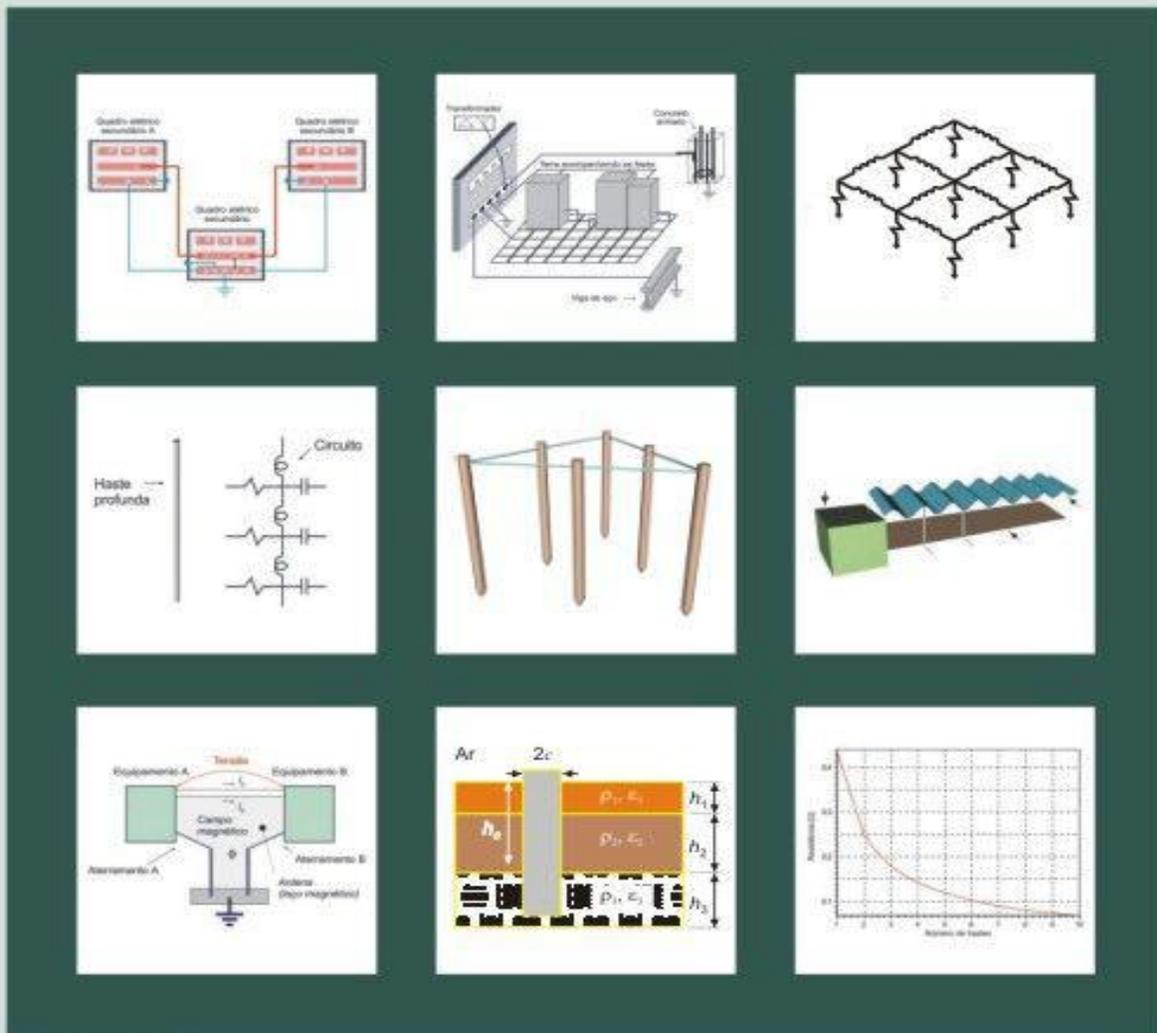


Técnicas de Aterramento

Marcos André Mattos, Ph.D.



www.okime.com.br

OKIME

2a edição

Técnicas de Aterramento

Marcos André Mattos, Ph.D

<http://spdaterra.blogspot.com.br/>

2ª Edição

Rio de Janeiro, 2014

Ficha catalográfica

M436t Mattos, Marcos André da Frota.
Técnicas de aterramento / Marcos André da Frota
Mattos. – Rio de Janeiro, RJ : Okime Eletromagnetismo
Aplicado, 2014.
243p.

ISBN 85-98294-01-2

1. Engenharia elétrica. 2. Eletromagnetismo.
3. Descarga elétrica - Proteção. I. Título.

CDD - 621.3
- 551.563

Índices para Catálogo Sistemático

1. Engenharia elétrica – 621.3
2. Eletromagnetismo – 621.3
3. Descarga elétrica – Proteção – 551.563

: ISBN

DIREITOS AUTORAIS

**É proibida a reprodução total ou parcial desta obra sem o consentimento
prévio do autor.**

Prefácio

Foi com satisfação que vi esgotada a primeira edição deste livro, mesmo esgotada a procura foi grande, nada mais recompensador para um autor. Volto a publicar este livro com acréscimos e atualizações. Agora, lançando mão da mais nova tecnologia disponível de editoração de livros, o que permitirá ao profissional da área a estar com um exemplar deste livro sempre a mão.

Marcos André

Prefácio da primeira edição

As publicações sobre aterramento elétrico são raras não somente no Brasil mas também em outros países. Nos países localizados acima dos trópicos a questão de aterramento tem soluções mais simples do que nos países tropicais tais como o Brasil. Isto devido à lixiviação e a densidade de descargas atmosféricas que são bem maiores nas regiões tropicais do que nas regiões subtropicais ou árticas. Esta questão geográfica aliada aos aspectos culturais torna as instalações brasileiras altamente vulneráveis às condições elétricas externas ou internas a estas. Este livro vem trazer mais informações sobre aterramento elétrico, ramo do eletromagnetismo aplicado que está impregnado de lendas, filósofos, achismos, “deixa que eu entendo”, reis de um olho só etc. Podemos juntar a isto os interesses comerciais. Felizmente, porém em grande minoria, há os pesquisadores, acadêmicos e os demais bons profissionais que mantém dentro de suas áreas de atuação a correta aplicação e entendimento do referencial elétrico, do aterramento e da massa condutora. Este texto visa colocar esta seção do eletromagnetismo dentro de seus limites de aplicabilidade e correção conceitual mantendo, contudo, os que visam receituários interessados.

Esta obra foi escrita não apenas levando em conta a física da eletricidade mas também normas técnicas e questões e necessidades colocadas por vários profissionais que lidam com sistemas elétricos de todos os tipos.

Desejo lembrar aos leitores mais ávidos que escrevi apenas um livro de aterramento muito embora há a necessidade de uma enciclopédia sobre o assunto.

Marcos André

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO

2 ELETROMAGNETISMO

3 CIRCUITOS

4 EFEITO ANTENA

5 LINHAS DE TRANSMISSÃO

6 MATERIAL DE ATERRAMENTO

7 CAMINHO DE RETORNO

8 RESISTÊNCIA X IMPEDÂNCIA DE TERRA

9 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO

10 ELETRODOS COM HASTES

11 ELETRODOS COM CABOS E OUTROS

12 MALHA DE TERRA

13 MEDIÇÕES

14 INSTALAÇÕES PREDIAIS

15 INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

16 EQUIPAMENTOS

A APÊNDICE

A1 Técnicas

A2 Curvas de redução do número de camadas

A3 Geometria

A4 Unidades Físicas

B BIBLIOGRAFIA

B1 ELETROMAGNETISMO E AFINS

B2 INSTALAÇÕES

B3 SOLO

B4 ELETRODOS

B5 NORMAS

B6 SUBESTAÇÃO E MALHA

B7 OUTROS

1 INTRODUÇÃO

Este livro aborda o aterramento elétrico de uma forma atual e consistente. Traz os elementos indispensáveis para um bom aterramento com uma linguagem direta e fácil. Esta leitura é indicada a todos os técnicos, engenheiros e cientistas que estão diretamente ou indiretamente envolvidos com equipamentos elétricos e eletrônicos.

O aterramento é um subitem da compatibilidade eletromagnética, e esta aparece dentro do eletromagnetismo. Para haver um completo entendimento do que é, para que serve e da eficiência de um aterramento, é necessário situar corretamente este sistema dentro do ambiente eletromagnético em questão. As técnicas envolvidas em um aterramento adequado vão além do tradicional conhecimento do solo. Os conceitos e técnicas de linhas de transmissão, antenas, material, impedâncias e circuitos são indispensáveis dentro das necessidades atuais de escoar ruídos indesejados, destacando-se o efeito da propagação do sinal.

1.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

A compatibilidade eletromagnética popularmente é conhecida como interferência eletromagnética. A compatibilidade eletromagnética tem este nome por transmitir uma ideia de coexistência “pacífica” entre dois dispositivos. Estes dispositivos, apesar de estarem se interferindo mutuamente, ainda mantêm o seu funcionamento correto, isto é, existe compatibilidade elétrica e magnética entre eles. A compatibilidade eletromagnética, ou simplesmente CEM, pode ser subdividida em vários itens, entre os quais:

- Aterramento;
- Blindagem: cabos, bastidores, ambientes;
- Emissividade e suscetibilidade;
- Arranjo de dispositivos e componentes;
- Filtros e supressores;
- Protetores;
- Descarga eletrostática;
- Descarga atmosférica (proteção, fenomenologia etc.);
- Medições;
- Componentes harmônicas.

1.2 ESTRUTURA DO LIVRO

Este livro está dividido em cinco partes, cada parte contendo um ou mais capítulos. Estas partes são:

- Introdução;
- Básica (Eletromagnetismo, Circuitos, Antenas, Linhas de transmissão, Material de aterramento);
- Generalidades (Caminho de retorno, Resistência X Impedância de terra);
- Solo (Características elétricas do solo, Eletrodos com hastes, Eletrodos com cabos e outros, Malhas de terra, Medições);
- Instalações (Instalações prediais, Instalações industriais, Equipamentos).

Dicas para ler o livro

Vá direto ao ponto de seu interesse. Daí se precisar ou se teve curiosidade vai voltando para trás até chegar à introdução ou parar onde for o suficiente.

Os capítulos de 1 a 8 são recomendados a todos, pelo menos uma leitura. Estão nestes capítulos as informações mais relevantes.

1.3 O QUE É ATERRAMENTO

Os três termos a seguir são tratados coloquialmente como aterramento. Apesar da simplicidade é importante distinguir os três termos, não apenas por uma questão semântica mas por uma questão de interpretação do ambiente elétrico.

REFERÊNCIA ELÉTRICA

Existem equipamentos elétricos e eletrônicos que necessitam de um referencial de tensão elétrica. O referencial, evidentemente, está na tensão zero para o sistema em questão. Todas as tensões internas deste sistema elétrico são relacionadas a este ponto de referência. A referência é arbitrada e escolhida por praticidade.

Uma forma clássica de exemplificar isto, é o operário da manutenção em contato com a linha de transmissão de alta-tensão viva, isto é, energizada. Estas pessoas, quando em contato com a linha, estão no potencial zero para elas e estão em um elevado potencial para quem está no solo. O chão está a um elevado potencial para os operários que estão em contato com os cabos energizados.

Em alguns casos este referencial é escolhido estar localizado em um ponto teórico, não existindo na realidade. Este ponto teórico muitas vezes passa a ter importância prática, pois é possível levantar a tensão entre este e o ponto no circuito real. Isto permite conhecer as diferenças de potencial (ddp) presentes.

Não é mandatório que o ponto escolhido como referência seja o terra do circuito, o mais comum, no entanto, é que a referência e o terra estejam conectados.

MASSA CONDUTORA

Uma massa condutora é um conjunto de material condutor interconectado que permite uma fácil dispersão de cargas nela injetadas. Os chassis de automóveis e de aviões, satélites, estruturas metálicas de edificações, o planeta Terra etc. são grandes massas condutoras. Estas massas são utilizadas como ponto de aterramento, uma vez que as correntes se dispersarão com facilidade nestes corpos. As massas condutoras podem ser ou não escolhidas como referencial de tensão.

TERRA

Originalmente o terra era uma conexão ao planeta Terra, isto é, uma ligação ao solo ou a terra. Daí a origem da nomenclatura aterramento ou terra. Neste caso, o planeta é uma grande massa condutora e, portanto, uma escolha adequada para ser o referencial de vários sistemas elétricos.

Com o tempo o terra passou a ser um ponto para escoar a corrente elétrica indesejada para fora do circuito elétrico a ser protegido. O terra existe mesmo em aviões, satélites etc. O terra, em geral, escolhido é a maior massa condutora próxima. Nem sempre o terra é o referencial do circuito, em um circuito trifásico o referencial é o neutro.

1.4 RAZÕES PARA ATERRAR

O aterramento teve o seu início histórico com a proteção de edificações contra descargas atmosféricas. Com a grande utilização da energia elétrica, surgiu a necessidade de proteger as pessoas contra choques originados nas instalações elétricas. Este último uso do aterramento ainda é a sua principal finalidade.

Com o passar do tempo verificou-se que vários equipamentos elétricos deveriam ser aterrados para terem um melhor funcionamento e mesmo para que pudessem operar. Nos dias atuais, muitos equipamentos elétricos e eletrônicos têm ligações com um ponto terra. Os equipamentos mecânicos, químicos e até mesmo biológicos são, por vezes, aterrados para garantir a segurança e o seu funcionamento dentro das especificações.

No início, o aterramento consistia simplesmente em ter um caminho para o solo (planeta Terra), daí as palavras aterramento, aterrar, terra etc. Sabemos que muitos equipamentos elétricos e eletrônicos não estão em contato com o solo do planeta e ainda assim têm o seu ponto para eliminar as tensões indesejadas que passou a ser chamado de terra. Estes equipamentos fazem parte da eletrônica embarcada e dos dispositivos portáteis.

O terra, geralmente, é a referência zero de tensão para um sistema elétrico, usualmente a maior massa condutora próxima. Se este sistema estiver em um veículo, a carroceria ou chassi do veículo será o ponto de referência. Estando o sistema em outro corpo celeste, este astro é que será o terra do sistema, caso seja condutor. O terra tem por objetivo escoar para “fora” do sistema as tensões indesejadas que aparecem. Estas tensões vêm de diversas origens.

Do ponto de vista econômico, o grande retorno do investimento no aterramento está na manutenção ininterrupta do serviço gerado por equipamentos que devem estar aterrados. Em muitos casos os gastos em reparos e substituições de equipamentos são inferiores às perdas causadas pela parada da produção, do *telemarketing* e das comunicações de compra e venda (telefone, *internet*, fax).

Nesta prática, é levantado um panorama dos diversos sistemas elétricos que se integram e dos seus respectivos sistemas de aterramento. O sistema de aterramento é direcionado a uma determinada frequência, a um tipo de sistema elétrico, a um tamanho do sistema, a um arranjo do sistema e à segurança. Procuramos considerar o sistema de aterramento como uma aplicação do eletromagnetismo em vez de apresentá-lo como uma questão de *filosofia* ou de *arte*.

1.5 ATERRAMENTO DE SEGURANÇA

O aterramento de segurança visa à integridade física das pessoas. Preservar a integridade dos equipamentos elétricos e eletrônicos também é função do aterramento.

1.5.1 Choque em seres humanos

Os limites suportados de corrente e de tensão são fornecidos pelos médicos e biólogos. A biofísica é o ramo da ciência que analisa e estuda os efeitos biológicos do eletromagnetismo. Cabe a física encontrar sistemas que limitem as tensões, as correntes, os campos magnéticos e elétricos que por ventura venham a entrar em contato com o organismo humano.

A corrente suportada por uma pessoa varia de acordo com a impedância do corpo desta pessoa e da duração. Vários fatores influenciam na impedância corpórea, como os sais, a massa corpórea e o tamanho. Há uma relação mais direta com a massa corpórea, quanto maior a massa menor a sensibilidade à corrente elétrica. Dois organismos dos EUA estabelecem limites de corrente elétrica através do corpo humano, um é o *Institute of Electrical and Electronic Engineering* (IEEE) e o outro é o *Underwriter Laboratory* (UL). É estabelecido pelo IEEE *standard 80* que a corrente máxima, de baixa frequência, suportada por uma pessoa de 50 kg, para $0,03 \text{ s} < t < 3,0 \text{ s}$, é de

$$I_{\text{pessoa}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ [A]}$$

Este limite do IEEE não considera as pessoas com fragilidade cardíaca, com marcapassos, enfermas ou gestantes. Alguns autores consideram que este limite deve ser mais restritivo. O IEC, *International Electrotechnical Commission*, instituição de origem europeia também estabelece limites de corrente no corpo.

1.5.2 Fibrilação

É bem conhecido o fato de os músculos humanos se contraírem com estímulos elétricos. O coração, como é um músculo, contrai-se com estímulos gerados por um sistema autônomo, que ao sofrer um choque elétrico poderá causar um descompasso no batimento cardíaco. A fibrilação ventricular é causada por este descompasso.

1.5.3 Impedância do corpo humano

Como qualquer outro material, o corpo humano oferece uma impedância à passagem da corrente elétrica. Os sais do corpo misturados à água (aproximadamente 70% do peso de uma pessoa) propiciam o escoamento da corrente elétrica através do corpo humano. A fim de analisar os potenciais de toque, de passo ou de pata no caso de animais, modelos elétricos de seres vivos são desenvolvidos, ver [Figura 1.1](#).

A impedância do corpo, dos braços e das pernas é dependente da massa e das características químicas destes membros. A impedância dos pés é a impedância de contato dos

pés com o solo. Havendo calçados, a impedância destes entrarão no cálculo. A impedância dos pés pode ser estimada a partir da resistência de contato de uma placa retangular em contato com o solo, assim a resistividade do solo e a resistividade dos pés fazem parte dos cálculos.

A impedância do corpo varia com a frequência, quanto mais alta a frequência menor é a impedância. São utilizados valores diferentes de impedância para baixas frequências e para impulsos.

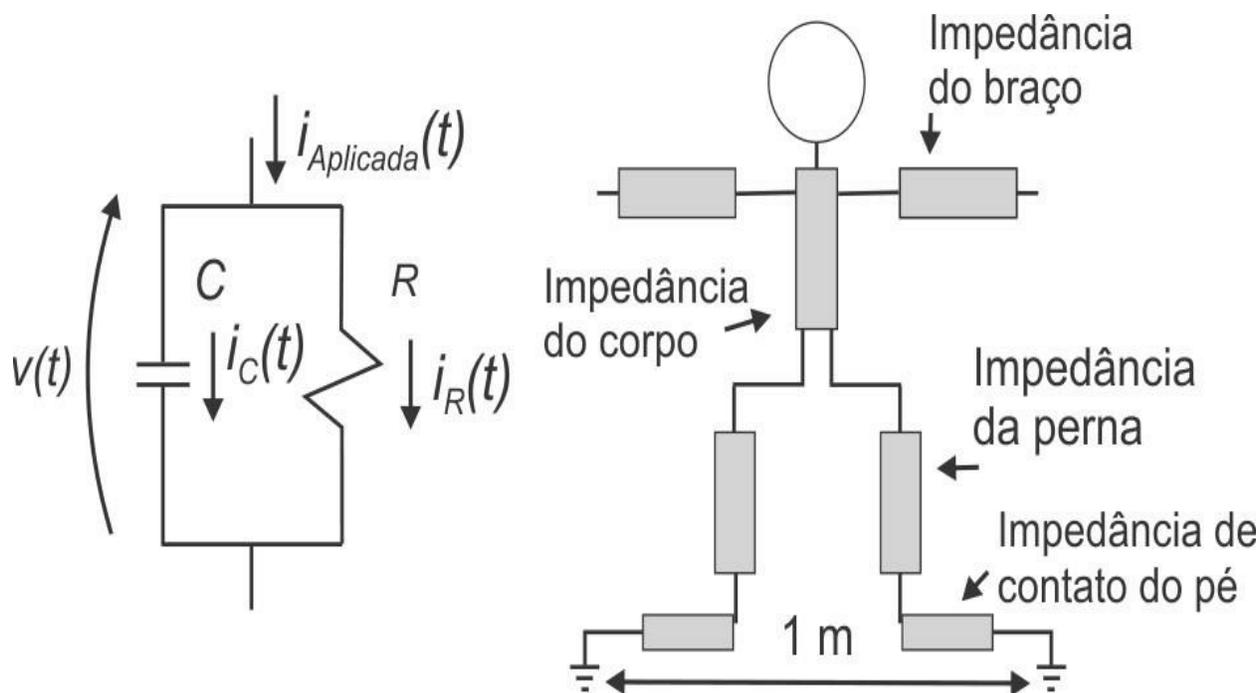


Figura 1.1: Modelo elétrico e impedâncias relevantes do corpo humano

1.5.4 Tensão de passo, de toque e de pata

A tensão que surge no solo entre os dois pés de uma pessoa é chamada de tensão de passo e é formada pelo campo elétrico na superfície do chão, este é o campo superficial ou E_s . Esta tensão deve ser mantida em limites toleráveis aos seres humanos. A forma mais usual para reduzir esta tensão é o emprego de malhas de aterramento ou anéis.

A tensão que surge na parede e no solo entre a mão e o pé de uma pessoa é chamada de tensão de toque, ver [Figura 1.2](#). A tensão que aparece no solo entre as patas de um animal é chamada de tensão de pata, ver [Figura 1.3](#). E esta tensão é responsável por matar animais durante descargas atmosféricas em campo aberto.

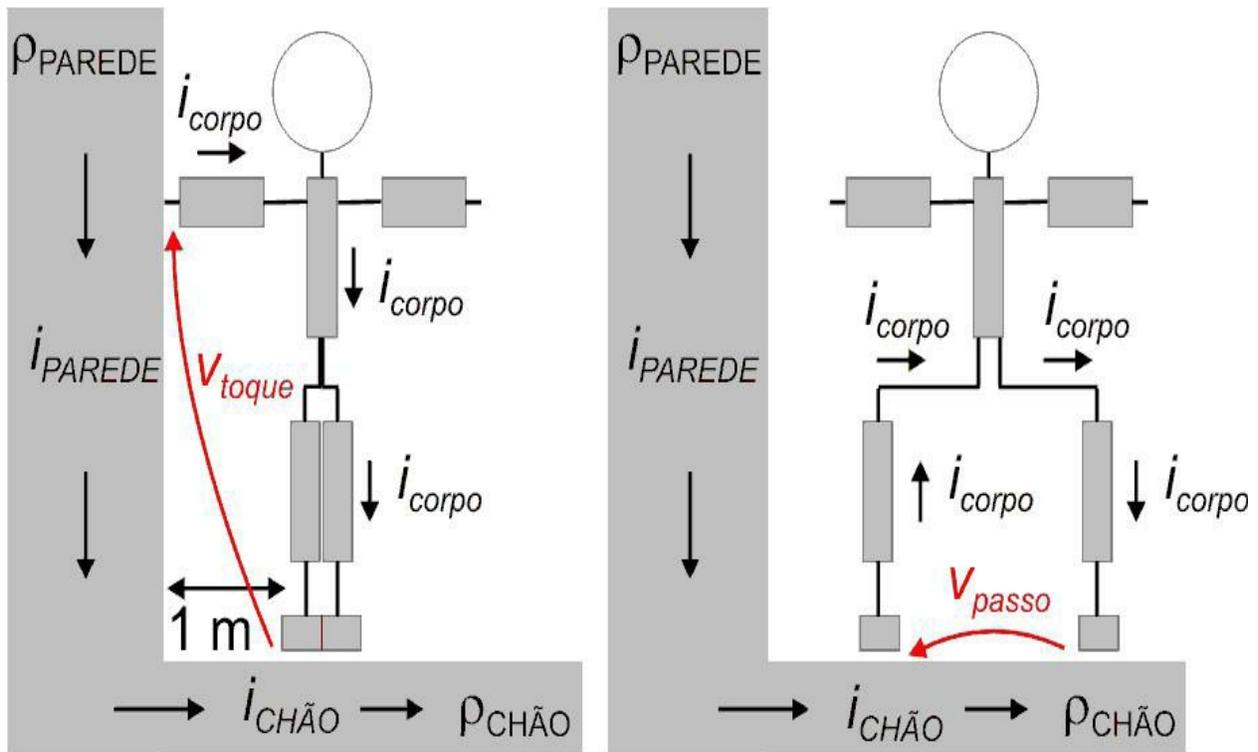


Figura 1.2: Tensão de toque e de passo




 Tensão de pata

Figura 1.3: Tensão de pata: tensão entre as patas de um animal

1.5.5 Tensão de passo e toque para impulsos

A segurança para impulsos de corrente rápidos é radicalmente diferente para fenômenos de baixa frequência tais como 60 Hz, 50 Hz ou as componentes harmônicas. É inteiramente impróprio extrapolar ou adaptar o comportamento do campo elétrico superficial para fenômenos lentos para fenômenos rápidos. Esta inadequação decorre das características do solo, características

biológicas e da forma de onda.

Para impulsos de descarga atmosférica a impedância do corpo humano adotada pela IEC é 500Ω , e a resistência de contato com a superfície do solo é quatro vezes a resistividade da camada superficial do solo.

Limite para fibrilação ventricular

Considerando a primeira corrente de retorno de uma descarga atmosférica o limite para fibrilação ventricular e o parâmetro de severidade se relaciona por:

$$S = \int_0^t |i_{corpo}(\tau)|^{1,4} d\tau \leq M$$

em que

$$M = 1,5 \times 10^{-3} [A^{1,4} s]$$

é o limite de não ocorrer fibrilação ventricular e i_{corpo} é a corrente elétrica através do corpo humano.

Em outras palavras, se $S = M$ então a pessoa está a salvo com quase 100% de certeza. Considerando todos os pontos de interesse da malha a pessoa estará praticamente segura.

Para a corrente de retorno subsequente o limite acima continua válido mas com um grau de certeza menor. Limites para outras formas de ondas e para uma sequência de correntes de retorno, trem de impulsos, ainda não são conhecidos.

1.6 ATERRAMENTO DE SINAL

O aterramento de sinal visa ao funcionamento de máquinas e equipamentos dentro das especificações do fabricante.

O aterramento de sinal é apenas uma das técnicas adotadas para eliminar ou reduzir a interferência em equipamentos e sistemas eletroeletrônicos. Estes sistemas podem estar no ar, no mar, na terra ou no espaço. Outros métodos que devem ser empregados na eliminação ou redução de ruídos são: blindagem, filtragem, balanceamento, isolamento, agrupamento, distanciamento, orientação, controle de impedância do circuito, projeto e disposição de cablagem, controle de frequência. Estes métodos são práticas abordadas pela compatibilidade eletromagnética. Este ramo do eletromagnetismo tem tido grande expansão nos anos recentes, por causa do aumento da densidade de equipamentos e dispositivos eletroeletrônicos e do aumento da suscetibilidade destes.

1.7 SISTEMA ELÉTRICO

O sistema elétrico é complexo envolvendo tensões que variam de poucos volts nos sistemas digitais até várias centenas de milhares de volts nos sistemas de transmissão de potência. Em todas as etapas do sistema elétrico, encontramos aterramentos das mais variadas técnicas, para que possam atender às necessidades de cada subsistema elétrico. A [Figura 1.4](#) ilustra o sistema elétrico em suas diferentes etapas. A interligação total dos terras ainda não é feita através de condutores metálicos. Esta interligação ocorre pelo solo. Em especial, a interligação do neutro aterrado do sistema com o terra do consumidor deve ser feita ou não conforme as especificações das normas técnicas, [Figura 1.5](#).

A interligação pelo solo resulta em correntes espúrias no subsolo de grandes cidades. Estas correntes influenciam os dispositivos de proteção, danificam concretos e provocam corrosão. Além disso, partes metálicas encontradas no subsolo e na superfície, como adutoras, fundações de prédios e instalações, trilhos, canos e tubos etc., influenciam os sistemas de aterramento. Esta influência varia de modo particular para cada caso.

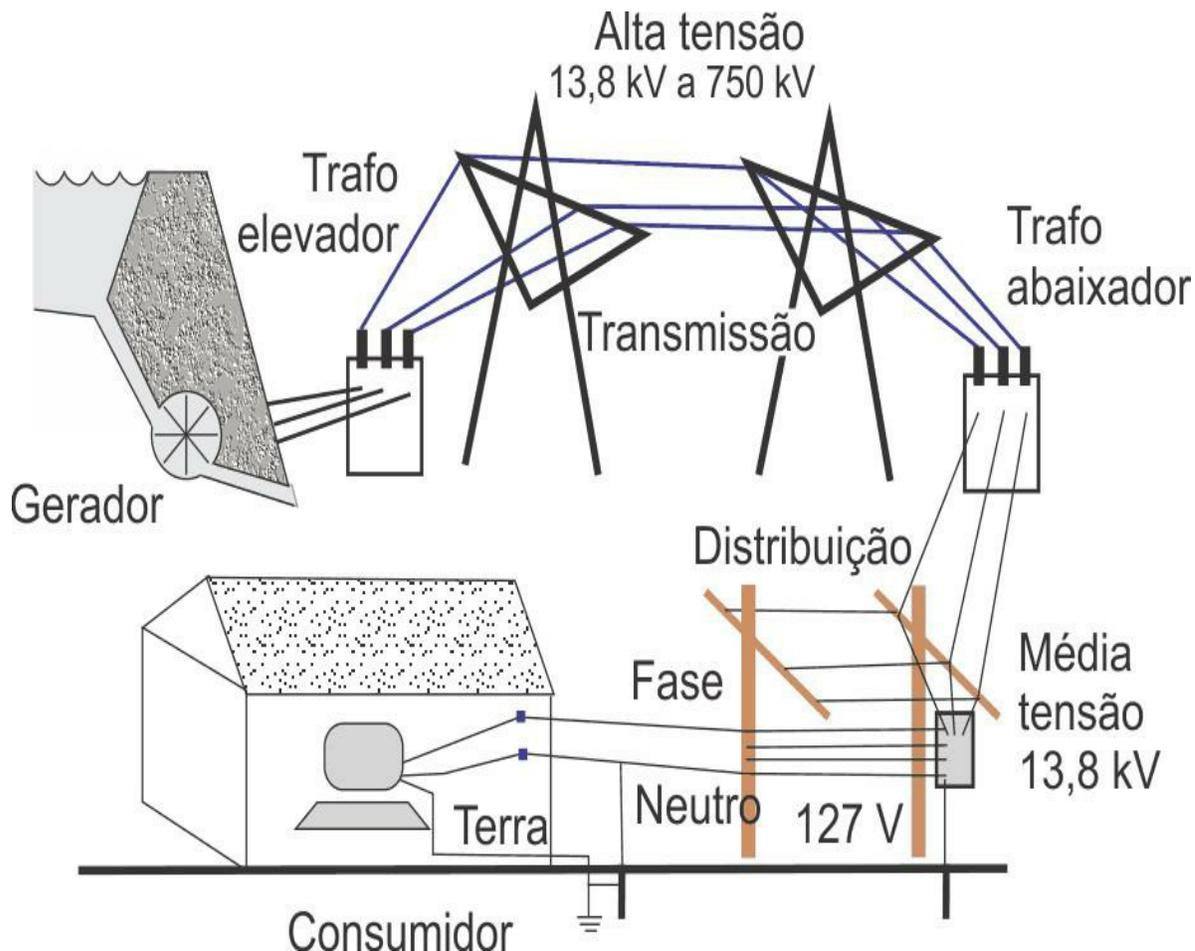


Figura 1.4: Sistema elétrico e seus subsistemas

1.7.1 O neutro e o terra

O neutro e o terra são fundamentalmente diferentes quanto ao uso e em conceito. O neutro é o retorno da corrente que vai pela fase. A corrente passa pela carga e retorna à fonte pelo neutro. Em outras palavras, o neutro é parte do sistema ou circuito elétrico de alimentação.

O terra é uma via para escoar eventuais correntes que não deveriam estar no sistema elétrico. É como se fosse o acostamento das estradas, deve estar sempre livre para uma eventual emergência ou contingência.

O neutro pode estar aterrado ou não. No caso de estar aterrado, deve ter o seu ponto de terra ligado ao terra geral do sistema, [Figura 1.5](#).

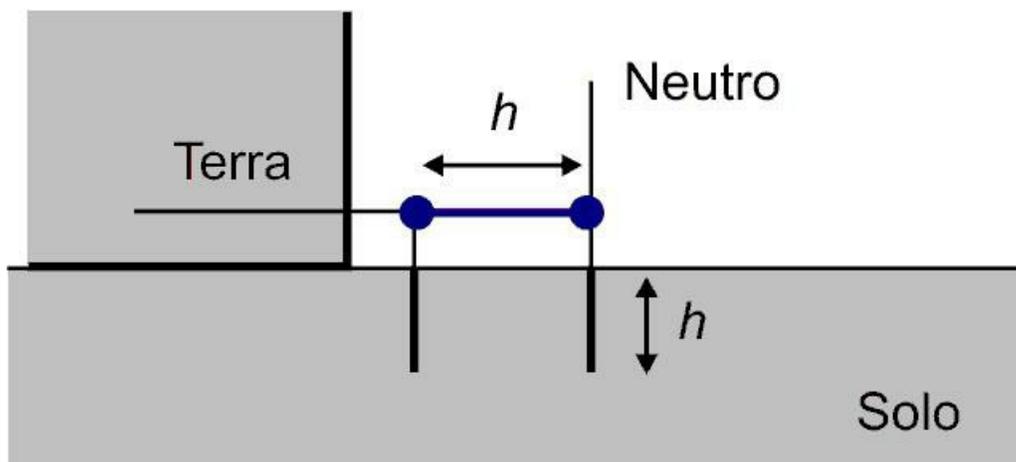
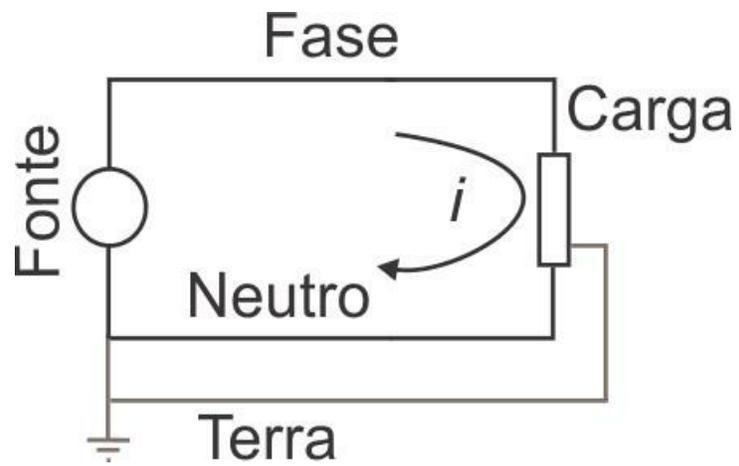


Figura 1.5: A ligação do terra do consumidor com o terra do neutro é tecnicamente o mais indicado.

A [Figura 1.6](#) mostra uma carga sendo alimentada por uma fase. A corrente i requerida pela carga é a mesma na fase e no neutro. A conexão da carga ao terra geral, onde o neutro também está aterrado, ocorre por meio de um cabo independente para garantir que protegerá o circuito.

Uma queda de tensão, iZ_N , surge quando a corrente i passa pelo neutro. Esta queda de tensão é a mesma que aparece entre neutro e condutor terra. Esta tensão será zero no terra geral e vai aumentando à medida que se aproxima da carga.

1.6a)



1.6b)

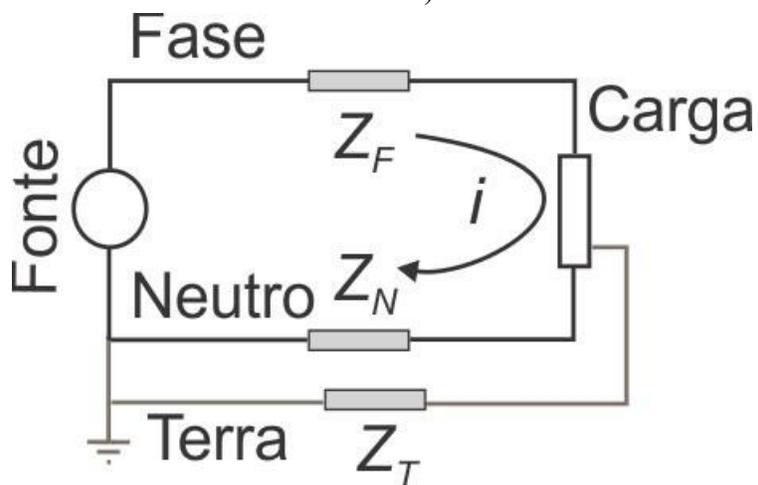


Figura 1.6: Neutro e terra, diagrama unifilar e diagrama de circuito

No caso de a carga estar aterrada via neutro, a tensão iZ_N estará no ponto de terra na carga. Esta tensão poderá ser prejudicial para pessoas ou equipamentos.

1.8 TÉCNICA VERSUS MUNDO REAL

As técnicas de aterramento esbarram em diversas situações do mundo em que vivemos. Estas barreiras são de vários tipos e podem-se citar como exemplo a questão da infraestrutura existente, os recursos para instalar o aterramento adequado e o que é o mais difícil e lamentável, a falta de conhecimento e os aspectos culturais. Esta questão cultural tem várias causas como a formação nos cursos de primeiro, segundo e terceiro graus, mau entendimento dos conceitos básicos de eletromagnetismo, informações mal divulgadas, conceitos antigos ou ultrapassados que persistem devido à contínua edição de publicações inadequadas e à inércia inerente da sociedade pertinente.

Estes empecilhos à aplicação do conhecimento do eletromagnetismo para proteção de pessoas, equipamentos e serviços, devem ser enfrentados ou contornados sem que a segurança seja comprometida. Deve ser alcançado um balanço entre os orçamentos para enfrentar estes empecilhos e possíveis gastos econômicos advindos de perdas de equipamentos e sobretudo do serviço prestado.

Este livro visa a indicar os conhecimentos básicos e técnicas de eletricidade e magnetismo com o objetivo de se ter um ponto de referência de tensão adequado a um sistema elétrico. Este conhecimento é derivado diretamente das equações de Maxwell, já há muito consagradas. O eletromagnetismo aplicado encontra aqui uma finalidade nobre e útil à sociedade, especialmente à sociedade brasileira, tão assolada por descargas atmosféricas, descargas eletrostáticas e com solos de características elétricas desfavoráveis. Cabe ao “aplicador” final deste conhecimento driblar os obstáculos encontrados no mundo real.

1.9 FONTES DE CORRENTE PARA O TERRA

As diversas fontes de corrente para o terra podem ter origem no próprio circuito ou ser de origem externa. Estas fontes de corrente são originárias de tensões indesejadas ou diretamente de correntes no sistema. Entre as diversas fontes de corrente para o terra têm-se:

- Sobretensões de origem atmosférica;
- Sobretensões impulsivas de origem no sistema elétrico;
- Tensões indesejadas originárias no sistema elétrico;
- Tensões de origem eletrostática;
- Tensão gerada por campos eletromagnéticos externos;
- Acoplamentos de dispositivos e equipamentos;
- Tensões originárias no sistema de aterramento;
- Componentes harmônicas múltiplas de três (180 Hz, 540 Hz etc.);
- Curtos-circuitos.

As tensões indesejadas têm características que tornam possível seu agrupamento.

1.9.1 Descargas atmosféricas

As sobretensões de origem atmosféricas são descargas atmosféricas que atingem diretamente as instalações elétricas, as instalações de mecatrônicas, químicas, telefônicas, de informática ou biológicas, podendo causar grande estrago. As descargas elétricas que atingem pontos próximos também geram sobretensões nos equipamentos a serem aterrados.

As descargas atmosféricas ou raios podem ocorrer entre nuvens, dentro de uma nuvem ou entre nuvem e terra. Existem, também, descargas atmosféricas em erupções vulcânicas e tempestades de areia. As que mais nos interessam são as que ocorrem entre a nuvem e a terra. Estima-se que elas sejam aproximadamente 20% do total das descargas atmosféricas. O raio pode ter origem na terra ou na nuvem, sendo mais comum à origem na nuvem. Ele pode ser positivo ou negativo, sendo mais comum o negativo. Os raios podem “cair” mais de uma vez no mesmo local, embora pouco provável.

O índice que mede a quantidade de descargas atmosféricas em um local se chama densidade de descargas atmosféricas. O nível cerâmico é o registro do número de dias de trovoadas por ano em uma região. As descargas atmosféricas, como estão associadas com as

nuvens, ocorrem com mais frequência, nas regiões tropicais. À medida que nos aproximamos dos pólos da Terra, elas diminuem em quantidade.

Uma descarga atmosférica tem uma forma de onda complexa que é aproximada como na [Figura 1.7](#). O primeiro pico de corrente é o mais conhecido e pode ser aproximado por uma equação com dupla exponencial, [Figura 1.8](#):

$$i(t) = I_0(e^{-at} - e^{-bt}) \text{ [A]}$$

Se a representação for uma onda de tensão então:

$$v(t) = V_0(e^{-at} - e^{-bt}) \text{ [V]}$$

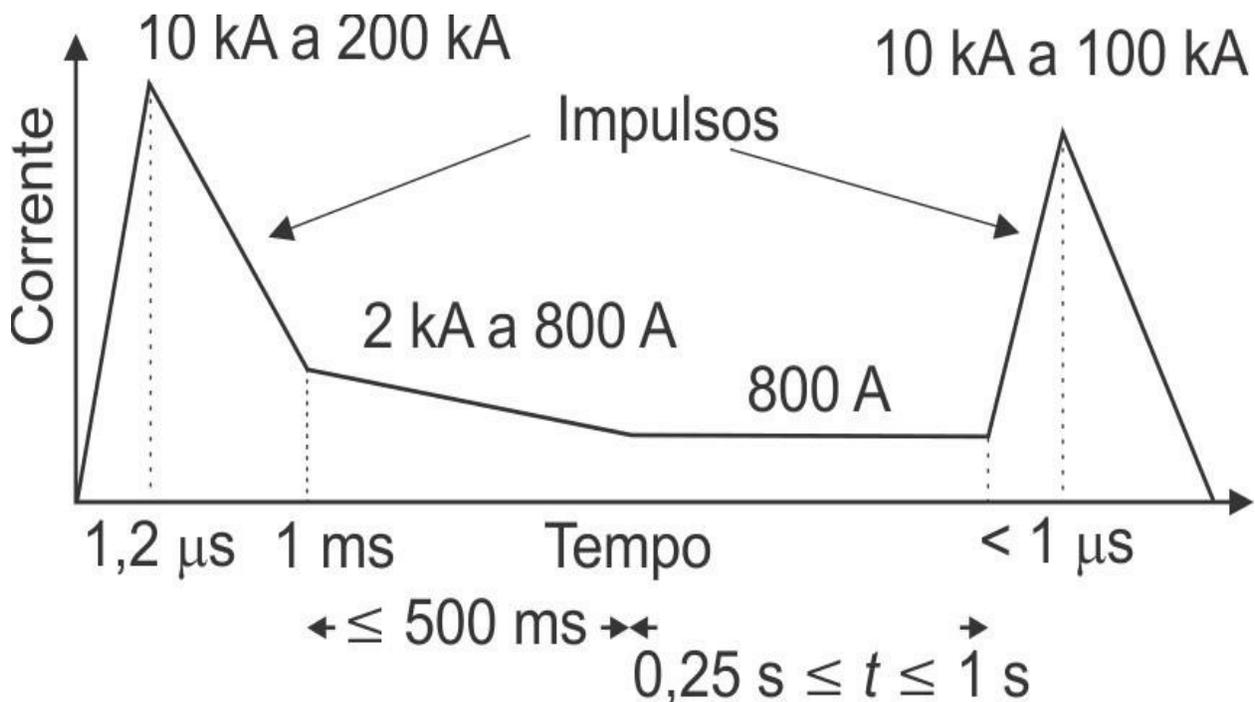


Figura 1.7: Forma de onda normalizada de uma descarga atmosférica

Normalizou-se que esta curva leva $1,2 \mu\text{s}$ para atingir o valor máximo e $50 \mu\text{s}$ para atingir, na descida, o valor médio do valor de pico, sendo este o padrão adotado para ondas de tensão e para ondas de correntes. Para geradores de impulso o tempo de pico é normalizado $1,67(t_{90}-t_{30})$, sendo que t_{30} e t_{90} são os tempos para atingir 30% e 90% do valor de pico. Outras curvas como esta podem ocorrer em uma mesma descarga atmosférica. A primeira destas curvas é chamada de corrente de retorno, as demais são chamadas de correntes de retorno subsequentes. Entre as correntes de retorno, pode haver correntes menores com longa duração.

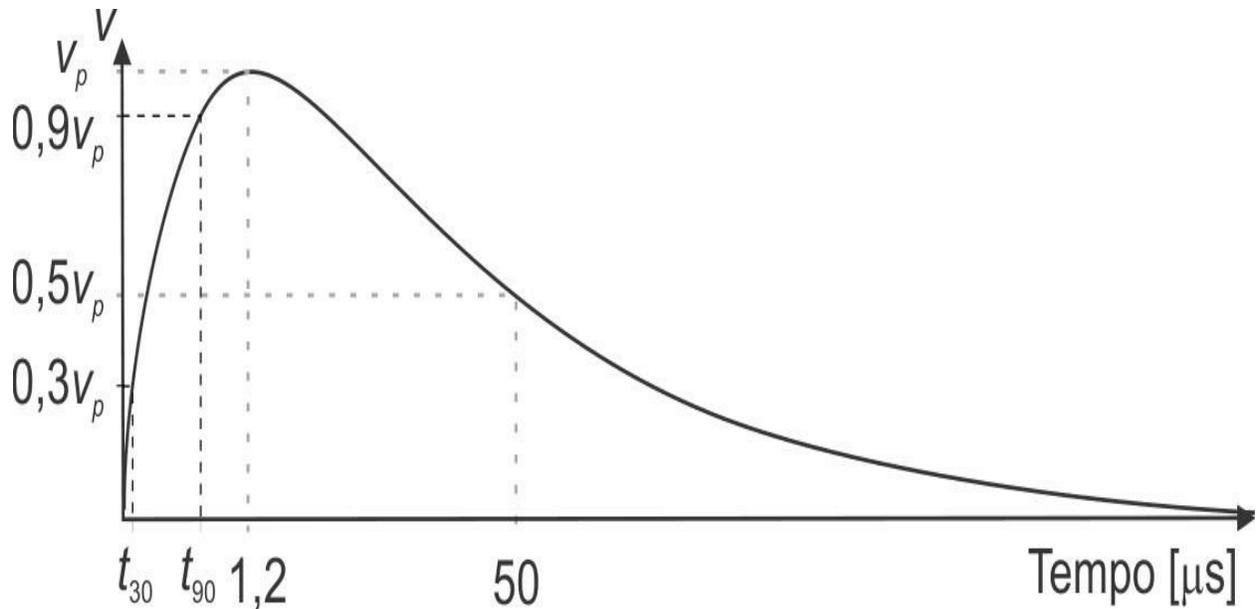


Figura 1.8: Dupla exponencial, V_p – valor de pico da tensão ou de corrente; gráfico não está proporcional.

As descargas atmosféricas emitem campos eletromagnéticos, o campo distante tem forma de onda semelhante à da corrente elétrica desta descarga. Estes campos, ao atingirem cabos telefônicos, cabos de energia e equipamentos, geram correntes e tensões indesejadas. Tais fenômenos são chamados de *descargas atmosféricas indiretas*.

Tabela 1.1: Dados de impulsos usualmente adotados em cálculos – para $V_p = 1$ V, nesta tabela o tempo de frente é o tempo de pico.

Impulso [μ s]	V_0 [V]	a, b [$(\text{ms})^{-1}$]
0,1/50	1,001548781	$a=13,88840278$ $b=87.496,93753$
1,2/50	1,0202926	$a=14,29383$ $b=4.874,1959$
7,8/20 (~8/20)	7,297	$a=110$ $b=160$

6/12	3,9055	$a=113,5$ $b=231$
10/350	1,0244359	$a=2,0499165$ $b=563,72703$

1.9.2 Sistemas elétricos

Os sistemas elétricos de energia geram correntes e tensões indesejadas. O sistema de proteção se encarregará de colocar estas tensões no sistema de aterramento. As tensões e correntes espúrias são transitórias e oriundas de chaveamentos ou abertura de um dispositivo de proteção. Os surtos de tensão e corrente aparecem como reação a uma mudança brusca do equilíbrio elétrico do sistema, e, para se retornar ao novo ponto de equilíbrio, aparecem movimentações de energia magnética e elétrica entre os dispositivos capacitivos e indutivos do sistema. Este fenômeno quando relacionado com máquinas elétricas com núcleo de ferro é chamado de ferorrressonância. As linhas e os transformadores de um sistema de distribuição são basicamente indutivos, isto é, podem ser representados em muitos casos por indutores. Os sistemas de distribuição têm vários bancos de capacitores para elevação da tensão e para a correção do fator de potência. Ainda podemos considerar que 50% a 75% da carga é composta de motores elétricos, que são basicamente indutivos e podem ser representados simplesmente por indutores em muitos casos.

O curto-circuito é a descarga mais severa do sistema de potência para o terra. Para um cálculo básico desta corrente deve-se fazer um levantamento das cargas do sistema e da tensão de operação. Em sistemas industriais a potência das cargas, o fator de potência e a impedância do transformador de alimentação devem ser conhecidos. Isto é necessário porque no instante do curto os motores (indutâncias) e as capacitâncias contribuirão com corrente para o ponto de curto.

Para a análise de curto-circuito as impedâncias do sistema devem ser agrupadas conforme a seguinte equação:

$$Z_{CC} = Z_{Gerador+LT} + Z_{Transformador} + Z_{Cabo} + Z_{Terra}$$

Os componentes do sistema relativos às impedâncias da equação anterior estão ilustradas na [Figura 1.9](#).

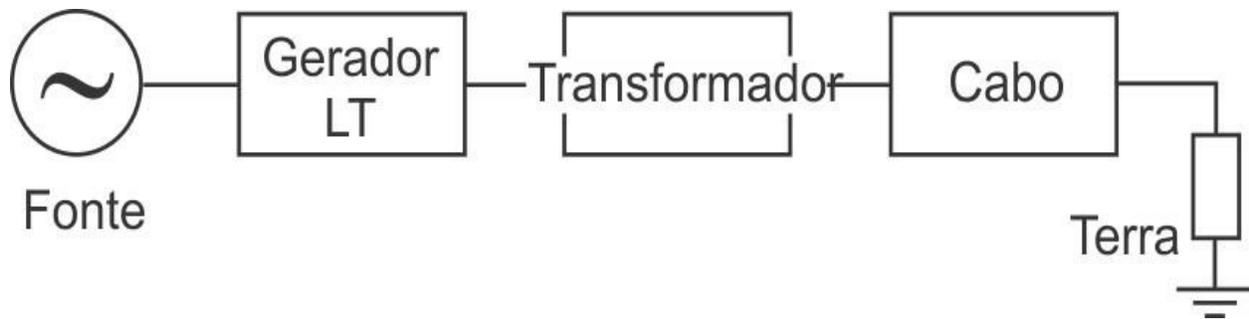
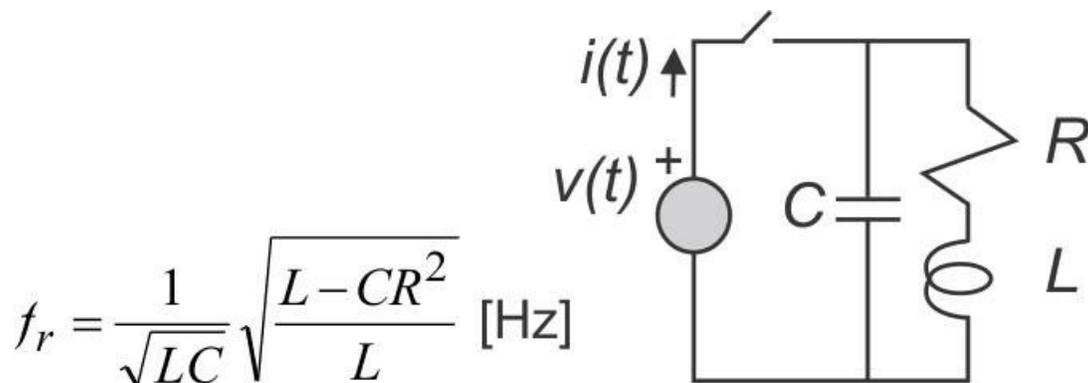


Figura 1.9: Circuito de um curto-circuito

A frequência de oscilação da sobretensão oriunda de um circuito LC é

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \text{ [Hz]}$$

Um circuito RLC, [Figura 1.10](#), pode nos dar uma ideia razoável da rede elétrica. O indutor L representa as linhas de distribuição, os motores elétricos e os transformadores; o capacitor C , os bancos de capacitores para elevação de tensão e correção de fator de potência; e o resistor R , o gasto útil de energia e as perdas nas linhas e máquinas. A fonte de tensão representa a tensão do sistema elétrico. A frequência de oscilação natural deste circuito é mostrada na [Figura 1.10](#).



$$f_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L - CR^2}{L}} \text{ [Hz]}$$

Figura 1.10: Circuito RLC com fonte de tensão variável no tempo, e equação da frequência ressonância

No domínio da frequência as equações complexas deste circuito são

$$Y = \frac{R}{R^2 + X_L^2} + j \left(\frac{1}{X_C} + \frac{X_L}{R^2 + X_L^2} \right) \quad [S]$$

$$I = YV \text{ [A]}$$

sendo $Z = 1/Y [\Omega]$ então $V = ZI \text{ [V]}$.

No desligamento de uma carga aparece uma das configurações como mostradas na [Figura 1.11](#), em que há troca de energia entre o capacitor e o indutor da carga.

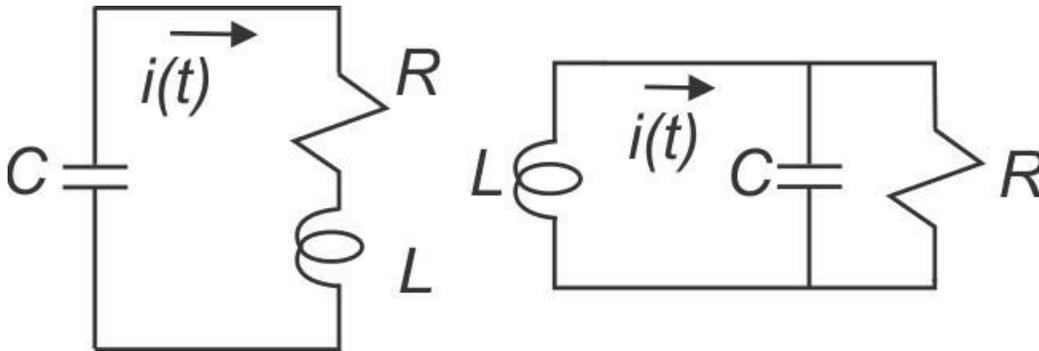


Figura 1.11: Circuitos RLC, troca de energia entre o indutor e o capacitor

Os transitórios podem ser de curta duração, levando um a dois ciclos de 60 Hz (ou 50 Hz). As manobras com transformadores e capacitores provocam este tipo de transitório. Os de longa duração, durando vários ciclos, aparecem em faltas e abertura de condutores. Em geral, os transitórios atingem até o dobro da tensão nominal.

1.9.3 Surtos de manobra

Os chaveamentos na rede elétrica provocam surtos no sistema. Estes surtos, muitas vezes, podem ser aproximados por duplas exponenciais, como ilustrado na [Figura 1.12](#). As relações entre frente de onda e o tempo para retornar a 50% do valor de pico são:

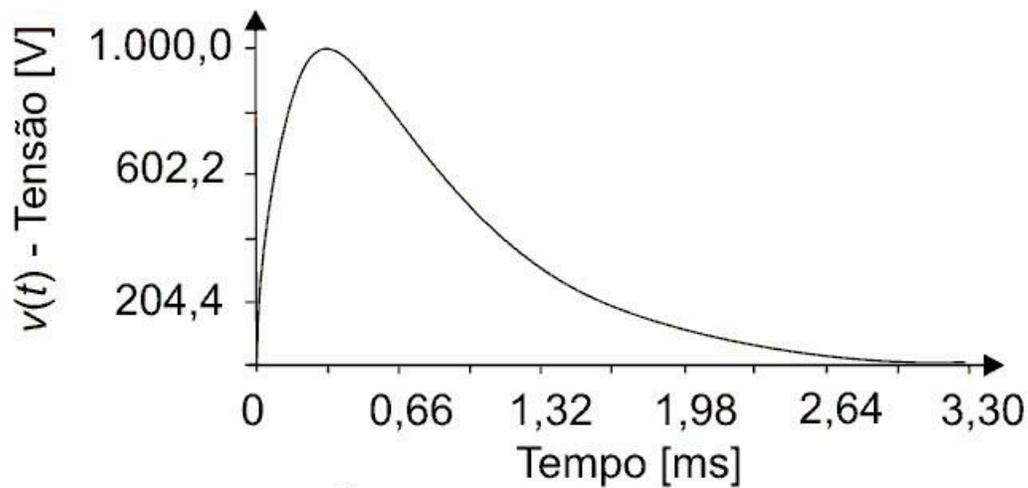
$$50 / (1.000 \text{ a } 5.000) \mu\text{s}$$

$$300 / (1.000 \text{ a } 5.000) \mu\text{s}$$

$$1.000 / (5.000 \text{ a } 10.000) \mu\text{s}$$

A [Figura 1.12](#) ilustra uma dupla exponencial de frente de onda 300 μs e tempo de calda de 1.000 μs .

