UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM BAIXA TENSÃO

Tiago Figueira Leão Pinheiro

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento, Dr.Eng.

Rio de Janeiro

Abril de 2013

SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM BAIXA TENSÃO

Tiago Figueira Leão Pinheiro

PROJETO DE GRADUAÇÃO 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 A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovado por:

Prof. Jorge Luiz do Nascimento, Dr.Eng.

(Orientador)

Prof. Antonio Carlos Siqueira de Lima, D.Sc.

(Examinador)

Prof. Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D.Sc.

(Examinador)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2013

Pinheiro, Tiago Figueira Leão

Sistemas de Aterramento em Baixa Tensão/ Tiago Figueira Leão Pinheiro. - Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

XII, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Elétrica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 89-90.

1. Sistemas de Aterramento. 2. Choques Elétricos. 3. Segurança Pessoal. 4. Resistividade. 5. Solo. I. Nascimento, Jorge Luiz do. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Sistemas de Aterramento em Baixa Tensão.

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

Sistemas de Aterramento em Baixa Tensão

Tiago Figueira Leão Pinheiro

Abril/2013

Orientador: Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

Curso: Engenharia Elétrica

Os sistemas de aterramento são importantes no que diz respeito, principalmente, à segurança pessoal em relação a choques elétricos. Portanto, é fundamental que seja do conhecimento de todos saber como se proteger das correntes elétricas perigosas que podem, inclusive, levar pessoas a morte.

Neste trabalho serão apresentadas as diferentes técnicas de como fazer um sistema de aterramento de acordo com o local, o tipo de solo e a necessidade de proteção dos equipamentos. Também será falado de como tratar o solo de sistemas já existentes que possuam uma resistividade alta, melhorando o escoamento da corrente de falta. Ao final, serão feitos alguns estudos de caso.

Palavras chave: Sistemas de Aterramento, Choques Elétricos, Segurança Pessoal, Resistividade, Solo.

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

Grounding Systems in Low Voltage

Tiago Figueira Leão Pinheiro

April/2013

Advisor: Jorge Luiz do Nascimento, Dr. Eng.

Course: Electrical Engineering

Earthing systems are important with regard mainly to personal safety against electrical shocks. Therefore, it is essential that all know how to protect themselves from dangerous electrical currents that can even lead people to death.

This paper will present the different techniques of how to make a grounding system according to the site, the type of soil and the need for protective equipment. It will also be spoken of as treating the soil of existing systems that have a high resistivity, improving the flow of fault current. At the end, some will be done case studies.

Key words: Grounding Systems, Electrical Shocks, Personal Safety, Resistivity, Ground.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida, pela oportunidade de cada dia viver uma experiência diferente e apender com ela.

Agradeço a minha mãe e a minha avó por todo o apoio e paciência durante todo o período da faculdade e por nunca desistirem de mim como ser humano. Em especial a minha mãe que me ajudou na revisão desse trabalho.

Agradeço à Mariana pela convivência e paciência durante a fase final da minha graduação incluindo o projeto final e por saber me escutar nos momentos difíceis.

Ao professor Jorge Luiz do Nascimento pela orientação, disponibilidade, apoio e paciência tornando possível a realização desse trabalho.

Sumário

1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - RELEVÂNCIA DO TEMA 1

1.2 - MOTIVAÇÃO 1

1.3 - OBJETIVO 2

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO 2

2 - ASPECTOS GERAIS SOBRE ATERRAMENTO 4

2.1 - DEFINIÇÃO 4

2.2 - PORQUE DEVEMOS ATERRAR? 5

2.3 - TIPOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS 6

2.3.1 - Sistemas não aterrados 6

2.3.2 - Sistemas aterrados 7

2.4 - TIPOS DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO 8

2.5 - CLASSIFICAÇÃO DOS ESQUEMAS DE ATERRAMENTO EM BAIXA TENSÃO 8

2.5.1 - Esquema TT 10

2.5.2 - Esquema TN 11

2.5.3 - Esquema IT 13

2.6 - CONDUTOR DE PROTEÇÃO (PE) 15

2.7 - DISPOSITIVOS DIFERENCIAIS RESIDUAIS (DRS) 16

2.7.1 - Princípio de funcionamento 16

2.7.2 - Tipos de proteção do DR 18

2.7.3 - Aplicação dos dispositivos DR 19

3 - FIBRILAÇÃO VENTRICULAR PELO CHOQUE ELÉTRICO 21

3.1 - CHOQUE ELÉTRICO 21

3.2 - INFLUÊNCIA DO VALOR DA CORRENTE ELÉTRICA 22

3.3 - LIMITE DE CORRENTE PARA NÃO CAUSAR FIBRILAÇÃO 24

3.4 - POTENCIAL DE TOQUE 25

3.5 - POTENCIAL DE PASSO 26

4 - PROJETO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO 27

4.1 - LOCALIZAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO 28

4.2 - MEDIÇÕES NO LOCAL DO ATERRAMENTO 29
4.3 - MÉTODO DE WENNER 30
4.3.1 - Medição da resistividade do solo 31
4.3.2 - Fatores que influenciam na resistividade do solo 33
4.4 - ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO 34
4.4.1 - Modelagem do Solo em Duas Camadas 35
4.4.2 - Modelagem pelo Método Pirson 35
4.5 - DIMENSIONAMENTO DOS PRINCIPAIS SISTEMAS DE ATERRAMENTO EM RELAÇÃO A SUA RESISTIVIDADE APARENTE 36
4.5.1 - Dimensionamento de um sistema com uma haste vertical 37
4.5.2 - Dimensionamento de um sistema formado por hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas 40
4.5.3 - Dimensionamento de um sistema com hastes em triângulo 41
4.5.4 - Dimensionamento de um Sistema com hastes em quadrado vazio 43
4.5.5 - Dimensionamento de um Sistema com hastes em circunferência 43
4.6 - MALHA DE ATERRAMENTO 44
4.6.1 - Elementos de uma malha de terra 44
4.6.2 - Projeto de uma malha de terra 47
4.7 - TRATAMENTO QUÍMICO DO SOLO 54
4.7.1 - Tipos de tratamento químico 54
4.7.2 - Coeficiente de redução devido ao tratamento químico do solo (K_t) 56

5 - SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA) 57

5.1 - FORMAÇÃO DO RAIO 57
5.2 - MÉTODOS DE PROJETO DOS CAPTORES 61
5.2.1 - Modelo Eletrogeométrico 61
5.2.2 - Método de Franklin 63
5.2.3 - Método de Faraday 64
5.3 - INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA (EMI) 65
5.4 - DISPOSITIVO DE PROTEÇÃO CONTRA SURTOS (DPS) 67
5.4.1 - As diferentes classes de DPS 67
5.4.2 - Regra dos "50 cm" 68
5.4.3 - Localização do DPS 69

6 - ESTUDOS DE CASO 70

6.1 - PROJETO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UMA RESIDÊNCIA TÉRREA 70

6.1.1 - Aspectos construtivos 71

6.1.2 - Dimensionamento dos materiais utilizados 74

6.1.3 - Aterramento do chuveiro elétrico 75

6.1.4 - Aterramento dos eletrodomésticos 77

6.1.5 - Aterramento dos equipamentos em geral 78

6.2 - PROJETO DE UM SPDA PARA UM PRÉDIO RESIDENCIAL 78

6.2.1 - Aspectos construtivos 79

6.2.2 - Aterramento das estruturas do SPDA 83

6.3 - PROJETO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO DE UM LABORATÓRIO DE INFORMÁTICA 84

6.3.1 - Sistema de aterramento 85

6.3.2 - Instalação elétrica 86

7 - CONCLUSÃO 87

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 89

Lista de Figuras

Figura 1 - Barras de equipotencialização 7
Figura 2 - Esquema TT 10
Figura 3 - Esquema TN-S 12
Figura 4 - Esquema TN-C 12
Figura 5 - Esquema TN-C-S 13
Figura 6 - Esquema IT 14
Figura 7 - Esquema do DR 16
Figura 8 - Funcionamento do DR 18
Figura 9 - Proteção Básica 18
Figura 10 - Proteção Supletiva 19
Figura 11 - Disposição dos dispositivos DR 20
Figura 12 - Possíveis percursos da corrente elétrica pelo corpo humano 24
Figura 13 - Potencial de toque 25
Figura 14 - Potencial de passo 26
Figura 15 - Localização do aterramento entre a rede BT e o medidor de energia 28
Figura 16 - Esquema de ligação dos componentes para execução do método de Wenner 30
Figura 17 - Solo estratificado 34
Figura 18 - Curva ρ(d) x d 36
Figura 19 - Haste cravada verticalmente no solo 37
Figura 20 - Seção transversal da haste circular e em cantoneira 38
Figura 21 - Parâmetros das interferências entre as hastes "h" e “m" 39
Figura 22 - Hastes alinhadas em paralelo 40
Figura 23 - Triângulo equilátero 41
Figura 24 - Malha em triângulo 42
Figura 25 - Quadrado vazio 43
Figura 26 - Hastes em circunferência 43
Figura 27 - Elementos de uma malha de terra 47
Figura 28 - Projeto inicial de malha 50
Figura 29 - Valores típicos de K_t em função da resistividade 56
Figura 30 - Incidência de raios nas edificações 58
Figura 31 - Volume de proteção do SPDA 60

Figura 32 - Exemplo de proteção de uma estrutura pelo Método Eletrogeométrico..... 62
Figura 33 - Área protegida de uma descarga lateral 63
Figura 34 - Ilustração do Método de Franklin 64
Figura 35 - Influência da EMI nos sinais de transmissão (TX) e recepção (RX) 66
Figura 36 - Efeitos diretos e indiretos causados pelas descargas atmosféricas 68
Figura 37 - Esquema de ligação de um DPS em um circuito elétrico 69
Figura 38 - Haste de aterramento 72
Figura 39 - Conector de aterramento 72
Figura 40 - Caixa de inspeção 73
Figura 41 - Interligação entre o condutor de aterramento e o condutor neutro 73
Figura 42 - Barramento de terra 74
Figura 43 - Conexões elétricas do chuveiro 76
Figura 44 - Choque devido a corrente de fuga do chuveiro 77
Figura 45 - Fio de aterramento 77
Figura 46 - Malha formada pelos condutores de cobertura e descida 80
Figura 47 - Malha aplicada em cobertura pré-moldada..... 81
Figura 48 - Barra chata de alumínio 82
Figura 49 - Caixa de medição..... 82
Figura 50 - Localização da caixa de medição..... 83
Figura 51 - Laboratório de informática 84
Figura 52 - Quadros elétricos 85
Figura 53 - Pino de aterramento 86

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores de K 16
Tabela 2 - Efeitos da corrente no corpo humano 23
Tabela 3 - Resistividade dos solos 29
Tabela 4 - Espaçamentos recomendados 32
Tabela 5 - Eletrodos de aterramento convencionais 45
Tabela 6 - Classificação das estruturas referentes ao nível de proteção do SPDA 59
Tabela 7 - Posicionamento de captores conforme o nível de proteção 60
Tabela 8 - Potência aparente dos equipamentos elétricos 70
Tabela 9 - Espaçamento médio dos condutores de descida conforme o nível de proteção 79

1 - Introdução

1.1 - Relevância do tema

Os sistemas de aterramento foram criados para proteger pessoas, animais e materiais contra uma possível falha de um determinado sistema. Essa falha pode ser desde uma pequena fuga de corrente até um arco elétrico visível que pode vir a danificar um equipamento e ocasionar um incêndio numa situação grave.

A maior preocupação, de fato, é proteger a vida dos seres vivos evitando a exposição dos mesmos a potencias elétricos perigosos e que, quando expostos, possam estar devidamente protegidos.

Em segundo plano, um bom aterramento elétrico pode evitar que falhas elétricas atentem contra um bem material danificando equipamentos, estruturas, edificações e objetos de uso comum como um livro, por exemplo, resultando em gastos financeiros.

1.2 - Motivação

Este trabalho vem mostrar a grande importância que tem um sistema de aterramento, pois é um dos grandes responsáveis por manter a segurança das pessoas e dos equipamentos em áreas energizadas.

Muitas pessoas acreditam, por exemplo, que podem tocar em qualquer aparelho sem haver risco de choque, porém isso só será verdade caso exista um sistema de aterramento bem dimensionado.

Sendo assim, este trabalho visa orientar um cidadão comum e, até mesmo, um profissional eletricista sem uma formação especializada, como fazer um bom aterramento elétrico e quais os cuidados que devem ser tomados na ausência de um sistema desses.

1.3 - Objetivo

Os objetivos principais desse trabalho são: fornecer maior número possível de informações para se fazer um bom aterramento elétrico, ajudar a melhorar um sistema já existente, desmistificar alguns conceitos sobre o assunto e falar de aplicações equivocadas.

Para realizar este trabalho será apresentada uma revisão teórica dos principais conceitos referentes ao assunto abordado e, posteriormente, apresentados resultados de como é implementado o aterramento elétrico na prática e onde ele se aplica.

A importância desse estudo é proporcionar maior conhecimento por parte do leitor das práticas usuais de aterramento, fornecendo informações úteis, no dia a dia, capazes de manter um indivíduo em segurança contra correntes e potenciais perigosos.

1.4 - Organização do documento

A Introdução é apresentada no Capítulo 1. No Capítulo 2 são descritos os diferentes tipos de sistemas elétricos e de aterramento, os esquemas de aterramento empregados e os dispositivos auxiliares que trabalham em conjunto com o sistema de aterramento.

O Capítulo 3 descreve os riscos a que um ser humano ou animal fica quando exposto sob potencial elétrico perigoso e quais as consequências fisiológicas sofridas por esse mesmo indivíduo nessa situação.

O Capítulo 4 apresenta o projeto de um sistema de aterramento: localização, estratificação do solo, principais medições e métodos para o cálculo da sua resistividade, dimensionamento dos tipos de aterramento e tratamento químico do solo.

No Capítulo 5 é descrito o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA). Assuntos como a formação do raio, os modelos para projeto dos captores,

interferência eletromagnética (EMI) e os dispositivos de proteção contra surtos (DPS) são detalhados.

O Capítulo 6 tem um caráter mais prático, proporcionando ao leitor, uma visão da implementação de um projeto de aterramento. Nele, são apresentados resultados de alguns estudos de caso em forma de projeto mostrando, passo a passo, as atividades desenvolvidas.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as respectivas propostas para trabalhos futuros.

2 - Aspectos gerais sobre aterramento

2.1 - Definição

O aterramento é um sistema que tem a finalidade de prover um caminho seguro, controlado e de baixa impedância em direção à terra para proteger pessoas e animais da exposição a potenciais perigosos. Esse sistema visa também evitar danos e sinistros aos bens patrimoniais causados por correntes destrutivas produzidas pela falha dos isolamentos ou por conexões acidentais indevidas.

Pode ser constituído por uma simples barra ligada às estruturas de suporte das partes vivas[1] e carcaças dos equipamentos (massa) ou até por sistemas mais complexos, tal como uma rede de condutores paralelos e transversais formando uma malha. Essa malha é conectada ao conjunto de estruturas de suporte das instalações.

Dizer que um aparelho está aterrado ou eletricamente aterrado significa que suas partes condutivas, isoladas das partes vivas, estão conectadas a terra e tal conexão é feita, normalmente, por um cabo de aterramento ou de proteção ligado entre o aparelho e o eletrodo ou malha de aterramento.

Não é necessário que os sistemas elétricos estejam aterrados para funcionarem, mas a evolução histórica dos sistemas elétricos encaminhou as soluções de proteção desses sistemas para a condição de que as tensões fossem referenciadas à terra, definindo idealmente o ponto de aterramento como o ponto de potencial de referência zero.

[1] Partes vivas são partes de material condutor com finalidade de conduzir correntes elétricas ou de prover potenciais elétricos diferentes de zero.

2.2 - Porque devemos aterrar?

A superfície da Terra é eletricamente condutiva e mantida permanentemente em um potencial negativo por um circuito elétrico global. Este circuito tem três fontes geradoras principais: o Vento Solar, que penetra pela magnetosfera; o Vento da Ionosfera e as tempestades acompanhadas de descargas atmosféricas (raios).

Estima-se que milhares de descargas atmosféricas aconteçam diariamente no planeta emitindo, consequentemente, milhares de descargas elétricas por minuto. Isso gera uma corrente elétrica constante de milhares de ampères, que transfere cargas positivas para as camadas superiores da atmosfera e cargas negativas para a superfície da Terra. Assim, **a superfície do nosso planeta é uma abundante fonte de elétrons livres.**

Sendo assim, para que um sistema de energia elétrica opere corretamente, com segurança na proteção, qualidade e continuidade de serviço, é fundamental que o quesito aterramento elétrico seja considerado de maneira especial e com cuidado.

Esse cuidado deve ser levado em conta na hora de elaborar projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam considerados todas as condições a que o sistema possa ser submetido.

Os principais objetivos do aterramento elétrico são:

- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança reduzindo a possibilidade de choques graves ou desconfortáveis em pessoas e animais;
- Minimizar os danos materiais em equipamentos e nas linhas, em caso de falhas elétricas provocadas por deficiência ou falhas no isolamento das partes vivas;
- Obter um valor de resistência de aterramento o mais baixo possível a fim de descarregar cargas elétricas e correntes indevidas para a terra;
- Dar maior confiabilidade e rapidez na atuação dos sistemas de proteção.

Uma instalação elétrica de baixa tensão, por exemplo, deve estar protegida a fim de garantir o funcionamento adequado dos sistemas de proteção contra choques elétricos, sobretensões, descargas atmosféricas, descargas eletrostáticas e também dos equipamentos de tecnologia de informação como: computadores, centrais telefônicas, modems, controladores etc.

Aterramos também para simplificar o sistema de proteção dos sistemas elétricos.

O aterramento proporciona a interrupção do suprimento de energia de um circuito ou de todo o sistema elétrico de forma simples, rápida e precisa com a finalidade de isolar um defeito ou falha ocorrente, impedindo a propagação da falha e os consequentes danos materiais ou pessoais. Sem o aterramento, a proteção é feita de forma mais complexa e com maiores custos em dispositivos.

2.3 - Tipos de sistemas elétricos

2.3.1 - Sistemas não aterrados

Nesse tipo de sistema, uma falta fase-terra causaria apenas uma pequena corrente para a terra. No entanto, o sistema pode continuar em operação mesmo com a ocorrência da falha devido a não atuação da proteção. Sendo assim, os sistemas aterrados não são considerados confiáveis.

A corrente de “fuga” originada pela falha no sistema pode colocar em risco uma pessoa ao entrar em contato com uma parte normalmente não energizada da instalação.

As fugas de corrente ocorrem quando o fio fase está com a isolação dele danificada e faz contato com a terra através de uma parte metálica da instalação elétrica ou até mesmo de uma pessoa. Sendo assim, uma corrente de “fuga” fluirá por esse ponto podendo causar problemas à instalação, perda de energia provocada por essa fuga e choques elétricos.

Em baixa tensão, um sistema não aterrado pode causar o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos devido à ausência de um ponto de referência. Para contornar este tipo de problema, a NBR 5410 prevê o Barramento de Equipotencialização Principal (BEP) para a interligação dos elementos abrangidos pela equipotencialização.

Do ponto de vista econômico, é mais vantajoso, pois elimina os gastos com o sistema de aterramento.

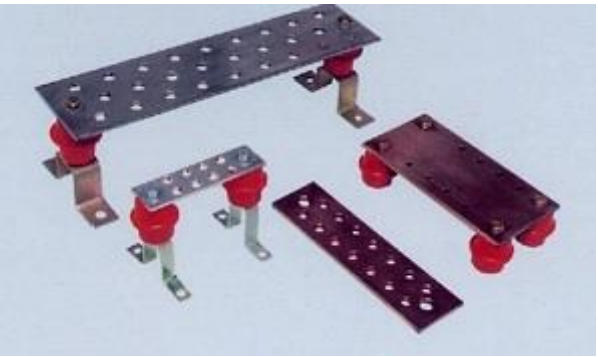


Figura 1 - Barras de equipotencialização

2.3.2 - Sistemas aterrados

Os sistemas aterrados garantem um caminho seguro para a corrente de falta em direção à terra, pois evita riscos de choque elétrico ou queima de equipamentos devido a uma sobrecorrente. Esse tipo de sistema é mais confiável que os sistemas não aterrados.

Porém, para projetar um sistema de aterramento, é necessário um estudo prévio do sistema elétrico em questão, levando em conta vários fatores como: resistividade aparente do solo, tipo de material utilizado para aterrar e o dimensionamento do sistema. Todo esse estudo gera custos, tornando mais cara a implementação deste tipo de sistema.

