

Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL

Nicolas Marques Xavier Dias Laport

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO
DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA
POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO
PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA

Orientador: Jorge Nemésio Sousa

Coorientador: João Gabriel Ferreira dos Santos Raiol

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

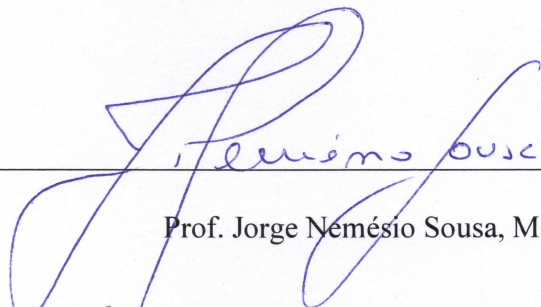
JANEIRO 2020

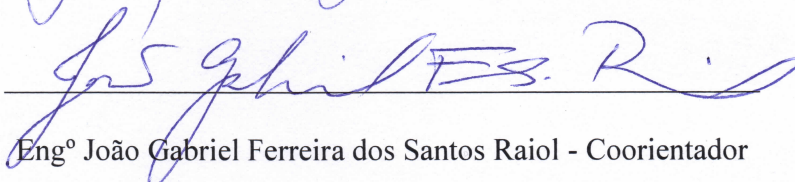
DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL


Nicolas Marques Xavier Dias Laport

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Examinado por:


Prof. Jorge Nemésio Sousa, MSc.- Orientador


Engº João Gabriel Ferreira dos Santos Raiol - Coorientador


Prof. Sergio Sami Hazan - Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JANEIRO 2020

Laport, Nicolas Marques Xavier Dias.

Dimensionamento de Malha de Aterramento de Subestação Industrial/ Nicolas Marques Xavier Dias
Laport - Rio de Janeiro: UFRJ/DEE, 2020.

XV, 82 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge Nemésio Sousa

Trabalho de Conclusão de Curso – UFRJ/DEE - 2019.

Referências Bibliográficas: p. 66-67.

1. Malha de aterramento 2. Dimensionamento 3. Subestação industrial.

I. Nemésio Sousa, Jorge II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, DEE - Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

Agradecimentos

Agradeço em especial a meus pais Marilda e Dalmir, por todo carinho, todos os ensinamentos e todo apoio que me ofereceram ao longo dos anos. Pois eles foram os maiores exemplos em minha vida de determinação e perseverança, fazendo que a cada dia eu me tornasse uma pessoa melhor.

Agradeço meus irmãos Lucas e Vinicus, pela amizade e companheirismo, pois sem vocês a minha vida teria sido vazia e monótona.

Agradeço aos meus amigos que acompanharam durante essa jornada ao longo dos anos, pois sem a amizade, carinho e companheirismo de todos a trajetória seria mais longa e penosa.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Jorge Nemésio Sousa, pois sua total dedicação, disponibilidade, conselhos e preocupação foram essenciais para chegar onde eu cheguei e alcançar meus objetivos.

Agradeço também ao meu coorientador João Gabriel Ferreira dos Santos Raiol, por sua amizade, carinho, determinação e pelos mais diversos conselhos acadêmicos e profissionais.

Estendo meu agradecimento ao Prof. Sérgio Sami Hazan, pelo apoio e comentários que foram indispensáveis para a boa conclusão desse trabalho.

Agradeço ao engenheiro André Luiz Vitorino Almeida, por sua determinação em ensinar, sua disponibilidade para aconselhar e sua fundamental contribuição para a realização deste trabalho, sem a qual não seria possível.

Agradeço à CAPES por ter me proporcionado um ano de intercâmbio na *Suffolk University* através do programa Ciência sem Fronteiras, onde fui capaz de conhecer diversas culturas e pessoas que contribuíram significativamente para o meu engandecimento pessoal, acadêmico e profissional.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheira Eletricista.

DIMENSIONAMENTO DE MALHA DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÃO INDUSTRIAL

Nicolas Marques Xavier Dias Laport

Janeiro/2020

Orientador: Jorge Nemésio Sousa

Coorientador: João Gabriel Ferreira dos Santos Raiol

Curso: Engenharia Elétrica

Ao longo dos anos, tem se observado um crescente interesse por parte de profissionais e pesquisadores no que concerne ao Aterramento Elétrico. Tal interesse se deve ao fato de ter ocorrido inúmeros eventos em que, por conta de um aterramento elétrico dimensionado incorretamente, ocorreram perdas econômicas, tais como perda temporária de uma planta e/ou perda de equipamentos elétricos, e perdas de vidas humanas, seja pelo contato acidental de partes energizadas ou pela simples diferença de potencial entre seus pés.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar e explicar todo e qualquer conceito que seja pertinente para o total entendimento ao se tratar do dimensionamento de uma malha de aterramento para subestações de forma segura e eficaz, levando-se em consideração as normas vigentes, a exploração da análise do dimensionamento de um caso prático para uma dada Indústria Petroquímica e o confronto de resultados obtidos através das equações contidas nas bibliografias aqui presentes.

Palavras-chave: Aterramento Elétrico, Malha de Aterramento, Dimensionamento de uma Malha, Aterramento para Subestações.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

DESIGNING OF A GROUNDING MESH FOR AN INDUSTRIAL SUBSTATION

Nicolas Marques Xavier Dias Laport

Janeiro/2020

Advisor: Jorge Nemésio Sousa

Co-Advisor: João Gabriel Ferreira dos Santos Raiol

Course: Electrical Engineering

Over the years, there has been a growing interest from professionals and researchers regarding electrical grounding. Such interest is due to the fact that have been numerous events in which, due to an improperly grounding, economic losses have occurred, such as temporary loss of a plant and/or loss of electrical equipment, and loss of human life, either by accidental contact of live parts or by potential difference between the feet.

This paper aims to present and explain all the concepts that are relevant to the full understanding when it comes to the designing of a grounding mesh for substations safely and effectively, taking into account the current standards, the analysis of a case of study for a given Petrochemical Industry and the comparison of the results obtained through the equations contained in the bibliographies.

Keywords: Electrical Grounding, Grounding Mesh, Designing of a Mesh, Substation Grounding.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	APRESENTAÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
1.3	IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO.....	2
1.4	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	3
1.5	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	3
1.6	METODOLOGIA DA PESQUISA DO TCC	4
1.6.1	Classificação da Pesquisa.....	4
1.6.2	Classificação deste Projeto.....	6
2	REFERENCIAL TEÓRICO	7
2.1	FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DO SOLO	7
2.1.1	Influência da Estratificação do Solo	7
2.1.2	Influência da Umidade	9
2.1.3	Influência da Temperatura.....	9
2.1.4	Influência da Concentração de Sais.....	10
2.1.5	Influência da Compacidade	11
2.2	RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO	11
2.2.1	Medição da Resistividade Elétrica do Solo pelo Método de Wenner	11
2.2.2	Método Simplificado para Estratificação do Solo em Duas Camadas	14
2.2.3	Cálculo da Resistividade Elétrica Aparente do Solo	15
2.3	ESTABELECIMENTO DE UMA GEOMETRIA BÁSICA DE MALHA ...	17
2.3.1	Cálculo Preliminar da Resistência de Aterramento.....	17
2.4	DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA DE ATERRAMENTO.....	18
2.4.1	Dimensionamento Mecânico.....	18

2.4.2	Dimensionamento Térmico.....	19
2.5	CÁLCULO DAS TENSÕES PERMISSÍVEIS.....	23
2.5.1	Efeito da Corrente Elétrica no Corpo Humano.....	23
2.5.2	Corrente de Choque de Longa Duração (I_{chld}).....	28
2.5.3	Corrente de Choque de Curta Duração (I_{chcd}).....	28
2.5.4	Tensão de Passo	29
2.5.5	Tensão de Toque	32
2.6	CÁLCULO SIMPLIFICADO DE POTENCIAIS NO SOLO	33
2.6.1	Equação Simplificada para Tensão de Toque.....	33
2.6.2	Equação Simplificada para Tensão de Passo.....	36
2.7	CÁLCULO DA CORRENTE QUE ESCOA PARA A MALHA DE ATERRAMENTO.....	37
2.7.1	Corrente de Malha Simétrica Eficaz	37
2.7.2	Corrente de Malha de Longa Duração	38
2.7.3	Fator de Decremento	38
2.7.4	Fator de Projeção.....	39
2.7.5	Corrente de Malha	39
2.8	REFINAMENTO E CUIDADOS AO SE DIMENSIONAR A MALHA DE ATERRAMENTO.....	40
2.8.1	Tratamento Químico do Solo.....	42
3	ESTUDO DE CASO	45
3.1	PREMISSAS ADOTADAS PARA O DIMENSIONAMENTO DA MALHA	45
3.2	CORRENTE DE MALHA	47
3.3	RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO.....	47
3.4	CÁLCULO PRELIMINAR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	48
3.5	DIMENSIONAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DOS CONDUTORES HORIZONTAIS	48

3.6	CORRENTES DE CHOQUE DE LONGA E DE CURTA DURAÇÃO ADMISSÍVEIS.....	49
3.7	TENSÕES DE PASSO E TOQUE ADMISSÍVEIS	49
3.8	DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO.....	50
3.8.1	Primeiro <i>Design</i>	51
3.8.2	Segundo <i>Design</i>	55
3.8.3	Terceiro <i>Design</i>	59
4	CONCLUSÃO.....	64
4.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	66

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Solo estratificado.	8
Figura 2.2 - Comportamento da corrente de falta para um solo estratificado em duas camadas.	8
Figura 2.3 - Método de Wenner utilizando terrômetro de 4 eletrodos.	12
Figura 2.4 - Croquis para medição da resistividade elétrica do solo.	13
Figura 2.5 - Curva resistividade (ρ) x espaçamentos entre eletrodos (a).	15
Figura 2.6 - Resistividade aparente para o solo estratificado em duas camadas.	16
Figura 2.7 - Grampo terra duplo com parafuso em U em liga de cobre tipo conexão aparafusada ou por pressão.	20
Figura 2.8 - Conector cabo a cabo em liga de cobre tipo conexão solda exotérmica.	21
Figura 2.9 - Molde utilizado para realizar a conexão por solda exotérmica.	21
Figura 2.10 - Conector cunha em liga de cobre tipo conexão a compressão.	21
Figura 2.11 - Alicates hidráulico utilizado para a conexão de conectores do tipo a compressão.	22
Figura 2.12 - Efeito da corrente alternada elétrica no corpo humano para frequências entre 15 e 100 Hz levando-se em consideração a duração do choque elétrico.	26
Figura 2.13 - Eletrocardiograma e pressão arterial de um indivíduo antes e depois de sofrer um choque elétrico.	27
Figura 2.14 - Defeito elétrico com religamento automático.	29
Figura 2.15 - Circuito equivalente correspondente aos parâmetros envolvidos na tensão de passo.	29
Figura 2.16: Determinação gráfica do fator de redução C	31
Figura 2.17 - Circuito equivalente correspondente aos parâmetros envolvidos na tensão de toque.	32
Figura 2.18 - Instalação típica de produtos químicos para tratamento do solo.	44
Figura 3.1 - <i>Layout</i> da subestação.	45
Figura 3.2 - Eixos utilizados para plotar os gráficos das tensões de toque e passo.	51
Figura 3.3 – Primeiro <i>design</i> da malha de aterramento.	51
Figura 3.4 - Distribuição do potencial de toque ao longo da malha para o primeiro <i>design</i>	53
Figura 3.5 - Distribuição do potencial de passo ao longo da malha para o primeiro <i>design</i>	54

Figura 3.6 -Distribuição do gradiente de tensão da superfície do solo para o primeiro <i>design</i>	54
Figura 3.7 – Segundo <i>design</i> da malha de aterramento.....	55
Comparativamente, o <i>software</i> nos fornece o gradiente de tensão ao longo da malha de aterramento. A tensão de toque ao longo da malha para o segundo <i>design</i> pode ser vista na Figura 3.9, onde pode-se observar que houve uma melhora significativa em relação ao <i>design</i> anterior - Figura 3.8, visto que as curvas estão mais próximas do limite de segurança.	56
Figura 3.9 - Distribuição do potencial de toque ao longo da malha para o segundo <i>design</i>	57
Figura 3.10 -Distribuição do potencial de passo ao longo da malha para o segundo <i>design</i>	58
Figura 3.11 - Distribuição do gradiente de tensão da superfície do solo para o segundo <i>design</i>	59
Figura 3.12 – Terceiro <i>design</i> da malha de aterramento.	60
Figura 3.13 - Distribuição do potencial de toque ao longo da malha para o terceiro <i>design</i>	61
Figura 3.14 - Distribuição do potencial de passo ao longo da malha para o terceiro <i>design</i>	62
Figura 3.15 - Distribuição do gradiente de tensão da superfície do solo para o terceiro <i>design</i>	63

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Efeito da umidade na resistividade de um solo arenoso.....	9
Tabela 2.2 - Efeito da temperatura na resistividade do solo.....	10
Tabela 2.3 - Efeito da concentração de sal adicionado na resistividade do solo.....	11
Tabela 2.4 - Número mínimo de linhas para medir a resistividade elétrica do solo.	13
Tabela 2.5 - Valores dos parâmetros para os mais diversos tipos de condutores.....	19
Tabela 2.6 - Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura.....	20
Tabela 2.7 - Valores típicos de K_f para o cobre.....	22
Tabela 2.8 - Efeitos da corrente no corpo humano.....	25
Tabela 2.9 - Efeitos da corrente alternada no corpo humano para frequências entre 15 e 100 Hz.	26
Tabela 2.10 - Estimativa da resistividade do material de revestimento (ρ_s).....	30
Tabela 2.11 - Valores típicos para o fator de decaimento D_f	39
Tabela 3.1 - Variáveis utilizadas para o dimensionamento da malha de aterramento....	46
Tabela 3.2 – Valores obtidos para o primeiro <i>design</i>	55
Tabela 3.3 – Valores obtidos para o segundo <i>design</i>	59
Tabela 3.4 – Valores obtidos para o terceiro <i>design</i>	63

Termos e Definições

Aqui neste estudo aplicam-se os termos e definições estabelecidos na ABNT NBR 5456 [1] e ABNT NBR 5460 [2].

- **Aterramento:** ligação intencional de parte eletricamente condutiva à terra através de um condutor elétrico.
- **Circuito Terra:** circuito elétrico formado pelos componentes responsáveis pelo escoamento da corrente de falta para o solo.
- **Condutor de Aterramento:** condutor ou elemento metálico que faz uma ligação elétrica entre uma parte de uma instalação que deve ser aterrada e o eletrodo de aterramento.
- **Corrente de Falta:** corrente que flui de um condutor para outro e/ou para a terra.
- **Corrente de Malha de Longa Duração (I_{mid}):** corrente que percorre a malha de aterramento por um tempo superior a 3 s.
- **Corrente de Malha:** parcela da corrente de falta dissipada pela malha de aterramento para o solo.
- **Eletrodo de Aterramento:** elemento ou conjunto de elementos do sistema de aterramento que garante o contato elétrico com o solo e dispersa a corrente de defeito, de retorno ou de descarga atmosférica.
- **Eletrodo Natural de Aterramento:** elemento condutor ligado diretamente à terra, cuja finalidade original não é de aterramento.
- **Falta Elétrica:** contato ou arco acidental entre partes sob potenciais diferentes e/ou de uma ou mais dessas partes para o ‘terra’, em um equipamento ou sistema elétrico energizado.
- **Haste de Aterramento:** eletrodo de aterramento constituído por uma haste rígida cravada no solo.
- **Malha de Aterramento:** conjunto de condutores nus interligados e enterrados no solo.
- **Potenciais Perigosos:** potenciais que podem provocar danos quando aplicados ao elemento tomado como referência.
- **Potencial Transferido:** valor do potencial transferido para um ponto remoto de um dado sistema de aterramento.

- Resistência de Aterramento de um Eletrodo: relação da tensão medida entre o eletrodo e o ‘terra’ remoto e a corrente injetada no eletrodo.
- Resistividade Aparente do Solo para um Dado Espaçamento: valor da resistividade resultante da avaliação das condições locais e do tratamento estatístico dos resultados de diversas medições de resistividade do solo para aquele espaçamento, efetuadas numa determinada área ou local, e que possa ser considerado como representativo das características elétricas do solo.
- Resistividade Aparente do Solo: resistividade vista por um sistema de aterramento qualquer, em um solo com característica de resistividade homogênea ou estratificado em camadas, cujo valor é utilizado para o cálculo da resistência de aterramento desse sistema.
- Resistividade Elétrica do Solo: resistência entre faces opostas do volume de solo, consistindo em um cubo homogêneo e isotrópico, cuja aresta mede uma unidade de comprimento.
- Sistema Aterrado: sistema ou parte de um sistema elétrico cujo neutro é permanentemente ligado à terra.
- Sistema de Aterramento: conjunto de todos os eletrodos e condutores de aterramento, interligados ou não, assim como partes metálicas que atuam direta ou indiretamente com a função de aterramento.
- Sistema Diretamente Aterrado: sistema aterrado sem interposição intencional de uma impedância.
- Subestação: parte de um sistema de potência, concentrada em um dado local, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo as obras civis e estruturas de montagem, podendo incluir também transformadores, equipamentos conversores e/ou outros equipamentos.
- Tensão de Passo: diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1 m.
- Tensão de Toque: diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionalmente em 1 m.
- Tensão Máxima do Sistema de Aterramento: tensão máxima que um sistema de aterramento pode atingir relativamente ao ‘terra’ de referência, quando houver

ocorrência de injeção de corrente de falta, de retorno ou de descarga atmosférica para o solo.

- Terra de Referência: região do solo suficientemente afastada da zona de influência de um eletrodo ou sistema de aterramento, tal que a diferença de potencial entre dois quaisquer de seus pontos, devido à corrente que circula pelo eletrodo para o ‘terra’, seja desprezível.
- Terra: massa condutora de terra; sistema de aterramento ao qual são ligadas as partes metálicas do equipamento ou da instalação que, normalmente, não fica sob tensão.

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

Com o passar dos anos, nota-se claramente que a segurança humana e patrimonial tem ganhado espaço nas discussões acadêmicas e entre a diretoria das empresas. Um grande motivo para tal é que toda perda de vida humana e material acarretam em dispendiosos valores monetários em processos e paradas de plantas que poderiam ter sido evitados caso medidas cabíveis de segurança fossem tomadas como forma de evitar tais situações. Tal importância pode ser vista com o advento da Norma Reguladora 10 [3], que foi elaborada pelo antigo Ministério do Trabalho e Emprego e tem como objetivo estabelecer os requisitos mínimos de segurança, de forma a garantir a segurança de trabalhadores que atuam em instalações e serviço que envolvam energia elétrica e a norma IEC 60479-1 [4], que foi elaborada com o intuito de expor os efeitos da corrente elétrica e seu comportamento em seres humanos e animais, analisando os limites de magnitude e duração que um ser vivo é capaz de aguentar para que não seja levado a óbito e/ou sofra sequelas duradouras.

O aterramento elétrico de um dado Sistema de Potência é de fundamental importância para que se possa operar com qualidade, sem interrupções e que se possa garantir os níveis de segurança para pessoas e equipamentos. A NBR 15751 [5], nos fornece os requisitos mínimos para o dimensionamento da malha de aterramento de subestações, acima de 1 kV, quando sujeitas a solicitações de frequências industriais (50-60 Hz) e estabelece também os limites de segurança para pessoas e equipamentos dentro e fora da subestação.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste projeto de fim de curso é dissertar sobre o dimensionamento de uma malha de aterramento elétrica de uma subestação, visando retratar os diversos meios em que uma malha de aterramento pode estar inserida, a caracterização e modelagem do solo da região em que a subestação se encontra, as diferentes formas e técnicas de se calcular a resistência e resistividade do solo, os tipos de materiais (hastes, condutores de cobre nu, solda exotérmica etc.) utilizados na configuração de uma malha de aterramento, os diversos tratamentos possíveis utilizados para que se possa alterar as propriedades

químicas do solo, uma breve explanação sobre o comportamento do corpo humano quando o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, a importância de levar em consideração a corrosão dos condutores metálicos constituintes da malha de aterramento e a adequação da malha para que ela atenda aos limites de tensão estabelecidos por norma para toque e passo.

Também é escopo deste projeto, a comparação dos parâmetros encontrados (tensão de toque e tensão de passo) através de modelagens matemáticas utilizando às normas vigentes com os valores retornados pelo *software* TecAt Plus 6.3 ao se configurar a malha.