Com o terra, os equipamentos são protegidos contra tensões elétricas acima do desejado, são as chamadas sobretensões.



$$v(t) = 1.819,73 \left(e^{-1.295,803142t} - e^{-6.842,58719t} \right)$$

Figura 1.12: Impulso 300/1.000 μ s, $V_0 = 1.819,730727$ V,

$$a = 1.295,803142 \text{ s}^{-1}, b = 6.842,58719 \text{ s}^{-1}$$

1.9.4 Eletricidade estática

A matéria é formada por átomos. Os átomos são compostos de prótons, elétrons e neutrons. Os prótons e neutrons formam o núcleo do átomo. Os elétrons giram em torno do núcleo. Os prótons têm carga positiva, os elétrons têm carga negativa e o neutro não tem carga elétrica.

Com a separação dos elétrons do átomo aparece uma carga elétrica negativa e outra positiva, que são chamadas de íons. O deslocamento destes íons provoca a corrente elétrica. Entre as cargas positivas e negativas há uma tensão elétrica.

Descarga eletrostática

A descarga eletrostática é causada pela carga estática e tem a forma de onda como se pode ver na [Figura 1.13](#). Esta dupla exponencial, é uma aproximação, tem tempo de subida de 1 ns e o tempo de queda até 50% do valor de pico é de 5 ns; estes valores são padrões. Existem vários modos de separar a carga estática ou eletricidade estática. Ao esfregar dois isolantes, pode causar transferência de carga elétrica de um para outro.

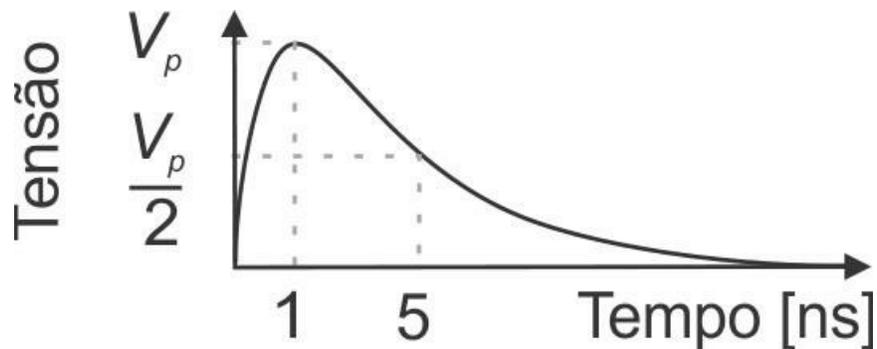


Figura 1.13: Impulso gerado por uma descarga eletrostática 1/5 ns

Exemplo 1.1

Modos de gerar eletricidade estática:

- Esfregar pente no cabelo;
- Esfregar régua de plástico na roupa;
- Esfregar sapato de borracha no carpete;
- Esfregar capa de náilon na cadeira de plástico;
- Passar solventes por tubos de aço;
- Girar hélices misturadoras dentro de tintas;
- Correntes de ar dentro de tubos de aço ou plástico.

#

Com a separação de cargas aparece uma tensão entre os dois corpos. Esta tensão pode provocar a ruptura do ar circundante. O atrito de um isolante com um condutor, também, pode causar separação de cargas.

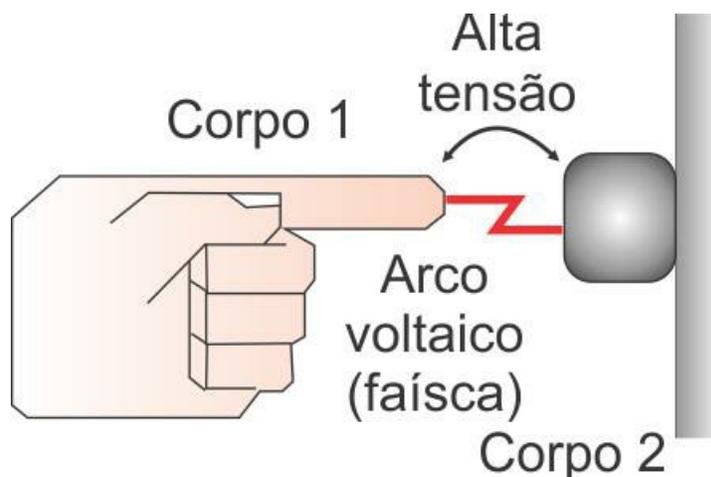


Figura 1.14: Descarga eletrostática entre corpo humano e botão em painel de controle. A alta-tensão aparece imediatamente antes do faiscamento.

Se o corpo 1 ou o corpo 2 estiver em contato com um condutor, a carga é descarregada sem faiscamento, ver [Figura 1.14](#).

O grau de transferência de carga de um material para outro depende do tipo de material. A relação a seguir mostra uma lista de material que quando atritados produzem eletricidade estática.

Lista de material – em ordem do mais eletricamente positivo para o mais eletricamente negativo:

Ar
Pele humana
Asbesto (*juntas de vedação*)
Vidro, mica
Cabelo humano
Náilon
Lã (*roupa etc.*)
Pele animal
Couro (*solas de sapato*)
Seda (*roupas*)
Alumínio (*metal*)
Papel (*embalagens*)
Algodão (*roupa*)
Madeira (*móveis, escadas etc.*)
Aço (*tachos, tubos etc.*)
Cera de vedação
Borracha dura (*solas de sapato*)
Mylar (lê-se: *máilar*) (*tipo de náilon*)
Epóxi-Vidro
Níquel, cobre (*metal*)
Prata (*metal*)
Ouro, platina (*metal*)
Poliestireno
Acrílico
Poliéster
Celulose
Poliuretano
Polietileno
Polipropileno
PVC (*tubos etc.*)
Silicone, teflon

Os componentes do início da lista tendem a ceder elétrons, tornando-se positivamente carregados. Os componentes do fim da lista tendem a aceitar elétrons, tornando-se negativamente carregados.

A lista de material mostrada não é o único fator que determina a separação de cargas. Outros fatores influenciam na separação de cargas: maciez da superfície, limpeza da superfície, área de contato da superfície, pressão do contato etc.

Pode haver separação de carga mesmo quando dois corpos de mesmo material estão em contato.

No material condutor a carga rapidamente se espalha pela sua superfície, diminuindo as chances de descargas elétricas. Em material isolante, a carga fica localizada no ponto de contato, facilitando a descarga eletrostática.

A tensão que aparece entre os corpos quando estão muito próximos pode ir a 15.000 V ou

mais. Esta elevada tensão provoca a disrupção do ar ($30.000 \text{ V/cm} = 3 \text{ MV/m}$). Quando um corpo isolante (náilon, por exemplo) carregado se aproxima de um corpo condutor (aço, por exemplo) provoca separação de carga, por indução, neste condutor, veja [Figura 1.15](#).

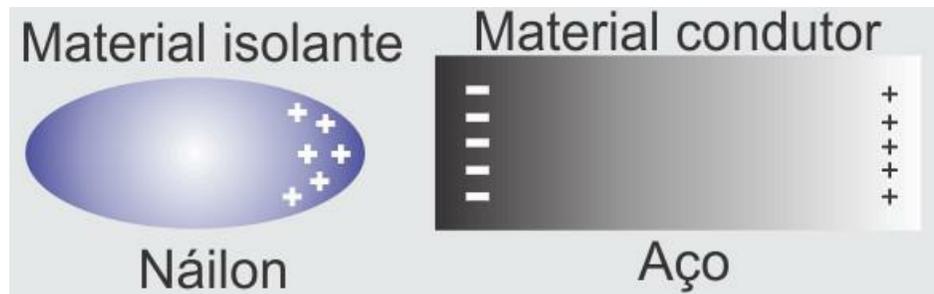


Figura 1.15: Corpo de náilon carregado nas proximidades de um corpo de aço provoca separação de cargas

Processo da descarga eletrostática

- a-Atrito de corpos, colocando carga em um corpo isolante;
- b-A proximidade do material isolante com um condutor carrega este por indução;
- c-Esse condutor é posto próximo de outro condutor e a descarga ocorre.

Exemplo 1.2

- Esfregando cabelo humano com PVC, haverá transferência de elétrons do cabelo para o PVC;
- Vento, brisa, correntes de ar em aço provocam transferência de elétrons do ar para o aço;
- Andar com sapato de borracha em carpete de náilon e tocar em um metal (maçaneta, equipamentos, placas de circuito impresso etc.);
- Elétrons são transferidos do carpete para o sapato de borracha;
- A carga negativa do sapato induz carga positiva na parte inferior do corpo (*material condutor*), o que produz carga negativa na parte superior do corpo;
- A carga negativa da parte superior do corpo flui via mão (*ou dedo*), atraindo para a região do maquinário, próxima à mão, carga positiva;
- Surge uma alta-tensão entre a mão e o equipamento, provocando uma faísca no ar entre os dois;
- Descargas eletrostáticas de até 3.500 V não são perceptíveis pelos humanos mas podem causar ignição.

1.9.5 Sistemas digitais

Nos sistemas digitais a forma de onda mais utilizada é a trapezoidal, conforme ilustrada na [Figura 1.16](#).

A frequência de $1,0 \text{ GHz}$ de um equipamento digital tem um período de $1,0 \text{ ns}$ ($T = 1,0 \text{ ns}$).

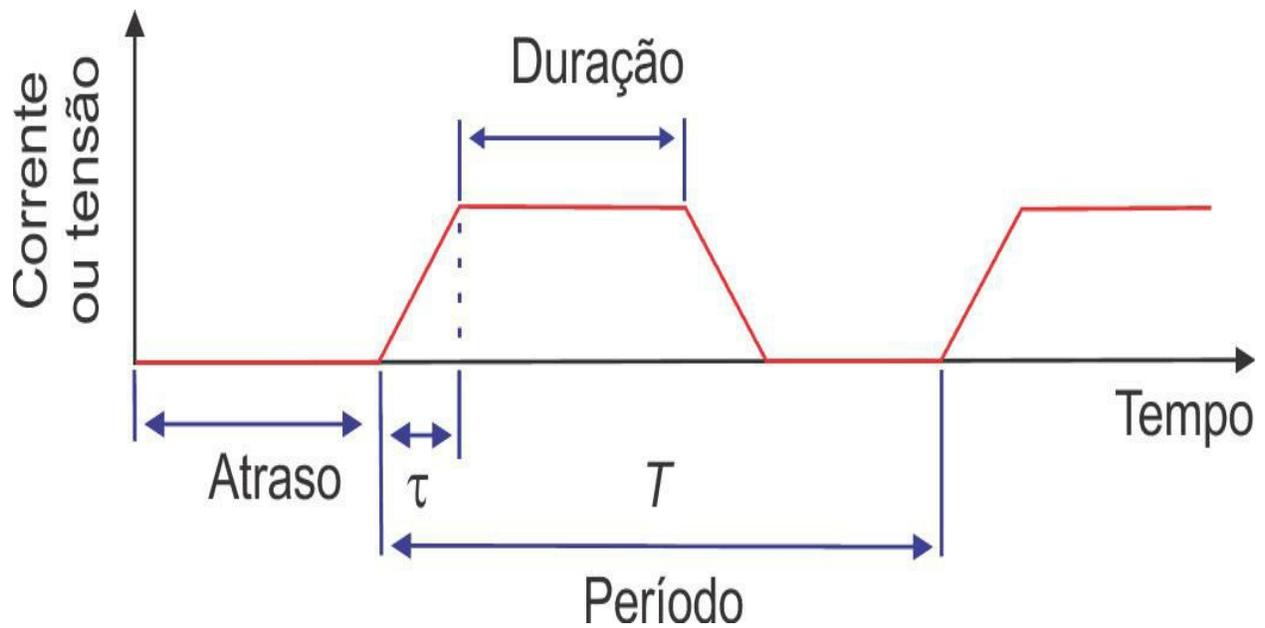


Figura 1.16: Pulsos digitais. τ é o tempo de subida do pulso e T é o período dos pulsos.

1.9.6 Outras formas de onda

Formas de onda quaisquer são formadas nos equipamentos devido ao acoplamento de campos eletromagnéticos de origem interna ou externa. Os campos externos são oriundos da própria natureza, de rádio comunicação, estações de TV, *walkie-talkie*, linhas de distribuição e transmissão de energia etc.

1.10 SISTEMA DE ATERRAMENTO

Os sistemas de aterramento são vários. O melhor esquema a ser utilizado será o que oferece maior segurança ao pessoal e em seguida vem aquele que mantém a compatibilidade eletromagnética dos equipamentos e dispositivos. Estes esquemas estão classificados com letras para facilitar a identificação.

A primeira letra da classificação indica o tipo de aterramento da entrada (fonte) de energia. Estas letras podem ser **T** ou **I**:

T – Indica que a fonte tem uma ou mais partes diretamente aterradas, isto é, aterradas diretamente no eletrodo de terra;

I – Indica que a fonte está aterrada via impedância ou que não está aterrada.

A segunda letra indica o arranjo de terra na carga:

T – Toda parte metálica é conectada diretamente ao eletrodo de terra, a carga é aterrada independentemente da fonte;

N – Toda parte metálica é conectada diretamente ao neutro, o terra da carga é ligado ao eletrodo de terra do neutro.

A terceira e a quarta letras indicam o sistema de aterramento da carga:

S – condutores neutro e terra são separados;

C – um único condutor para neutro e terra;

Outras simbologias:

PE – *protective earth*, condutor terra ou condutor de proteção;

PEN – *protective earth and neutro*, condutor terra ou de proteção com o neutro; isto é, um único condutor para neutro e terra.

Exemplo 1.3

Alguns esquemas de ligação: TN, TN-S, TN-C, TN-C-S, TT, TI etc.

#

2 ELETROMAGNETISMO

2.1 INTRODUÇÃO

Em um estudo de aterramento devemos ter em mente os princípios básicos do eletromagnetismo. Isto nos auxiliará no entendimento de processos e sistemas de condução de correntes, tensões e cargas espúrias para fora dos nossos sistemas e equipamentos.

Neste capítulo, o eletromagnetismo é mostrado com grande simplicidade de entendimento, destacando-se os efeitos e conceitos mais úteis ao aterramento elétrico.

2.2 CAMPO ELETROMAGNÉTICO

Toda carga elétrica tem um campo elétrico associado. Desta forma, como as correntes elétricas nos fios e cabos são formadas por cargas elétricas, há então um campo elétrico emanando destes fios e cabos. Sempre que houver corrente ou apenas carga em nosso circuito elétrico haverá um campo elétrico associado.

O campo elétrico está associado ao campo magnético e vice-versa. Este fato tem sido observado e usado no nosso dia a dia. A propagação de onda de rádio, TV, telefonia celular, radar e tantas outras está calcada nesta associação de campos. O *campo elétrico* quando varia através do tempo gera um *campo magnético*. O *campo magnético* quando varia através do tempo gera um *campo elétrico*. O campo gerado sempre aparece ao redor do primeiro, como ilustrado na [Figura 2.1](#). Este fenômeno faz com que um campo gerando o outro leve à chamada propagação eletromagnética ou onda eletromagnética. Um físico chamado Maxwell colocou em forma de equações esta associação de campos. Estas equações são as equações de Maxwell:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} & \text{Lei de Amper} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} & \text{Lei de Faraday} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho & \text{Lei de Gauss} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 & \end{array} \right.$$

em que:

\mathbf{H} – campo magnético [A/m]

\mathbf{J} – densidade de corrente [A/m²]

\mathbf{B} – indução magnética [T]

\mathbf{E} – campo elétrico [V/m]

\mathbf{D} – deslocamento elétrico [C/m²]

ρ – densidade de carga [C/m³]

Um campo elétrico é formado por cargas elétricas paradas ou em movimento. O campo

magnético, por sua vez, é formado por cargas elétricas em movimento (corrente elétrica).

Esta propagação eletromagnética não está somente nas telecomunicações e radares mas também nos sistemas elétricos como os sistemas de aterramento. As cargas e correntes nos cabos e eletrodos de aterramento emitem ondas elétricas e magnéticas (campo eletromagnético). Estas ondas elétricas e magnéticas causarão movimento de cargas elétricas por onde passarem. Isto é, causam interferência em outros sistemas elétricos. Este efeito é previsto pelas equações do eletromagnetismo mostradas anteriormente.

O campo elétrico e o magnético estão relacionados espacialmente de acordo com o ilustrado na [Figura 2.1](#). Se o campo magnético está com o seu sentido para fora da figura apontando para o leitor, o campo elétrico girará em torno deste no sentido anti-horário. Por sua vez, se o campo elétrico está perpendicular à figura, apontando para o leitor, o campo magnético girará em torno deste no sentido anti-horário. Esta relação entre os campos elétrico e magnético tem implicações práticas diretas, incluindo as aplicações em aterramento elétrico.

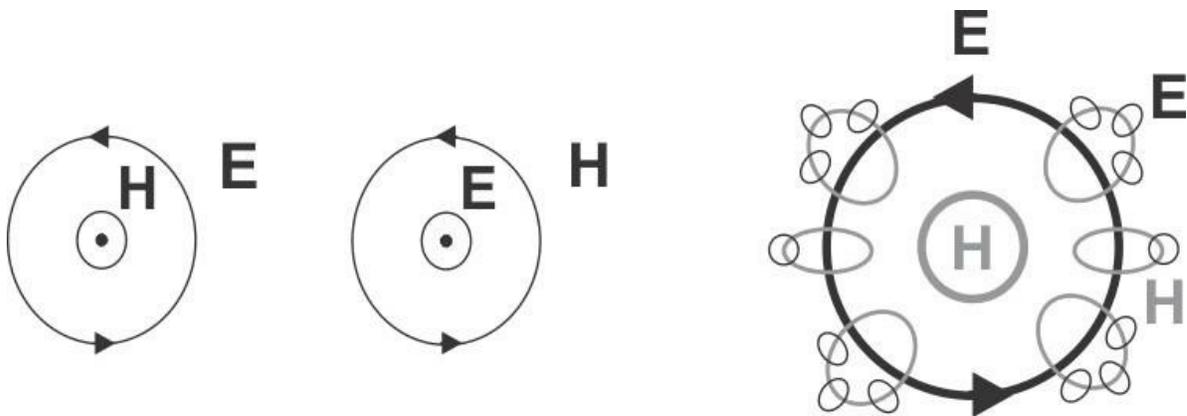


Figura 2.1: A variação do campo magnético H cria um campo elétrico E ao seu redor, e a variação do campo elétrico E cria um campo magnético H ao seu redor.

Devemos lembrar aqui a *regra da mão direita*. Esta diz que, estando o dedo apontando o sentido da corrente elétrica, os demais dedos estão apontando o sentido do campo magnético. Esta regra tem múltiplas aplicações em eletricidade e magnetismo, destacando-se a utilização dos medidores de resistência de terra tipo alicates.

2.3 CARACTERÍSTICAS DO MEIO

O meio é qualquer material por onde está passando o campo eletromagnético. Se o campo eletromagnético está passando pelo solo, o solo é o meio.

2.3.1 Condutividade elétrica – σ

A condutividade elétrica está associada às perdas por efeito de Joules (lê-se: *jaules*) no meio. Isto significa que o campo eletromagnético (ou onda eletromagnética) é atenuado na sua passagem por um meio com condutividade elétrica. Alguns meios são ditos meios sem perdas. No caso do espaço livre, isto é verdadeiro. Outros meios em que as perdas são desprezíveis também são chamados de sem perda, como é o caso do ar.

O solo é um meio com perdas e, dependendo do tipo do solo, sua condutividade elétrica varia. Em elementos como o cobre, o alumínio e o ferro, as perdas são pequenas mas não o suficiente para serem desprezadas em todos os casos.

A resistividade (ρ) é o inverso da condutividade (σ): $\rho = 1/\sigma$ (lê-se: *rô igual ao inverso de sigma*), para corrente contínua. A unidade de resistividade é $\Omega.m$ (lê-se: *oms metro*) e a unidade de condutividade é S/m (lê-se: *siemens por metro*).

2.3.2 Permissividade elétrica – ϵ

A permissividade elétrica indica as características elétricas de um material. É simbolizada pela letra grega ϵ (lê-se: *épsilon*). Por simplicidade é utilizada a permissividade relativa (ϵ_r), que é a permissividade em relação à do vácuo ($\epsilon_0 = 8,854187817 \times 10^{-12}$ F/m):

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \text{ [adimensional]}$$

A permissividade está associada aos efeitos capacitivos do meio e à velocidade de propagação de uma onda eletromagnética. A unidade de permissividade é F/m (lê-se: *farad por metro*) e a permissividade relativa não tem unidade.

A tabela 2.1 lista a permeabilidade relativa à do vácuo de material isolante. Os diferentes tipos de solo têm diferentes valores de permissividade. Pela tabela, a permissividade do solo varia de $1,328 \times 10^{11}$ a $7,083 \times 10^{10}$ F/m, ou seja, de 1,5 a 80 em valores relativos, há medições que dão valores de até 10^5 .

Tabela 2.1: Permissividade relativa

Meio	ϵ_r
Ar	1,0006
Água do mar	80
Água destilada	81

Neve	3,3
Gelo	4,2
Solo	1,5 a 80
Solo (alguns autores)	10 a 10 ⁵
Solo (adotado)	10
Solo seco	2,8
Areia seca	3,4
Óxido de alumínio	8,8
Polietileno	1,6
Polietileno Celular	1,8
Teflon	2,1
Polietileno	2,3
Poliestireno	2,5
Náilon	3,0
Borracha de silicone	3,1
Polivinil clorido (PVC)	3,5
Resina epóxi	3,6
Delrin	3,7
Vidro epóxi	4,7

Mylar	5,0
Poliuretano	7,0

A permissividade elétrica do solo varia com a frequência. Isto significa que se tivermos duas placas metálicas separadas por solo teremos um capacitor com a capacitância variando de acordo com a frequência do sinal. Neste capacitor a corrente de fuga é significativa, pois o solo também é condutor.

2.3.3 Permeabilidade magnética – μ

A permeabilidade magnética está associada às características magnéticas do material. Em geral os diversos tipos de solo têm a mesma permeabilidade magnética do vácuo. No vácuo a permeabilidade é $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m (lê-se: *enri por metro*). A permeabilidade relativa μ_r é a permeabilidade em relação à permeabilidade do vácuo:

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \text{ [adimensional]}$$

Assim a permeabilidade relativa do vácuo é $\mu_r = 1$. O ar tem permeabilidade aproximadamente igual à do vácuo.

2.3.4 Velocidade de propagação – v

A velocidade de propagação de uma onda eletromagnética depende do tipo de meio em que está se propagando. Uma forma aproximada para obtermos a velocidade de propagação de uma onda em um meio é:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \text{ [ms]}$$

No vácuo a velocidade de propagação é 299.792.458 m/s, aproximadamente 3×10^8 m/s. A velocidade de propagação no ar é praticamente a do vácuo.

Para meios com perdas ou condutores como o solo é aplicada a seguinte equação:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0}} \text{ [ms]}$$

Esta equação se aplica à propagação de ondas no interior do solo e do concreto.

2.4 PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO

A profundidade de penetração indica com que facilidade uma onda elétrica penetra em um condutor. O parâmetro δ ,

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu\sigma}} \quad [\text{m}]$$

quantifica este índice. Como pode ser visto da equação anterior, a onda elétrica penetra com mais dificuldade quando a frequência é elevada (ou di/dt elevado). Para fins de aterramento elétrico no solo, isto se aplica na qualidade do aterramento que diminui com o aumento da frequência do sinal injetado no eletrodo no solo. Em outras palavras o ruído que escoar para o eletrodo de terra encontra mais dificuldade de penetrar no solo com o aumento da frequência.

Outro parâmetro que influi na penetração da corrente no solo é o ρ , com a diminuição da resistividade há uma diminuição de δ . A [Figura 2.2](#) e a [Figura 2.3](#) mostram a variação de δ com a frequência.

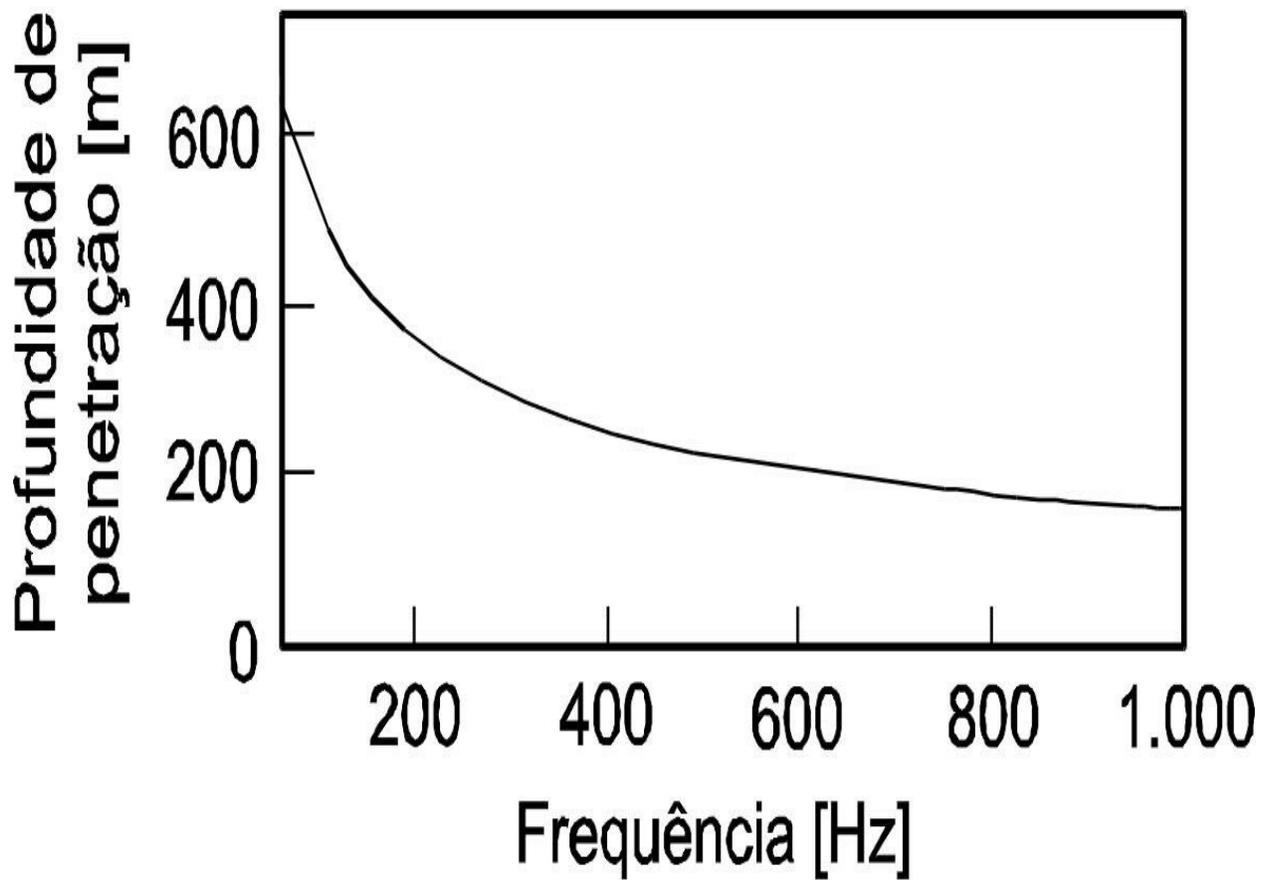


Figura 2.2: Profundidade de penetração, em metros, em solo de $\sigma = 100,0 \text{ S/m}$ ($\rho = 0,01 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$) com a variação da corrente no tempo

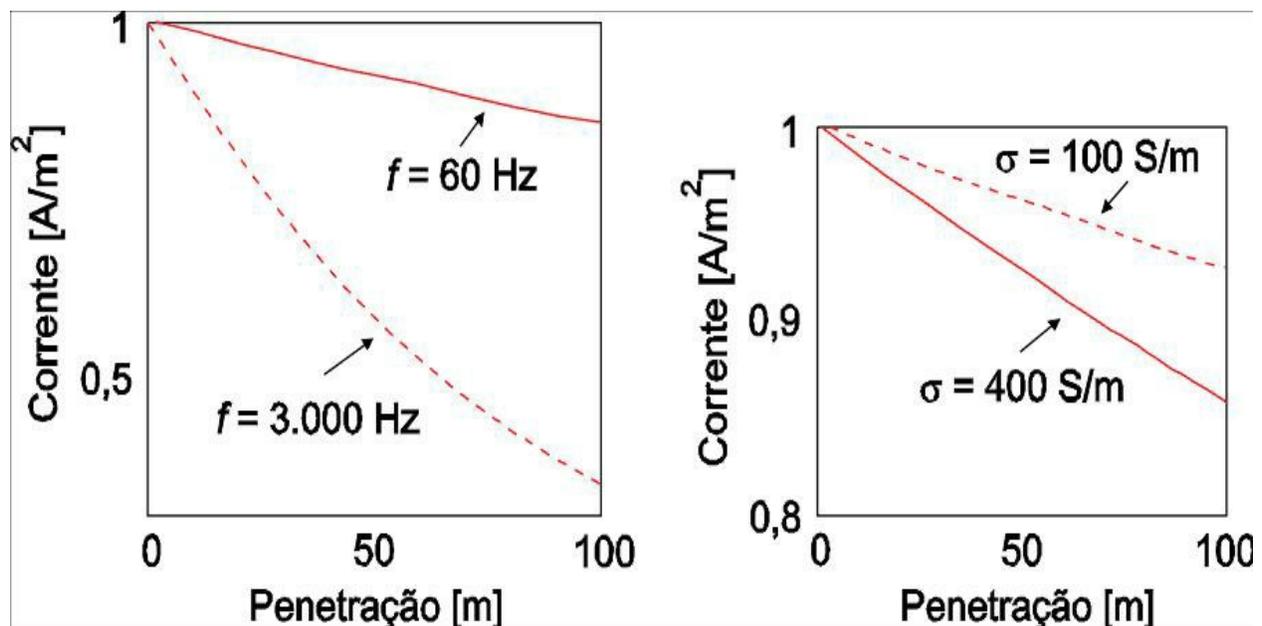


Figura 2.3: Penetração da corrente elétrica em solo de $\sigma = 100,0 \text{ S/m}$, em duas diferentes frequências e penetração da corrente de 60 Hz em dois diferentes solos

A profundidade de penetração está muito relacionada com a tensão de passo. A tensão de passo para baixa frequência não é a mesma para alta frequência (grande di/dt), tendo a mesma amplitude de corrente em ambos os casos.

2.5 TEORIA DAS IMAGENS

A teoria das imagens diz que cargas elétricas acima de um condutor perfeito, plano e infinito têm o seu campo elétrico refletido. Isto corresponde a substituímos o plano terra por uma carga igual de sinal contrário a uma distância duas vezes maior que a da carga original ao plano. Podemos dizer que o campo refletido é formado pela carga que usamos para substituir o plano, e a esta chamamos de carga imagem. A [Figura 2.4](#) ilustra esta situação para diferentes configurações de cargas.

Como no espelho convencional, que temos em casa, a imagem é invertida e fica mais distante, para dentro do espelho, à medida que nos afastamos do espelho.

A teoria das imagens é indispensável na obtenção de diversos parâmetros elétricos de vários componentes de um sistema elétrico ou de um sistema de aterramento. A aplicação das imagens facilita o uso, o entendimento e o cálculo dos circuitos de aterramento.

Esta teoria é aplicada no levantamento da resistividade aparente do solo.

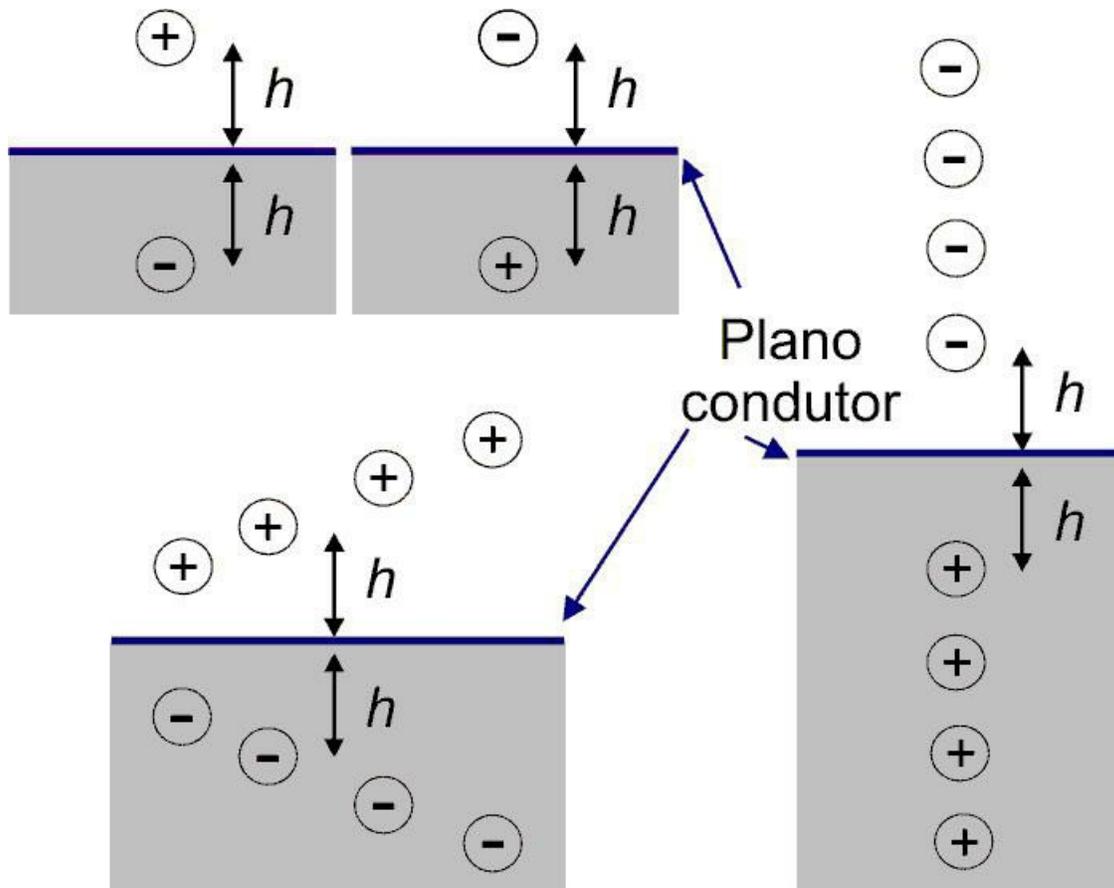


Figura 2.4: Cargas acima do plano condutor perfeito ($\rho = 0 \text{ } \Omega.m$) e respectivas imagens abaixo do plano condutor

Como uma corrente elétrica é formada por cargas em movimento, formará uma imagem em um plano condutor, como ilustrado na [Figura 2.5](#). A superfície da terra pode, por aproximação, ser considerada plana e perfeitamente condutora em muitos cálculos de parâmetros elétricos. Paredes

de prédios e casas, bastidores, armários metálicos entre outras superfícies são refletoras de campos elétricos, o que permite que os substituamos por imagens para facilitar o cálculo.

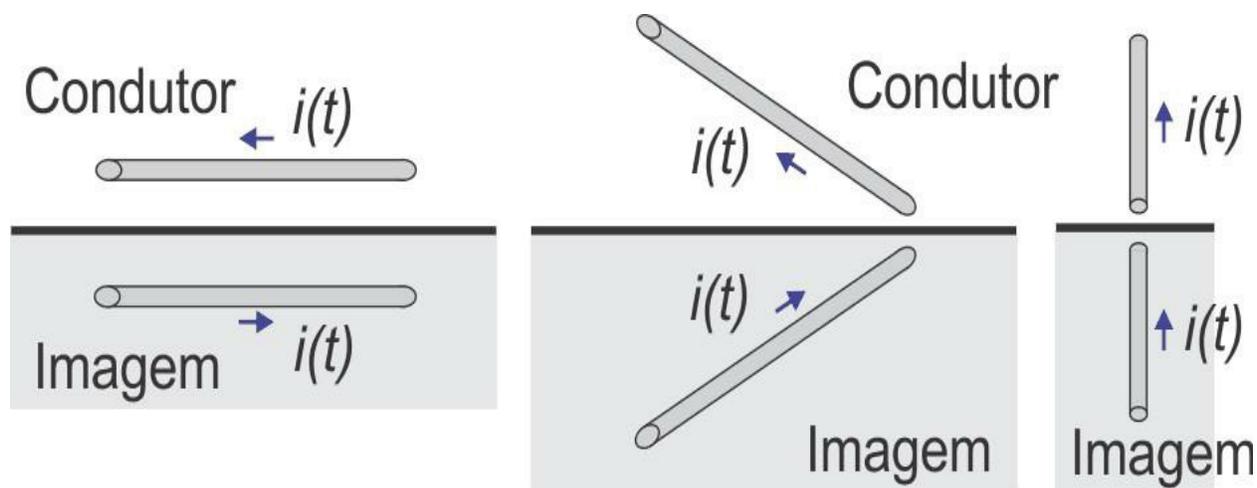


Figura 2.5: Imagens de correntes em condutores acima do solo

Um condutor de descida de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, ver [Figura 2.6](#), tem quatro imagens refletidas. Uma das imagens está na parede e as outras duas estão no chão. Para análises de 60 Hz e descargas atmosféricas, consideramos apenas para cálculo de parâmetros um par de condutores paralelos no espaço livre. Em alguns casos, como a análise de descargas atmosféricas e de transitórios que tenham em suas componentes harmônicas frequências mais elevadas e relevantes, consideramos um cálculo de parâmetros mais completo.

Um condutor passando por uma canaleta na superfície do solo, como mostrado na [Figura 2.7](#), tem cinco imagens refletidas. Duas destas imagens são nas laterais, uma inferior e duas nas diagonais. Este conjunto de imagens mais o condutor real correspondem a seis condutores no espaço livre, como também mostrado na [Figura 2.7](#). O cálculo dos parâmetros do condutor real leva em consideração o efeito das imagens.

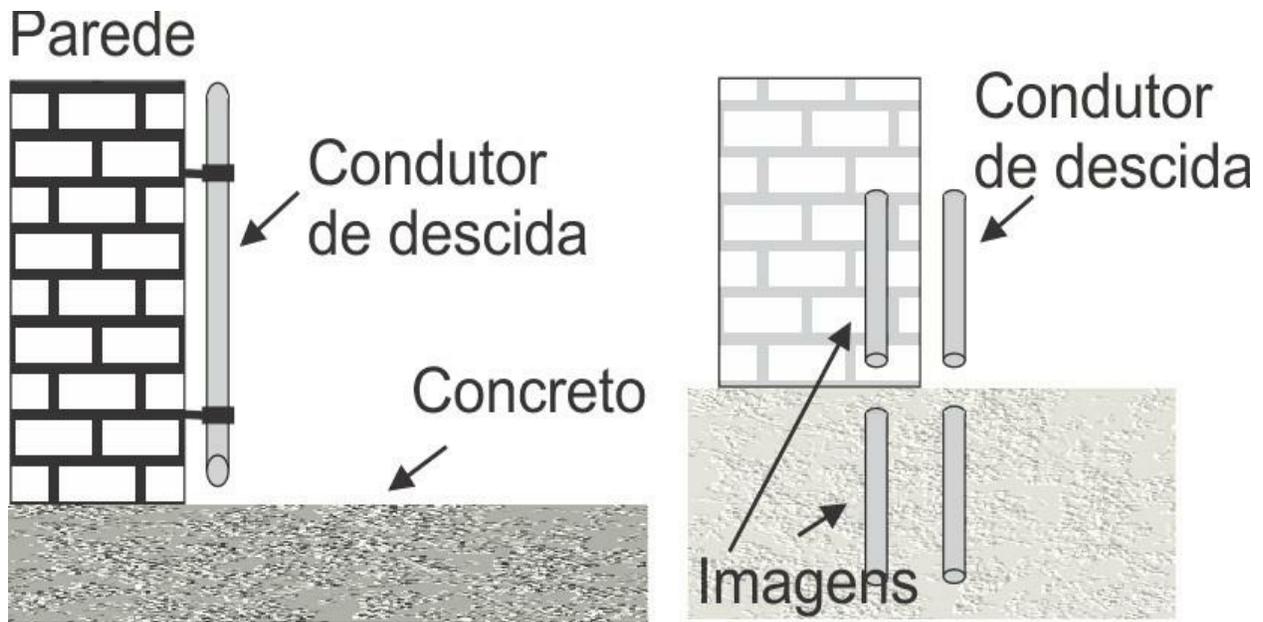


Figura 2.6: Imagens do condutor de descida do sistema de para-raios

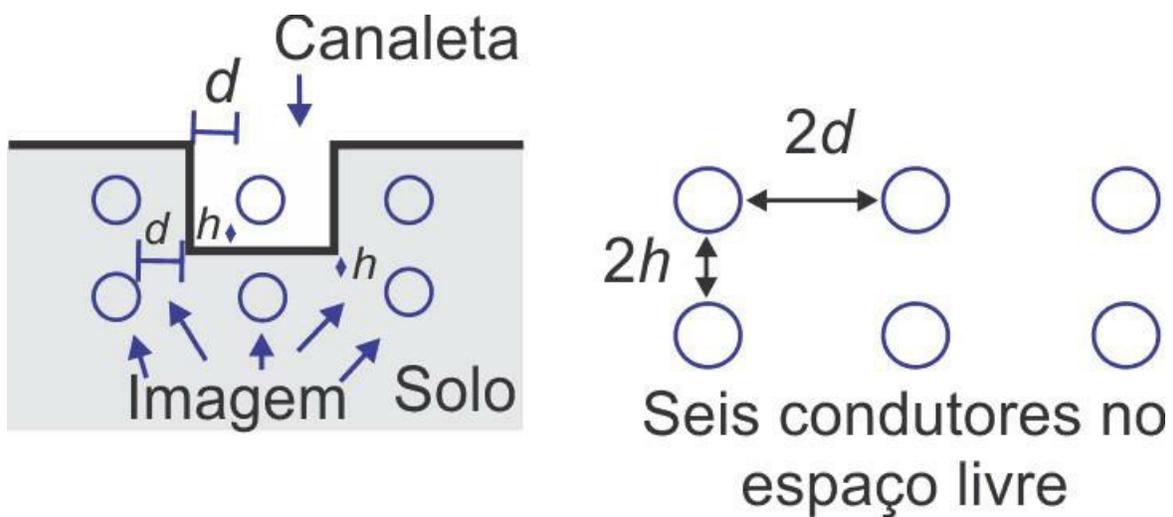


Figura 2.7: Imagens de condutor singular passando por canaleta no solo e um sistema equivalente com seis condutores no espaço livre

2.5.1 Tensão elétrica

A tensão elétrica é a integral do campo elétrico entre dos pontos seguindo um caminho. Isto é, é o resultado final do efeito do campo elétrico, \mathbf{E} , no caminho, L , entre os dois pontos:

$$V = -\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad [\text{V}]$$

Esta definição é feita para estado estacionário.

Mais simplesmente falando, a tensão elétrica é a "soma" do campo elétrico encontrado no

caminho entre dois pontos. A unidade da tensão elétrica é o volt, e simbolizado por V.

A tensão entre os pontos A e B mostrados na [Figura 2.8](#) pode assumir diferentes valores dependendo do caminho L percorrido:

$$V_{ABL=1} = -\int_{L=1} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad \text{soma-se todo } \mathbf{E} \text{ encontrado pelo caminho } L = 1;$$

$$V_{ABL=2} = -\int_{L=2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad \text{soma-se todo } \mathbf{E} \text{ encontrado pelo caminho } L = 2;$$

$$V_{ABL=3} = -\int_{L=3} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad \text{soma-se todo } \mathbf{E} \text{ encontrado pelo caminho } L = 3;$$

$$V_{ABL=4} = -\int_{L=4} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \quad \text{soma-se todo } \mathbf{E} \text{ encontrado pelo caminho } L = 4;$$

em que:

$$\int_{L=1} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \neq \int_{L=2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \neq \int_{L=3} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \neq \int_{L=4} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L};$$

$$\int_{L=3} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \neq \int_{L=1} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \neq \int_{L=4} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} \neq \int_{L=2} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L}.$$

A tensão entre os pontos A e B, V_{AB} , serão iguais apenas na eletrostática, isto é, quando as cargas estiverem paradas.

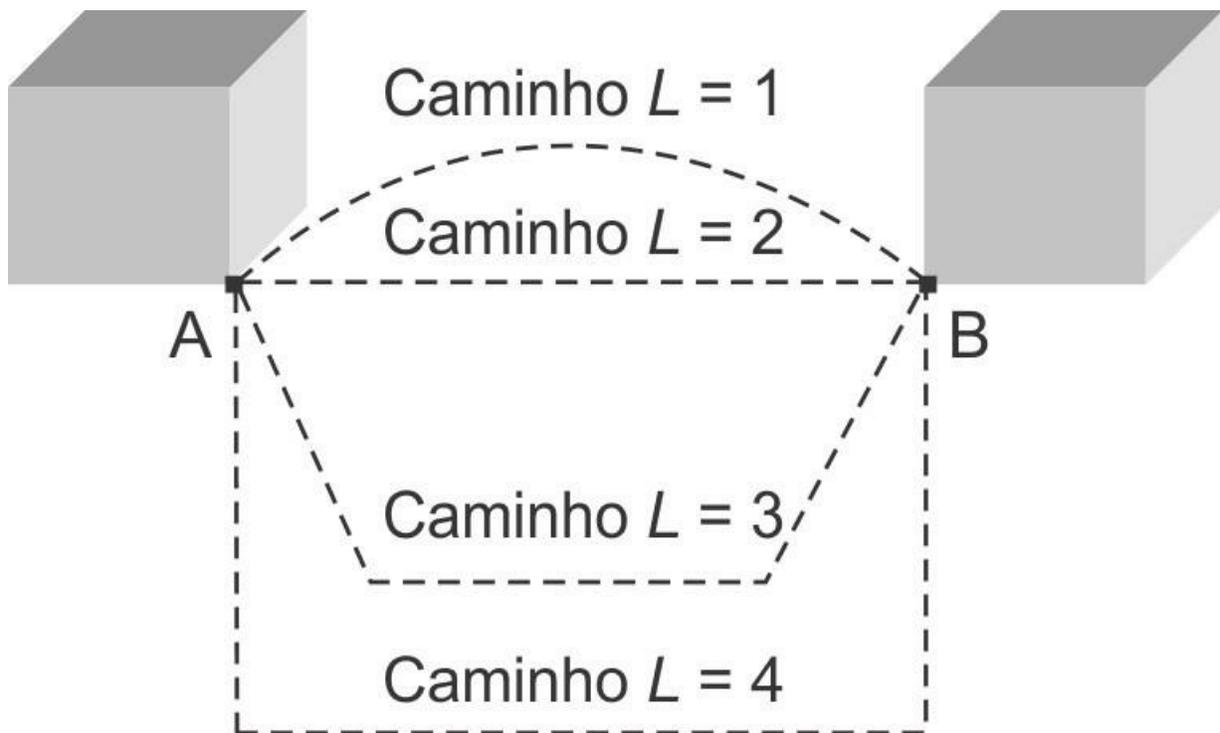


Figura 2.8: Caminhos ligando os pontos A e B

O valor da tensão V_{AB} mostrada por um voltímetro vai depender da posição dos cabos usados na medição, quando não estiver presente a eletrostática.

Uma outra relação entre campo elétrico e tensão elétrica é:

$$dv/dL = -E_L$$

em que E_L é o campo elétrico na direção do caminho L .

Nesta equação tem-se que a diferença de tensão entre dois pontos, 1 e 2, infinitamente próximos é, ver [Figura 2.9](#):

$$dv = v_1 - v_2 = v_{12}$$

como a distância entre v_1 e v_2 é dL o campo elétrico entre os pontos 1 e 2 é:

$$-dv/dL.$$

Como a carga positiva se move na direção do campo elétrico e do potencial maior para o menor é necessário incluir o sinal menos, “-”.

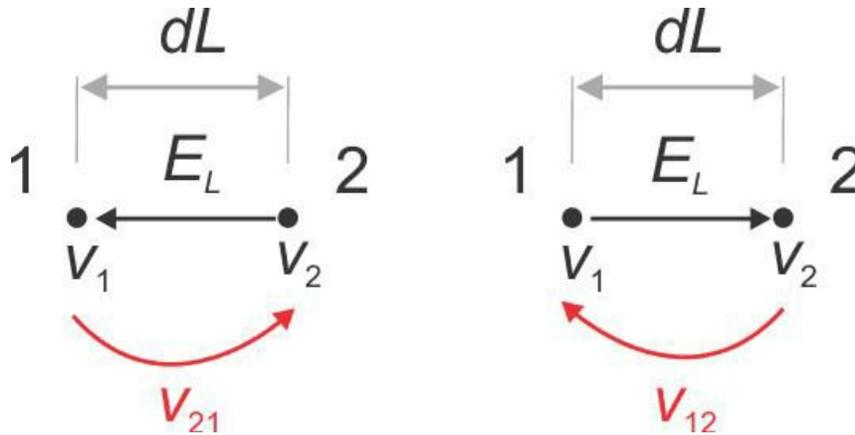


Figura 2.9: Relação entre campo elétrico e tensão para uma distância infinitamente pequena dL

Uma forma aproximada desta relação entre tensão elétrica e campo elétrico é:

$$\Delta v/\Delta L = - E_L.$$

2.5.2 Corrente elétrica

A corrente elétrica é um fluxo de elétrons. Este fluxo está associado com o campo magnético ao redor deste, conforme a lei de Ampère. A unidade da corrente elétrica é ampère, e simbolizado por A.

3 CIRCUITOS

3.1 INTRODUÇÃO

Todos os sistemas elétricos são compostos por elementos de circuitos. Estes elementos podem ser capacitores, indutores, transformadores, motores, transistores, circuitos integrados, fios, cabos, antenas, chaves etc. Destes elementos, três são básicos: indutor, capacitor e resistor.

Em sistemas de aterramento, os elementos básicos também estão presentes e são de relevada importância em projetos de aterramento.

3.2 ELEMENTOS DE CIRCUITOS

3.2.1 Indutor

Um fio esticado tem uma indutância associada. O valor da indutância depende das características geométricas e das características magnéticas do material. Com isso, o comprimento do fio e o seu diâmetro influenciam no valor da indutância. Se o fio for enrolado, a sua indutância é alterada. Se colocarmos próximo ao fio ferro ou ferrite (ou outro material ferromagnético qualquer), o valor da indutância aumenta.

Os indutores comerciais são, em geral, feitos com fios de cobre enrolados em ferro ou ferrite. Como exemplos temos as antenas de ferrite para rádio e os núcleos de transformadores. Um simples pedaço de fio ou cabo também é indutor. A representação de um indutor é mostrada na [Figura 3.1](#).

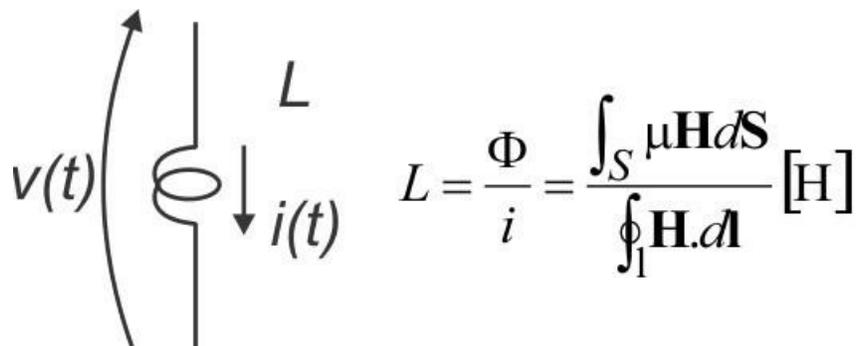


Figura 3.1: Representação de um indutor e definição de indutância

Os indutores têm a característica de atenuar mais intensamente as altas frequências. Isto faz do indutor um elemento importante em filtros. Em aplicações de aterramento esta propriedade pode ser útil em alguns casos mas em muitos outros se torna um empecilho ao bom aterramento.

A relação entre tensão e corrente através de um indutor é dada por

$$v = L \, di/dt \text{ e aproximadamente } v = L \, \Delta i/\Delta t.$$

Exemplo 3.1

Podemos calcular aproximadamente o di/dt (lê-se: $dê \, i \, dê \, t$) da frente de onda de uma dupla exponencial. Para isto tomamos uma reta que interliga o início da onda com o seu pico, [Figura 3.2](#). Neste caso, $di/dt = i_{max}/1,2 \, \mu\text{s}$; se $i_{max} = 100 \, \text{kA}$ temos $di/dt \approx \Delta i/\Delta t = 8,3 \times 10^{10} \, \text{A/s}$. Se este impulso estiver passando por um indutor com indutância $L = 10 \, \text{nH}$, a queda de tensão no indutor é de $Ldi/dt \approx L\Delta i/\Delta t = 10 \times 10^{-9} \times 8,3 \times 10^{10} = 830 \, \text{V}$. Para mais rigor deve-se usar a variação de 30% a 90% do pico de corrente: $\Delta i/\Delta t = 0,6i_{max}/(t_{90} - t_{30})$.

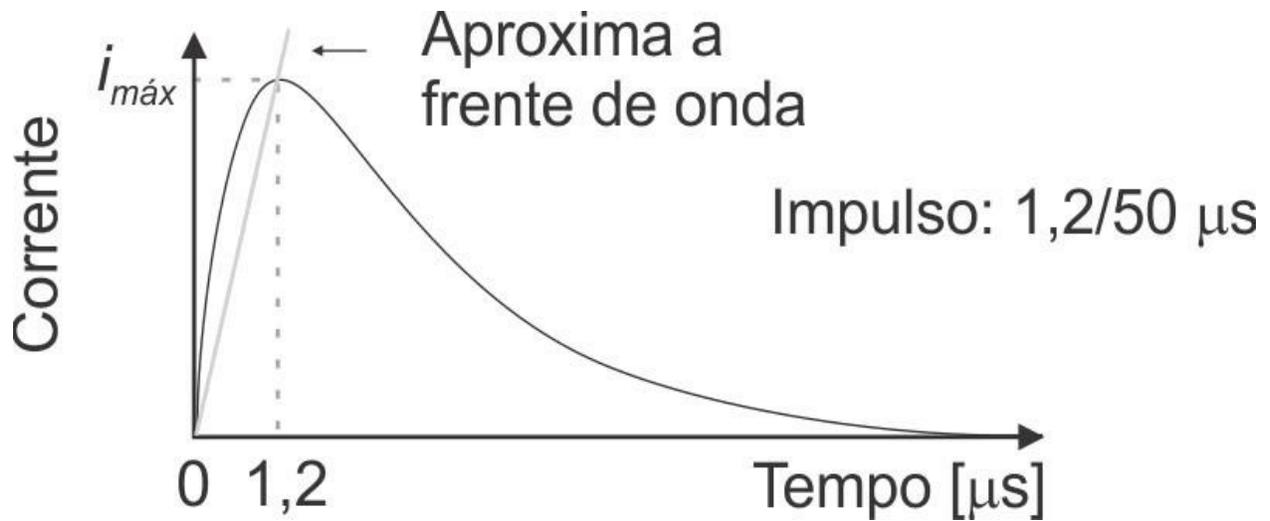


Figura 3.2: A frente de onda da dupla exponencial aproximada por uma reta ligando os pontos (0,0) com o ponto (1,2 μs, i_{max})

#

Exemplo 3.2

Na onda trapezoidal da [Figura 3.3](#), a variação no tempo da frente de onda é:

$di/dt = 10 \times 10^{-3} / 10^{-9}$, isto é, $di/dt = 10 \times 10^6$ A/s. A queda de tensão em um indutor, $L = 1 \mu\text{H}$, é $v = L di/dt = 10^{-6} \times 10 \times 10^6 = 10$ V.

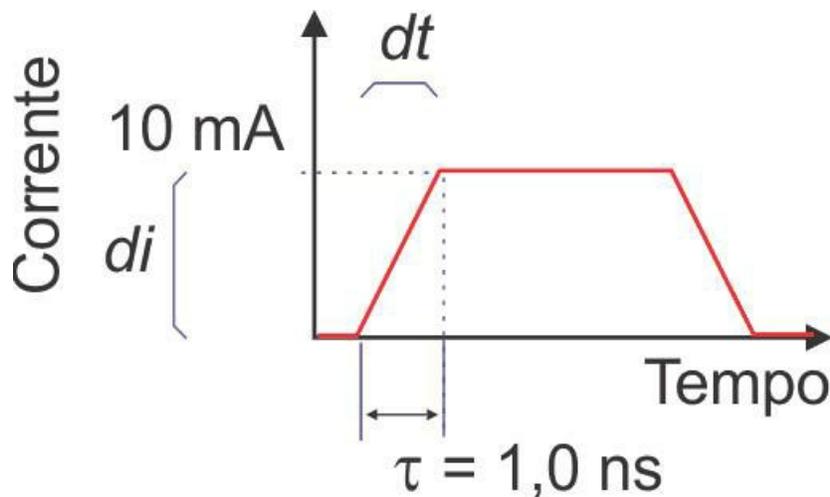


Figura 3.3: Frente de onda de um trapézio

#

Para uma frequência determinada, f , temos:

$$V = j\omega LI = jX_L I,$$

em que:

$$j = \sqrt{-1},$$

$$\omega = 2\pi f$$

e X_L é a reatância indutiva.