2.4 - Tipos de sistemas de aterramento

Os diversos tipos de sistemas de aterramento devem ser realizados de modo a garantir a melhor ligação com a terra.

Os principais tipos são:

- Uma simples haste cravada no solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulo;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculos;
- Placas de material condutor enterradas no solo;
- Fios ou cabos enterrados no solo, formando diversas configurações, tais como:
    - ✓ estendido em vala comum;
    - ✓ em cruz;
    - ✓ em estrela;
    - ✓ quadriculados, formando uma malha de terra.

O tipo de sistema de aterramento a ser adotado depende da importância do sistema elétrico envolvido, das características do local e do custo.

O sistema mais eficiente e também o mais caro é, evidentemente, a malha de terra.

2.5 - Classificação dos esquemas de aterramento em baixa tensão

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) possui uma norma que rege o campo de instalações elétricas em baixa tensão e utiliza a seguinte simbologia

para classificar os sistemas de aterramento em relação à alimentação e das massas em relação à terra:

1. Primeira letra: especifica a situação da fonte de alimentação em relação à terra:

    - **T-** um ponto diretamente aterrado;
    - **I-** isolação de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento de um ponto através de uma impedância elevada.

2. Segunda letra: especifica a situação das massas (carcaças) das cargas ou equipamentos em relação à terra:

    - **T-** massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual da fonte de alimentação;
    - **N-** massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado (em corrente alternada normalmente é o ponto neutro);
    - **I-** massa isolada, isto é, não aterrado.

3. Terceira letra: especifica a forma de ligação do aterramento da massa do equipamento, usando o sistema de aterramento da fonte:

    - **S-** separado, isto é, o aterramento da massa é feito com um fio (PE) separado (distinto) do neutro;
    - **C-** comum, isto é, o aterramento da massa do equipamento é feito usando o fio neutro (PEN).

2.5.1 - Esquema TT

Nesse sistema, um ponto (geralmente o centro da estrela em um sistema de baixa tensão ligado em estrela) da fonte é conectado diretamente à terra. Todas as partes metálicas expostas e todas as partes metálicas estranhas à instalação são ligadas a um eletrodo de terra separado na instalação. Nesse caso, o percurso de uma corrente fase-massa inclui a terra, o que limita em muito o valor da corrente devido ao elevado valor da resistência de terra.

Essa corrente é insuficiente para acionar dispositivos de proteção (disjuntores ou fusíveis), mas suficiente para colocar uma pessoa em perigo. Portanto, ela deve ser detectada e eliminada por dispositivos mais sensíveis, geralmente chamados de interruptores diferenciais residuais (DRs).

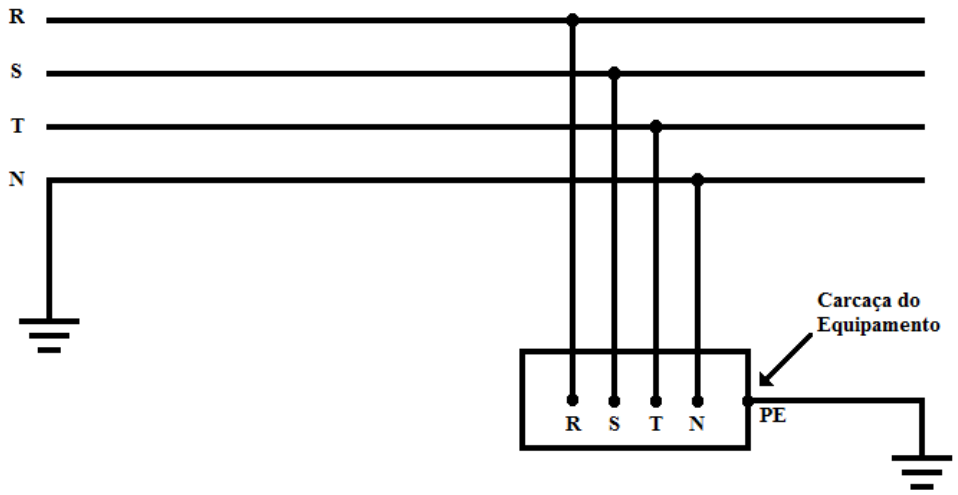


Figura 2 - Esquema TT

Todas as massas de uma instalação devem ser ligadas ao condutor de proteção. No entanto, a norma dispensa o uso do condutor de proteção nos circuitos de iluminação e tomadas em unidades residenciais.

2.5.2 - Esquema TN

Como no esquema TT, o neutro da fonte também é aterrado diretamente, estando todas as partes metálicas expostas e todas as partes metálicas não pertencentes à instalação ligadas a esse ponto por condutores metálicos.

Nesse caso, o percurso de uma corrente fase-massa possui uma impedância baixíssima e a corrente pode atingir valores elevados, suficientes para serem detectados e interrompidos por disjuntores ou fusíveis.

No esquema TN, podemos ter as seguintes variações:

1. **Esquema TN-S**

É comumente conhecido como sistema a cinco condutores. Neste caso, o condutor de proteção conectado à malha de terra na origem do sistema interliga todas as massas da instalação que são compostas, principalmente, pela carcaça dos equipamentos. O condutor de proteção é responsável pela condução das correntes de defeito entre fase e massa. As massas solidárias ao condutor de proteção (PE) podem sofrer sobretensões, devido à elevação de potencial no ponto de ligação com o neutro de sistema. Em sistemas com cabo enterrado onde exista uma capa de proteção de chumbo, o condutor de proteção é geralmente a capa de chumbo.

Essa configuração traz um aspecto relevante para a segurança pessoal, pois como as massas estão ligadas ao ponto aterrado da fonte diferente do neutro, elas mantêm o mesmo potencial, que é zero, submetendo o operador do equipamento a uma tensão de toque nula.

Outro aspecto positivo é que o cabo de proteção (PE) fica imune aos resíduos elétricos gerados pelos desequilíbrios das cargas e as harmônicas geradas pelas cargas lineares que escoam pelo condutor neutro.

A utilização de condutores separados N e PE é obrigatória para circuitos com seção inferior a 10 mm² para cobre e 16 mm² para alumínio e em equipamentos móveis.

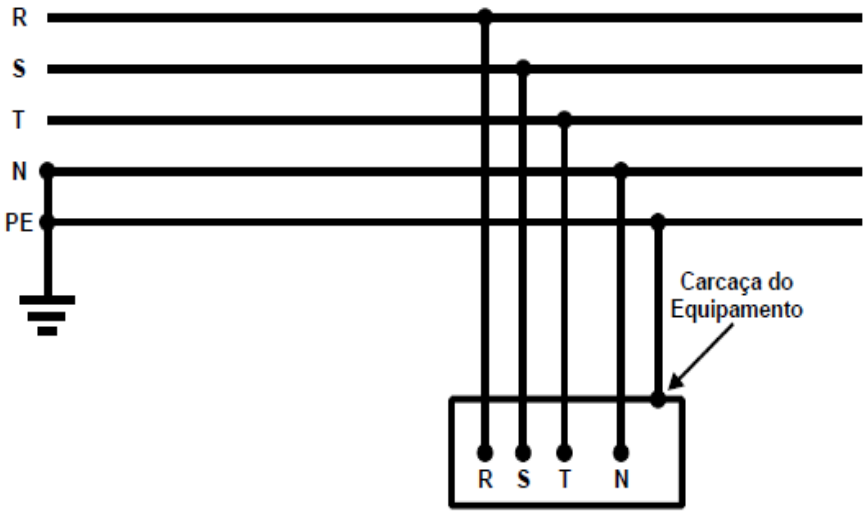


Figura 3 - Esquema TN-S

2. Esquema TN-C

O condutor neutro é utilizado também como condutor de proteção e designado como PEN (condutor de proteção + neutro). Nesse caso, diferentemente do esquema TN-S, as massas das cargas elétricas ficam submetidas a potenciais diferentes causadas pelas tensões geradas devido ao desequilíbrio das cargas e das harmônicas geradas pelas cargas não lineares.

Esse tipo de esquema não é permitido para condutores de seção inferior a 10 mm² e para equipamentos móveis.

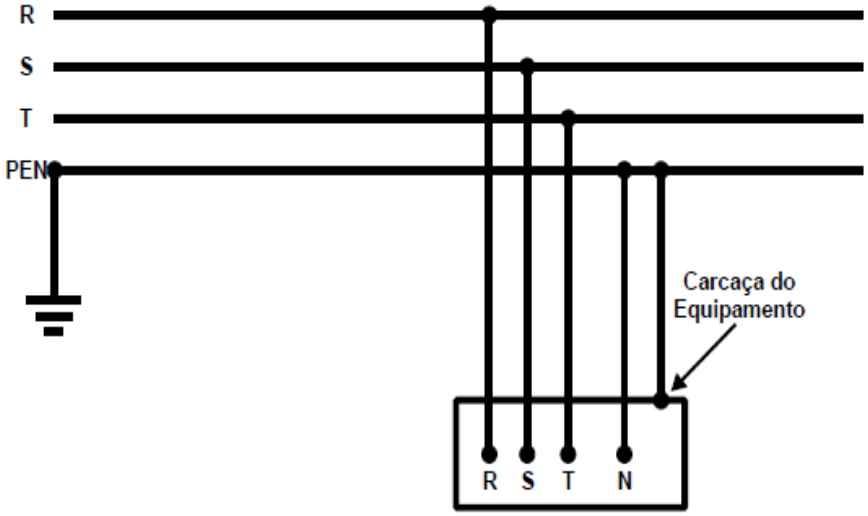


Figura 4 - Esquema TN-C

3. **Esquema TN-C-S**

A fonte de alimentação é aterrada, o equipamento tem o seu aterramento que usa um fio separado que, após certa distância, é conectado ao fio neutro.

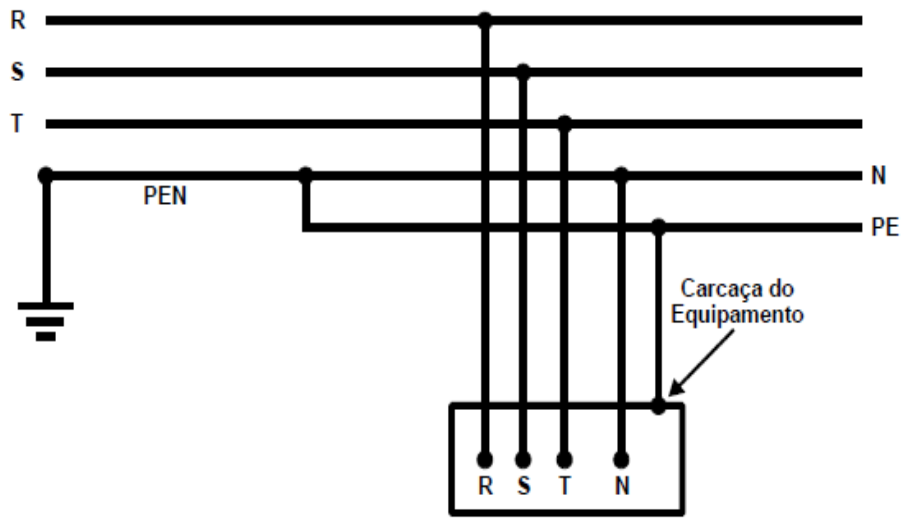


Figura 5 - Esquema TN-C-S

No Brasil, o esquema de ligação TN é o mais comum, quando se tratam de instalações alimentadas pela rede pública de baixa tensão da concessionária de energia elétrica e, quase sempre, a instalação é do tipo TN-C até a entrada. Do ponto de entrada em diante, o neutro é aterrado por razões funcionais e segue para o interior da instalação separado do condutor de proteção (TN-S).

2.5.3 - Esquema IT

É um esquema TT com neutro da fonte aterrado por impedância. Normalmente utiliza-se uma impedância na ordem de 1000 a 2000 Ohms entre o neutro do enrolamento de baixa tensão do transformador e a terra. Com isso, limita-se a corrente de falta a um valor desejado, de forma a não permitir que uma primeira falha desligue o sistema. Geralmente, essa corrente não é perigosa para as pessoas, mas como a instalação estará operando em condição de falta, devem ser utilizados dispositivos que

monitorem a isolação dos condutores, evitando a excessiva degradação dos componentes da instalação.

Todas as partes condutoras expostas e estranhas à instalação são ligadas a um eletrodo de terra.

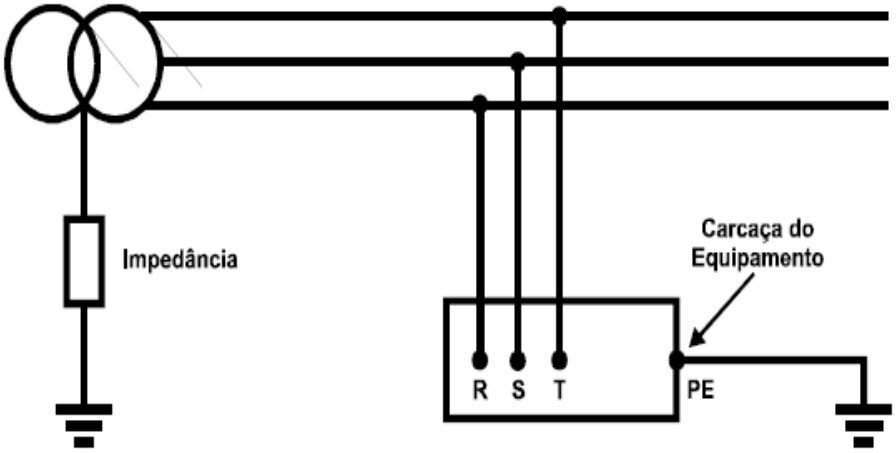


Figura 6 - Esquema IT

Este tipo de esquema de aterramento possui diversas vantagens e desvantagens.

As principais vantagens são:

- ✓ Continuidade (mantém o circuito em funcionamento quando submetido ao primeiro defeito);
- ✓ Limitar a corrente de curto-circuito de acordo a capacidade de suportabilidade dos componentes da instalação;
- ✓ Reduzir as harmônicas de maneira acentuada na operação do sistema elétrico utilizado;
- ✓ Segurança pessoal (protege o operador contra choques elétricos).

Por outro lado, este esquema de aterramento apresenta dificuldade em sistemas de grande porte, obrigando o emprego de dispositivos e técnicas especiais para a sinalização e localização do primeiro defeito. Na ocorrência de um segundo defeito, a segurança humana é comprometida.

No geral, o uso dos sistemas IT fica restrito aos casos onde uma primeira falha não pode desligar imediatamente a alimentação. Têm-se, como exemplo, processos importantes como salas de cirurgia e processos metalúrgicos.

2.6 - Condutor de proteção (PE)

O condutor de proteção tem por função o aterramento das massas metálicas de equipamentos elétricos. O seu dimensionamento visa a proteção de pessoas contra choques elétricos devido a contatos indiretos, bem como ao desempenho adequado dos dispositivos de proteção, sejam por sobrecorrente (fusíveis e disjuntores) ou pela corrente diferencial-residual (dispositivo DR).

A seção mínima do condutor pode ser determinada por (2.6.1), expressão aplicável apenas para tempos de atuação dos dispositivos de proteção inferiores a 5 segundos.

$$S \geq \frac{\sqrt{I^2 \times t}}{K} \qquad \textbf{(2.6.1)}$$

S → Seção mínima do condutor de proteção, em mm^2;

I → Corrente de defeito, em Ampères, que pode circular pelo dispositivo de proteção;

t → Tempo de atuação do dispositivo de proteção, em segundos;

K → Constante definida pela Tabela 1 (fator que depende do material do condutor de proteção, de sua isolação e outras partes e das temperaturas inicial e final).

Tabela 1 – Valores de K

Cabos Isolados		Material da Cobertura	
Tipo de Condutor	**Material do Condutor**	**PVC (160°C)**	**EPR/XLPE (250°C)**
Independentes (condutor isolado, cabo unipolar ou cabo nu em contato coma cobertura do cabo)	Cobre	143	176
	Alumínio	95	116
	Aço	52	64
Veias de cabos multipolares	Cobre	115	143
	Alumínio	76	94

2.7 - Dispositivos diferenciais residuais (DRs)

2.7.1 - Princípio de funcionamento

Um dispositivo diferencial residual (dispositivo DR) é constituído, em suas linhas essenciais, pelos seguintes elementos principais (Figura 7):

- Contatos fixos e móveis;
- Transformador diferencial;
- Disparador diferencial (relé polarizado).

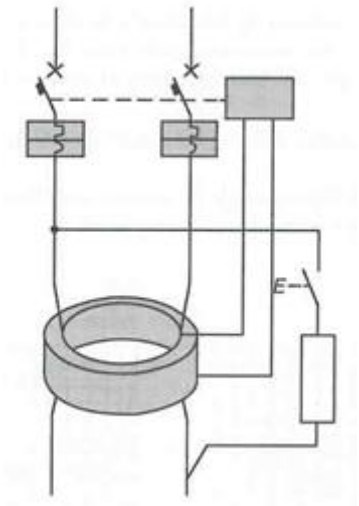


Figura 7 - Esquema do DR

Os contatos têm por função permitir a abertura e o fechamento do circuito e são dimensionados de acordo com a corrente nominal do dispositivo. Tratando-se de um disjuntor termomagnético diferencial, os contatos são dimensionados para poder interromper correntes de curto-circuito até o limite dado pela capacidade de interrupção de corrente nominal do dispositivo.

O transformador é constituído por um núcleo laminado, de material com alta permeabilidade, com tantas bobinas primárias quantos forem os polos do dispositivo e uma bobina secundária destinada a detectar a corrente diferencial-residual. O sinal na saída da bobina secundária é enviado a um relé polarizado que aciona o mecanismo de disparo para abertura dos contatos principais.

O disparador diferencial é um relé polarizado constituído por um imã permanente, uma bobina ligada à bobina secundária do transformador e uma peça móvel fixada de um lado por uma mola e ligada mecanicamente aos contatos do dispositivo. Na condição de repouso, a peça móvel permanece na posição fechada (Figura 8(a)), encostada no núcleo e tracionando a mola.

Em condições normais de funcionamento, o fluxo resultante no núcleo do transformador, produzido pelas correntes que percorrem os condutores de alimentação, é nulo, e na bobina secundária não é gerada nenhuma força eletromotriz.

Quando existir uma corrente diferencial residual (corrente de fuga) e se ela for superior a corrente diferencial residual nominal de atuação do dispositivo, o fluxo criado no núcleo do disparador pela corrente proveniente da bobina secundária do transformador provocará a desmagnetização do núcleo, abrindo o contato da parte móvel (Figura 8(b)) e, consequentemente, os contatos principais do dispositivo.

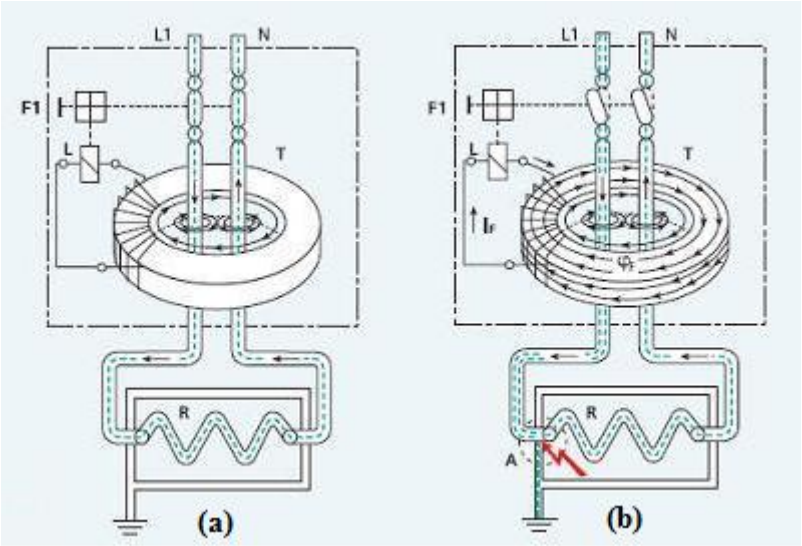


Figura 8 – Funcionamento do DR

2.7.2 - Tipos de proteção do DR

Existem dois tipos de proteção: a básica e a supletiva.

A proteção básica protege a pessoa que entra em contato direto com uma parte energizada (Figura 9) da instalação (cabos, terminais de motores etc.). Esse tipo de proteção pode evitar que um bebê, por exemplo, possa tomar um choque ao encostar o dedo na tomada.