Este *software*, que foi utilizado pelo seu custo-benefício e pela sua disponibilidade, realiza cálculos numéricos completos em solos de até 4 camadas de resistividade, resistência da malha e potenciais de toque e passo decorrentes de curtos-circuitos, além de exceder todas as normas práticas em uso nacionais e internacionais. Entretanto, o TecAt Plus 6.3 não é citado na norma IEEE-80 [25] como referência de comparação entre os resultados obtidos através da norma. Os *softwares* citados, a título de comparação são: *CDEGS - Safe Engineering Services (SES)*; *ETAP da Operations Technology, Inc. (OTI)*; *SGW da Electric Power Research Institute (EPRI)*; *SDWorkstation da Electric Power Research Institute (EPRI)* e *WinIGS da Advanced Grounding Concepts (AGC)*. Todos estes fazem a análise do solo, porém, o *CDEGS* só consegue fazer a análise para solos até duas camadas; o *CDEGS*, o *ETAP* e o *WinIGS* conseguem analisar a resistência de aterramento e os potenciais perigosos; e o *CDEGS* e *WinIGS* são os únicos que são capazes de calcular a corrente efetiva que escoará pela malha de aterramento.

1.3 IMPORTÂNCIA E RELEVÂNCIA DO ESTUDO

Este estudo se mostra de extrema importância devido ao fato de o dimensionamento do aterramento elétrico de uma subestação ser fundamental para que um sistema elétrico funcione corretamente. A negligência quanto ao aterramento pode trazer consequências gravíssimas no que concerne à perda de vidas humanas e perdas econômicas. O dimensionamento e a instalação correta de uma malha de aterramento garantem que as correntes de falta possam ser escoadas para o solo de maneira que elas não prejudiquem os equipamentos elétricos e mecânicos que se encontram instalados na planta e não possam vir a causar nenhuma lesão e/ou fatalidade às pessoas que se encontram dentro e no entorno da subestação.

1.4 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Uma importante limitação deste trabalho, que altera de maneira significativa os resultados aqui expostos, é a falta do estudo de estratificação do solo da área em que a subestação foi construída.

O estudo de estratificação do solo é essencial para saber a sua formação geológica, dividindo o solo em camadas estratificadas, cada uma possuindo uma resistividade elétrica associada. Com isso, o estudo deseja modelar o solo com base nas técnicas que serão expostas no Capítulo 2. Todavia, esta limitação pode ser contornada se utilizarmos o mapa pedológico¹ da área estudada, que pode nos fornecer as características do solo encontrado na região fazendo com que, desta maneira, possamos estimar, de modo bem preciso, a resistividade do solo.

1.5 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi estruturado de forma a expor, de maneira clara e concisa, conceitos/definições e metodologias fundamentais para que seja possível assimilar os resultados aqui contidos.

Sendo assim, o Capítulo 2 apresenta o conteúdo teórico exposto em livros, artigos e normas que serão importantes para a compreensão dos assuntos tratados neste trabalho. Também são introduzidas formulações matemáticas que permitem o entendimento e análise do dimensionamento de uma malha de aterramento elétrico de uma subestação, assim como são apresentadas possíveis medidas que podem ser tomadas de forma a melhorar determinadas características de um sistema de aterramento.

O Capítulo 3 analisa um estudo de caso sobre o dimensionamento de uma malha de aterramento de uma subestação para uma indústria petroquímica. São alinhadas as premissas adotadas para realizar o dimensionamento, juntamente com os resultados obtidos através da implementação das formulações matemáticas expostas no Capítulo 2. Também no Capítulo 3 são feitas comparações entre os resultados obtidos através das formulações matemáticas com os resultados gerados pelo *software* TecAt Plus 6.3.

¹ Mapas pedológicos são mapas que apresentam a distribuição espacial dos solos, tendo informações qualitativas e quantitativas desse recurso natural.

Ao final, o Capítulo 4 apresenta a conclusão dos estudos abordados nesse TCC juntamente com propostas para trabalhos futuros, seguido pelas referências bibliográficas utilizadas para elaborar o presente trabalho.

1.6 METODOLOGIA DA PESQUISA DO TCC

Aqui será apresentada a metodologia escolhida e definida pelo autor para abordar o tema exposto no presente trabalho e os métodos de pesquisas empregados. De forma a esclarecer o tipo de metodologia empregada no estudo, serão apresentados de forma clara e objetiva os aspectos metodológicos e a definição de pesquisa, levando em consideração os propósitos estabelecidos anteriormente e os meios de investigação utilizados.

1.6.1 Classificação da Pesquisa

Pode-se classificar uma pesquisa quanto à sua natureza, aos seus objetivos e aos procedimentos técnicos.

Segundo Moresi [6], podemos classificar uma pesquisa quanto à sua natureza de duas formas: pesquisa básica e pesquisa aplicada.

A **pesquisa básica** tem como seu objetivo fundamental a geração de um conhecimento novo, sem que necessariamente sirva para um propósito e/ou tenha aplicação no cotidiano das pessoas.

A **pesquisa aplicada** tem como seu principal objetivo gerar qualquer tipo de conhecimento em que se possa de alguma forma aplicá-lo na prática de forma a solucionar problemas particulares.

Segundo Gil [7], é comum classificar uma pesquisa com base nos seus objetivos gerais como forma de estabelecer o seu marco teórico, sendo dividido em três grandes grupos: exploratórias, descritivas e explicativas.

A **pesquisa exploratória**, tem como principal objetivo proporcionar visão geral, do tipo aproximativa, sobre determinado fato e com isso busca desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores [8]. Estão atreladas ao levantamento bibliográfico e documental, entrevistas e estudos de caso.

A **pesquisa descritiva**, tem como seu principal objetivo a descrição de características de determinado grupo ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis, tudo isso através da utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados [7].

A **pesquisa explicativa**, tem como foco principal tornar um conhecimento complexo em algo entendível, visando esclarecer, de forma clara, quais fatores contribuem, de alguma forma, para a ocorrência de determinado fenômeno [6].

Ainda segundo Gil [7], é necessária uma análise dos pontos de vista empírico, de forma que seja possível traçar um modelo conceitual e operativo de pesquisa. Este modelo é conhecido comumente como delineamento, podendo ser subdividido em: pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, pesquisa *ex-post facto*, o levantamento, o estudo de caso, a pesquisa-ação e a pesquisa participante.

A **pesquisa bibliográfica** é elaborada através de materiais existentes, formada principalmente de livros e artigos científicos que concernem ao assunto abordado.

A **pesquisa documental** assemelha-se à **pesquisa bibliográfica**, sua principal diferença é que enquanto essa se vale de livros e artigos científicos que passaram por bancas de revisões, aquela utiliza-se de materiais que ainda não receberam um tratamento analítico.

A **pesquisa experimental**, em sua essência, consiste em selecionar um objeto específico de estudo e então seleciona-se as variáveis que poderiam influenciá-lo para depois definir as possíveis formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

A **pesquisa *ex-post facto*** possui o mesmo propósito básico que a **pesquisa experimental**, que consiste em constatar a existência de relações entre determinadas variáveis. Uma singularidade que pertence a **pesquisa *ex-post facto*** é que o pesquisador não dispõe de controle sobre a variável independente, que constitui o fator presumível do fenômeno, pois ele já ocorrera no passado.

O **levantamento** tem como principal foco a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer, ou seja, colhe-se uma gama de informação significativa de um dado grupo escolhido acerca do problema estudado, para, em seguida, mediante análise quantitativa, obterem-se as conclusões cabíveis levando em consideração os dados coletados.

O **estudo de caso** tem como finalidade o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de forma que permita o conhecimento profundo acerca do objeto em estudo.

1.6.2 Classificação deste Projeto

O presente trabalho tem como objetivo aplicar os conhecimentos difundidos em livros, artigos e normas no que concerne ao ‘aterramento elétrico de subestações’ como forma de determinar uma geometria de malha de aterramento capaz de atender os requisitos mínimos de segurança estabelecidos em norma.

Com base nas classificações expostas anteriormente, pode-se classificar este projeto como sendo uma pesquisa de natureza **aplicada**, pois ele tem como objetivo gerar um conhecimento de forma a aplicá-lo em um problema prático; uma pesquisa **explicativa**, tendo em vista que o escopo inicial é esmiuçar um tema complexo e através disto, torná-lo inteligível. Quanto aos procedimentos técnicos de aquisição de dados, pode-se classificar esta pesquisa como **bibliográfica**, visto que é essencial a utilização de bibliografias como base para o desenvolvimento do trabalho. Também, pode-se definir o projeto como um **estudo de caso**, pois ele tenta conhecer os principais elementos envolvidos no que diz respeito ao dimensionamento de uma malha de aterramento elétrico de uma subestação, juntamente com os fatores que podem influenciar suas características e seu comportamento.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A RESISTIVIDADE DO SOLO

O entendimento do solo e sua composição onde a malha de aterramento será inserida são de fundamental importância, pois são inúmeros fatores que podem alterar a sua resistividade, dentre eles, podemos considerar: o tipo de solo, podendo ser composto por diversas camadas de solo estratificadas ou não, umidade, temperatura, concentração de sais e compactação².

2.1.1 Influência da Estratificação do Solo

Os solos, em sua maioria, são heterogêneos, ou seja, são formados por mais de uma camada de solo e cada camada possui suas características próprias, como umidade, compactação, concentração de sais etc. E essas características fazem com que cada camada tenha uma resistividade elétrica própria. Na Figura 2.1, podem ser observadas as diversas camadas estratificadas associadas a um mesmo local. Pode-se notar que as camadas estratificadas se encontram horizontais e paralelas à superfície. Esta é a configuração em grande parte do território nacional brasileiro. Em alguns casos, devido a ocorrência de uma determinada falha geológica e/ou agente ambiental no local, as camadas podem apresentar acentuada inclinação. Por essas razões, o estudo de estratificação do solo é extremamente necessário para o entendimento do terreno em que se irá inserir a malha de aterramento.

² Compactação é a qualidade ou estado daquilo que é compacto.



Figura 2.1 - Solo estratificado.

Fonte: Marangon [9].

De acordo com Kindermann e Campagnolo [10], a variação da resistividade das camadas do solo influencia na dispersão da corrente de falta. A Figura 2.2 ilustra o comportamento dos fluxos de dispersão das correntes elétricas em um solo heterogêneo³ de camada dupla.

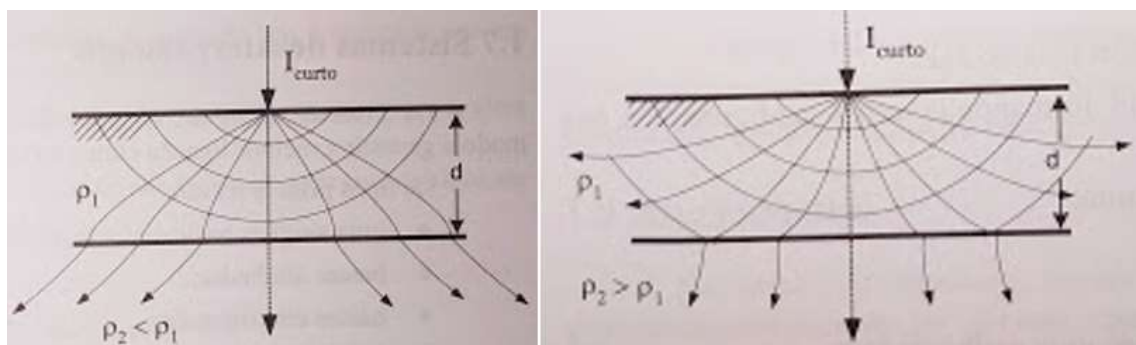


Figura 2.2 - Comportamento da corrente de falta para um solo estratificado em duas camadas.

Fonte: Kindermann e Campagnolo [10].

³ Solo heterogêneo é todo solo que não apresenta uma mistura uniforme na sua composição, onde a proporção dos componentes inerentes varia ao longo da amostra.

2.1.2 Influência da Umidade

A variação na umidade relativa do solo⁴ faz com que a resistividade do mesmo se altere. Segundo Kižlo e Kanbergs [11], essa variação ocorre devido ao fato da condução de cargas elétricas no solo ser predominante iônica e um aumento na umidade faz com que os sais no solo se dissolvam, formando um meio eletrolítico favorável à passagem de corrente. A Tabela 2.1 deixa clara a relação entre umidade e resistividade elétrica, onde o aumento de umidade faz com que o solo se torne um meio físico mais condutor.

Tabela 2.1 - Efeito da umidade na resistividade de um solo arenoso.

Umidade por peso (%)	Resistividade ($\Omega.m$)
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5	430
10	185
15	105
20	63
30	43

Fonte: Kižlo e Kanbergs [11].

Por esse motivo, a NBR 15751 [5] recomenda que a análise do solo seja feita em um período seco, levando em consideração o pior cenário para o escoamento das correntes de falta.

2.1.3 Influência da Temperatura

Segundo Visacro [12], os efeitos da temperatura que influenciam a resistividade do solo devem ser abordados de duas maneiras distintas.

- Uma temperatura elevada no local de instalação da malha de aterramento leva a um aumento na evaporação da água, diminuindo a umidade do solo, fazendo com que a resistividade aumente.
- A resistividade do solo é diretamente proporcional a quantidade de água que nele está contida. Sabe-se que a água possui coeficiente negativo de temperatura,

⁴ Umidade relativa do solo é a relação existente entre a quantidade de água presente no solo em um dado instante, e a quantidade total do solo.

ocasionando no aumento da resistividade do solo quando ocorre um resfriamento do solo.

A Tabela 2.2 nos mostra, para dados colhidos experimentalmente onde a umidade é mantida constante, a influência da temperatura na resistividade do solo. Pode-se observar que a resistividade quase dobra ao se resfriar o solo de 20 °C para 0 °C no estado líquido.

Tabela 2.2 - Efeito da temperatura na resistividade do solo.

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω.m)
20	7,2
10	9,9
0 (água)	13,8
0 (gelo)	30
- 5	79
- 15	330

Fonte: Samadinasab *et al.* [13].

Portanto, é de grande importância analisar a variação da temperatura anual do local onde a malha de aterramento será instalada e levar em consideração para o dimensionamento da mesma, tendo em vista que um simples aumento ou diminuição da temperatura pode alterar significativamente a resistividade do solo.

2.1.4 Influência da Concentração de Sais

A resistividade do solo depende diretamente da quantidade de água nele retida. Sabe-se que a condução elétrica no solo é possível tendo em vista que existem sais dissolvidos no meio, condução eletrolítica. Pode-se afirmar que a resistividade também dependerá do tipo e quantidade de sais dissolvidos na água retida no solo.

Segundo Wenner [14], os sais dissolvidos no solo com a prevalência de componentes como cloreto de sódio, sulfato de cobre e carbonato de sódio, conseguem providenciar para que seja possível a condução da corrente elétrica de falta. Na Tabela 2.3 pode-se observar a relação entre a concentração de sal e a resistividade para um solo predominantemente arenoso com 15% (em peso) de umidade e com a temperatura mantida constante.

Tabela 2.3 - Efeito da concentração de sal adicionado na resistividade do solo.

Concentração de sais (%)	Resistividade ($\Omega.m$)
0	107
1	4,6
20	1

Fonte: Kižlo e Kanbergs [11].

2.1.5 Influência da Compacidade

Após um solo ser compactado, pode-se dizer que ele apresentará uma maior continuidade física, proporcionando assim uma melhora na sua condutividade elétrica. Um aumento da pressão sobre um solo ocasiona uma maior compacidade, fazendo assim, que sua resistividade se reduza [12].

2.2 RESISTIVIDADE APARENTE DO SOLO

Para que se possa dar início ao projeto de dimensionamento da malha de aterramento, primeiramente deve-se conhecer a resistividade aparente do solo.

A resistividade do solo é obtida através de medidas realizadas em campo. Para tal, podem-se usar diversos métodos e técnicas com o propósito de auferir tal fator. Porém, neste trabalho será utilizado o **Método de Wenner** para medir a resistividade do solo.

Após a obtenção da resistividade do solo através do Método de Wenner, deve-se utilizar algum recurso para estratificar o solo em duas camadas. Neste estudo será utilizado o **método simplificado para estratificação do solo de duas camadas** como forma de se obter a resistividade da primeira e segunda camadas do solo estratificado.

Obtida a resistividade da primeira e segunda camadas do solo estratificado, deve-se utilizar o Anexo A da NBR 15751 [5] para cálculo da resistividade aparente do solo.

2.2.1 Medição da Resistividade Elétrica do Solo pelo Método de Wenner

Um dos meios de realizar a medição da resistividade elétrica do solo é através de um terrômetro. Este instrumento é utilizado especialmente para fazer essa medição, possuindo quatro terminais: dois que injetam a corrente que circulará pelo solo; e dois que medem a diferença de potencial entre duas das hastes centrais.

A Figura 2.3 mostra um esquemático de como deve ser utilizado um terrômetro para a medição da resistividade. Essa medição é feita da seguinte forma: o aparelho possui uma fonte interna, que faz com que uma corrente I circule entre os terminais C_1 e C_2 , mensurando-a; simultaneamente, o instrumento registra a diferença de potencial entre as hastes que são conectadas nos terminais P_1 e P_2 . Com isso, o instrumento registra todos os dados e indica o valor da resistência elétrica (R) que é dada, segundo a NBR 7177 [15], pela Equação (1).

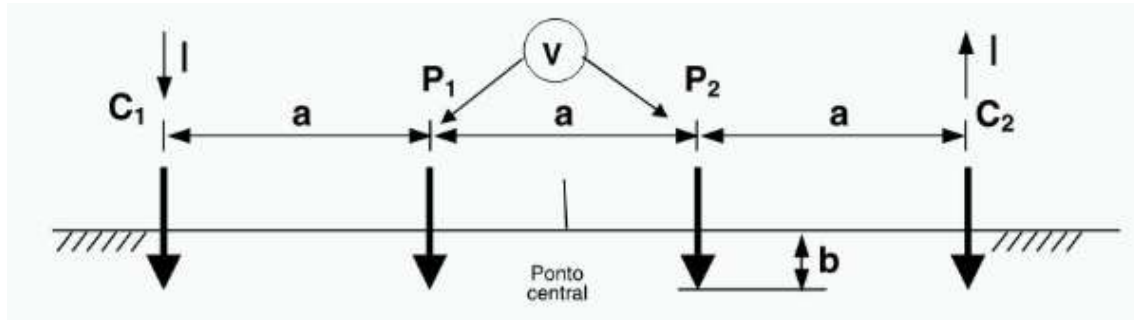


Figura 2.3 - Método de Wenner utilizando terrômetro de 4 eletrodos.

Fonte: NBR 7177 [15].

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

Onde: R = Resistência elétrica do solo medida pelo instrumento (Ω); ρ = Resistividade elétrica do solo ($\Omega \cdot m$); a = Espaçamento das hastes (m); b = Profundidade da haste cravada no solo (m).

Rearranjando a Equação (1), conseguimos obter a resistividade elétrica do solo observada pelo equipamento, que é dada por:

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

Que é conhecida como **Fórmula de Palmer**. Pode-se observar, para um afastamento relativamente grande entre as hastes, ou seja, $a > 10b$, que a Equação (2) ficará da seguinte forma:

$$\rho = 2\pi aR [\Omega \cdot m] \quad (3)$$

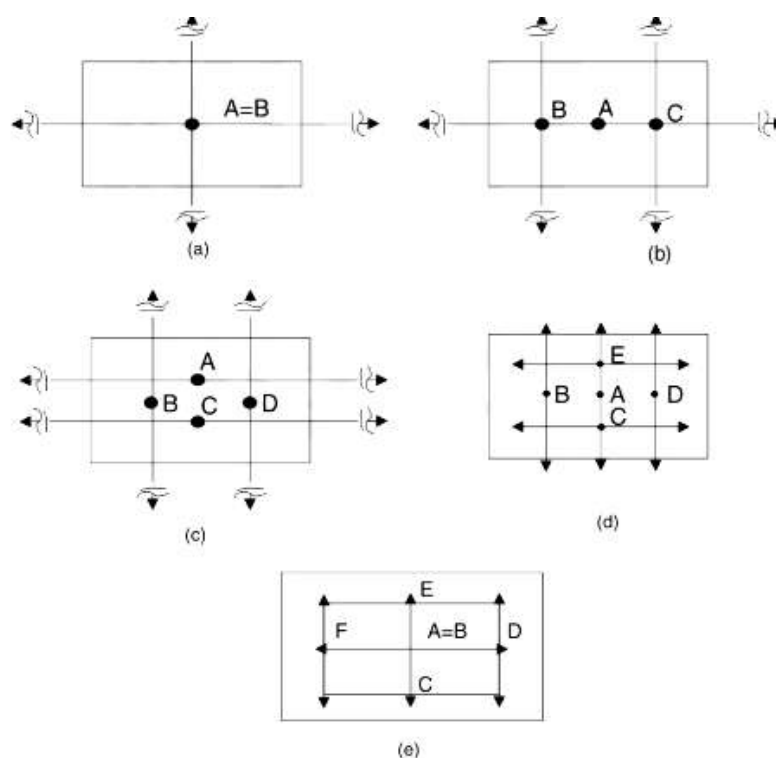
O Método de Wenner considera que praticamente 58% da distribuição de corrente que passa entre a primeira e a última haste utilizada para fazer a medição da resistividade do solo ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes [10].