Exemplo 3.3

Qual a queda de tensão em um indutor de 1,0 μH , durante a passagem de uma corrente de 1,0 A a uma frequência de 1,0 MHz?

Cálculo:

$$L = 1 \mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$$

$$f = 1 \text{ MHz} = 10^6\text{Hz}$$

$$I = 1 \text{ A}$$

$$V = j 2 \pi (10^6) (10^{-6})(1) \Rightarrow V = 6,28 \text{ V}$$

A queda de tensão no indutor é de 6,28 V.

#

Com elevados valores de di/dt a queda de tensão, v , no indutor também será elevada. Em corrente contínua em que $di/dt = 0$, a corrente passa pelo indutor sem provocar queda de tensão. Na passagem de impulso quando a frente de onda tem uma variação grande da corrente no tempo, a queda de tensão também é grande. Isto leva o indutor a ser usado como filtro para os valores di/dt maiores. No domínio da frequência este processo é exemplificado na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Variação da reatância indutiva com a frequência

Indutor [nH]	Frequência [Hz]	X_L [Ω]
14	60	5,27 μ
14	3.000	263,9 μ
14	20 k	1,76 m
14	1 M	88 m
14	100 M	8,8

Observação: 14 nH é o valor aproximado da indutância de pernas de componentes passivos.

3.2.2 Capacitor

Dois condutores separados por um isolante formam um capacitor e o símbolo é mostrado na [Figura 3.4](#). Desta forma, os cabos de uma linha de distribuição que estão separados pelo ar formam um capacitor. Aparece mais uma capacitância entre um destes cabos e a terra, pois a terra é um condutor e está separada pelo ar. As espiras de uma bobina também formam capacitores.

Estas espiras estão separadas por material isolante. As trilhas de circuitos impressos estão separadas por isolantes e por isto formam capacitores. Podemos citar vários exemplos de capacitores além dos comerciais.

A capacitância depende apenas das características geométricas do capacitor e das características físicas. Esta observação fica clara ao olharmos para a equação seguinte que define capacitância:

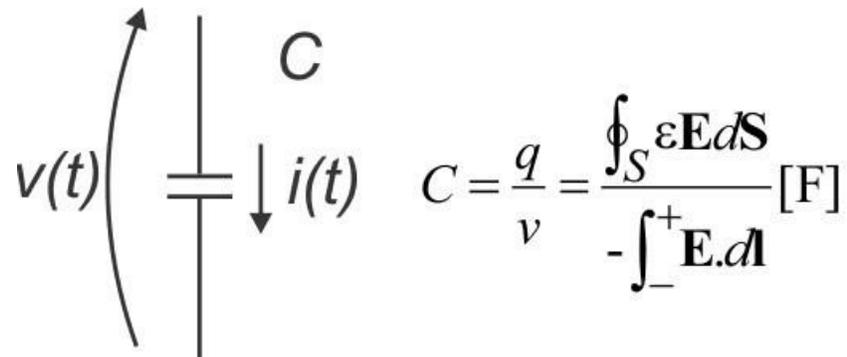


Figura 3.4: Representação de um capacitor e definição de capacitância

Uma das características dos capacitores é facilitar a passagem da corrente com o aumento da frequência. A relação entre a tensão e a corrente em um capacitor é, ver [Figura 3.4](#):

$$i = C dv/dt \text{ e aproximadamente } i = C \Delta v/\Delta t.$$

Para uma frequência determinada, f , temos:

$$V = -j(1/\omega C)I = -jX_C I,$$

em que X_c é uma reatância capacitiva.

Exemplo 3.4

Qual a queda de tensão em um capacitor de 1,0 nF, quando uma corrente alternada de 1,0 A e frequência de 10,0 MHz está passando por este?

$$X_C = 1 / (2\pi f C)$$

e

$$V = -jX_C I = -j(1/\omega C)I = -1 / (2\pi f C)I,$$

Cálculo:

$$C = 1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F},$$

$$f = 10 \text{ MHz} = 10^7 \text{ Hz},$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$V = j \frac{1}{2 \times \pi \times 10^7 \times 10^{-9} \times 10}$$

A queda de tensão no capacitor é $V = 1,59 \text{ V}$

#

Com o aumento da frequência a reatância capacitiva diminui de valor, tendendo a um curto-circuito, como é ilustrado na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Variação da reatância capacitiva com a frequência

Capacitor [nF]	Frequência [Hz]	X_c [Ω]
1	60	2,65 M
1	3.000	53,0 k
1	20 k	7.958
1	1 M	159
1	100 M	1,59

Capacitância de duas placas paralelas:

$$C = \epsilon A/d \text{ [F/m]}$$

em que:

A – área de cada placa [m²];

d – distância entre as placas [m];

ϵ – permissividade do material entre as placas [F/m].

Exemplo 3.5

Sejam duas placas condutoras com lados de 3,0 m e 4,0 m separadas por 4,0 mm de um material de $\epsilon_r = 10,0$. Qual a capacitância?

Cálculo:

$$C = \frac{10 \times 8,854 \times 10^{-12} \times 3 \times 4}{4 \times 10^{-3}} = 265,6 \text{ nF}$$

#

Exemplo 3.6

Qual a capacitância de um fio, no ar, de raio $a = 3,34$ mm, comprimento $L = 4,0$ m e distante $h = 4,0$ mm de um plano condutor?

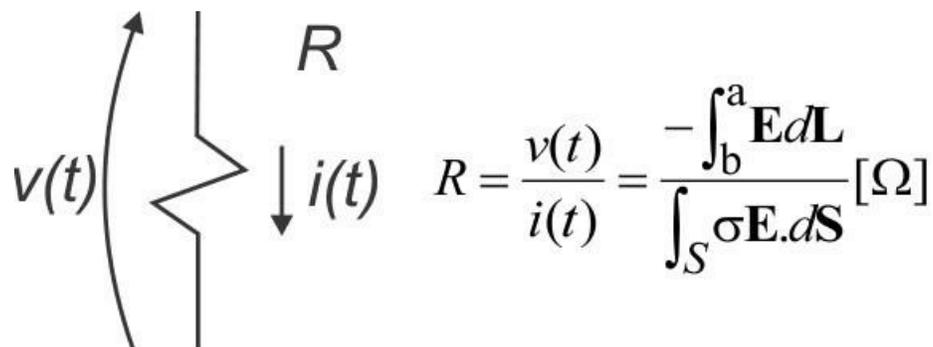
Cálculo:

$$C = \frac{2\pi\epsilon L}{\operatorname{arccosh}\left(\frac{h}{a}\right)} = \frac{2 \times \pi \times 8,854 \times 10^{-12} \times 4}{\operatorname{arccosh}\left(\frac{4}{3,34}\right)} = 359,6 \text{ nF}$$

#

3.2.3 Resistor

Um condutor qualquer tem perdas que são caracterizadas pela resistência do condutor à passagem da corrente elétrica. Estas perdas em geral são a transformação da energia elétrica em térmica. A representação simbólica de um resistor é mostrada na [Figura 3.5](#).



The diagram shows a zigzag resistor symbol. To its left, a curved arrow labeled $v(t)$ indicates the voltage across it. To its right, a downward arrow labeled $i(t)$ indicates the current through it. The letter R is placed above the symbol. To the right of the symbol is the equation:

$$R = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{-\int_b^a \mathbf{E} d\mathbf{L}}{\int_S \sigma \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S}} [\Omega]$$

Figura 3.5: Representação de um resistor

A relação entre a tensão e a corrente em um resistor é $v = Ri$, que é a lei de Ohm.

3.2.4 Impedância

Uma impedância é dada pela relação entre a tensão e a corrente elétrica de um componente, [Figura 3.6](#), ou, de forma simplificada, pela relação:

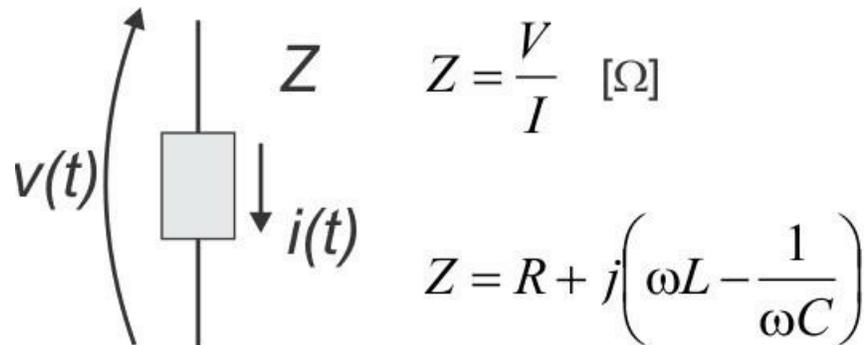


Figura 3.6: Representação de uma impedância

Os elementos de um sistema elétrico, como o sistema de aterramento, são formados por resistências, indutâncias e capacitâncias, isto é, são formados de impedâncias. Qualquer componente elétrico tem indutância, capacitância e resistência. Deste modo, é mais apropriado falarmos com frequência em impedâncias. A relação entre a tensão e a corrente em uma impedância é $V = ZI$ no domínio da frequência.

3.2.5 Não-linearidades

Os elementos de circuitos podem sofrer variações quando a tensão e a corrente sobre o elemento variarem. Fatores físicos externos e internos influenciam estes elementos, como são os casos da temperatura e da umidade. Por causa destas variações, os parâmetros elétricos e magnéticos do circuito não se comportam de forma linear.

A resistência em um cabo ou fio aumenta de valor devido ao efeito pelicular. Com o crescimento da frequência ou de di/dt a corrente tende a se concentrar na superfície do fio ou cabo, causando um aumento da resistência.

Para determinadas faixas de corrente e tensão o solo é não-linear. A variação da frequência é outro fator de não-linearidade do solo.

Alguns exemplos de componentes não-lineares: varistores, solo, condutores metálicos etc.

4 EFEITO ANTENA

4.1 INTRODUÇÃO

As antenas são dispositivos condutores que convertem ondas eletromagnéticas em correntes elétricas ou convertem correntes elétricas em ondas eletromagnéticas. Os sistemas de aterramento como bons condutores também radiam e captam ondas eletromagnéticas. Deste modo, os cabos, eletrodos, placas etc. podem ser uma fonte importante de interferência e de emissão de ondas, causando problemas custosos. Uma introdução em antenas é relevante para entender os sistemas de aterramento moderno.

As antenas podem ser do tipo elétrica ou do tipo magnética. Para estes dois tipos existem várias configurações geométricas para as diferentes aplicações. A seguir discutiremos as duas antenas mais básicas e onde podemos encontrá-las em sistemas de terra.

4.2 DIPOLO ELÉTRICO

Básico (dipolo hertziano)

O dipolo hertziano é uma antena infinitesimal e por isto é a mais básica de todas as antenas elétricas. O seu entendimento e as equações que modelam o comportamento deste dispositivo imaginário têm emprego na análise de outras antenas mais complexas e de condutores (fios e cabos). Em várias situações fios e cabos eletricamente curtos podem ser considerados dipolos hertzianos. Esta aproximação facilita consideravelmente e com bons resultados o mapeamento de campos radiados por estes fios e cabos. A [Figura 4.1](#) mostra o posicionamento dos campos elétricos e magnéticos gerados por um dipolo hertziano.

Um campo elétrico de origem externa tangente ao filamento da [Figura 4.1](#) causa movimento de cargas no filamento. Este movimento de cargas é a corrente $i(z,t)$ da figura.

Um outro filamento condutor que esteja perpendicular ao campo elétrico gerado pelo dipolo não sofrerá influência deste.

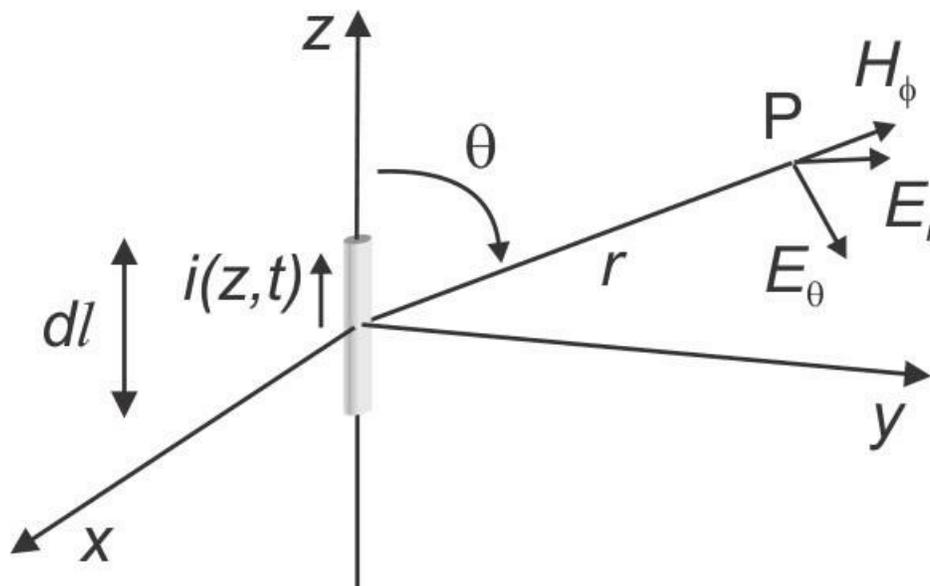


Figura 4.1: Dipolo elétrico – antena linear

$$\left\{ \begin{array}{l} E_r = \frac{I(2h)e^{j(\omega t - \beta r)} \cos(\theta)}{2\pi\epsilon} \left(\frac{1}{\nu r^2} + \frac{1}{j\omega r^3} \right) \quad [\text{V/m}] \\ E_\theta = \frac{I(2h)e^{j(\omega t - \beta r)} \sin(\theta)}{4\pi\epsilon} \left(\frac{j\omega}{\nu^2 r} + \frac{1}{\nu r^2} + \frac{1}{j\omega r^3} \right) \quad [\text{V/m}] \\ H_\phi = \frac{I(2h)e^{j(\omega t - \beta r)} \sin(\theta)}{4\pi} \left(\frac{j\omega}{\nu r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad [\text{A/m}] \end{array} \right.$$

em que:

I – corrente elétrica complexa [A];

$2h$ – comprimento do dipolo [m];

$\omega = 2\pi f$ sendo f a frequência [Hz];

$\beta = 2\pi/\lambda$ – constante de fase [rad/m];

$\lambda = f/\nu$ – comprimento de onda [m];

t – tempo [s];

θ – ângulo entre o dipolo e o vetor que aponta para o ponto P [adimensional];

ϵ – permissividade do meio [F/m];

ν – velocidade de propagação da onda eletromagnética no meio [m/s];

$j = \sqrt{-1}$;

r – distância do dipolo até o ponto P, [Figura 4.1](#).

Dipolo curto

Os dipolos elétricos, [Figura 4.2](#), são antenas lineares com equações e parâmetros mais complexos do que os encontrados no dipolo hertziano. Este tipo de antena é a básica para o estudo de conjuntos de antenas entre outros tipos. Esta antena tem aplicações práticas na análise de aterramento. Com os parâmetros da [Figura 4.1](#) o campo gerado pelo dipolo curto, em um meio não

condutor, pode ser obtido pelas equações a seguir:

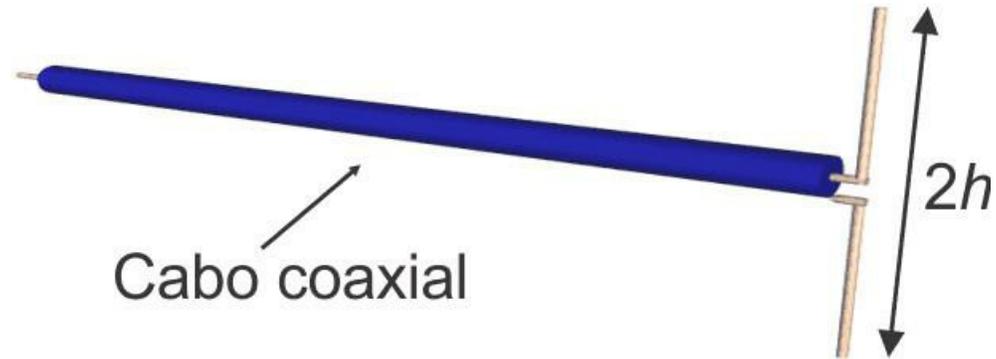


Figura 4.2: Dipolo elétrico conectado a um cabo coaxial

Exemplo 4.1

Antenas usadas em medições.

#

4.3 MONOPOLO ELÉTRICO

O monopolo é constituído por um fio perpendicular a um plano condutor perfeito. O reflexo deste fio vertical no plano condutor forma com o fio um dipolo eléctrico como o discutido anteriormente. A forma de tratamento dos campos radiados é muito semelhante à do dipolo eléctrico. Este tipo de antena é muito comum no nosso dia a dia. As aplicações são variadas e é de fácil construção.

Na prática os dipolos aparecem não apenas como antenas de comunicação mas também como condutores de descida de aterramento, postes de concreto armado, canais de descarga atmosférica etc.

A análise da radiação eletromagnética de diversas estruturas condutoras, como treliças metálicas, linhas de transmissão, descargas atmosféricas, malhas de terra etc., pode ser feita com facilidade utilizando-se dos princípios e equações deste tipo de antena.

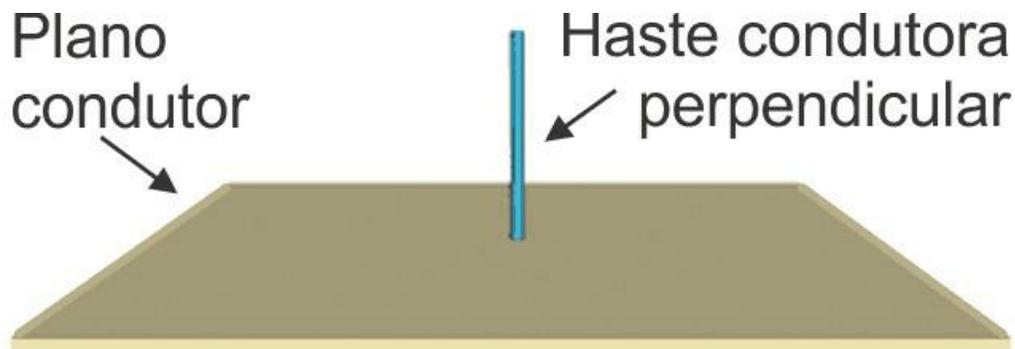


Figura 4.3: Monopolo – o plano condutor da figura é infinito com condutividade infinita.

Exemplo 4.2

Exemplos de monopolos eléctricos:

- Hastes de aterramento;
- Cabo de aterramento de transformadores e para-raios;
- Conductor de descida;
- Antenas de radiodifusão;
- Antenas de rádios de automóveis;
- Antenas de aparelhos receptores de TV e de rádio;

- Linhas de transmissão;
- Qualquer fio ou cabo, incluindo os fios e cabos terra.

#

4.4 DIPOLO MAGNÉTICO

Os dipolos magnéticos são anéis de corrente. O nome dipolo é adotado por analogia com o dipolo elétrico. O dipolo elétrico básico é um anel de corrente com um diâmetro infinitesimal. Embora não seja existente na prática, as equações obtidas deste dipolo são de grande utilidade nos casos práticos em que encontramos anéis de corrente.

Como o dipolo elétrico hertziano, existe por associação de nomenclatura o dipolo magnético infinitesimal. Este dipolo é a base para diversas análises de outros laços de correntes usados na prática. A Figura 4.4 mostra o posicionamento dos campos elétricos e magnéticos gerados por um dipolo magnético ou laço de corrente.

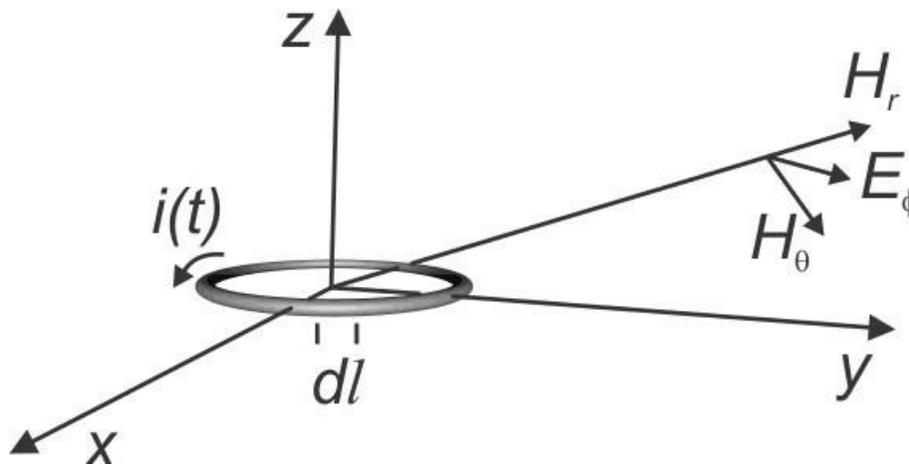


Figura 4.4: Dipolo magnético

Laços de corrente

Na avaliação de aterramentos, laços de correntes formados por condutores e eletrodos de terra são de extrema importância. O laço introduz no circuito elétrico uma indutância que aumenta o impedimento da passagem da corrente elétrica. Uma outra consequência do laço é o campo elétrico radiado por ele [Figura 4.5](#). Este campo pode se acoplar a outros componentes do circuito causando ruídos indesejados.

O fluxo magnético ϕ é obtido a partir do campo magnético:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \text{ [Wb]}$$

em que S é a superfície por onde está passando o fluxo magnético.

Aproximadamente $\phi = BA$, em que A é a área do laço. Esta aproximação é válida para dimensões eletricamente pequenas (veja o capítulo de linhas de transmissão para detalhes).

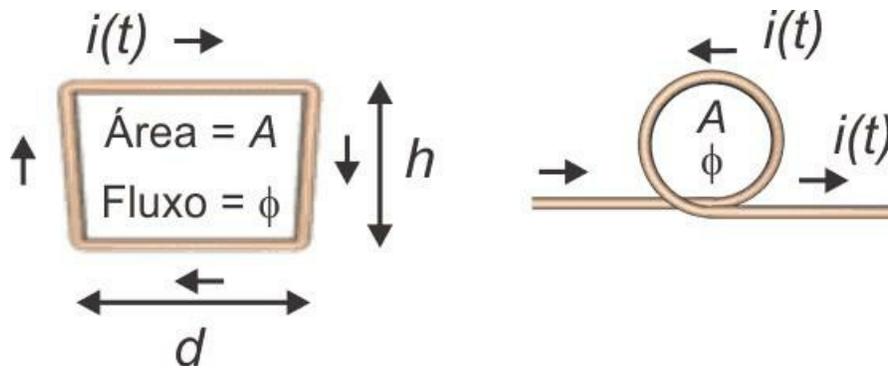


Figura 4.5: Laço de corrente formado por fios ou cabos; d é a largura do laço, h é a altura do laço e $A(= h.d)$. ϕ é o fluxo magnético gerado pela corrente $i(t)$ ou ϕ é o fluxo magnético que gera a corrente $i(t)$.

Exemplo 4.3

Alguns exemplos de dipolo magnético:

- Eventuais laços formados por cabos terra;
- As retículas de uma malha de terra formam dipolos magnéticos;
- Anéis usados como eletrodos de terra;
- Esquadrias metálicas de janelas;
- Reticulado de alambrados;
- Antenas de ferrite em receptores AM.

5 LINHAS DE TRANSMISSÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Os cabos, fios e hastes de aterramento são linhas de transmissão entre outros vários tipos de linhas de transmissão que podem ser observados no nosso dia a dia. Podemos citar as linhas de transmissão de energia elétrica (69 kV a 750 kV ou mais, suspensas por com torres metálicas), linhas de distribuição de energia elétrica (13,8 kV, sustentadas por postes), linhas de transmissão de dados digitais (cabos de impressoras, cabos de *modem*, cabos de controle PLC, linhas telefônicas etc.), linhas de dados analógicos (cabos telefônicos), cabos de alimentação (127 V, 220 V etc.), antenas lineares, cabos e hastes de aterramento etc. As linhas de transmissão aparecem em diversas configurações geométricas e em diferentes tipos de meios. As linhas de transmissão são formadas por pares de fios ou cabos em paralelo, cabos coaxiais, cabos paralelos a planos condutores, multicondutores em paralelo, cabos verticais ou em configurações quaisquer. Enfim, quaisquer conjuntos de cabos, barras, fios e fitas que transmitam eletricidade são linhas de transmissão, não importando a extensão.

A análise do aterramento adequado a um determinado sistema passa pela análise da propagação do sinal no sistema a ser aterrado (linhas de distribuição, linhas de potência etc.) e da propagação do sinal nos cabos do sistema de aterramento. Os impulsos atmosféricos e outros, bem como altas frequências, sofrem o efeito de reflexão, da superposição, ressonância, onda estacionária etc. As famosas questões de aterramento de uma blindagem em um só ponta ou nos dois extremos ou mesmo fazer um multiaterramento são respondidas pela análise de linhas de transmissão. Os efeitos citados devem ser analisados cuidadosamente quando impulsos e altas frequências estão presentes.

A forma mais usual de iniciar a análise de linhas de transmissão é com um par de condutores em paralelo no espaço livre.

5.2 PAR DE CONDUTORES

Dois condutores cilíndricos paralelos, como na [Figura 5.1](#), com uma corrente $i(t)$ fluindo por eles e uma tensão $v(t)$ entre estes, separados por um material de permissividade ϵ , formam uma linha de transmissão. O material pode ter perdas, ou seja, pode ser o solo. O par de condutores em paralelo forma a configuração mais simples e mais facilmente estudada. A seguir vários aspectos desta linha serão apresentados.

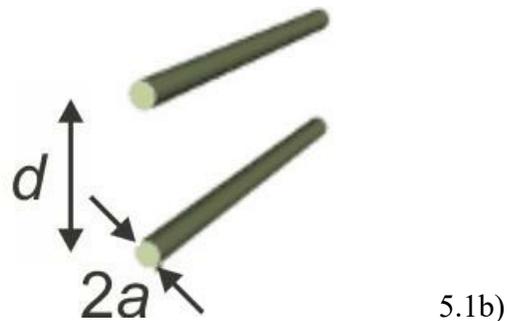
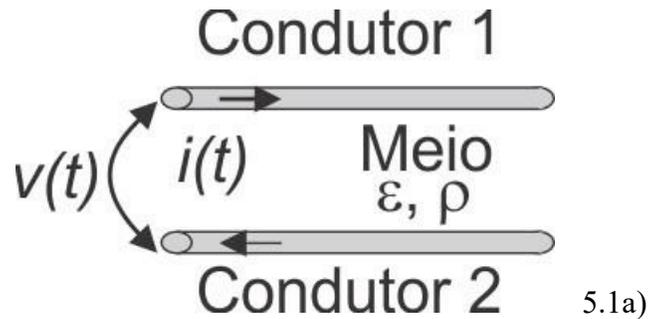


Figura 5.1: Linha de transmissão formada por par de condutores em paralelo. a) $v(t)$ é a tensão elétrica entre os condutores e $i(t)$ é a corrente elétrica circulando nos condutores; b) distância entre os condutores e diâmetro.

5.2.1 Campo elétrico

As cargas em um condutor são opostas às do outro condutor, o que forma um campo elétrico entre estes condutores. A [Figura 5.2](#) ilustra o campo formado por uma linha de transmissão com dois condutores paralelos. Uma linha de transmissão também é um conjunto de antenas radiando campo elétrico. Qualquer outro condutor que esteja envolvido por este campo elétrico sofrerá influência deste e influenciará a tensão e a corrente na linha de transmissão.

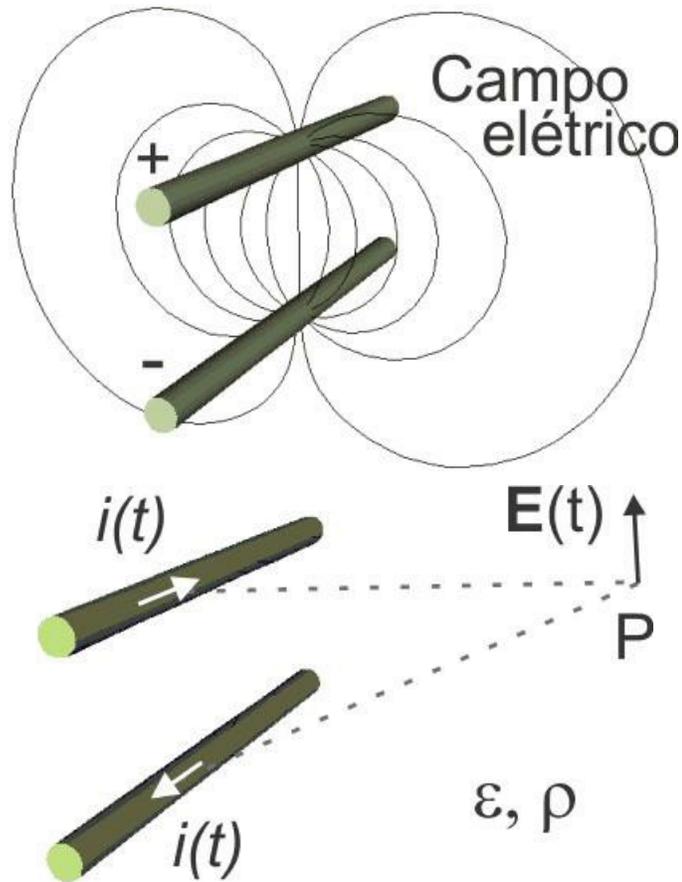


Figura 5.2: Linhas de campo elétrico em uma linha de transmissão e campo elétrico no ponto P

5.2.2 Campo magnético

A corrente quando passa pelos condutores forma um campo magnético entre estes. Este campo magnético é praticamente nulo acima dos condutores. A [Figura 5.3](#) ilustra o campo magnético em um par de condutores. Uma linha de transmissão forma um ou mais laços magnéticos que radiam e captam campo magnético. Os condutores que estejam envolvendo linhas de campo magnético ou que estejam envolvendo apenas um dos condutores da linha sofrerão influência deste campo magnético. Estes condutores externos alterarão a tensão e a corrente da linha.

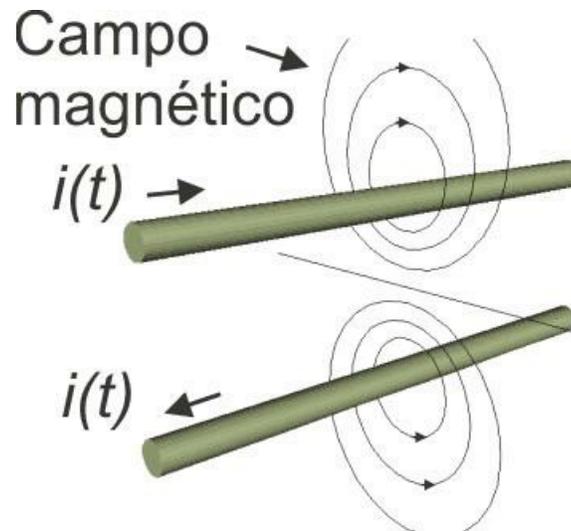


Figura 5.3: Linhas de campo magnético em uma linha de transmissão

5.2.3 Regra da mão direita

A regra da mão direita indica o sentido do campo magnético \mathbf{H} conhecendo-se o sentido da corrente $i(t)$, ou vice-versa. O dedo polegar indica a direção da corrente e os demais dedos indicam a direção do campo magnético, como ilustrado na [Figura 5.4](#). Esta é uma regra muito prática e de grande utilidade em medições de corrente elétrica. Em várias aplicações onde há necessidade de conhecer ou avaliar a influência do campo magnético, a aplicação desta regra é de grande valia.

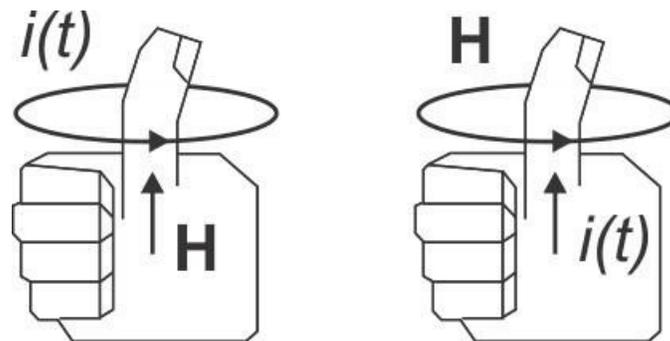


Figura 5.4: Regra da mão direita

5.2.4 Parâmetros geométricos e físicos

Os parâmetros elétricos de uma linha de transmissão são obtidos a partir dos parâmetros físicos, estes parâmetros físicos estão relacionados a seguir:

- Altura - distância entre os condutores;
- Diâmetro dos condutores;
- Meio - (tipo de isolantes: ar, plásticos, resinas, areia, pedra, argila etc.);

- Condutor (cobre, alumínio, aço, solo etc.).

5.2.5 Parâmetros da linha - *RLCG* - Parâmetros elétricos

Os parâmetros elétricos são obtidos a partir dos parâmetros geométricos e físicos da linha de transmissão. Para o caso de uma linha de transmissão a dois condutores cilíndricos em paralelo tem-se:

- A resistência da linha está relacionada com o diâmetro e a condutividade elétrica do condutor:

$$R = 1 / (A\sigma) \text{ } [\Omega/\text{m}]$$

e para condutores cilíndricos:

$$R = 1 / (a^2\pi\sigma) \text{ } [\Omega/\text{m}]$$

em que:

A – área da seção reta do condutor [m^2];

a – raio da seção reta do condutor cilíndrico [m].

- A indutância externa da linha, L_{ext} , que aproximadamente igual a indutância total da linha, é obtida a partir da permeabilidade magnética e da altura e diâmetro do condutor:

$$L_{ext} = \frac{\phi}{I} \cong \frac{\mu}{\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right) \text{ } [\text{H}/\text{m}]$$

- A capacitância da linha é o resultado da permissividade do meio e da distância entre os condutores além do diâmetro destes:

$$C = \frac{q}{V} \cong \frac{\pi\epsilon}{\ln(d/a)} \text{ } [\text{F}/\text{m}]$$

Um capacitor são dois condutores separados por um dielétrico, isto é o que ocorre com uma linha de transmissão.

- A condutância, G [S/m], de uma linha representa as perdas transversais da linha. Estas perdas ocorrem através do meio circundante, e dependem de σ (condutividade do meio). Em muitos cálculos este valor pode ser desprezado por ser muito pequeno com influência ínfima nos resultados. No caso de condutores nus enterrados a condutância é da maior relevância. O meio externo à linha, neste caso, é o solo, que é condutor.

5.2.6 Impedância característica

A impedância característica, também chamada de impedância de surto, é obtida de forma aproximada por:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega]$$

ou no domínio da frequência:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad [\Omega]$$

em que $\omega = 2\pi f$, velocidade angular, e f é a frequência.

A forma exata da impedância é obtida pela relação entre a tensão e a corrente:

$$Z = V / I \quad [\Omega].$$

Exemplo 5.1

Exemplos de linhas de transmissão:

Hastes de aterramento, vigas metálicas, cabos de alimentação de eletrodomésticos e de máquinas de escritórios, pares telefônicos, estais de aço, condutores de descida de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, canaletas metálicas, tubos metálicos, cabos terra, componentes de estruturas metálicas, fiação residencial etc.

#

5.3 MULTICONDUTORES

Em geral as linhas de transmissão são compostas de vários condutores em paralelo como ilustrado na [Figura 5.5](#). Estes condutores podem ter qualquer tipo de seção reta. Neste caso, existe uma capacitância entre cada dois condutores, uma indutância própria do condutor, uma indutância entre cada dois condutores (indutância mútua) e uma resistência para cada condutor.

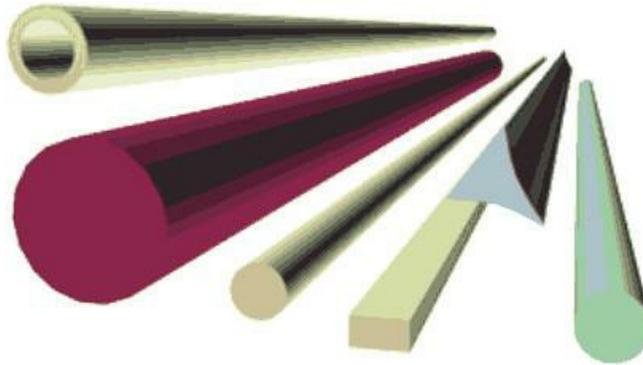


Figura 5.5: Linha de transmissão com vários condutores em paralelo

Exemplo 5.2

Alguns exemplos de linhas de transmissão com multicondutores:

- Cabo terra e suas imagens;
- Vergalhões em concreto armado;
- Colunas e vigas metálicas;
- Linhas trifásicas de alta-tensão, em caso de circuito duplo geminado com cabos para-raios, podem chegar até 26 cabos em paralelo ou mais.

- Linhas de distribuição em geral têm três condutores em paralelo. Quando a linha de distribuição é acompanhada por circuito secundário, pode haver sete cabos em paralelo.

- Cabos telefônicos possuem dezenas, centenas ou mesmo milhares de pares de assinantes juntos mais a blindagem.

- Placas de circuito impresso têm casos com 32 trilhas em paralelo.

- Cabos para ligação com impressoras e outros periféricos têm oito ou mais fios em paralelo.

5.4 CABO E PLANO PARALELO

Uma linha de transmissão pode ser formada por um plano condutor e um cabo ou fio acima deste, como ilustrado na [Figura 5.6](#).

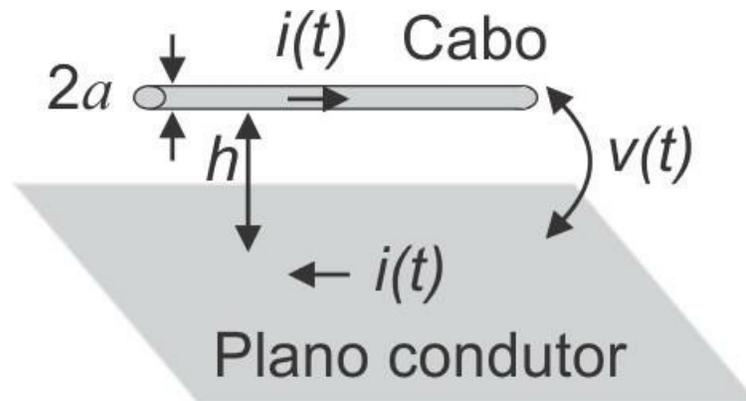


Figura 5.6: Cabo condutor paralelo a plano condutor

Parâmetros

A capacitância e a indutância de um condutor cilíndrico e um plano são:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{h + \sqrt{h^2 - a^2}}{a}\right)} \cong \frac{2\pi\epsilon}{\ln(2h/a)} \quad [\text{F/m}]$$

e

$$L \cong \frac{\mu}{2\pi} \ln(2h/a) \quad [\text{H/m}]$$

em que h é a altura do cilindro ao plano [m] e a o raio do cabo [m].

Exemplo 5.3

Alguns exemplos de linhas de transmissão formadas por um cilindro condutor acima de um plano condutor:

- Fios e cabos terra;
- Sistema de corrente contínua por meio de um cabo condutor – o retorno é feito pela terra;
- Distribuição de potência elétrica monofásica – retorno pela terra;
- Estais e cabos de aço.

#

5.5 CABO E PLANO PERPENDICULARES

Para se calcular a impedância característica de um condutor perpendicular a um plano condutor, [Figura 4.3](#), utilizar a equação:

$$Z_c = 60 \left[\ln \left(\frac{2l}{a} \right) - 1 \right] \quad [\Omega]$$

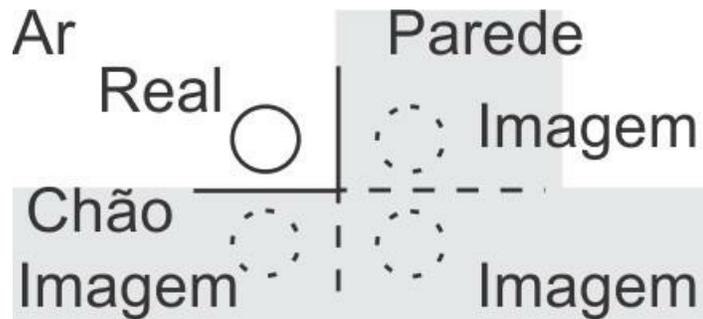
em que:

l – comprimento do condutor [m];

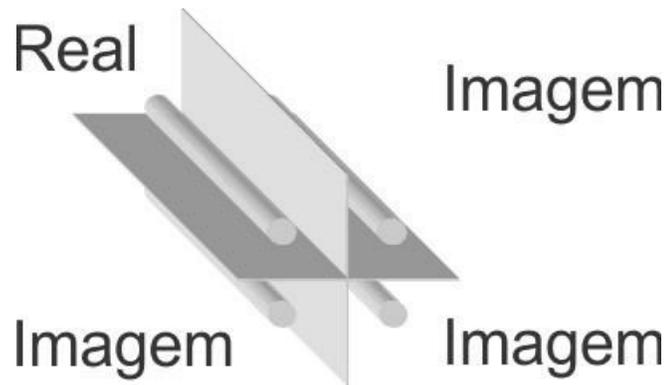
a – raio do condutor [m].

5.6 CABO PARALELO A DOIS PLANOS PERPENDICULARES

Uma configuração muito comum é a de um cabo terra correndo junto à parede e ao chão. Neste caso, o cabo, o chão e a parede podem ser substituídos por um arranjo de quatro cabos em paralelo, ver [Figura 5.7](#). Assim as três imagens do cabo são utilizadas para o cálculo dos parâmetros elétricos.



5.7a) 5.7



b)

Figura 5.7: Cabo de aterramento correndo junto ao chão e à parede – estão representadas as imagens do cabo e o arranjo de cabos equivalentes. a) vista em corte; b) vista em perspectiva.

5.7 FITA E PLANO EM PARALELO

Um tipo de linha de transmissão muito encontrado no dia a dia é a fita e plano em paralelo, veja [Figura 5.8](#). Este tipo de linha de transmissão é muito usado quando precisamos aterrar alta frequência ou elevadas taxas di/dt . A capacitância pode ser aumentada com facilidade com o aumento da largura b da fita. O aumento da capacitância diminui a impedância da linha de transmissão, facilitando a passagem da corrente.

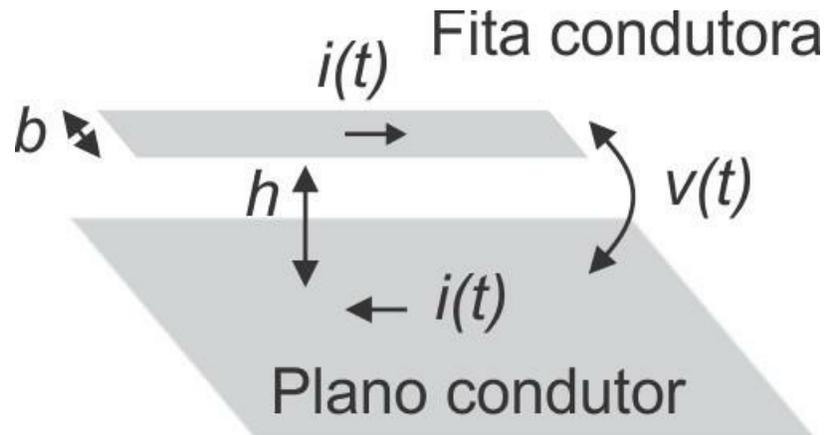


Figura 5.8: Linha de transmissão em fita e plano em paralelo; b é a largura da fita e h é a distância da fita ao plano.

A impedância de uma fita acima de um plano pode ser calculada aproximadamente pela equação, para $b \gg h$:

$$Z_c = \frac{377h}{b\sqrt{\epsilon_r}} \quad [\Omega]$$

Exemplo 5.4

Fitas de aterramento são muito comuns em:

- Laboratórios de alta-tensão;
- Estações de televisão;
- Grades para terra de informática;

- Laboratórios de medição de precisão;
- Trilhas de circuito impresso são em alguns casos fitas acima de plano condutor.

#

5.8 FEIXE DE CONDUTORES

Um feixe de cabos em paralelo se aproxima da forma de uma fita condutora, [Figura 5.9](#), esta configuração tem uma capacitância maior do que um único condutor. A impedância de um feixe de quatro condutores de 25 mm² em paralelo é portanto menor do que a impedância de um condutor isolado de 100 mm².



Figura 5.9: Feixe de condutores se aproximando da forma de uma fita

5.9 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Quando submetemos uma linha de transmissão a um campo eletromagnético (aplicamos tensão e corrente à linha), este adere à linha e passa a se deslocar como um trem sobre trilhos. As rodas são como a corrente elétrica e os eixos que mantêm os pares de rodas unidos é como a tensão elétrica. Os trilhos são como os condutores. A relevância disto, em aterramento, está em buscar o mesmo potencial em todo o sistema de aterramento a todo momento. Um mesmo impulso elétrico, gerado por uma única fonte, ao seguir caminhos diferentes com velocidades diferentes causará diferença de potencial em um intervalo de tempo.

5.9.1 Velocidade de propagação

A velocidade de propagação desta onda eletromagnética é dada pela equação

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_{ext}C}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0 \epsilon_r}} \quad [\text{m/s}]$$

com boa aproximação, em que ϵ_r é a permissividade relativa do meio e L_{ext} é a indutância externa da linha. A equação anterior é válida para o solo e para dielétricos, por exemplo, o ar.

5.9.2 Tempo de propagação

O tempo de propagação é relevante em diversas configurações de aterramento em que estão envolvidos impulsos ou outras correntes transitórias. Os transitórios aparecem em diversas situações, como em desligamentos e religamentos de equipamentos.

O tempo de propagação é o tempo que leva a onda eletromagnética do início ao fim da linha. Isto é, ao ligarmos uma corrente e tensão no início da linha, esta vai levar um tempo para chegar a outra ponta da linha. Este tempo é o tempo de propagação

$$\tau = \ell / v \quad [\text{s}]$$

em que ℓ [m] é o comprimento da linha.

5.9.3 Equações de propagação

As equações que descrevem a propagação de uma onda em uma linha de transmissão são conhecidas como equações do telegrafista. Elas formam um sistema de duas equações diferenciais parciais e são de solução complexa, necessitando na maioria dos casos o uso de computador para a solução. Diversas técnicas numéricas têm sido utilizadas para solucionar estas equações, entre as quais: TLM (*Transmission-Line Modeling*) e diferenças finitas no domínio do tempo. Em casos muito simples de reflexões, pode-se usar o diagrama de Lattice. As equações do telegrafista são:

$$\begin{cases} C \frac{\partial v(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + gv(x,t) = 0 \\ L \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} + ri(x,t) = 0 \end{cases}$$

5.9.4 Reflexões

Uma bola encontra um obstáculo, bate e é arremessada de volta. Uma onda de tensão e de corrente ao atingir um obstáculo no fim da linha também é arremessada de volta. Neste caso, pode ocorrer uma elevação de tensão ou de corrente, causando rompimento de isolamento ou sobreaquecimento. As reflexões de tensão e de corrente estão presentes nos sistemas de aterramento podendo causar danos temporários ou permanentes ao sistema aterrado.

A tensão resultante da reflexão é sempre a soma da tensão que está chegando com a tensão que está retornando:

Tensão Total = Tensão Incidente + Tensão Refletida

$$v_t = v_r + v_i.$$

E, para a corrente:

Corrente Total = Corrente Incidente + Corrente Refletida

$$i_t = i_r + i_i.$$

O obstáculo pode mudar dependendo do caso. Por exemplo: uma linha aberta, um curto-circuito, uma resistência casada, um capacitor, um indutor ou uma combinação de diversos componentes.

Para o caso de linha aberta, a onda de corrente retorna com o sinal trocado, anulando assim a onda incidente. A onda de tensão volta com o mesmo sinal, e, neste caso, dobra o valor da tensão pois também se soma à tensão incidente.

Em um curto-circuito a onda de tensão retorna com o valor do sinal trocado e a onda de corrente retorna com o mesmo sinal. Neste caso, o valor da corrente duplica pois o sinal retornado soma-se ao sinal incidente.

5.9.5 Terminal resistivo

Quando a linha termina em uma resistência com valor igual ao da impedância de linha não há um retorno das ondas de tensão e de corrente. Para uma resistência com valor igual à metade da

impedância característica a reflexão fica como mostrado na [Figura 5.10](#).

Nas situações em que a resistência assume um valor qualquer, a tensão refletida é:

$$v_r = \frac{R - Z_c}{R + Z_c} v_i$$

e a corrente refletida é:

$$i_r = \frac{Z_c - R}{Z_c + R} i_i$$

em que v_i é a tensão incidente e i_i é a corrente incidente.

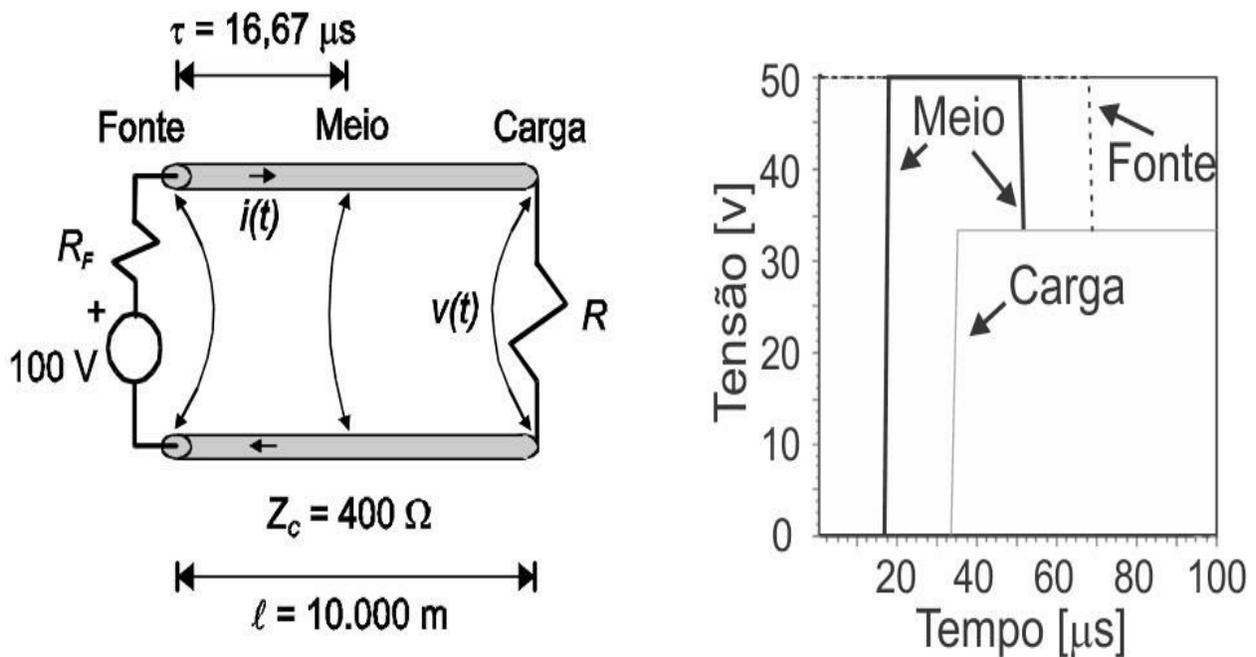


Figura 5.10: Linha com terminal resistivo; reflexão em linha de $Z_c = 400,0 \Omega$, $R = 200,0 \Omega$ e resistência do gerador de $400,0 \Omega$; três curvas são mostradas no gráfico: uma está no início

da linha (Fonte), outra no meio da linha (Meio) e a terceira no fim da linha, onde fica o resistor (Carga).

5.9.6 Terminal indutivo

Uma linha de transmissão terminada por um indutor é mostrada na , a tensão em três pontos da linha também está na figura. O indutor pode representar um motor, um transformador, um relé etc.

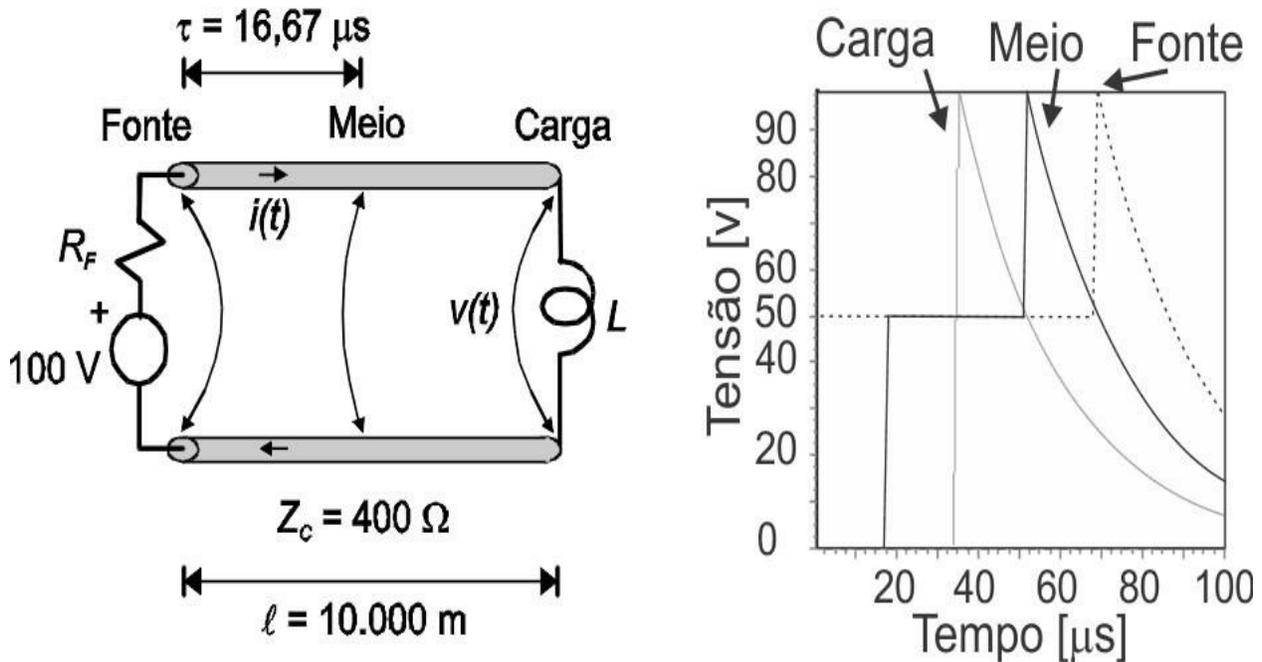


Figura 5.11: Linha com terminal indutivo; uma fonte de tensão degrau aplicada a uma linha de $Z_c = 400,0 \Omega$, carga indutiva de $10,0 \text{ mH}$ e resistência da fonte de $400,0 \Omega$. Três curvas são mostradas no gráfico: uma está no início da linha (Fonte), outra no meio da linha (Meio) e a terceira no fim da linha, onde fica o indutor (Carga).

5.9.7 Terminal capacitivo

Uma linha de transmissão terminada por um capacitor é mostrada na [Figura 5.12](#). Notar que a tensão só aparece no meio da linha no tempo $16,16 \mu\text{s}$ e que chega ao capacitor no instante $33 \mu\text{s}$, quando há um curto-circuito e o capacitor começa a ser carregado. Esta simulação computacional representa a situação real de um raio que atinge uma linha de potência e propaga por esta até atingir capacitores de correção de fator de potência.

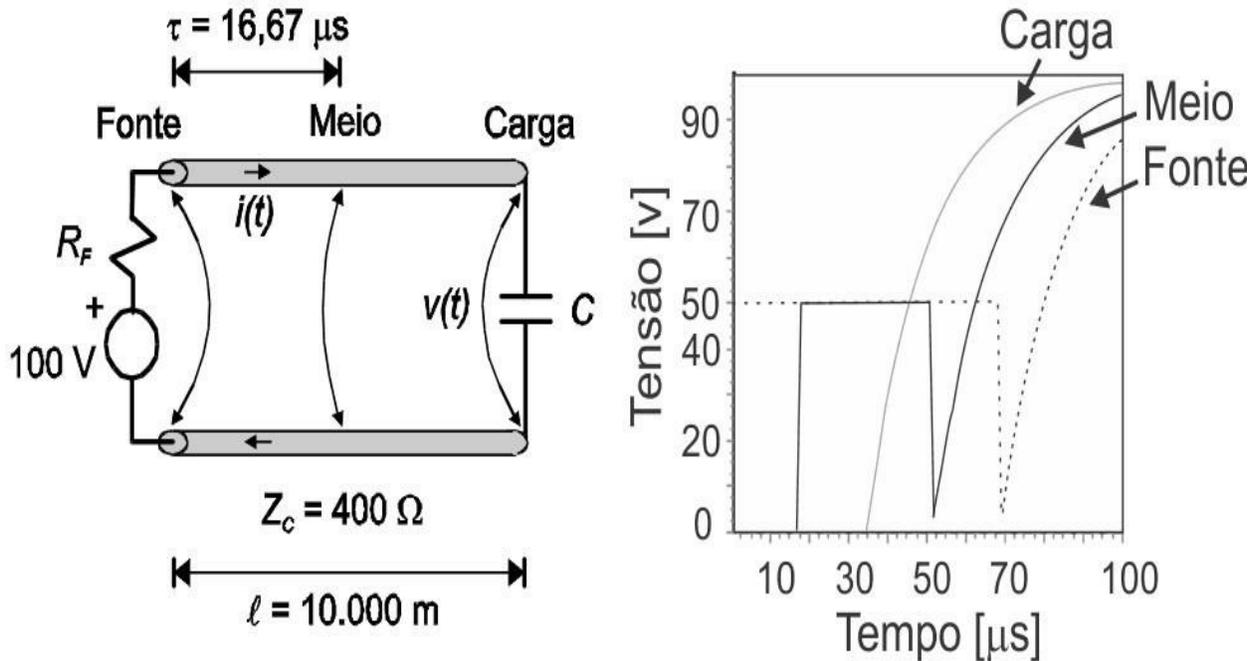


Figura 5.12: Linha com terminal capacitivo; uma fonte de tensão degrau aplicada a uma linha de $Z_c = 400,0 \Omega$, carga capacitiva de $40,0 \text{ nF}$ e resistência da fonte de $400,0 \Omega$. Três curvas são mostradas no gráfico: uma está no início da linha (Fonte), outra, no meio da linha (Meio) e a terceira no fim da linha, onde fica o capacitor (Carga).