Figura 9 - Proteção Básica

A proteção supletiva protege a pessoa que entra em contato com uma parte normalmente não energizada (Figura 10) da instalação, mas que está energizada devido a uma falha (carcaça de equipamento, registro do chuveiro etc.).

Figura 10 - Proteção Supletiva

O dispositivo DR oferece também uma proteção diferencial em diferentes níveis de sensibilidade: um que protege contra os efeitos do choque elétrico por contatos diretos ou indiretos (30 mA) e outro contra falhas de isolamento da instalação que podem gerar faíscas causando incêndios (300 mA). Com isso, economiza-se energia que seria perdida em uma fuga para terra.

Os dispositivos DR com sensibilidade de 30 mA são muitos utilizados na área residencial, pois oferecem proteção contra choques elétricos. Já os dispositivos DR com sensibilidade de 300 mA são empregados no ramo industrial, pois o objetivo é proteger contra possíveis causas de incêndio.

2.7.3 - Aplicação dos dispositivos DR

Toda instalação elétrica possui corrente de fuga por menor que seja e seu valor depende de diversos fatores, tais como: a qualidade dos componentes e equipamentos utilizados na instalação, assim como a mão-de-obra empregada na mesma.

Por ser um dispositivo com grande sensibilidade, é importante tomar certo cuidado antes de instalá-lo, sobretudo em instalações mais antigas. Não se pode, por exemplo, utilizar um dispositivo DR numa instalação onde exista um chuveiro. Portanto, é necessário efetuar uma medição destinada a verificar a existência de correntes de fuga superiores a certo limite. Caso não existam correntes significativas fluindo para a terra, o dispositivo DR pode ser empregado. Caso contrário, ele somente poderá ser instalado nas derivações da instalação (circuitos terminais).

A NBR-5410 recomenda que, para os esquemas TT, caso haja um único dispositivo DR para proteger a instalação, ele deve ser colocado na origem da mesma (Figura 11(a)). Outra opção seria o uso de vários dispositivos, um em cada derivação (Figura 11(b)).

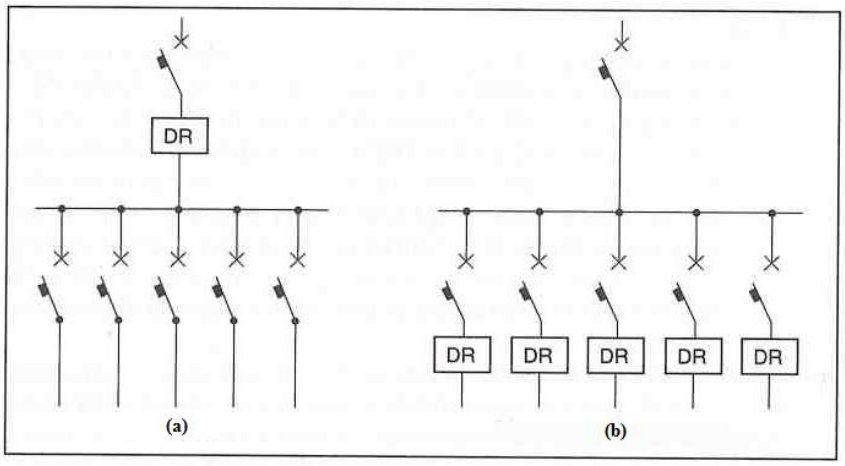


Figura 11 - Disposição dos dispositivos DR

3 - Fibrilação ventricular pelo choque elétrico

A fibrilação ventricular é o estado de tremulação (vibração) irregular e desritmada das fibras musculares das paredes dos ventrículos, com perda do bombeamento do sangue pelo corpo.

O sistema de aterramento é projetado de modo a produzir, durante o máximo curto-circuito com a terra, uma distribuição no perfil dos potenciais, de modo que as tensões de passo e de toque fiquem abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração.

A área do aterramento é a região de concentração das correntes de defeitos, sendo assim os potenciais nesse local são elevados devendo-se tomar cuidado a fim de preservar a segurança das pessoas.

A fim de elucidar alguns dos prejuízos que uma falha na isolação pode causar, devido à ausência ou alguma aplicação equivocada de um sistema de aterramento, é importante falar sobre o choque elétrico que afeta diretamente pessoas e animais causando perdas inestimáveis.

3.1 - Choque elétrico

O choque elétrico é um conjunto de perturbações de natureza e efeitos diversos, que se manifestam no organismo humano ou animal, quando ele é percorrido por uma corrente elétrica.

Os efeitos das perturbações variam e dependem:

- do percurso da corrente elétrica pelo corpo;
- do tempo de duração do choque elétrico;
- da intensidade da corrente elétrica;
- da tensão elétrica;

- da frequência da corrente elétrica;
- da espécie da corrente elétrica;
- do estado de umidade da pele.

Esse fenômeno ocorre quando duas ou mais partes do nosso corpo, ou de um animal, entram em contato com diferentes pontos de uma estrutura que possuem uma diferença de potencial.

3.2 - Influência do valor da corrente elétrica

Os efeitos da corrente elétrica no corpo são os mais variados possíveis. Sendo assim, a Tabela 2 apresenta genericamente os efeitos das correntes elétricas alternadas de 50 e 60 Hz no corpo humano, sem levar em consideração o tempo de duração do choque.

Tabela 2 - Efeitos da corrente no corpo humano

<table>
<tr><th colspan="2">I (mA)</th><th rowspan="2">Reação Fisiológica</th><th rowspan="2">Consequência</th><th rowspan="2">Salvamento</th></tr>
<tr><th>CA</th><th>CC</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Até 25</td><td rowspan="3">Até 80</td><td><u>1mA</u> (CA): limiar de sensação (formigamento)</td><td rowspan="3">Se a corrente for próxima de 25 mA (CA), poderá haver problemas respiratórios e consequentemente a morte aparente</td><td rowspan="3">Respiração artificial</td></tr>
<tr><td><u>5-15mA</u> (CA): contração muscular</td></tr>
<tr><td>15-25mA (CA):
- Contraçãoes violentas, impossibilidade de soltar o fio energizado
- Problemas respiratórios</td></tr>
<tr><td>25-80</td><td>80-300</td><td>- Sensação insuportável
- Contrações violentas
- Asfixia</td><td>Morte aparente</td><td>Respiração artificial</td></tr>
<tr><td>> 80</td><td>> 300</td><td>- Asfixia imediata
- Fibrilação ventricular
- Alterações musculares (químicas)
- Queimaduras</td><td>Morte aparente</td><td>- Respiração artificial
- Massagem cardíaca</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Ordem de Ampères</td><td rowspan="2">- Queimaduras
- Necrose do tecido
- Fibrilação ventricular
- Asfixia imediata
- Danos posteriores provenientes da eletrólise</td><td>- Morte Aparente</td><td>- Respiração artificial</td></tr>
<tr><td>- Dependendo da extensão das queimaduras, sequelas ou morte</td><td>- Massagem cardíaca
- Tratamento hospitalar</td></tr>
</table>

É preciso levar em consideração, também, o caminho que a corrente elétrica faz ao percorrer o corpo humano (Figura 12), pois um simples valor de corrente passando por um caminho específico, o coração, por exemplo, pode levar à morte.

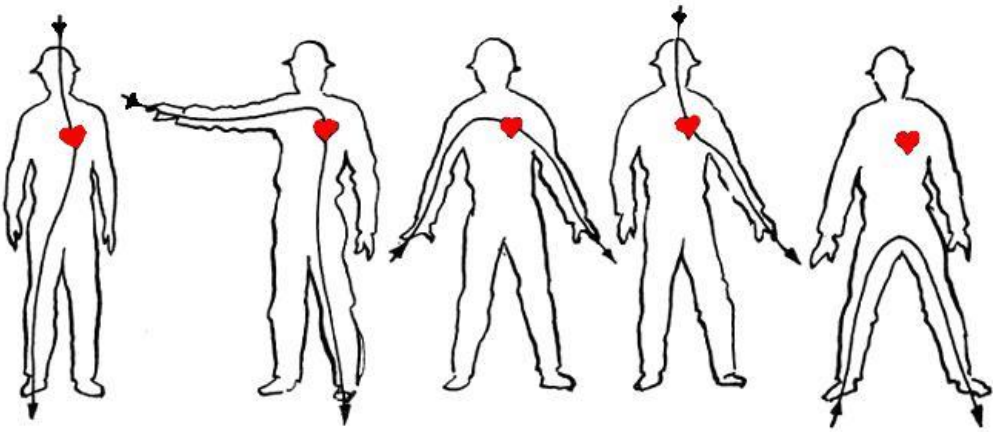


Figura 12 - Possíveis percursos da corrente elétrica pelo corpo humano

3.3 - Limite de corrente para não causar fibrilação

Charles Dalziel[2] concluiu, após pesquisa, que 99,5% das pessoas com peso de 50 kg ou mais podem suportar, sem a ocorrência de fibrilação ventricular, a corrente determinada em (3.3.1).

$$I_{choque} = \frac{0{,}116}{\sqrt{t}} \qquad \textbf{(3.3.1)}$$

Sendo:

0,03s ≤ **t** ≤ 3s

$\boldsymbol{I_{choque}}$ → Corrente, em ampères, pelo corpo humano, limite para não causar fibrilação;

t → Tempo, em segundos, da duração do choque.

[2] Charles Dalziel (1904-1986) foi professor de engenharia elétrica e ciências da computação na Universidade de Berkeley. Ele estudou o efeito da eletricidade em animais e humanos.

3.4 - Potencial de toque

É a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica, situada da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura (Figura 13).

Em consequência, poderemos ter a passagem de uma corrente elétrica pelo braço, tronco e pernas, cuja duração e intensidade poderão provocar fibrilação cardíaca, queimaduras ou outras lesões graves ao organismo.

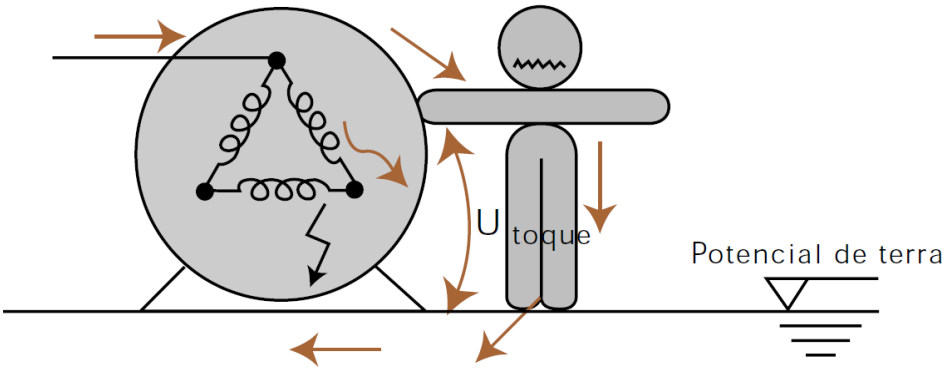


Figura 13 - Potencial de toque

<u>Potencial de toque máximo</u>

O potencial de toque máximo permissível entre a mão e o pé, para causar fibrilação ventricular, é o produzido pela corrente limite de **Dalziel**. Esse limite pode ser expresso de maneira quantitativa por (3.4.1).

$$V_{máximo} = (1000 + 1{,}5\rho s)\frac{0{,}116}{\sqrt{t}} \qquad \textbf{(3.4.1)}$$

Sendo:

ρs → resistividade superficial do solo, ou da primeira camada do solo.

3.5 - Potencial de passo

Potencial de passo é a diferença existente entre os dois pés.

As tensões de passos ocorrem quando, entre os membros de apoio (pés), aparecem diferenças de potencial (Figura 14). Isso ocorre quando os pés estão posicionados sobre linhas equipotenciais diferentes. As linhas equipotenciais se formam na superfície do solo quando do escoamento da corrente de curto-circuito. Se durante a falha os dois pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial ou se um único pé estiver sendo usado como apoio, não haverá a tensão de passo.

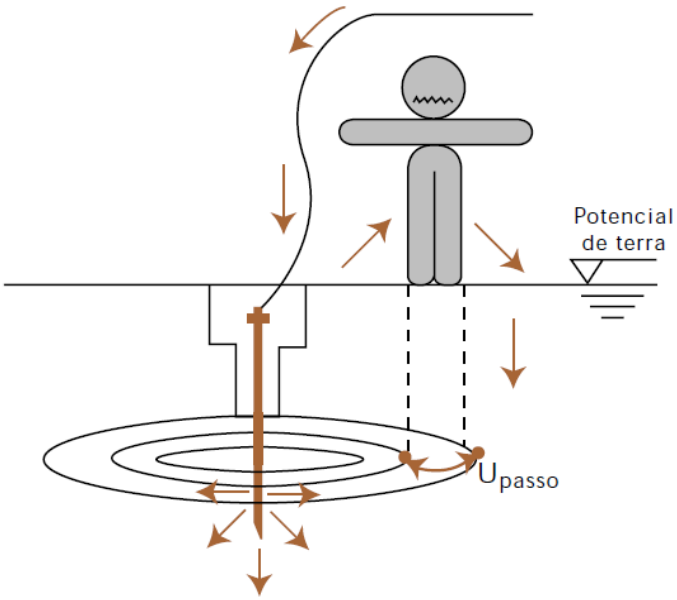


Figura 14 - Potencial de passo

<u>Potencial de passo máximo</u>

O potencial de passo máximo ($V_{passo\ máximo}$) tolerável é limitado pela máxima corrente permissível pelo corpo humano que não causa fibrilação e pode ser calculado por (3.5.1).

$$V_{máximo} = (1000 + 6 \cdot \rho s)\frac{0{,}116}{\sqrt{t}} \qquad \textbf{(3.5.1)}$$

4 - Projeto do sistema de aterramento

No projeto de um sistema de aterramento é preciso levar em consideração diversos fatores para que se obtenha um bom resultado final. Resultado no qual seja possível conectar as massas dos equipamentos junto às estruturas de apoio e proteção ao sistema de aterramento que se pretende dimensionar e realmente prover um caminho seguro para a corrente de falta.

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

a. Definir o local de aterramento;
b. Providenciar várias medições no local (por exemplo, umidade e resistividade do solo);
c. Fazer a estratificação do solo nas suas respectivas camadas;
d. Definir o tipo de sistema de aterramento desejado;
e. Calcular a resistividade aparente do solo para o respectivo sistema de aterramento;
f. Dimensionar o sistema de aterramento, levando em conta a sensibilidade e os limites de segurança pessoal, isto é, da fibrilação ventricular do coração.

O dimensionamento correto do sistema de aterramento resulta em algumas consequências, tais como:

- Fornecimento do ponto de referência (neutro) de transformadores trifásicos e de redes de distribuição;
- Auxílio na proteção contra interferência eletromagnética;
- Viabilidade de um caminho alternativo e seguro das descargas atmosféricas para a terra.

4.1 - Localização do sistema de aterramento

A localização do sistema de aterramento depende da posição estratégica ocupada pelos equipamentos elétricos importantes do sistema elétrico em questão.

No suprimento de energia em baixa tensão, o aterramento é localizado embaixo do local onde se localiza o medidor de energia ou bem próximo a ele. A Figura 15 ilustra como ocorre essa disposição.

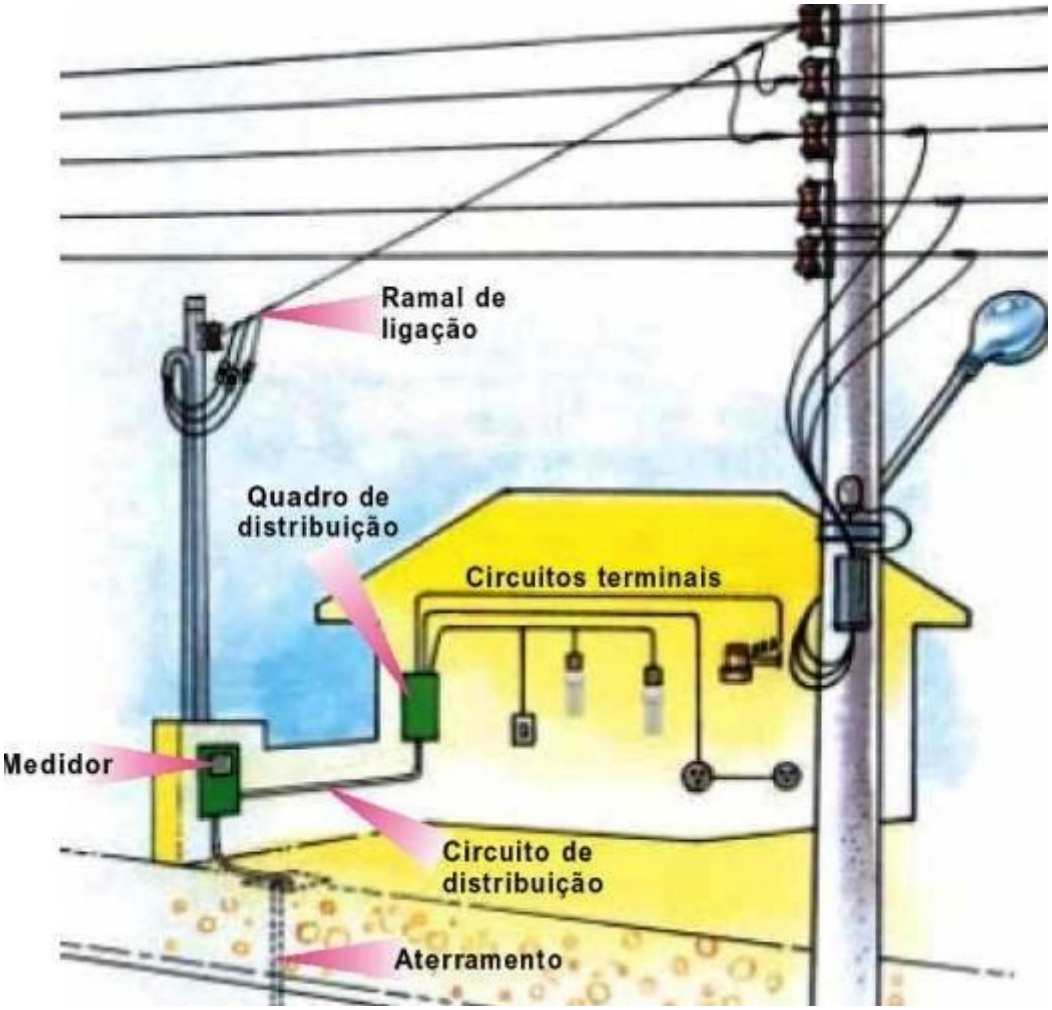


Figura 15 - Localização do aterramento entre a rede BT e o medidor de energia

Nas instalações internas, desde o medidor até os equipamentos de utilização, os aterramentos podem ser distribuídos de acordo com a localização dos centros de carga e da área ocupada pela edificação.

4.2 - Medições no local do aterramento

Definido o local da instalação do sistema de aterramento, é preciso fazer a medição da resistividade do solo.

A resistividade do solo vai depender do tamanho do sistema de aterramento projetado. A dispersão de correntes elétricas atinge camadas profundas com o aumento da área envolvida pelo aterramento.

A Tabela 3 fornece a resistividade de diferentes naturezas do solo, compreendida entre valores inferior e superior, que podem ser usados na elaboração de projeto de malha de terra, desde que não se disponha de medições adequadas.

Tabela 3 - Resistividade dos solos

Natureza dos solos	**Resistividade (Ω.m)**	
	Mínima	**Máxima**
Solos alagadiços e pantanosos	-	30
Lodo	20	100
Húmus	10	150
Argilas plásticas	-	50
Argilas compactas	100	200
Terra de jardins com 50% de umidade	-	140
Terra de jardins com 20% de umidade	-	480
Argila seca	1.500	5.000
Argila com 40% de umidade	-	80
Argila com 20% de umidade	-	330
Areia com 90% de umidade	-	1.300
Areia comum	3.000	8.000
Solo pedregoso nu	1.500	3.000
Solo pedregoso coberto com relva	300	500
Calcários moles	100	400
Calcários compactos	100	5.000
Calcários fissurados	500	1.000
Xisto	50	300
Micaxisto	-	800
Granito e arenito	500	10.000

O levantamento dos valores da resistividade é feito através de medições em campo, com instrumentos do tipo terrômetro, utilizando-se métodos de prospecção geoelétricos, dentre os quais, o mais conhecido e utilizado é o Método de Wenner.

4.3 - Método de Wenner

O método utiliza um **Megger,** instrumento de medida de resistência que possui quatro terminais, dois de corrente e dois de potencial e consiste em colocar quatro eletrodos de teste em linha separados por uma distância *d* e enterrados no solo com a uma mesma profundidade. Os dois eletrodos extremos estão ligados aos terminais de corrente $\mathbf{C_1}$ e $\mathbf{C_2}$ e os dois eletrodos centrais estão ligados aos terminais de potencial $\mathbf{P_1}$ e $\mathbf{P_2}$ do aparelho.