A Tabela 2.4 [15] nos fornece o número mínimo de linhas de medições para mensurar a resistividade elétrica do solo e a Figura 2.4 seus respectivos croquis para terrenos de diversos tamanhos.

Tabela 2.4 - Número mínimo de linhas para medir a resistividade elétrica do solo.

Área do terreno (m ²)	Número mínimo de linhas de medição	Croquis para as linhas de medição
$S \leq 1.000$	2	Figura 2.4-a
$1.000 \leq S \leq 2.000$	3	Figura 2.4-b
$2.000 \leq S \leq 5.000$	4	Figura 2.4-c
$5.000 \leq S \leq 10.000$	5	Figura 2.4-d
$10.000 \leq S \leq 20.000$	6	Figura 2.4-e

Fonte: NBR 7177 [15].



Legenda

A, B, C, D, E, F Linhas de medição

Figura 2.4 - Croquis para medição da resistividade elétrica do solo.

Fonte: NBR 7177 [15].

Algumas recomendações e cuidados são levantados por Kindermann e Campagnolo [10], pela NBR 16254-1 [16], pela NBR 15751 [5] e pela NBR 7177 [15].

- A medida da resistividade do solo deve ser realizada no período mais crítico do ano, ou seja, o período do ano em que não se registrar a ocorrência de chuvas na região em que será realizado após o período de 7 dias.
- As hastes metálicas utilizadas para a realização do teste devem ser bons condutores elétricos, inertes às ações dos ácidos e sais, não deverão sofrer corrosão galvânica e possuir boa resistência mecânica.
- As condições em que o solo estudado se encontra devem ser guardadas e não se deve realizar medições sob condições atmosféricas adversas.
- Deve-se descontar a resistência dos cabos elétricos utilizados para realizar as medições quando o solo possuir baixa resistividade elétrica.
- Todo valor medido que possuir um desvio maior que 50% da média deve ser desconsiderado e caso ocorra para diversos valores, deve-se realizar novas medidas em direções e pontos diferentes.

2.2.2 Método Simplificado para Estratificação do Solo em Duas Camadas

Para se determinar as resistividades elétricas e profundidades da primeira e segunda camada do solo, deve ser seguida a seguinte rotina, conforme a Figura 2.5, que é explicitada na ABNT NBR 7177 [15].

- Prolongar a curva $\rho \times a$ até que a mesma intercepte o eixo das ordenadas. Com isso, é determinado o valor da resistividade da camada superior do solo (ρ_1).
- Traçar uma assíntota à curva $\rho \times a$ e deve-se prologar a mesma até o eixo das ordenadas. Com isso, obtêm-se o valor da resistividade da camada inferior do solo (ρ_2).
- Calcular a relação ρ_2 / ρ_1 . Com este valor, pode-se encontrar o valor de M_0 que pode ser encontrado na Tabela A.1 da ABNT NBR 7177 [15].
- Calcula-se então $\rho_m = M_0 \times \rho_1$.
- Na curva $\rho \times a$, deve-se localizar ρ_m para que, dessa forma, seja obtida a espessura da camada superior do solo (h).

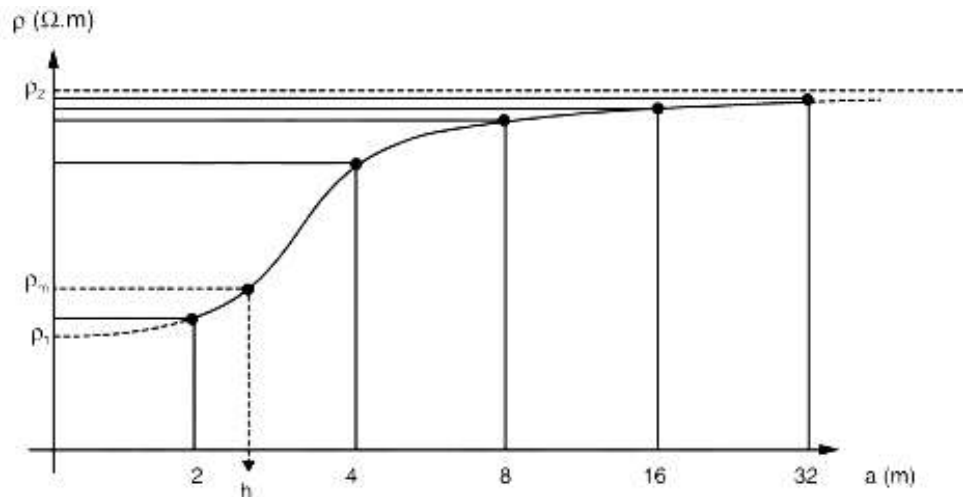


Figura 2.5 - Curva resistividade (ρ) x espaçamentos entre eletrodos (a).

Fonte: NBR 7177 [15].

2.2.3 Cálculo da Resistividade Elétrica Aparente do Solo

Após a resistividade do solo ter sido mensurada e sua estratificação realizada, procede-se com a determinação da resistividade aparente do solo ρ_a (em $\Omega.m$), que está associada ao solo em que a malha de aterramento será inserida. De acordo com a NBR 15751 [5], a resistividade aparente do solo pode ser determinada da seguinte forma.

- Primeiramente deve-se determinar o valor do raio r do círculo equivalente à área do sistema de aterramento, que é dado pela Equação (4).

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} [m] \quad (4)$$

Onde: r = Raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento (m); A = Área da malha de aterramento (m^2).

- Deve-se ter definida previamente a profundidade H (em m) em que a malha de aterramento será inserida no solo.
- Deve-se então determinar o fator α , que é dado pelas Equações (5) ou (6).
 - Se $\rho_2 / \rho_1 < 1$ e $H / h \geq 0,9$:

$$\alpha = \frac{r}{2 \times h \times H} \quad (5)$$

Onde: h = Espessura da primeira camada (m); α = Coeficiente de penetração que indica o grau de penetração das correntes escoadas pelo aterramento no solo equivalente [10]; H = profundidade em que a malha de aterramento será inserida no solo (m).

- Para as outras situações:

$$\alpha = \frac{r}{h} \quad (6)$$

- De posse de α e da relação ρ_2/ρ_1 (razão entre a resistividade da segunda e primeira camadas), pode-se determinar o valor de 'N' com o auxílio da Figura 2.6. O valor de ρ_a é então obtido pela Equação (7).

$$\rho_a = N \times \rho_1 \quad [\Omega \cdot m] \quad (7)$$

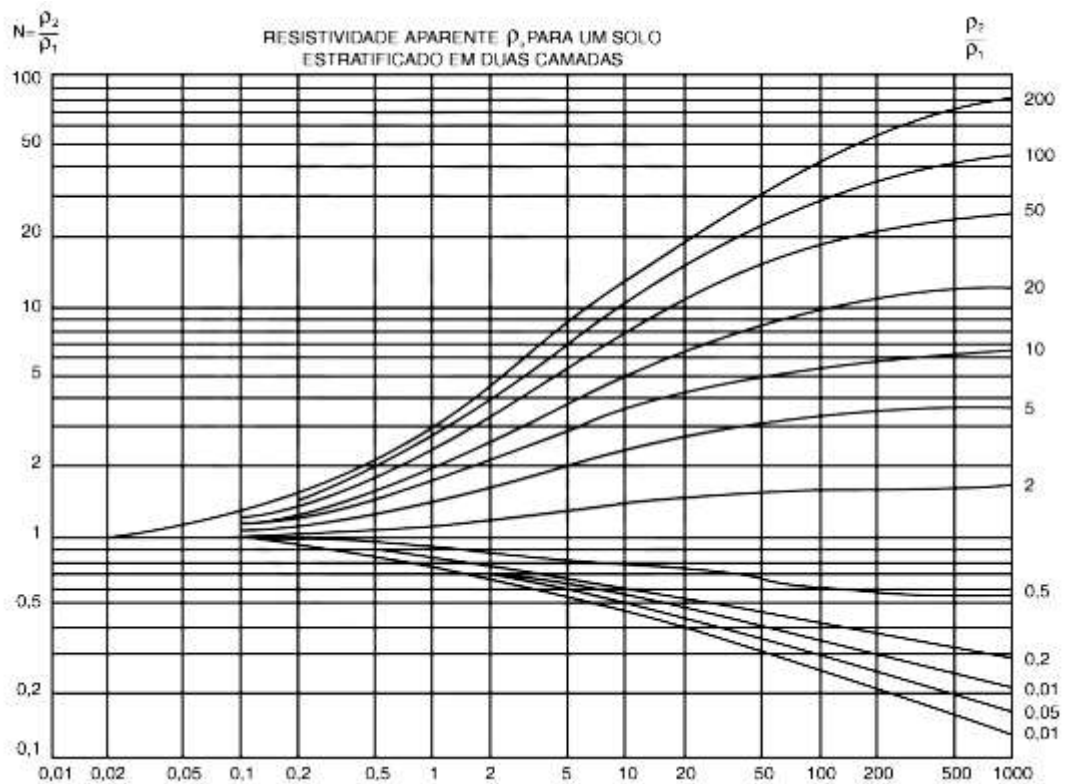


Figura 2.6 - Resistividade aparente para o solo estratificado em duas camadas.

Fonte: NBR 7177 [15].

2.3 ESTABELECIMENTO DE UMA GEOMETRIA BÁSICA DE MALHA

A definição de uma geometria básica consiste numa das primeiras etapas do dimensionamento de uma malha de aterramento. Ela deve incluir no mínimo todo o pátio da subestação, onde devem estar incluídos todos os equipamentos e edificações que pertencem à área da SE.

Vale ressaltar que, segundo a NBR 15751 [5], a geometria básica da malha de aterramento deve estar enterrada a uma profundidade de no mínimo 0,5 m, podendo ser admitida uma profundidade mínima de 0,25 m em áreas em que o piso no local é concretado ou existe um substrato rochoso muito superficial, além do fato de que deva existir, obrigatoriamente, um condutor periférico no entorno das edificações.

2.3.1 Cálculo Preliminar da Resistência de Aterramento

Como boa prática, a NBR 15751 [5] recomenda que antes da definição da geometria definitiva da malha de aterramento, deve ser calculada, de forma aproximada, a sua resistência, com o propósito de verificar se deverão ser feitos alguns ajustes na geometria da malha e/ou algum tratamento químico no solo (explanado na Seção 2.8.1) com o intuito de manter a resistência elétrica abaixo de um valor preestabelecido. Usualmente utiliza-se como boa prática o valor de 10Ω . No entanto, vale ressaltar que a NBR 15751 [5] não estabelece tal limite, deixando esta incumbência ao encargo do engenheiro responsável.

Considerando-se que a resistência de aterramento é função da área ocupada pela malha e da resistividade do solo, temos:

$$R = \frac{\rho_a}{4r} [\Omega] \quad (8)$$

Onde: R = resistência de aterramento (Ω); ρ_a = resistividade aparente do solo ($\Omega.m$); r = raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento pela Equação (4) (m).

Uma vez definida a geometria inicial da malha, é possível calcular a resistência de aterramento levando-se em consideração o comprimento dos condutores enterrados, com o auxílio das Equações (9) e (10).

- Para malhas enterradas até uma profundidade de 0,25 m.

$$R = \frac{\rho_a}{4r} + \frac{\rho_a}{L_t} [\Omega] \quad (9)$$

- Para malhas enterradas a uma profundidade entre 0,25 m e 2,5 m.

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{L_t} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \times A}} \right) \times \left[1 + \left(\frac{1}{1 + H \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \right\} [\Omega] \quad (10)$$

Onde: R = resistência de aterramento (Ω); L_t = comprimento total de condutores enterrados (m); ρ_a = resistividade aparente do solo ($\Omega \cdot m$); r = raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento pela Equação (4) (m); H = profundidade da malha (m); A = área ocupada pela malha (m^2).

É importante ressaltar que ao considerar malhas que contenham hastes verticais as Equações (8), (9) e (10) são conservativas.

2.4 DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA DE ATERRAMENTO

Uma vez determinada a geometria básica da malha de aterramento, deve-se então dar prosseguimento ao dimensionamento dos seus condutores. Esses condutores deverão ser tal que consigam suportar os esforços mecânicos (compressão, tração e cisalhamento), térmicos e eletromagnéticos a que estarão sujeitos durante sua vida útil.

2.4.1 Dimensionamento Mecânico

Considerando-se a necessidade de suportar os esforços mecânicos e eletromagnéticos, a NBR 15751 [5] recomenda que os condutores que irão compor a malha de aterramento deverão possuir bitolas mínimas de 50 mm² para condutores em cobre ou 38 mm² para condutores em aço, devendo, no entanto, serem protegidos contra corrosão.

2.4.2 Dimensionamento Térmico

Conforme Fleury e Guedes [17], quanto ao dimensionamento térmico, os condutores deverão possuir seção transversal com o objetivo de suportar uma circulação de corrente de falta sem que a temperatura do condutor se eleve acima de um determinado valor limite, durante um certo período de tempo, devendo toda energia térmica ficar contida no próprio condutor.

A Equação (11) nos fornece a seção mínima do condutor levando em consideração as solicitações térmicas.

$$S = I_f \sqrt{\frac{t \times \alpha_r \times \rho_r \times 10^4}{TCAP \times \ln \frac{(k_0 + T_m)}{(k_0 + T_a)}}} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (11)$$

Onde: S = Seção mínima do condutor (mm²); I_f = Corrente de falta fase-terra (kA); t = Tempo total de acionamento da proteção (s); α_r = Coeficiente térmico de resistividade do condutor a uma dada temperatura (°C⁻¹); ρ_r = Resistividade do condutor de aterramento a uma dada temperatura ($\Omega \times \text{cm}$); $TCAP$ = Fator de capacidade térmica [J/(cm³ x °C)]; T_m = Temperatura máxima suportável (°C); T_a = Temperatura ambiente (°C); k_0 = Coeficiente térmico da resistividade do condutor a 0 °C que é dado por $1/\alpha_0$.

A Tabela 2.5 nos fornece os valores dos parâmetros necessários para realizar o cálculo da seção mínima utilizando a Equação (11).

Tabela 2.5 - Valores dos parâmetros para os mais diversos tipos de condutores.

Tipo do condutor	Condutância	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura máxima suportável	Resistividade	TCAP
	%	α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)	T_m (°C)	ρ_r (20 °C)	[J/(cm ³ x °C)]
Cobre (macio)	100	0,00427	0,00393	1.083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97	0,00413	0,00381	1.084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40	0,00408	0,00378	1.084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30	0,00408	0,00378	1.084	5,862	3,846

Fonte: NBR 15751 [5].

Caso a temperatura de máxima suportada pela conexão seja inferior à temperatura máxima suportada pelo condutor, deve-se então, por motivos de segurança, utilizar a temperatura máxima suportada referente ao tipo de conexão utilizada. A Tabela 2.6 nos fornece o valor de T_m para os diversos tipos de conexões.

Tabela 2.6 - Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura

Conexão	T_m °C
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850
Emenda à compressão	850

Fonte: NBR 15751 [5].

A Figura 2.7 nos mostra um grampo terra em liga de cobre que é considerado um tipo de conexão mecânica e é utilizado para unir dois ou mais componentes distintos.



Figura 2.7 - Grampo terra duplo com parafuso em U em liga de cobre tipo conexão aparafusada ou por pressão.

Fonte: Intelli [18].

A Figura 2.8 ilustra uma conexão cabo a cabo em liga de cobre que é obtida através da solda exotérmica e é utilizada para unir dois ou mais componentes. Essa solda é obtida com o auxílio de um molde, ilustrado na Figura 2.9, onde deve-se primeiro inserir os elementos que serão soldados, em seguida colocar o disco metálico no fundo do molde, inserir o pó de solda, fechar a tampa e finalmente utilizar algum tipo de ignitor para dar início à reação e soldar permanentemente os elementos previamente inseridos.



Figura 2.8 - Conector cabo a cabo em liga de cobre tipo conexão solda exotérmica.

Fonte: Exosolda [19].

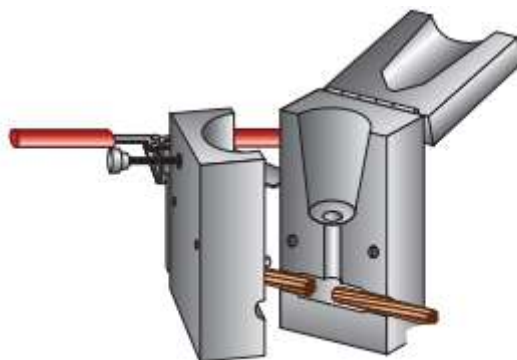


Figura 2.9 - Molde utilizado para realizar a conexão por solda exotérmica.

Fonte: Exosolda [19].

A Figura 2.10 nos mostra um conector cunha em liga de cobre e uma conexão entre dois componentes que foi obtida através da emenda a compressão, que é obtida com o auxílio de um alicate hidráulico, mostrado na Figura 2.11.



Figura 2.10 - Conector cunha em liga de cobre tipo conexão a compressão.

Fonte: Intelli [18].



Figura 2.11 - Alicates hidráulico utilizado para a conexão de conectores do tipo a compressão.

Fonte: Intelli [18].

Vale ressaltar que a conexão obtida através da emenda a compressão é considerada um tipo de ‘solda permanente’ devido à elevada pressão aplicada, obtendo os mesmos resultados da solda exotérmica.

A Equação (11), de acordo com a NBR 15751 [5], pode ser substituída por:

$$S = I_f \times K_f \sqrt{t} \text{ [mm}^2\text{]} \quad (12)$$

Onde: S = Seção mínima do condutor (mm²); I_f = Corrente de falta fase-terra (kA); K_f = Constante para materiais considerando temperatura ambiente (T_a) de 40 °C.

A Tabela 2.7 nos fornece valores típicos de K_f para o cobre considerando o limite de fusão do tipo de conexão utilizada.

Tabela 2.7 - Valores típicos de K_f para o cobre.

Conexão	K_f
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	5,8
Emenda tipo solda oxiacetilênica	4,7
Emenda com solda exotérmica	3,8
Emenda à compressão	3,8

Fonte: NBR 15751 [5].

Nota-se que a conexão entre um equipamento elétrico e a malha de aterramento é feita no ponto mais próximo, fazendo com que a corrente de defeito se fracione. Com isso, a seção definida para o condutor da malha de aterramento é superdimensionada podendo-se então realizar novamente os cálculos com uma corrente de defeito fase-terra de 0,6 vezes o valor nominal. Leva-se em consideração que a corrente de curto se divide no mínimo em duas partes no ponto de conexão à malha de aterramento, onde os 10% adicionais são inseridos como um fator de segurança [10].

Uma vez que as Equações (11) e/ou (12) nos fornecem uma bitola para o condutor da malha de aterramento que está sendo projetada inferior ao previamente estabelecido na Seção 2.4.1, deve-se então optar pela utilização do condutor com a menor bitola.

2.5 CÁLCULO DAS TENSÕES PERMISSÍVEIS

Como o corpo humano é percorrido por uma corrente elétrica ao ser submetido a uma diferença de potencial, então, o sistema de aterramento deve ser dimensionado de tal forma que durante a ocorrência de um defeito assimétrico, que originará corrente de sequência zero que circulará pela malha de aterramento [20], produzirá um gradiente de tensões no solo de forma que as tensões de passo e toque permaneçam dentro dos limites toleráveis pelo corpo humano e estabelecidos pela norma NBR 15751 [5].

Segundo Creder [21], os efeitos da corrente elétrica no corpo humano variam e estão associados a alguns fatores.

- O estado da pele do indivíduo.
- O percurso da corrente elétrica pelo corpo.
- A intensidade da corrente.
- O tempo de duração do contato.
- O tipo da corrente elétrica (alternada ou contínua).
- A frequência da corrente.
- O nível de tensão.
- As condições orgânicas do indivíduo.

Em seguida, serão explanados os efeitos do choque elétrico no corpo humano, esclarecidos os limites máximos de corrente de choque elétrico de longa e de curta duração suportados pelos seres humanos, a conceituação e demonstração das tensões de toque e de passo.

2.5.1 Efeito da Corrente Elétrica no Corpo Humano

O choque elétrico é a reação de qualquer organismo à passagem de uma corrente elétrica, e, como visto na Seção 2.5, os efeitos da corrente elétrica no corpo humano variam de indivíduo para indivíduo e dependem de diversos fatores. Conforme Nemésio Sousa [22], podemos relacionar os principais efeitos fisiológicos produzidos por tal perturbação.