5.9.8 Junção de duas linhas

Duas linhas de transmissão conectadas com impedâncias características diferentes sofrem reflexão de ondas na junção, [Figura 5.13](#). Esta reflexão é proporcional à relação das impedâncias. A ligação de uma linha com outras duas ou mais também provoca reflexão.

Junções de condutores de descida de para-raios com condutores terra são exemplos de linhas com impedâncias diferentes. Vários cabos terra se unindo em um único cabo terra é outro exemplo de junções de linhas.

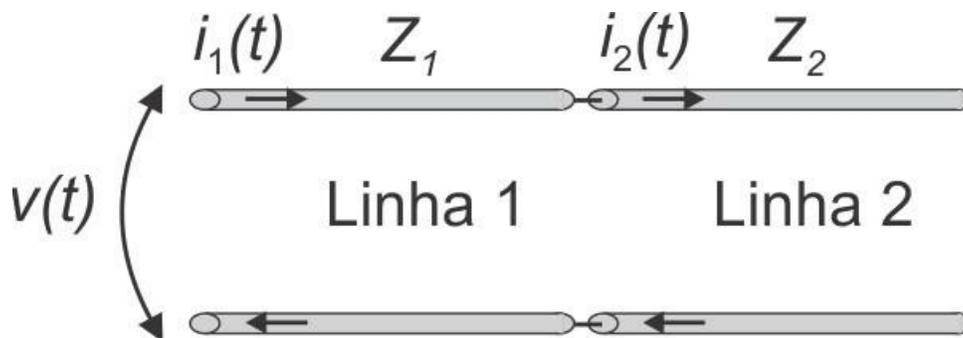


Figura 5.13: Junção de duas linhas de transmissão com impedâncias Z_1 e Z_2 .

5.9.9 Linha com para-raios em derivação

Em muitos casos encontramos resistores, [Figura 5.14](#), indutores, capacitores, uma combinação dos três ou outros equipamentos ligados a uma linha de distribuição ou em cabos terra. Um exemplo muito comum é o de para-raios em derivação em linhas de distribuição. Os capacitores e os indutores são muitas vezes ligados a cabos terra.

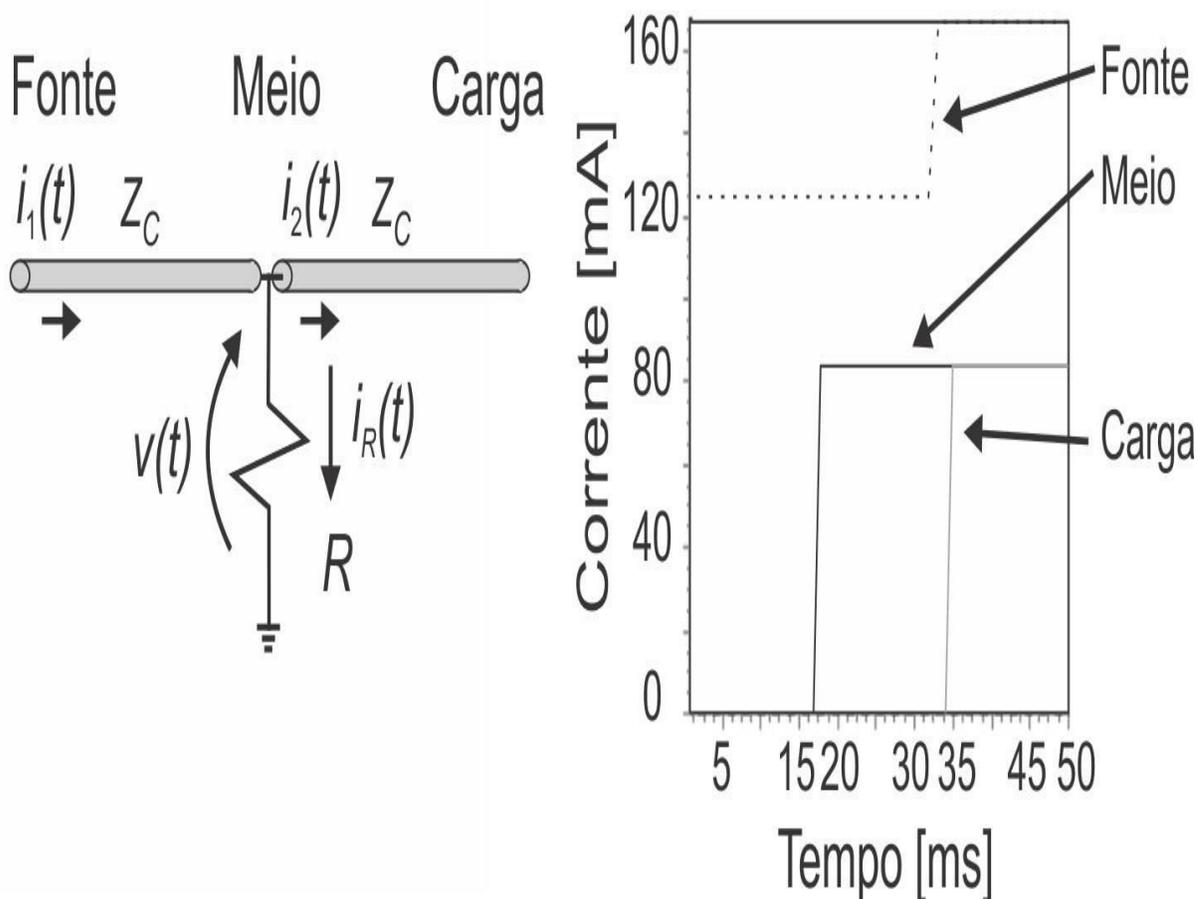


Figura 5.14: Linha de distribuição com resistência em derivação representando um para-raios e o aterramento; uma fonte de tensão degrau aplicada a uma linha de $Z_c = 400,0 \Omega$, carga resistiva de $400,0 \Omega$, resistência da fonte de $400,0 \Omega$ e derivação resistiva $R = 400,0 \Omega$ no meio da linha; três curvas são mostradas no gráfico: uma está no início da linha (Fonte), outra no meio da linha (Meio) e a terceira, no fim da linha, onde fica o resistor (Carga).

As reflexões ocorrem nos sistemas de aterramento. Algumas reflexões se sobrepõem à onda incidente causando sobretensão no sistema aterrado. As correntes impulsivas injetadas em malhas de terra causam muitas reflexões nas junções desta malha. Toda e qualquer corrente inicial irá ter um período passageiro de reflexões até se acomodar. Este período é chamado de transitório. As reflexões também estão presentes nos sistemas de potência e de telecomunicação. Em alguns casos as reflexões que ocorrem nestes sistemas influenciam o modo de aterrar.

5.10 LINHAS DE TRANSMISSÃO ELETRICAMENTE CURTAS

As linhas de transmissão podem ser consideradas curtas ou longas. Esta ideia de comprimento está associada a uma noção de tamanho elétrico. Uma linha eletricamente curta é facilmente representada por um modelo que pode ser um circuito elétrico ou um algoritmo computacional. Isto facilita muito o cálculo dos valores de tensão e corrente. A [Figura 5.15](#) ilustra uma senoide de período T e frequência f .

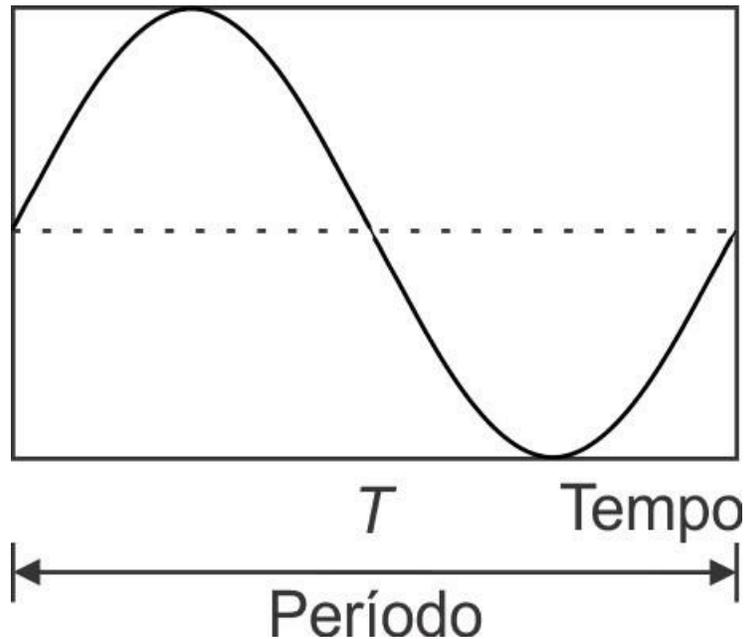


Figura 5.15: Senoide com frequência f e período $T = 1/f$

Se $\ell \ll \lambda$ (comprimento de onda = λ – lê-se: *lambda*), linha eletricamente curta, podemos representar a linha por parâmetros concentrados.

O comprimento de onda é obtido pela relação:

$$\lambda = v / f \text{ [m]}$$

em que:

v – velocidade de propagação no meio (no ar $v \approx 3 \times 10^8$ m/s) [m/s];

f – frequência [Hz].

Exemplo 5.5

Exemplos de linhas eletricamente curtas para ondas senoidais:

Linha	Comprimento da linha – ℓ	Frequência do sinal – f	Comprimento de onda – λ
1	200 km	60 Hz	5.000 km

2	3 m	10 MHz	30 m
3	3 cm	1 GHz	30 cm

#

Como pode ser notado o comprimento de onda no subsolo é bem inferior ao comprimento de onda no ar. Para uma frequência de 60 Hz no ar o comprimento de onda é 5.000 km, [Figura 5.16](#), e em um solo com permissividade relativa 10 o comprimento de onda é de 1.580 km.

Uma frente de onda de uma descarga atmosférica, atinge 360 m no ar e 114 m em um solo de permissividade relativa 10, ver [Figura 5.17](#). Uma onda trapezoidal de 1 GHz tem o comprimento de onda de 30 m no ar, ver [Figura 5.18](#).

Uma linha de 30 m é longa para sinais da telefonia celular (900 MHz a 1.800 MHz), [Figura 5.18](#). Uma linha curta para transmissão de potência ou distribuição é longa para sinais da informática.

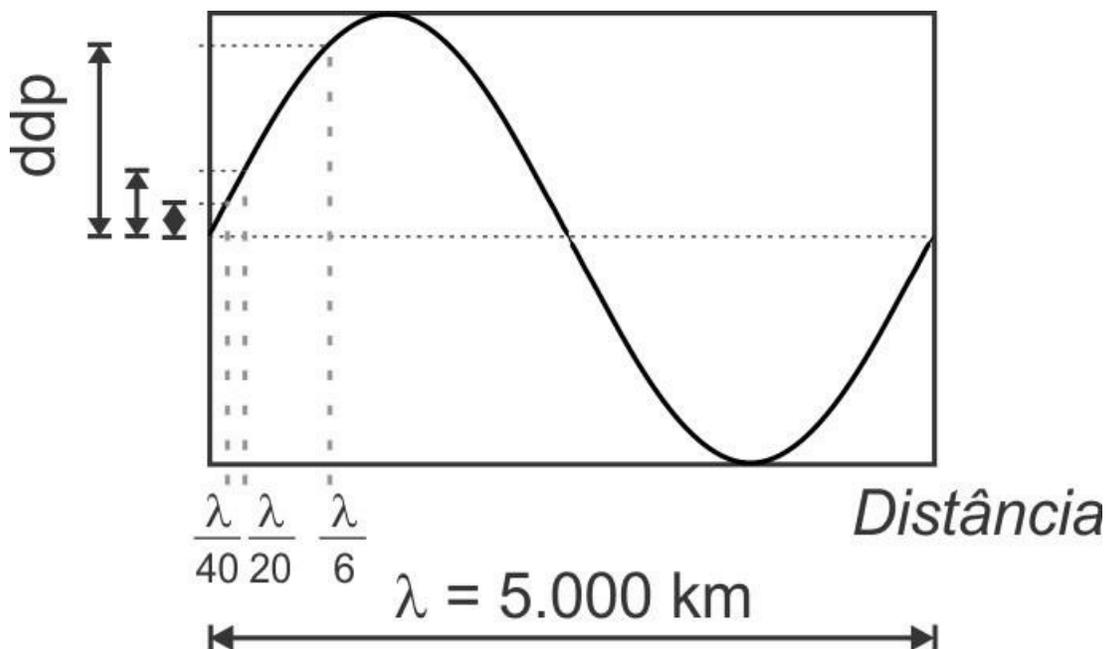


Figura 5.16: Comprimento de onda de uma senoide de 60 Hz – o meio material considerado é o ar, $\ell = v/f$

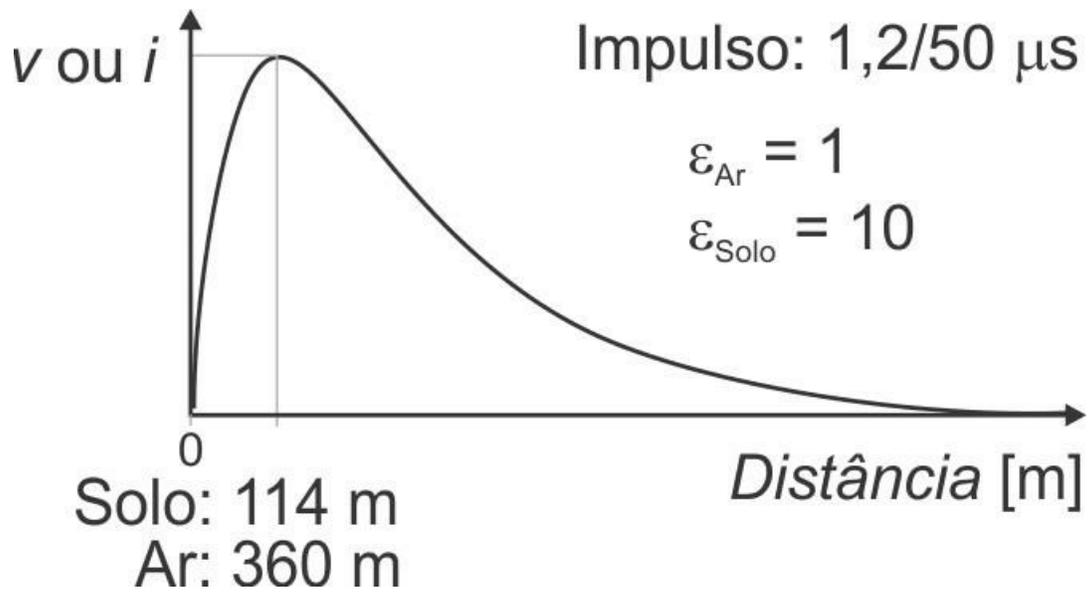


Figura 5.17: Comprimento da frente de onda de um impulso atmosférico no interior do solo e no ar; gráfico estilizado

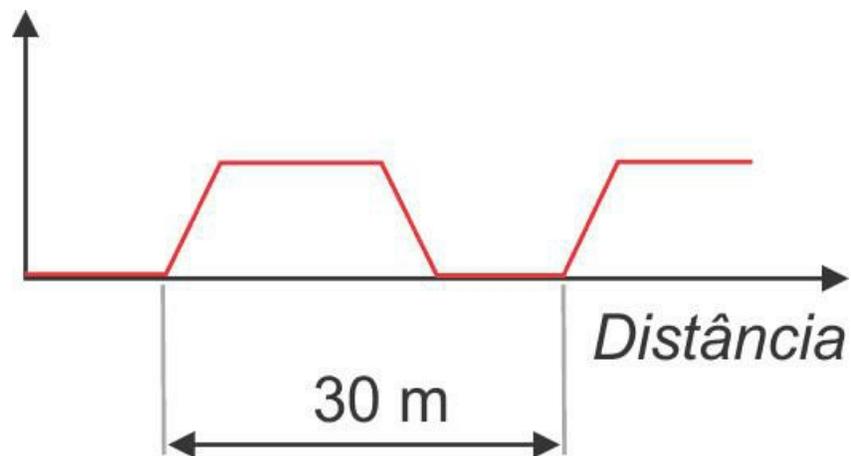


Figura 5.18: Comprimento de onda de uma onda trapezoidal de 1,0 GHz no ar

A linha curta pode ser representada pelos circuitos equivalentes (Π , T, Γ , Γ^{-1}), como ilustrado nas figuras 5.19, 5.20, 5.21 e 5.22.

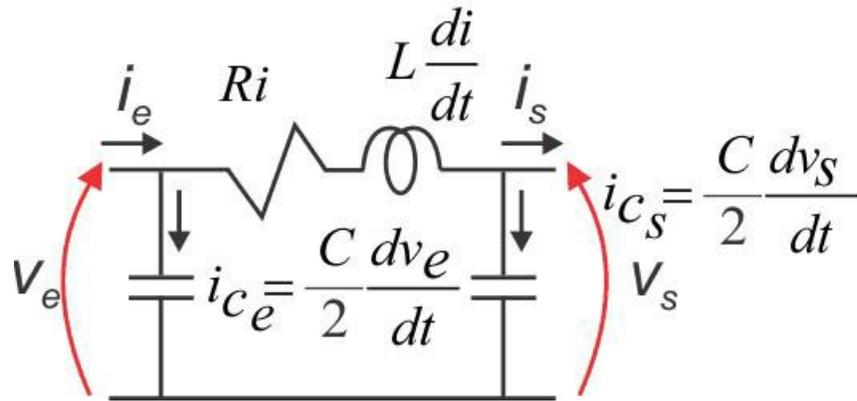


Figura 5.19: Circuito pi, Π , correntes e tensões de entrada e de saída

No circuito gama, [Figura 5.20](#):

$$i_e = -i_c - i_s \Rightarrow i_e = -i_c - C \, dv_e/dt$$

$$v_s = v_e - Ri_s - L \, di_s/dt$$

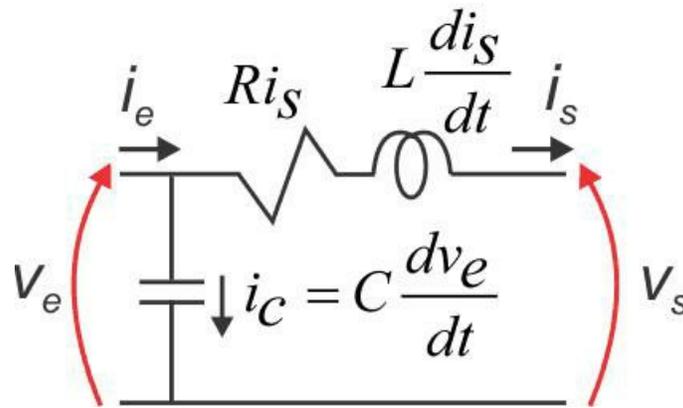


Figura 5.20: Circuito gama, Γ , correntes e tensões de entrada e de saída

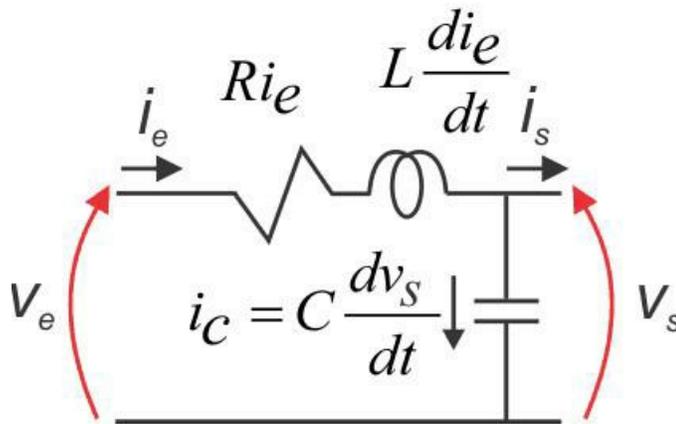


Figura 5.21: Circuito gama invertido, Γ^{-1} , correntes e tensões de entrada e de saída

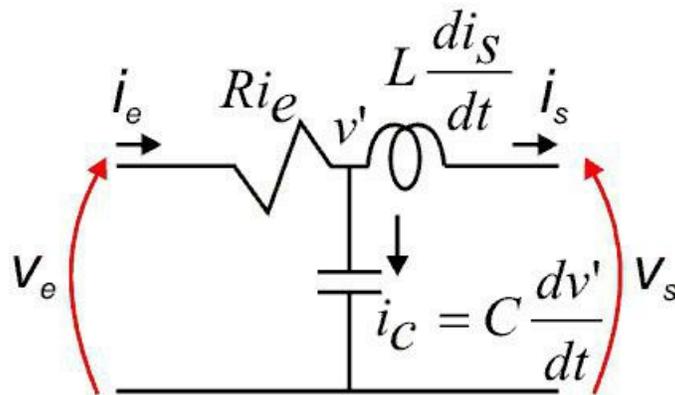


Figura 5.22: Circuito T, correntes e tensões de entrada e de saída

Aplicações de linha eletricamente curta

A ideia de linha eletricamente curta é aplicável em diversas situações de aterramento. Podemos estender este conceito para dimensões eletricamente curtas. O conhecimento desta característica nos possibilita responder a várias questões de aterramento relacionadas a:

- Placas de aterramento;
- Malhas de aterramento (tamanho da retícula);
- Multiaterramento de blindagem de cabos;
- Comprimento de fios, cabos, fitas etc.;
- Uma linha eletricamente curta é uma região equipotencial (para fins práticos – na realidade é quase-equipotencial).

Exemplo 5.6

Neste exemplo consideramos uma descarga atmosférica atingindo captor aterrado por um condutor de descida de 30,0 m, sendo o eletrodo de terra uma haste vertical de 3 m de profundidade em um solo de 100,0 $\Omega \cdot m$ e permissividade 20,0.

Cabo de aterramento

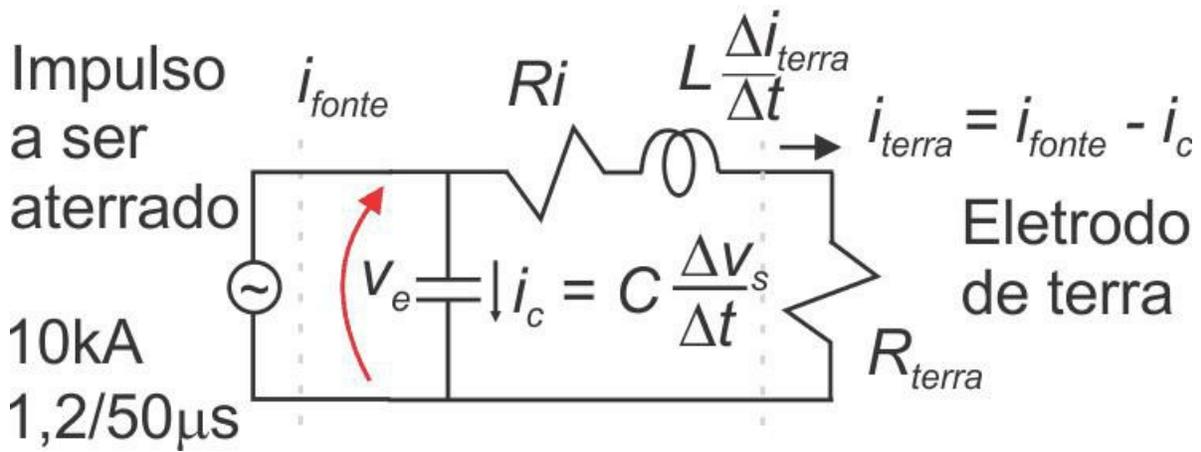


Figura 5.23: Circuito representativo de uma descarga atmosférica atingindo um captor ligado a um eletrodo de terra

5.11 LINHAS LONGAS

As linhas longas são representadas por parâmetros distribuídos. Para solucionar problemas com linhas longas temos que utilizar de computação digital. Em alguns casos podemos particionar a linha longa em várias linhas curtas conectadas, [Figura 5.24](#).

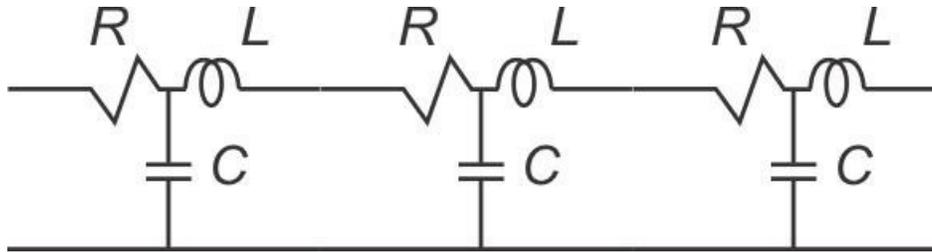


Figura 5.24: Representação de linha longa por três segmentos

Exemplo 5.7

Exemplos de linhas eletricamente longas para ondas senoidais:

Linha	Comprimento da linha – ℓ	Frequência do sinal – f	Comprimento de onda – λ
1	2.500 km	60 Hz	5.000 km
2	20 m	10 MHz	30 m
3	10 cm	1 GHz	30 cm

Os métodos para solucionar questões em linhas longas também se aplicam em problemas que ocorrem em linhas curtas.

#

5.11.1 Modelo de linha TLM

O TLM é uma técnica de modelagem computacional fácil e prática para aplicações em eletricidade. O *Transmission-Line Modeling* ou TLM (Modelando com Linha de Transmissão) foi usado para calcular os transitórios mostrados neste livro, incluindo o da [Figura 5.25](#).

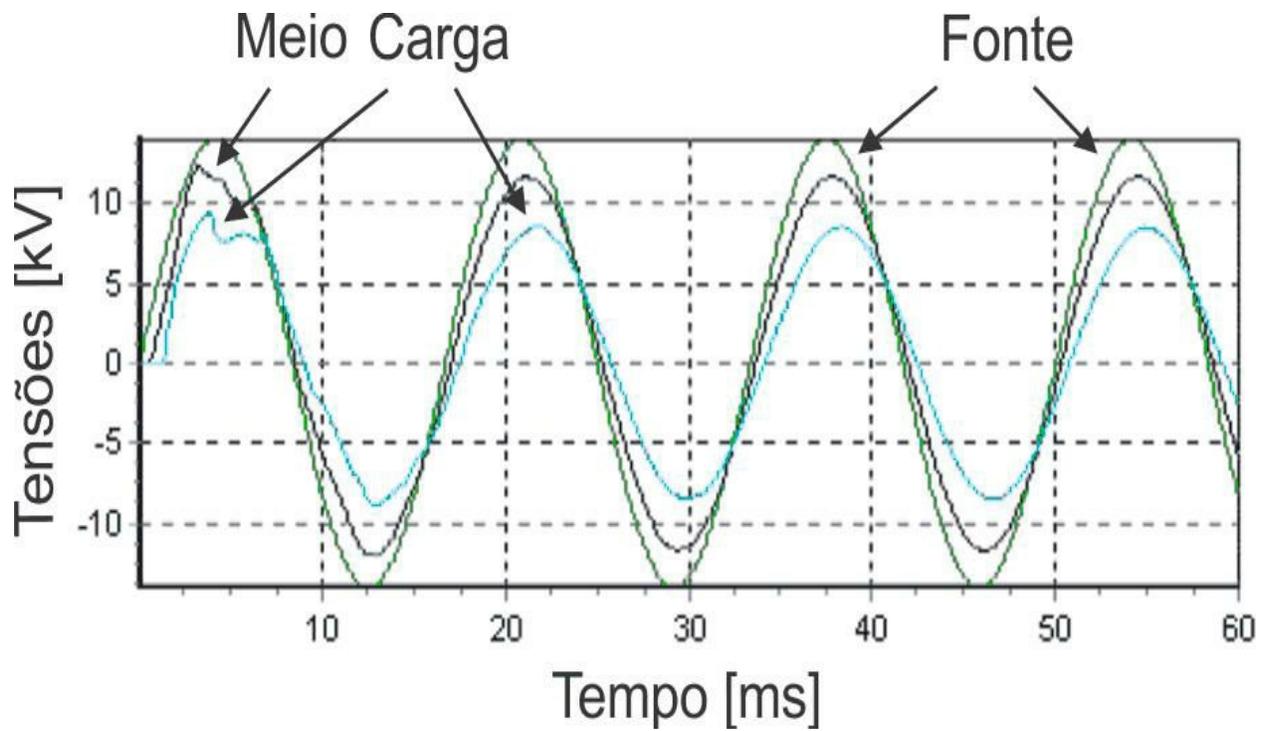


Figura 5.25: Linha de transmissão com 362,0 km, fonte de 14,0 kV senoidal 60,0 Hz, impedância de linha de 400,0 Ω e carga RL série ($R = 200,0 \Omega$ e $L = 400,0$ mH). Aparecem no gráfico três curvas uma na fonte de tensão (Fonte), uma no meio da linha (Meio) e uma na carga (Carga). Um transitório é evidente nos primeiros 10 ms.

6 MATERIAL DE ATERRAMENTO

6.1 INTRODUÇÃO

O material utilizado em aterramentos são os mais diversos. Existe material para eletrodos de terra em contato com o solo, condutores no ar, no concreto, ou isolados para ligações com os eletrodos no solo, material utilizado dentro de bastidores, material para eletrônica sensível e material para aterramento humano dentre outros.

A junção de metais diferentes no sistema de aterramento deve ser analisada com cuidado. Em certos casos pode haver corrosão galvânica (exemplo: aço e cobre), em outros pode haver o surgimento de tensão galvânica colocando sinais indesejados em dispositivos eletrônicos sensíveis.

O material para aterramento vistos neste capítulo são os mais utilizados. Para casos específicos recomenda-se pesquisa na literatura técnica de fabricantes.

6.2 ELETRODOS

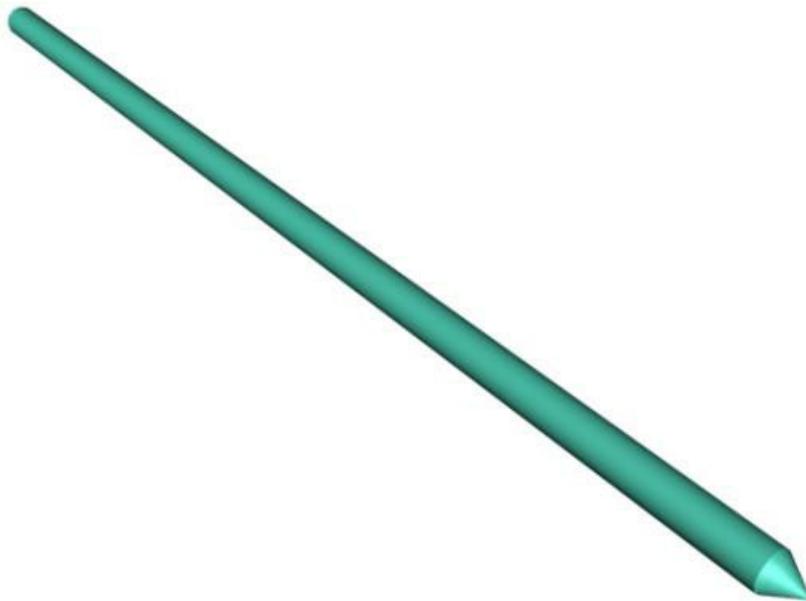
O material utilizado como eletrodos de terra no solo devem ser resistentes à ação dos sais e dos ácidos e à corrosão galvânica. Além disto, os eletrodos sujeitos à cravação mecânica devem ter resistência mecânica compatível. São contraindicados o alumínio, o ferro e o aço como eletrodos enterrados no solo, por tempo prolongado, devido à corrosão química. Mesmo o cobre, o aço galvanizado, o aço inoxidável e o chumbo estão sujeitos à corrosão química. Estes últimos quatro tipos de material são os mais indicados para aterramentos em contato com o solo.

Para eletrodos horizontais são usadas fitas de cobre, fita de aço galvanizado, cabo de cobre, cabo de aço zincado ou cabo de aço cobreado. São usados ainda estruturas de concreto armado, placas e discos de cobre, radiadores de automóveis de cobre etc.

6.2.1 Hastes

Os eletrodos verticais são em geral feitos de haste de aço zincado, de haste aço-cobre, de haste de cobre, haste de aço inoxidável, haste de aço de construção embutida em concreto, cantoneira de aço zincado, de tubo de aço zincado ou de tubo de cobre. A [Figura 6.1](#) ilustra dois tipos de hastes: a cilíndrica e a cantoneira. Em hastes de aço-cobre e zincada, o aço é empregado para que se tenha resistência mecânica durante a cravação e o cobre e o zinco são usados para proporcionar resistência à corrosão.

6.1a)



6.1b)



Figura 6.1: Hastes de aterramento. a) cilíndrica; b) cantoneira

As hastes cobreadas podem ser de três tipos:

- *Copperweld*: cobre fundido sobre o aço;
- Encamisado por extrusão: um tubo de cobre reveste o aço por extrusão; e
- *Cadweld*: depósito eletrolítico de cobre sobre aço.

Quando a camada externa de cobre é muito fina, pode haver exposição do aço por meio de arranhões ou saída da camisa de cobre durante sua cravação no solo.

6.2.2 Concreto

Muitas vezes é adicionado concreto após a instalação do terra metálico (hastes, placas etc.) no buraco aberto para colocação destes eletrodos. Com sua baixa resistividade, é ideal para melhorar as condições do eletrodo de terra local, quando a resistividade do solo é maior que a do concreto. A resistividade do concreto varia de 60 a 90 Ω .m.

O concreto é higroscópico, isto é, permite que a água se acumule no seu interior. Esta umidade se mistura aos sais do concreto, criando assim um meio condutor. Embora este meio seja de baixa condutividade com relação ao cobre ou mesmo ao aço, o concreto colabora com o

eletrodo metálico na dispersão da eletricidade no solo. O concreto colabora com a proteção química e mecânica do eletrodo.

6.2.3 Química

A impedância do eletrodo de terra pode mudar com o tratamento químico do solo. Com este tratamento a resistência de terra diminui. Existem disponíveis na indústria vários tipos de soluções, além da bentonita, que é uma mistura de argilas, para serem empregados na redução da condutividade do solo. A bentonita é um material vulcânico natural e que incha quando recebe água. Deve-se ressaltar que o emprego de produtos químicos para baixar a resistividade do solo pode também aumentar a corrosão do eletrodo.

Uma forma econômica de aplicar tratamento químico é o uso de carvão vegetal para baixar a resistividade do local. O uso de carvão mineral também é viável. O sulfato de cobre e o sal de cozinha (cloreto de sódio - NaCl) pode ser usado como tratamento químico do solo. O sal de cozinha é muito facilmente levado pela chuva, tendo pouca durabilidade, e é muito corrosivo. O uso deste componente químico pode ser empregado quando o eletrodo de terra for de uso temporário. Situações como esta são comuns, e podem-se citar: aterramento em apresentações artísticas, medições de campo, acampamento etc.

Quanto menor for a resistividade do solo menor é o efeito da química na redução da resistência do eletrodo.

6.3 CABOS DE ATERRAMENTO

Os cabos e fios usados no solo devem ser adequados às condições de corrosão, sendo o cobre um material mais próprio para este uso. O aço galvanizado pode ser empregado em algumas situações. Em contato com o ar pode ser usado alumínio, cobre, bronze, aço etc. Estes podem ser maciços cilíndricos ou com seção reta retangular e também podem ser encordoados.

6.3.1 Cabo de cobre

Os cabos de cobre usados em aterramento são de 25,0, 35,0, 50,0, 75,0 mm² etc., conforme o cálculo da ampacidade, a [Figura 6.2](#) mostra a seção reta de um cabo de cobre nu. A resistividade a 20°C é de 0,017837 Ω.mm²/m. Os cabos da tabela 6.1 também são usados em aterramento.

Tabela 6.1: Características de alguns cabos para aterramento

Bitola	Nº condutores	Diâmetro [mm]	Seção [mm ²]	Ampacidade [A]
4	7	5,88	21,15	167
2	7	7,42	33,62	226

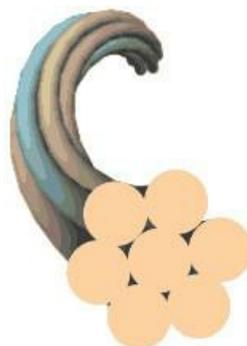


Figura 6.2: Seção reta de cabo de aterramento de cobre nú com sete fios trançados, encordado

6.3.2 Fio de aço-cobre

O fio de aço-cobre é como a haste cobreada, é de aço revestido por cobre. Este fio tem bitola AWG 2 com diâmetro de 21,15 mm, com resistência de 2,8 Ω/km e ampacidade maior que um cabo de mesmo diâmetro de cobre, a [Figura 6.3](#) mostra a seção reta de um fio aço-cobre.

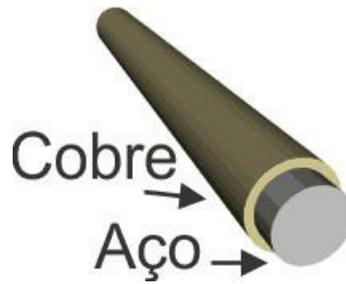


Figura 6.3: Seção reta de um fio de aço cobre

6.3.3 Arame de aço

Os arames de aço são laminados ou trefilados. A tabela 6.2 lista os fios com as suas características geométricas. Os arames de aço só devem ser aplicados quando em contato com o ar em atmosferas não corrosivas.

Tabela 6.2: Alguns fios para aterramento

AWG	Seção	Diâmetro
12	6,03 mm ²	2,77 mm
4	28,75 mm ²	6,05 mm

6.3.4 Barras de aço inoxidável

As barras de aço inoxidável são muitas vezes usadas nos modernos sistemas de aterramento. A utilização está na descida dos condutores terra, em instalações prediais, pelo interior das colunas de concreto armado. A fim de garantir uma longa durabilidade aos eletrodos no solo são empregadas estas barras de aço inoxidável.

6.3.5 Barras de cobre

As barras de cobre são utilizados no interior de instalações com equipamentos sensíveis, de alta precisão, com muitos equipamentos gerando ruídos etc. Os pontos de equalização de terra em quadros elétricos são feitos barras de cobre.

6.3.6 Barras de alumínio

As barras de alumínio são empregadas como descidas de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas em instalações prediais.

6.4 CORDOALHAS E FITAS

As cordoalhas são fitas feitas com finos fios trançados, este arranjo permite flexibilidade e tem a forma de uma fita. Em geral a cordoalha é feita com cobre ou aço.

As fitas podem ser de cobre ou de alumínio, raramente são adotados outros tipos de condutores para fitas. Quando usadas no subsolo deve-se levar em conta o efeito da corrosão na escolha do material.

6.5 PLANOS E GRADES

Os planos são placas de cobre, alumínio, aço, concreto armado, solo encharcado de água etc. Estes planos são usados no interior de instalações ou no exterior como no caso de antenas de AM.

As grades são de vários tipos, podendo ser de aço, de cobre, de arame galvanizado etc. As grades podem ser formadas por condutores cilíndricos ou por fitas condutores. São empregadas em instalações externas ou internas. As grades têm uma eficiência menor que os planos condutores.

6.6 CONEXÕES

6.6.1 Conectores

Dispositivo para fazer a ligação entre dois condutores ou entre um condutor com equipamentos ou componentes elétricos.

Um conector de terra conecta um condutor com um eletrodo de terra. Estes conectores devem ser manufacturados para suportarem tensões mecânicas, elétricas e químicas a que estarão sujeitos.

Os conectores são de bronze-alumínio com parafuso de aço ou aço-liga zincado. É mostrado um conector na [Figura 6.4](#). Parafusos fendidos também são usados em conexões.

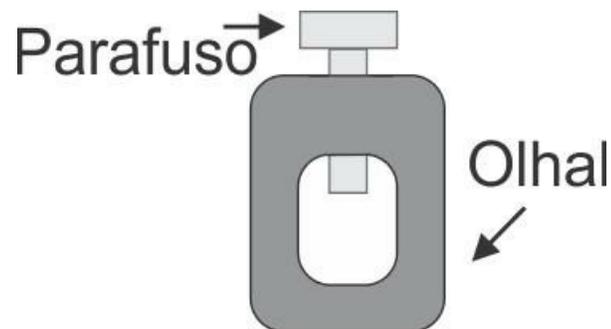


Figura 6.4: Estilização de um conector; olhal e parafuso

Sempre aparece uma resistência elétrica nos pontos de conexão. Esta resistência contribui para aumentar a resistência do aterramento, estando a conexão limpa e sem oxidação a resistência é mínima. Este tipo de conexão é o que menos suporta o calor gerado pela corrente elétrica, não sendo o mais indicado para descargas atmosféricas e curtos-circuitos. Há necessidade de frequente manutenção.

6.6.2 Soldas

Em aterramentos para sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e correntes elevadas industriais, usam-se soldas exotérmicas. Este tipo de solda garante a continuidade da corrente elétrica mesmo quando muito elevada. Este tipo de soldagem suporta as elevadas temperaturas que estarão presentes durante surtos de corrente e curtos-circuitos.

Um outro tipo de solda utilizado é a solda amarela, a base de oxi-acetileno. Esta também suporta altas correntes. Em vergalhões da construção civil é utilizado a solda elétrica para garantir a continuidade de corrente.

Soldas de prata e estanho são utilizadas para conexões em eletrônica e microeletrônica.

6.6.3 Conexões por pressão

Alicates de pressão têm sido usados para unir dois cabos de aterramento ou um cabo com uma haste.

Os parafusos e porcas também são usados para fazer a conexão de fios e cabos de aterramento, sendo necessário manutenção frequente.

6.6.4 Eletrostática

O material utilizado no aterramento de cargas eletrostáticas são os mais variados, podemos citar alguns:

- Carpetes antiestáticos;
- Pulseiras e calcanheiras;
- Sapatos aterrados para chão de fábrica;
- Pisos grafitados;
- Umidade;
- Escovas metálicas com metal que não produz centelha.

7 CAMINHO DE RETORNO

7.1 INTRODUÇÃO

O ponto de terra deve ser o caminho de mais fácil retorno da corrente para a sua fonte. Este caminho de retorno deve ter a impedância mais baixa possíveis para levar a corrente de volta a sua fonte. O aterramento tem sido visto como uma equipotencialização de todos os pontos de terra, servindo como potencial de referência para o sistema ou equipamento. Como já vimos, todos os caminhos para o terra têm impedâncias que dificilmente serão iguais, o que leva a quedas de tensão diferentes ao longo dos caminhos de retorno da corrente. Outro fator que dificulta termos esta condição ideal e utópica de equipotencialização é o tempo de propagação das diferentes correntes de terra. Em corrente contínua e em baixas frequências, a equipotencialização é praticamente alcançada e é neste sentido que devemos caminhar. Já em transitórios (descargas atmosféricas, altas frequências etc.), não é mais possível termos a equipotencialização nas dimensões dos aterramentos práticos.

O caminho de retorno deve ser pensado não apenas em termos de impedância mas também em relação às suas características de emissão de campo eletromagnético e de interferências. Estas condições são de grande importância para o bom funcionamento de equipamentos e sistemas eletrônicos digitais e analógicos. Os sistemas de proteção e de medição de alta e baixa tensão também podem sofrer interferências indesejadas dos sistemas de terra que causam mal funcionamento.

Para um bom funcionamento, o caminho de retorno deve:

- Ser de baixa impedância;
- Ser de baixa susceptibilidade a campos externos;
- Ser sem laços;
- Ter baixa emissão radiada;
- Evitar acoplamento com cabos e fios do sistema (acoplamento magnético ou indutivo);
- Ter bitola para suportar a corrente de retorno.

Para ter baixa impedância são usadas fitas. Quanto mais largas as fitas e mais próximas do chão maior sua capacitância e, por consequência, menor sua impedância. Os feixes de cabos e de fios em paralelo têm baixa capacitância. Em algumas ligações é preferível instalar estes feixes com a mesma ampacidade que um cabo ou um fio. Cabe destacar aqui que o uso de fitas não é obrigatório ou indispensável; em todos os caminhos para o terra, em vários tipos de aterramento é satisfatório o uso de cabos.

Os cabos, fitas e fios devem estar o mais próximo possível do chão e das paredes. Este procedimento diminui os laços. Em equipamentos e placas de circuito impresso, os laços também podem ser minimizados com o roteamento adequado ou com o uso de grades de terra. O contato com o chão pode prejudicar a limpeza e causar danos mecânicos.

O caminho de retorno deve ser o mais curto possível para minimizar as emissões radiadas em altas frequências. Como regra geral o cabo ou o fio terra não devem exceder $\lambda/16$ de comprimento.

A separação dos cabos e dos fios terra favorece a redução do acoplamento entre estes condutores. Devem-se manter os cabos, fio e fitas distantes dos cabos de força e de sinal para se ter um baixo acoplamento.

7.2 “EQUIPOTENCIALIZAÇÃO”

Equipotencializar significa colocar todo o sistema de aterramento no mesmo potencial elétrico. Todos os pontos terra estão na mesma tensão elétrica. Ou seja, a tensão de referência é a mesma para todos os equipamentos e em todos os lugares. Como foi mencionada, esta condição nunca é alcançada na prática; porém, é desejada para o bom funcionamento e proteção dos sistemas elétricos, bem como para a proteção de pessoal. Vários problemas de mal ou não aterramento de sinal são devidos a esta diferença de potencial entre os terras dos equipamentos e os dispositivos.

Para alcançar uma condição a mais próxima possível da equipotencialização, todos os sistemas de aterramentos são interligados. No caso de termos dois sistemas de aterramentos independentes, como o da [Figura 7.1](#), tensões indesejadas surgirão em um dos sistemas quando o outro estiver com corrente.

Tendo o sistema de proteção contra descargas atmosféricas um aterramento independente do de sinais, uma tensão surgirá entre estes, [Figura 7.2](#). Durante um surto atmosférico, esta tensão poderá causar danos em dados do sistema de informática e mesmo em equipamentos ligados ao sistema de terra de sinal.

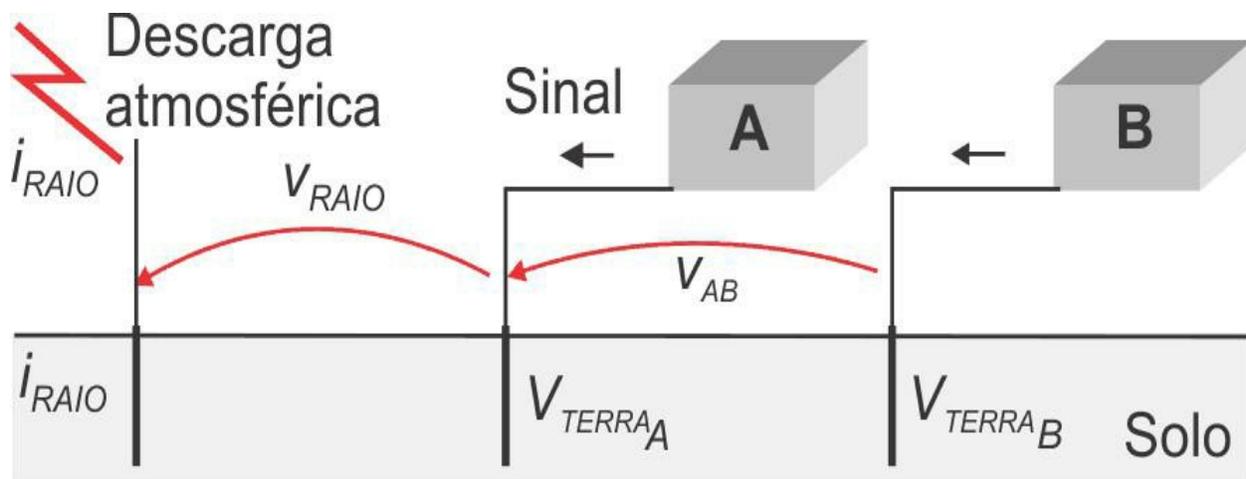


Figura 7.1: Não havendo interligação entre os terras surgirá uma tensão entre estes.

Centelhamentos poderão ocorrer em sistemas de terra, independentemente do terra da descarga atmosférica durante a ocorrência deste fenômeno. A proximidade de pessoal nestes outros sistemas elétricos pode levar a choques elétricos graves.

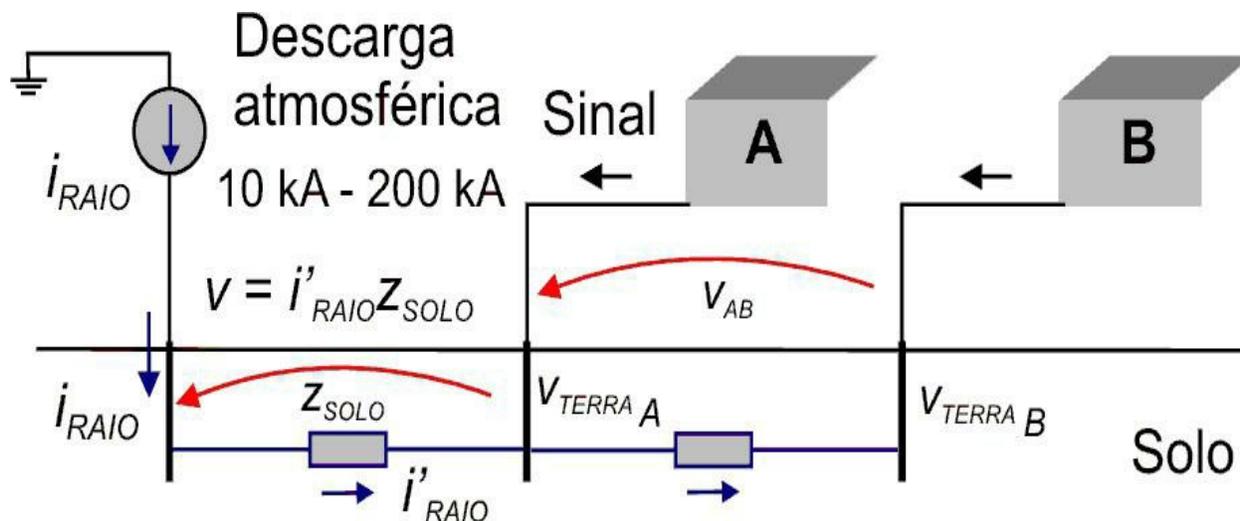


Figura 7.2: Parte da corrente do raio, i'_{raio} , flui para o eletrodo de sinal através da impedância do solo. Daí surge uma queda de tensão, introduzindo um ruído no terra de sinal.

Com a interligação do terra de sinal com o de descargas atmosféricas a tensão entre estes sistemas é minimizada. Assim, com a elevação do potencial do solo devido à injeção da corrente da descarga atmosférica, os terras de sinal também terão o potencial elevado, ficando na mesma tensão que o terra do raio, [Figura 7.3](#).

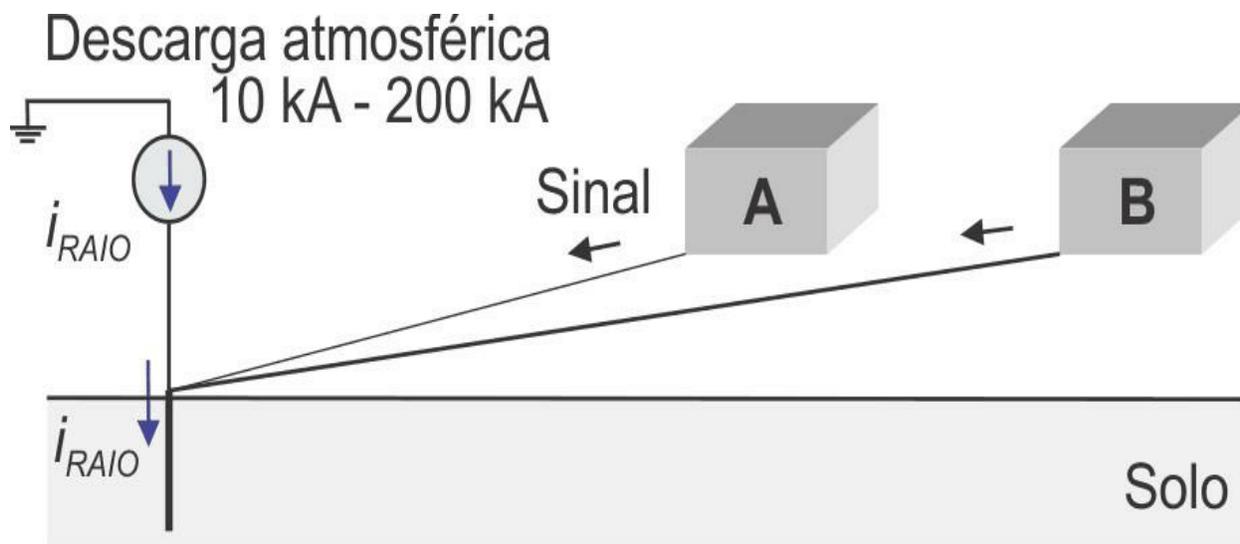


Figura 7.3: Equipotencialização dos terras de sinal com do sistema contra descargas atmosféricas

Um dos obstáculos para a equipotencialização são as dimensões eletricamente longas para os sinais trafegantes. Desta forma, a rede de terra não mudará de potencial igualmente no seu conjunto. Outra causa para a falta de equipotencialização são os transitórios que provocam

tensões e correntes refletidas nas diversas conexões do sistema de aterramento.

7.2.1 Potencial de passo

Como já foi mostrado, o fluxo de corrente no solo provoca queda de tensão. Na superfície do solo, esta queda de tensão é chamada de tensão de passo. A queda de tensão, em uma distância igual a uma passada humana, que possa provocar choque é sempre evitada com um aterramento adequado. Para isso, as malhas de terra com a grade fina, as placas condutoras como eletrodos e os anéis concêntricos são usados em aterramentos sujeitos a elevadas correntes. A queda de tensão superficial será maior quanto maior for a corrente injetada no solo, quanto maior for a impedância do solo e quanto maior for a frequência ou a variação da corrente no tempo.

Mesmo tendo importância primordial, a tensão de passo para impulsos (surtos, transitórios etc.) tem sido negligenciada. E, sendo, indispensável a análise de tensões de passo para baixa frequência, não é suficiente para garantir a segurança e o bom funcionamento da instalação, incluindo a segurança de pessoal.

7.2.2 Barra de equalização do terra

A barra de equalização do terra, em geral de cobre, é utilizada para colocar todos os terras referenciados a um mesmo potencial, ver [Figura 7.4](#). Esta barra é o ponto de referência para a tensão. Se a tensão da barra aumentar ou diminuir com relação a um outro ponto externo ou interno ao sistema elétrico aterrado nesta barra, o sistema elétrico não sofrerá com esta alteração. Normalmente esta barra é instalada nos pontos de saída dos cabos de força e todas as vias de terra vindas dos diferentes equipamentos ou ambientes são conectadas a ela. Esta barra, por sua vez, está ligada a uma outra barra de equalização ou diretamente conectada ao eletrodo de terra final da instalação.

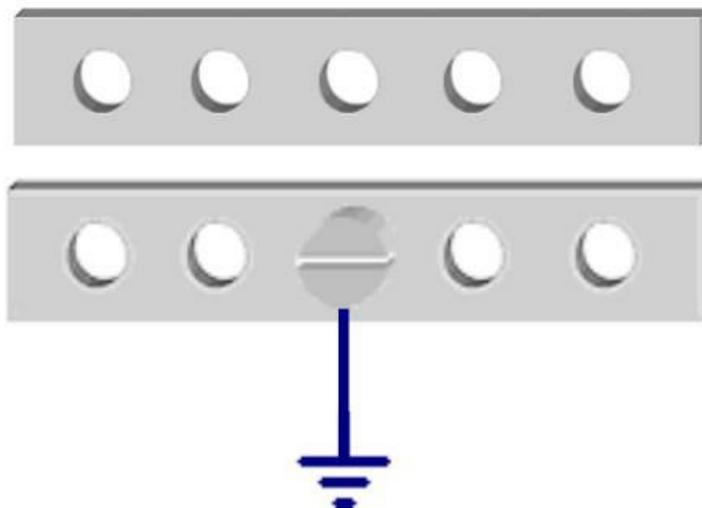


Figura 7.4: Barra de equipotencialização e barra de equipotencialização aterrada

A barra de equipotencialização pode estar ligada a uma outra referência. Esta nova referência pode ser um eletrodo de terra no solo, uma estrutura metálica, outra barra de

equipotencialização etc. Nesta ligação ao próximo terra existe uma impedância e, portanto, uma queda de tensão quando houver uma corrente de terra, veja a [Figura 7.5](#).