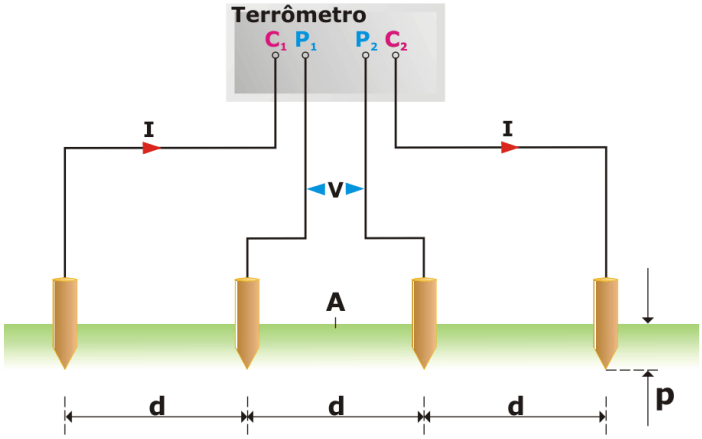


Figura 16 - Esquema de ligação dos componentes para execução do Método de Wenner

Onde:

R → Leitura da resistência em Ω no **Megger**, para uma profundidade "**d**"

d → Espaçamento das hastes cravadas no solo [m]

p → Profundidade da haste cravada no solo [m]

Alguns instrumentos do tipo **Megger** de terra dispõem de um terminal *guarda* ligado a um eletrodo, com o objetivo de minimizar os efeitos das correntes parasitas de valor relativamente elevado, que podem distorcer os resultados lidos.

4.3.1 - Medição da resistividade do solo

O **Megger (Terrômetro)** faz circular uma corrente elétrica **I** entre as duas hastes externas que estão conectadas aos terminais $\mathbf{C_1}$ e $\mathbf{C_2}$. Por sua vez, as duas hastes internas são ligadas nos terminais de potencial $\mathbf{P_1}$ e $\mathbf{P_2}$. Nessa configuração, é possível com que o aparelho processe todas as medidas e informe o valor da resistência elétrica entre os terminais $\mathbf{P_1}$ e $\mathbf{P_2}$.

A corrente atinge uma profundidade maior com uma correspondente área grande de dispersão, tendo, em consequência, um efeito que pode ser desconsiderado. Portanto, para efeito do Método de Wenner, considera-se que o valor da resistência elétrica lida no aparelho é relativo a uma profundidade "**d**" do solo.

Após as medições, aplica-se a Fórmula de Palmer (4.3.1.1) para se achar a resistividade do solo (ρ).

$$\rho = \frac{4.\pi.d.R}{1 + \frac{2d}{\sqrt{d^2 + (2p)^2}} - \frac{2d}{\sqrt{(2d)^2 + (2p)^2}}} \qquad \textbf{(4.3.1.1)}$$

Para um afastamento entre as hastes relativamente grande, isto é, **d > 20p** e um **diâmetro da haste menor ou igual que 0,1d**; a Fórmula de Palmer se reduz a (4.3.1.2).

$$\boxed{\rho = 2.\pi.d.R\ [\Omega.m]} \qquad \textbf{(4.3.1.2)}$$

Os dados podem ser organizados em uma tabela com alguns espaçamentos recomendados:

Tabela 4 – Espaçamentos recomendados

Espaçamento d [m]	**Leitura** R [Ω]	**Calculado** ρ [Ω.m]
1		
2		
4		
6		
8		
16		
32		

Para se obter resultados satisfatórios na medição da resistividade do solo, é necessário seguir alguns pontos básicos:

- Os eletrodos devem ser cravados, aproximadamente, 20 cm no solo ou até apresentarem resistência mecânica de cravação consistente para que haja uma resistência de contato aceitável;
- Os eletrodos devem estar alinhados e espaçados a uma mesma distância;
- O equipamento deve ser calibrado (galvanômetro indicando zero) para cada espaçamento definido entre os eletrodos, ajustando-se o potenciômetro e o multiplicador do terrômetro;
- O espaçamento entre os eletrodos deve variar equivalendo a uma medida por ponto para cada distância considerada;
- A distância entre as hastes corresponde à profundidade do solo cuja resistividade está se medindo;
- Qualquer oscilação intensa no galvanômetro significa que existe alguma interferência que pode ser eliminada afastando-se os pontos de medição;
- Devem ser observadas, principalmente, as condições de temperatura e umidade do solo.

4.3.2 - Fatores que influenciam na resistividade do solo

Dependendo das condições em que o solo é submetido, a sua resistividade pode variar em função de vários fatores, tais como:

1. **Composição química**

   A presença e quantidade de sais solúveis e ácidos que normalmente se acham agregados ao solo influenciam no valor da resistividade deste. Portanto, com o objetivo de reduzir a resistividade do solo, adicionam-se, ao redor do eletrodo de terra, produtos químicos à base de sais, que combinados entre si e na presença de água, formam o GEL. Esse produto é de grande eficiência na redução da resistividade do solo.

2. **Umidade**

   A resistência de uma malha de terra, junto com a resistividade do solo, sofre grande alteração quando a umidade do solo varia, principalmente quando este valor cai abaixo dos 20%. Por esse motivo, os eletrodos de terra devem ser implantados a uma profundidade adequada para garantir a necessária umidade do solo em torno deles.

   A utilização de uma camada de brita de 100 a 200 mm sobre a área da malha construída ao tempo serve para retardar a evaporação da água do solo.

3. **Temperatura**

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

Correntes de um curto-circuito fase-terra de valor elevado podem fazer com que a água entre em estado de ebulição, em torno do eletrodo, diminuindo a umidade e elevando a temperatura no local, prejudicando o desempenho do sistema de aterramento.

4.4 - Estratificação do solo

Considerando as características que normalmente apresentam os solos, em virtude da sua própria formação geológica ao longo dos anos, a modelagem em camadas estratificadas, isto é, em camadas horizontais, tem produzido excelentes resultados comprovados na prática.

A Figura 17 apresenta um modelo ideal de um solo dividido em camadas. Na prática, o solo é estratificado em até, no máximo, duas camadas para o cálculo das suas respectivas resistividades. Depois da segunda camada de solo, as medições já apresentam erros devido à limitação dos equipamentos de medição.

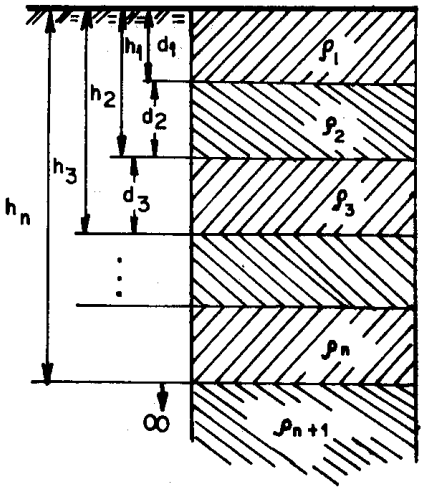


Figura 17 - Solo estratificado

A resistividade de cada camada, assim como a profundidade podem ser determinadas através de dois métodos[3] principais de estratificação do solo, conforme abaixo:

- Métodos de Estratificação de Duas Camadas;
- Método de Pirson;

4.4.1 - Modelagem do Solo em Duas Camadas

Usando as teorias do eletromagnetismo no solo com duas camadas horizontais, é possível desenvolver uma modelagem matemática que, com o auxílio das medidas efetuadas pelo Método de Wenner, possibilita encontrar a resistividade do solo da primeira e da segunda camadas, bem como sua respectivas profundidades.

4.4.2 - Modelagem pelo Método de Pirson

O Método Pirson pode ser encarado como uma extensão do método de duas camadas. Nele trabalha-se com a curva $\boldsymbol{\rho}$**(d) x (d)**, onde **d** é a distância entre as hastes mostrada na Figura 16, onde é apresentado como é realizado o Método Wenner, e $\boldsymbol{\rho}$**(d)** é a resistividade do solo em função dessa distância.

Ao se dividir a curva $\boldsymbol{\rho}$**(d) x (d)** em trechos ascendentes e descendentes fica evidenciado que o solo de várias camadas pode ser analisado como uma sequência de curvas de solo equivalentes a duas camadas.

[3] Para um tratamento mais amplo em relação aos métodos de estratificação do solo, veja G. Kindermann, e J.M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 6ª ed., 2011, Capítulo 3.

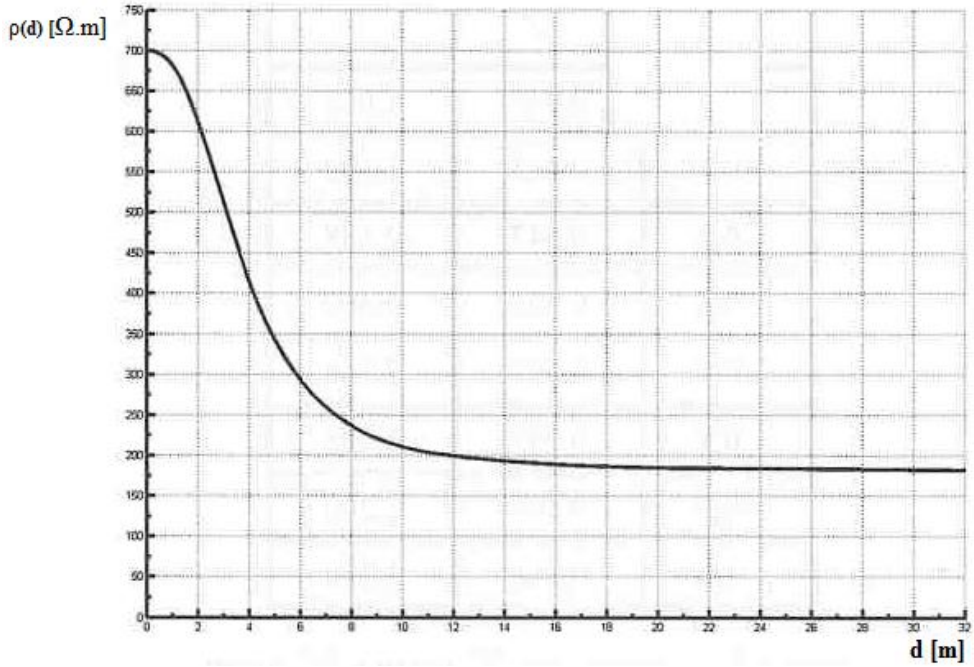


Figura 18 - Curva ρ(d) x d

4.5 - Dimensionamento dos principais sistemas de aterramento em relação a sua resistividade aparente

Serão apresentados agora, os sistemas de aterramento mais simples com geometria e configuração efetuadas por hastes, anel e cabos enterrados no solo.

O escoamento da corrente elétrica emanada ou absorvida pelo sistema de aterramento se dá através de uma resistividade aparente que é a resistividade vista pelo sistema de aterramento em integração com o solo, considerando a profundidade atingida pelo escoamento das correntes elétricas.

Portanto, serão analisados, inicialmente, os sistemas de aterramento em relação a uma resistividade aparente.

4.5.1 - Dimensionamento de um sistema com uma haste vertical

Uma haste cravada verticalmente em um solo homogêneo, de acordo com a Figura 19, tem uma resistência elétrica que pode ser determinada pela fórmula (4.5.1.1).

$$R_{1haste} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right)[\Omega] \qquad \textbf{(4.5.1.1)}$$

Onde:

$\boldsymbol{\rho_a}$→ Resistividade aparente do solo [Ω.m]

L → Comprimento da haste [m]

d → Diâmetro do círculo equivalente à área da secção transversal da haste [m]

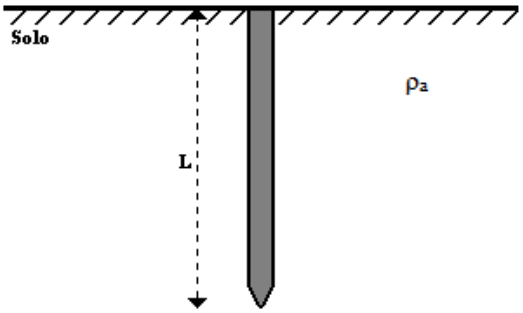


Figura 19 - Haste cravada verticalmente no solo

No caso de haste tipo cantoneira, deve-se efetuar o cálculo da área da sua secção transversal e igualar à área de um círculo.

$$S_{cantoneira} = S_{círculo} = \pi\left(\frac{d}{2}\right)^2 \qquad \textbf{(4.5.1.2)}$$

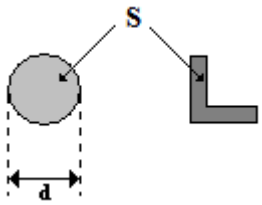


Figura 20 - Seção transversal da haste circular e em cantoneira

- <u>Resistência equivalente de hastes paralelas</u>

Para o cálculo da resistência equivalente de hastes paralelas, deve-se levar em conta o acréscimo de resistência ocasionado pela interferência entre as hastes. A fórmula (4.5.1.3) apresenta a resistência elétrica de cada haste individualmente acrescida de um valor de resistência devido à interferência mútua entre elas.

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1, m \neq h}^{n} R_{hm} \qquad \textbf{(4.5.1.3)}$$

Onde:

$\boldsymbol{R_h}$ → Resistência apresentada pela haste "**h**" inserida no conjunto considerando as interferências das outras hastes.

$\boldsymbol{n}$ → Número de hastes paralelas

$\boldsymbol{R_{hh}}$ → Resistência individual de cada haste

$\boldsymbol{R_{hm}}$ → Acréscimo de resistência na haste "**h**" devido à interferência mútua da haste "**m**", dada pela expressão:

$$R_{hm} = \frac{\rho_a}{4\pi L} \ln\left[\frac{(b_{hm} + L)^2 - e_{hm}^2}{e_{hm}^2 - (b_{hm} - L)^2}\right] \qquad \textbf{(4.5.1.4)}$$

$$b_{hm} = \sqrt{L^2 + e_{hm}^2}$$

$\boldsymbol{e_{hm}}$ → Espaçamento entre a haste "**h**" e a haste "**m**" (em metros)

L → Comprimento da haste [m]

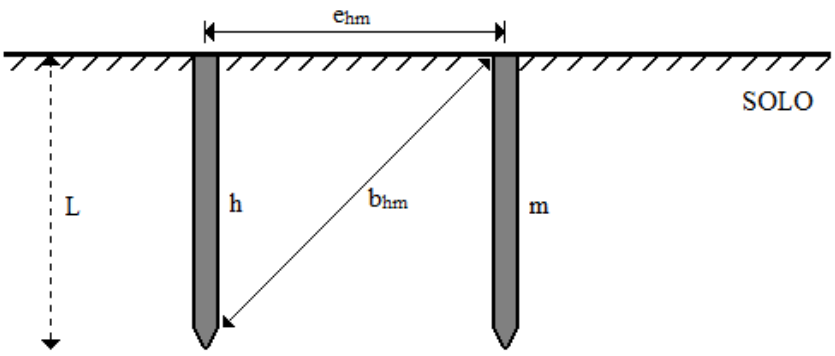


Figura 21 – Parâmetros das interferências entre as hastes "h" e "m"

Determinada a resistência individual de cada haste dentro do conjunto, já considerados os acréscimos ocasionados pelas interferências, a resistência equivalente das hastes interligadas será a resultante do paralelismo destas.

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i}} \qquad \textbf{(4.5.1.4)}$$

Num sistema de aterramento, empregam-se hastes iguais, o que facilita a padronização na empresa e também o cálculo da resistência equivalente do conjunto.

- <u>Índice de aproveitamento ou índice de redução (K)</u>

É definido como a relação entre a resistência equivalente do conjunto R_{eq} e a resistência individual de cada haste sem a presença de outras.

$$K = \frac{R_{eq}}{R_{1haste}}$$

$$R_{eq} = K \cdot R_{1haste} \qquad \textbf{(4.5.1.5)}$$

A expressão (4.5.1.5) indica que a resistência equivalente (R_{eq}) do conjunto de hastes em paralelo está reduzida de ***K*** vezes o valor da resistência de uma haste isoladamente.

Para facilitar o cálculo de R_{eq} os valores de K são tabelados[4] ou obtidos através de curvas.

4.5.2 - Dimensionamento de um sistema formado por hastes alinhadas em paralelo e igualmente espaçadas

A Figura 22 mostra um sistema de aterramento formado por hastes em paralelo.

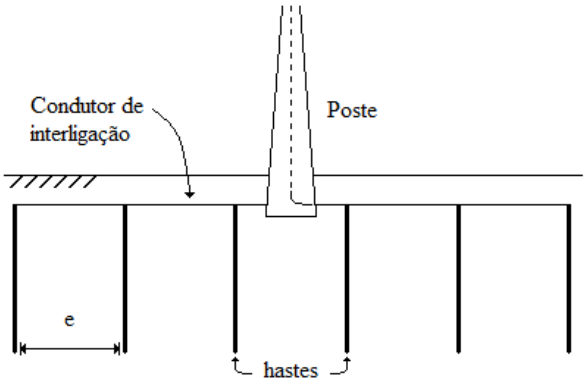


Figura 22 – Hastes alinhadas em paralelo

É um sistema simples e eficiente, muito empregado em sistemas de distribuição de energia elétrica e no aterramento de equipamentos isolados. Dentro da área urbana, efetua-se o aterramento ao longo do meio fio da calçada, o que é econômico e não prejudica o trânsito.

Para calcular a resistência equivalente desse arranjo é preciso levar em consideração a interferência de cada haste, duas a duas.

Por exemplo, para um sistema de três hastes, tem-se:

[4] As Tabelas de Hastes paralelas, Alinhadas e Igualmente espaçadas podem ser encontradas em G. Kindermann, e J.M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 6ª ed., 2011, Apêndice D.

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33}$$

Supondo que as hastes tenham o mesmo formato, então:

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \qquad \textbf{(4.5.2.1)}$$

As resistências mútuas de acréscimo são obtidas usando a fórmula (4.5.2.2) e (4.5.2.3).

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left[\frac{(b_{12}+L)^2 - e_{12}^2}{e_{12}^2 - (b_{12}-L)^2}\right] \qquad \textbf{(4.5.2.2)}$$

$$R_{13} = R_{31} = \frac{\rho_a}{2\pi L} \ln\left[\frac{(b_{13}+L)^2 - e_{13}^2}{e_{13}^2 - (b_{13}-L)^2}\right] \qquad \textbf{(4.5.2.3)}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

4.5.3 - Dimensionamento de um sistema com hastes em triângulo

Para este sistema, as hastes são cravadas nos vértices de um triângulo equilátero.

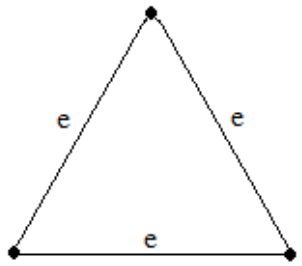


Figura 23 - Triângulo equilátero

Na Figura 24 pode-se visualizar um sistema real onde três hastes de aterramento de cobre são cravadas no solo, dispostas 2 metros uma da outra e interligadas por fio cobre nu.

Figura 24 - Malha em triângulo

Todo o dimensionamento do sistema em triângulo baseia-se na definição do índice de redução (K)[5].

$$R_{eq\Delta} = K \cdot R_{1haste} \qquad \textbf{(4.5.3.1)}$$

Onde:

$\boldsymbol{R_{1haste}}$ → Resistência elétrica de uma haste cravada isoladamente no solo

$\boldsymbol{K}$ → Índice de redução do sistema de aterramento

$\boldsymbol{R_{eq\Delta}}$ → Resistência equivalente apresentada pelo sistema de aterramento em triângulo com lado "e"

[5] Obtido através da curva encontrada em G. Kindermann, e J.M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 6ª ed., 2011, p.83.

4.5.4 - Dimensionamento de um Sistema com hastes em quadrado vazio

A Figura 25 mostra o sistema com o formato de quadrado vazio, onde hastes são colocadas na periferia a uma distância "**e**" das hastes adjacentes.

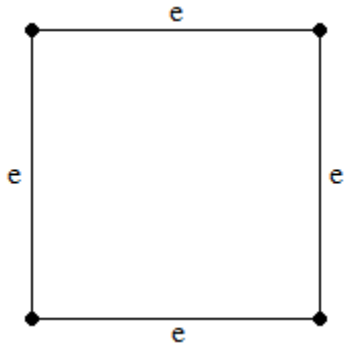


Figura 25 - Quadrado vazio

A resistência equivalente do sistema é dada pela expressão $R_{eq} = K \cdot R_{1haste}$ com o índice de redução (K)[6].