- Alterações do ritmo cardíaco, podendo ocorrer a fibrilação ventricular.
- Infarto.
- Contração dos centros nervosos, podendo causar asfixia.
- Paralisia e convulsões.
- Fraturas.
- Queimaduras.
- Insuficiência renal, enurese⁵.
- Falta de oxigênio no sistema respiratório, provocando anóxia⁶.
- Ausência de oxigênio no sangue causando anoxemia⁷.
- Queimaduras produzindo a destruição dos tecidos.
- Alterações profundas no sangue provocadas pelos efeitos térmico e eletrolítico da corrente elétrica.
- Trombose⁸.

A Tabela 2.8 apresenta os efeitos da corrente elétrica alternada no corpo humano para frequências de 50 e 60 Hz, desconsiderando a duração da ocorrência do choque elétrico. Vale a pena ressaltar que estes valores são estimados e não absolutos, uma vez que diversos fatores influenciam a resposta fisiológica de cada indivíduo à passagem de corrente elétrica.

⁵ Enurese é a micção involuntária e/ou inconsciente.

⁶ A anóxia designa uma diminuição da quantidade de oxigênio distribuída pelo sangue aos tecidos.

⁷ A anoxemia é uma diminuição da quantidade de oxigênio presente no sangue.

⁸ Trombose é a formação de um coágulo sanguíneo em uma ou mais veias localizadas da parte inferior do corpo, geralmente nas pernas.

Tabela 2.8 - Efeitos da corrente no corpo humano.

Corrente (mA)	Reação Fisiológica	Consequência	Socorro/ Tratamento	Resultado Final Esperado
CA				
Até 25	1 mA : Considera-se o limiar de sensação (formigamento). 15 – 25 mA: Contrações violentas, impossibilidade de soltar o condutor elétrico, problemas respiratórios.	Quanto mais próxima a corrente de 25 mA maior a chance de haver problemas respiratórios e consequentemente a morte aparente.	Respiração artificial	Restabelecimento
25 - 80	Extrema sensação de desconforto, contrações violentas, asfixia.	Morte aparente	Respiração artificial	Restabelecimento
> 80	Asfixia imediata, fibrilação ventricular, alterações musculares (químicas), queimaduras.	Morte aparente	Respiração artificial, massagem cardíaca.	Restabelecimento
Ordem de Ampères	Queimaduras, necrose do tecido, fibrilação ventricular, asfixia imediata, danos posteriores provenientes da eletrólise.	Morte aparente, queimaduras, sequelas e morte.	Respiração artificial, massagem cardíaca, tratamento hospitalar.	Caso sobreviva, o indivíduo apresentará sequelas tais como: queimaduras, atrofia muscular, deformidades diversas entre outras.

Fonte: Kindermann e Campgnolo [10].

Observa-se na Figura 2.12 a influência do tempo de duração do choque elétrico na resposta fisiológica de um indivíduo. As explanações das zonas com suas respectivas respostas fisiológicas podem ser encontradas na Tabela 2.9.

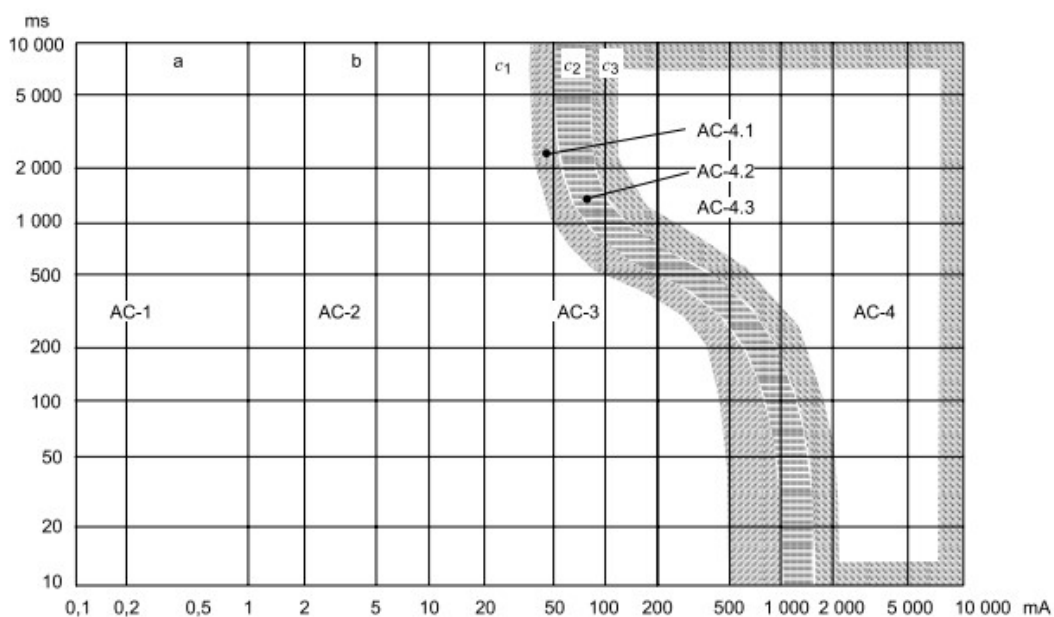


Figura 2.12 - Efeito da corrente alternada elétrica no corpo humano para frequências entre 15 e 100 Hz levando-se em consideração a duração do choque elétrico.

Fonte: IEC 60479-1 [4].

Tabela 2.9 - Efeitos da corrente alternada no corpo humano para frequências entre 15 e 100 Hz.

Zonas	Limites	Efeitos Fisiológicos
AC-1	Até 2 mA, curva a	Possível percepção da corrente elétrica
AC-2	Acima de 2 mA até a curva b	Percepção da corrente elétrica e contração involuntária dos músculos.
AC-3	Curva b e acima	Contrações violentas, dificuldade respiratória, distúrbio na função do coração.
AC-4	Acima da curva c_1	Possibilidade de ocorrência de parada cardiorrespiratória, queimaduras e outros danos celulares. A probabilidade de fibrilação ventricular aumenta com a magnitude da corrente e com o tempo de duração do choque.

Zonas	Limites	Efeitos Fisiológicos
AC-4	$C_1 - C_2$	A probabilidade de fibrilação ventricular aumenta em 5%.
	$C_2 - C_3$	A probabilidade de ocorrer fibrilação ventricular é de até 50%.
	Acima da curva c_3	A probabilidade de no mínimo 50%.

Fonte: IEC 60479-1 [4].

O efeito mais importante que devemos considerar é a fibrilação ventricular, que, segundo Guyton e Hal [23], corresponde ao estado de vibração irregular e desritmada das fibras musculares do coração, decorrendo de impulsos cardíacos frenéticos na massa do músculo ventricular. Podemos observar na Figura 2.13 o eletrocardiograma e a pressão arterial quando o coração é sujeito a um choque elétrico. Ressalte-se que antes do choque elétrico o coração bombeia o sangue em um ritmo constante mantendo assim a pressão sanguínea. Logo após o choque o coração não apresenta ritmo definido e está com contrações irregulares, fazendo com que a pressão arterial caia à zero, isto é, o sangue não consegue se mover pelas veias e artérias, ficando estagnado no corpo. Este fenômeno é conhecido como ‘morte aparente’.

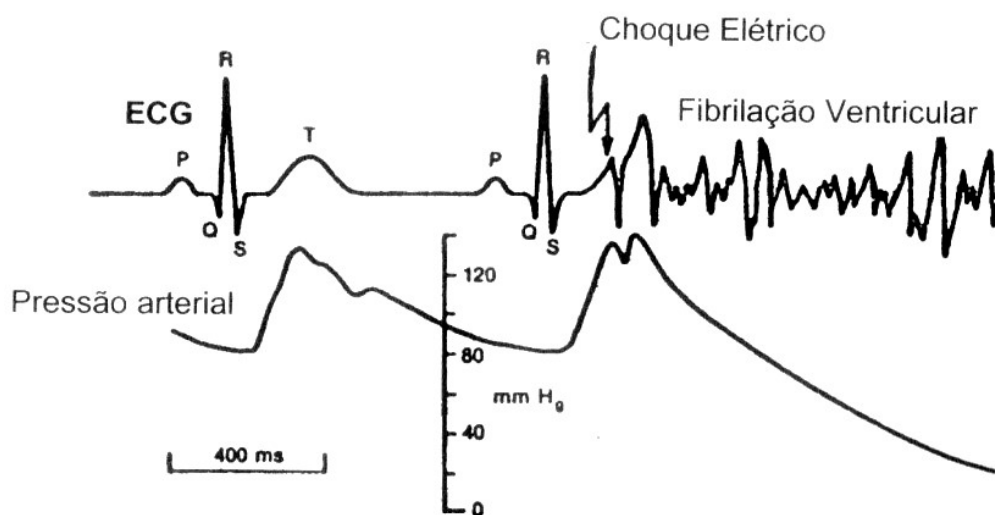


Figura 2.13 - Eletrocardiograma e pressão arterial de um indivíduo antes e depois de sofrer um choque elétrico.

Fonte: IEC 60479-1 [4].

2.5.2 Corrente de Choque de Longa Duração (I_{chld})

A corrente de choque de longa duração pode ser definida como “a corrente de choque provocada por uma tensão de toque ou passo devido a uma corrente de defeito de longa duração” [5]. Ela é a corrente máxima que um indivíduo consegue suportar sem que o mesmo experiencie fibrilação ventricular, sendo que, segundo Dalziel [24], para 99,5% da população masculina esse valor é de 9 mA, enquanto para 99,5% da população feminina o limite máximo cai para 6 mA. Tal disparidade é justificada pela notória diferença entre o biotipo masculino e feminino.

2.5.3 Corrente de Choque de Curta Duração (I_{chcd})

A corrente de choque de curta duração pode ser definida como “a corrente máxima de não fibrilação no intervalo de tempo de $0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$ ” [5].

Devido ao estudo conduzido por Dalziel [24], concluiu-se que 99,5% das pessoas com peso superior a 50 kg conseguem suportar a corrente elétrica determinada pela Equação (13) sem que experienciem a ocorrência de fibrilação ventricular durante o tempo em que a pessoa esteja submetida a qualquer diferença de potencial, seja pela tensão de passo e/ou pela tensão de toque.

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} [A] \quad (13)$$

Onde: $0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$;

O valor de ‘ t ’ é definido como a duração do choque elétrico, onde o mesmo é limitado pelos dispositivos de proteção que compõem o sistema estudado, sendo estipulado pelo tempo máximo de eliminação da falta baseado na parametrização das curvas de atuação dos equipamentos elétricos utilizados.

A NBR 15751 [5] estipula que, ao haver religamento automático e considerando o intervalo de tempo de religamento (t_r) menor que 0,5 s, o valor de ‘ t ’ a ser considerado na Equação (13) deve ser igual à soma dos tempos da falta inicial e das faltas subsequentes desconsiderando o tempo de religamento. Caso contrário, deve-se utilizar o maior valor dentre os observados. A Figura 2.14 expressa de maneira visual como deve ser determinado o tempo a ser utilizado no cálculo da corrente de choque de curta duração ao se considerar religamento automático.

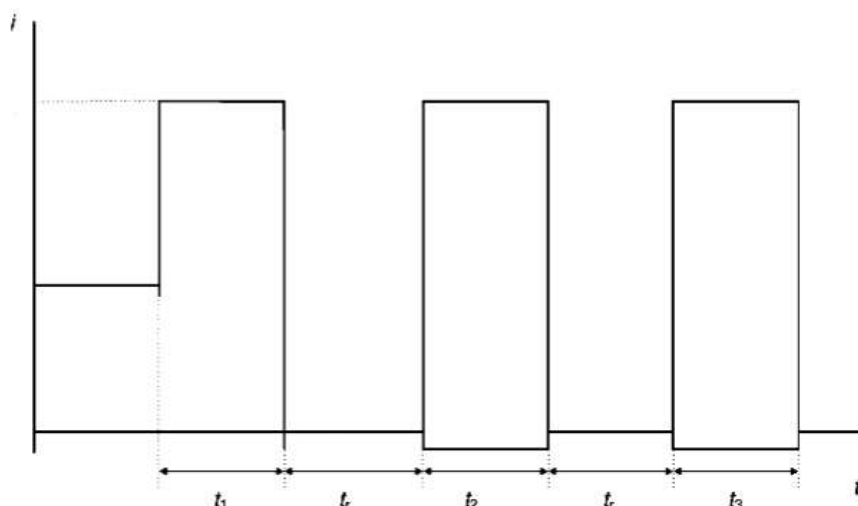


Figura 2.14 - Defeito elétrico com religamento automático.

Fonte: NBR 15751 [5].

2.5.4 Tensão de Passo

Como definido, a tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo levando em conta a distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1 m. A tensão de passo ocorre quando os membros inferiores de um indivíduo estão situados sobre linhas de potenciais distintas, fazendo com que seja possível a passagem de corrente elétrica através do corpo humano. Na Figura 2.15 pode ser observado o circuito equivalente com os parâmetros resistivos de um indivíduo que está sob efeito da tensão de passo. Onde R_{ch} é a resistência do corpo humano, R_p é a resistência própria de cada pé em relação ao ‘terra remoto’ e R_{mp} é resistência mútua entre os pés.

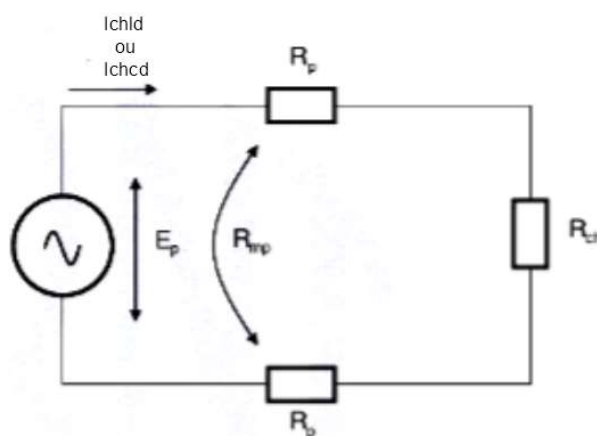


Figura 2.15 - Circuito equivalente correspondente aos parâmetros envolvidos na tensão de passo.

Fonte: NBR 15751 [5].

Sendo assim, a tensão limite de passo permissível a um ser humano sem que o mesmo sofra fibrilação ventricular é dada por:

- Para curta duração:

$$E_{pcd} = [R_{ch} + 2 \times (R_p - R_{mp})] \times I_{chcd} [V] \quad (14)$$

- Para longa duração:

$$E_{pld} = [R_{ch} + 2 \times (R_p - R_{mp})] \times I_{chld} [V] \quad (15)$$

Onde: R_{ch} = Resistência do corpo humano, estimada em 1000 Ω ; R_p = Resistência própria de cada pé em relação ao ‘terra remoto’ (Ω), dada pela Equação (16); R_{mp} = Resistência mútua entre os pés (Ω); I_{chcd} = Máxima corrente de curta duração admissível (A); I_{chld} = Máxima corrente de longa duração admissível (A).

A resistência própria de cada pé é dada por:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) \times C [\Omega] \quad (16)$$

Onde: ρ_s = Resistividade da camada de recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$) e pode ser determinado conforme a Tabela 2.10; b = Raio do disco utilizado para representar o pé humano e é igual a 0,083 m; C = Fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, dado pelas Equações (17) e (18).

Tabela 2.10 - Estimativa da resistividade do material de recobrimento (ρ_s).

Material	Resistividade $\Omega \times m$	
	Seco	Molhado
Brita nº 1, 2 ou 3	-	3.000
Concreto	1.200 a 280.000	21 a 100
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10×10^3 a 6×10^6

Fonte: NBR 15751 [5].

O fator de redução pode ser calculado da seguinte maneira.

$$C = \frac{1}{0,96} \times \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \times n \times h_s}{0,08} \right)^2}} \right] \quad (17)$$

Ou simplesmente:

$$C \cong 1 - 0,106 \times \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 \times h_s + 0,106} \right] \quad (18)$$

Onde: $k = (\rho_1 - \rho_s) / (\rho_1 + \rho_s)$; ρ_1 = Resistividade da camada do solo que se encontra abaixo da camada de recobrimento superficial ($\Omega \times m$); ρ_s = Resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$); h_s = Espessura da camada de recobrimento superficial (m).

O fator C também pode ser determinado graficamente utilizando o fator k e a espessura da camada de revestimento superficial (h_s), como mostra a Figura 2.16.

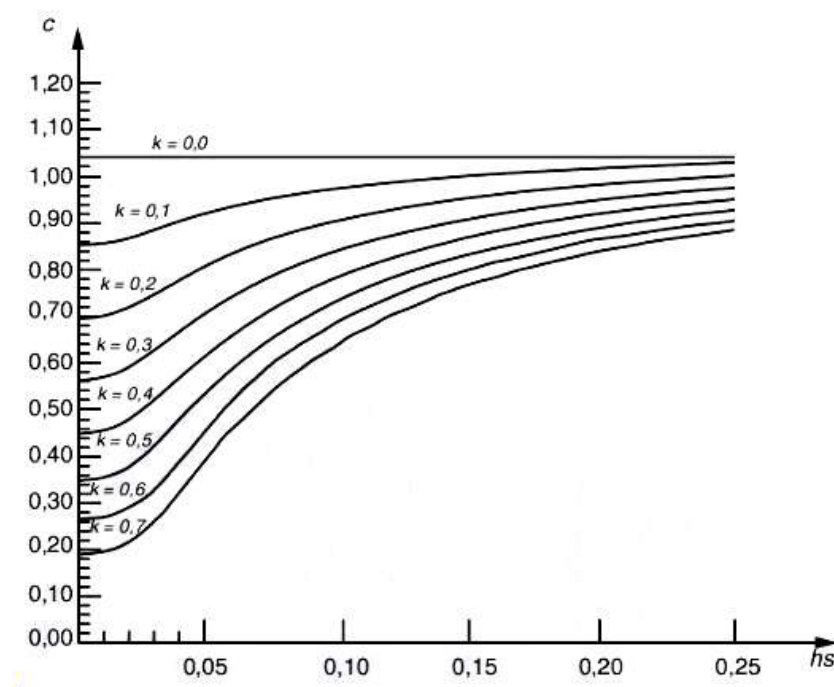


Figura 2.16: Determinação gráfica do fator de redução C .

Fonte: NBR 15751 [5].

E a resistência mútua entre os pés é dada por:

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2 \times \pi \times R_p} \right) [\Omega] \quad (19)$$

Onde: ρ_s = Resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$); R_p = Resistência própria de cada pé (Ω) dado pela Equação (16).

2.5.5 Tensão de Toque

A tensão de toque pode ser definida como a diferença de potencial entre um ponto de uma superfície que esteja energizada e o solo, considerando a altura de toque de uma pessoa, considerada igual a 1 m. A tensão de toque ocorre quando a parte do membro superior do indivíduo que tocou na estrutura energizada está em um potencial distinto dos membros inferiores, em contato com o solo, sendo assim, torna-se possível que uma corrente elétrica trafegue através do corpo humano. Na Figura 2.17 pode ser observado o circuito equivalente com os parâmetros resistivos de um indivíduo que está sob efeito da tensão de toque. Onde R_{ch} é a resistência do corpo humano, R_p é a resistência própria de cada pé em relação ao ‘terra remoto’ e R_{mp} é resistência mútua entre os pés.

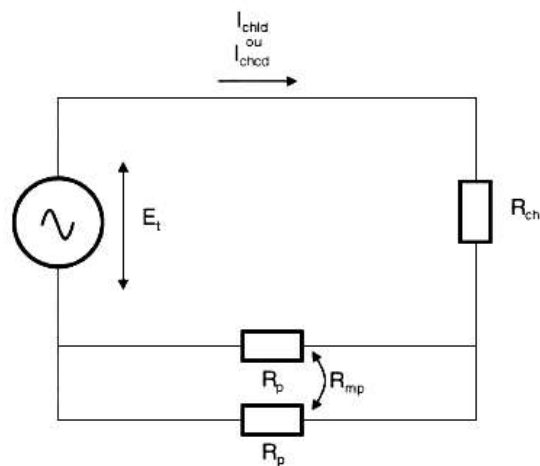


Figura 2.17 - Circuito equivalente correspondente aos parâmetros envolvidos na tensão de toque.

Fonte: NBR 15751 [5].

Sendo assim, a tensão limite de toque permissível a um ser humano sem que o mesmo sofra fibrilação ventricular é dada por:

- Para curta duração:

$$E_{tcd} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \times I_{chcd} [V] \quad (20)$$

Ou,

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{chcd} [V] \quad (21)$$

- Para longa duração:

$$E_{tld} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \times I_{chld} [V] \quad (22)$$

Ou,

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{chld} [V] \quad (23)$$

Onde: R_{ch} = Resistência do corpo humano, estimada em 1000 Ω ; R_p = Resistência própria de cada pé em relação ao ‘terra remoto’ (Ω), dada pela Equação (16); R_{mp} = Resistência mútua entre os pés (Ω); I_{chcd} = Máxima corrente de curta duração admissível (A); I_{chld} = Máxima corrente de longa duração admissível (A); ρ_s = Resistividade da camada de recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$) e pode ser determinado conforme a Tabela 2.10; C = Fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, dado pelas Equações (17) e (18).