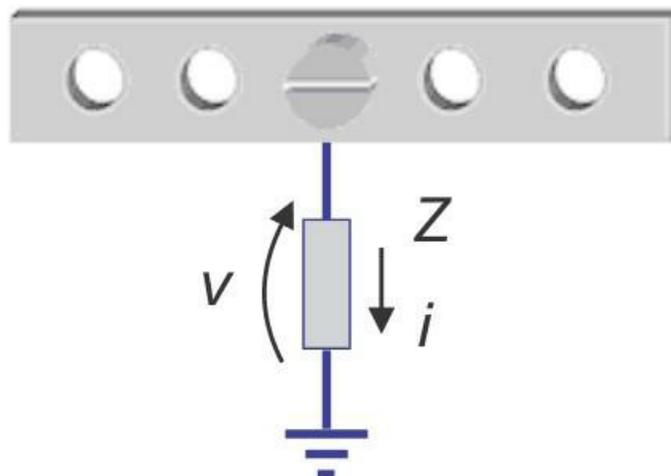


Figura 7.5: Impedância entre a barra de equipotencialização e o terra (referência) da barra

Um sistema elétrico pode ter várias barras de equipotencialização. Estas barras estarão aterradas em um mesmo potencial de referência, por grupos ou no todo.

Um sistema elétrico qualquer, ou um sistema eletrônico, ou seres vivos, ou partes e estruturas metálicas são ligados à barra de equipotencialização. Esta ligação pode ocorrer por vários meios, podendo citar: fitas, barras, cabos, fios, feixes de cabos, cordoalhas, por combinação dos meios anteriores etc. A [Figura 7.6](#) ilustra esta ligação do sistema com o barramento de equipotencialização.

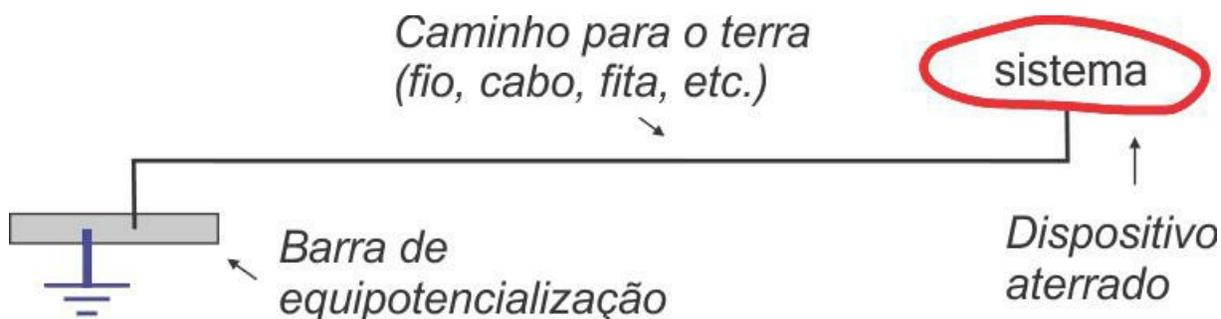


Figura 7.6: Aterramento de um sistema elétrico ou eletrônico ou biológico ou metálico

O condutor que leva a corrente de terra à barra de equalização terá uma queda de tensão devida a esta corrente, como ilustrado na [Figura 7.7](#).

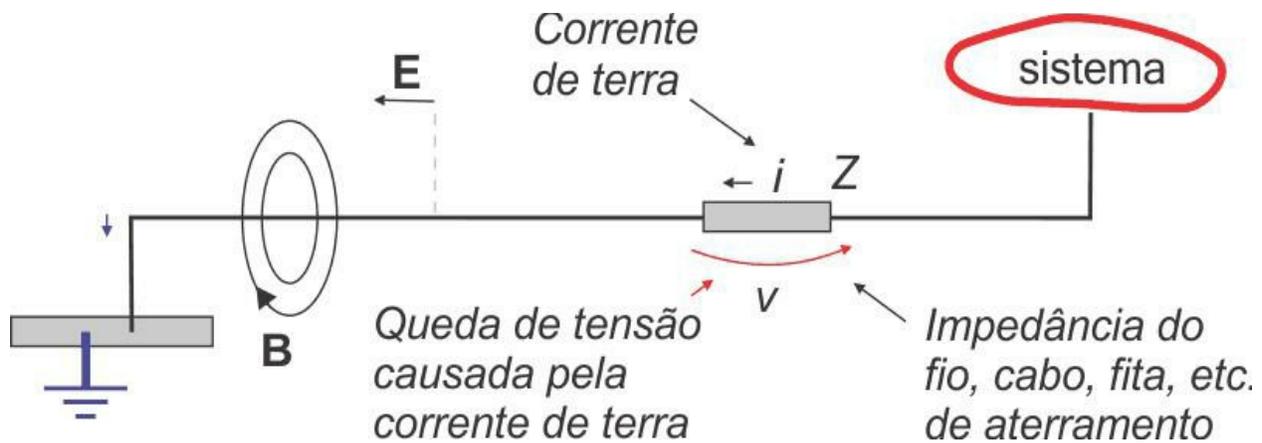


Figura 7.7: Impedância, corrente e queda de tensão entre a barra de equalização e o sistema aterrado; campo elétrico E e campo magnético B gerados pela corrente i

7.2.3 Plano ou grade de equalização de terra

Um plano condutor ou uma grade metálica, [Figura 7.8](#), são usados para equalizar o potencial de terra em um ambiente eletromagnético. O objetivo é colocar todos os terras no mesmo referencial. Essa grade ou o plano citado são conectados por um único ponto a de referência externo.



Figura 7.8: Plano e grade de equipotencialização

Uma grande vantagem do uso de malha ou plano condutor é a alta capacitância que leva a uma baixa impedância de terra:

$$Z_{pequeno} = \sqrt{\frac{L}{C_{grande}}} \quad [\Omega]$$

em que a capacitância do plano condutor é obtida por:

$$C = \epsilon A/d \text{ [F]},$$

A é a área do plano [m^2] e d é a distância entre o plano e o piso [m].

Para baixar a impedância das grades estas são feitas com fitas em vez de cabos.

7.2.4 Equalização de potencial em fitas e planos terra

Uma placa usada no aterramento pode ter variações de tensão em sua extensão. Esta variação de tensão decorre de sinais que têm uma frequência grande o suficiente para que o comprimento de onda faça da fita uma linha de transmissão eletricamente longa, [Figura 7.9](#) e [Figura 7.10](#). Os transitórios também podem causar variações de tensão ao longo da fita. Estas variações são muitas vezes causadas por reflexões nos extremos da fita.

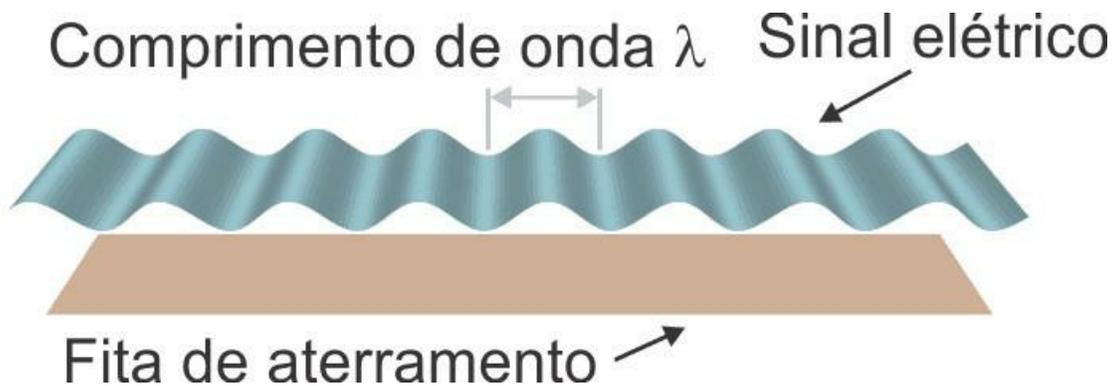


Figura 7.9: A fita da figura é uma linha de transmissão eletricamente longa para o sinal elétrico mostrado.

Para que a fita seja uma equipotencial é necessário que o seu comprimento seja eletricamente curto para o sinal passante.

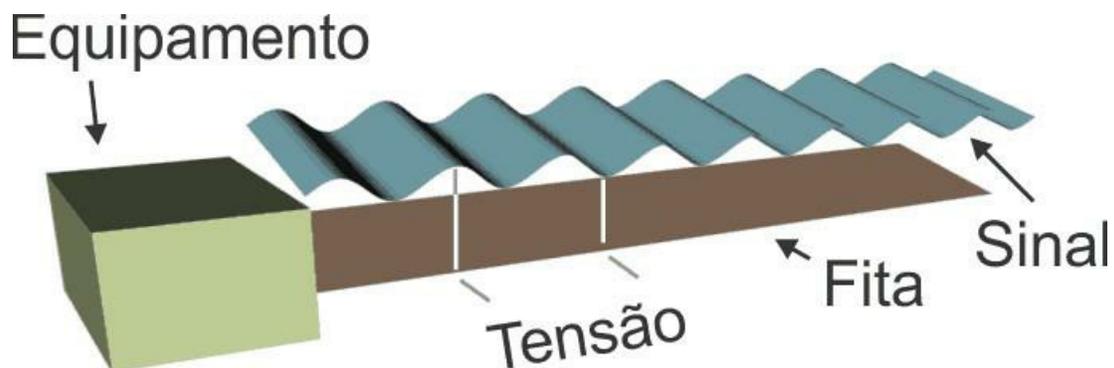


Figura 7.10: Fita aterrando equipamento – não há equipotencialização ao longo da fita.

Uma placa de terra também pode não ser uma equipotencial. Para que ela não funcione como equipotencial basta que o sinal aterrado na placa tenha uma frequência alta o suficiente para que o comprimento de onda seja menor que as dimensões da placa. Em outras palavras, se a placa tem dimensões eletricamente longas para a frequência (di/dt) do sinal, então não é uma equipotencial. A [Figura 7.11](#) ilustra esta situação. Nesta figura é mostrado um sinal elétrico de alta frequência aplicado no vértice superior direito de uma placa de terra. Ao se propagar pela placa,

este sinal, deixa locais de alta e de baixa de tensão.

As grades usadas em aterramento também estão sujeitas a variações de tensão em sua extensão.



Figura 7.11: Sinal transitando na placa de terra com comprimento maior que o comprimento de onda do sinal. a) vista de cima; b) vista em perspectiva.

Caminho zero

Considerando apenas o campo elétrico gerado pela carga na fita ou no plano condutor, deve-se observar que, a tensão entre dois pontos sobre a fita ou o plano condutor será aproximadamente zero se o caminho de integração seguir pela superfície da fita ou do plano entre estes dois pontos. A tabela 7.1 exemplifica quatro casos em que são combinados dois caminhos diferentes nas condições de eletricamente curto e eletricamente longo.

Tabela 7.1: Tensão entre A e B para quatro situações diferentes

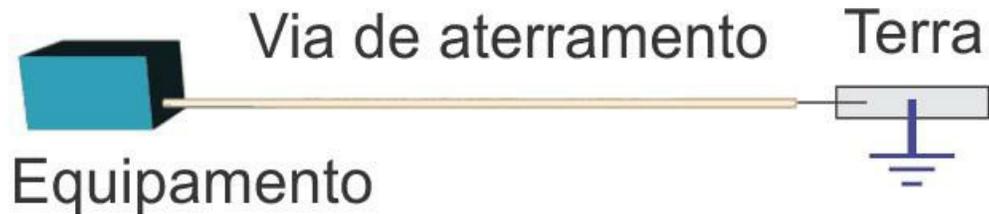
	Caminho sobre a superfície da fita	Outro caminho qualquer
Tensão entre os pontos A e B sobre a superfície da fita da Figura 7.9	V_{AB1}	V_{AB2}
$\frac{\lambda}{16} < \overline{AB}, \lambda \neq n\overline{AB}$ eletricamente longo	$\approx 0 \text{ V}$	$\neq 0 \text{ V}$
$\frac{\lambda}{16} > \overline{AB}$ eletricamente curto	$\approx 0 \text{ V}$	$\approx 0 \text{ V}$

sendo que n é inteiro positivo.

7.3 LIGAÇÃO COM O TERRA

A ligação do terra de um equipamento com o terra seguinte é feita por meio de cabos, fios, barras retangulares, fitas, grades, planos condutores etc. Entre os vários tipos de ligação três são os mostrados na [Figura 7.12](#). A melhor ligação do ponto de vista técnico nem sempre é a indicada do ponto de vista econômico ou prático.

7.12a)



7.12b)



7.12c)

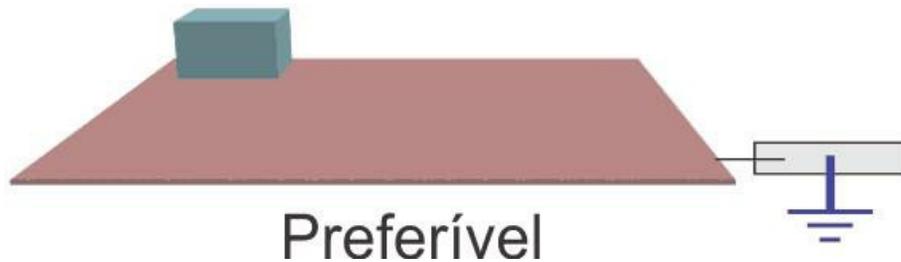


Figura 7.12: Equipamento aterrado por meio de: a) um cabo; b) uma fita e c) um plano condutor

O comprimento máximo de uma ligação com o terra deve ser de $\lambda/16$ para manter a ligação o mais próximo possível de uma equipotencial. A tabela 7.2 relaciona frequências com dimensões eletricamente curtas.

Tabela 7.2: Frequência e o comprimento de onda no ar

Frequência [Hz]	λ [m]	$\lambda/16$ [m]	$\lambda/20$ [m]	$\lambda/40$ [m]

50	6.000.000	375.000	300.000	150.000
60	5.000.000	312.500	250.000	125.000
3.000	100.000	6.250	5.000	2.500
20.000	15.000	937,5	750	375
100 k	3.000	187,5	150	75
1 M	300	18,75	15	7,5
10 M	30	1,875	1,5	0,75
100 M	3	0,1875	0,15	0,075
1 G	0,3	0,01875	0,015	0,0075

7.4 UM ÚNICO PONTO TERRA

Para o aterramento de sinal nem sempre é melhor que os sistemas eletroeletrônicos sejam ligados ao terra, como mostrado na [Figura 7.13](#). Neste modo de aterrar, somente o escoamento das baixas frequências é adequado. Como ilustrado na [Figura 7.14](#), tensões entre o ponto de aterramento e os sistemas surgem em razão de as correntes de terra destes sistemas passarem pelas impedâncias Z_1 , Z_2 e Z_3 . Estas quedas de tensão e correntes são fontes de ruído para estes três sistemas.

Os sistemas aqui considerados são quaisquer sistemas elétricos, eletrônicos, biológicos ou partes metálicas (condutores de modo geral). Como exemplos destes sistemas podem-se citar:

1)

Equipamento de escritório
Fresas
Esteiras rolantes

2)

Processador
Memória
Disco rígido

3)

Monitoração
Controle
Iluminação

4)

Terra de sinal
Neutro
Terra de potência

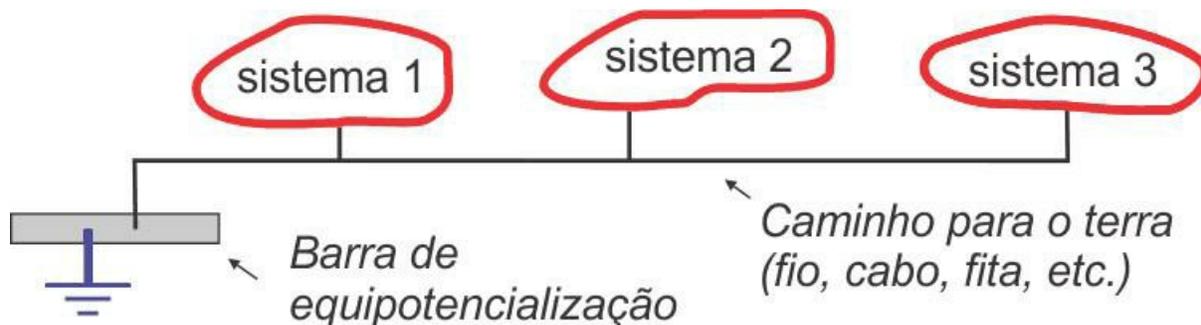


Figura 7.13: Os sistemas elétricos 1, 2 e 3 estão aterrados em série e em um único ponto.

Da [Figura 7.14](#) tem-se que as quedas de tensão entre a barra de equalização e os terras dos sistemas 1, 2 e 3 são:

$$v_1 = (i_1 + i_2 + i_3)Z_1$$

$$v_2 = (i_1 + i_2 + i_3)Z_1 + (i_2 + i_3)Z_2 = v_1 + (i_2 + i_3)Z_2$$

$$v_3 = (i_1 + i_2 + i_3)Z_1 + (i_2 + i_3)Z_2 + i_3Z_3 = v_2 + i_3Z_3$$

ou

$$v_1 = (i_1 + i_2 + i_3)Z_1$$

$$v_2 = i_1Z_1 + i_2(Z_1 + Z_2) + i_3(Z_1 + Z_2)$$

$$v_3 = i_1Z_1 + i_2(Z_1 + Z_2) + i_3(Z_1 + Z_2 + Z_3)$$

Neste caso, cada um dos terras dos três sistemas estão sendo afetados pelo ruído de terra dos demais.

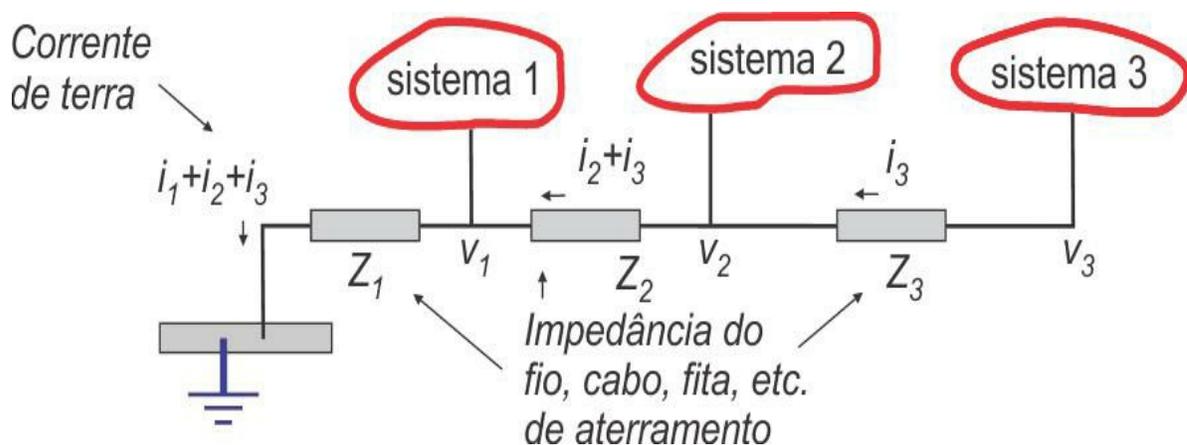


Figura 7.14: Impedâncias do sistema de aterramento

Esse sistema de aterramento é muito usado por sua simplicidade, embora seja o menos

recomendado para altas frequências. O sistema mais sensível deve ser o mais próximo do ponto de aterramento. Para baixas frequências e sistemas robustos, este tipo de aterramento é admissível. Idealmente as impedâncias das vias de terra e as possíveis correntes e frequências de terra devem ser conhecidas para que uma avaliação do sistema seja feita antes da instalação. Sendo detectado que haverá queda de tensão nos terminais de terra de cada sistema que possa afetar o funcionamento correto deste, a forma de aterrar deve ser repensada para que haja confiabilidade de todos os sistemas envolvidos. Enfim, deve ser feita uma análise da compatibilidade eletromagnética do sistema envolvido.

Para eliminar as indutâncias comuns a todos os sinais nas vias de aterramento é mais recomendável ligar diretamente os terras de cada sistema ao terra geral, [Figura 7.15](#). A queda de tensão ao longo de cada cabos terra, [Figura 7.16](#), fica restrita ao sistema ligado a este. Isto reduz a tensão do terra e não mistura os ruídos. Em frequências elevadas os condutores terra se portam como antenas e passam a radiar e a captar campos eletromagnéticos. O acoplamento mútuo entre os condutores terra acaba por guiar ruídos para os sistemas. Uma outra desvantagem deste modo de aterrar é o grande número de fios e cabos terra. Esta técnica é adotada em várias instalações.

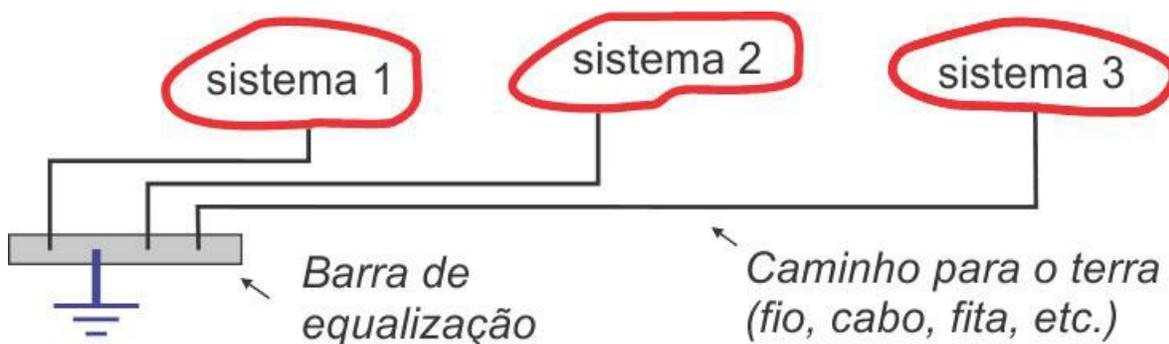


Figura 7.15: Três sistemas elétricos estão diretamente aterrados em um único ponto.

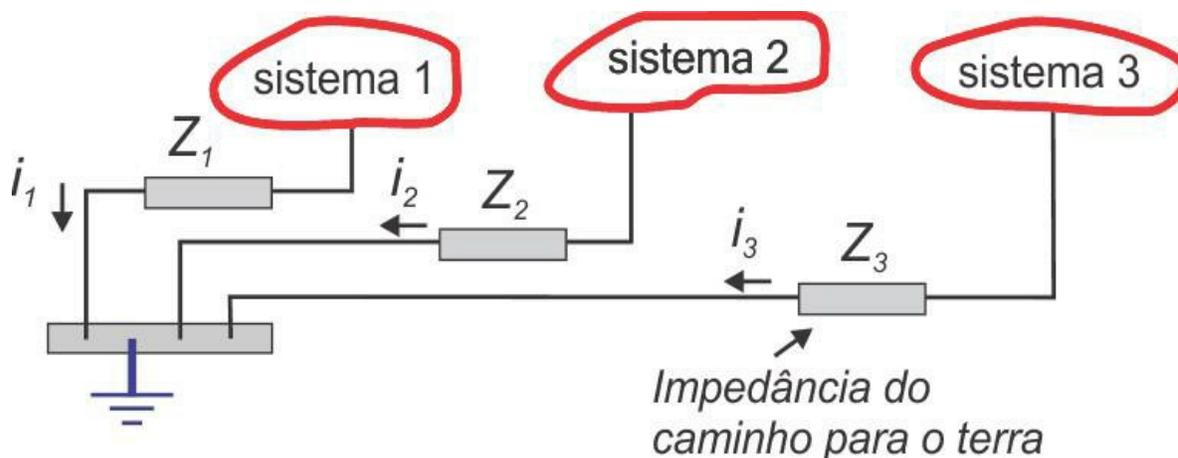


Figura 7.16: Impedâncias de aterramento de três sistemas distintos

7.5 VÁRIOS PONTOS DE TERRA

Uma ligação com vários pontos de terra é normalmente usado em sistemas digitais, [Figura 7.17](#). Neste caso, os dispositivos são ligados ao terra mais próximo, geralmente o chassi de um veículo ou um plano terra. Este tipo de ligação deve ser feito para frequências maiores que 10 MHz, ou quando a ligação é eletricamente longa.

A impedância de terra fica diretamente entre o sistema e o terra, [Figura 7.18](#). Neste caso, os pontos de saída dos terras dos sistemas 1, 2 e 3 estão sujeitos apenas à tensão gerada pela corrente de terra própria.

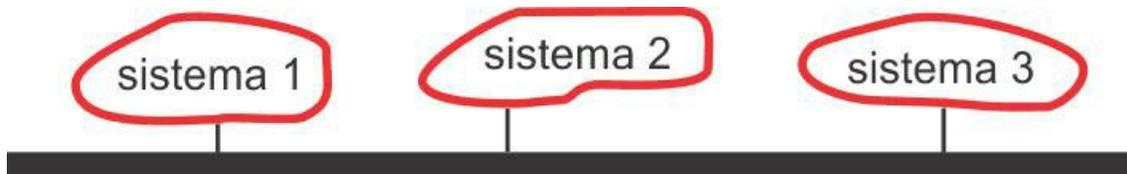


Figura 7.17: Os sistemas elétricos estão aterrados em pontos distintos

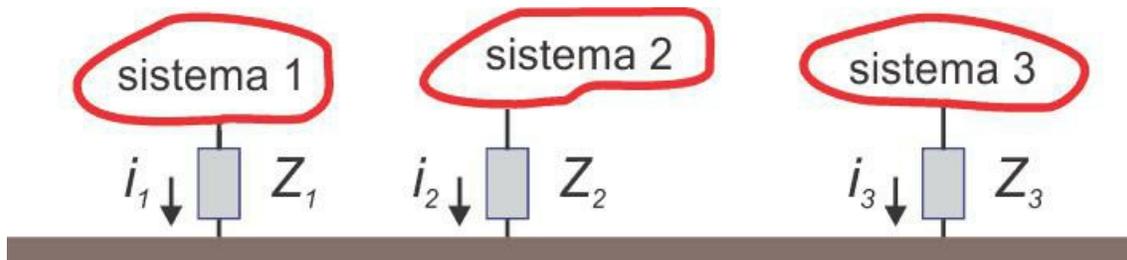


Figura 7.18: Impedância dos terras de três sistemas

Em placas de circuito impresso e em instalações variadas é encontrado este tipo de aterramento.

7.6 ATERRAMENTO HÍBRIDO

O aterramento híbrido é uma técnica em que são adotados os sistemas multipontos e o de um único ponto simultaneamente. Isto é possível se se estiver aterrando frequências diferentes. Neste processo são usados indutores e capacitores de aterramento como é mostrado nas [Figura 7.19](#) e [Figura 7.20](#).

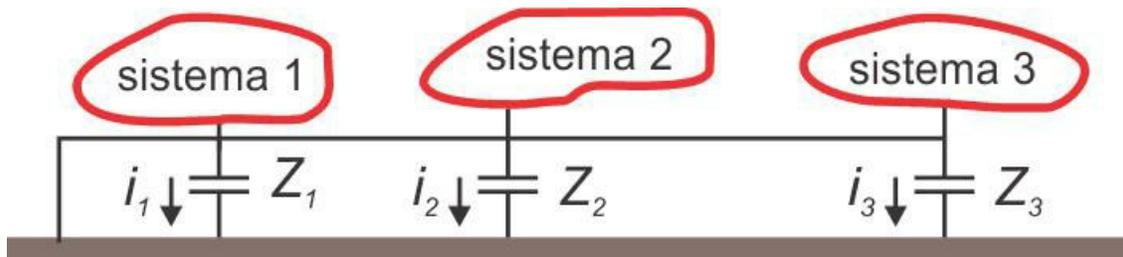


Figura 7.19: Sistema de aterramento de vários pontos para alta frequência e de único ponto para baixas frequências

Os capacitores de aterramento permitem a passagem de altas frequências. A baixa frequência circula pela via de aterramento comum. Este processo evita a circulação por longa extensão de sinais de alta frequência, minimizando, deste modo, as emissões radiadas destes sinais. Esta técnica é encontrada, por exemplo, em instalações de subestações de potência moderna. Nestas instalações são encontradas altas e baixas frequências.

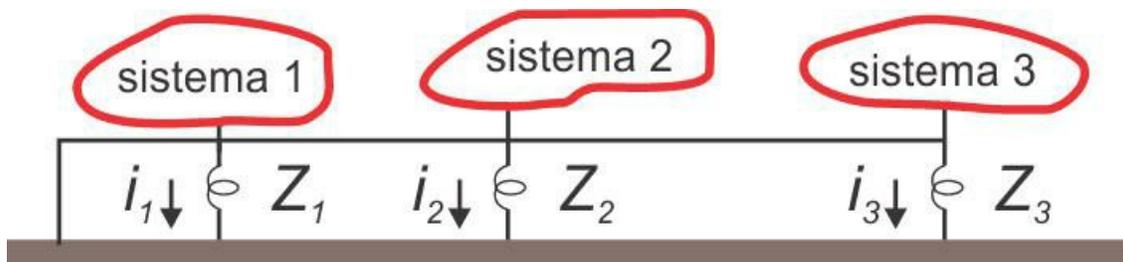


Figura 7.20: Múltiplos pontos de aterramento para baixas frequências, um único ponto de aterramento para altas frequências

O aterramento com indutores permite que apenas o sinal de baixa frequência passe para o terra próximo. A alta frequência circula pelo caminho comum aos três sistemas elétricos. Este processo evita que tensões de alta frequência apareçam nos terras. Esta técnica dificulta o surgimento de tensões e correntes de modo comum.

Em um sistema de aterramento podem ocorrer todos os modos de aterrar mostrados anteriormente, veja a [Figura 7.21](#).

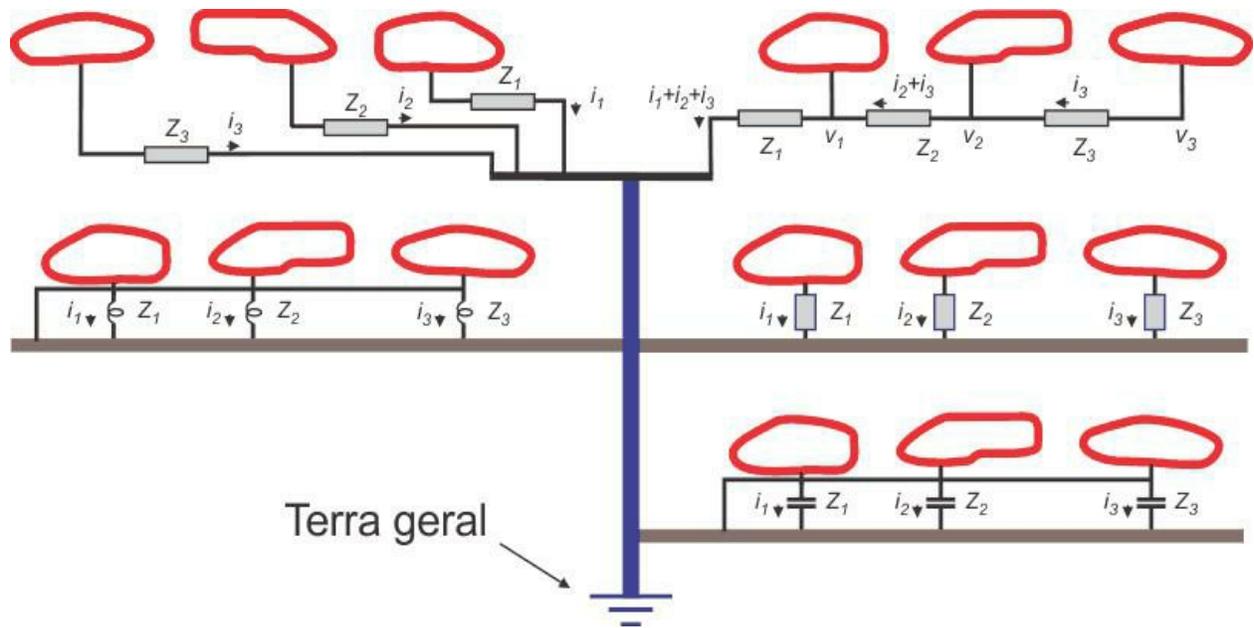


Figura 7.21: Um sistema de aterramento

7.7 TRANSITÓRIOS

Os transitórios são um obstáculo à equipotencialização. No caminho entre um sistema e a barra de equipotencialização existe uma linha de transmissão, ver [Figura 7.22](#). Em outras palavras, o transitório que surge no sistema leva um tempo τ para atingir a barra de equipotencialização. Ao atingir esta barra aparecerá um sinal refletido que retorna ao sistema e um sinal transmitido que segue através da impedância de terra Z_T . Se $Z = Z_T$ então não haverá reflexão, isto ocorre para a máxima transferência de potência

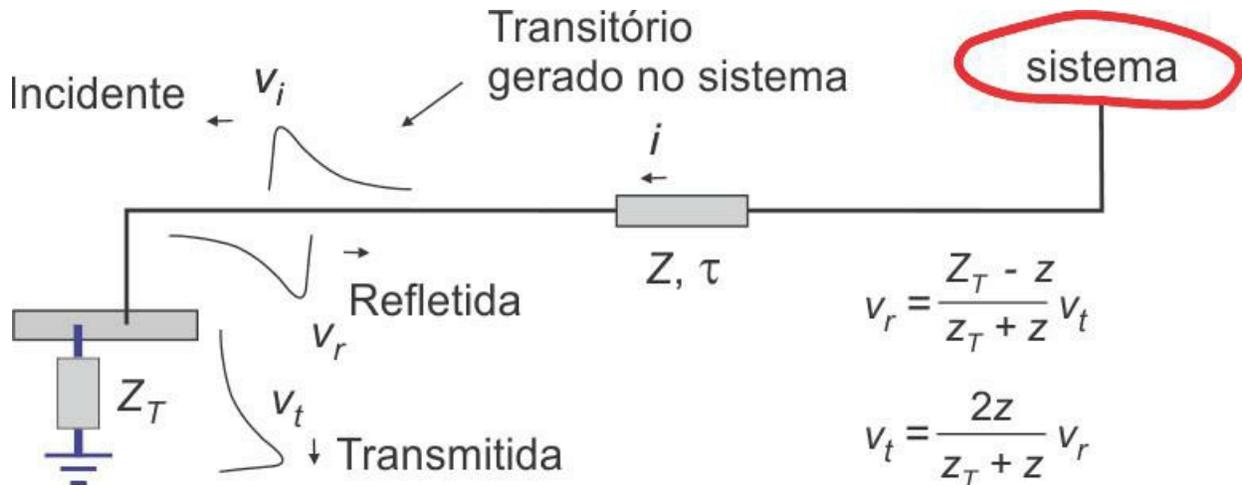


Figura 7.22: Transitório gerado no sistema

Um transitório originado no sistema 3, ver [Figura 7.23](#), atingirá o sistema 1 em $\tau_3 + \tau_1$ segundos e atingirá o sistema 2 em $\tau_3 + \tau_2$ segundos.

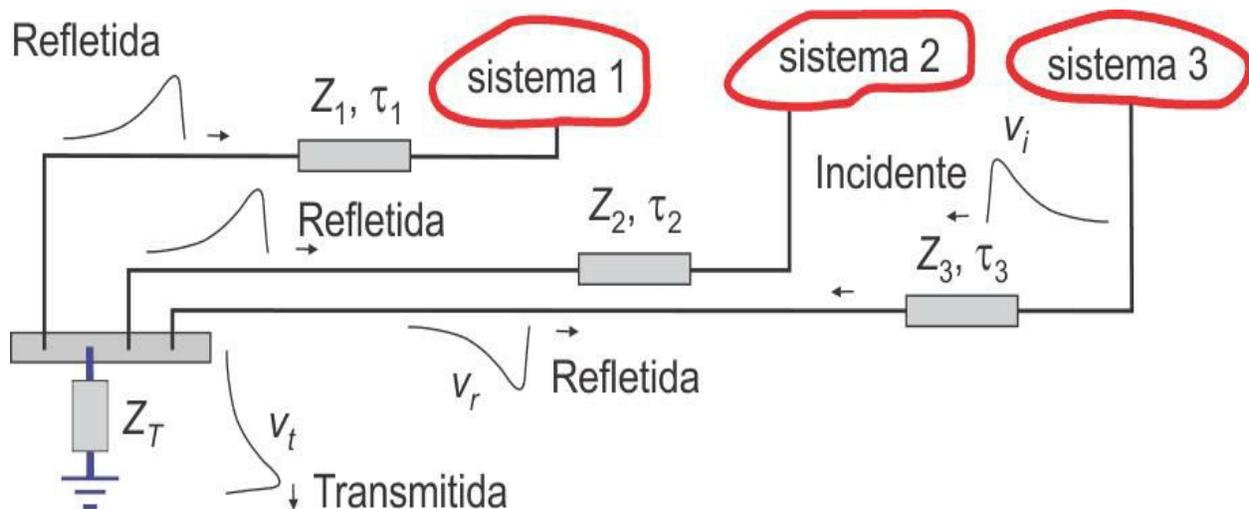


Figura 7.23: Um transitório gerado no sistema 3 afeta por reflexão na impedância de terra os

sistemas 1, 2 e 3.

7.8 CAMINHO ZERO

Se todos os caminhos percorridos entre dois pontos de terra levar a uma integral do campo igual a zero, então haverá compatibilidade entre estas terras.

Se o caminho escolhido para a passagem da cablagem que interliga os equipamentos desses dois pontos de terra levar à

$$-\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = 0,$$

ver [Figura 7.24](#), então não haverá correntes ou tensões indesejadas. Para um caminho L eletricamente curto esta integral é aproximadamente zero, sendo aceitável para fins práticos.

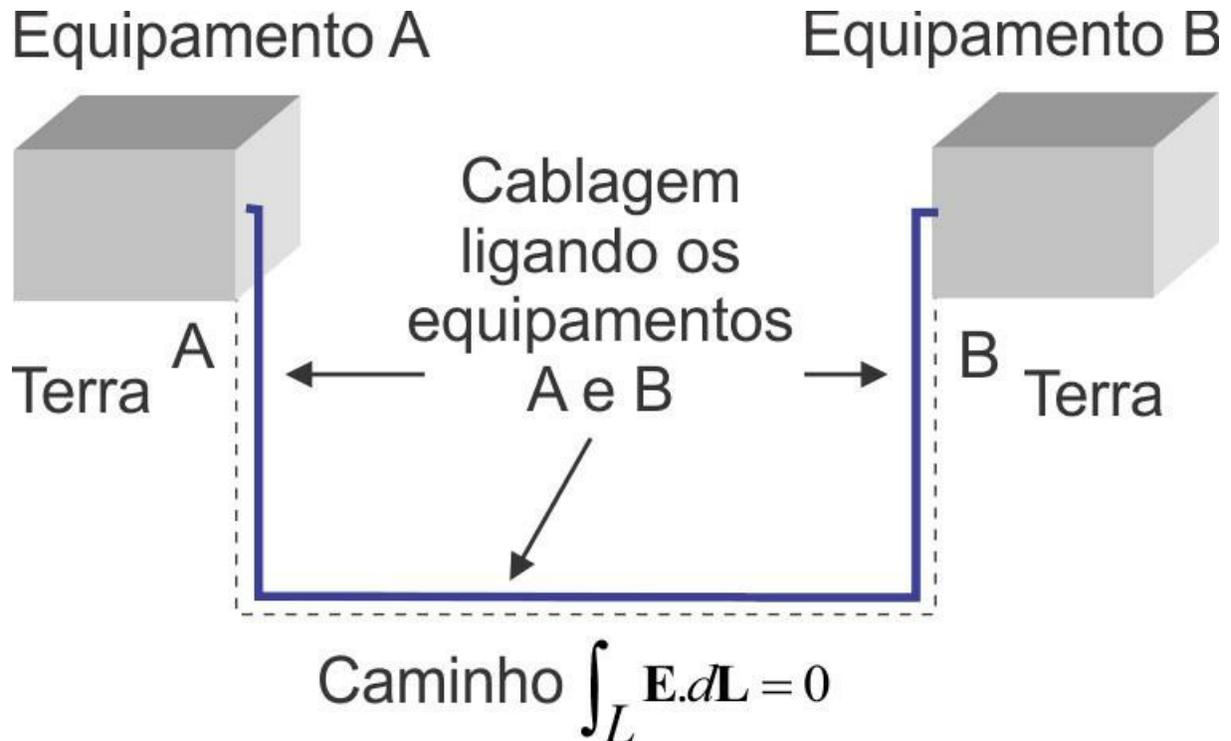


Figura 7.24: Caminho cuja tensão é zero entre A e B, e a cablagem, ligando os equipamentos A e B, passando por este caminho.

7.9 TRANSITÓRIOS

Na realidade o que está presente no ponto de terra de um circuito elétrico é o que afeta este circuito. As cargas e campos elétricos e magnéticos que estão alhures não têm efeito sobre o circuito, a menos que venham a atingi-lo, [Figura 7.25](#). Assim, fica claro que o terra adequado não é nem uma questão de resistência de terra, nem de impedância de terra, nem de equipotencialização ou mesmo de caminho zero mas sim uma questão da carga e seu campo associado chegando ao circuito aterrado. O aterramento é uma questão instantânea e transitória.

As técnicas de aterramento vêm evoluindo e os recursos, conhecimento e equipamentos disponíveis também. Quanto mais precisa e extensa a análise do circuito de terra mais confiável será o sistema aterrado.



Figura 7.25: A carga elétrica se deslocando a uma velocidade v no sentido do equipamento só irá afetá-lo quando chegar neste.

8 RESISTÊNCIA X IMPEDÂNCIA DE TERRA

8.1 INTRODUÇÃO

Tem sido usada uma resistência para se referir a um ponto de aterramento. Esta resistência de terra é o suficiente para calcularmos o aterramento quanto às baixas frequências (exemplo: 60 Hz e 50 Hz). Do ponto de vista de proteção de pessoas com relação à frequência industrial é uma aplicação adequada. Na prática um ponto de terra também tem componentes capacitivos e indutivos, [Figura 8.1](#). Estes componentes afetam a qualidade do ponto de aterramento dependendo do tipo de corrente e tensão que estão fluindo para este ponto.

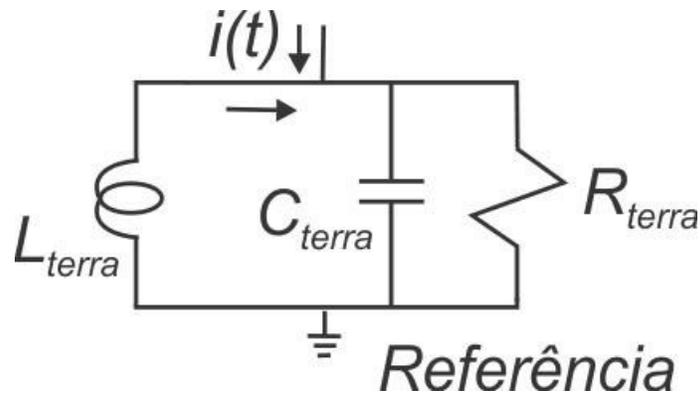


Figura 8.1: Representação do ponto de aterramento com os parâmetros resistivo, capacitivo e indutivo

Ainda podemos considerar que estes parâmetros (resistência, capacitância e indutância) de terra variam durante o impulso que está sendo aplicado. Este tipo de variação é bastante comum e relevante no escoamento de descargas atmosféricas. As faltas para a terra de longa duração e altas frequências também levam a variações dos parâmetros de terra.

No aterramento de sistemas digitais, sistemas de comunicação, escritórios, prédios comerciais e laboratórios devem ser considerados os componentes indutivos e capacitivos. Neste tipo de aterramento, os efeitos capacitivos e indutivos são consideravelmente relevantes, devendo ser levados em conta sempre em estudos de aterramento.

Mesmo em sistemas de terra dentro de bastidores de equipamentos digitais e analógicos e em placas de circuito impresso, os efeitos indutivo e capacitivo são de grande importância.

8.2 IMPEDÂNCIA DE TERRA NO SOLO

A análise da impedância de aterramento implica conhecer as características do solo e de se aplicar o eletromagnetismo:

Solo Características elétricas
Umidade Magnetismo
Terreno Equações de Maxwell
Geometria Tempo/Frequência

Podemos analisar a impedância do solo por meio do aterramento mais simples que é a haste vertical, como ilustrado na [Figura 8.2](#). A superfície do solo é em geral irregular, o subsolo não é homogêneo e a superfície da Terra é curva.

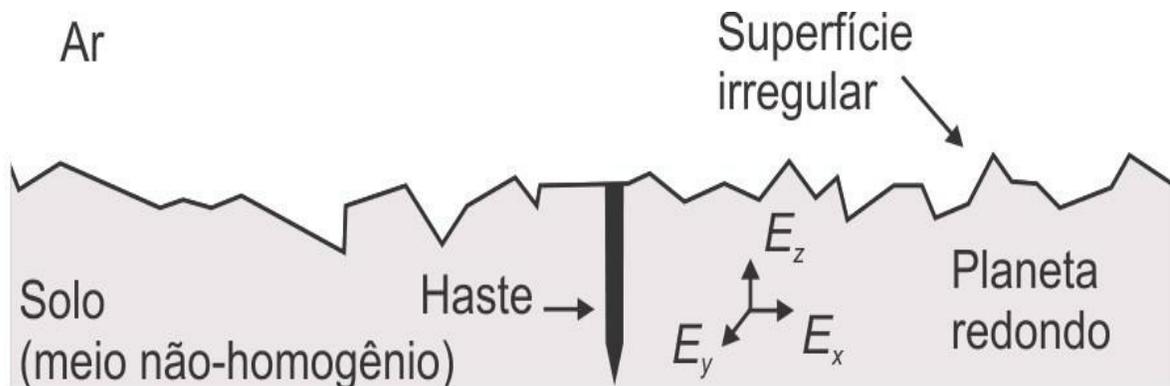


Figura 8.2: Haste de aterramento em solo irregular

A primeira atitude a tomar para conhecer a resistência de uma haste é modelar o ambiente em que está sendo aplicada. Supomos a Terra plana sem irregularidades pequenas ou grandes na superfície. O subsolo é considerado homogêneo ou homogêneo por camadas no caso de solo estratificado. E, por fim, o eletrodo de terra é considerado perfeitamente semiesférico, como na [Figura 8.3](#).

Com base nestas simplificações serão feitas análises de modelos elétricos do aterramento. Em outras palavras, serão criados circuitos e equações representativas do aterramento. Essas análises serão feitas para corrente contínua, para corrente complexa e para impulsos. Nos dois primeiros casos é considerado apenas o estado estacionário. A análise feita aqui pode ser estendida para qualquer tipo de eletrodo e as equações representativas de vários tipos de eletrodos são mostradas nos próximos capítulos.

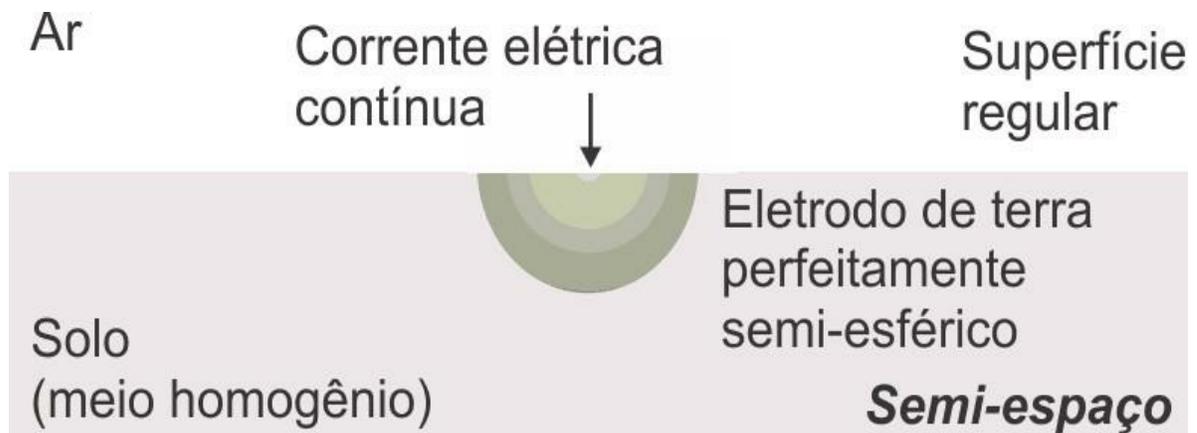


Figura 8.3: Modelo do ambiente de aterramento, semiesfera de raio a

8.2.1 Impedância de corrente contínua

A impedância de corrente contínua nada mais é do que a resistência de terra. Vamos então achar a resistência de terra do eletrodo semiesférico:

$$\begin{aligned} \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E} && \text{Lei de Ohm} \\ V &= -\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} && \text{Tensão elétrica} \\ V &= RI && \text{Lei de Ohm} \end{aligned}$$

em que:

σ – condutividade do solo [S/m];

\mathbf{j} – densidade volumétrica de corrente [A/m^2];

I – corrente contínua injetada no eletrodo de terra [A];

\mathbf{E} – campo elétrico [V/m] no subsolo formado pela corrente I ;

V – tensão [V] no eletrodo em relação à *referência*;

R – resistência do aterramento [Ω];

L – caminho de integração entre a *referência* e o eletrodo de terra;

referência é um ponto infinitamente distante do eletrodo de terra.

Como a corrente injetada é conhecida e a partir do sistema anterior podemos obter a queda de tensão do eletrodo (raio da semiesfera a) até a *referência* (no infinito):

$$V_{terra} = -\int_a^\infty \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = -\int_a^\infty \frac{\mathbf{j}}{\sigma} \cdot d\mathbf{L}$$

Tendo a queda de tensão V_{terra} , podemos obter a resistência de terra:

$$R = V_{terra}/I \text{ } [\Omega]$$

Cabe aqui observar que a resistência de terra acima não é a resistência do eletrodo propriamente dito mas a resistência entre o eletrodo e o infinito (*referência*).

A resistência do aterramento de qualquer eletrodo pode ser obtida como acima, achando um raio a equivalente ao raio de uma semiesfera usada como eletrodo. Com esta técnica a resistência de aterramento pode ser obtida mas a indutância e a capacitância de aterramento ficam excluídas. Métodos mais sofisticados podem ser empregados porém para o uso destes métodos é necessária a utilização de computação eletrônica.

Neste caso, tem-se a resistência de terra igual a impedância de terra, isto é, $R = Z$.

8.2.2 Impedância com correntes senoidais

Para frequências encontradas em surtos e em sinais digitais e de comunicação, a resistência de aterramento não é o suficiente para representar o efeito do solo em um circuito elétrico. Para levarmos em conta a capacitância e a indutância do aterramento, a densidade de corrente é derivada das equações de Maxwell para o domínio da frequência, estado estacionário:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + k\omega \epsilon \mathbf{E}$$

como

$$\mathbf{E} = -\nabla V - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

então

$$V = -\int_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} - \int_L (\partial \mathbf{A} / \partial t) \cdot d\mathbf{L}$$

$$V_{terra} = ZI \text{ } [\Omega]$$

em que:

$k = \sqrt{-1}$, para diferenciar da densidade de corrente \mathbf{j} ;

\mathbf{A} – vetor potencial magnético [Vs/m];

\mathbf{E} – campo elétrico complexo [V/m] no subsolo formado pela corrente I ;

I – corrente complexa [A];

\mathbf{j} – densidade volumétrica de corrente complexa [A/m²];

V – tensão complexa [V] no eletrodo em relação à *referência*;

Z – impedância complexa [Ω].

Ainda considerando um eletrodo semiesférico, a queda de tensão do raio a até o infinito, há limites de uso, por um caminho radial a semiesfera, é:

$$V_{terra}(\omega) = - \int_a^\infty \left[\frac{\mathbf{j}}{\sigma + k\omega\epsilon} + k\omega\mathbf{A} \right] \cdot d\mathbf{L} = \left(\frac{1}{\sigma + k\omega\epsilon} + k\omega\mu \right) \int_\infty^a \mathbf{j} \cdot d\mathbf{L}$$

A impedância do eletrodo pode então ser obtida da relação:

$$Z = V_{terra}/I \text{ } [\Omega].$$

Para um eletrodo com uma haste de terra e variação da frequência:

$$Z(f) = \left(\frac{1}{\sigma + k\omega\epsilon} + k\omega\mu \right) \left(\frac{1}{2\pi h} \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \right) \text{ } [\Omega].$$

A resistência de terra de uma haste enterrada é de 43,95 Ω para corrente contínua, de acordo com o processo tradicional de cálculo. Seguindo a variação da frequência, o módulo da impedância de terra para a mesma haste fica como mostrado na [Figura 8.4](#). A componente dependente da permeabilidade magnética tem influência desprezível na impedância de terra até 1,0 MHz.

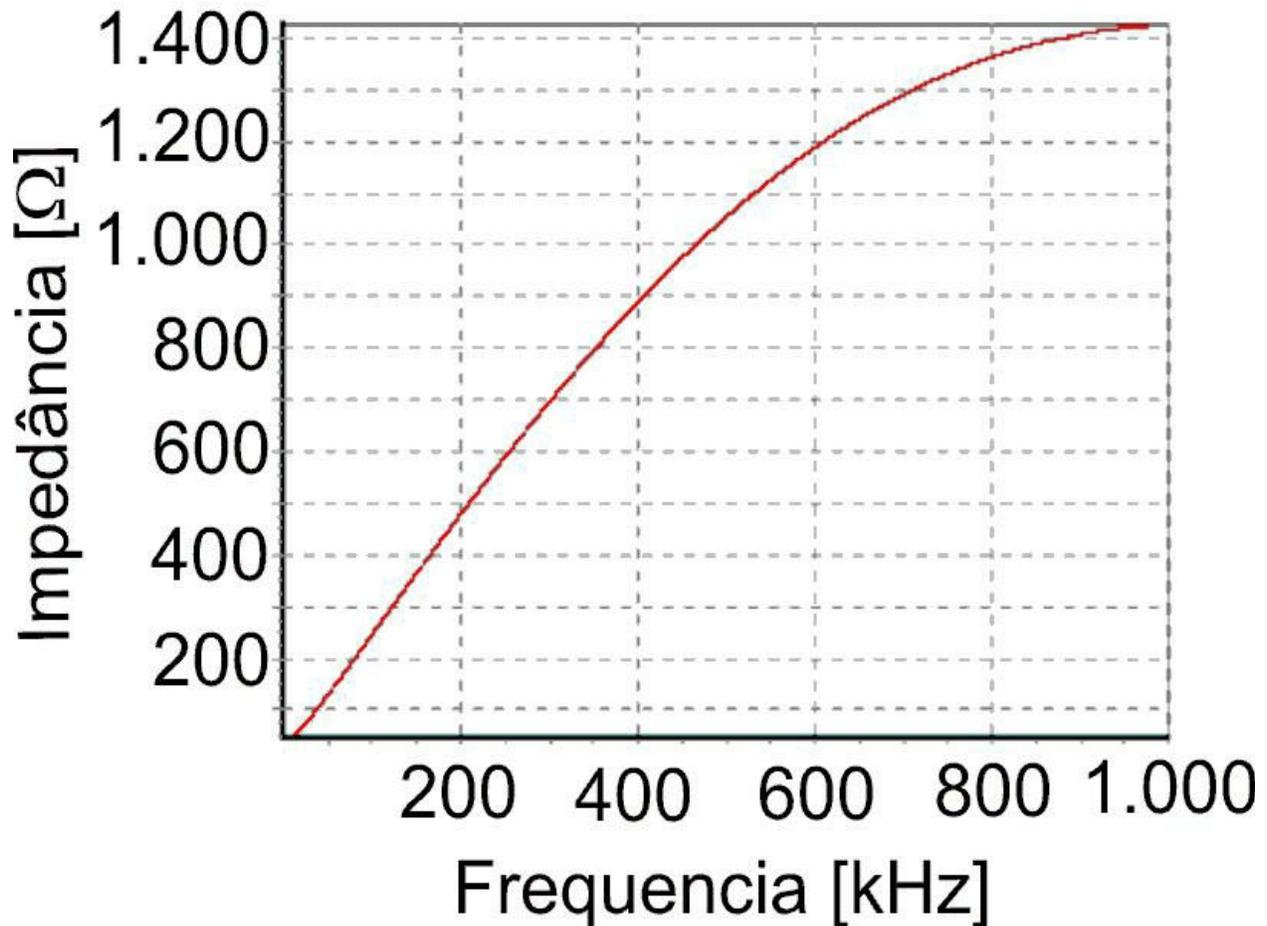


Figura 8.4: Variação do módulo da impedância de terra de um eletrodo de uma haste; profundidade 2,40 m, diâmetro 12,7 mm, resistividade 100,0 $\Omega \cdot m$, permissividade relativa 100,0.

No gráfico anterior não foi considerada a variação da permissividade e da resistividade com a frequência, isto é, $\epsilon = \epsilon(f)$ e $\rho = \rho(f)$. Para incluir esta variação tem-se a seguinte equação da tensão de terra:

$$V_{terra} = - \int_a^{\infty} \frac{j \cdot dL}{\sigma(f) + k\omega\epsilon(f)} \quad [V]$$

Levando em consideração a indutância do eletrodo de terra, a impedância de terra tem a seguinte forma geral:

$$Z(f) = R(f) + k \left(\omega L - \frac{1}{\omega C(f)} \right) \quad [\Omega]$$

Esta variação da permissividade com a frequência é de difícil cálculo e medição não sendo adotado até o momento para a maioria dos fins práticos.