4.5.5 - Dimensionamento de um Sistema com hastes em circunferência[7]

As hastes estão igualmente espaçadas da circunferência com raio **R**.

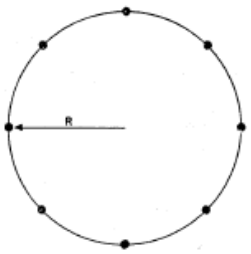


Figura 26 - Hastes em circunferência

[6] Obtido através das curvas encontradas em G. Kindermann, e J.M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 6ª ed., 2011, p.84-86.
[7] Os respectivos índices de redução podem ser obtidos em G. Kindermann, e J.M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, 6ª ed., 2011, p.88.

4.6 - Malha de aterramento

Resumidamente, pode-se dizer que dimensionar uma malha de terra é verificar se os potenciais que surgem na superfície do solo, quando da ocorrência do máximo defeito à terra, são inferiores aos máximos potenciais de passo e de toque que uma pessoa pode suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular. Além disso, deve ser dimensionado o condutor de malha, de forma a suportar os esforços mecânicos e térmicos que estarão sujeitos ao longo de sua vida útil. É preciso também levar em conta o valor da resistência de terra da malha para que ela seja compatível com a sensibilidade da proteção.

Dimensionar uma malha de terra é um processo iterativo. A partir de uma malha inicial são verificados se os potenciais estão de acordo com os valores máximos suportáveis por um ser humano. Caso contrário, é necessário modificar o projeto inicial e fazer as modificações até satisfazer as condições exigidas.

4.6.1 - Elementos de uma malha de terra

Os principais elementos de uma malha de terra são:

a) Eletrodos de terra ou aterramento

O eletrodo de aterramento pode ser constituído por um único elemento ou por um conjunto de elementos. O termo tanto se aplica a uma simples haste enterrada, a várias hastes enterradas e interligadas quanto a outros tipos de condutores em diversas configurações.

Eles podem ser constituídos dos seguintes elementos:

- Aço galvanizado

Em geral, após um determinado período de tempo, o eletrodo sofre corrosão, aumentando, em consequência, a resistência de contato com o solo. Seu uso é restrito.

- Aço cobreado

Com a camada de cobre sobre o vergalhão de aço, o eletrodo adquire uma elevada resistência à corrosão, mantendo suas características originais por um longo tempo.

Tabela 5 - Eletrodos de aterramento convencionais

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

b) Condutor da malha

De acordo com a norma NBR 5410, para solos com características ácidas e não protegidos mecanicamente, é recomendável a utilização de um condutor de cobre nu de seção maior ou igual a 16 mm^2. Para solos de natureza alcalina, a seção do condutor de cobre não deve ser inferior a 25 mm^2. Dependendo da grandeza da corrente de defeito fase-terra e de esforços mecânicos, podem ser determinadas seções superiores. A Figura 27(a) mostra a seção de um cabo utilizado como condutor de aterramento da malha.

c) Conexões

São elementos metálicos utilizados para conectar os condutores nas emendas ou derivações.

Existe uma grande variedade de conectores, podendo-se destacar os seguintes:

- Conectores aparafusados

São peças metálicas, de formato mostrado na Figura 27(b), utilizadas na emenda de condutores. Sempre que possível deve-se evitar a sua utilização em condutores de aterramento.

- Conexão exotérmica

É um processo de conexão a quente onde se verifica uma fusão entre o elemento metálico de conexão e o condutor. Existem vários tipos de conexão utilizando este processo. A Figura 27(c) ilustra uma conexão exotérmica tipo derivação (**T**) e a Figura 27(d) mostra uma conexão exotérmica tipo cruzamento (**X**).

A conexão exotérmica é executada no interior de um cadinho. A Figura 27(e) ilustra um cadinho próprio para a conexão do tipo (I) para emendas de condutores.

d) Condutor de ligação

É aquele utilizado para a ligação das massas (por exemplo: carcaça de equipamentos) aos terminais de aterramento parcial e principal. Este último será ligado à malha de terra através do condutor de aterramento.

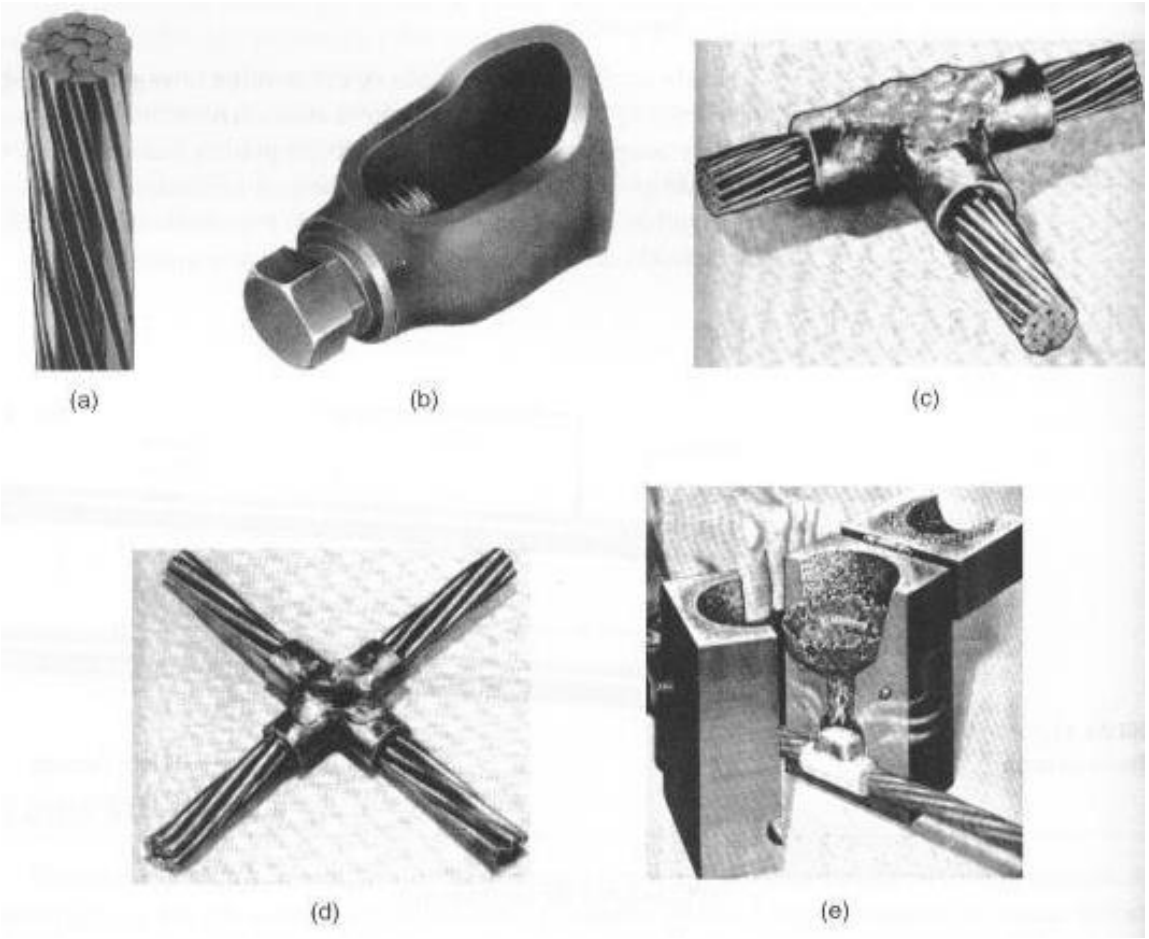


Figura 27 - Elementos de uma malha de terra

4.6.2 - Projeto de uma malha de terra

Para o projeto de uma malha de terra, são necessários alguns procedimentos pré-definidos, assim como informações do local da construção da malha.

São eles:

- Obter a estratificação do solo fazendo as medições necessárias pelo método **Wenner**;
- Resistividade superficial do solo (ρs). Geralmente utiliza-se brita na superfície do solo sobre a malha e neste caso, utiliza-se o valor da resistividade da brita molhada (ρs = 3000 Ω.m).
- Corrente de curto-circuito máxima entre fase e terra local, no local da malha de terra ($I_{máxima} = 3I_0$), ver referência [6];
- Percentual da corrente de curto-circuito máxima que realmente escoa pela malha. Devem-se observar os diversos caminhos pelos quais as correntes de sequência zero podem circular. A corrente que entra na malha é conhecida como corrente de malha (I_{malha});
- Tempo de defeito para a máxima corrente de curto-circuito fase-terra ($t_{defeito}$), ver referência [7];
- Área pretendida;
- Valor máximo da resistência de terra de modo a ser compatível com a sensibilidade da proteção.

a) <u>Dimensionamento do Condutor da Malha</u>

O condutor de malha é dimensionado considerando os esforços mecânicos e térmicos que ele pode suportar. Na prática, utiliza-se, no mínimo, o condutor de 35 mm^2 que suporta os esforços mecânicos da movimentação do solo e dos veículos que transportam os equipamentos durante a montagem.

Quanto ao dimensionamento térmico, utiliza-se a fórmula de **Onderdonk**, válida somente para cabos de cobre, que considera o calor produzido pela corrente de curto-circuito totalmente restrito ao condutor.

$$I = 226{,}53 \cdot S_{cobre} \sqrt{\frac{1}{t_{defeito}} \ln\left(\frac{\theta_m + \theta_a}{234 + \theta_a} + 1\right)} \qquad \textbf{(4.6.2.1)}$$

Onde:

$\boldsymbol{S_{cobre}}$ → Seção do condutor de cobre da malha de terra, em mm^2;

$\boldsymbol{I}$ → Corrente de defeito em Ampères, através do condutor;

$\boldsymbol{t_{defeito}}$ → Duração do defeito, em segundos;

$\boldsymbol{\theta_a}$ → Temperatura ambiente, em º C;

$\boldsymbol{\theta_m}$ → Temperatura máxima permissível em º C.

Com isso, pode-se verificar se o condutor suporta os esforços térmicos provocados pela elevação da temperatura de modo a não comprometer suas características.

Para condutores de cobre, o valor de θ_m é limitado pelo tipo de conexão adotado.

As conexões podem ser do tipo:

- Conexão cavilhada com juntas de bronze; é uma conexão tradicional por aperto (pressão), cuja temperatura máxima é de θ_m = 250ºC.
- Solda convencional feita com eletrodo revestido, cuja fusão se dá através do arco elétrico produzido pela Máquina de Solda; sua temperatura máxima é de θ_m = 450ºC.
- Brasagem com liga **Foscoper** é uma união feita usando maçarico (Oxi-Acetileno), cuja temperatura máxima é de θ_m = 550ºC. **Foscoper** é uma liga cobre e fósforo, cuja união é feita por brasagem, vulgarmente conhecida como solda heterógena.
- Solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, cuja conexão é feita pela fusão obtida pela ignição e combustão dos ingredientes colocados num cadinho. Neste caso a temperatura máxima é de θ_m = 850ºC.

b) <u>Dimensionamento do condutor de ligação</u>

A conexão do condutor de ligação ao equipamento elétrico é feito por aperto (pressão), portanto, sua temperatura máxima é a mesma da junta cavilhada, isto é, de 250ºC.

c) <u>Potenciais máximos a serem verificados</u>

Foi definido no Capítulo 3 o potencial de passo e de toque e calculados os potenciais máximos de passo e toque que uma pessoa pode suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular. A malha só estará adequada se os potenciais estiverem abaixo desses limites.

$$V_{toque} \leq V_{toque\ máximo}$$

$$V_{passo} \leq V_{passo\ máximo}$$

d) <u>Malha inicial</u>

As dimensões da malha são pré-definidas, levando em conta o histórico do sistema elétrico por similaridade das malhas existentes. Assim, partimos de uma área desejada, estabelecemos um espaçamento entre os condutores e definimos se serão utilizadas, junto com a malha, hastes de aterramento.

Um espaçamento inicial típico está entre 5% e 10% do comprimento dos respectivos lados da malha.

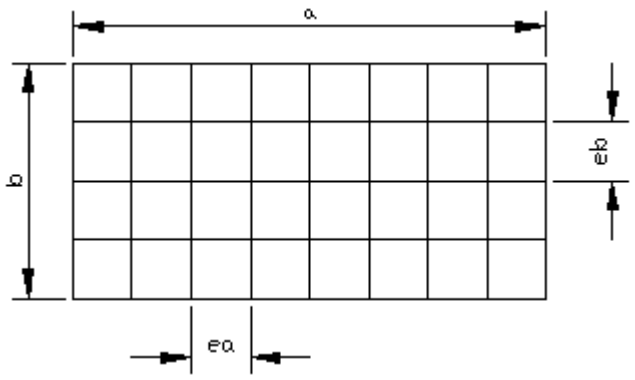


Figura 28 - Projeto inicial de malha

Uma vez definidas as dimensões da malha, determina-se o número de condutores paralelos de acordo com as equações (4.6.2.2) e (4.6.2.3).

$$N_a = \frac{a}{e_a} + 1 \qquad \textbf{(4.6.2.2)}$$

$$N_b = \frac{a}{e_b} + 1 \qquad \textbf{(4.6.2.3)}$$

Escolhe-se o número inteiro, adequado ao resultado acima.

O comprimento total dos condutores (cabos) que formam a malha é dado pela expressão (4.6.2.4).

$$L_{cabos} = aN_b + bN_a \qquad \textbf{(4.6.2.4)}$$

Caso sejam adicionadas hastes na malha, devem-se acrescentar seus comprimentos ao número total de condutores.

$$L_{total} = L_{cabos} + L_{hastes} \qquad \textbf{(4.6.2.5)}$$

Onde:

$\boldsymbol{L_{cabos}}$ → Comprimento total de condutores da malha;

$\boldsymbol{L_{hastes}}$ → Comprimento total das hastes cravadas na malha.

e) <u>Resistência de aterramento da malha</u>

A resistência de aterramento da malha pode, aproximadamente, ser calculada pela fórmula de **Sverak**. Esta fórmula leva em conta à profundidade (h) em que a malha é construída.

$$R_{malha} = \rho_a \left[\frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A_{malha}}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A_{malha}}}} \right) \right] \qquad \textbf{(4.6.2.6)}$$

Onde:

$\boldsymbol{A_{malha} = a.b}$ → Área ocupada pela malha, em m^2;

$\boldsymbol{h}$ → Profundidade da malha, em metros, com $0{,}25 \leq h \leq 2{,}5$ m;

$\boldsymbol{L_{total}}$ → Comprimento total dos cabos e hastes que formam a malha.

f) <u>Potencial da malha</u>

O potencial de malha (V_{malha}) é definido como o potencial de toque máximo, encontrado dentro de uma submalha da malha de terra, quando ocorre o máximo defeito fase-terra.

Assim, o potencial de malha máximo, para uma malha com hastes cravadas ao longo do perímetro ou nos cantos, pode ser calculado pela expressão (4.6.2.7).

$$V_{malha} = \frac{\rho_a K_m K_i I_{malha}}{L_{total}} \qquad \textbf{(4.6.2.7)}$$

Onde K_m é definido como o coeficiente de malha que condensa a influência da profundidade da malha, do diâmetro do condutor e do espaçamento entre condutores.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln\left[\frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{1}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\} \qquad \textbf{(4.6.2.8)}$$

Sendo:

h → Profundidade da malha, em metros;

e → Espaçamento entre os condutores paralelos ao longo da malha, em metros;

d → Diâmetro do condutor da malha;

$\boldsymbol{N = (N_a N_b)^{1/2}}$

$\boldsymbol{K_h}$ → Correção da profundidade.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Onde:

$\boldsymbol{h_0} = 1\ m$

Já o K_i é definido como coeficiente de irregularidade que condensa os efeitos da não uniformidade de distribuição da corrente pela malha.

$$K_i = 0{,}656 + 0{,}172N \qquad \textbf{(4.6.2.9)}$$

g) <u>Potencial de toque máximo da malha em relação ao infinito</u>

O potencial gerado pela maior corrente de curto-circuito monofásica à terra, entre as partes metálicas dos equipamentos e um ponto no infinito é dado por:

$$V_{toque\ máximo\ da\ malha} = R_{malha} \cdot I_{malha}$$

Se este valor estiver abaixo do limite da tensão de toque para não causar fibrilação, significa que a malha satisfaz todos os requisitos de segurança e que, portanto, está bem dimensionada. Caso contrário, deve-se refazer os cálculos de modo que atenda ao limite de fibrilação.

4.7 - Tratamento químico do solo

Todo sistema de aterramento depende da sua integração com o solo e da resistividade aparente.

Se o sistema já está fisicamente definido e instalado, a única maneira de diminuir sua resistência elétrica é alterar as características do solo, usando um tratamento químico.

O tratamento químico deve ser empregado quando:

- Existe o aterramento no solo, com uma resistência fora da desejada e não se pretende alterá-la por algum motivo;
- Não existe alternativa possível, dentro das condições do sistema, por impossibilidade de trocar o local, e o terreno tem resistividade elevada.

O tratamento químico visa à diminuição de sua resistividade, consequentemente, à diminuição da resistência de aterramento.

Os materiais a serem utilizados para um bom tratamento químico do solo devem ter as seguintes características:

- ✓ Boa higroscopia (boa capacidade de absorção de água);
- ✓ Não lixiviável;
- ✓ Não ser corrosivo;
- ✓ Baixa resistividade elétrica;
- ✓ Quimicamente estável no solo;
- ✓ Não ser tóxico;
- ✓ Não causar dano à natureza.

4.7.1 - Tipos de tratamento químico

Os produtos mais usados nos diversos tipos de tratamento do solo são:

a) BENTONITA

É um material argiloso que tem as seguintes propriedades:

- ❖ Facilidade na absorção de água;
- ❖ Retém umidade;
- ❖ Conduz bem eletricidade;
- ❖ Baixa resistividade (1,2 a 4 Ω.m);
- ❖ Não corrosivo, pH alcalino e protege o material do aterramento contra a corrosão natural do solo.

Hoje em dia, apesar de ser pouco usada, é empregada uma variação onde se adiciona gesso para dar maior estabilidade ao tratamento.

b) EARTHRON

É um material líquido de lignosulfato (principal componente da polpa de madeira) mais um agente geleificador e sais inorgânicos. Suas principais propriedades são:

- o Não solúvel em água;
- o Não corrosivo;
- o Seu efeito é duradouro;
- o É de fácil aplicação no solo;
- o Quimicamente estável;
- o Retém umidade

c) GEL

É constituído de uma mistura de diversos sais que, em presença da água, formam o agente ativo do tratamento. Suas propriedades são:

- Quimicamente estável;
- Não solúvel em água;
- Higroscópico;
- Não corrosivo;

- Não é atacado pelos ácidos contidos no solo;
- Seu efeito é de longa duração.

4.7.2 - Coeficiente de redução devido ao tratamento químico do solo (K_t)

O valor de $\mathbf{K_t}$ poderá ser obtido medindo-se a resistência do aterramento antes e após o tratamento para cada caso em análise.

Sendo assim, obtém-se:

$$K_t = \frac{R_{após\ o\ tratamento}}{R_{antes\ do\ tratamento}}$$

Para um tratamento do tipo GEL, podem-se ilustrar prováveis valores de $\mathbf{K_t}$ em função da resistividade do solo, como mostra a Figura 29.

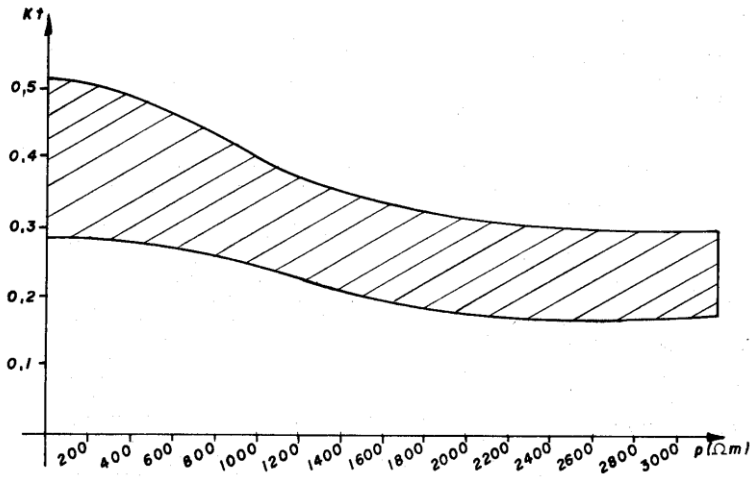


Figura 29 - Valores típicos de K_t em função da resistividade

A região hachurada indica os prováveis valores de K_t dado pelo fabricante.