2.6 CÁLCULO SIMPLIFICADO DE POTENCIAIS NO SOLO

Existem diversos *softwares* desenvolvidos com o intuito de calcular a resistência da malha de aterramento, a tensão de passo e a tensão de toque, porém, em alguns casos, não é economicamente viável a utilização de tais *softwares* pois os mesmos são extremamente custosos, sendo mais vantajoso a utilização de equações aproximadas para determinar o *design* da malha e os parâmetros previamente citados [25].

Importante ressaltar que enquanto a norma brasileira NBR 15751 [5] diz que o número de condutores paralelos em uma determinada direção deve ser menor ou igual a 25, que a malha deve estar enterrada a uma profundidade entre 0,25 m e 2,5 m, que o diâmetro dos condutores da malha devem ser menores que 0,25 m e que a distância entre os condutores paralelos ao longo da malha deve ser de no mínimo 2,5m, a norma americana IEEE-80 [25] não possui tais restrições.

2.6.1 Equação Simplificada para Tensão de Toque

Uma formulação simplificada para cálculo da tensão de toque pode ser dada pela Equação (24) [5].

$$V_t = \frac{\rho \times I_m \times K_m \times K_i}{L_t} [V] \quad (24)$$

Onde: ρ = Resistividade do solo homogêneo ($\Omega \times m$); I_m = Corrente de falta escoada para a malha (A); K_m = Fator geométrico da malha de aterramento utilizado nos cálculos das tensões de toque, dado pela Equação (25), desenvolvido pelo *AIEE Working Group on Substation Grounding Practices* [26]; K_i = Fator de correção utilizado nos cálculos das tensões de toque que leva em consideração a não uniformidade da dispersão de corrente pelos condutores da malha de aterramento, dado pela Equação (27); L_t = comprimento total dos condutores enterrados (m).

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \times H \times d} + \frac{(D+2 \times H)^2}{8 \times D \times d} - \frac{H}{4 \times d} \right) + \frac{k_{ii}}{\sqrt{1+H}} \ln \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (25)$$

Onde: D = Distância entre os condutores paralelos (m); H = Profundidade em que a malha está enterrada (m); d = Diâmetro dos condutores que compõem a malha (m); n = Número de condutores paralelos em uma determinada direção; k_{ii} = Fator de correção que leva em consideração a densidade de corrente e corrige algumas deficiências do fator K_m nas suas versões passadas, foi adicionado por Sverak [27] juntamente com o fator $\sqrt{1+H}$ e é dado pela Equação (26) .

Para os casos em que a malha de aterramento não possui nenhuma haste de aterramento ou para o caso em que possui apenas algumas, nenhuma delas localizadas nos cantos ou na parte mais externa da malha, o fator de correção k_{ii} é dado a seguir. Caso contrário, pode ser considerado igual a 1.

$$k_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}} \quad (26)$$

Devido às mais diversas aproximações utilizadas para estabelecer a Equação (25), o uso do fator de correção K_i se faz necessário para compensar o fato que o modelo matemático de n condutores paralelos não pode explicar completamente o efeito da geometria em malha, ou seja, para dois pares de condutores paralelos que são perpendiculares entre si e interconectados onde existe um cruzamento entre eles [25]. Então Thapar *et al.* [28], através da análise computacional, propôs que o fator de correção K_i seja dado por:

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times n \quad (27)$$

De forma a permitir que as Equações (25), (26) e (27) possam ser utilizadas para malhas com as mais diversas geometrias (em forma de T, triangular, em forma de L, entre outras), Thapar *et al.* [28] propõem um novo valor para n baseado na geometria da malha.

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d \quad (28)$$

Onde:

$$n_a = \frac{2 \times L_c}{L_p} \quad (29)$$

E $n_b = 1$ (para malhas quadradas), $n_c = 1$ (para malhas quadradas e retangulares) e $n_d = 1$ (para malhas quadradas, retangulares e em formato de L).

Caso contrário,

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4 \times \sqrt{A}}} \quad (30)$$

$$n_c = \left[\frac{L_x \times L_y}{A} \right]^{\frac{0,7 \times A}{L_x \times L_y}} \quad (31)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \quad (32)$$

Onde: L_c = Comprimento total dos condutores na horizontal (m); L_p = Perímetro da malha (m); A = Área da malha (m²); L_x = Máximo comprimento da malha na direção x (m); L_y = Máximo comprimento da malha na direção y (m); D_m = Máxima distância entre dois pontos da malha (m).

Enquanto que essas alterações permitiram a aplicação para cálculo da tensão de toque para as mais diversas geometrias, elas não incluíram o uso de hastes de aterramento. Uma tentativa para a inclusão das hastes de aterramento pode ser vista na Equação (33) [25].

$$V_t = \frac{\rho \times I_m \times K_m \times K_i}{L_c + \left[1,55 + 1,22 \times \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \times L_R} \quad [V] \quad (33)$$

Onde: L_r = Comprimento médio de cada haste de aterramento (m); L_R = Comprimento total de todas as hastes de aterramento (m).

2.6.2 Equação Simplificada para Tensão de Passo

Uma formulação simplificada para cálculo da tensão de passo pode ser dada pela Equação (34).

$$V_p = \frac{\rho \times I_m \times K_s \times K_i}{L_t} [V] \quad (34)$$

Onde: ρ = Resistividade do solo homogêneo ($\Omega \times m$); I_m = Corrente de falta escoada para a malha (A); K_s = Fator geométrico da malha de aterramento utilizado nos cálculos das tensões de passo, dado pela Equação (35), desenvolvido por Sverak [27]; K_i = Fator de correção utilizado nos cálculos das tensões de passo que leva em consideração a não uniformidade da dispersão de corrente pelos condutores da malha de aterramento, dado pela Equação (27); L_t = Comprimento total dos condutores enterrados (m).

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D + H} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (35)$$

Onde: D = Distância entre os condutores paralelos (m); H = Profundidade em que a malha está enterrada (m); n = Número de condutores paralelos em uma determinada direção.

Enquanto que essas alterações permitiram a aplicação para cálculo da tensão de passo para as mais diversas geometrias, elas não incluíram o uso de hastes de aterramento. Uma tentativa para inclusão das hastes de aterramento pode ser vista na Equação (36) [25].

$$V_p = \frac{\rho \times I_m \times K_s \times K_i}{0,75 \times L_C + 0,85 \times L_R} [V] \quad (36)$$

Onde: L_C = Comprimento total dos condutores na horizontal (m); L_R = Comprimento total de todas as hastes de aterramento (m).

2.7 CÁLCULO DA CORRENTE QUE ESCOA PARA A MALHA DE ATERRAMENTO

Ao acontecer uma falta assimétrica de curta duração, ocorre que a corrente de falta irá se dividir por todos os componentes que constituem o sistema de aterramento, fazendo com que cada componente escoe individualmente uma parcela da corrente de falta. A corrente de malha (I_m), como definido anteriormente, é a parcela da corrente de falta dissipada pela malha de aterramento para o solo [5].

2.7.1 Corrente de Malha Simétrica Eficaz

Nos casos em que a corrente de falta ou a corrente de suportabilidade de curto-circuito for utilizada para o dimensionamento da malha de aterramento, a mesma será superdimensionada, acarretando em custos desnecessários ao projeto que poderiam ter sido evitados ao se utilizar a corrente de malha. Em alguns casos particulares, como em sistemas elétricos de transmissão sem para-raios e/ou sistemas de distribuição sem cabo de neutro conectado à malha de aterramento, deve-se considerar que a corrente de malha é igual à corrente de falta.

Porém, para as situações em que a corrente de malha difere significativamente da corrente de falta, torna-se indispensável o cálculo da corrente de malha simétrica eficaz. Para o cálculo desta corrente, o sistema deve ser modelado convenientemente por um circuito equivalente, levando em consideração que a terra é um dos caminhos plausíveis de retorno para a corrente de falta. Em determinadas situações em que a topologia da rede é extremamente simples, torna-se mais conveniente o cálculo do fator de distribuição (S_f), dado pela Equação (37) e definido como o fator que fornece a parcela da corrente de falta que escoar para a terra através da malha da subestação, ser mais conveniente calcular-se primeiramente este fator, e a partir deste, a corrente de malha.

$$S_f = \frac{I_{malha\ sim\ ef}}{I_{falta}} \quad (37)$$

Onde: $I_{malha\ sim\ ef}$ = Corrente de falta que escoar para a terra através da malha da subestação (A); I_{falta} = Corrente de falta na subestação (A).

Vale ressaltar que existem no mercado diversos *softwares* capazes de realizar o cálculo das correntes de falta em cada ponto de um sistema elétrico e as devidas contribuições das mesmas para a malha de aterramento, agilizando-se assim o processo na determinação das correntes a serem consideradas no dimensionamento da malha de aterramento.

2.7.2 Corrente de Malha de Longa Duração

Importante ressaltar que a corrente de malha de longa duração (I_{mla}) também deve ser levada em consideração no dimensionamento de uma malha de aterramento. Primeiramente deve-se definir a máxima corrente que pode circular permanentemente no neutro de um ou mais transformadores da subestação. Esta corrente deve servir posteriormente de parâmetro para ajustar os relês de proteção de sobrecorrente da subestação. Em seguida, deve-se também obter a parcela de corrente que irá fluir pela malha de aterramento da subestação.

2.7.3 Fator de Decremento

A IEEE-80 [25] define o fator de decremento (D_f) como um fator de ajuste utilizado juntamente com a corrente de falta simétrica para dimensionar, de forma segura, a malha de aterramento. Ele determina o valor RMS da onda da corrente de falta assimétrica para uma dada duração da falta, levando em consideração o efeito inicial do deslocamento da corrente contínua e sua atenuação ao longo do tempo.

Nos casos em que a falta possui uma duração muito longa, 30 ciclos ou mais, pode-se assumir que o efeito do deslocamento da corrente contínua foi mais do que compensado pelo decaimento da componente de corrente alternada subtransitória. Portanto, para esses casos, o fator de decremento pode ser considerado unitário.

Então, o fator de decremento D_f pode tanto ser obtido pela Equação (38) como pela Tabela 2.11.

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \times \left(1 - e^{\frac{-2t_f}{T_a}}\right)} \quad (38)$$

Onde: T_a = Constante de tempo do deslocamento da componente contínua (s); t_f = Duração da falta (s).

Tabela 2.11 - Valores típicos para o fator de decremento D_f .

Tempo de duração da falta, t_f		Fator de Decremento, D_f			
Segundos	Ciclos em 60 Hz	X/R =10	X/R =20	X/R =30	X/R =40
0,00833	0,5	1,576	1,648	1,675	1,688
0,05	3	1,232	1,378	1,462	1,515
0,10	6	1,125	1,232	1,316	1,378
0,20	12	1,064	1,125	1,181	1,232
0,30	18	1,043	1,085	1,125	1,163
0,40	24	1,033	1,064	1,095	1,125
0,50	30	1,026	1,052	1,077	1,101
0,75	45	1,018	1,035	1,052	1,068
1,00	60	1,013	1,026	1,039	1,052

Fonte: IEEE-80 [25].

Crawford e Griffith [29] propõem que a duração da falta a ser considerada tanto na determinação do fator de decremento como no cálculo das correntes admissíveis seja o mesmo, que irá resultar em suficientes geometrias de malha para casos em que não existe religamento automático ou sucessivos choques de alta velocidade. Tal proposta foi feita em contrapartida com os métodos antigos em que se considerava a soma dos tempos de falta ou o maior tempo para o cálculo das correntes admissíveis e o menor tempo de falta para o fato de decremento. A IEEE-80 [25] deixa a cargo do engenheiro responsável pelo *design* a escolha dos tempos de falta a serem utilizados em cada situação.

2.7.4 Fator de Projeção

O fator de projeção (C_p) pode ser considerado como um parâmetro de correção que leva em consideração a expansão da instalação que está sendo estudada, levando em consideração o crescimento da corrente de falta ao longo da vida útil da mesma [5]. Tal fator, no caso de níveis industriais, é alinhado com o cliente como forma de prever se está previsto um aumento de carga no sistema elétrico para o qual se está dimensionando a malha de aterramento.

2.7.5 Corrente de Malha

Considerando-se todas as equações e definições acima, a corrente de malha pode ser dada tanto pelas Equações (39) ou (40).

$$I_m = I_{\text{malha sim ef}} \times D_f \times C_p [A] \quad (39)$$

$$I_m = I_{\text{falta}} \times S_f \times D_f \times C_p [A] \quad (40)$$

Onde: $I_{\text{malha sim ef}}$ = Corrente de falta que escoo para a terra através da malha de aterramento da subestação (A); I_{falta} = Corrente de falta na subestação (A); D_f = Fator de decremento; C_p = Fator de projeção; S_f = Fator de distribuição.

2.8 REFINAMENTO E CUIDADOS AO SE DIMENSIONAR A MALHA DE ATERRAMENTO

Importante ressaltar que dificilmente o primeiro *design* escolhido para a malha de aterramento atenderá aos critérios estabelecidos pelas normas NBR 15751 [5] e/ou IEEE-80 [25]. O engenheiro responsável deverá alterar a malha até que as tensões de toque e passo estejam dentro dos limites estipulados. Porém, em alguns casos, tal tarefa pode ser menos laboriosa, tendo em vista que alguns *softwares* dimensionam a malha de aterramento de forma automática dada uma geometria inicial e os critérios que devem ser atendidos.

A seguir são listadas algumas medidas, recomendadas pela IEEE-80 [25], que podem ser tomadas e aplicadas, onde necessárias, para os casos em que diferenças de potenciais perigosos possam ser ocasionados dentro ou no entorno da malha de aterramento.

- Diminuição da resistência total de aterramento: ao se diminuir a resistência total da malha de aterramento, as tensões de passo e toque também irão diminuir visto que elas são diretamente proporcionais. A solução mais efetiva para tal é aumentando-se a área ocupada pela malha. Entretanto, em algumas situações a área que a malha possa vir a ocupar é limitada, podendo-se então optar por hastes de aterramentos maiores (com o intuito de penetrar camadas mais profundas do solo) ou tratar quimicamente o solo (o assunto será melhor tratado na Seção 2.8.1). A efetividade na diminuição dos gradientes de tensão dependerá do método que será utilizado, podendo-se haver a combinação de múltiplas soluções.

- Diminuição do espaçamento entre os condutores horizontais: ao se diminuir a distância entre os condutores horizontais, a condição de placa contínua pode ser obtida com mais precisão. Sendo assim, os potenciais perigosos dentro da área limitada pela subestação podem ser eliminados. Todavia, o mesmo não se aplica para a área em torno do perímetro da malha, principalmente para subestações pequenas que possuem em sua grande maioria uma resistividade mais alta. Entretanto, existe a possibilidade de estender a malha, após a linha da cerca (que geralmente limita uma subestação), como forma de garantir que os gradientes de tensão mais acentuados fora da região da subestação não contribuam com tensões de contato perigosas. Outro método bastante efetivo e econômico para controlar os gradientes de tensão é aumentando-se o número de hastes de aterramento no perímetro da malha. Também pode-se enterrar dois ou mais condutores paralelos em torno do perímetro aumentando-se a profundidade conforme a distância até a subestação aumenta de forma a controlar os gradientes no perímetro e os potenciais perigosos de toque e passo. De forma semelhante podem-se tornar os condutores horizontais mais próximos uns dos outros conforme eles se aproximem do perímetro da malha de aterramento.
- Direcionar uma grande parte da corrente de falta para outras localidades: ao se conectar condutores de aterramento aéreos de linhas de transmissão ou diminuindo-se a resistência de aterramento da torre na vizinhança da subestação, consegue-se então que grande parte da corrente de falta seja direcionada para tais localidades e não em sua totalidade para a malha de aterramento. Com relação ao direcionamento da corrente de falta para torres de transmissão, deve-se tomar muito cuidado, pois podem-se formar gradientes perigosos [30].
- Limitando a corrente total de falta: se possível, limitar a corrente de falta fará com que as tensões de toque e passo diminuam, podendo-se utilizar um limitador de corrente de curto-circuito.
- Limitando ou restringindo o acesso a certas áreas: barrando ou limitando-se o acesso de pessoas a certas áreas, onde possível, poderá reduzir

consideravelmente o risco de acidentes, visto que áreas com gradientes de tensão perigosos não serão acessíveis.

- Aumentar as tensões de toque e passo permissíveis: as tensões de toque e passo permissíveis podem ser aumentadas caso se reduza o tempo em que a falta será eliminada, aumentando-se a camada de espessura de recobrimento do solo ou utilizando materiais com uma resistividade maior para a camada de cobertura.

2.8.1 Tratamento Químico do Solo

Em situações em que a malha de aterramento já se encontra enterrada e é impossível acessá-la facilmente ou quando existe uma limitação tanto física quanto orçamentária ao se projetar uma malha de aterramento, pode-se optar pelo tratamento químico do solo como forma de alterar as características do solo e conseqüentemente, diminuir a resistência total da malha de aterramento para os casos em que consideradas todas as possibilidades, ainda assim não fora possível atingir tensões seguras de passo e toque.

O tratamento químico do solo, de forma geral, objetiva a redução da resistividade do mesmo, portanto, a diminuição da resistência total da malha de aterramento. É importante que os materiais utilizados para tal função possuem algumas características, como ter uma boa higroscopia (de forma a reter a maior quantidade de água possível), não ser lixiviável⁹ (objetivando que o mesmo tenha uma boa duração sem precisar ser repostos), não ser corrosivo, baixa resistividade elétrica, quimicamente estável no solo e não ser tóxico (evitando o máximo de danos possíveis ao meio ambiente de forma geral).

São apresentados, a seguir, alguns materiais e produtos que podem ser utilizados para tratar quimicamente o solo.

- Cloreto de sódio, magnésio, sulfato de cobre e cloreto de cálcio: tais produtos são utilizados para reduzir de forma eficaz e econômica a resistividade do solo no entorno da haste de aterramento. Entretanto, dependendo da localidade, tais técnicas não devem ser utilizadas devido ao fato de serem proibidas pelos órgãos legais. Adicionalmente, o produto

⁹ Lixiviáveis são sólidos passíveis de se dissolverem em água fazendo com que sua quantidade se reduza ao longo do tempo devido à precipitação.

utilizado deve ser renovado periodicamente devido ao fato de ele ser lixiviável.

- **Betonita:** ela é uma argila natural de origem vulcânica. É não corrosiva, estável, tem baixa resistividade ($1,2 - 4 \Omega.m$), higroscópica, um pH básico ($8 - 10$) e não lixiviável. Devido a sua natureza higroscópica, a betonita absorve grande parte da umidade de seu entorno, sendo assim, é imprescindível que ela e o solo que a cerca estejam úmidos, pois caso seque, ela perderá suas propriedades básicas, devido ao fato dela encolher e conseqüentemente diminuir a superfície de contato com a haste ou condutor de aterramento, podendo até aumentar a resistência total da malha.
- **Gel:** o gel é basicamente constituído de diversos sais e outros materiais que, em presença de água, formam o agente ativo do tratamento. Ele é quimicamente estável, higroscópico, não corrosivo e possui efeito de longa duração. A resistividade do gel é em torno de $0,12 \Omega.m$ (cerca de 10% da resistividade de betonita). Alguns géis são permanentes e não vão ser lixiviados, outros, são misturados com o solo local e vão sendo lixiviados com o tempo, diminuindo-se assim a resistividade do solo no entorno.

Na Figura 2.18, pode ser observada uma instalação típica com produtos químicos aqui mencionados para diminuição da resistividade do solo no entorno do condutor. Basicamente cava-se uma valeta de aproximadamente 80 cm, então coloca-se o produto químico, posiciona-se o condutor e finalmente cobre-se com o solo local.