8.2.3 Corrente variável no tempo para o terra

A impedância é uma grandeza obtida das características físicas e geométricas do sistema. Desta forma, a impedância é definida para uma determinada forma de tensão de entrada. Para transitórios, o parâmetro que relaciona a tensão com a corrente do terra é variável no tempo, levando a dizer que a “impedância” é variável no tempo. Conceitualmente é inadequado usar o termo “impedância variável no tempo”, no entanto, tem sido usado no dia a dia.

A penetração da corrente injetada em um ponto na superfície do solo provoca uma propagação de corrente em ondas semi-esféricas no interior da terra, [Figura 8.5](#). Neste caso, em que estão presentes uma situação transitória e de propagação de campos eletromagnéticos no solo, utilizamos das equações de Maxwell a equação para a densidade de corrente no domínio do tempo:

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

Como a tensão é uma grandeza definida para estado estacionário, não faz sentido falar de tensão. A integral do campo elétrico entre dois pontos não define mais uma grandeza chamada tensão em razão da propagação do campo no subsolo, então:

$$v = ?$$

Como não temos a tensão a impedância variável no tempo também fica sem sentido:

$$Z = \frac{\text{não faz sentido}}{i}$$

em que i é a corrente injetada no solo.

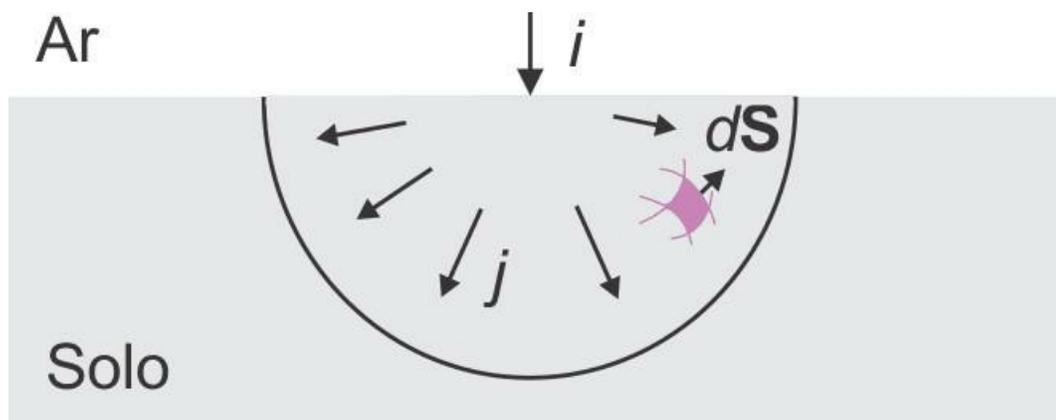


Figura 8.5: Corrente elétrica injetada em um ponto do solo

Por causa desta dificuldade de fazer um cálculo analítico da chamada “impedância” de terra transitória, surge a impedância impulsiva.

8.2.4 Impedância impulsiva

A “impedância instantânea” é um parâmetro que relaciona a tensão a cada instante de tempo com a corrente no mesmo instante. Este parâmetro tem diversas aplicações na análise de aterramento uma vez que em situações transitórias surgem não-linearidades significativas. Na presença de surtos atmosféricos, surtos de chaveamento e altas frequências podem aparecer não-linearidades no sistema de aterramento. Esse parâmetro é algumas vezes conhecido como impedância impulsiva ou impedância de surto, quando referida a impulsos que são injetados no eletrodo de terra. A impedância impulsiva é conceitualmente uma impedância pois representa as características físicas e geométricas do meio para um impulso elétrico determinado, desde que em situações lineares. Este impulso pode ser, por exemplo, uma dupla exponencial, $1,2/50 \mu s$, representativa da corrente de retorno de uma descarga atmosférica em várias normas técnicas.

A definição do parâmetro impedância impulsiva, em um sistema linear, é:

$$Z = v(t)/i(t) \quad [\Omega]$$

em que:

$v(t)$ – tensão medida com relação a um terra remoto e perfeito; [Figura 8.6](#);

$i(t)$ – corrente impulsiva de entrada no ponto de terra.

Em sistemas em que haja não linearidades na presença da corrente injetada ou da tensão aplicada temos a relação:

$$z(t) = v(t)/i(t) \quad [\Omega]$$

neste caso o parâmetro $z(t)$ varia a cada instante de tempo.

Em algumas situações podem ser levantados circuitos que modelam a impedância

impulsiva.

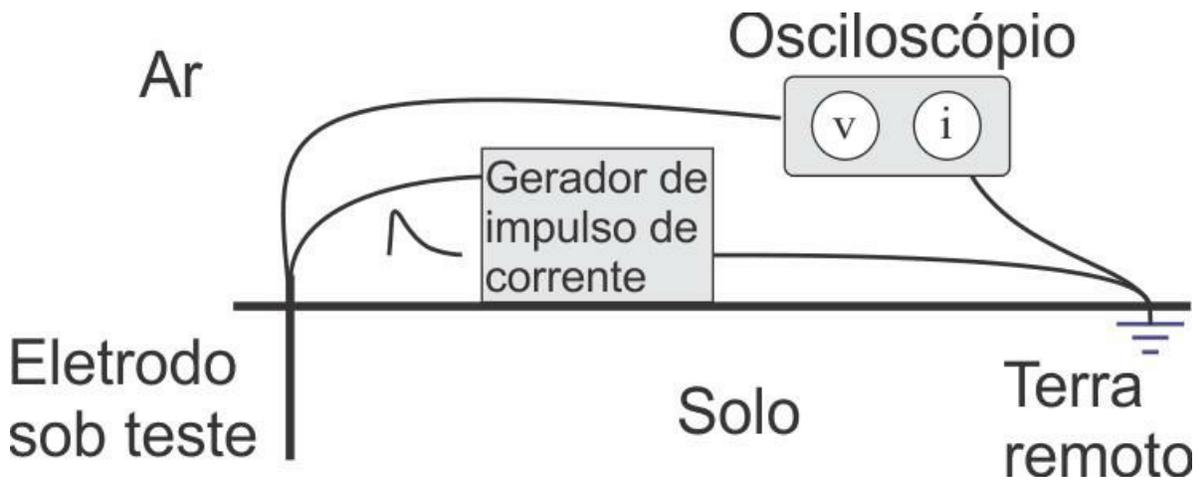


Figura 8.6: Esquema para levantar a impedância impulsiva de um eletrodo de terra.

Para casos experimentais, $v(t)$ é a tensão medida diretamente ou medida no divisor de tensão.

Várias curvas de impedância impulsiva podem ser encontradas nas literaturas técnicas de concessionárias, de universidades e de periódicos científicos.

9 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO

9.1 INTRODUÇÃO

O solo, como outro meio qualquer, tem propriedades elétricas e magnéticas. Estas propriedades variam de acordo com a composição química, física e geométrica dos componentes do solo. Três são as propriedades eletromagnéticas do solo: resistividade, permissividade e permeabilidade. A qualidade de um aterramento elétrico no solo está relacionada diretamente com estas propriedades. A mais óbvia é a resistividade, ou seja, a capacidade de conduzir corrente elétrica. A permissividade elétrica assume importância durante o escoamento de impulsos e frequências elevadas. E a permeabilidade ainda é tratada como sendo constante e igual à do vácuo para a grande maioria dos tipos de solo.

As características geométricas do solo têm influência na qualidade do aterramento. O solo pode ser plano ou muito acidentado, pode ser inclinado ou ser rodeado por paredes verticais de granito ou outro material.

Neste capítulo é feita uma análise destas propriedades do solo.

9.1.1 Resistividade do solo – ρ

Várias características físico-químicas do solo afetam a resistência de terra de um eletrodo. Entre estas características podemos citar:

- Umidade;
- Nível do lençol freático (umidade);
- pH (acidez);

- Lixiviação e erosão;

- Rigidez dielétrica;

- Compactação;

- Granulometria e porosidade;

- Parâmetros dependentes da frequência (temporal);

- Temperatura;

- Condutividade térmica;

- Calor específico;
- Estabilidade mecânica.

A condução de eletricidade no solo se dá por meio de solução eletrolítica criada pela dissolução de sais encontrados no solo e dissolvidos na água contida neste. Na ausência total de água o solo se torna um material quase isolante. A medida que o solo vai absorvendo água a condutividade aumenta porém se a quantidade de água for muito grande a concentração de sais na água será muito pequena e a condutividade volta a diminuir.

Como a ausência total de água no solo faz deste um quase isolante, a total ausência de sais também fará do solo um quase isolante. É aí que a lixiviação se torna um processo relevante no aterramento elétrico. Com a grande quantidade de chuvas a água desta retira do solo os sais, levando-os para rios, lagos e oceanos. Esta redução da concentração de sais aumenta a resistividade do solo. Em consequência disto, em regiões tropicais (Amazônia, Brasil, Paraguai, florestas tropicais africanas e asiáticas etc.) a resistividade média do solo é maior que nas regiões temperadas (América do Norte e Europa).

Como com o aumento da umidade do solo há uma diminuição da resistividade, por isto, é boa prática colocarmos o eletrodo de terra sempre que possível próximo aos rios, lençóis freáticos, lagos, pântanos, fossas assépticas etc.

Por outro lado, se a água estiver congelada a resistividade do solo aumentará muito, e continuará aumentando com a diminuição da temperatura. Em regiões como a Antártica, as montanhas Andinas, a Terra do Fogo e a Patagônia a água do solo está congelada durante alguns meses do ano ou mesmo durante o ano todo.

A solução eletrolítica, água mais sais, circula entre as partículas de solo. Deste modo, a compactação do solo, a porosidade e a granulometria influenciam a resistividade do solo.

A condução de eletricidade entre camadas de solos ocorre pela solução eletrolítica, não havendo resistência de contato entre estas camadas. Este efeito também está presente entre produtos químicos, usados para redução de resistência de aterramento, e o solo.

Variações rápidas da corrente elétrica ou de alta frequência proporcionam variações da resistividade do solo e da sua permissividade.

Tabela 9.1: Relação de tipos de solos e umidade relativa com a resistividade, valores mínimos e máximos de resistividade

Tipo de solo	Umidade	ρ_{\min} [$\Omega.m$]	ρ_{\max} [$\Omega.m$]
Água do mar	100	0,01	1
Argila	40	480	480

Argila	20	80	80
Argila	~0	330	330
Argila completa		100	200
Argila plástica		-	50
Areia	90	300	5.000
Areia	“Seca”	1.000	1.300
Areia argilosa		50	500
Basalto		10.000	20.000
Brita	Seca	3.000	3.000
Calcário fissurado		3.000	8.000
Calcário compacto		500	5.000
Calcário mole		100	400
Concreto		60	100
Granito		1.000	5.000
Húmus		10	150
Limo		20	100
Lodo		10	1.100
Orgânico*	Molhado	10	30
Orgânico*	50	5	100

Orgânico*	20	140	140
Solo pedregoso nu		1.500	3.000
Solo pedregoso Coberto		300	500
Mica xisto		-	800
Xisto		50	300

Esta tabela não é absoluta. *Para cultivo, terra de jardim, terra fértil

Os efeitos térmicos são relevantes em grandes eletrodos que transmitem potência elétrica em sistemas de transmissão de energia com retorno pela terra.

A tabela 9.1 lista valores máximos e mínimos de resistividade para vários tipos de solo. Em muitos casos a resistividade varia com a umidade, e alguns valores são mostrados para diferentes graus de umidade do solo. Como na prática os solos não têm exatamente a mesma constituição físico-química, a tabela apresenta valores máximos e mínimos para cada tipo de solo. Os valores mostrados na tabela não são absolutos, isto é, é possível que sejam encontrados valores além destes limites.

Os valores tabelados servem apenas como uma consulta prévia para uma primeira avaliação das condições locais e da sensibilidade. Como os valores de resistividade variam de local para local, é recomendada que seja feita uma medição de resistividade no ponto onde o eletrodo ficará.

A resistividade do solo varia com a profundidade, podendo esta variação ser significativa em longas temporadas de seca ou de chuva. Em geral, quanto mais aprofundamos mais nos aproximamos dos lençóis d'água e a resistividade do solo diminui.

Sem considerar a variação da umidade com a profundidade, não há indicação de que a resistividade diminua com a profundidade.

9.1.2 Permissividade

A permissividade varia para cada tipo de terreno. A permissividade tem influência no efeito capacitivo dos eletrodos de terra e na velocidade de propagação da corrente elétrica nos condutores de terra. Os solos conhecidos têm a constante dielétrica relativa variando de 1,5 a 80, sendo mais usuais os valores entre 10 e 15. Devido à falta de praticidade no levantamento do valor desta constante, alguns autores recomendam usar $\epsilon_r = 10$ para qualquer tipo de solo. A água do mar tem constante dielétrica 80. Algumas medições da permissividade relativa do solo mostraram valores de $\epsilon_r = 10^3$ e maiores.

A permissividade depende do tipo de solo, da umidade, da frequência e do di/dt do sinal injetado no solo. Até o presente momento estas variações têm sido consideradas apenas em pesquisa científica.

9.1.3 Permeabilidade

O solo tem uma característica magnética: a permeabilidade. A permeabilidade, em geral, é próxima à do vácuo ($\mu_0 = 400\pi \times 10^{-9}$ H/m); a constante magnética relativa do solo é em geral $\mu_r = 1$. Uma exceção é o O_4Fe_3 , um tipo de minério de ferro mas para o tipo O_3Fe_2 continua sendo $\mu_r = 1$.

9.1.4 Estratificação do solo

A terra é modelada como sendo composta de diversas camadas de solo as quais têm características elétricas diferentes, como ilustrado na [Figura 9.1](#). Cada camada tem uma espessura, uma resistividade e uma permissividade própria. Esta estratificação pode ser tratada de diversas formas. Na maioria dos casos o solo é considerado homogêneo eletricamente e equivalente ao solo estratificado encontrado no local, deve-se sempre observar os limites de aplicação das aproximações. Em poucos casos, em que é necessária uma maior precisão de cálculo, é considerado um número limitado de camadas com as suas respectivas características elétricas. Neste último caso, a camada mais profunda considerada é tida como homogênea e de espessura infinita, [Figura 9.2](#).

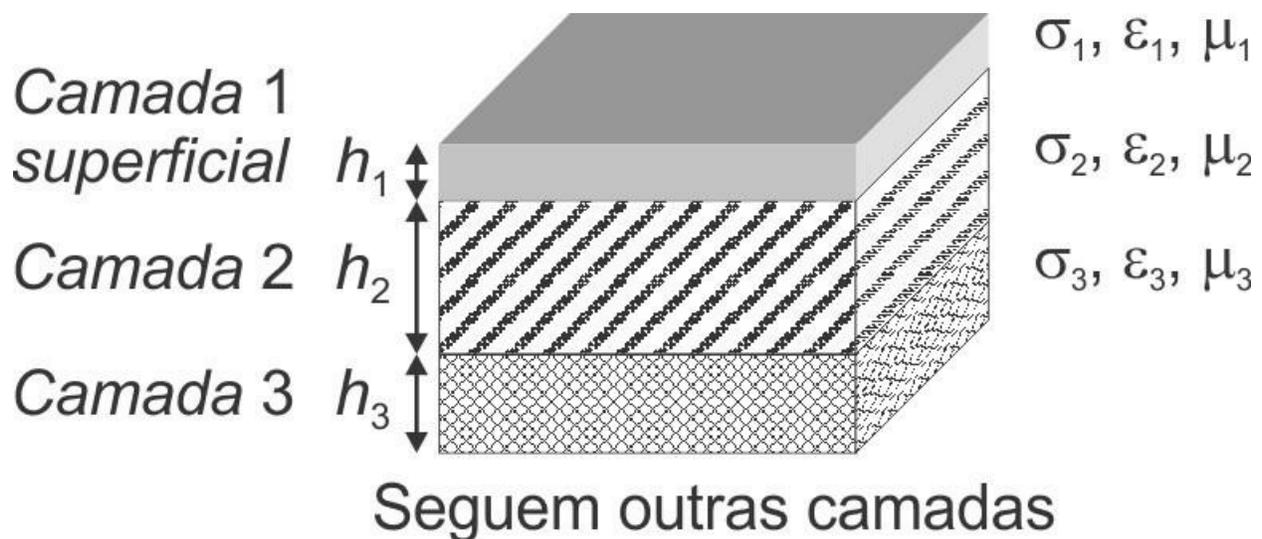


Figura 9.1: Solo estratificado e suas características eletromagnéticas; camada superficial e duas camadas inferiores

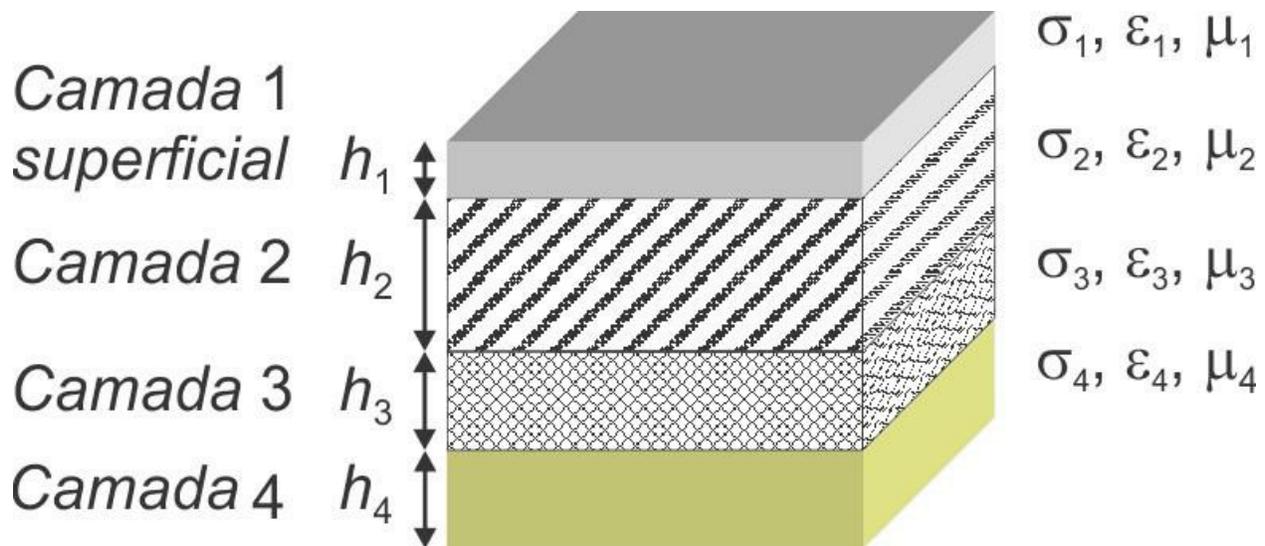


Figura 9.2: Representação do solo real, a última camada é considerada infinita.

Em muitos casos o solo é representado por duas camadas. Nesta representação a camada superficial tem a sua espessura e características elétricas equivalentes as $n-1$ camadas a partir da superfície. A outra é a última camada, tendo espessura considerada infinita, [Figura 9.3](#).

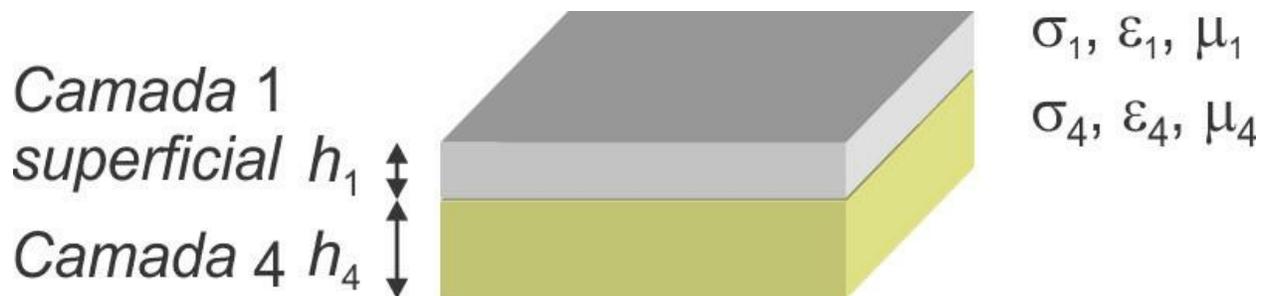


Figura 9.3: Representação do solo por duas camadas

9.1.5 Lençol freático

O lençol de água facilita o escoamento da corrente de terra. O nível do lençol freático, [Figura 9.4](#), varia durante o ano, na época da seca o nível da água está baixo e no verão (temporada de chuva) o nível aumenta. Com o nível baixo a umidade no solo diminui aumentando sua resistividade.



Figura 9.4: Solo estratificado com lençol freático

Os eletrodos devem estar o mais fundo possível, para que possam se aproximar ao máximo desses lençóis. A proximidade dos eletrodos com fossas assépticas, poços, rios, riachos, lagoas, nascentes, ou qualquer outro tipo de solo úmido é bastante conveniente em termos de baixar a resistência do aterramento. Este efeito é assegurado para corrente contínua ou de baixas frequências, tais como 60 Hz e 50 Hz e as suas 50 primeiras componentes harmônicas.

9.2 RESISTIVIDADE APARENTE

A resistividade aparente é a resistividade vista pelo eletrodo de terra. Em outras palavras, é a resistividade de um solo fictício homogêneo que levaria à mesma resistência de terra do eletrodo em um solo estratificado. Esta resistividade aparente é um *facilitador* para a obtenção de resistências de eletrodos de aterramento. O cálculo da resistência de terra de eletrodos e de malhas de aterramento fica muitíssimo facilitado. No capítulo de medições é mostrado como essa resistividade aparente pode ser medida.

A resistividade equivalente aparece quando um conjunto de camadas de solo é substituído por uma camada única. Esta camada única tem a espessura da soma das espessuras do conjunto de camadas. Este conceito é semelhante ao de resistividade aparente mas se aplica somente na ausência de eletrodos de terra.

9.2.1 Multicamadas para duas camadas

A resistividade aparente ou resistividade equivalente podem ser aproximadas por cálculo quando conhecemos a espessura e resistividade de várias camadas do solo. Este processo é mostrado a seguir:

$$\rho_a = \frac{\sum_{i=1}^{i=i_{\max}} h_i}{\sum_{i=1}^{i=i_{\max}} (h_i / \rho_i)} \quad [\Omega.m]$$

em que: h_i é a espessura [m] da camada de resistividade ρ_i [$\Omega.m$] e i_{\max} é a última camada considerada. Este procedimento permite transformar um solo de várias camadas em um solo equivalente de duas camadas apenas. A primeira camada é uma camada equivalente a todas as camadas menos a mais profunda. A segunda camada fica sendo a camada mais profunda em que a sua espessura é considerada infinita.

Este cálculo embora prático e simples oferece restrições quanto a sua aplicação. O eletrodo a ser considerado deve estar contido inteiramente em uma das camadas, sendo que sempre a pelo menos a uma distância de 10% da espessura da sua camada da próxima camada. A relação h/ρ da camada do eletrodo deve ser maior que a das demais camadas. Caso a resistividade de cada camada tenha valor próximo das demais é razoável aplicar este cálculo.

Exemplo 9.1

Como transformar o solo da [Figura 9.5](#) em um solo de duas camadas?

Solução: As duas primeiras camadas são substituídas por uma camada equivalente:

$$\rho_{eq} = \frac{h_1 + h_2}{\frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2}}$$

e a terceira camada é considerada infinita, como mostrado na [Figura 9.6](#).

Ar

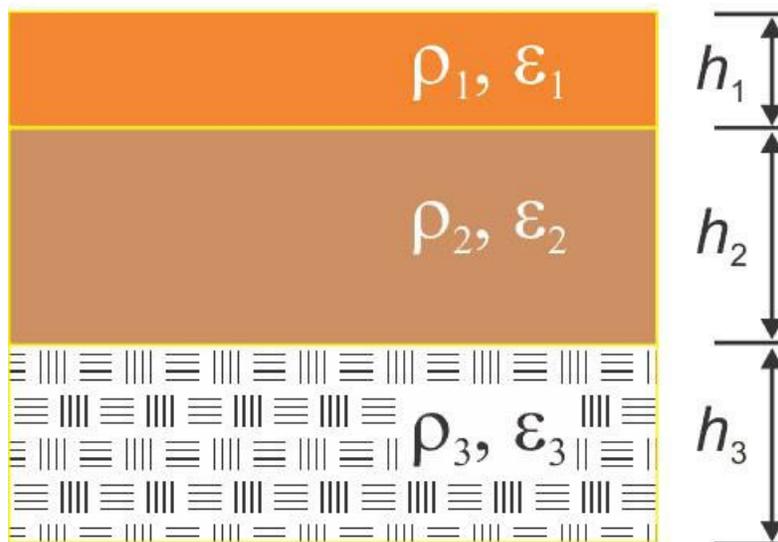


Figura 9.5: Solo de três camadas de solo diferentes

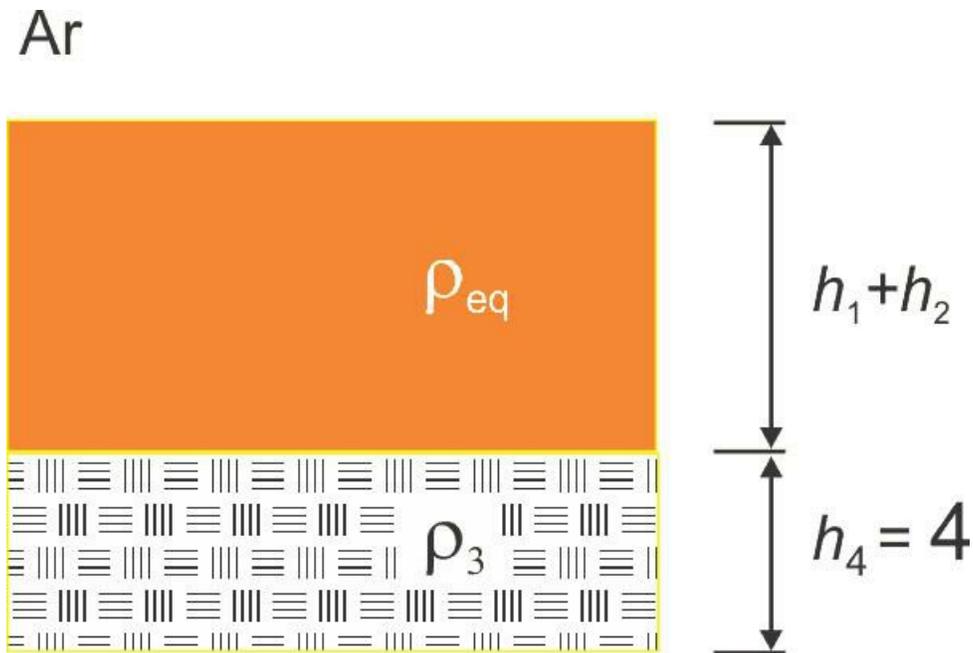


Figura 9.6: Solo de duas camadas do exemplo 9.1

Os valores de ρ_{eq} e ρ_3 são utilizados na obtenção da resistividade aparente do solo. Assim, tem-se um solo homogêneo aparente de resistividade ρ_a . Este valor de ρ_a é utilizado para o cálculo da resistência de terra de eletrodos e malhas de terra.

#

9.2.2 Duas camadas para homogêneo

Para transformar um solo de duas camadas em um solo de uma única camada é necessário conhecer a área horizontal aparente do eletrodo de terra, a resistividade da camada superficial e a resistividade da camada infinita. Este processo é feito a partir da equação mostrada a seguir:

$$N = 1 + \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \Gamma^m \left(\frac{K_{m-}}{C_{m-}} + \frac{2K_m}{C_m} + \frac{K_{m+}}{C_{m+}} \right)}{\ln \left(\frac{16a}{d_o} \right) + \frac{K_{0+}}{C_{0+}}}$$

em que:

$$\Gamma = \frac{\rho_{\infty} - \rho_{eq}}{\rho_{\infty} + \rho_{eq}}$$

– coeficiente de reflexão;

$$K_{m-} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + (m - \phi)^2}}$$

$$K_m = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + m^2}}$$

$$K_{m+} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + (m + \phi)^2}}$$

$$C_{m-} = \sqrt{1 + \left(\frac{m - \phi}{\alpha}\right)^2}$$

$$C_m = \sqrt{1 + \left(\frac{m}{\alpha}\right)^2}$$

$$C_{m+} = \sqrt{1 + \left(\frac{m + \phi}{\alpha}\right)^2}$$

$$\alpha = \frac{a}{d}$$

$$\phi = \frac{h}{d}$$

d – profundidade da primeira camada [m];

h – profundidade da malha de terra ou eletrodo [m];

a – raio equivalente do eletrodo ou malha [m], raio de uma malha circular equivalente;

d_o – diâmetro do condutor usado no eletrodo ou malha [m];

ρ_{eq} – resistividade equivalente da camada superficial [$\Omega.m$];

ρ_{∞} – resistividade da camada infinita [$\Omega.m$].

A resistividade aparente é então calculada pela seguinte equação:

$$\rho_a = N\rho_{eq} \text{ } [\Omega].$$

Esta é válida para eletrodos e malhas inteiramente contidos na primeira camada desde que a relação entre a maior dimensão horizontal do eletrodo com a sua espessura vertical seja pequena.

No apêndice tem duas figuras com curvas de N x a/d .

9.3 CORRENTE PARA O SOLO VIA ELETRODOS

Existem diversos modos de se escoar a corrente para o solo. Dentre estes alguns são mais indicados do que outros. A escolha do eletrodo de terra a ser utilizado dependerá da frequência, da intensidade da corrente, do espaço físico disponível para a construção do eletrodo, da tensão de passo e de toque etc.

Os eletrodos podem ser formados por hastes, cabos, fios, placas e outros componentes. As combinações destes componentes formam também eletrodos de terra.

9.3.1 Eletrodo semiesférico

O estudo inicial do escoamento de corrente no solo se faz com o semiesférico, [Figura 9.7](#). Este tipo de eletrodo, apesar de não ser de uso prático, é de grande valor para a análise dos parâmetros básicos envolvidos na avaliação e aplicação de eletrodos.

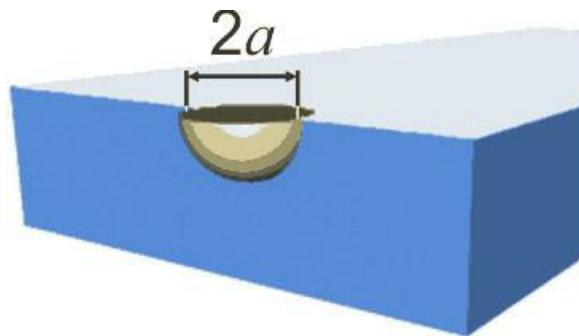


Figura 9.7: Eletrodo semiesférico, a é o raio da semiesfera.

Para calcular a resistência de terra de um eletrodo semiesférico, consideramos o solo de superfície plana e infinita para baixo e para os lados, conforme ilustrado na [Figura 9.7](#), e sendo o solo homogêneo. A resistência deste eletrodo é:

$$R = \rho_a / (2\pi a) \quad [\Omega]$$

em que:

ρ_a – resistividade aparente do solo [$\Omega \cdot m$];

a – raio da semiesfera [m].

9.3.2 Região de influência dos eletrodos

Os eletrodos de aterramento são os meios para o escoamento da corrente no solo, a qual se espalhará sofrendo atenuação e dispersão. A superfície equipotencial, em que o potencial atinge um valor igual a 2% ou menos do que o potencial no eletrodo é denominada superfície limite. A região compreendida entre o eletrodo e a superfície limite é chamada de região de influência. A [Figura 9.8](#) ilustra esta região para um eletrodo semiesférico quando ele estiver sujeito a corrente contínua ou de baixa frequência (60 Hz ou 50 Hz). Dentro da região delimitada por essa superfície equipotencial a influência do eletrodo é intensa. Deve-se evitar a passagem de cablagem, a colocação de equipamentos e o uso de hastes e cabos de aterramento dentro desta região.

Esta região de influência varia de tamanho e forma, dependendo das características de resistividade e de permissividade do solo. Outros fatores que influenciam as dimensões desta

região são as diferentes camadas de solo e a frequência (di/dt) da corrente elétrica.

O aumento da frequência diminui a região de influência do eletrodo de terra, o mesmo acontecendo quando há um aumento do di/dt . O parâmetro que está relacionado com a região de influência é a profundidade de penetração, conforme a equação a seguir:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho a}{f\pi\mu}} \quad [\text{m}]$$

Considerando uma onda plana, o campo elétrico com a profundidade h é obtido por:

$$E(h) = E_0 e^{-h/\delta},$$

sendo E_0 o campo na superfície. Assim, quanto maior a frequência menor será a penetração do campo elétrico no solo. Por exemplo, um impulso atmosférico que não cause ionização no subsolo, terá uma penetração mais dificultada que uma corrente a 60 Hz ou 50 Hz.

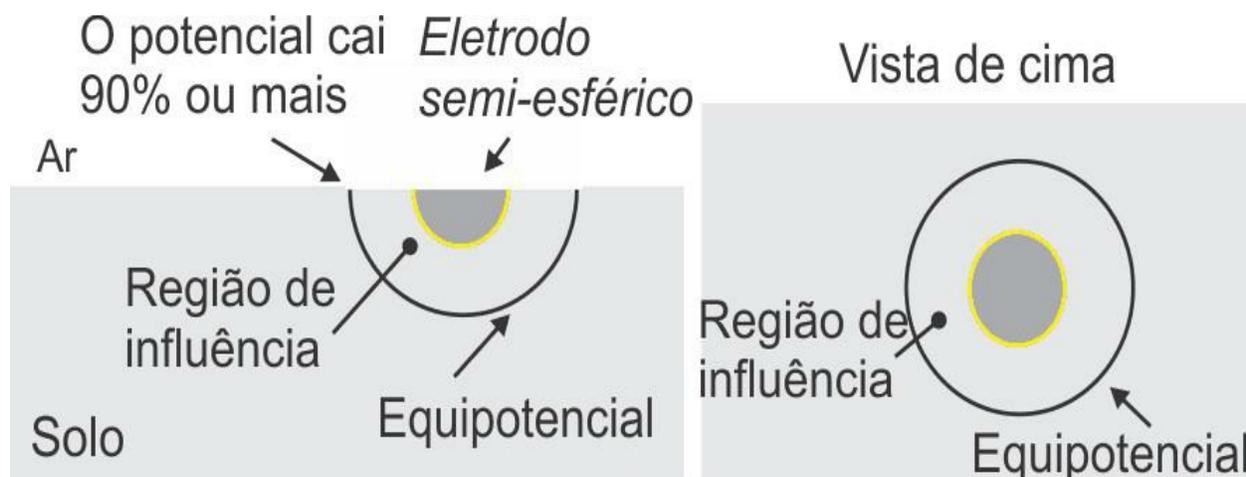


Figura 9.8: Eletrodo semiesférico com sua superfície equipotencial limite – esta equipotencial se aproxima do eletrodo à medida que a frequência (di/dt) da corrente injetada no eletrodo aumenta.

É recomendado que novos eletrodos sejam instalados fora desta região, a fim de se ter um melhor aproveitamento. Com a colocação de dois elementos (duas semiesferas, por exemplo) em um eletrodo, a região de influência aumenta mais do que a soma das regiões individuais, como ilustrado na [Figura 9.9](#). Para muitos fins práticos devem-se considerar apenas as regiões de influência individual de cada elemento.

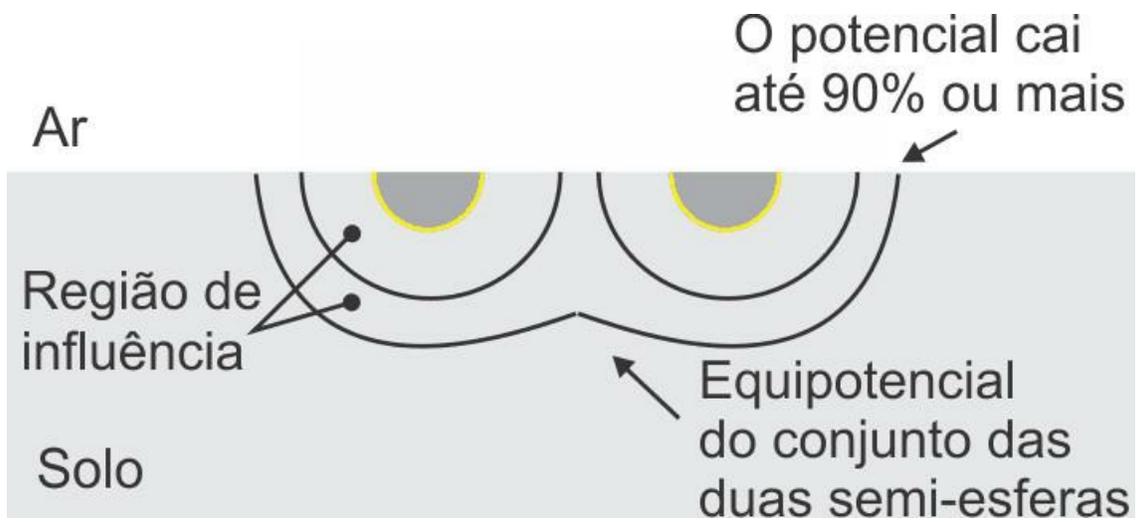


Figura 9.9: Duas semiesferas formando um eletrodo

9.4 NÃO-LINEARIDADES NO SUBSOLO

Um dos parâmetros críticos na determinação do desempenho, na presença do impulso em uma linha de transmissão, é a impedância dos pés de torre. E tem sido sugerido que o decréscimo na impedância resultante da ionização do solo sob condições de alta-tensão seja considerado. A ionização do solo também está presente quando impulsos atmosféricos oriundos de para-raios e de outros sistemas fluem para eletrodos de terra.

A impedância de um eletrodo quando submetido a um impulso de alta corrente é significativamente diferente da impedância a baixa corrente. Sob alta corrente a impedância é reduzida e é devida ao processo de ionização do solo. A redução da impedância deve ser considerada em casos de pequenos eletrodos submetidos a impulso atmosférico. Esta redução é favorável ao escoamento da corrente indesejada.

O modelamento deste fenômeno que ocorre no eletrodo sob alta-tensão se dá pela definição de duas dimensões características de um eletrodo. Estas dimensões características não requerem o valor do gradiente de ionização crítico do solo, E_c , isto é, o valor de campo elétrico que dá início as descargas no subsolo não é utilizado neste modelamento. Com as técnicas atuais, a obtenção deste parâmetro é feita em laboratório, o que torna inviável a sua aplicação nas instalações mais corriqueiras. Nos casos apresentados aqui, apenas as dimensões geométricas são usadas.

9.5 IONIZAÇÃO E SIMILARIDADE

O critério da similaridade se baseia em uma zona de descarga uniforme, dentro da qual o solo é considerado um bom condutor, como o metal do eletrodo. A resistividade do solo é tida como zero na região de ionização no momento da alta corrente da descarga.

9.5.1 Campo elétrico crítico de ionização do solo – E_c

Quando o solo ao redor do eletrodo começa a se ionizar, descargas elétricas partem deste. Estas descargas rasgam o solo do mesmo modo que uma descarga atmosférica rasga o ar. No momento em que esse processo de descargas tem início, o campo elétrico é chamado de campo elétrico crítico de ionização do solo, e é simbolizado por E_c . O valor E_c , rigidez dielétrica, é determinado experimentalmente e considerado 300 kV/m para qualquer tipo de solo, apesar de variar com o tipo de solo. E_c é variável com a forma do impulso (dependente da forma de onda injetada no solo e da sua intensidade). E_c varia com: frente de onda (di/dt); calda da onda (di/dt); tensão de pico; combinações das anteriores.

9.5.2 Região de descarga

Quando o campo ultrapassa o valor do gradiente crítico, E_c , o importante é a dimensão da região ionizada que envolve o eletrodo, veja [Figura 9.10](#). Esta região ionizada pode ser considerada uniforme.

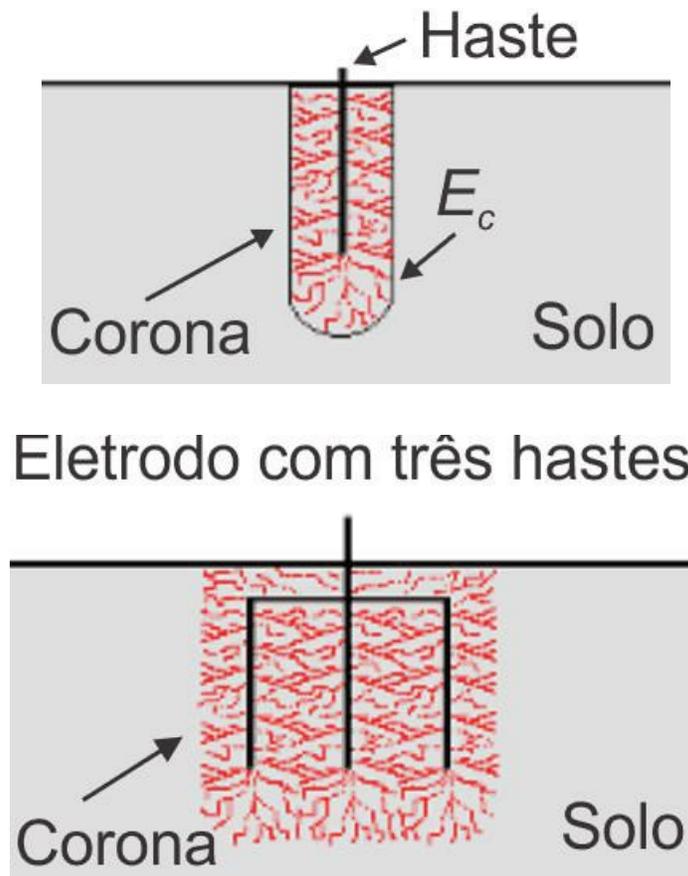


Figura 9.10: Regiões de corona no subsolo ao redor de eletrodos

9.5.3 Dimensões características S ou H do eletrodo

A partir dos valores S ou H pode-se calcular a resistência do eletrodo sob impulso e com um novo formato geométrico, [Figura 9.11](#). A primeira das distâncias, S , é definida como a distância do centro geométrico do eletrodo na superfície do solo ao seu ponto mais distante.

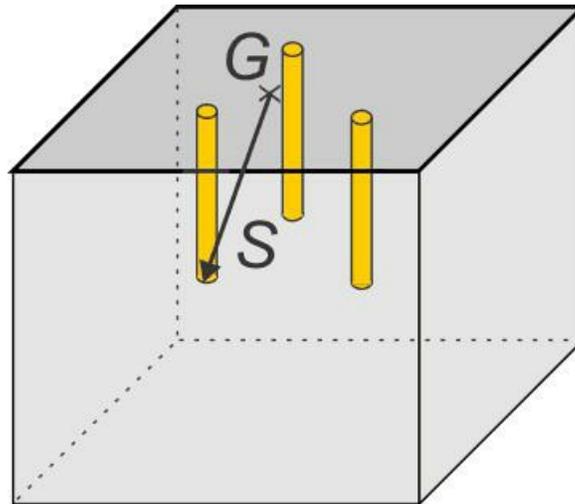
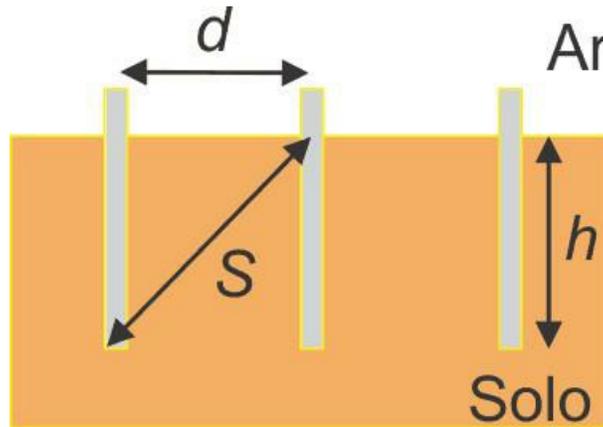


Figura 9.11: Distância, S , do centro geométrico, G , na superfície ao ponto mais distante; eletrodos alinhados e eletrodos em triângulo

A segunda dimensão adotada, H , é a raiz média quadrática da soma, da maior distância horizontal (d_1), da maior distância (d_2), perpendicular a d_1 e da profundidade do eletrodo (h), [Figura 9.12](#):

$$H = \sqrt{d_1^2 + d_2^2 + h^2} \text{ [m]}$$

em que todos os valores estão em metros.

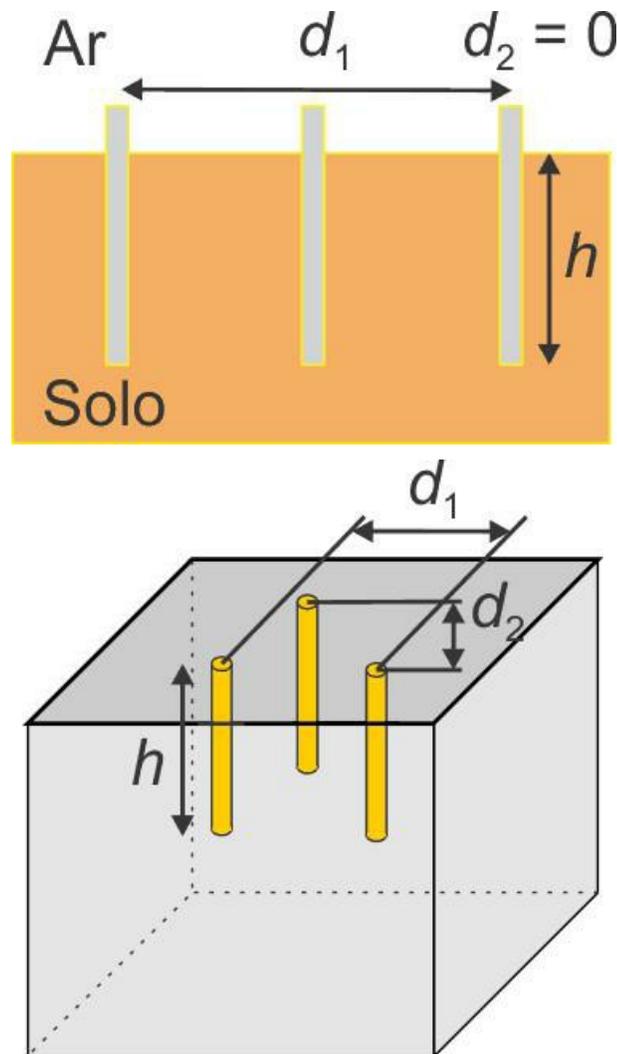


Figura 9.12: Parâmetros para obtenção da dimensão característica; eletrodos alinhados e eletrodos em triângulo

Com os exemplos a seguir podemos notar a diferença entre a dimensão característica H e a dimensão S . A tabela 9.2 apresenta uma comparação entre as duas dimensões características para configurações diferentes de eletrodos.

Tabela 9.2: Dimensão característica, S e H , ilustrando diversos arranjos de eletrodos

Eletrodo	S [m]	d_1 [m]	d_2 [m]	h [m]	H [m]
Linha horizontal	1,4142	2	0	1	2,236
2 hastes alinhadas	1,732	2,828	0	1	3
Condutores em cruz	1,4142	2	2	1	3
4 hastes em quadrado	1,732	2,828	2,828	1	4,123

9.5.4 Impedância de impulso de um eletrodo

A impedância de impulso de um eletrodo é a impedância do eletrodo quando este é submetido a um impulso de corrente. Ela assume valores significativamente diferentes de impedância se o campo elétrico gerado for abaixo ou acima de E_c . O valor desta impedância é diferente da impedância para frequência nominal ou para corrente contínua. A impedância do eletrodo depende da forma de onda e das características elétricas do solo. A relação entre a tensão aplicada e a corrente injetada é do tipo $z(t)$, quando há não linearidades, pois varia a cada instante do tempo com a passagem do impulso. Com o uso da dimensão característica este parâmetro fica resumido a dois valores:

Z_{eletrodo} que é a impedância do eletrodo para baixas tensões e frequências;

Z_{impulso} que é o valor que a impedância do eletrodo assume quando este está com a região ao seu redor ionizada.

Esse procedimento facilita muitíssimo o trabalho de cálculo, trazendo os dois valores significativos da impedância impulsiva.

Existem modelos mais precisos para representar as não linearidades que ocorrem durante a injeção de impulsos de alta corrente.

10 ELETRODOS COM HASTES

10.1 INTRODUÇÃO

Os eletrodos servem para escoar regime permanente senoidal, tensões impulsivas atmosféricas ou de chaveamento, curtos-circuitos, impulsos eletrostáticos, ruídos de modo geral e sinais digitais e de comunicação.

A resistência de terra de um eletrodo é limitada pelas normas nacionais, regionais ou normas técnicas de empresas e órgãos governamentais. Alguns equipamentos ainda podem trazer exigências dos fabricantes, quanto a resistência de terra, para garantir um funcionamento dentro das especificações de projeto.

Como já mostrado, o eletrodo de terra é na realidade uma impedância de terra. Nesta impedância os parâmetros do terreno que mais influenciam o aterramento são a resistividade e a permissividade. Neste capítulo é mostrado como se obtém por cálculo a impedância de terra de vários tipos de eletrodos formados por hastes, além de serem discutidas algumas características destes eletrodos. O uso de hastes visa atingir camadas de solos de mais baixa resistividade, solos mais úmidos.

Os eletrodos mais comuns são os formados por:

- Hastes alinhadas;
- Hastes em retângulo;
- Hastes em triângulo;
- Haste profunda.

Nestes eletrodos o mais comum é colocar as hastes verticalmente no solo, deste modo a análise feita aqui considera apenas esta posição da haste. É possível usar hastes inclinadas, as quais formam um ângulo com a superfície do solo.

10.2 HASTES VERTICAIS

10.2.1 Haste vertical

A haste vertical é um componente dos eletrodos de terra mais utilizados em toda parte principalmente por sua facilidade de instalação. Este eletrodo tem como característica uma indutância série. Várias hastes interligadas em diferentes configurações são utilizadas para obter uma resistência de aterramento menor e também uma indutância menor, [Figura 10.1](#).

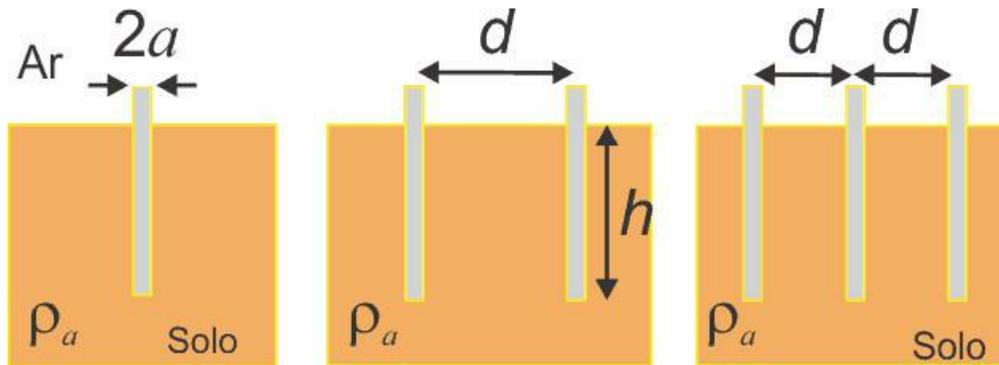


Figura 10.1: Sistema de aterramento com uma, duas e três hastes verticais

A equação para a resistência de uma haste vertical é:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi h} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) \quad [\Omega]$$

em que:

h – profundidade da haste [m];

a – raio da haste [m].

Exemplo 10.1

Qual a resistência de uma haste de comprimento 2,40 m e raio de 0,50 cm em um solo arenoso seco?

$\rho_a = 1.000 \Omega.m$,

$h = 2,40 \text{ m}$,

$a = 0,005 \text{ m}$

$$R = \frac{1.000}{2 \times 3,14159 \times 2,40} \ln \left(\frac{2 \times 2,40}{0,005} \right)$$

$$R = 455,4 \Omega$$

E em um solo orgânico molhado com $\rho_e = 10 \Omega.m$?

$$R = \frac{10}{2 \times 3,14159 \times 2,40} \ln \left(\frac{2 \times 2,40}{0,005} \right)$$

$$R = 4,55 \Omega$$

#

10.2.2 Região de influência das hastes

A forma com que a corrente entrando em uma haste se espalhará pelo solo assume características dependentes da geometria da haste. A superfície limite gerada por uma haste de terra tem características próprias e é ilustrada na [Figura 10.2](#), quando sujeita a uma corrente contínua ou de baixa frequência (60 Hz ou 50 Hz). Na região delimitada por esta superfície equipotencial, a influência da haste é intensa.

A forma e o tamanho deste volume de grande densidade de corrente depende da resistividade e da permissividade do solo. A estratificação do solo e a frequência (di/dt) do sinal são outros fatores que influenciam na região de influência de um eletrodo de terra formado por uma haste. A [Figura 10.3](#) ilustra a variação da tensão em relação ao infinito, referência, e a haste. A [Figura 10.4](#) ilustra a tensão superficial próximo a uma haste quando uma corrente contínua de 1.000 A é injetada nesta.

O aumento da frequência diminui a região de influência do eletrodo de terra, o mesmo acontecendo quando há um aumento do di/dt .

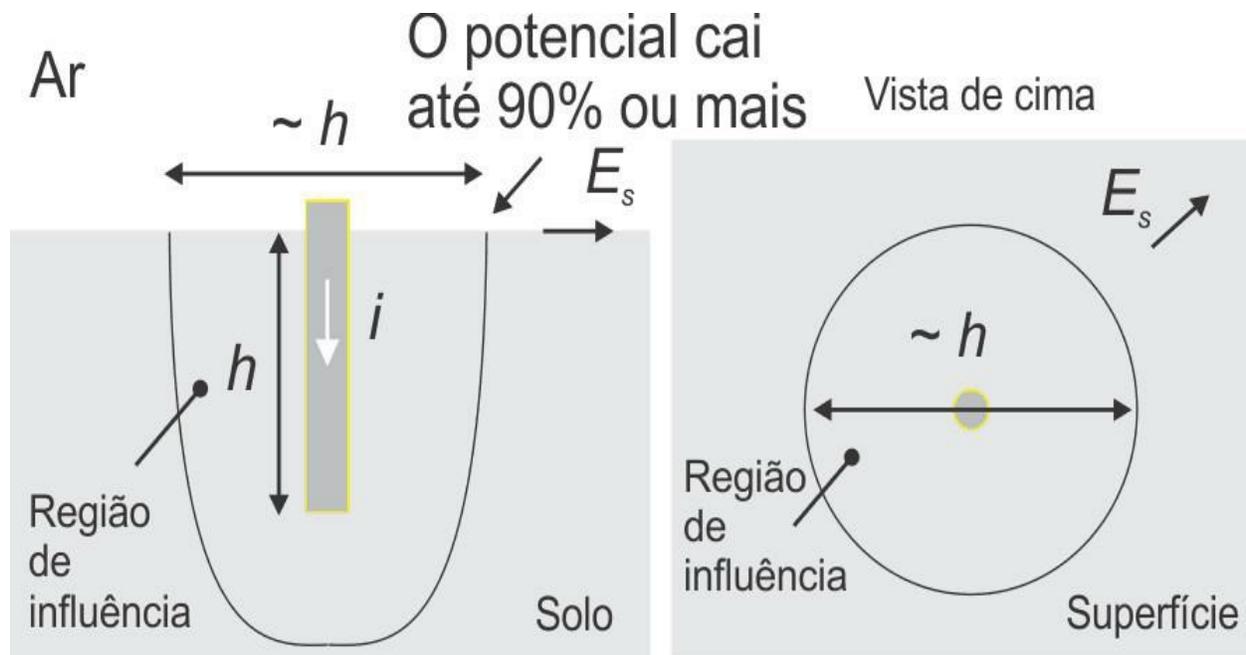


Figura 10.2: Eletrodo haste com sua superfície equipotencial limite

É recomendado que as demais hastes sejam instaladas fora desta região, para se ter um melhor aproveitamento. Com a colocação de duas hastes em um eletrodo, a região de influência aumenta mais do que a soma das regiões individuais, [Figura 10.5](#), E_{sA} e E_{sB} são os campos elétricos superficiais gerados pela corrente elétrica nas hastes A e B. Para muitos fins práticos devem-se considerar apenas as regiões de interferência individual de cada haste.