Também é possível observar que, em solos com alta resistividade, o tratamento químico é mais eficiente.

5 - Sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA)

As descargas atmosféricas podem ser diretas ou indiretas.

A incidência de uma descarga atmosférica diretamente em uma linha de transmissão de energia submete os componentes do sistema próximos ao ponto de incidência. Os sistemas de proteção contra descargas diretas têm por objetivo básico interceptar raios e conduzi-los para a terra.

As descargas que incidem em uma região próxima à linha exercem influência no comportamento da mesma. Tais descargas são as descargas indiretas ou descargas para o solo. Quando elas atingem o solo, induzem tensão e corrente no sistema provocando sobretensões.

Na Terra ocorrem cerca de 100 relâmpagos por segundo enquanto que no Brasil, ocorrem 3,2, sendo a maior incidência de raios do mundo.

Anualmente, as descargas atmosféricas são responsáveis por prejuízos de, aproximadamente, um bilhão de dólares em todo o mundo e pela morte de 6.000 pessoas por ano, das quais 200 só no Brasil.

5.1 - Formação do raio

Ao longo dos anos, várias teorias foram desenvolvidas para explicar o fenômeno dos raios. Atualmente, sabe-se que a fricção entre as partículas de água e gelo que formam as nuvens dão origem à grande quantidade de cargas elétricas. A nuvem, por sua vez, fica carregada positivamente na parte superior e negativamente na parte inferior.

A nuvem carregada induz no solo cargas positivas que ocupam uma área correspondente ao tamanho da nuvem. Entre a nuvem e a Terra formam-se diferenças de potenciais que variam de 10.000 a 1.000.000 kV, sendo que a nuvem se encontra entre

300 e 5.000 metros de altura. Porém, não é necessário um gradiente de tensão superior à camada de ar entre a nuvem e o solo, pois esta camada contém grande quantidade de impurezas o que enfraquece a rigidez dielétrica da mesma. Sendo assim, o raio consegue perfurar o ar e descarregar na Terra.

Figura 30 - Incidência de raios nas edificações

As correntes dos raios penetram na instalação pelos captores e são conduzidas até o aterramento por meio das descidas, que são ligadas aos eletrodos de aterramento.

Os eletrodos de aterramento podem ser de cobre, aço galvanizado a quente ou aço inoxidável, não sendo permitido o uso de alumínio. É possível também utilizar o aço revestido de cobre (*copperweld*) com uma camada mínima de 254 milímetros.

O eletrodo de terra pode ter a forma de cabo, barra chata ou redonda ou tubo, com seções mínimas de 50 mm² para o cobre, 80 mm² para o aço galvanizado e 100 mm² para aço inoxidável.

Segundo a norma brasileira NBR 5419/2001, a probabilidade de penetração de uma descarga atmosférica no volume atmosférico a proteger é consideravelmente reduzida pela presença de um subsistema de captação corretamente projetado.

Tabela 6 - Classificação das estruturas referentes ao nível de proteção do SPDA

Classificação da estrutura	Tipo da estrutura	Efeitos das descargas atmosféricas	Nível de proteção
Estruturas comuns [1)]	Residências	Perfuração da isolação de instalações elétricas, incêndios e danos materiais Danos normalmente limitados a objetos no ponto de impacto ou no caminho do raio	III
	Fazendas, estabelecimentos agropecuários	Risco direto de incêndio e tensões de passo perigosas Risco indireto devido à interrupção de energia e risco de vida para animais devivo à perdas de controles eletrônicos, ventilação, suprimento de alimentação e outros	III ou IV [2)]
	Teatros, escolas, lojas de departamento, áreas esportivas e igrejas	Danos às instalações elétricas (por exemplo: iluminação) e possibilidade de pânico Falha do sistema de alarme contra incêndio causando atraso no socorro	II
	Bancos, companhias de seguro, companhias comerciais e outros	Como acima, além dos efeitos indiretos com a perda de comunicações, falha dos computadores e perda de dados	II
	Hospitais, casas de repouso e prisões	Como para escolas, além dos efeitos indiretos para pessoas em tratamento intensivo e dificuldade de resgate de pessoas imobilizadas	II
	Indústrias	Efeitos indiretos conforme o conteúdo das estruturas, variando de danos pequenos a prejuízos inaceitáveis e perda de produção	III
	Museus, locais arqueológicos	Perda de patrimônio cultural insubstituível	II
Estruturas com risco confinado	Estações de telecomunicações, usinas elétricas Indústrias	Interrupção inaceitável de serviçiões públicos por breve ou longo período de tempo Risco indireto para imediações devido a incêndios e outros com risco de incêndio	I
Estruturas com risco para os arredores	Refinarias, postos de combustível, fábricas de fogos, fábricas de munição	Risco de incêndio e explosão para a instalação e seus arredores	I
Estruturas com risco para o meio ambiente	Indústrias químicas, usinas nucleares, laboratórios bioquímicos	Risco de incêndio e falhas de operação, com consequências perigosas e para o meio ambiente	I

[1)] ETI (equipamentos de tecnologia da informação) podem ser instalados em todos os tipos de estruturas, inclusive estruturas comuns. É impraticável a proteção total contra danos causados pelos raios dentro destas estruturas; não obstante, devem ser tomadas medidas (conforme a NBR 5410) de modo a limitar os prejuízos a níveis aceitáveis

[2)] Estruturas de madeira: nível III; estruturas nível IV. Estruturas contendo produtos agrícolas potencialmente combustíveis (pós de grãos) sujeitos a explosão são considerados com risco para arredores.

Os captores podem ser constituídos por uma combinação qualquer dos seguintes elementos:

a) hastes;
b) cabos esticados;
c) condutores em malha;
d) elementos naturais.

Para o correto posicionamento dos captores, devem ser observados os requisitos da Tabela 7 e da Figura 31.

Tabela 7 – Posicionamento de captores conforme o nível de proteção

		Ângulo de proteção (α) - método Franklin, em função da altura da captor (h) (ver Nota 1) e do nível de proteção					Largura do módulo da malha (ver Nota 2) (m)
Nível de proteção	h (m) / R (m)	0 - 20 m	21 m - 30 m	31 m - 45 m	46 m - 60 m	> 60 m	
I	20	25°	1)	1)	1)	2)	5
II	30	35°	25°	1)	1)	2)	10
III	45	45°	35°	25°	1)	2)	10
IV	60	55°	45°	35°	25°	2)	20

R = raio da esfera isolante
1) Aplicam-se somente os métodos eletrogeométrico, malha ou da gaiola de Faraday
2) Aplica-se somente o método da gaiola de Faraday
NOTAS
1 Para escolha do nível de proteção, a altura é em relação ao solo e, para verificação da área protegida, é em relação ao plano horizontal a ser protegido.
2 O módulo da malha deverá constituir um anel fechado, com o comprimento não superior ao dobro da sua largura

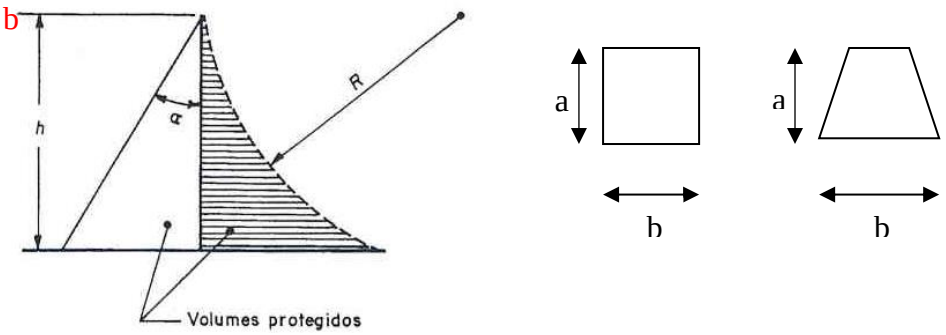


Figura 31 - Volume de proteção do SPDA

h – altura do captor

α – ângulo de proteção (método Franklin)

R – raio da esfera rolante

a – largura da malha

b – comprimento da malha

$b \leq 2^a$

5.2 - Métodos de projeto dos captores

No projeto dos captores, podem-se utilizar os seguintes métodos, conforme o caso:

a) ângulo de proteção (método Franklin);e/ou
b) esfera rolante ou fictícia (modelo eletrogeométrico); e/ou
c) condutores em malha ou gaiola (método Faraday).

5.2.1 - Modelo Eletrogeométrico

O Modelo Eletrogeométrico (MEG) foi embasado em um extensivo trabalho de pesquisa e resgatou o modelo sugerido por Preece em 1881, que previa que o volume de proteção de um elemento captor seria definido por um cone com vértice na extremidade do captor, delimitado pela rotação de um segmento de círculo tangente ao solo. O raio deste segmento de círculo é função do nível de proteção desejado para a instalação.

O MEG para aplicação na proteção das estruturas admite algumas hipóteses simplificadoras:

- só são consideradas as descargas negativas iniciadas nas nuvens;
- a descarga final se dá para o objeto aterrado mais próximo, independente de sua massa ou condições de aterramento;
- as hastes verticais e os condutores horizontais têm o mesmo poder de atração.

Uma aplicação do MEG pode ser visto na Figura 32, onde se verifica que o para-raios existente no topo do campanário protege apenas uma parte da igreja, sendo necessário mais um para-raios para proteger a ponta da nave da igreja.

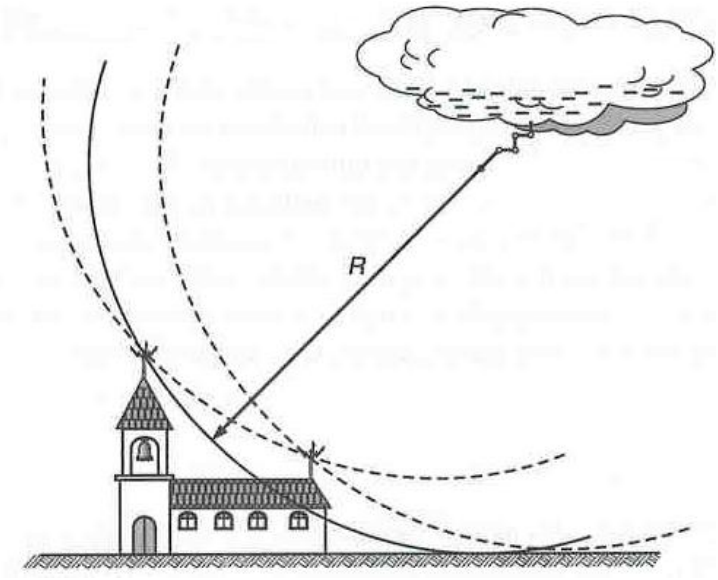


Figura 32 - Exemplo de proteção de uma estrutura pelo Método Eletrogeométrico

No MEG, a distância de atração ou o raio de atração R_a, é calculada por:

$$R_a = a \, . \, I_{máx}^{b}$$

Onde:

$I_{máx}$ é o valor de pico da corrente de retorno do raio

a e b são as constantes que variam conforme propostas de vários pesquisadores.

Quando aplicadas às estruturas, a norma NBR-5419/2005 adota a=10 e b=0,65.

O Modelo Eletrogeométrico é compatível com a constatação prática de que as estruturas muito altas são susceptíveis de serem atingidas por descargas laterais. Efetivamente, se a estrutura tiver uma altura superior à distância R, um elemento captor

no seu topo não garantirá uma proteção adequada, pois o segmento de círculo tangente ao solo tocará lateralmente na estrutura.

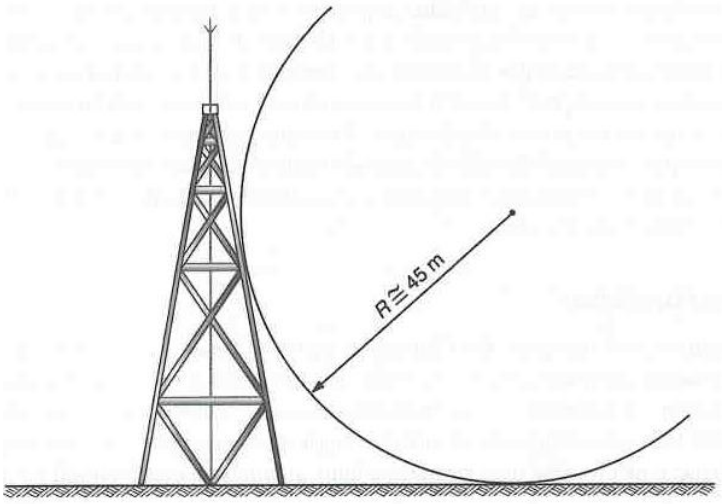


Figura 33 - Área protegida de uma descarga lateral

5.2.2 - Método de Franklin

O Método de Franklin é um caso particular do Modelo Eletrogeométrico, em que o segmento de círculo é aproximado por um segmento de reta (Figura 34), tangente ao círculo na altura do captor. Em termos geométricos é mais fácil de aplicar em relação ao Modelo Eletrogeométrico, porém pode resultar em um sistema superdimensionado, uma vez que o volume de proteção proporcionado pelo segmento de círculo sempre será superior ao proporcionado pelo segmento de reta.

A aproximação do segmento de círculo por um segmento de reta pode ser feita, pois o raio de atração R_a apresenta um valor alto. Sendo assim, essa simplificação se mostra bem razoável.

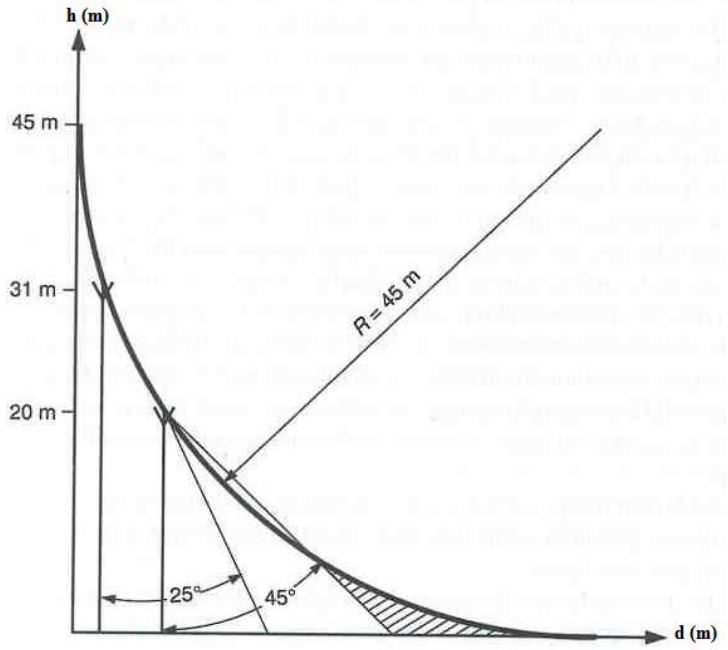


Figura 34 – Ilustração do Método de Franklin

5.2.3 - Método de Faraday

Neste sistema de proteção, uma rede de condutores, lançada na cobertura e nas laterais da instalação, forma uma blindagem eletrostática, destinada a interceptar as descargas atmosféricas incidentes. Elementos metálicos estruturais, de fachada e de cobertura, podem integrar esta rede de condutores, desde que atendam a requisitos específicos.

Edificações com estruturas metálicas e continuidade elétrica nas ferragens estruturais, assim como o aterramento em fundações (ou anel) têm bom desempenho como Gaiola de Faraday. Galpões em estrutura metálica (colunas e cobertura) constituem-se em Gaiolas de Faraday naturais, mesmo assim, devem ser complementados com um aterramento adequado, preferencialmente integrado às armaduras das fundações.

O Método de Faraday é também aplicável a edificações de grande área de cobertura (usualmente prédios industriais), onde a adoção de outras técnicas de dimensionamento da rede captora implica a utilização de grande número de mastros

captores, que demandam uma ampla rede de condutores de interligação que, por si só, já é uma aproximação de uma Gaiola de Faraday.

Pode-se fazer também uma blindagem em equipamentos elétricos (fontes de alimentação, inversores de frequência, PCs etc.), utilizando o conceito da Gaiola de Faraday que não permite que cargas elétricas penetrem ou saiam do ambiente em que estão confinadas. Dessa forma, esses equipamentos possuem suas caixas de montagem feitas de metal que são ligadas ao terminal terra.

5.3 - Interferência eletromagnética (EMI)

Qualquer condutor de eletricidade, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, gera ao seu redor um campo eletromagnético. Dependendo da frequência e intensidade da corrente elétrica, esse campo pode ser maior ou menor. Quando sua intensidade ultrapassa determinados valores, ela pode começar a interferir em outros circuitos próximos a ele. Esse fenômeno é a EMI.

A interferência eletromagnética (EMI) é um campo ou onda elétrica ou magnética que pode ou não alterar o funcionamento de um equipamento ou, até mesmo, danificá-lo. A interferência pode ser proposital ou acidental e pode ser de origem natural ou artificial. O campo magnético terrestre é de origem natural e, por exemplo, causa interferência em sistemas elétricos de potência pela influência de sua força. As descargas atmosféricas e os ventos são causas naturais de EMIs.

A EMI pode ser radiada (via ar), conduzida (via condutores), induzida ou pode ser uma combinação das mesmas.

Atualmente, os circuitos chaveados (fontes de alimentação, inversores de frequência, reatores eletrônicos, etc.) são os principais geradores artificiais de EMI. O “chaveamento” dos transistores (PWM) em frequências de 2 a 30 kHz gera interferências que podem provocar o mau funcionamento de outros circuitos próximos, tais como CPUs, e dispositivos de comunicação (principalmente RS 232).

Os sistemas de comunicações seriais como RS 232 são especialmente sensíveis à EMI. A RS 232 utiliza o terminal terra dos sistemas comunicantes como referência para os sinais de transmissão (TX) e recepção (RX). Caso haja diferenças de potenciais entre esses terminais terra, a comunicação poderá ser quebrada. Isso ocorre quando o potencial da terra é utilizado como referência e a resistência de terra não está dentro do valor ideal (menor ou igual a 10 Ω). Portanto o fio terra serve como uma "antena" receptora de EMI.

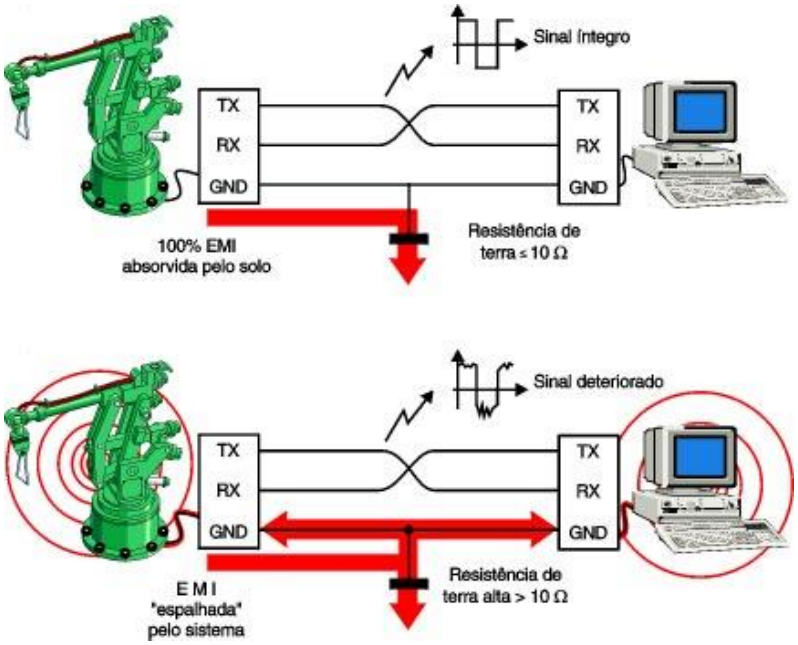


Figura 35 - Influência da EMI nos sinais de transmissão (TX) e recepção (RX)

Isso significa que o mau aterramento é uma "porta aberta" para que os ruídos elétricos (tais como EMI) entrem no circuito e causem um funcionamento anormal na máquina.

5.4 - Dispositivo de proteção contra surtos (DPS)

Os dispositivos de proteção contra surtos (DPS) devem apresentar características de forma a garantir o "grampeamento" de tensão a níveis inferiores e tempos suportáveis e manter a integridade, continuidade dos equipamentos e dispositivos da instalação. São conhecidos por limitar e eliminar as descargas atmosféricas.