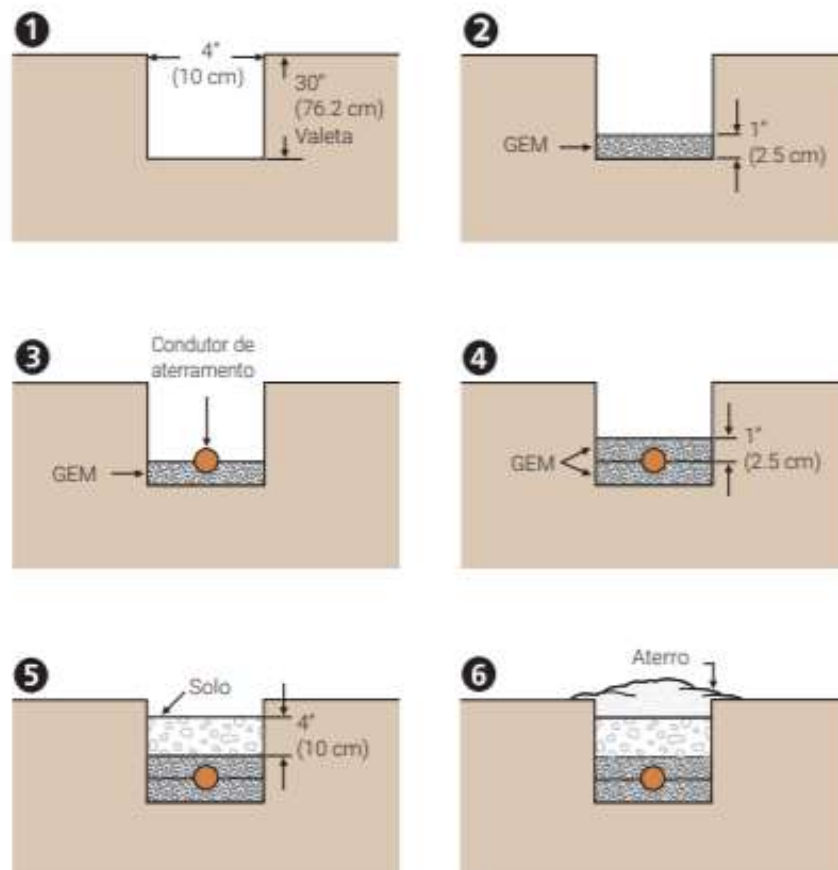


Figura 2.18 - Instalação típica de produtos químicos para tratamento do solo.

Fonte: NVENT [31].

3 ESTUDO DE CASO

De posse das equações, técnicas e conhecimentos teóricos explanados anteriormente, será aplicado aqui nesta seção o dimensionamento de uma malha de aterramento de uma subestação para uma indústria petroquímica localizada na cidade de São Paulo, SP.

3.1 PREMISSAS ADOTADAS PARA O DIMENSIONAMENTO DA MALHA

Devido às restrições físicas, a malha de aterramento deverá ter um comprimento máximo de 15 m e uma largura máxima de 12 m, sendo que a subestação tem 11 m de comprimento e 5,5 m de largura e a mesma é rodeada por uma cerca de 13 m de comprimento e 7,5 m de largura, como pode ser visto na Figura 3.1. A corrente de falta fase-terra considerada para este estudo será de 25 kA.

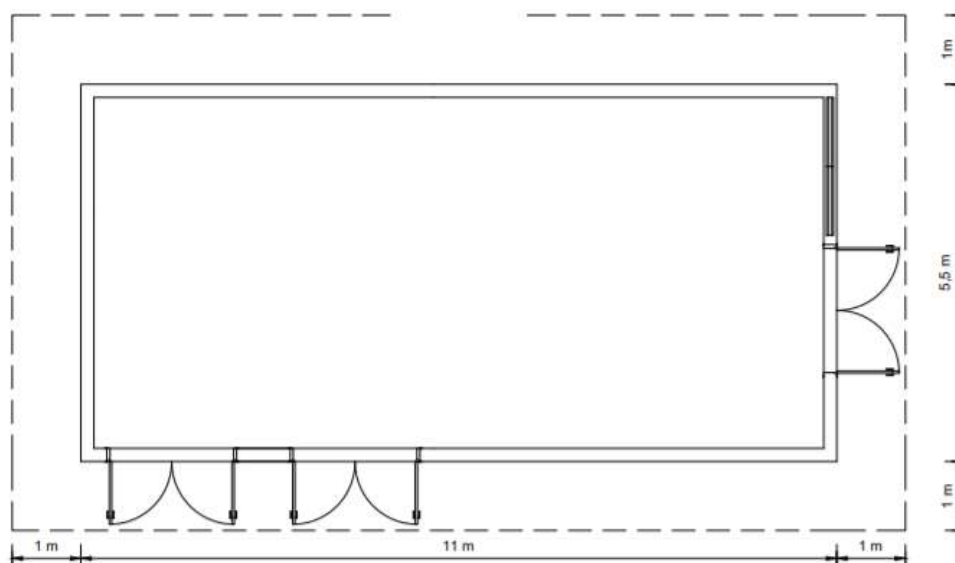


Figura 3.1 - *Layout* da subestação.

Fonte: o autor.

Como forma de determinar de maneira simplificada as resistividades elétricas da primeira e segunda camada do solo, ρ_1 e ρ_2 respectivamente, considerou-se que o solo onde será instalado a malha de aterramento se tratava de um solo argiloso através do mapa pedológico emitido pelo Instituto Florestal da Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo [32]. Para este tipo de solo, é estimado que a resistividade elétrica varia entre 100 e 200 Ω .m. Sendo assim, considerou-se que a primeira camada possui uma

resistividade elétrica de $200 \Omega \cdot m$ com uma profundidade de 5 m e a segunda camada possui uma resistividade elétrica de $100 \Omega \cdot m$.

A profundidade de instalação da malha de aterramento deverá ser de no mínimo 0,6 m.

Será utilizada, como camada de recobrimento do solo, uma camada de 15 cm de espessura de concreto seco com resistividade elétrica de $140 k \Omega \cdot m$.

Os condutores horizontais serão de cobre com têmpera dura e os condutores verticais (hastes) serão de aço cobreado com uma seção de $\frac{3}{4}$ " e 3 m de comprimento, sendo que todo e qualquer tipo de conexão deverá ser feito através de solda exotérmica. Os condutores, horizontais e verticais, deverão suportar a corrente de falta que escoará para a malha por um período de 0,5 s.

Foi estimado que a potência instalada poderá sofrer um aumento de 10% no horizonte de 10 anos, com isso, o fator de projeção (C_p) adotado foi de 1,1. O fator de decremento (D_f) é unitário para este estudo já que o tempo de eliminação de falta utilizado para o dimensionamento é de 0,5 s. Já o fator de distribuição (S_f) utilizado será de 0,8, visto que nem toda a corrente de falta escoará para a malha de aterramento.

Com isso, pode-se observar na Tabela 3.1, todas as variáveis utilizadas para cálculo dos parâmetros básicos da malha de aterramento.

Tabela 3.1 - Variáveis utilizadas para o dimensionamento da malha de aterramento.

VARIÁVEL	VALOR	DESCRIÇÃO
Comprimento	15 m	Comprimento máximo para a malha de aterramento
Largura	12 m	Largura máxima para a malha de aterramento
I_f	25 kA	Corrente de falta fase-terra
S_f	0,8	Fator de distribuição
C_p	1,1	Fator de Projeção
D_f	1,0	Fator de Decremento
t	0,5 s	Tempo que o condutor deve suportar os efeitos térmicos e tempo de atuação do dispositivo de proteção
K_f	3,8	Constante K_f , Tabela 2.7
ρ_1	$200 \Omega \cdot m$	Resistividade da primeira camada (estimada)

VARIÁVEL	VALOR	DESCRIÇÃO
ρ_2	100 Ω .m	Resistividade da segunda camada (estimada)
ρ_s	140 k Ω .m	Resistividade da camada de recobrimento do solo
h_s	0,15 m	Espessura da camada de recobrimento do solo
h	5 m	Profundidade da primeira camada(estimada)
H	0,60 m	Profundidade da malha de aterramento

Fonte: o autor.

3.2 CORRENTE DE MALHA

Sabendo-se que a corrente de falta (I_f) é 25 kA, o fator de distribuição (S_f) é 0,8, o fator de decremento (D_f) é unitário e o fator de projeção (C_p) é igual a 1,1, pode-se então obter efetivamente a corrente que escoará para a malha de aterramento (I_m) pela Equação (40).

$$I_m = 25.000 \times 0,8 \times 1,0 \times 1,1 = 22 \text{ kA}$$

3.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE DO SOLO

Para calcular a resistividade elétrica aparente do solo (ρ_a), primeiramente é necessário calcular o raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento e o coeficiente de penetração (α) para que finalmente se possa calcular a resistividade elétrica aparente do solo.

O raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento é dado pela Equação (4) e considerando que a malha de aterramento será retangular 15x12 podemos calcular tal raio.

$$r = \sqrt{\frac{15 \times 12}{\pi}} = 7,57 \text{ m}$$

Como a razão entre a resistividade elétrica da segunda camada e da primeira camada é 0,5 e a razão entre a profundidade da malha e a profundidade da primeira camada é 0,12, então o coeficiente de penetração (α) pode ser calculado pela Equação (6), com a espessura da primeira camada saindo da Tabela 3.1, isto é, 5 m.

$$\alpha = \frac{7,57}{5} \cong 1,5$$

De posse do coeficiente de penetração (α) e da razão entre a resistividade elétrica da primeira e segunda camadas, pode-se então extrair o valor de ‘ N ’ com o auxílio da Figura 2.6, sendo ele 0,9. Com esse valor calcula-se a resistividade elétrica aparente do solo (ρ_a) utilizando para tal a Equação (7) e sabendo-se que a resistividade elétrica da primeira camada é igual a 200 $\Omega.m$.

$$\rho_a = 0,9 \times 200 = 180 \Omega.m$$

3.4 CÁLCULO PRELIMINAR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

De posse da resistividade elétrica aparente do solo (ρ_a), 180 $\Omega.m$, e do raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento (r), 7,57 m, pode-se então calcular a resistividade elétrica preliminar inerente à malha de aterramento (R) de forma a observar se deverá ser feito algum tipo de ajuste em qualquer um dos parâmetros para se melhorar tal fator. Com isso, utiliza-se a Equação (8) para tal.

$$R = \frac{180}{4 \times 7,57} = 5,94 \Omega$$

3.5 DIMENSIONAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DOS CONDUTORES HORIZONTAIS

Foi definido, nas premissas, que será utilizada solda exotérmica, cuja constante K_f é igual à 3,8, para todo e qualquer tipo de conexão, então com o auxílio da Tabela 2.7 e de posse da Equação (12), pode-se determinar a seção mínima dos condutores horizontais (S) para que eles possam suportar a corrente que irá escoar para a malha de aterramento (I_m), 22 kA, durante o tempo total de eliminação da falta (t), 0,5 s. Aqui vale ressaltar que a corrente que está sendo utilizada é a de malha, visto que ela é efetivamente a corrente que os condutores poderão ser submetidos.

$$S = 22 \times 3,8 \times \sqrt{0,5} = 59,11 \text{ mm}^2$$

Tendo em vista que não existe condutor utilizado para aterramento com seção de 60 mm², então deve-se utilizar o condutor imediatamente superior comercialmente vendido, que é o de 70 mm² com diâmetro externo do cabo (d) de 10,6 mm.

3.6 CORRENTES DE CHOQUE DE LONGA E DE CURTA DURAÇÃO ADMISSÍVEIS

A corrente máxima admissível de longa duração (I_{chld}) para dimensionamento da malha de aterramento aqui utilizada será de 6 mA devido ao fato de que se pode garantir que tanto os homens como as mulheres podem ser expostos a tal corrente sem experimentar fibrilação ventricular.

De posse do tempo de atuação da proteção (t), 0,5 s, a corrente máxima admissível de curta duração pode ser calculada pela Equação (13).

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{0,5}} \cong 164 \text{ mA}$$

3.7 TENSÕES DE PASSO E TOQUE ADMISSÍVEIS

Antes de se calcular as tensões de toque e passo admissíveis deve-se primeiro calcular o Fator de redução (C), a resistência própria de cada pé (R_p) e a resistência mútua entre os pés (R_{mp}) de forma a se obter os parâmetros necessários para calcular as tensões admissíveis.

De posse da resistividade elétrica da primeira camada do solo (ρ_l), 200 Ω .m, da resistividade elétrica da camada de recobrimento do solo (ρ_s), 140 k Ω .m, e da espessura da mesma (h_s), 0,15 m, torna-se possível calcular o Fator de redução (C) pela Equação (18).

$$C \cong 1 - 0,106 \times \left[\frac{1 - \frac{200}{140000}}{2 \times 0,15 + 0,106} \right] \cong 0,74$$

Obtido o Fator de redução (C), calcula-se a resistência própria de cada pé (R_p) através da aplicação direta da Equação (16).

$$R_p = \left(\frac{140000}{4 \times 0,083} \right) \times 0,74 \cong 312 \text{ k}\Omega$$

Então,

$$R_{mp} = \left(\frac{140000}{2 \times \pi \times 312k} \right) \cong 71 \text{ m}\Omega$$

Com isso, pode-se finalmente calcular a tensão de passo para curta (E_{pcd}) e longa duração (E_{pld}) através da aplicação das Equações (14) e (15), respectivamente, onde a máxima corrente de curta duração admissível (I_{chcd}) é 164 mA e a máxima corrente de longa duração admissível (I_{chld}) é 6 mA.

- Para curta duração:

$$E_{pcd} = [1000 + 2 \times (312k - 71m)] \times 0,164 \cong 102,5 \text{ kV}$$

- Para longa duração:

$$E_{pld} = [1000 + 2 \times (312000 - 0,071)] \times 0,006 \cong 3,75 \text{ kV}$$

E para se obter a tensão de toque para curta e longa duração, aplicam-se as Equações (21) e (23), respectivamente.

- Para curta duração:

$$E_{tcd} = (1000 + 1,5 \times 140000 \times 0,74) \times 0,164 \cong 26 \text{ kV}$$

- Para longa duração:

$$E_{tld} = (1000 + 1,5 \times 140000 \times 0,74) \times 0,006 \cong 938 \text{ V}$$

3.8 DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO

Calculados todos os parâmetros básicos necessários para o dimensionamento da malha de aterramento, pode-se então dar prosseguimento à definição da sua geometria, calculando as tensões de toque e passo e então compará-las com as admissíveis.

Na Figura 3.2 podem ser observados os eixos traçados para plotar os gráficos das tensões de toque e passo, onde P1 é o eixo horizontal e P2 é o eixo na diagonal.

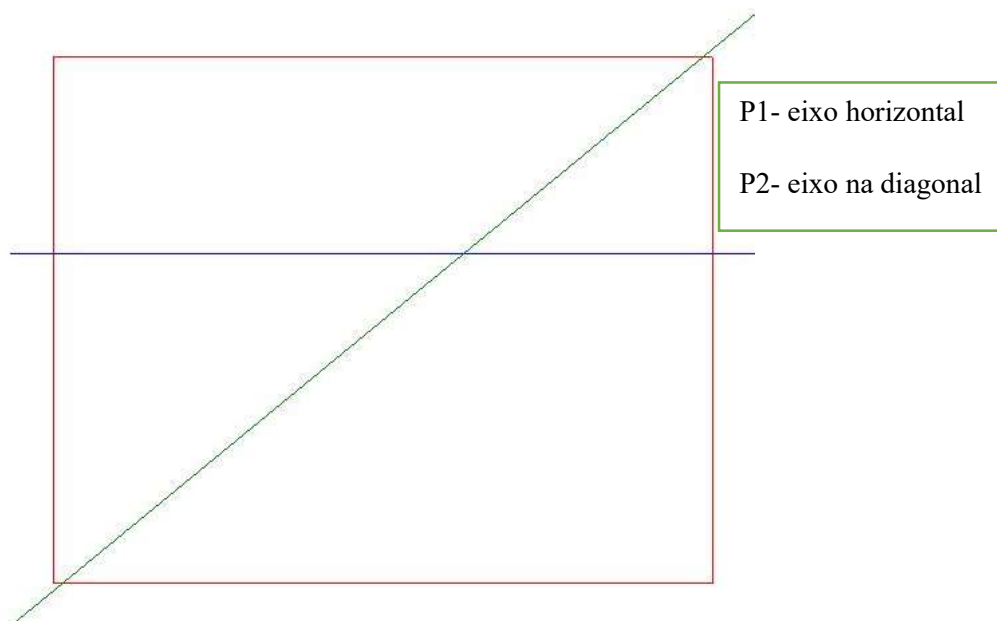


Figura 3.2 - Eixos utilizados para plotar os gráficos das tensões de toque e passo.

Fonte: o autor.

3.8.1 Primeiro *Design*

Como primeiro *design* da malha de aterramento, optou-se pelo desenho mais simples possível, onde a malha só circunda a subestação e não possui hastes de aterramento, como pode ser visto na Figura 3.3.

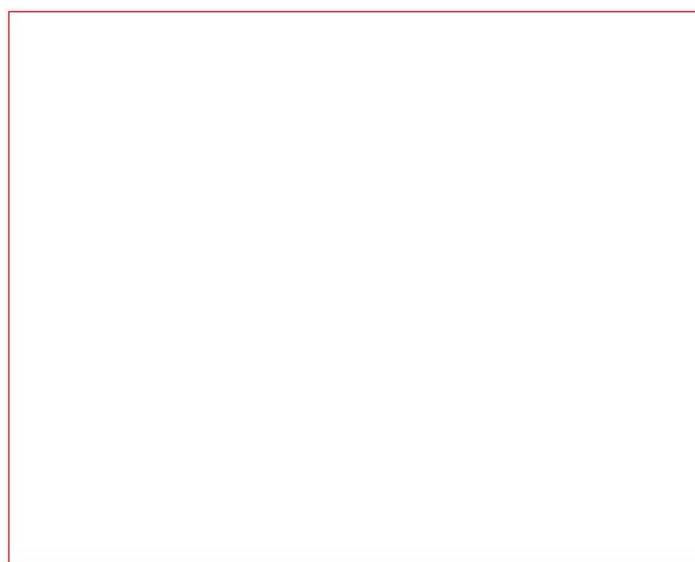


Figura 3.3 – Primeiro *design* da malha de aterramento.

Fonte: o autor.

De posse das premissas iniciais estabelecidas e do *design* da malha de aterramento, podem-se calcular a resistência e as tensões de toque e de passo, através das Equações (10), (33) e (36), respectivamente. Onde a resistividade aparente do solo (ρ_a) é 180 Ω .m, o comprimento total dos condutores enterrados (L_t) é 54 m, a área ocupada pela malha (A) é de 180 m² e a malha está enterrada a uma profundidade H de 0,6 m.

$$R = 180 \left\{ \left(\frac{1}{54} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \times 180}} \right) \times \left[1 + \left(\frac{1}{1 + 0,6 \sqrt{\frac{20}{180}}} \right) \right] \right\} \cong 8,83 \Omega$$

Ao se inserir os mesmos dados no *software* TecAt Plus 6.3, obtém-se 7,05 Ω como valor para a resistência da malha de aterramento, um valor bem próximo do calculado, uma vez que a resistência da malha foi calculada através de equações simplificadas.

Para calcular a tensão de toque, primeiramente é necessário calcular os fatores de correção K_m e K_i . Onde a distância entre os condutores em paralelo (D) é de 15 m, o diâmetro dos condutores horizontais (d) é 0,01 m e o fator de correção k_{ii} é igual a 0,25.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{15^2}{16 \times 0,6 \times 0,01} + \frac{(15 + 2 \times 0,6)^2}{8 \times 15 \times 0,01} - \frac{0,6}{4 \times 0,01} \right) + \frac{0,25}{\sqrt{1 + 0,6}} \ln \left(\frac{8}{\pi(4 - 1)} \right) \right] \cong 1,24$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times \frac{2 \times 54}{54} \times \sqrt{\frac{54}{4 \times \sqrt{180}}} \cong 0,94$$

Com K_m e K_i , pode-se finalmente calcular a tensão de toque inerente à malha de aterramento.

$$V_t = \frac{180 \times 22000 \times 1,24 \times 0,94}{54} \cong 85 \text{ kV}$$

Comparativamente, o *software* nos fornece o gradiente de tensão ao longo da malha de aterramento. A tensão de toque ao longo da malha para o primeiro *design* pode ser vista na Figura 3.4.