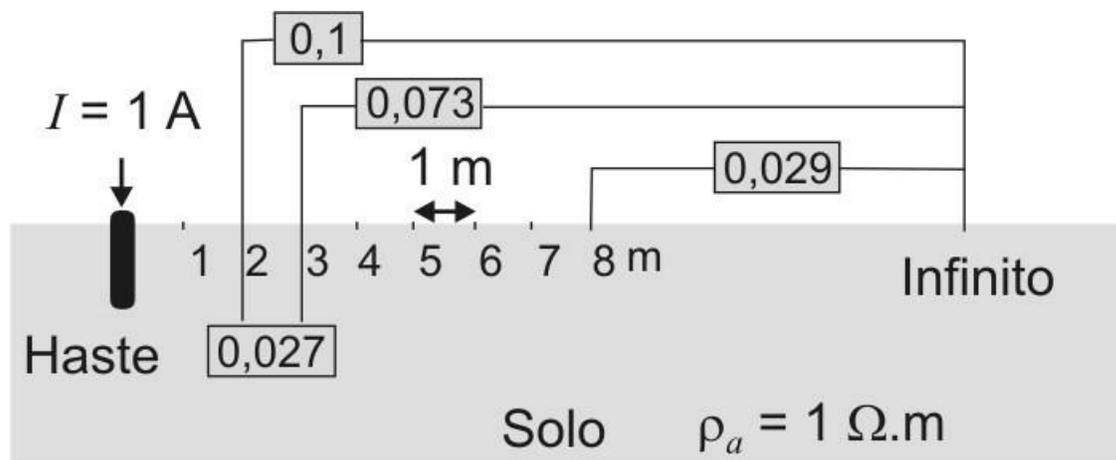
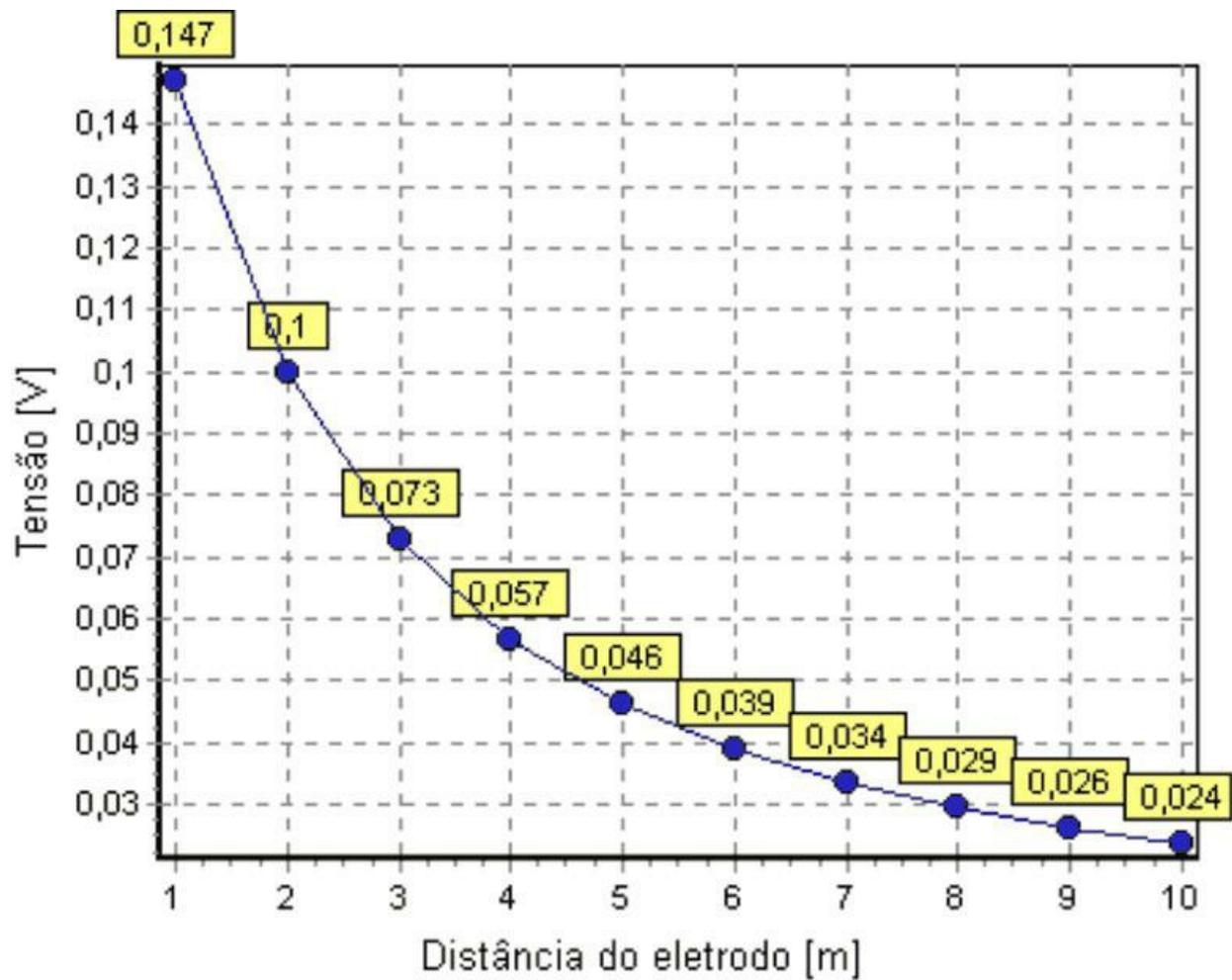


Figura 10.3: Tensão, em volts, com relação ao infinito de pontos na superfície do solo quando da injeção de 1,0 A de corrente em uma haste vertical de 1,5 m de profundidade e 5,0 mm de diâmetro em um solo com resistividade aparente de 1,0 $\Omega \cdot \text{m}$.

Deste volume de atuação da haste é que vem a regra prática de se ter uma haste a uma distância igual à sua profundidade das hastas vizinhas. Neste caso, considerar todas as hastas de igual profundidade. Esta regra prática não se aplica para o caso de altas frequências e impulsos.

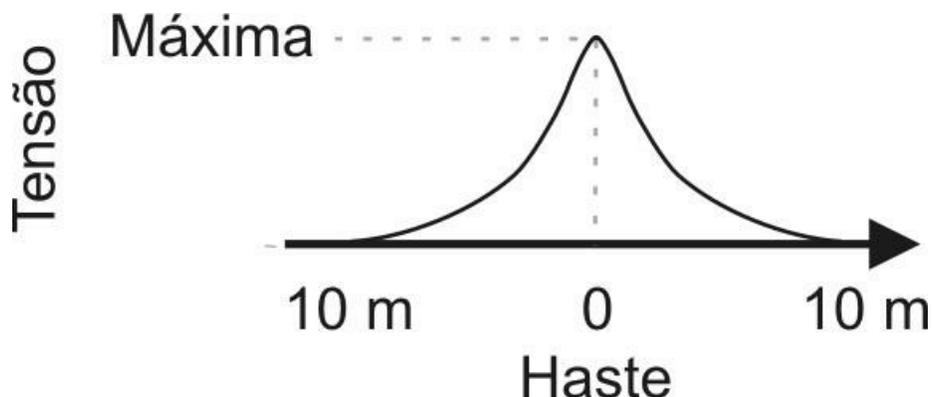


Figura 10.4: Tensão na superfície de um solo quando uma corrente é injetada em um eletrodo haste na posição zero.

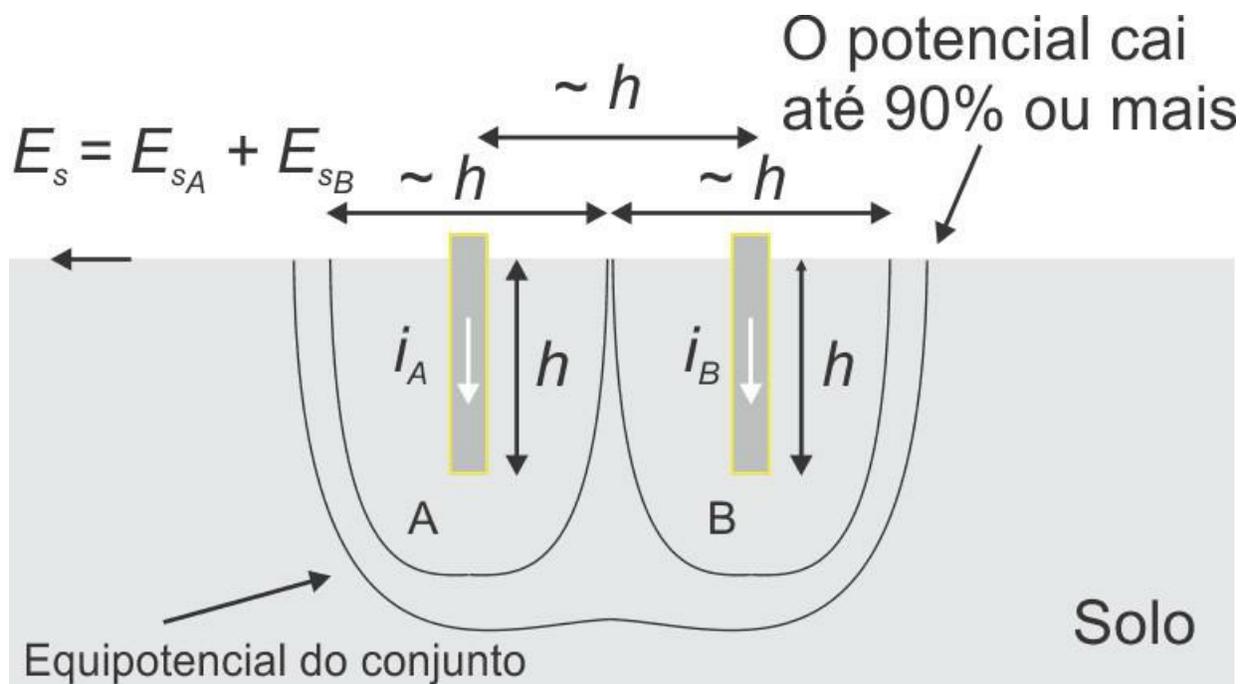


Figura 10.5: Haste A e haste B formando um único eletrodo

As duas hastas de terra terão uma influência mútua devido aos seus campos elétricos e magnéticos, [Figura 10.6](#).

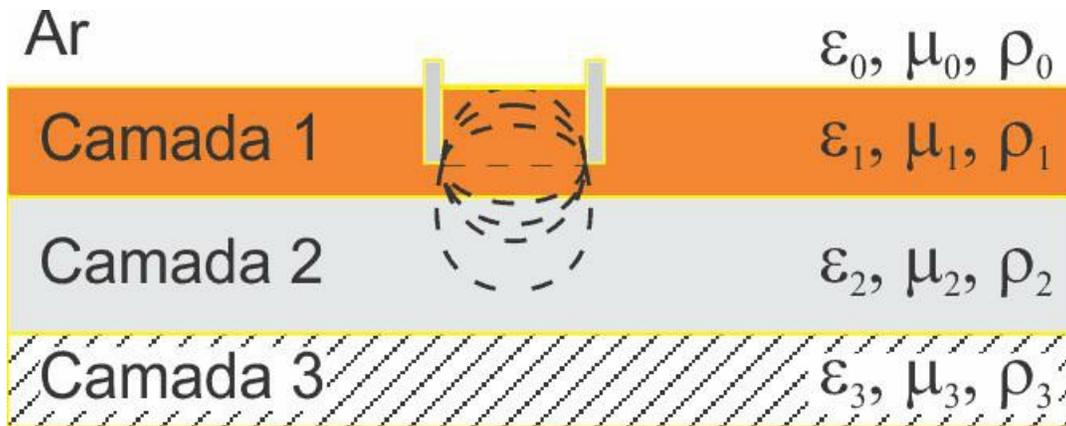


Figura 10.6: Par de hastes em um solo estratificado, influência mútua

10.2.3 Cálculo da resistência de terra de um conjunto de hastes

Vimos que o campo elétrico gerado pela corrente em um eletrodo cai à medida que nos afastamos do eletrodo mas nunca chega ao valor zero. Podemos, agora, imaginar que ao colocarmos uma nova haste vertical na terra teremos que considerar a presença das hastes já enterradas. Para o cálculo da resistência do eletrodo de aterramento consideram-se as resistências individuais das hastes menos o efeito mútuo.

A resistência de um conjunto de hastes em paralelo pode ser obtida por:

$$R = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{R_i}} \quad [\Omega]$$

em que:

$$R_i = R_p + \sum_{k=1}^{k=n} R_{ik}$$

é a resistência de cada haste no conjunto;

n é o número total de hastes em paralelo;

$$R_p = \frac{\rho_a}{2\pi h} \ln\left(\frac{2h}{a}\right)$$

é a resistência de terra da haste isolada;

$$R_{ik} = \frac{0,183\rho_a}{h} \log\left[\frac{(b_{ik} + h)^2 - d_{ik}^2}{d_{ik}^2 - (b_{ik} - h)^2}\right]$$

$i \neq k$, resistência mútua entre hastes;

d_{ik} é a distância [m] entre a haste i e a haste k ;

$$b_{ik} = \sqrt{h^2 + d_{ik}^2} \quad [\text{m}]$$

Nota-se deste conjunto de equações que a resistência de terra total varia linearmente com a resistividade aparente, isto é:

$$R = \rho_a R_{pu} \quad [\Omega]$$

em que R_{pu} é a resistência de terra por unidade tendo como base $\rho_a = 1 \Omega \cdot \text{m}$.

Deve-se observar que os eletrodos que ocupam uma extensão muito grande podem estar sujeitos a diferentes valores de resistividade aparente do solo.

10.2.4 Hastes verticais em linha

A utilização de várias hastes alinhadas é muito comum pela facilidade de instalação e requer pouco espaço para o aterramento, [Figura 10.7](#). Com a finalidade de otimizar os custos, à distância entre as hastes deve ser igual à profundidade das hastes, sendo todas as hastes de igual profundidade e considerando corrente contínua ou de baixa frequência.

Vista de cima

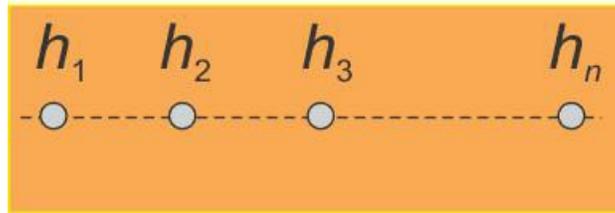


Figura 10.7: Hastes alinhadas vistas da superfície

Resistência de terra de duas hastes em paralelo:

$$R = \frac{\rho_a}{4\pi h} \left(\ln\left(\frac{2h}{a}\right) + \frac{h}{d} \right) \quad [\Omega]$$

em que d é a distância entre as hastes [m].

Para três hastes alinhadas e em paralelo, a equação da resistência já é bastante mais longa:

$$R = \frac{\rho_a}{\pi h d} \frac{\left(d \ln\left(\frac{2h}{a}\right)^2 + \frac{hd}{2} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) - 2h^2 \right)}{6d \ln\left(\frac{2h}{a}\right) - 7h} \quad [\Omega]$$

Com o aumento do número de hastes, o tamanho e a complexidade da equação para cálculo da resistência de terra vão aumentando.

Exemplo 10.2

Um eletrodo com quatro hastes verticais, alinhadas em solo de resistividade de 1.000 Ω .m, hastes de 2,4 m e diâmetros de 25,4 mm²; tem a resistência de terra mostrada no gráfico da [Figura 10.8](#) para o espaçamento entre os eletrodos variando de 1 m até 10 m.

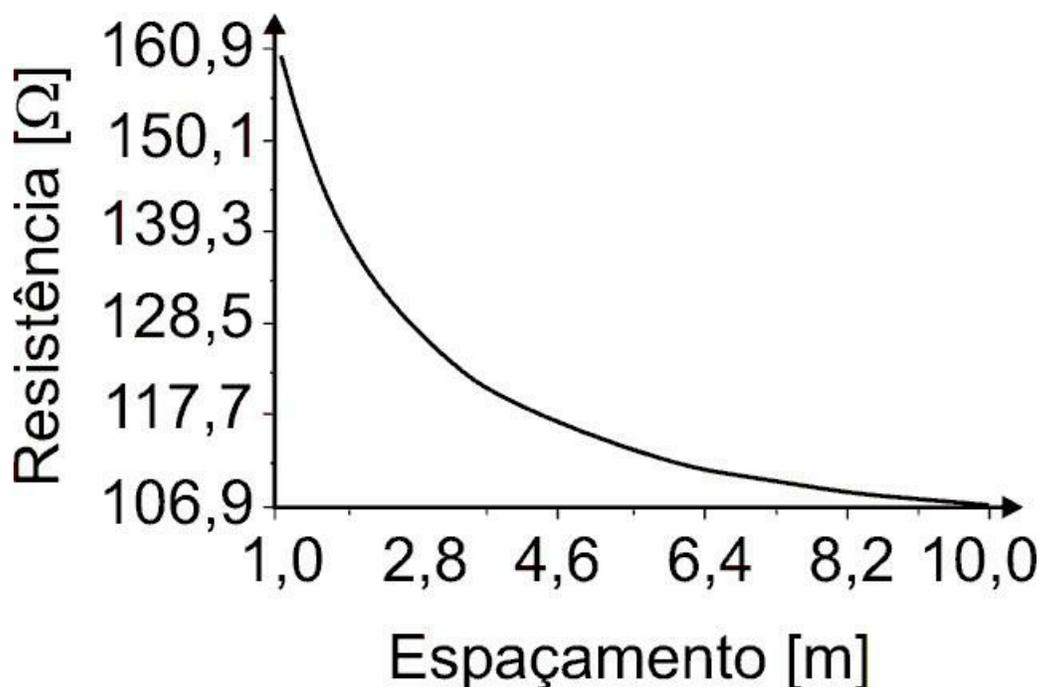


Figura 10.8: Variação da resistência de um eletrodo de quatro hastes alinhadas com o espaçamento entre as hastes

#

Fica claro observando o exemplo anterior que o aumento da distância entre as hastes acarreta uma diminuição da resistência do eletrodo. Pode ser constatado também que o aumento da distância entre as hastes não corresponde a uma diminuição proporcional da resistência. Esta relação desproporcional se deve às mútuas das hastes individuais.

O gráfico a seguir, [Figura 10.9](#), mostra a variação da resistência de terra com o aumento do número de hastes. As hastes estão igualmente espaçadas e têm a mesma profundidade e diâmetro. O gráfico foi traçado para uma resistividade de 1 Ω .m. Pelas equações do cálculo da resistência de aterramento para um conjunto qualquer de hastes em paralelo nota-se que, multiplicando-se os valores de resistência do gráfico por um valor qualquer de resistividade, tem-se o valor da resistência de terra correspondente. Para duas hastes em um solo de resistividade aparente de 1 Ω .m a resistência de terra é de 0,25 Ω , para um solo com uma resistividade aparente de 330 Ω .m a resistência de terra deste eletrodo com duas hastes é de 82,5 Ω .

O gráfico seguinte, [Figura 10.10](#), mostra a variação da resistência de terra de hastes alinhadas com 3 m de profundidade versus o número de hastes.

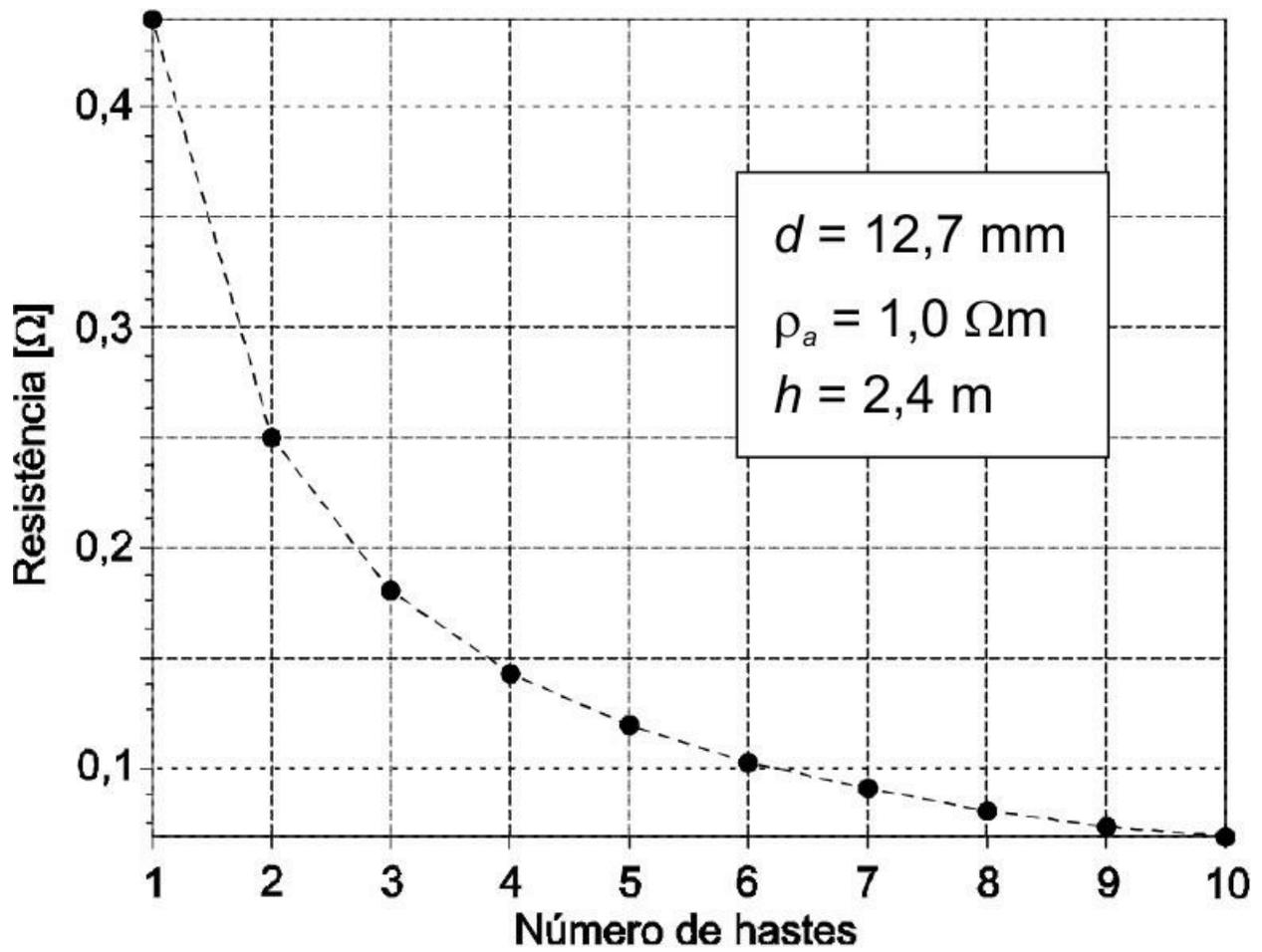


Figura 10.9: Resistência versus número de hastes, profundidade 2,40 m, diâmetro 12,7 mm, espaçamento 2,40 m, resistividade aparente 1,0 $\Omega\cdot\text{m}$

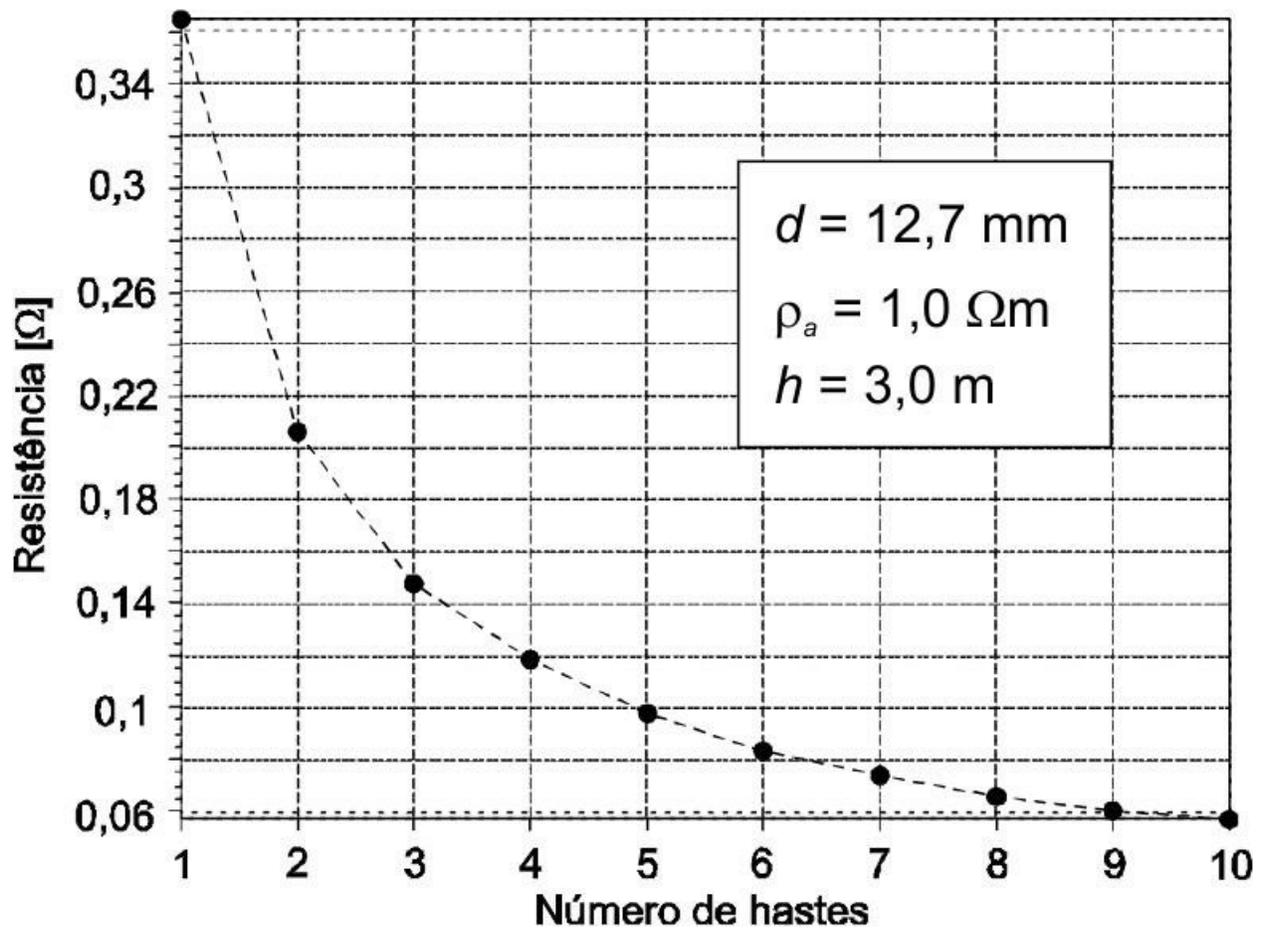


Figura 10.10: Mesmo que a [Figura 10.9](#) mas com espaçamento = $h = 3,0$ m

10.2.5 Hastes formando um quadrado

Para baixas frequências e corrente contínua, hastes paralelas formando um quadrado cheio representam desperdício de hastes, uma vez que as hastes do interior serão pouco aproveitadas. As hastes colocadas no interior do quadrado estarão dentro da região de influência das hastes do perímetro. A redução da resistência total de aterramento do eletrodo será menos efetiva se comparada com o mesmo conjunto de hastes colocadas em linha reta. Poderá haver casos específicos em que o eletrodo em quadrado seja necessário independentemente da frequência do sinal.

Os eletrodos em quadrado cheio e quadrado vazio (hastes apenas no perímetro do quadrado) são mostrados na [Figura 10.11](#). A [Figura 10.12](#) mostra um eletrodo em quadrado vazio com oito hastes em perspectiva. A [Figura 10.13](#) mostra um eletrodo com nove hastes formando um quadrado cheio.

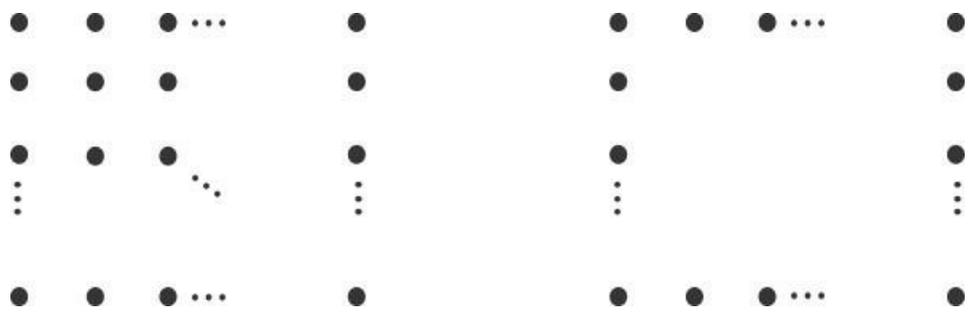


Figura 10.11: Hastes formando um eletrodo em quadrado cheio e hastes formando um quadrado vazio

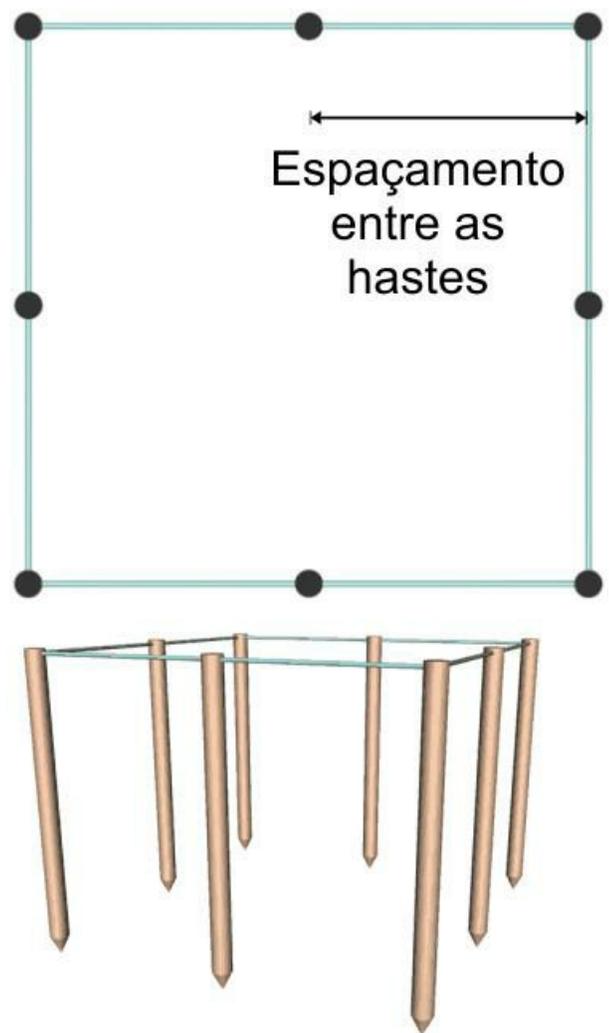


Figura 10.12: Quadrado vazio com oito hastes; vista de cima e em perspectiva

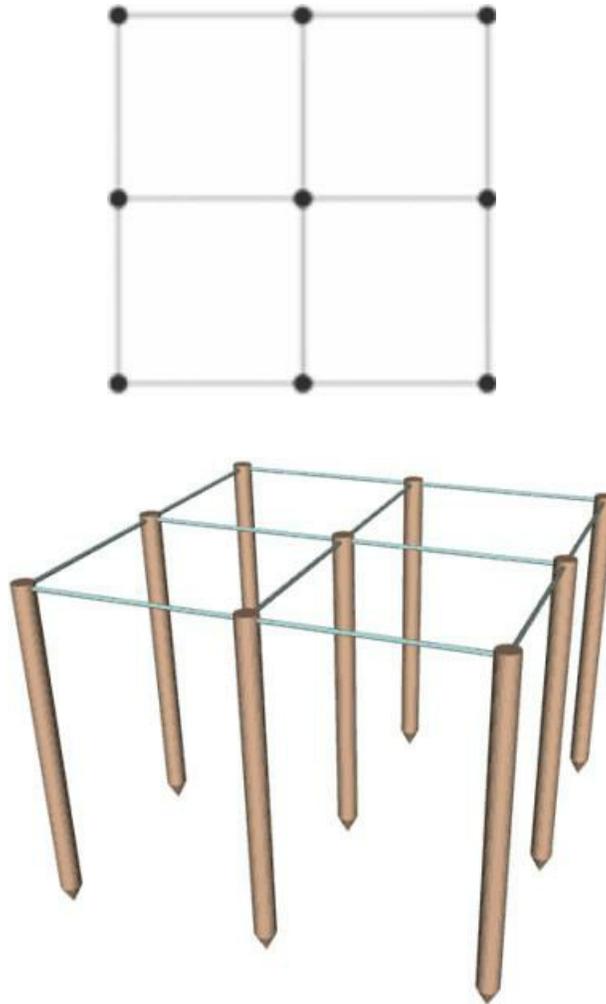


Figura 10.13: Quadrado cheio com nove hastes; vista de cima e em perspectiva

O gráfico da [Figura 10.14](#) mostra a variação da resistência de terra de um eletrodo com hastes em paralelo formando um quadrado vazio *versus* o número de hastes para solo de 1 Ω .m. Novamente, para saber o valor da resistência de terra para outros tipos de solo, basta multiplicar os valores de resistência de terra encontrados no gráfico pela resistividade aparente do solo em questão.

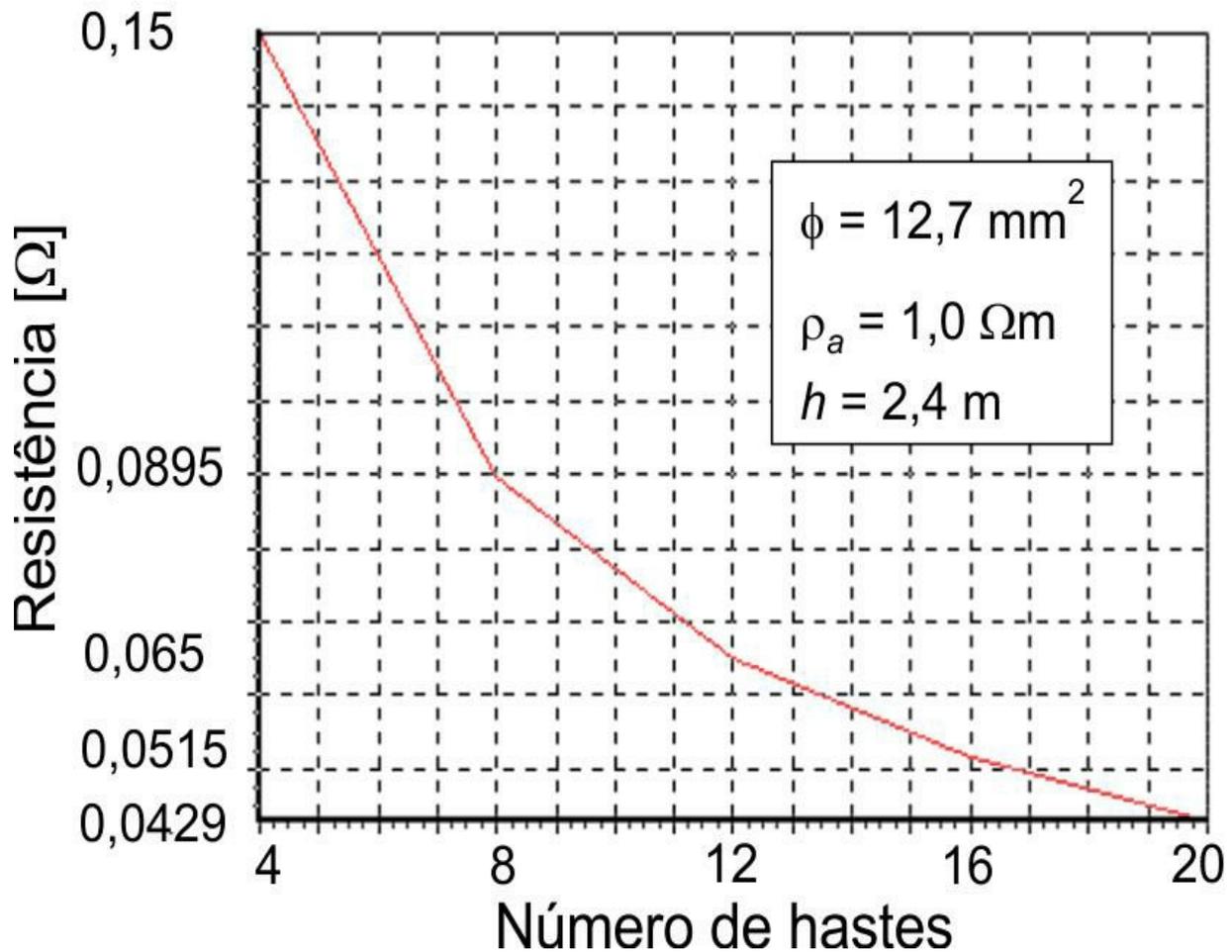


Figura 10.14: Variação da resistência de um quadrado vazio feito com hastes de 2,40 m e espaçadas de 2,40 m e com diâmetro de 12,7 mm. Considerar apenas os eletrodos com um número de hastes múltiplo de quatro.

A resistência de aterramento de quatro hastes dispostas em quadrado pode ser obtida por:

$$R = \frac{\rho_a}{8\pi h d} \left(d \ln \left(\frac{2h}{a} \right) + 2,7071h \right) \quad [\Omega]$$

em que d é o lado do quadrado [m].

Os eletrodos formados por hastes em quadrado cheio são úteis para aterramentos de altas frequências. Neste caso, as hastes do interior do quadrado são mais bem aproveitadas.

10.2.6 Hastes em círculo

A resistência do círculo formado por hastes, [Figura 10.15](#), é dada por:

$$R = \left(\frac{R_p}{n} \right) \left[1 + 0,5B + B \sum_{k=1}^{\frac{n}{2}-1} \operatorname{cosec} \left(\frac{k\pi}{n} \right) \right]$$

[Ω]

em que:

R_p a resistência de terra de uma haste [Ω];

n – número de hastes;

$B = r/L$;

L – raio do círculo [m];

$$r = \frac{h}{\ln(4h/a) - 1}$$

a – raio da haste [m].

Fazendo uso desta equação foi traçado o gráfico da [Figura 10.16](#) em que o diâmetro do círculo varia de 1 até 10 m.

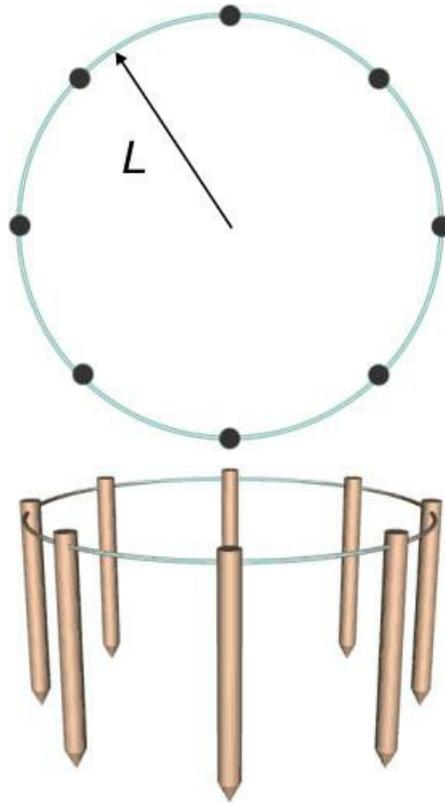


Figura 10.15: Hastes dispostas em círculo de raio L , a uma profundidade h

A distância entre duas hastes adjacentes pode ser obtida pela equação a seguir:

$$d = L \sqrt{\sin^2\left(\frac{2\pi}{n}\right) + \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)\right)^2} \quad [\text{m}]$$

Com já foi visto, para baixas frequências, a distância de melhor custo-benefício entre as hastes deve ser igual à profundidade das hastes, sendo todas as hastes de igual profundidade.

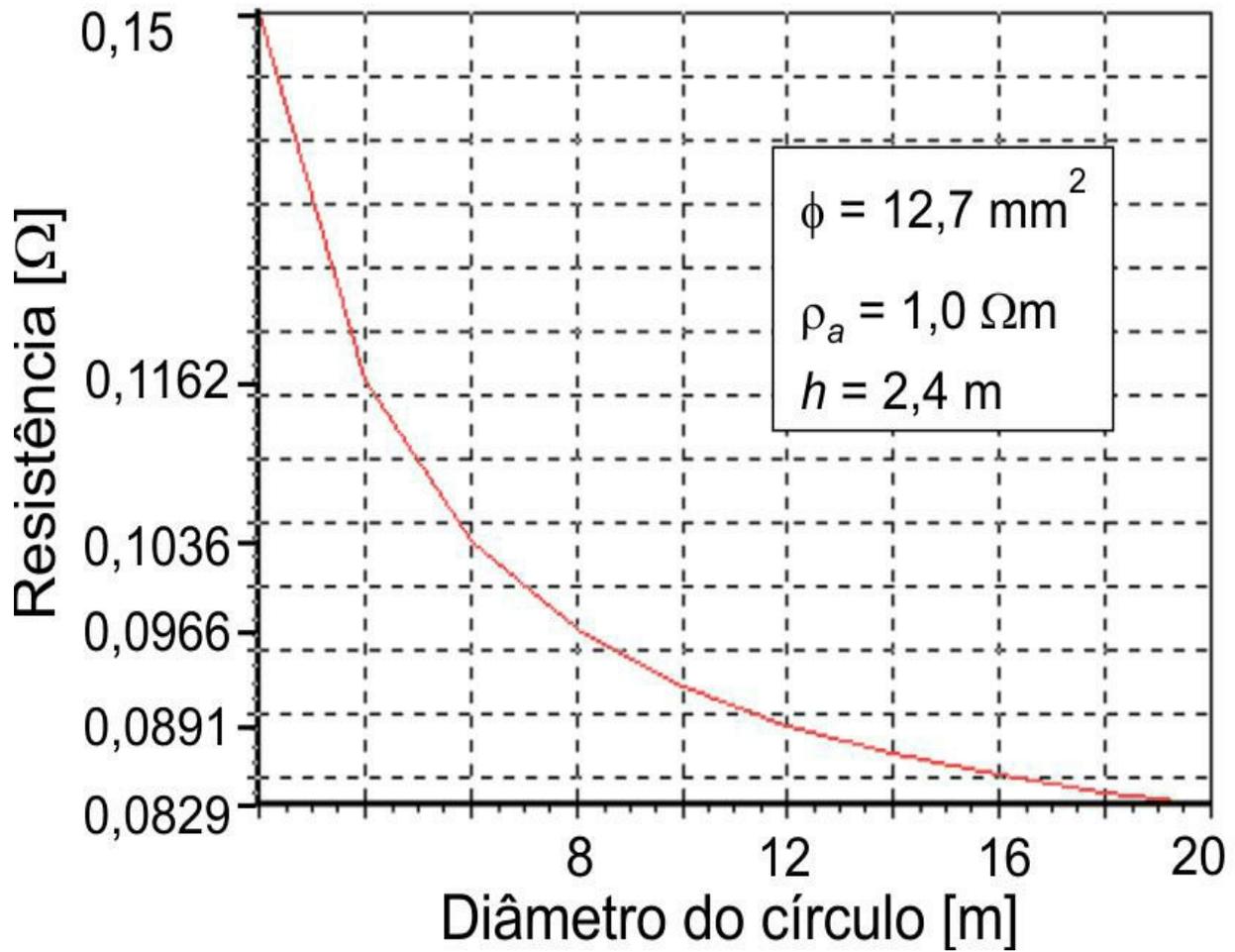


Figura 10.16: Gráfico de um círculo com seis hastes de diâmetro 12,7 mm e profundidade 2,40 m em um solo de 1,0 Ω.m

10.2.7 Hastes em triângulo

O eletrodo em triângulo é formado por hastes paralelas cravadas de modo a formar um triângulo equilátero. A [Figura 10.17](#) ilustra um eletrodo em triângulo com seis hastes.

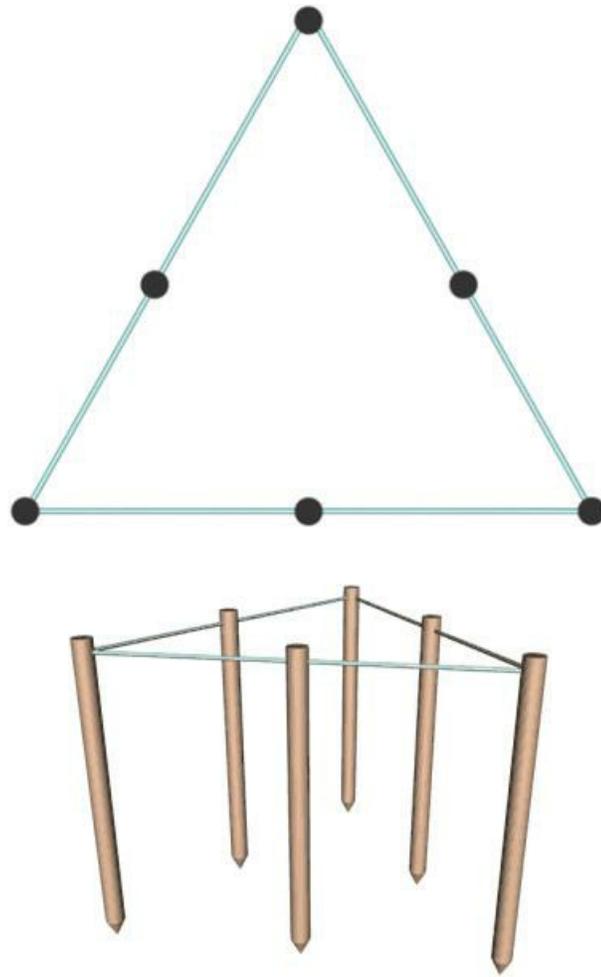


Figura 10.17: Eletrodo em triângulo equilátero, formado por seis hastes, vista de cima e em perspectiva

A resistência de terra de um eletrodo em triângulo com três hastes é

$$R = \frac{\rho_a}{6\pi h d} \left(d \ln \left(\frac{2h}{a} \right) + 2h \right) \quad [\Omega]$$

10.2.8 Comparação entre eletrodos com hastes

A comparação entre eletrodos com hastes leva em consideração apenas a resistência de terra, isto é vantajoso para baixas frequências.

Tabela 10.1: Comparação entre diferentes eletrodos; $\rho_a = 1,0 \Omega.m$, $h = 2,4 m$, espaçamento = $2,4 m$, $d = 12,7 m$ – valores em Ω

Nº de hastes	Alinhadas	Quadrado	Círculo ($L = 5 m$)	Triângulo
6	0,102535	-	0,092148	0,113645
12	0,058222	0,065043	0,061618	0,066805

Exemplo 10.3

Qual a queda de tensão entre a referência e o ponto de saída de aterramento do equipamento mostrado na [Figura 10.18](#)? O solo é de argila seca e a frequência do sinal de 0,01 A ($\approx 1,6667 V$) a ser aterrado é de 1,0 MHz. O condutor de aterramento, parte aérea, e a haste no solo têm diâmetro de 0,5 cm.

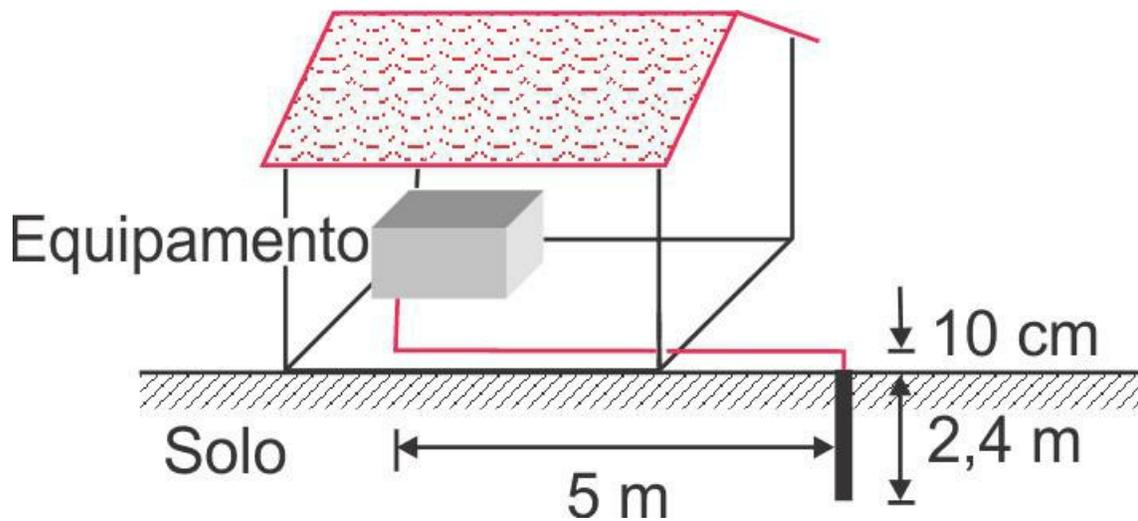


Figura 10.18: Aterramento de equipamento

Cálculo:

$$a = 0,5 \text{ cm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\sigma_{cu} = 56,5 \text{ MS/m} = 56,5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$$

Parâmetros do cabo de aterramento (linha de transmissão), [Figura 10.19](#):

$$C = \frac{2 \times \pi \times 8.854 \times 10^{-12}}{\ln(2 \times 0,1 / 0,005)} = 15,08 \text{ pF/m}$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) = \frac{4 \times \pi \times 10^{-7}}{2 \times \pi} \ln\left(\frac{2 \times 0,1}{0,005}\right) = 0,738$$

$\mu\text{H/m}$

$$R = \frac{1}{\pi a^2 \sigma} = \frac{1}{\pi \times (0,005)^2 \times 56,5 \times 10^6} = 2,25 \times 10^{-4}$$

Ω/m

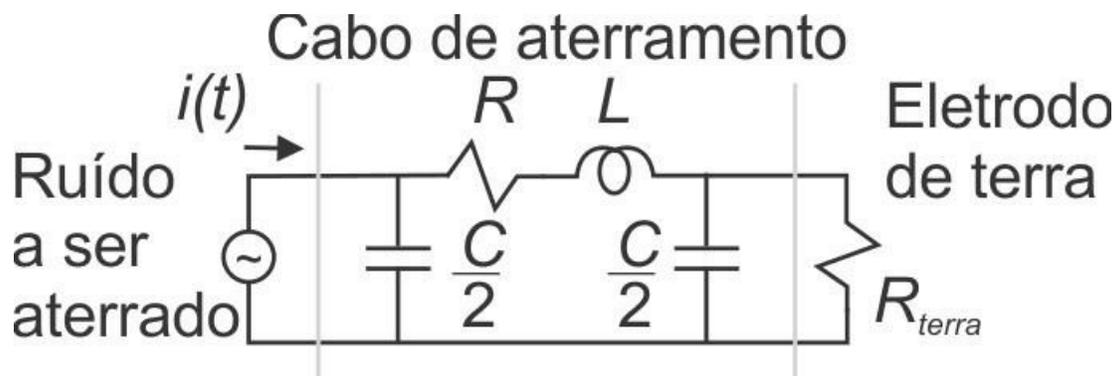


Figura 10.19: Circuito representativo do sistema de aterramento da [Figura 10.18](#)

Resistência do eletrodo de terra:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi h} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) \quad [\Omega]$$

Argila => $\rho_{\text{solo}} = 330 \Omega \cdot \text{m}$ (resistividade aparente)

$h = 2,40 \text{ m}$

$a = 0,005 \text{ m}$

$$R = \frac{330}{2 \times 3,14159 \times 2,40} \ln\left(\frac{2 \times 2,40}{0,005}\right)$$

$R = 150,3 \Omega$

Reatâncias do circuito de aterramento:

$f = 1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$

$$X_C = \frac{1}{\omega(C/2)} = \frac{1}{2 \times \pi \times 10^6 \times (5 \times 15,08 \times 10^{-9} / 2)} = 4,22 \Omega$$

$$X_L = \omega L = 2 \times \pi \times 10^6 \times 5 \times 0,738 \times 10^{-6} = 23,185 \Omega$$

Na [Figura 10.20](#) é mostrada a tensão ao longo deste cabo de aterramento. Deve-se observar que a tensão é praticamente inalterada em todo o percurso. A fonte é de 0,01 A.

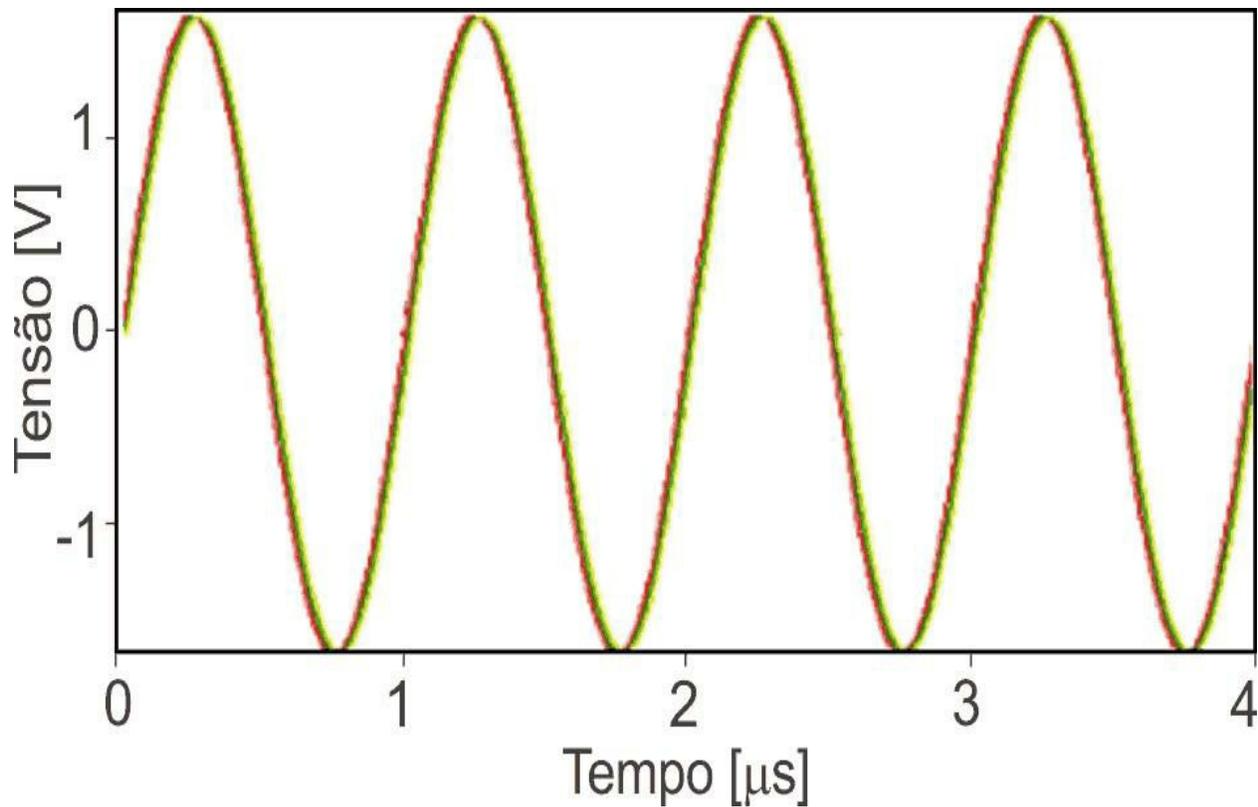


Figura 10.20: Curvas de tensão na fonte, no meio e no eletrodo de terra. Estas curvas foram calculadas com os dados do exemplo.

#

Exemplo 10.4

Como o Exemplo 10.3 só que tendo como ruído um impulso. Aproximando a frente de onda por:

$$\frac{di}{dt} \cong \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{10000}{1,2 \times 10^{-6}} = 8333333333,3$$

A/s

$$v_s = Ri + L \frac{\Delta i}{\Delta t} = Ri + L \times 8333333333,3$$

$$i_s = (C + C_{terra}) \frac{\Delta v_s}{\Delta t}$$

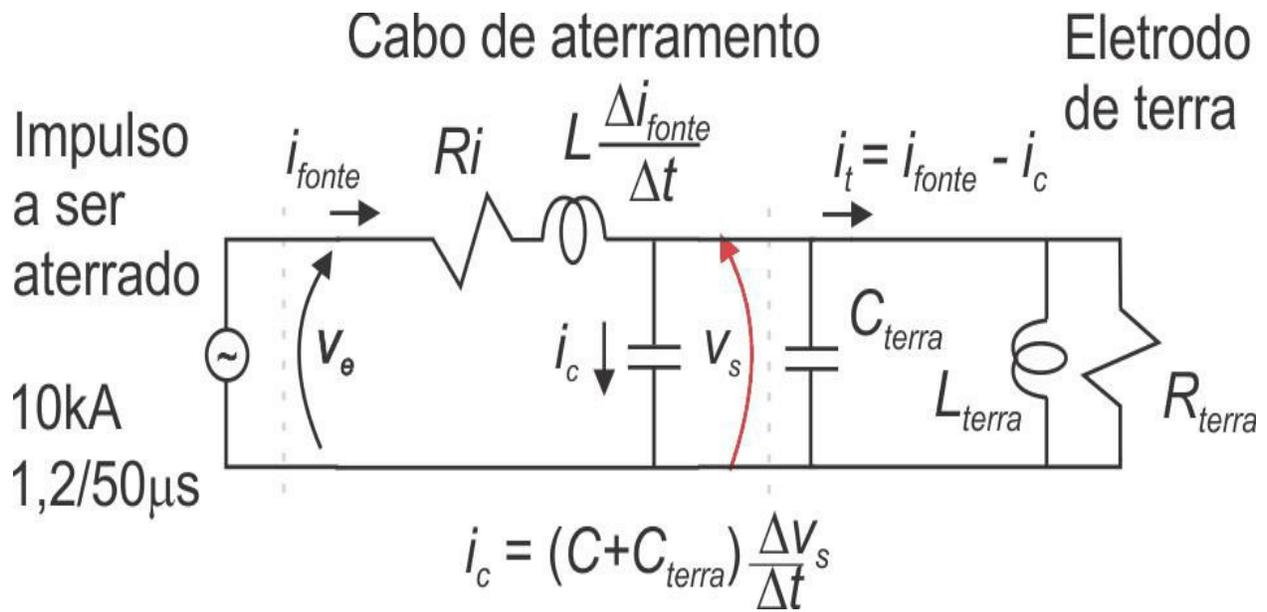


Figura 10.21: Descarga atmosférica aterrada via condutor de descida em eletrodo de terra

#

10.3 ELETRODO EM PROFUNDIDADE

Uma das técnicas para se obter uma resistência de terra pequena é por meio de um eletrodo colocado a grande profundidade. Esta profundidade pode ser de 20 metros e chegar até 60 metros. O comprimento é determinado pela resistência requerida. Devido à praticidade esse eletrodo é do tipo haste. Uma haste é fincada no solo e na ponta desta é soldada ou atarraxada outra haste, e a colocação continua, até atingir a resistência de terra desejada. Este processo é interrompido quando se atinge a resistência desejada. O processo de medição da resistência é contínuo à medida que a longa haste é cravada no solo. Um outro processo é escavar um buraco profundo e colocar um cabo de cobre e depois preencher o buraco com solo. Este último processo é mais trabalhoso pois a resistência de terra do eletrodo só é conhecida depois de o eletrodo ser instalado por completo.