5.4.1 - As diferentes classes de DPS

Um DPS deve suportar as ondas de choques do raio normalizadas segundo ensaios correspondentes à sua Classe I, II ou III, conforme a norma ABNT NBR IEC 6164-1.

- **Classe I**: os DPS Classe I permitem eliminar os defeitos diretos causados pelas descargas atmosféricas.
- **Classe II**: os DPS Classe II são destinados a proteger os equipamentos elétricos contra sobretensões induzidas ou conduzidas (efeitos indiretos) causados pelas descargas atmosféricas. Os ensaios do DPS Classe II são efetuados com corrente máxima de descarga de forma de onda 8/20 µs. Ele pode ser instalado sozinho ou em cascata com um DPS Classe I ou com outro DPS Classe II; também deve ser instalado com um dispositivo de desconexão a montante (um disjuntor, por exemplo), cuja capacidade de interrupção deve ser no mínimo igual à corrente máxima de curto-circuito presumida no local da instalação.
- **Classe I+II**: Os ***DPS Classes I+II*** *asseguram a proteção contra os efeitos diretos e indiretos causados pelas descargas atmosféricas.*
- **Classe III**: os DPS Classe III são destinados à proteção fina de equipamentos situados a mais de 30 m do DPS de cabeceira. O DPS

Classe III é testado com uma forma de onda de corrente combinada 12/50 µs e 8/20 µs.

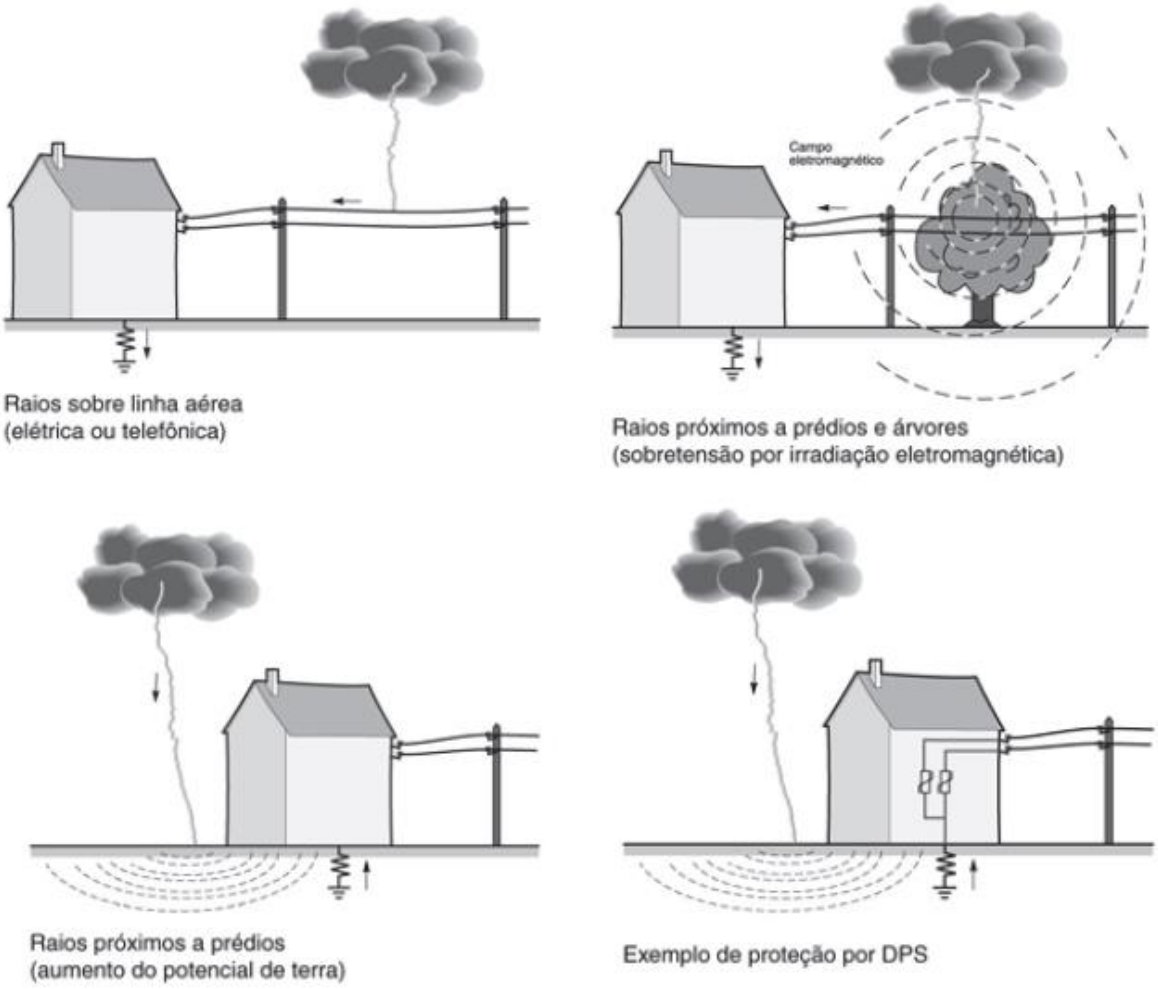


Figura 36 - Efeitos diretos e indiretos causados pelas descargas atmosféricas

5.4.2 - Regra dos "50 cm"

A eficácia da proteção contra descargas atmosféricas depende principalmente da qualidade da instalação dentro dos painéis. No caso de descarga atmosférica, a impedância dos cabos aumenta de modo considerável: a impedância do circuito cresce com seu comprimento e a frequência 200 000 vezes superior em 50 Hz.

A Regra dos “50 cm” se aplica à porção do circuito afetado exclusivamente pela corrente de descarga. Quando o comprimento dele for superior a 50 cm, a sobretensão transitória deve ser bastante considerável, sendo maior o risco de danos aos equipamentos. As conexões entre o DPS e a barra de terra devem ser as mais curtas possíveis. É necessário não ultrapassar 50 cm, para proteger de maneira eficaz os equipamentos elétricos.

5.4.3 - Localização do DPS

De acordo com as prescrições na norma NBR 5410/1997, O DPS deverá ser localizado o mais próximo possível do Ponto de Entrada da edificação, ou seja, ponto em que os cabos/condutores elétricos entram na edificação.

Para fazer a instalação do DPS, deve-se conectar um de seus terminais a fio que sai do disjuntor e o outro terminal a barra de equipotencialização representando pelo condutor de proteção (PE). A Figura 37 ilustra como essas conexões são feitas.

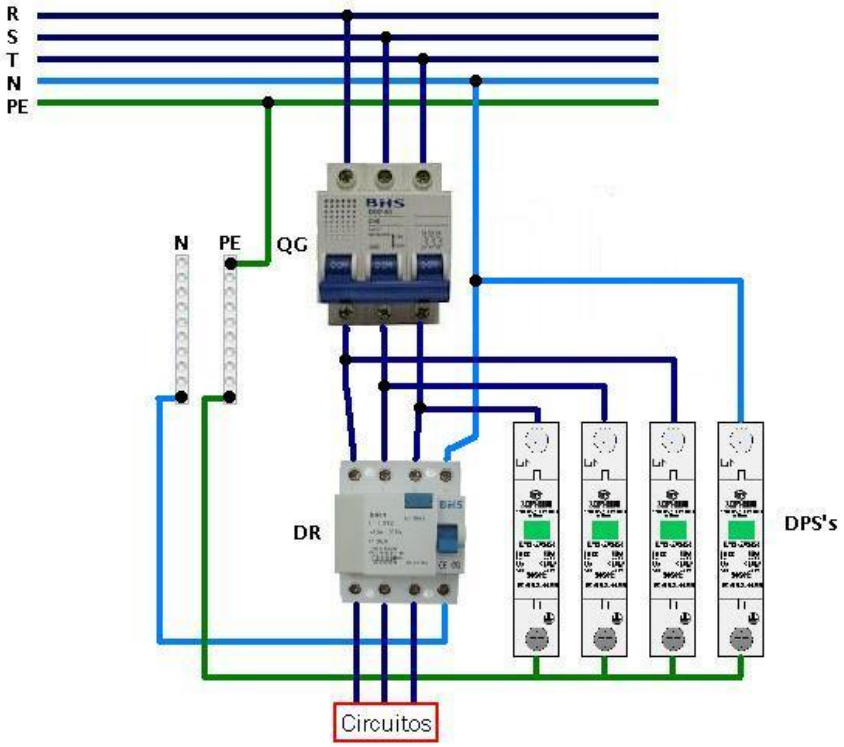


Figura 37 - Esquema de ligação de um DPS em um circuito elétrico

6 - Estudos de caso

6.1 - Projeto de um sistema de aterramento de uma residência térrea

Considerando uma casa de aproximadamente 250 m^2, localizada na cidade do Rio de Janeiro, composta de uma sala, dois quartos, cozinha, banheiro e um quintal com fornecimento de energia elétrica pela concessionária em corrente alternada na frequência de 60 Hz com tensão nominal entre fases de 220 V (sistema trifásico a 4 fios).

A casa possui os seguintes aparelhos elétricos e suas respectivas potências aparentes conforme a Tabela 8:

Tabela 8 – Potência aparente dos equipamentos elétricos

APARELHO	QUANTIDADE	POTÊNCIA (VA)
DVD	1	10
Ar condicionado (7500BTU/h)	2	4400
Cafeteira elétrica	1	600
Chuveiro	1	4500
Computador	2	500
Ferro elétrico	1	1000
Forno micro-ondas	1	1300
Geladeira	1	200
Liquidificador	1	200

Máquina de lavar roupas	1	1000
TV LED de 26 polegadas	2	200
TV LED de 40 polegadas	1	100

6.1.1 - Aspectos construtivos

Antes de começar o projeto, é necessário prestar atenção no tipo de solo que o pátio da casa dispõe. O que deve ser observado é se ele é úmido, pois solos com esse aspecto são melhores para o aterramento. Caso ele seja rochoso e seco, é necessário fazer uma análise e um tratamento para deixá-lo de acordo com o necessário para o trabalho de aterramento residencial. Nesse projeto iremos adotar um solo bastante úmido e, portanto, bom para o aterramento com uma resistividade aparente $\rho_a = 50\ \Omega.m$.

O sistema de aterramento em uma residência, devido a sua complexidade, geralmente é composto por uma haste de aço cobreada enterrada no solo que fica numa caixa de inspeção. A haste de cobre deve ter um comprimento mínimo de 2 (dois) metros e diâmetro mínimo de 3/4" (19,05 mm).

O RECON – BT da Light, concessionária fornecedora de energia da cidade do Rio de Janeiro, regulamenta que o valor máximo da resistência de aterramento não deve ultrapassar 25 ohms. Portanto, a resistência de aterramento do nosso projeto é dada por:

$$R_{1haste} = \frac{50}{2 \times \pi \times 2} \ln\left(\frac{4 \times 2}{19{,}05\ \times 10^{-3}}\right)$$

$$\mathbf{R_{1haste} = 24{,}03\ \Omega}$$

Após ter verificado que a resistência de aterramento está dentro dos limites estabelecidos pela concessionária de energia, é necessário definir o local onde a caixa de inspeção será enterrada. É interessante que a mesma fique o mais próximo possível do local de entrega de energia.

Utilizando a força das mãos, deve-se exercer pressão para cravar a haste de aço cobreada no centro do diâmetro da caixa de inspeção onde a haste deverá ser fixada até a metade da altura da caixa.

Figura 38 - Haste de aterramento

Em seguida, deve-se passar o condutor de aterramento pelo eletroduto até a caixa de inspeção e com auxílio de uma chave conectar o cabo à haste através de um conector específico feito de cobre.

Figura 39 - Conector de aterramento

A caixa de inspeção pode ser preenchida com brita, deixando o conector visível, além de ajudar a manter a umidade do solo junto à haste e evita que alguém jogue concreto dentro da caixa de maneira inadvertida.

Figura 40 - Caixa de inspeção

Considerando a adoção do esquema de aterramento **TN-S**, o condutor de aterramento é interligado ao condutor neutro na caixa de entrada. **Nesse esquema de aterramento, o condutor de proteção e o condutor de neutro <u>não podem ser interligados nos circuitos à jusante (após) da proteção geral</u>, de forma a não provocar a perda da seletividade nas proteções diferenciais residuais.**

A Figura 41 mostra como é feita essa interligação entre o condutor de aterramento (fio verde) e o condutor neutro (fio azul) fornecido pela concessionária.

Figura 41 – Interligação entre o condutor de aterramento e o condutor neutro

O condutor neutro não pode ser seccionado, pois caso não haja um sistema de aterramento, a corrente de falta retornará a carga podendo danificar algum equipamento. Isso somente poderá ser feito, sem o risco de danificar um equipamento, se houver aterramento na carga que permita o escoamento da corrente de curto circuito.

A partir deste ponto de interligação, deriva-se um novo condutor (agora chamado condutor de proteção) que é conectado ao barramento de equipotencialização do quadro de distribuição.

Figura 42 - Barramento de terra

Esse cabo de proteção, vulgarmente chamado de "fio terra", deve percorrer toda a instalação interna e ao qual devem ser conectadas todas as partes metálicas (carcaças) não energizadas dos aparelhos elétricos existentes na residência, bem como o terceiro pino (**terra**) das tomadas dos equipamentos elétricos, conforme a norma NBR 5410.

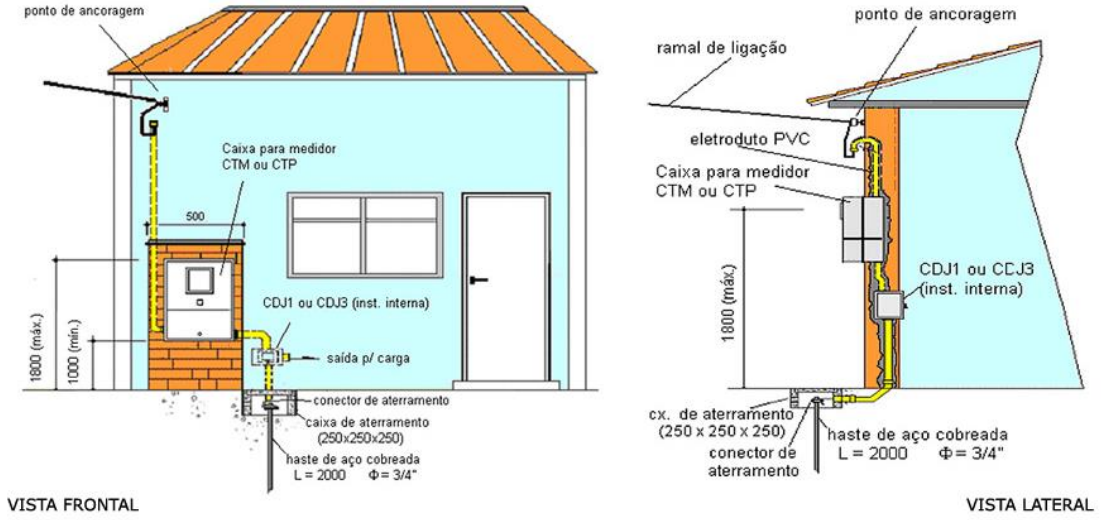
6.1.2 - Dimensionamento dos materiais utilizados

De acordo com a tensão nominal de fornecimento de energia e da demanda de atendimento, o RECON – BT da Light recomenda as seções retas dos condutores de cada uma das fases do circuito após a medição, do condutor de proteção e do neutro.

Sendo um sistema trifásico a 4 fios com tensão de 220 volts entre fases e uma demanda de atendimento de 13,81 kVA, a residência se enquadra na categoria de atendimento T3 e, portanto, as dimensões dos materiais são:

- Disjuntor tripolar de 60 A;
- Dispositivo DR de 4 polos e sensibilidade de 30 mA;

- Condutor neutro de cobre (PVC 70 ºC) e seção reta de 16 mm^2;
- Condutor de cada fase de cobre (PVC 70 ºC) e seção reta de 16 mm^2;
- Condutor de proteção de cobre (PVC 70 ºC) e seção reta de 16 mm^2;
- Condutor de interligação do neutro ao aterramento nu de cobre e seção reta de 16 mm^2;
- Eletroduto rígido de PVC 3/4" para descida do aterramento.



Legenda: CDJ3 – Caixa para Disjuntor Tripolar

CTP – Caixa Transparente Polifásica

Apesar de uma residência de um só pavimento não ser tão alta, é preciso proteger os equipamentos contras as descargas atmosféricas que podem vir através da incidência de um raio sobre a rede elétrica. Portanto, é necessário instalar um DPS no circuito de entrada da edificação conforma a Figura 37 da Seção 5.4.3.

6.1.3 - Aterramento do chuveiro elétrico

Para evitar risco de choques elétricos, o fio terra (fio verde ou verde/amarelo) deve ser conectado a um sistema de aterramento, conforme a norma brasileira NBR-5410.

Um costume muito empregado e que deve ser evitado é o aterramento do fio neutro. No caso de uma sobrecarga da rede elétrica, ocasionada por um raio, o fio neutro pode ficar carregado e queimar os aparelhos elétricos ligados a ele.

A Figura 43 ilustra como devem ser feitas as conexões elétricas de um chuveiro elétrico para que ele funcione sem oferecer riscos à segurança. Neste exemplo, a alimentação do chuveiro é feita por dois condutores de fases diferentes e mais o cabo de proteção.

Para o caso de um local onde o sistema seja monofásico, o chuveiro elétrico será alimentado por um condutor fase, um condutor neutro e o cabo de proteção.

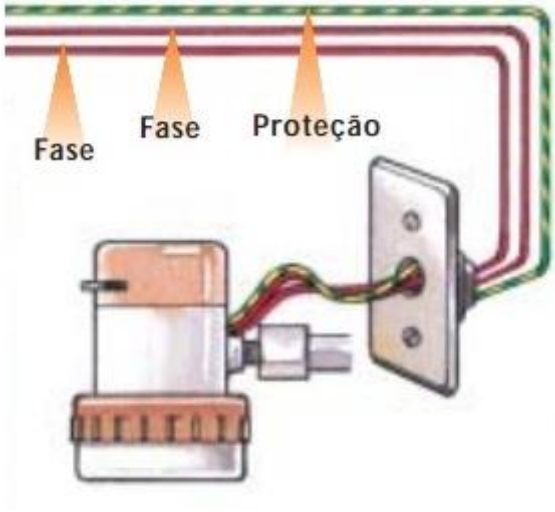


Figura 43 – Conexões elétricas do chuveiro

Em hipótese alguma se deve utilizar plugues ou tomadas de uso geral (TUG) na instalação de um chuveiro elétrico ou de aparelhos de aquecimento, pois as TUG não são preparadas para resistir à corrente elétrica que circula nestes equipamentos de alta potência. Seu uso indevido pode comprometer a segurança da instalação.

No caso da falta de aterramento do chuveiro, há risco de choque elétrico devido a uma possível corrente de fuga que poderá circular por alguém ao abrir a torneira, fechando o circuito para a terra.

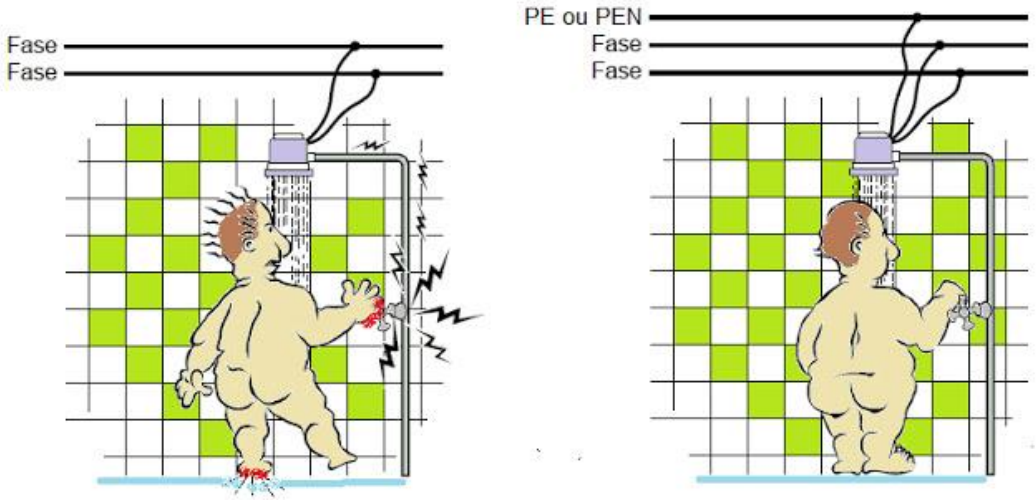


Figura 44 - Choque devido a corrente de fuga do chuveiro

6.1.4 - Aterramento dos eletrodomésticos

Apesar de aparentemente ser um aparelho inofensivo, é preciso seguir algumas instruções de segurança a fim de evitar o risco de choque elétrico.