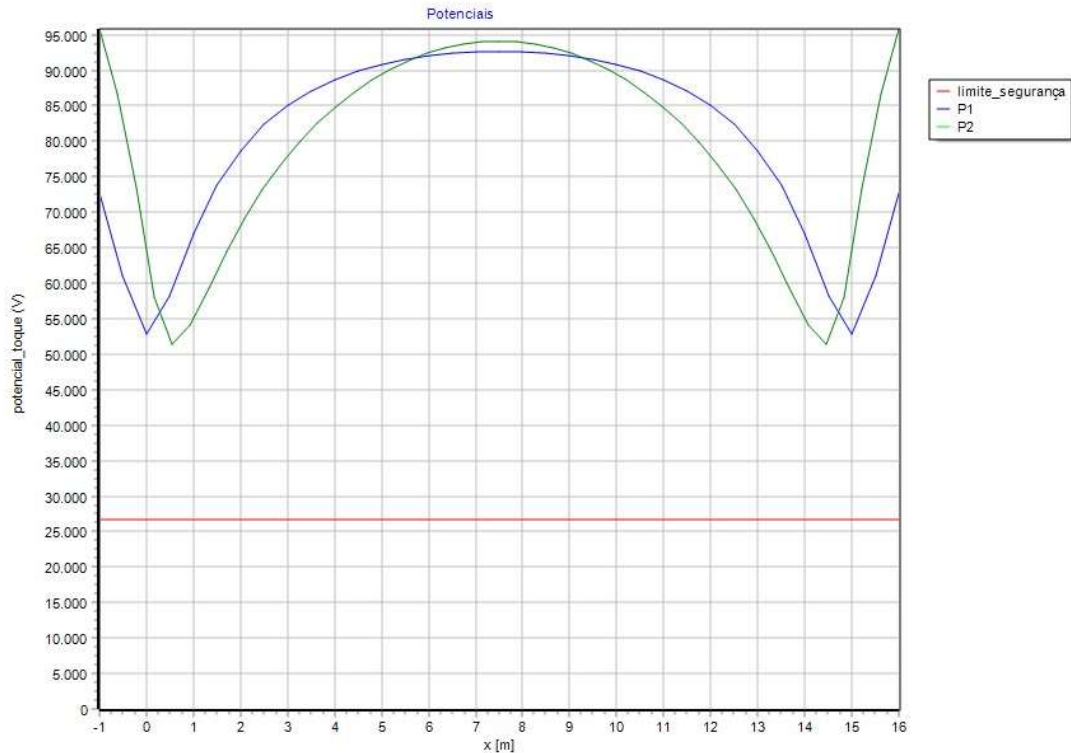


Figura 3.4 - Distribuição do potencial de toque ao longo da malha para o primeiro *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

Para calcular a tensão de passo, primeiramente é necessário calcular o fator de correção K_s . Onde a distância entre os condutores em paralelo (D) é de 15 m e a profundidade H em que a malha está enterrada é de 0,6 m.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0,6} + \frac{1}{15 + 0,6} + \frac{1}{15} (1 - 0,5^{2-2}) \right] \cong 0,29$$

Com K_s , pode-se finalmente calcular a tensão de passo inerente à malha de aterramento. Onde a resistividade aparente do solo (ρ_a) é 180 Ω .m, a corrente de malha (I_m) é 22 kA e o comprimento total dos condutores na horizontal (L_c) é de 54 m.

$$V_p = \frac{180 \times 22000 \times 0,29 \times 0,94}{0,75 \times 54} \cong 26 \text{ kV}$$

A tensão de passo ao longo da malha para o primeiro *design* pode ser vista na Figura 3.5.

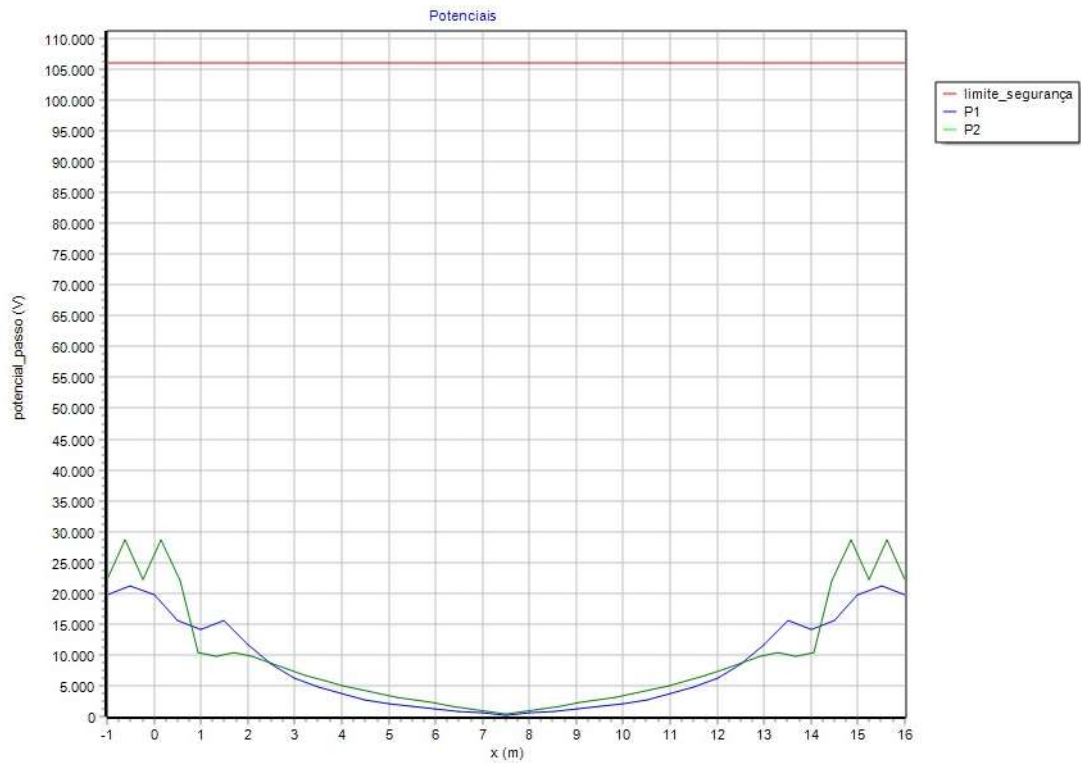


Figura 3.5 - Distribuição do potencial de passo ao longo da malha para o primeiro *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

É possível observar o gradiente de tensão da superfície do solo na Figura 3.6, onde a Figura 3.4 representa um corte da mesma respeitando-se os eixos definidos pela Figura 3.2.

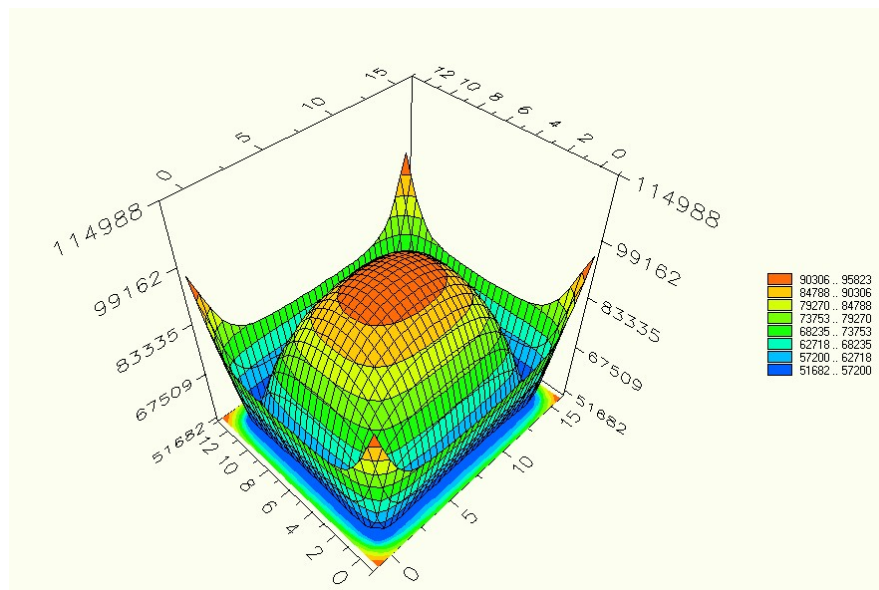


Figura 3.6 - Distribuição do gradiente de tensão da superfície do solo para o primeiro *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

Na Tabela 3.2 estão expostos os valores permissíveis, os calculados diretamente através das equações e os obtidos através do uso do *software* TecAt Plus 6.3.

Tabela 3.2 – Valores obtidos para o primeiro *design*.

PARÂMETRO	PERMISSÍVEIS	CALCULADO	SIMULADO (MÁX)
Resistência de Aterramento - R	10 Ω	8,83 Ω	7,05 Ω
Tensão de Toque - V_t	26 kV	85 kV	95 kV
Tensão de Passo - V_p	102,5 kV	26 kV	29 kV

Fonte: o autor.

É notório que um novo *design* deve ser proposto já que o aqui analisado não atende ao critério de tensão de toque mesmo que satisfaça os critérios de resistência de aterramento e tensão de passo.

3.8.2 Segundo *Design*

Como segundo *design* da malha de aterramento, optou-se pela adição de hastes de aço cobreado de $\frac{3}{4}$ polegada de espessura e 3 metros de comprimento nos vértices da malha, como pode ser visto na Figura 3.7.



Figura 3.7 – Segundo *design* da malha de aterramento.

Fonte: o autor.

De posse das premissas iniciais estabelecidas e do *design* da malha de aterramento, podem-se calcular a resistência e as tensões de toque e de passo, através das Equações (10), (33) e (36), respectivamente. Onde a resistividade aparente do solo (ρ_a) é 180 Ω .m, o comprimento total dos condutores enterrados (L_t) é 66 m, a área ocupada pela malha (A) é de 180 m² e a malha está enterrada a uma profundidade H de 0,6 m.

$$R = 180 \left\{ \left(\frac{1}{54+12} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \times 180}} \right) \times \left[1 + \left(\frac{1}{1+0,6 \sqrt{\frac{20}{180}}} \right) \right] \right\} \cong 8,23 \Omega$$

Ao se inserir os mesmos dados no *software* TecAt Plus 6.3, obtém-se 5,60 Ω como valor para a resistência da malha de aterramento, um valor bem próximo do calculado, uma vez que a resistência da malha foi calculada através de equações simplificadas.

Para se calcular a tensão de toque, primeiramente é necessário calcular os fatores de correção K_m e K_i . Onde a distância entre os condutores em paralelo (D) é de 15 m, o diâmetro dos condutores horizontais (d) é 0,01 m e o fator de correção k_{ii} é unitário.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{15^2}{16 \times 0,6 \times 0,01} + \frac{(15 + 2 \times 0,6)^2}{8 \times 15 \times 0,01} - \frac{0,6}{4 \times 0,01} \right) + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,6}} \ln \left(\frac{8}{\pi(4 - 1)} \right) \right] \cong 1,2$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times \frac{2 \times 54}{54} \times \sqrt{\frac{54}{4 \times \sqrt{180}}} \cong 0,94$$

Com K_m e K_i pode-se, finalmente, calcular a tensão de toque inerente à malha de aterramento.

$$V_t = \frac{180 \times 22000 \times 1,2 \times 0,94}{54 + \left[1,55 + 1,22 \times \left(\frac{3}{\sqrt{15^2 + 12^2}} \right) \right] \times 12} \cong 60 \text{ kV}$$

Comparativamente, o *software* nos fornece o gradiente de tensão ao longo da malha de aterramento. A tensão de toque ao longo da malha para o segundo *design* pode ser vista na Figura 3.9, onde pode-se observar que houve uma melhora significativa em

relação ao *design* anterior - Figura 3.8, visto que as curvas estão mais próximas do limite de segurança.

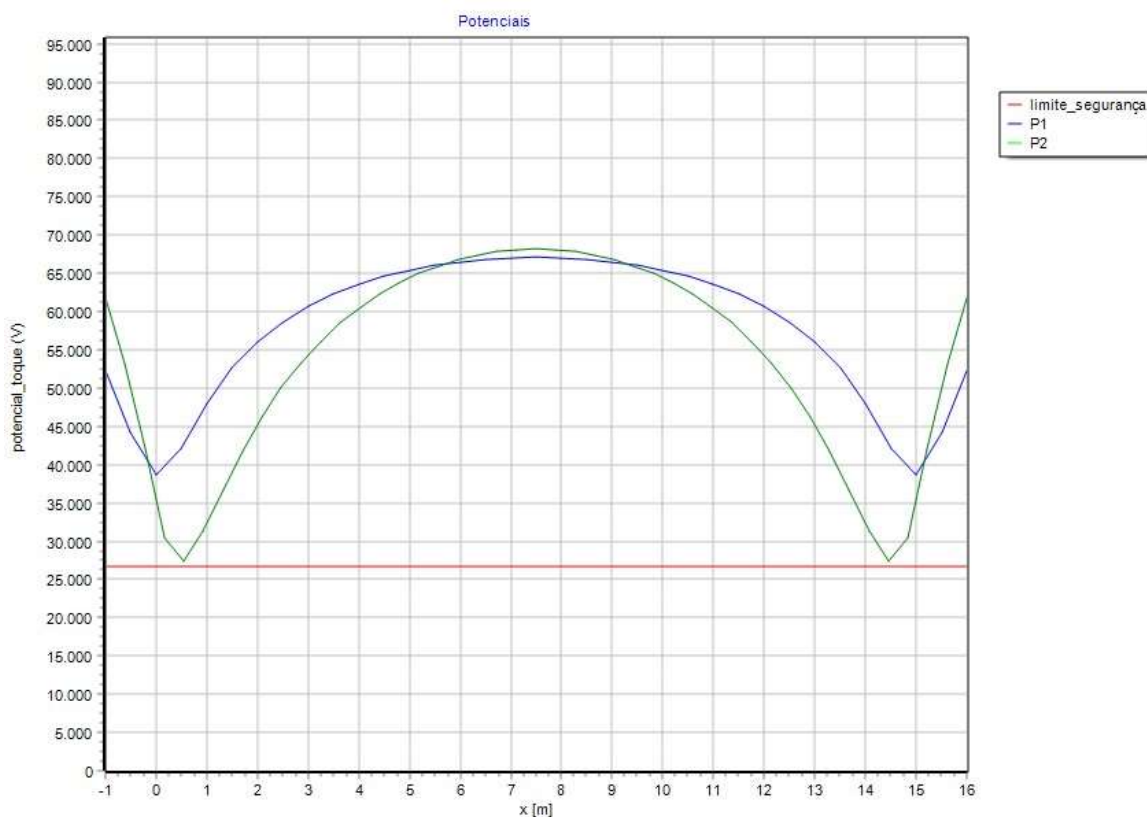


Figura 3.9 - Distribuição do potencial de toque ao longo da malha para o segundo *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

Para calcular a tensão de passo, primeiramente é necessário se calcular o fator de correção K_s . Onde a distância entre os condutores em paralelo (D) é de 15 m e a profundidade H em que a malha está enterrada é de 0,6 m.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0,6} + \frac{1}{15 + 0,6} + \frac{1}{15} (1 - 0,5^{2-2}) \right] \cong 0,29$$

Com K_s , pode-se finalmente calcular a tensão de passo inerente à malha de aterramento. Onde a resistividade aparente do solo (ρ_a) é 180 Ω .m, a corrente de malha (I_m) é 22 kA, o comprimento total dos condutores na horizontal (L_c) é de 54 m e o comprimento total das hastes de aterramento (L_R) é de 12 m.

$$V_p = \frac{180 \times 22000 \times 0,29 \times 0,94}{0,75 \times 54 + 0,85 \times 12} \cong 21 \text{ kV}$$

A tensão de passo ao longo da malha para o primeiro *design* pode ser vista na Figura 3.10, onde, pode-se observar que a adição das hastes de aterramento acarretou em uma melhora pouca significativa em relação ao *design* anterior, pois o primeiro já atendia os critérios estabelecidos.

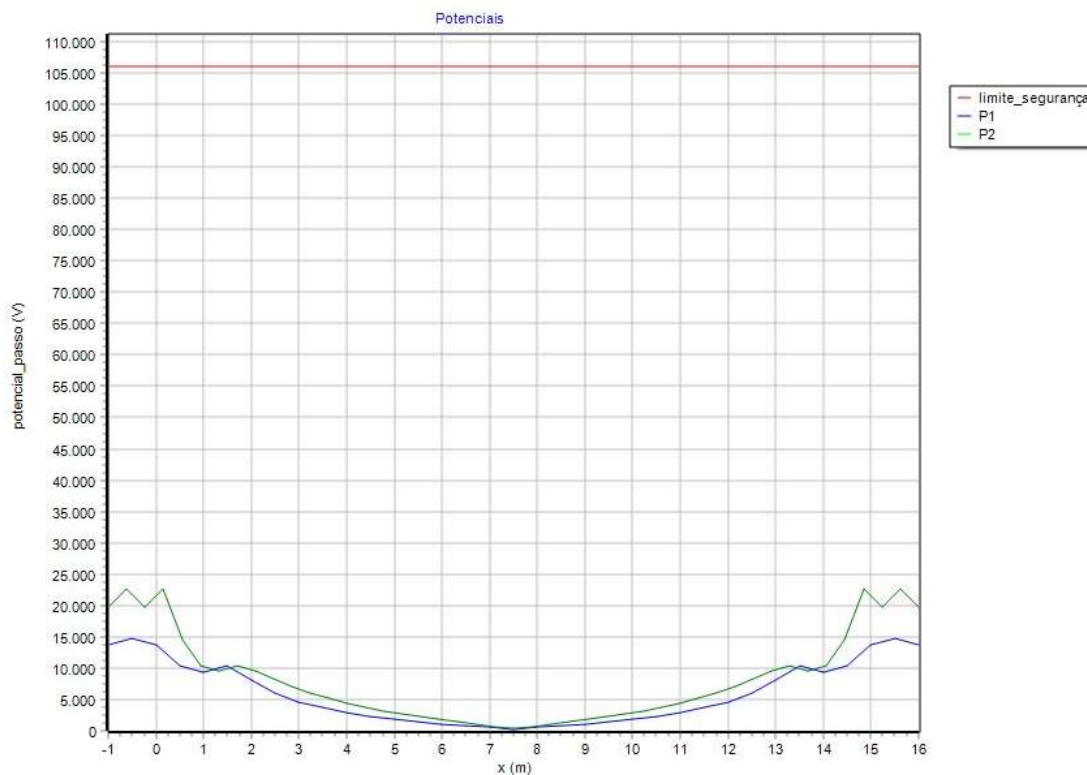


Figura 3.10 -Distribuição do potencial de passo ao longo da malha para o segundo *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

É possível observar o gradiente de tensão da superfície do solo na Figura 3.11, onde a Figura 3.9 representa um corte da mesma respeitando-se os eixos definidos pela Figura 3.2.

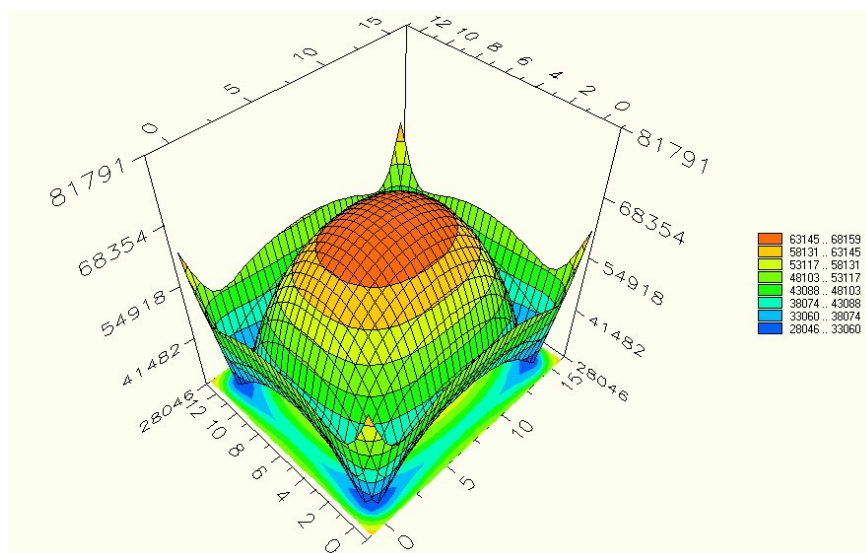


Figura 3.11 - Distribuição do gradiente de tensão da superfície do solo para o segundo *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

Na Tabela 3.3 estão expostos os valores permissíveis, os calculados diretamente através das equações e os obtidos através do uso do *software* TecAt Plus 6.3.

Tabela 3.3 – Valores obtidos para o segundo *design*.

PARÂMETRO	PERMISSÍVEIS	CALCULADO	SIMULADO (MÁX)
Resistência de Aterramento - R	10 Ω	8,23 Ω	5,60 Ω
Tensão de Toque - V_t	26 kV	60 kV	69 kV
Tensão de Passo - V_p	102,5 kV	21 kV	24 kV

Fonte: o autor.

É notório que um novo *design* deve ser proposto já que o aqui analisado não atende ao critério de tensão de toque.

3.8.3 Terceiro *Design*

Como terceiro *design* da malha de aterramento, optou-se pela adição de hastes de aço cobreado de $\frac{3}{4}$ polegada de espessura e 3 metros de comprimento nas extremidades da malha e adicionaram-se alguns condutores paralelos como pode ser visto na Figura 3.12.

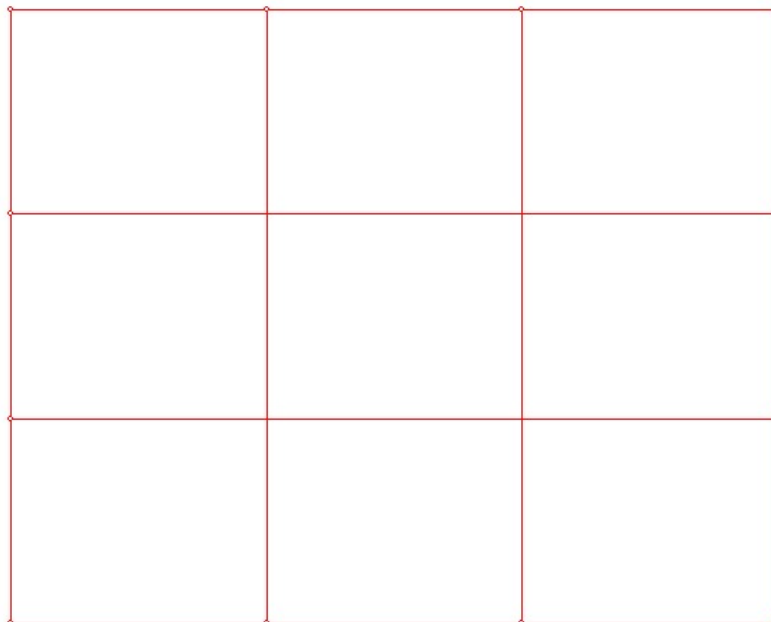


Figura 3.12 – Terceiro *design* da malha de aterramento.