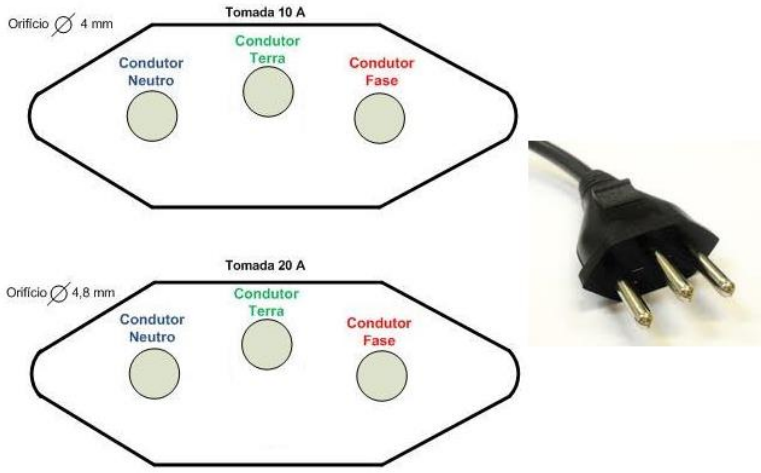
No caso dos eletrodomésticos, em geral, não é possível fazer o aterramento diretamente pelo plugue de alimentação, pois o fio terra vem em separado ligado à carcaça na parte traseira do equipamento. De acordo com a norma, esse fio é da cor verde-amarela.

Figura 45 - Fio de aterramento

Nesse caso, então, deve-se fazer a conexão do fio de terra diretamente com o sistema de aterramento local através de uma emenda devidamente isolada.

6.1.5 - Aterramento dos equipamentos em geral

Segundo a norma ABNT NBR 14136:2002 que criou o Padrão Brasileiro de Plugues e Tomadas, o aterramento dos aparelhos como: TV, ar condicionado, liquidificador, home theater etc; é feito pelo próprio plugue de equipamento classe I (Plugue 2P + T) conectando ao sistema de aterramento da instalação.



6.2 - Projeto de um SPDA para um prédio residencial

Seja um prédio de 5 andares com as seguintes informações:

→ Largura: 40 metros

→ Comprimento: 60 metros

→ Altura: 15 metros

→ Construção: pré-moldada

Sendo assim, vamos iniciar o projeto do SPDA escolhendo o método de Faraday que utiliza condutores em malha como captor para as descargas atmosféricas.

6.2.1 - Aspectos construtivos

Primeiramente temos que definir o nível de proteção a ser adotado conforme a norma NBR 5419. Sendo uma estrutura comum e do tipo residencial, o nível de proteção a ser considerado para o projeto é o nível III.

Escolhido o nível de proteção, o próximo passo é definir o número de prumadas (descidas) e o *mesch* da Gaiola de Faraday, pois o espaçamento médio das prumadas é definido em função do nível de proteção conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Espaçamento médio dos condutores de descida conforme o nível de proteção

Nível de proteção	Espaçamento médio (m)
I	10
II	15
III	20
IV	25

Com o *mesch* da Gaiola (20m x 20m) definido, é possível calcular o número de prumadas dividindo-se o perímetro pelo espaçamento médio correspondente:

$$\text{Nº prumadas} = \frac{2 \times (40 + 60)}{20} \cong 10 \text{ prumadas}$$

Depois é preciso calcular o tipo de condutor da cobertura e das descidas. Ele pode ser um cabo de cobre nu de 35 mm^2 ou uma barra chata de alumínio 7/8" x 1/8". Vamos optar pela barra chata de alumínio por ter um custo menor e menor incidência de furto. Então:

- Comprimento das barras de cobertura = (3 x 60m) + (4 x 40m) = 340 metros
- Comprimento das barras de descida = 10 x (15m – 1,5m) = 135 metros
- Comprimento total das barras = 475 metros

Sendo assim o sistema com as barras de cobertura e as barras prumadas pode ser visto conforme a Figura 46.

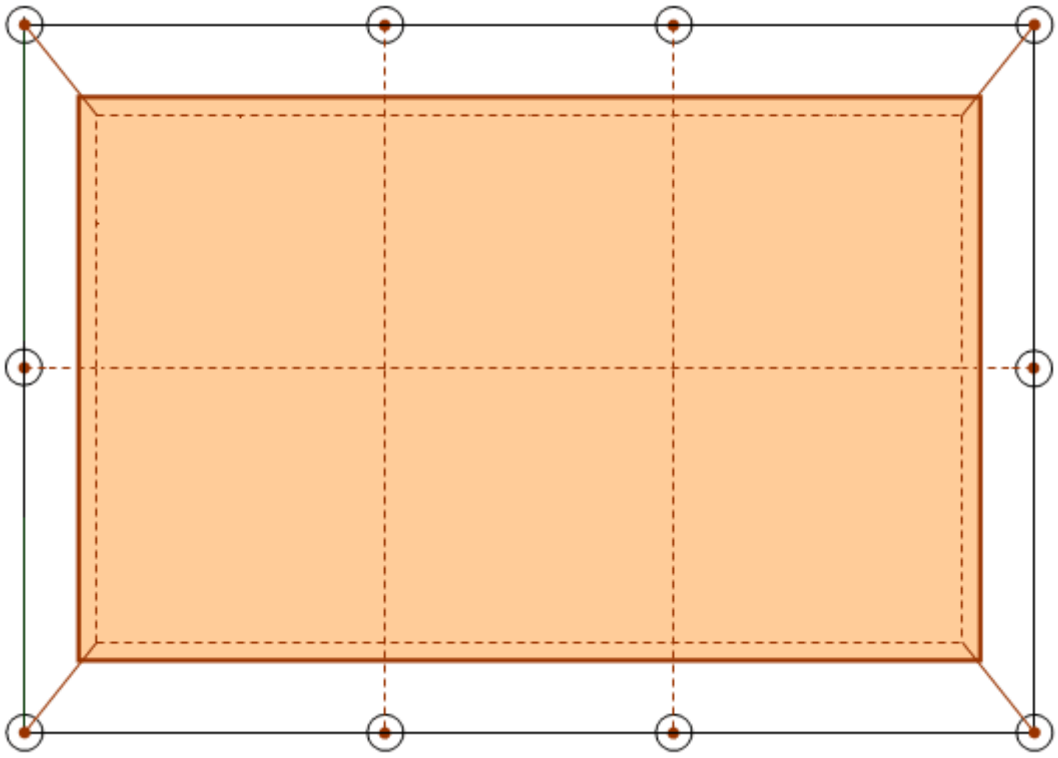


Figura 46 – Malha formada pelos condutores de cobertura e descida

A conexão entre as barras pode ser feita por meio de rebites, no caso de uma barra de alumínio, ou por meio de um conector em X, no caso de um cabo de cobre nu.

A Figura 47 mostra uma malha de condutores de cobre nus aplicada em cobertura pré-moldada semelhante ao projeto realizado.

Figura 47 - Malha aplicada em cobertura pré-moldada

Uma informação importante é que a fixação das barras diretamente na parede deve ser evitada por diversas razões como:

- Corrosão eletrolítica devido aos materiais diferentes do parafuso que perfura a barra e da própria barra;
- Necessidade de uma barra mais larga para compensar a perda da área de seção devido à perfuração;
- A dilatação das barras devido ao Efeito Joule quando a mesma recebe uma descarga elétrica e acaba sendo arrancada da parede com a bucha e tudo.

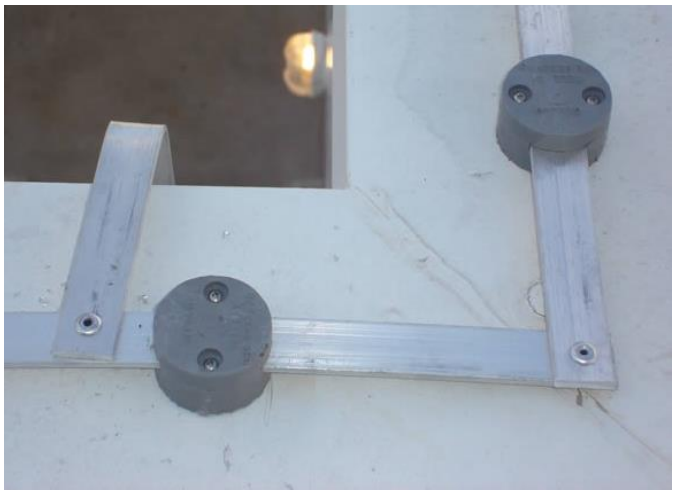


Figura 48 - Barra chata de alumínio

Nas descidas é importante que tenha uma caixa aérea com junção de medição para fazer algumas medidas se necessário, como mostra a Figura 49.

Figura 49 – Caixa de medição

Essa caixa, portanto, deve ser instalada a uma altura que seja de fácil alcance e próxima do ponto de ligação ao eletrodo de aterramento.

Na caixa de medição também é feita a conexão entre a barra chata de alumínio e o cabo de cobre nu que é responsável por interligar os eletrodos de aterramento.

Figura 50 - Localização da caixa de medição

6.2.2 - Aterramento das estruturas do SPDA

Pode-se utilizar as ferragens de fundação do prédio para conduzir e dispersar a corrente da descarga elétrica na terra, porém neste projeto iremos considerar um eletrodo de terra como forma de aterramento.

Para um nível de proteção III, o comprimento do eletrodo é independente da resistividade. De acordo com a norma, o comprimento mínimo total dos eletrodos de aterramento deve ser de 5 metros.

Sendo assim, vamos utilizar no nosso projeto 10 eletrodos de 1 metro cada para cada descida. Eles devem ser instalados externos ao volume a proteger, a uma distância de 1 metro das fundações da estrutura.

Os eletrodos são conectados entre si por um cabo nu (# 50 mm^2), contornando o prédio e depois faz-se uma ligação equipotencial próxima ao quadro geral de entrada da instalação. Nesse caso, conecta-se ao terminal de aterramento principal.

6.3 - Projeto de um sistema de aterramento de um laboratório de informática

Seja um laboratório de informática composto por 12 computadores e um servidor onde cada computador disponha de, no mínimo, 2 m^2 de forma a garantir o menor espaço para a operação dos equipamentos.

Sendo assim, o laboratório tem um formato retangular, com dimensões de 15 metros x 6 metros, e com a disposição dos computadores conforme mostra a Figura 51.

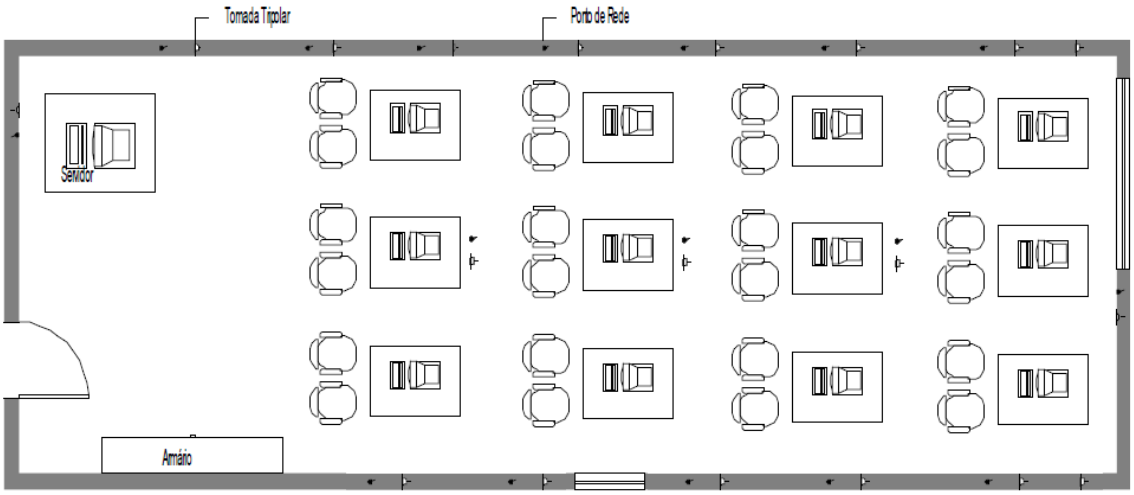


Figura 51 – Laboratório de informática

Esse laboratório deve possui algumas características, assim como todo o material em seu interior, a fim de manter um ambiente propício para a utilização dos computadores. São eles:

- ✓ Tomadas de Uso Específico (TUEs) para os computadores;
- ✓ Temperatura ambiente de no máximo 30 ºC, necessitando de um aparelho de ar condicionado de 18 000 BTUs;
- ✓ Piso adequado que não gere energia estática em função do atrito (nesse projeto o piso utilizado será cimento liso);

- ✓ Fornecimento de energia elétrica em 127 volts, fase-neutro, e com uma capacidade de 12 kVA (13 x 500 VA + 18 000 BTUs + iluminação);
- ✓ Quadro de distribuição de energia elétrica independente para evitar interferências e oscilações na rede elétrica geradas por outros equipamentos.

Figura 52 - Quadros elétricos

6.3.1 - Sistema de aterramento

O aterramento do quadro juntamente com os circuitos deverá seguir a norma e, portanto, a resistência de aterramento não deve ultrapassar **o valor máximo de 10 Ω**. Esse valor é considerado conforme orientação da ABNT quando equalizado com o sistema de para-raios. Quando não existir para-raios na instalação, o valor máximo da resistência de aterramento não deve ultrapassar os 25 Ω.

Neste projeto, por se tratar de um solo mais seco (resistividade do cimento ρ_a = 60 Ω.m) e um limite de valor de resistência de aterramento relativamente baixo, o sistema de aterramento terá uma geometria mais complexa e um custo mais alto.

Portanto, utilizaremos um sistema formado por quatro hastes de cobre com 2,4 metros de comprimento e diâmetro de 1/2" (12,7 mm), formando um quadrado vazio com um espaçamento de **e** = 2 metros entre elas. As hastes serão cravadas no solo e interligadas por um fio de cobre nu (# 50 mm^2) como mostra a Figura 25.

Sendo assim, a resistência equivalente de aterramento é dada por:

$$R_{eq} = K \cdot R_{1haste}$$

O valor de K[6] é obtido através de uma curva em função do espaçamento entre as hastes e o comprimento delas. Para a configuração do nosso projeto K = 0,375. Então:

$$R_{eq} = 0{,}375 \cdot R_{1haste}$$

$$R_{1haste} = \frac{60}{2 \times \pi \times 2{,}4} \ln\left(\frac{4 \times 2{,}4}{12{,}70 \ \times 10^{-3}}\right) = 26{,}4\ \Omega$$

$$R_{eq} = 0{,}375 \cdot 0{,}44 \cdot 60 = \mathbf{9{,}9}\ \Omega$$

6.3.2 - Instalação elétrica

Após o dimensionamento do aterramento em si, é necessário fazer a interligação do terminal terra junto aos equipamentos. Na canaleta destinada à fiação elétrica, vamos passar o cabo de proteção (# 16 mm^2) dos computadores da barra de terra encontrada no quadro elétrico até os terminais das tomadas, para se conectar ao pino de aterramento.

Figura 53 - Pino de aterramento

7 - Conclusão

Neste trabalho foi apresentado, de uma maneira bem detalhada e explicativa, o passo a passo necessário para se projetar um sistema de aterramento, quais eram as finalidades desse projeto, os tipos de sistemas e os equipamentos necessários que dão suporte ao aterramento.

Foram apresentadas também soluções corretivas para sistemas de aterramento já fisicamente instalados, mas que não apresentam um valor de resistência elétrica de acordo com os níveis definidos pela norma. Portanto, a Seção 4.7 mostra como deve ser feito o tratamento químico do solo visando à diminuição da sua resistividade.

O Capítulo 5 foi totalmente dedicado a falar das descargas atmosféricas, mostrando desde como os raios são formados até como eles são capturados pelos elementos captores e direcionados à terra, assim como dos dispositivos que protegem os equipamentos elétricos dos efeitos direto e indireto das descargas.

Para justificar a necessidade dos sistemas de aterramento, o Capítulo 3 abordou quais são os riscos que as correntes elétricas perigosas podem trazer ao nosso organismo. Nesse mesmo capítulo, foram definidos os potenciais de toque e de passo.

Ao final foram feitos alguns estudos de caso onde foi possível utilizar todo o embasamento teórico aplicando-o na prática.

Dentro do que este trabalho apresentou, é possível afirmar que a maioria dos objetivos iniciais traçados para este projeto foram alcançados. O objetivo principal era apresentar quais eram os sistemas de aterramento existentes e como fazer o seu dimensionamento. Esse ponto pôde ser explorado devido à ampla bibliografia já publicada.

A maior dificuldade foi a falta de clareza na razão da escolha por um determinado tipo de sistema de aterramento específico. Outra dificuldade encontrada foi em relação ao processo construtivo dos sistemas de aterramento que não eram tão explícitos.

Não foi possível, neste projeto, encontrar métodos mais simples e funcionais de aterramento nem soluções tão inovadoras que possibilitem, por exemplo, um morador de um prédio construir um aterramento próprio para seu apartamento num primeiro momento.

Mesmo assim, o trabalho apresentou, de forma extensa, as diversas possibilidades de se fazer um aterramento, as exigências de um projeto, os cuidados que devem ser tomados ao fazê-lo e como esse projeto deve ser executado. Além disso, foram apresentadas quais as ferramentas e os equipamentos necessários para fazer as medições dos parâmetros exigidos de um bom aterramento, como a resistividade do solo.

No que tange à segurança pessoal, foi falado dos dispositivos DR e dos efeitos provocados pela corrente elétrica ao circular pelo nosso organismo, além dos cuidados que cada um de nós devemos tomar.

Por último, de forma bem didática e prática, foi mostrado todo o processo de construção de um aterramento residencial simples, de uma estrutura de SPDA em um prédio e do aterramento em uma sala de computadores.

Sendo assim, foi possível através deste trabalho orientar para que práticas inadequadas de aterramento não sejam mais realizadas por falta de conhecimento técnico do assunto.

Para trabalhos futuros, fica a possibilidade de fazer um projeto mais amplo, envolvendo questões mais específicas, como a análise da dispersão da corrente elétrica pelo solo, utilizando métodos computacionais. Também é relevante realizar um estudo aprofundado dos tipos de solos existentes, analisando as suas características, medindo a sua resistividade e verificando a sua interação com os diferentes tipos de sistemas de aterramento.

Referências bibliográficas

[1] KINDERMANN, G., CAMPAGNOLO, J.M., 2011, ***Aterramento Elétrico***. 6 ed. Florianópolis – EEL/UFSC.

[2] *Manual de Instalações Elétricas Residenciais* (CEMIG-2003). Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/10231125/62/Fugas-de-Corrente>. Acesso em: 24 fev. 2013.

[3] NBR 5410/1997 – *Instalações elétricas de baixa tensão*. Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[4] CREDER, H., 2007, ***Instalações Elétricos***. 15 ed. Rio de Janeiro – LTC.

[5] MORENO, H., COSTA, P.F., *Manual de Aterramento Elétrico do Procobre.* Disponível em: <www.apes.eng.br/Irineu/aterramento.pdf>. Acesso em: 19 ago. 2012.

[6] KINDERMANN, G., 2010, ***Curto-Circuito***. 5 ed.(Edição do autor).

[7] KINDERMANN, G., 2011, ***Proteção de Sistemas Elétricos de Potência***. 3 ed. (Edição do autor).

[8] NBR 15749/2009 – *Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento*. Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[9] NBR 5419/2001 – *Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas*. Rio de Janeiro, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[10] CASSIOLATO, C. *EMI – Interferência Eletromagnética.* Disponível em: < http://www.profibus.org.br/artigos/EMI_Interferencia_Eletromagnetica.pdf>. Acesso em: 24 fev.2013

[11] ROCHA, P.L., *Introdução à Modelagem de Sistemas de Aterramento*. Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[12] *Simulador de Demanda*. Disponível em: < https://agenciavirtual.light.com.br/slno/simuladorDemanda.do>. Acesso em 12 mar. 2013.

[13] *Dimensionamento e Quantificação dos Materiais do SPDA.* Disponível em: <http://www.gelcam.com.br/dimensionamento_e_especificacao_spda.php>. Acesso em: 12 mar. 2013.

[14] *Cartilha: Recomendações para a Montagem de Laboratório de Informática nas Escolas*. Disponível em: <http://www.cted.educacao.rj.gov.br/nterj/escolas/me000353.pdf>. Acesso em 13 mar. 2013.