Fonte: o autor.

De posse das premissas iniciais estabelecidas e do *design* da malha de aterramento, podem-se calcular a resistência e as tensões de toque e de passo, através das Equações (10), (33) e (36), respectivamente. Onde a resistividade aparente do solo (ρ_a) é 180 Ω .m, o comprimento total dos condutores enterrados (L_t) é 144 m, a área ocupada pela malha (A) é de 180 m² e a malha está enterrada a uma profundidade H de 0,6 m.

$$R = 180 \left\{ \left(\frac{1}{108 + 36} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \times 180}} \right) \times \left[1 + \left(\frac{1}{1 + 0,6 \sqrt{\frac{20}{180}}} \right) \right] \right\} \cong 6,75 \Omega$$

Ao se inserir os mesmos dados no *software* TecAt Plus 6.3, obtém-se 3,96 Ω como valor para a resistência da malha de aterramento, um valor bem próximo do calculado, uma vez que a resistência da malha foi calculada através de equações simplificadas.

Para calcular a tensão de toque, primeiramente é necessário calcular os fatores de correção K_m e K_i . Onde a distância entre os condutores em paralelo (D) é de 5 m, o diâmetro dos condutores horizontais (d) é 0,01 m e o fator de correção k_{ii} é unitário.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{5^2}{16 \times 0,6 \times 0,01} + \frac{(5 + 2 \times 0,6)^2}{8 \times 5 \times 0,01} - \frac{0,6}{4 \times 0,01} \right) + \frac{1}{\sqrt{1 + 0,6}} \ln \left(\frac{8}{\pi(8 - 1)} \right) \right] \cong 0,8$$

$$K_i = 0,644 + 0,148 \times \frac{2 \times 108}{54} \times \sqrt{\frac{54}{4 \times \sqrt{180}}} \cong 1,24$$

Com K_m e K_i , pode-se finalmente calcular a tensão de toque inerente à malha de aterramento.

$$V_t = \frac{180 \times 22000 \times 1,24 \times 0,8}{108 + \left[1,55 + 1,22 \times \left(\frac{3}{\sqrt{15^2 + 12^2}} \right) \right] \times 36} \cong 23 \text{ kV}$$

Comparativamente, o *software* nos fornece o gradiente de tensão ao longo da malha de aterramento. A tensão de toque ao longo da malha para o terceiro *design* pode ser vista na Figura 3.13, onde pode-se observar que houve uma melhora significativa em relação ao *design* anterior atendendo ao critério máximo de tensão de toque.

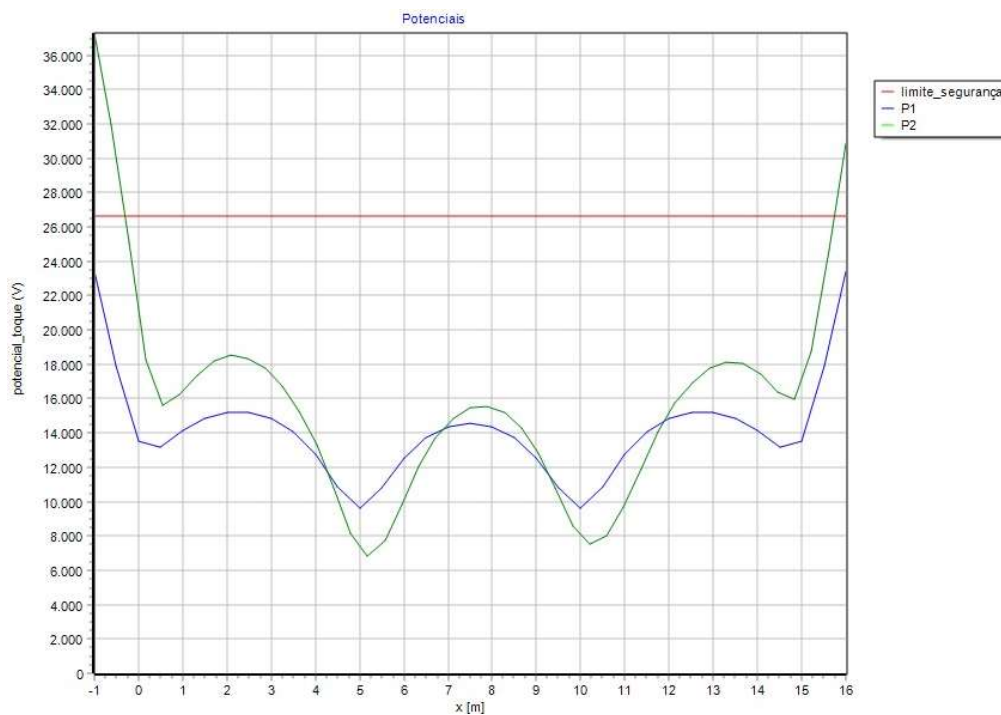


Figura 3.13 - Distribuição do potencial de toque ao longo da malha para o terceiro *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

Para calcular a tensão de passo, primeiramente é necessário calcular o fator de correção K_s . Onde a distância entre os condutores em paralelo (D) é de 5 m e a profundidade H em que a malha está enterrada é de 0,6 m.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0,6} + \frac{1}{5 + 0,6} + \frac{1}{5} (1 - 0,5^{4-2}) \right] \cong 0,37$$

Com K_s , pode-se finalmente calcular a tensão de passo inerente à malha de aterramento. Onde a resistividade aparente do solo (ρ_a) é 180 Ω .m, a corrente de malha (I_m) é 22 kA, o comprimento total dos condutores na horizontal (L_c) é de 108 m e o comprimento total das hastes de aterramento (L_R) é de 36 m.

$$V_p = \frac{180 \times 22000 \times 0,37 \times 0,8}{0,75 \times 108 + 0,85 \times 36} \cong 11 \text{ kV}$$

A tensão de passo ao longo da malha para o terceiro *design* pode ser vista na Figura 3.14, na qual pode-se observar que a adição das hastes de aterramento e dos condutores paralelos acarretou uma melhora significativa em relação ao *design* anterior.

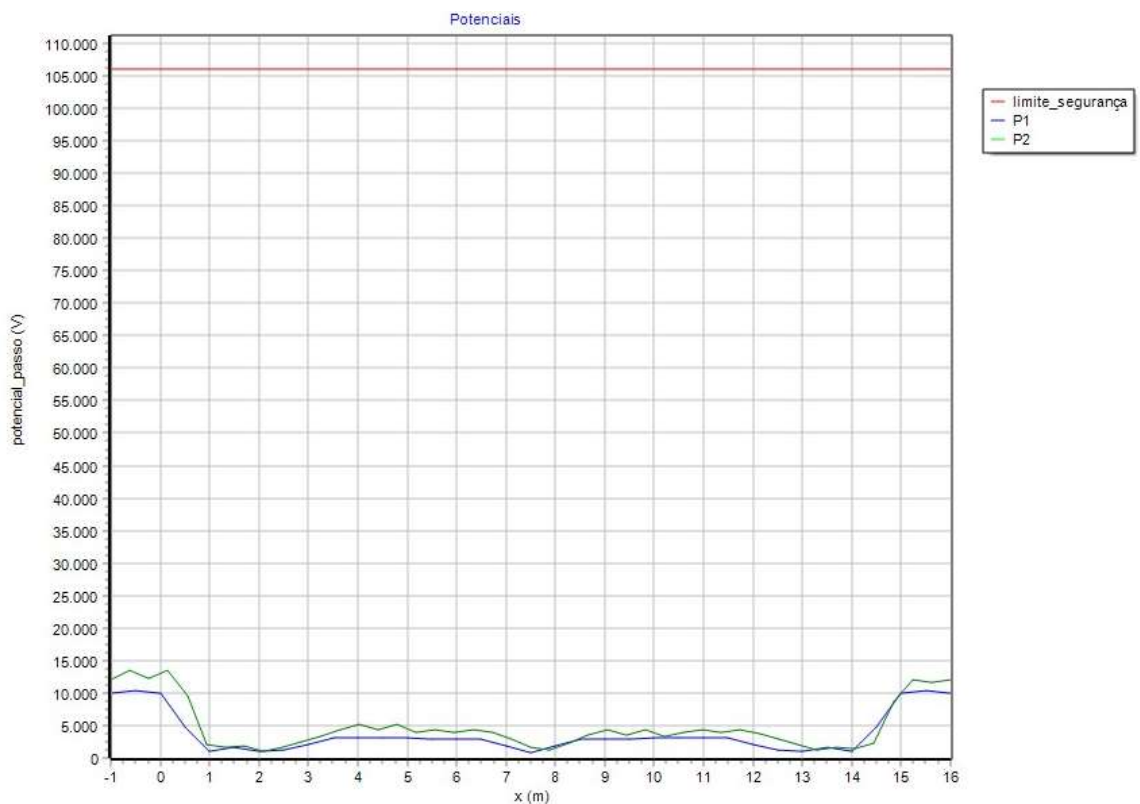


Figura 3.14 - Distribuição do potencial de passo ao longo da malha para o terceiro *design*.

É possível observar o gradiente de tensão da superfície do solo na Figura 3.15, onde a Figura 3.13 representa um corte da mesma respeitando-se os eixos definidos pela Figura 3.2.

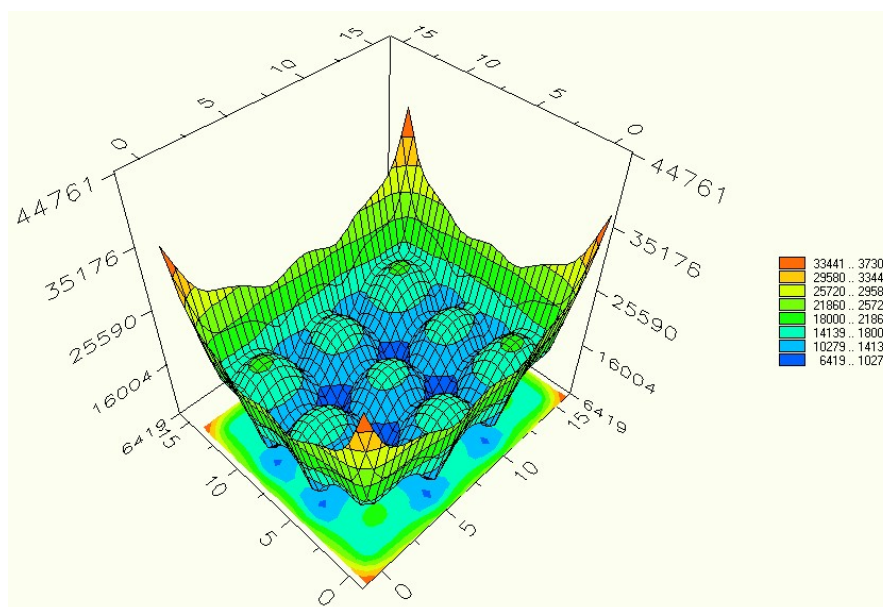


Figura 3.15 - Distribuição do gradiente de tensão da superfície do solo para o terceiro *design*.

Fonte: TecAt Plus 6.3

Na Tabela 3.4 estão expostos os valores permissíveis, os calculados diretamente através das equações e os obtidos através do uso do *software* TecAt Plus 6.3.

Tabela 3.4 – Valores obtidos para o terceiro *design*.

PARÂMETRO	PERMISSÍVEIS	CALCULADO	SIMULADO (MÁX)
Resistência de Aterramento - R	10 Ω	6,75 Ω	3,96 Ω
Tensão de Toque - V_t	26 kV	23 kV	19 kV
Tensão de Passo - V_p	102,5 kV	11 kV	14 kV

Fonte: o autor.

Vale ressaltar que a Figura 3.13 nos mostra que existem potenciais de toque perigosos nas extremidades da malha de aterramento, porém, não existe nenhuma estrutura metálicas ao redor da malha de aterramento, somente dentro dela. Sendo assim, o terceiro *design* para a malha de aterramento atende todos os critérios estabelecidos anteriormente.

4 CONCLUSÃO

É notória a importância do aterramento elétrico em qualquer sistema, visto que ele é de suma importância para que o sistema, como um todo, possa operar com qualidade e constância, atendendo os requisitos estabelecidos por normas técnicas nacionais e internacionais, visando a segurança de todos envolvidos em sua operação e manutenção.

Este estudo mostrou a importância do correto dimensionamento de uma malha de aterramento de uma subestação devido ao fato de que se isso for negligenciado, pode-se trazer consequências graves no que concerne à segurança com possibilidade de perdas de vidas humanas e econômicas.

O dimensionamento e a instalação correta de uma malha de aterramento garantem que as correntes de falta sejam escoadas para o solo de maneira adequada sem que prejudiquem os equipamentos instalados na planta e possam vir a causar lesão e/ou fatalidade às pessoas que se encontram dentro e no entorno da subestação.

Este projeto de fim de curso dissertou sobre o dimensionamento de uma malha de aterramento elétrico de uma subestação, onde foram retratados seus principais aspectos e meios que ela pode ser contemplada, juntamente com a caracterização do solo e as técnicas necessárias para tal: os componentes físicos que fazem parte do sistema de aterramento, como a haste de aterramento, os condutores horizontais de cobre nu, os conectores utilizados para se fazer a conexão entre os elementos da malha etc.; tratamentos utilizados para se alterar a resistividade do solo através de processos químicos e diversas técnicas e procedimentos para se ajustar os valores das tensões de toque e de passo para que se possa atender os critérios estabelecidos por norma. Também foram explanados os efeitos da corrente elétrica no corpo humanos, juntamente com os perigos e sequelas que ela possa vir a causar.

Ao se dimensionar a malha de aterramento notou-se que até para a configuração mais simples a tensão de passo era atendida e que o critério que influencia diretamente no *design* da malha é a tensão de toque. Uma vez adicionadas as hastes de aterramento nas extremidades da malha, locais onde a tensão de toque é mais elevada, observou-se uma melhora significativa na mesma, entendendo-se que não são necessárias hastes de aterramento no interior da malha, visto que os critérios de tensão de passo foram atendidos.

No último *design* aqui proposto, foram adicionados condutores paralelos tanto no eixo x como no eixo y, além de hastes de aterramento em todas as interseções dos condutores no perímetro mais externo. Com tais modificações foram observadas melhoras significativas na tensão de toque, tensão de passo e resistividade da malha de aterramento. Entretanto, foi observado que nas extremidades da malha o critério da tensão de toque não foi atendido. Porém, não foi preciso modificações no projeto, pois só se deve atender o critério da tensão de toque até um metro de distância de um elemento que está aterrado à malha. Nesse caso, tal elemento é a cerca metálica que circunda a subestação. Sendo assim, o terceiro e último *design* da malha de aterramento atendeu todos os critérios estabelecidos.

Importante ressaltar que os valores calculados diretamente através das fórmulas contidas nas normas não foram tão divergentes dos encontrados através de simulação usando-se o TecAt Plus 6.3. Então, uma vez que os *softwares* utilizados para esses cálculos são muito dispendiosos, os resultados obtidos através das aplicações diretas das fórmulas estabelecidas pelas normas são bastante satisfatórios.

4.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Levando-se em conta o tema dimensionamento de uma malha de aterramento de uma subestação elétrica, sugiro os seguintes temas para trabalhos futuros.

- Comparação entre os resultados obtidos através da norma brasileira NBR 15751 [5] e a norma americana IEE 80 [25].
- Estabelecimento de referências que possam ser utilizadas como parâmetros para comparação das malhas de aterramentos através do confronto dos resultados obtidos dos diversos *softwares* existentes no mercado.
- Análise da influência do comprimento da haste de aterramento nos valores obtidos para as tensões de toque e de passo.

Referência Bibliográfica

- [1] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5456 - Eletricidade Geral**, 2010.
- [2] _____, **NBR 5460 - Sistemas Elétricos de Potência**, 1992.
- [3] MTE - MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO, **Norma Regulamentadora NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**, 2016.
- [4] IEC - INTERNATIONAL ELECTRICAL COMMISSION, IEC 60479-1: **Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects**, 2018.
- [5] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751 - Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos**, 2013.
- [6] MORESI, E., **Metodologia da Pesquisa**. Material didático - Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação. Universidade Católica de Brasília - UCB, Brasília, DF, 2003.
- [7] GIL, A. C., **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**, 4ª ed. São Paulo, Editora Atlas S.A., 2002.
- [8] _____, **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**, 6ª ed. São Paulo, Editora Atlas S.A., 2008.
- [9] MARANGON, M., **Formação Geológica dos Solos**. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nugeo/files/2009/11/GF111-Formacao-Geologica-dos-Solos-2008.pdf>>. Acesso em 06/05/2019.
- [10] KINDERMANN, G. e CAMPGNOLO, J. M., **Aterramento Elétrico**, 6ª ed Florianópolis, UFSC, 2011.
- [11] KIZILO, M. e KANBERGS A., “The Causes of the Parameters Changes of Soil”, in **Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering**, v. 25, pp. 43-46, Jan. 2009.
- [12] VISACRO FILHO, S., **Aterramentos Elétricos**, 1ª ed. São Paulo, Artiliber Editora Ltda., 2015.
- [13] SAMADINASAB, S., NAMDARI, F. e BAKHSHIPOUR, M., “The Influence of Moisture and Temperature on the Behavior of Soil Resistivity in Earthing Design Using Finite Element Method”, in **Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science**, v. 2, nº 1, pp. 11-22, Abr. 2016.
- [14] WENNER, F., **A Method of Measuring Earth Resistivity**, Report nº. 258, vol. 12, Outubro, 1915.
- [15] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR - 7117 - Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo**, 2012.
- [16] _____, **NBR - 16254-1: Materiais para Sistemas de Aterramento Parte 1: Requisitos Gerais**, 2014.
- [17] FLEURY, N. e GUEDES, L., **Aplicações de Aterramento e Proteção de Sistemas Elétricos**, 2ª ed. Goiânia, London 7 Editora, 2015.
- [18] INTELLI, **Catálogo Geral de Produtos**, Orlândia, SP, 2019.
- [19] EXOSOLDA, **Catálogo de Produtos para SPDA - Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas**, São Paulo, SP, 2019.
- [20] KINDERMANN, G., **Curto-Circuito**, 6ª ed. Florianópolis, UFSC, 2018.

- [21] CREDER, H. , **Instalações Elétricas**, 15ª ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.
- [22] NEMÉSIO SOUSA, J., **Medidas de Segurança em Manutenção de Instalação Elétrica : Choque Elétrico e NR-10**. Material didático da disciplina de Manutenção de Equipamentos Elétricos, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2019.
- [23] A. e. H. J. E. GUYTON, **Tratado de Fisiologia Médica**. In: _____. Arritmias Cardíacas e sua Interpretação Eletrocardiográfica, Rio de Janeiro, RJ: Elsevier Editora Ltda, 2006, pp. 153-163.
- [24] DALZIEL, F. C., **Effects of Electric Shock on Man**, **IRE Transactions on Medical Electronics**, 1956.
- [25] IEEE - INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE Std 80-2013: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**, 2015.
- [26] AIEE WORKING GROUP ON SUBSTATION GROUNDING PRACTICES, “Application guide on methods of substation grounding”, **AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. 73, n° 2, pp. 271-278, 1954.
- [27] SVERAK, J. G., “Simplified analysis of electrical gradients above a ground grid; Part I — How good is the present IEEE method?” **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PER-4, n° 1, pp. 7-25, 1984.
- [28] THAPAR, B., GEREZ, V., BALAKRISHNAN, A., AND BLANK, D., “Simplified equations for mesh and step voltages in an AC substation”, **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 6, n° 2, pp. 601-607, 1991.
- [29] CRAWFORD, E. E GRIFFITH, M., “A closer look at ‘The facts of life’ in ground mat design”, **IEEE Transactions an Industry Applications**, v. IA-15, n° 3, pp. 241-250,1979.
- [30] YU, L., “Determination of induced currents and voltages in earth wires during faults”, **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 120, n° 6, pp. 601-607, 1991.
- [31] NVENT, **Catálogo de Material para Diminuição da Resistividade do Solo - GEM25A**, São Paulo, 2018.
- [32] ROSSI, M.. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**, São Paulo, Instituto Florestal, 2017.