Esta técnica é conveniente quando se deseja uma pequena resistência de terra para baixas frequências. Na presença de frequências elevadas e impulsos, esse tipo de eletrodo de terra pode se tornar inefetivo pois o longo comprimento do eletrodo aumenta consideravelmente a indutância. Esta indutância provoca queda de tensão ao longo do caminho até a parte mais profunda da haste de terra.

O modelo elétrico (circuito elétrico representativo) deste eletrodo é ilustrado na [Figura 10.21](#). O número de conjuntos *GLC* para representar o eletrodo em profundidade depende da precisão requerida no cálculo. Cada conjunto *GLC* deve representar um segmento eletricamente curto da haste.

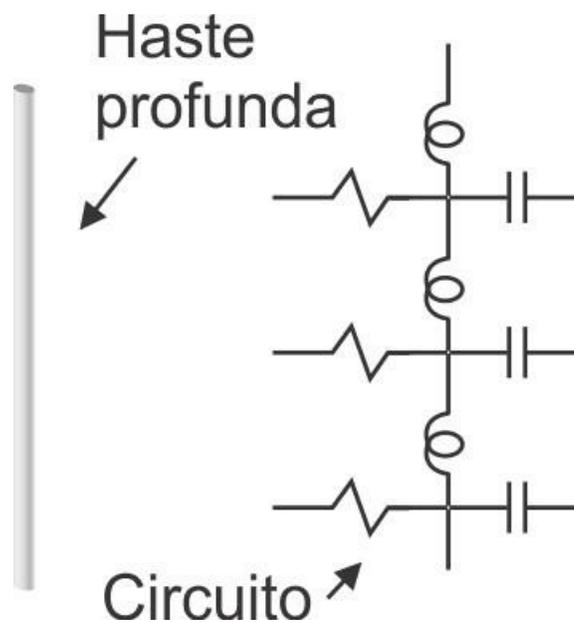


Figura 10.22: Eletrodo em profundidade e circuito representativo

A capacitância e a indutância do eletrodo podem ser obtidas pelas equações:

$$C = \frac{h\varepsilon_r}{18 \ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \quad [\text{pF}]$$

$$L = 0,02h \ln\left(\frac{2h}{a}\right) \quad [\mu\text{H}]$$

em que:

a – raio da haste [m];

h – profundidade da haste [m].

10.4 TRATAMENTO QUÍMICO

Para reduzir a resistividade do solo pode-se utilizar produtos químicos. Neste caso, cava-se um buraco maior que o da haste, preenche o buraco com o produto químico até próximo a borda. O restante do buraco é completado com o solo. A haste pode ser colocada no local antes do produto químico, ver [Figura 10.22](#).

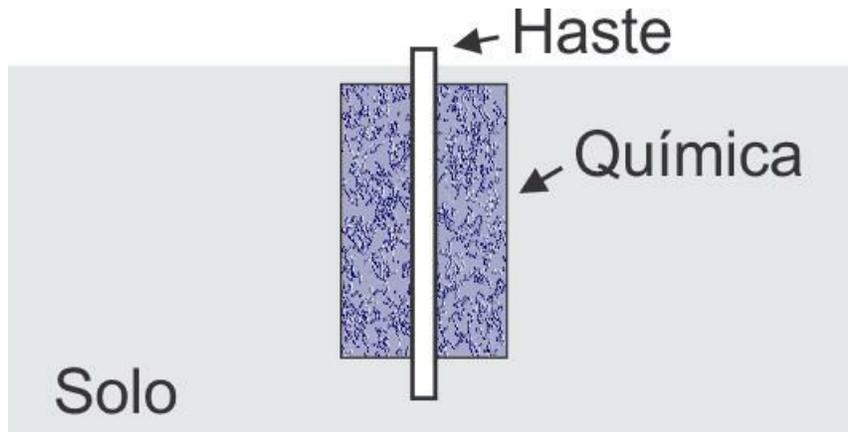


Figura 10.23: Haste com tratamento químico do solo

Em solos de alta resistividade ($> 1.000 \Omega$) o produto químico pode reduzir a resistência de terra de uma única haste em até 50%. A medida que o número de hastes de um eletrodo vai aumentando a redução percentual, devida a aplicação da química, da resistência do eletrodo vai diminuindo. O uso de duas hastes, com pequeno afastamento ($\sim h/5$), em lugar de uma, proporciona o mesmo efeito do tratamento químico. Em malhas de aterramento, em solo de alta resistividade, a redução é da ordem de 10% da resistência de terra, sendo um ganho da mesma ordem de grandeza do erro de medição da resistividade do solo.

Uma outra técnica é o uso da haste eletrolítica, [Figura 10.24](#). Esta haste também é conhecida como “saco gaúcho” e consiste na realidade de um tubo contendo sais. Estes sais são cloreto de cálcio e cloreto de sódio. Existem aberturas na parte superior da tubo que estão sempre acima do solo e na parte inferior do tubo. Os buracos na parte superior absorvem umidade. Pela parte inferior os sais se difundem em forma de ions pelo solo, reduzindo a resistividade. Uma tampa de proteção é colocada acima da haste para protegê-la e para permitir colocar mais material químico dentro do tubo quando necessário. A parte inferior do tubo é vedada.

Esta haste é utilizada em solos de alta resistividade em que é necessária uma baixa resistência de aterramento. Quando necessário, várias hastes eletrolíticas interligadas podem ser utilizadas para compor um eletrodo mais eficiente. Este tipo de eletrodo tem sido aplicado para aterrar equipamentos de microeletrônica.

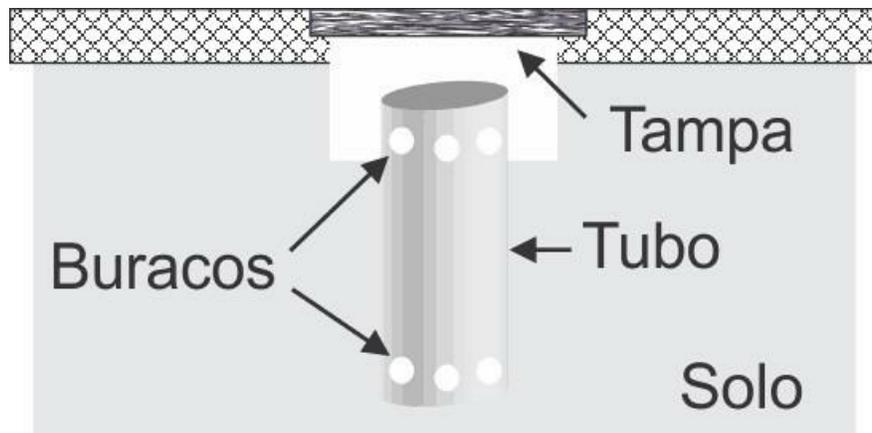


Figura 10.24: Haste eletrolítica

11 ELETRODOS COM CABOS E OUTROS

11.1 INTRODUÇÃO

Os principais eletrodos abordados neste capítulo são: linhas horizontais e anéis.

11.2 REGIÃO DE INFLUÊNCIA DOS ELETRODOS

A região de influência dos eletrodos horizontais tipo linha é mostrada na [Figura 11.1](#). Como antes, o aumento da frequência diminui a região de influência do eletrodo de terra, o mesmo acontecendo quando há um aumento do di/dt . A região de influência também é afetada pela resistividade e pela permissividade.

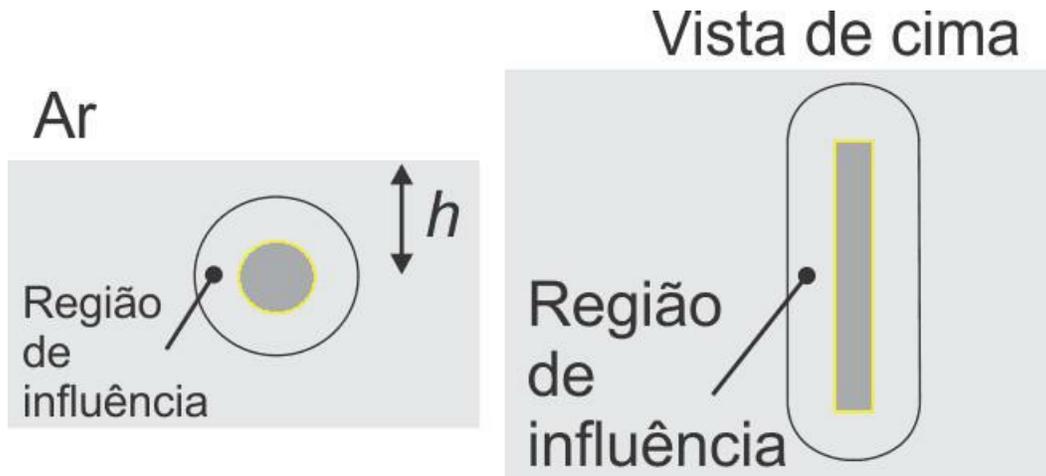


Figura 11.1: Eletrodo com cabo enterrado com sua superfície equipotencial limite, vista em corte e vista de cima

Comparando a [Figura 10.5](#) com a [Figura 11.1](#) verificamos que a região de influência de um cabo horizontal se espalha por uma área maior na superfície da terra do que a região de influência de uma haste vertical. Para que a região de influência na superfície do solo seja minimizada é necessário colocar outro condutor no subsolo de modo que o campo elétrico gerado por estes se contraponham. É deste princípio que surgiram as malhas de terra de subestações de energia.

Dois cabos enterrados horizontalmente terão uma influência mútua devido aos seus campos elétricos e magnéticos, [Figura 11.2](#).

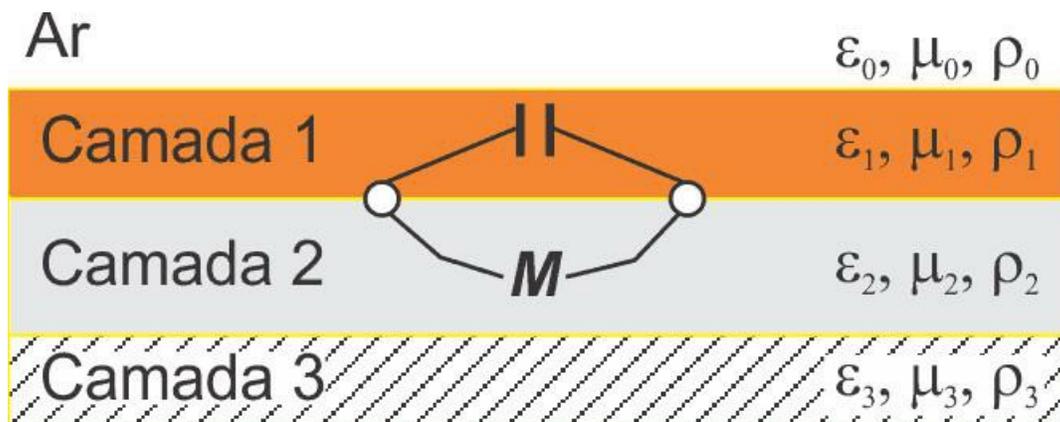


Figura 11.2: Par de cabos em um solo estratificado, influência mútua, capacitância entre os cabos e indutância mútua M

11.3 FIOS HORIZONTAIS

11.3.1 Linha na superfície

Em caso de conexão entre um dispositivo e o ponto de terra via fita ou fio nus, haverá um contato com o solo ou piso. Através deste contato há passagem de corrente da fita ou fio para o terra em pontos indevidos. Esta corrente pode fechar laços de correntes, criando campos indesejados. Esse contato também altera a impedância total do terra.

Geralmente em instalações com equipamentos de alta frequência (laboratórios, emissoras de televisão, emissoras de rádio FM, equipamentos de microondas etc.), fitas são usados para ligar os equipamentos com o ponto de aterramento. Estas fitas ficam em contato com o solo ou o chão da instalação.

11.3.2 Linha enterrada

Uma linha enterrada, [Figura 11.3](#), pode ser na prática um fio, um cabo nu ou um outro condutor linear. Estas linhas são utilizadas em ligações diversas entre eletrodos de terra ou entre sistemas de aterramento. A região de influência também está presente neste tipo de eletrodo de aterramento. E esta região de influência é que faz com que a resistência não diminua proporcionalmente com o aumento do cabo, [Figura 11.4](#).

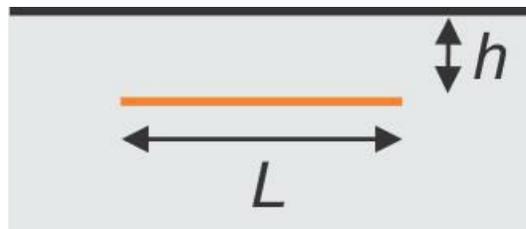


Figura 11.3: Condutor de comprimento L enterrado horizontalmente a uma profundidade h

A resistência para uma linha horizontal enterrada pode ser calculada por:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{2L}{a}\right) - 1 + \ln\left(\frac{L + \sqrt{4h^2 + L^2}}{2h}\right) + \frac{2h}{L} - \frac{\sqrt{4h^2 + L^2}}{L} \right]$$

[Ω]

em que a é o raio do condutor [m].

Em regiões frias, em que durante certos períodos do ano a temperatura do solo leva ao congelamento da água contida neste, é conveniente enterrar o cabo a uma profundidade no mínimo de 60 cm (dois pés). Esta profundidade varia de acordo com a camada de solo congelado. Em regiões antárticas esta profundidade pode ser mais de 60 cm.

Nas regiões em que o ponto de congelamento do solo nunca é atingido, a profundidade dependerá das demais características técnicas e práticas envolvidas.

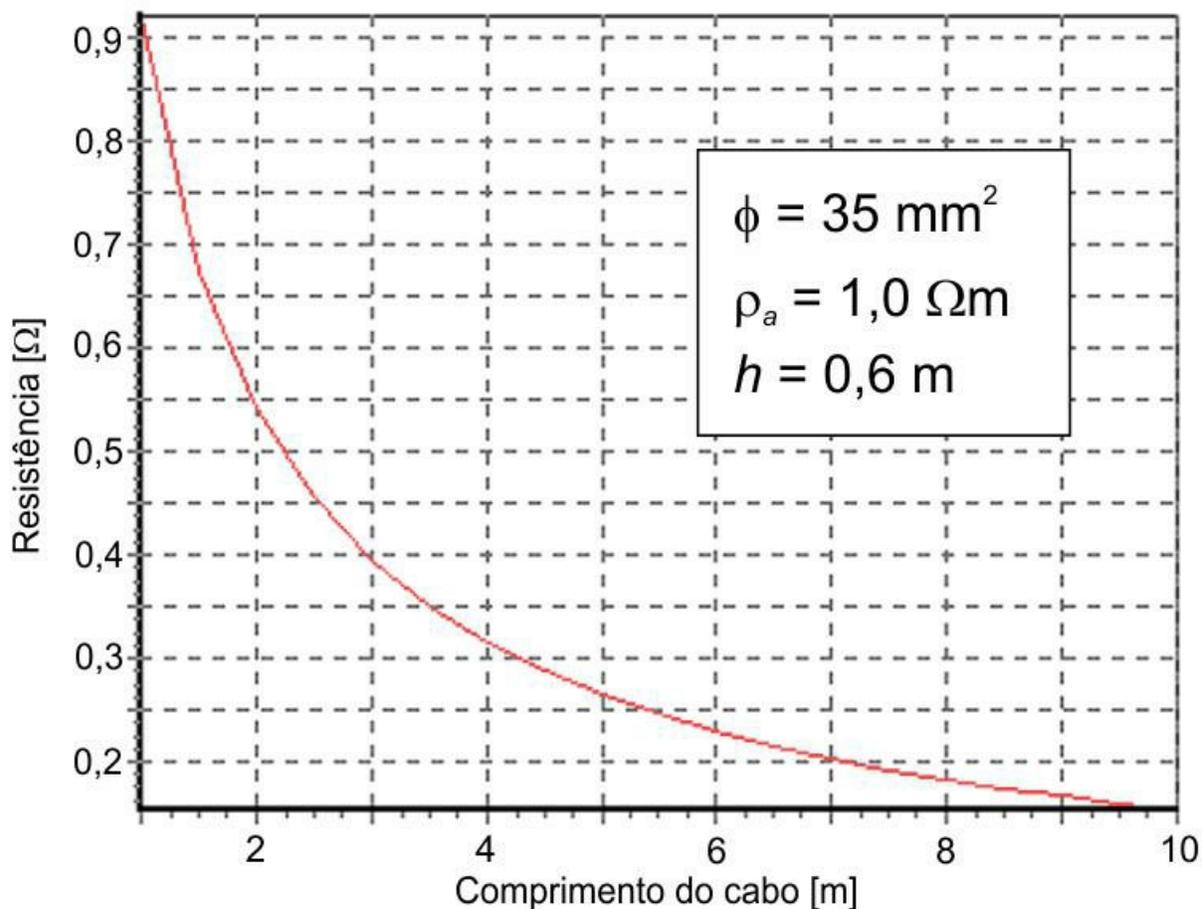


Figura 11.4: Variação do comprimento de uma linha de 35 mm² enterrada horizontalmente a 60 cm e solo de resistividade de 1,0 Ω.m

Para saber a resistência de uma linha enterrada em um solo de resistividade aparente ρ_a , basta multiplicar ρ_a pelo valor da resistência mostrado no gráfico da [Figura 11.4](#). Por exemplo: $\rho_a = 436 \text{ } \Omega\text{.m}$, $L = 2 \text{ m}$ e diâmetro 35,0 mm² então $436 \times 0,55 = 135,3 \text{ } \Omega$. A resistência de terra varia pouco com a bitola do cabo.

11.3.3 Linhas em paralelo na superfície

As linhas em paralelo na superfície são eletrodos formados por fios ou cabos nus deitados sobre o solo e em paralelo ou pisos condutores. Em muitos casos, estes são encontrados não com a finalidade de serem um caminho deliberado para o terra mas como um caminho acidental para o terra. Dutos sobre a superfície do solo também estão aterrados pelo contato. Os cabos de aterramento correndo em paralelo se aproximam do efeito que teria uma fita de aterramento na mesma posição e no mesmo local.

11.4 FIOS RADIAIS

11.4.1 Fios cruzados

Os fios cruzados são muito usados para fazer um plano de terra de antenas de comunicação. Estas antenas são monopolos que devem estar acima de um plano terra ideal; como na prática o solo tem condutividade finita colocam-se estes fios cruzados para melhorar a imagem da antena no solo. O emprego destes tipos de eletrodos é extenso. A corrente de terra é facilmente espalhada pelo solo. A [Figura 11.5](#) mostra alguns tipos de eletrodos com fios cruzados.

O gráfico da [Figura 11.6](#) faz uma comparação entre os diversos tipos de eletrodos com cabos radiais e paralelos à superfície do solo mostrado na [Figura 11.5](#). A [Figura 11.6](#) mostra o valor da resistência de terra para cada eletrodo.

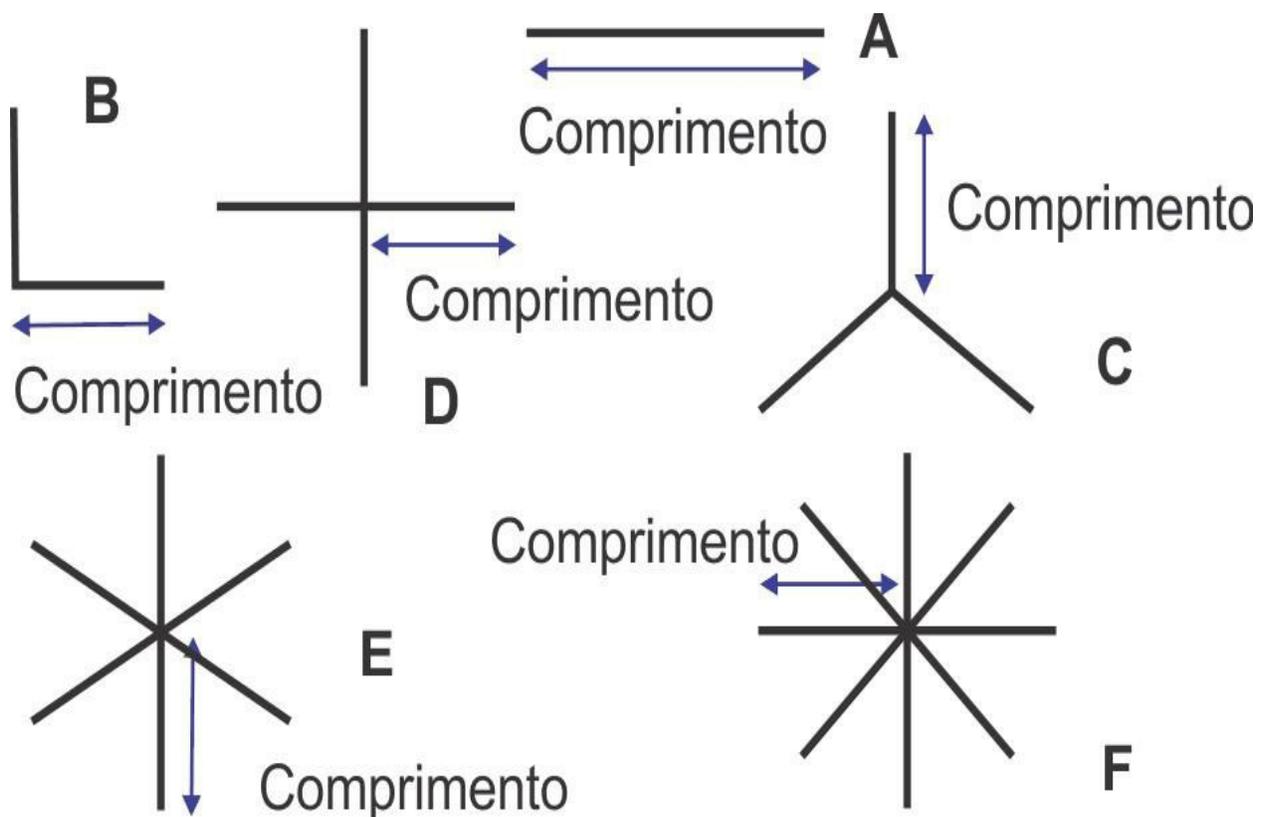


Figura 11.5: Linhas radiais formando um eletrodo de aterramento, vista de cima. A – uma linha; B – duas linhas em L; C – três linhas em Y; D – quatro linhas formando uma cruz; E – seis linhas radiais e F – oito linhas radiais

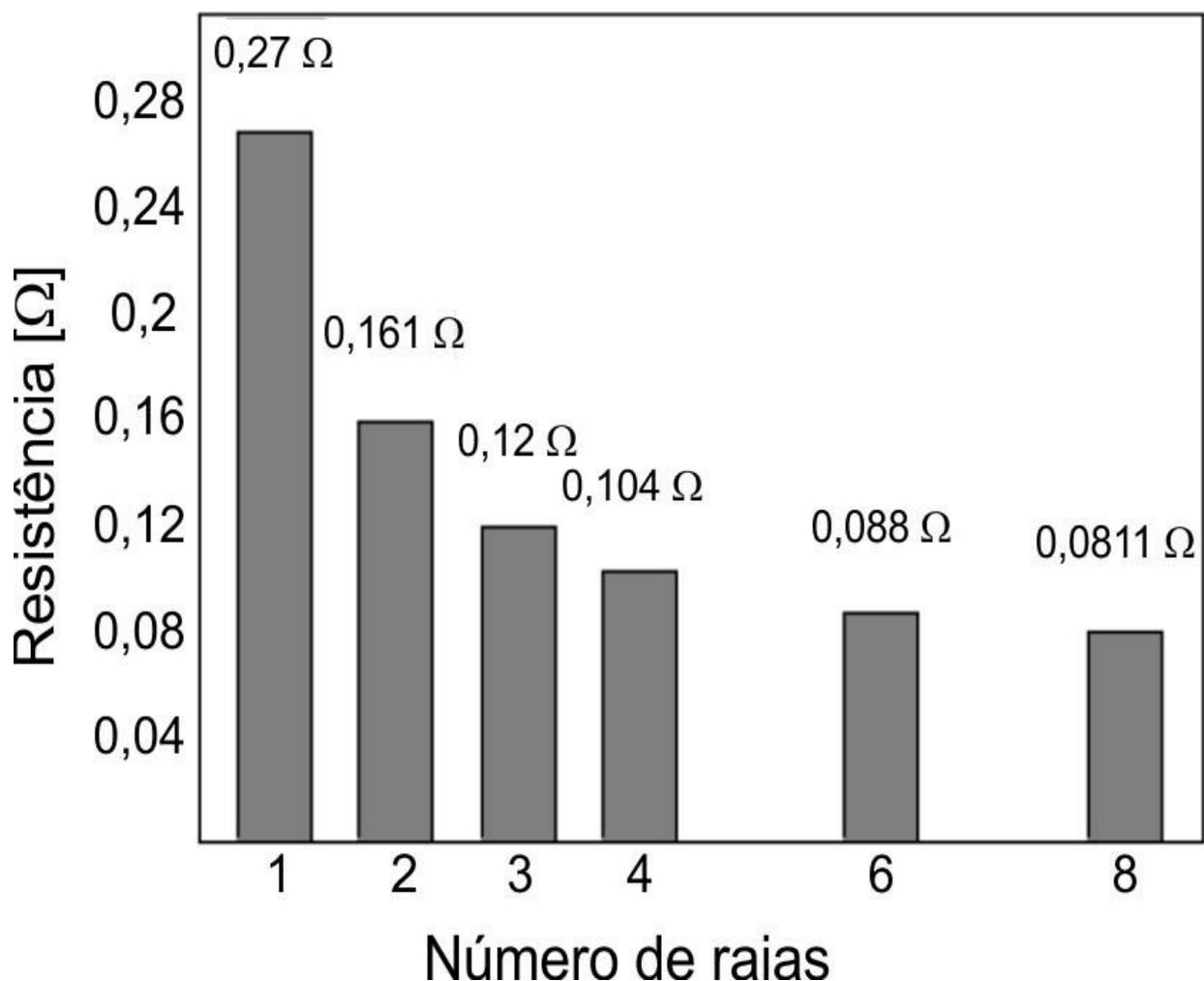


Figura 11.6: Comparação da resistência de terra de eletrodos radiais; bitola 35 mm², profundidade de 0,5 m e resistividade de 1,0 Ω.m. Os valores dentro dos retângulos estão em Ω.

11.4.2 Eletrodo em L

O eletrodo em L consiste de cabos de igual comprimento formando um ângulo de 90°, tendo um formato que lembra a letra L, e enterrados a uma profundidade h . A [Figura 11.7](#) ilustra este eletrodo e a equação seguinte a figura é usada para calcular a resistência de terra deste eletrodo. Os comprimentos dos cabos podem ser diferentes.

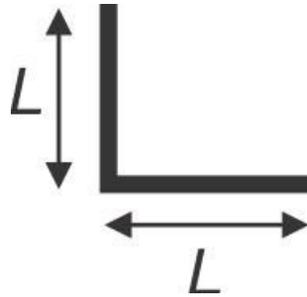


Figura 11.7: Eletrodo em L enterrado a uma profundidade h

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{L}{a}\right) + \ln\left(\frac{L}{2h}\right) - 0,2373 + 0,8584 \frac{h}{L} + 1,656 \frac{h^2}{L^2} - 10,8544 \frac{h^4}{L^4} \right]$$

[Ω]

O gráfico da [Figura 11.8](#) mostra a variação da resistência de terra com o comprimento dos cabos do eletrodo em L. Os parâmetros usados para a construção do gráfico estão descritos na legenda da [Figura 11.8](#).

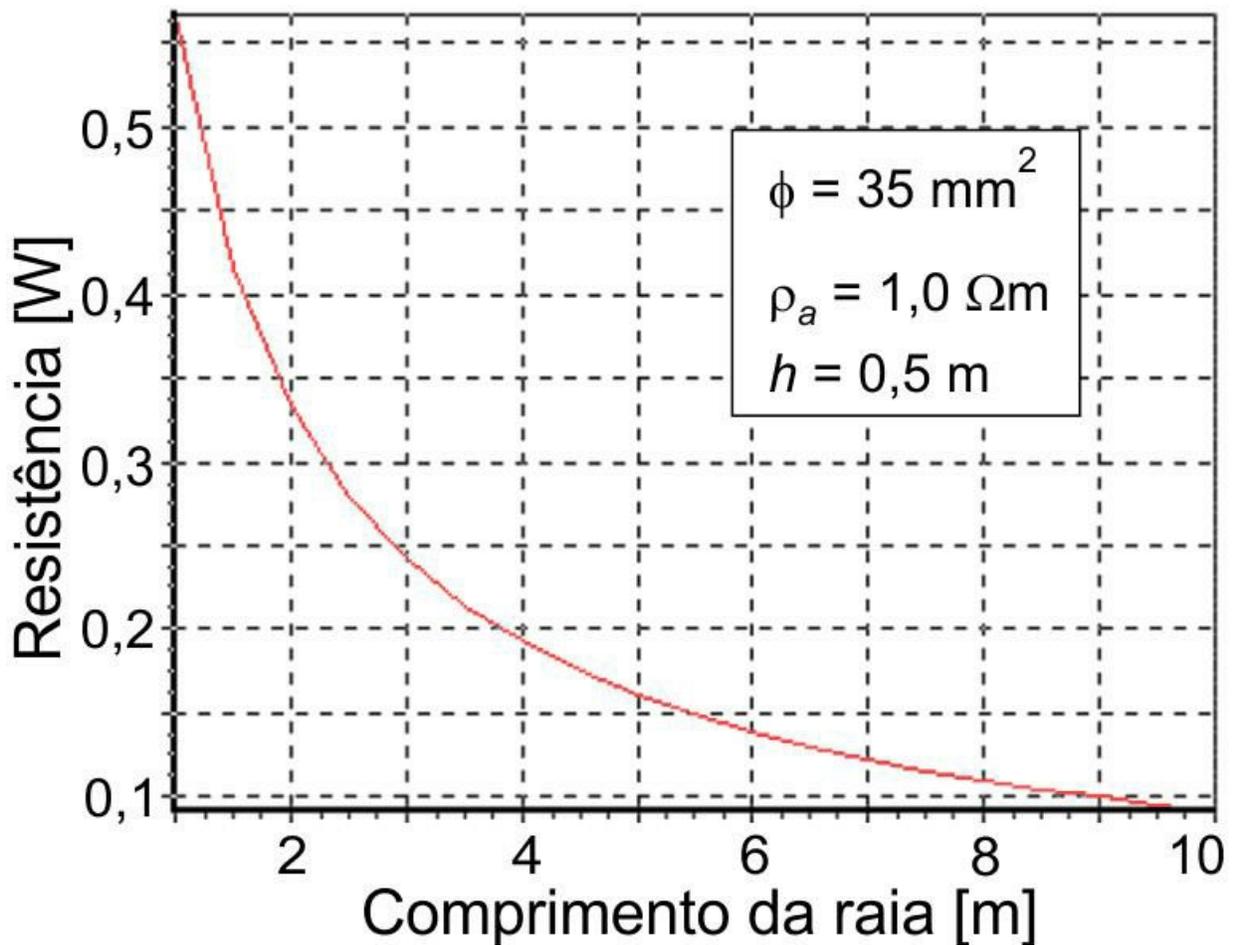


Figura 11.8: Variação da resistência de terra de um L *versus* o comprimento dos condutores, enterrados a 0,5 m e feito com cabos de 35,0 mm², resistividade aparente de 1,0 Ω.m.

Para saber a resistência de um L enterrado a 0,5 m com bitola dos cabos de 35,0 mm² em um solo de resistividade aparente ρ_a , basta multiplicar ρ_a pelo valor da resistência mostrado no gráfico da [Figura 11.8](#). Por exemplo: $\rho_a = 138 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, $L = 4 \text{ m}$ e diâmetro 35,0 mm² então, a partir do gráfico, $138 \times 0,19 = 26,22 \text{ } \Omega$ (por cálculo = 26,5866 Ω).

11.4.3 Eletrodo em Y

O eletrodo em Y também é conhecido como pé de galinha, veja a [Figura 11.9](#), os três dedos que constituem este eletrodo têm o mesmo comprimento L .

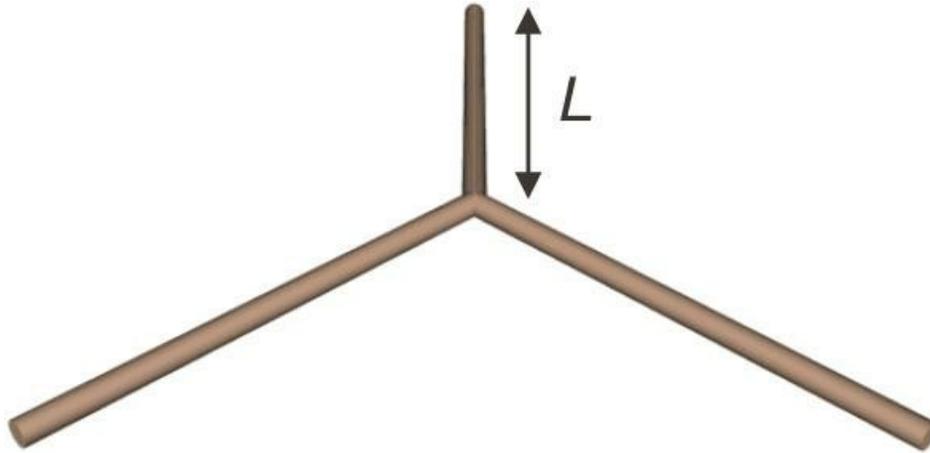


Figura 11.9: Eletrodo em Y enterrado a uma profundidade h

A equação para obter a resistência de terra para um eletrodo em Y é:

$$R = \frac{\rho_a}{3\pi L} \left[\ln\left(\frac{L}{a}\right) + \ln\left(\frac{L}{2h}\right) + 1,071 - 0,836\frac{h}{L} + 3,808\frac{h^2}{L^2} - 13,824\frac{h^4}{L^4} \right]$$

[Ω]

em que a é o raio do condutor [m]. O gráfico da [Figura 11.10](#) foi obtido para o eletrodo Y com os dados mostrados na legenda da mesma figura.

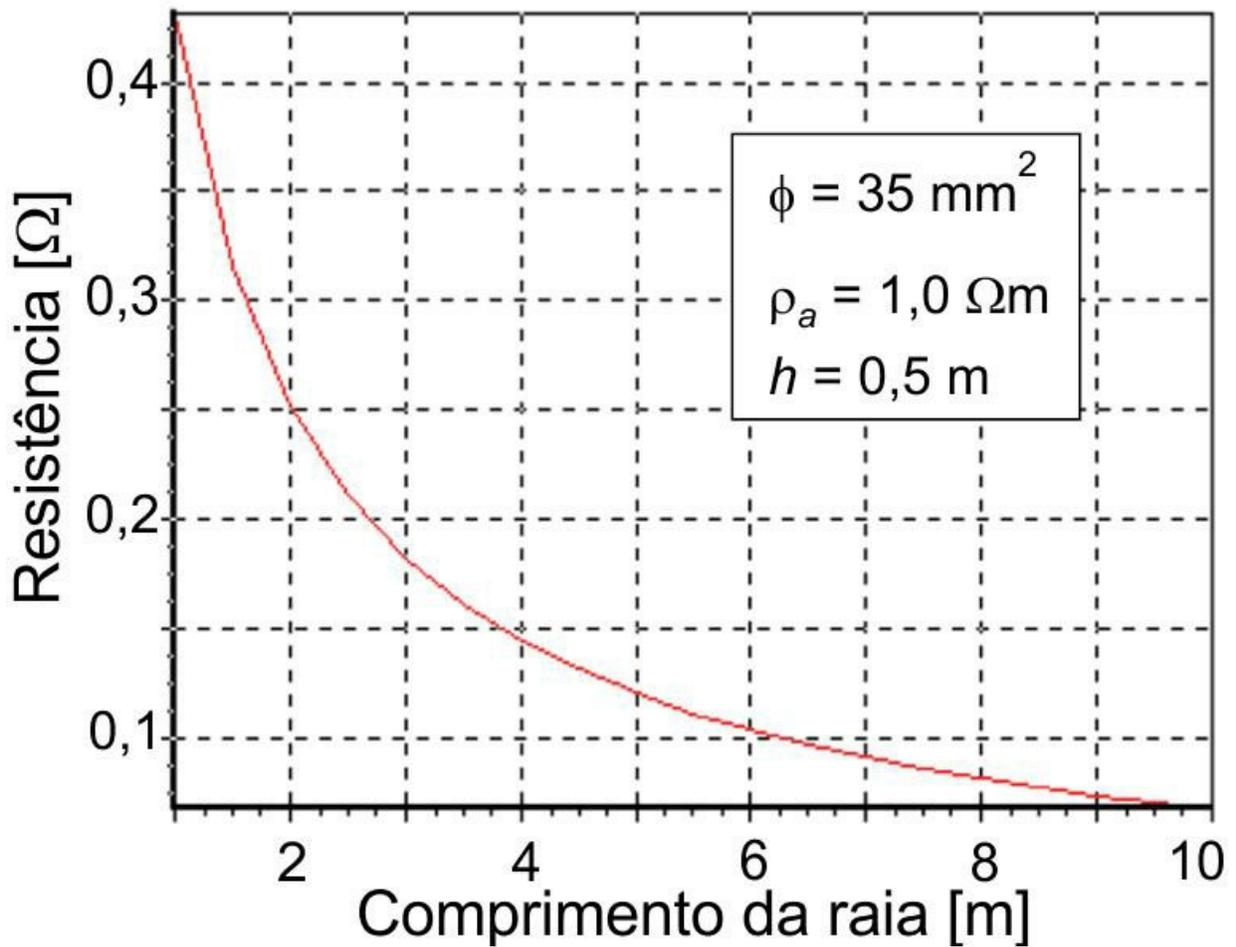


Figura 11.10: Variação da resistência com o comprimento da raia, sendo a profundidade de 0,5 m, bitola do condutor de 35 mm² e resistividade de 1,0 Ω.m.

11.4.4 Outros cruzamentos

Quatro condutores radiais formando uma cruz, [Figura 11.5D](#), segue a equação para cálculo da resistência de terra deste tipo de eletrodo:

$$R = \frac{\rho_a}{4\pi L} \left[\ln\left(\frac{L}{a}\right) + \ln\left(\frac{L}{2h}\right) + 2,912 - 4,284 \frac{h}{L} + 10,32 \frac{h^2}{L^2} - 37,12 \frac{h^4}{L^4} \right]$$

[Ω]

Seis condutores radiais, como mostrado na [Figura 11.11](#), e a equação para cálculo da resistência de terra:

$$R = \frac{\rho_a}{6\pi L} \left[\ln\left(\frac{L}{a}\right) + \ln\left(\frac{L}{2h}\right) + 6,851 - 12,512 \frac{h}{L} + 28,128 \frac{h^2}{L^2} - 125,44 \frac{h^4}{L^4} \right]$$

[Ω]

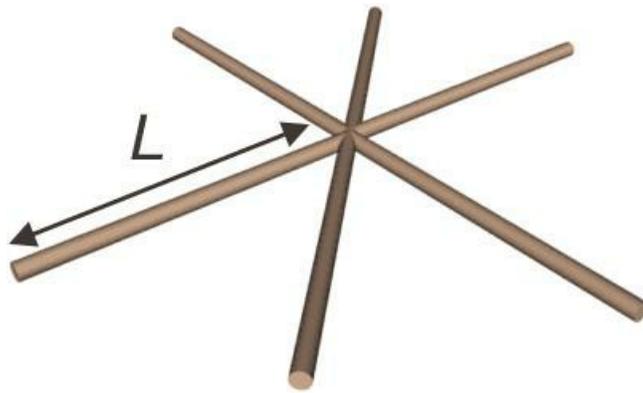


Figura 11.11: Eletrodo com seis cabos radiais de igual comprimento, L

Oito condutores radiais com o mesmo ângulo entre os condutores adjacentes, [Figura 11.12](#), segue a equação para o cálculo da resistência de terra para este tipo de eletrodo:

$$R = \frac{\rho_a}{8\pi L} \left[\ln\left(\frac{L}{a}\right) + \ln\left(\frac{L}{2h}\right) + 10,98 - 22,04 \frac{h}{L} + 52,16 \frac{h^2}{L^2} - 299,52 \frac{h^4}{L^4} \right]$$

[Ω]

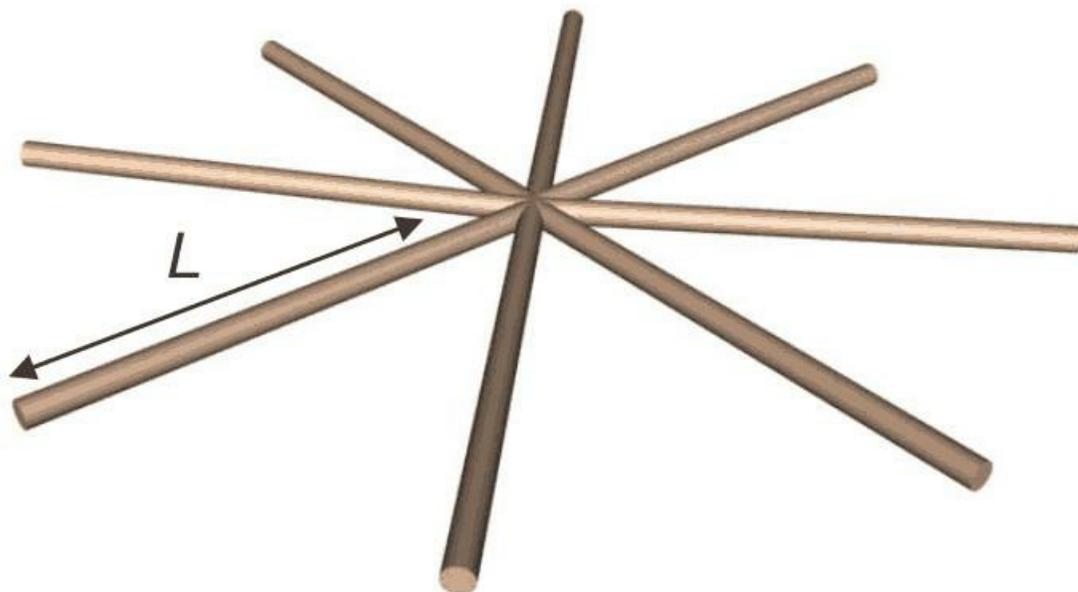


Figura 11.12: Eletrodo com oito cabos radiais de igual comprimento, L

11.5 FITA

Uma fita condutora pode ser usada como meio de aterramento, veja [Figura 11.13](#).

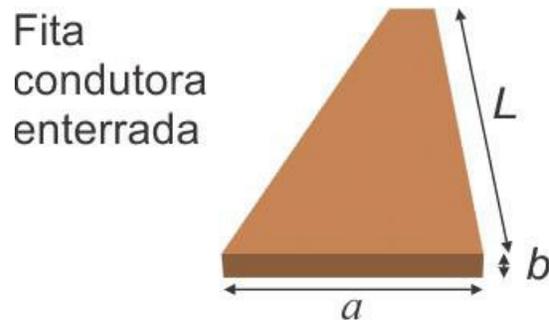


Figura 11.13: Eletrodo de terra em fita enterrado a uma profundidade h e largura a .

A equação para obtenção da resistência de aterramento de uma fita enterrada é, válida para que $8b < a$:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{2L}{a}\right) + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln\left(\frac{L}{h}\right) - 1 + \frac{2h}{L} - \frac{h^2}{L^2} + \frac{h^4}{2L^4} \right]$$

[Ω]

em que:

a – largura da fita [m];

b – espessura da fita [m];

L – comprimento da fita [m];

h – profundidade [m].

11.6 ANEL ENTERRADO

O eletrodo em anel pode ser encontrado em muitas instalações de equipamentos de potência construídas em campo aberto, distantes de outras instalações. Uma das características deste eletrodo é a capacidade de distribuir uniformemente o campo elétrico no solo. A tensão de passo na superfície do solo acima do interior do anel tende a ser reduzida em comparação com a parte fora do anel. Segue a equação para obtenção da resistência de terra do anel e a [Figura 11.14](#) com a representação dos parâmetros utilizados na equação:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi^2 L} \left[\ln\left(\frac{8L}{a}\right) + \ln\left(\frac{2L}{h}\right) \right] \quad [\Omega]$$

em que:

L – diâmetro do anel [m];

a – raio do condutor [m].

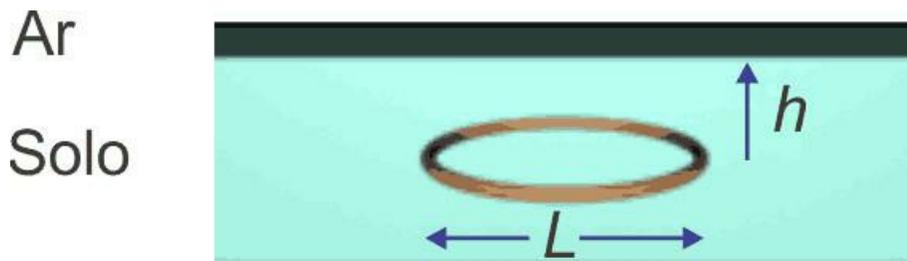


Figura 11.14: Eletrodo de anel de diâmetro L enterrado a uma profundidade h

11.7 ESFÉRICOS

11.7.1 Semiesfera

O eletrodo em semiesfera não é um terra prático. Este eletrodo é utilizado para entendimento do processo de escoamento da corrente no solo pela sua simplicidade geométrica. Além disto, eletrodos com tratamento químico podem ser aproximados por um terra semiesférico para facilitar a análise.

A resistência de terra do eletrodo semiesférico é dada por:

$$R = \rho_d / (2\pi a) \quad [\Omega]$$

em que a é o raio da semiesfera [m].

A resistência de um eletrodo semiesférico com solo tratado quimicamente pode ser obtida por:

$$R = \frac{\rho_a}{2\pi a} + \frac{\rho_q}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{a_q} \right) \quad [\Omega]$$

em que:

a_q – raio geométrico da região do solo que foi tratada quimicamente [m];

ρ_q – resistividade da região do solo tratada quimicamente [$\Omega \cdot m$].

11.7.2 Esfera enterrada

O eletrodo em forma de esfera, [Figura 11.15](#), é útil para estimar a resistência de terra de objetos, quaisquer, condutores utilizados como eletrodos de terra. Como exemplo, têm-se os radiadores de automóveis muito usados no passado. Observa-se aqui que estes radiadores eram feitos de cobre. As esferas enterradas são utilizadas em experimentos por terem um campo elétrico uniforme.



Figura 11.15: Eletrodo esférico enterrado

A resistência de terra de uma esfera enterrada é

$$R = \frac{\rho a}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{2h} \right) \quad [\Omega]$$

em que:

a – raio da esfera [m].

11.8 PLACAS

11.8.1 Disco na superfície

Os discos na superfície, [Figura 11.16](#), são utilizados para criar uma superfície equipotencial. Esta aplicação evita o aparecimento de tensões de passo prejudiciais na superfície do disco. Muitas vezes são usadas placas retangulares e telas. A resistência de terra de um disco na superfície é:

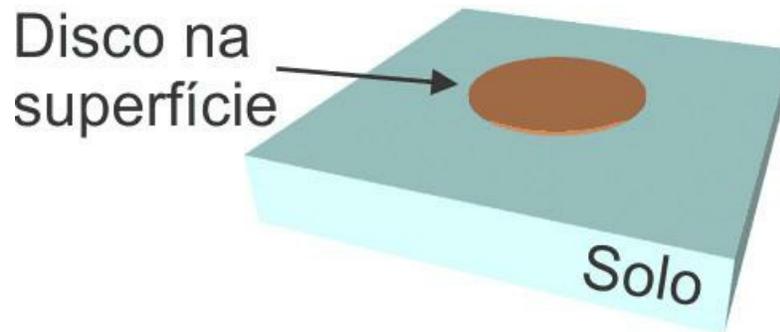


Figura 11.16: Eletrodo em disco na superfície

$$R = \rho_a / (2L) \quad [\Omega]$$

em que L é o diâmetro do disco [m].

11.8.2 Disco enterrado

A resistência de um eletrodo enterrado com a forma de um disco paralelo à superfície do solo, [Figura 11.17](#), é, para $h > L/2$,

$$R = \rho_a \left(\frac{1}{4L} + \frac{1}{8\pi h} \right) \quad [\Omega]$$

e para $h < L/2$

$$R = \frac{\rho_a}{2L} \left(1 - \frac{8h}{\pi L} \right) \quad [\Omega]$$

em que L é o diâmetro do disco [m] e h é a profundidade [m].

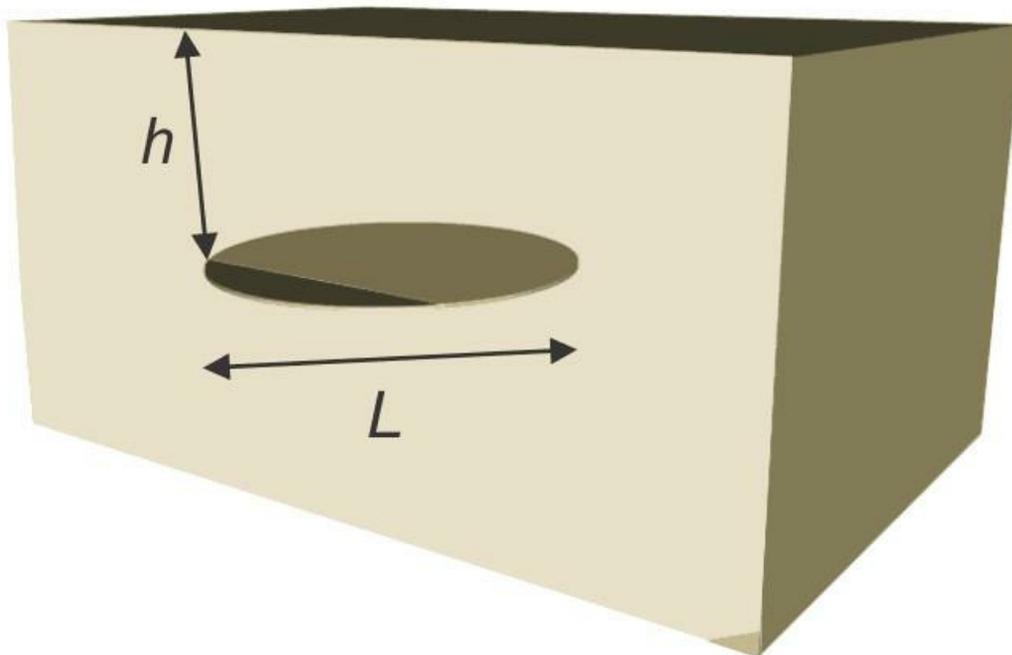
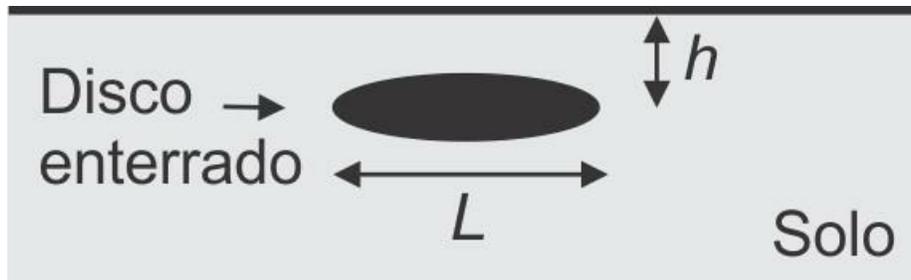


Figura 11.17: Eletrodo em disco de diâmetro L enterrado a uma profundidade h

11.8.3 Placa retangular enterrada

A placa enterrada é mais um tipo de eletrodo. Este eletrodo é de fácil construção e semelhante ao disco enterrado. A resistência de terra da placa retangular pode ser obtida com a equação da resistência de terra da fita enterrada.

11.9 NÃO-LINEARIDADES NO SUBSOLO

Os efeitos não-lineares que ocorrem no subsolo quando o eletrodo está escoando uma corrente elevada, estes efeitos afetam o desempenho dos eletrodos discutidos neste capítulo. As técnicas mostradas para eletrodos com hastes também se aplicam a estes eletrodos.

11.10 TRATAMENTO QUÍMICO

Produtos químicos podem ser utilizados em conjunto com eletrodos de aterramento horizontais. Estes produtos ficam dispostos na vala do condutor como ilustrado na [Figura 11.18](#). Após abrir a trincheira colocar um pouco de produto químico. Em cima desta química coloca-se o condutor de aterramento, ilustrado com um círculo na [Figura 11.18](#). O condutor é então coberto com mais uma camada de produto químico. Para completar o enchimento da vala utilizar o solo retirado para abrir o buraco.

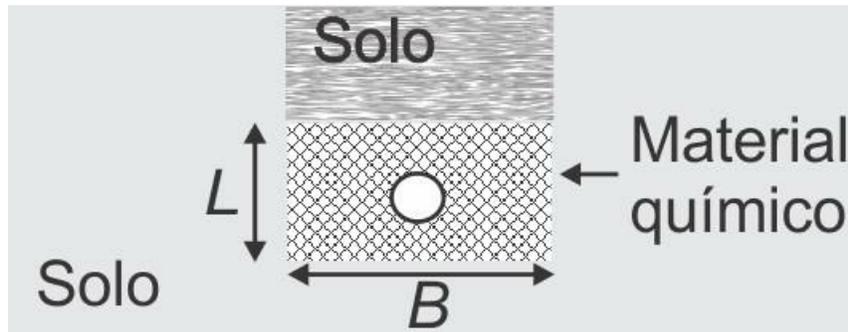


Figura 11.18: Eletrodo em horizontal envolto com produto químico

A resistência de terra de eletrodos compostos de cabos imersos em material químico pode ser calculada levando-se em conta que o condutor e a vala têm um raio equivalente a:

$$a_{equivalente} = a \left(\frac{a_{químico}}{a} \right)^{1 - \frac{\rho_{químico}}{\rho_{solo}}} \quad [m]$$

em que:

a – raio do condutor cilíndrico [m];

$\rho_{químico}$ – resistividade do produto químico [$\Omega \cdot m$];

ρ_{solo} – resistividade do solo [$\Omega \cdot m$];

$$a_{químico} = \sqrt{\frac{B \cdot L}{\pi}} \quad [m]$$

B – base da seção reta retangular da trincheira [m];

L – lateral da seção reta retangular da trincheira [m].

Este resultado é válido para hastes sendo que $a_{químico}$ passa a ser o raio do buraco, se circular, em que a química que envolve a haste se encontra.

12 MALHA DE TERRA

12.1 INTRODUÇÃO

As malhas de terra são usadas em subestações de energia, laboratórios de alta-tensão, centrais telefônicas e em vários outros tipos de instalações. Nestas instalações a malha de terra tem várias finalidades, entre as mais comuns estão:

- Criar uma área na superfície do solo com tensão de passo suportável;
- Criar um terra de baixa impedância;
- Criar um terra de equipotencial.

Tradicionalmente as malhas de aterramento têm sido projetadas para terem uma baixa resistência de aterramento e uma tensão de passo e de toque suportáveis ao ser humano. Estes procedimentos foram estabelecidos há muito tempo pelo IEEE *standard* 80 e adotado no projeto e construção de malhas de aterramento até recentemente. Algumas evoluções foram feitas quanto ao cálculo da tensão de passo da malha de terra para uma determinada corrente de baixa frequência injetada na malha. Várias sofisticções deste processo vêm sendo consideradas para que o cálculo fique cada vez mais apurado. Infelizmente este caminho evolutivo é inadequado, pois atenta unicamente para condições de baixa frequência. Por mais que evolua não atenderá às condições de segurança de pessoal para tensões impulsivas. A análise para baixa frequência não atende às exigências da compatibilidade eletromagnética que estão cada vez mais restritas devido à grande sensibilidade dos equipamentos e à necessidade de manter o sistema ininterrupto para fins de qualidade de serviço (qualidade de energia). Uma malha projetada para condições de baixa frequência não está necessariamente garantindo a segurança de pessoal e equipamentos para condições de impulso, início de curto-circuito e altas frequências.

Neste capítulo serão analisadas as condições de baixa frequência e de alta frequência (impulsos) de uma malha de aterramento. No entanto, a intenção não é esgotar o assunto de malhas de aterramento nestas páginas, este tema é consideravelmente extenso, necessitando uma análise mais profunda e ampla. Aqui serão mostrados os aspectos fundamentais relativos a uma malha de aterramento tais como: conexão de equipamentos a esta, tensões de toque e de passo e cálculos básicos relativos a uma malha.

Uma malha de terra pode ser construída com várias finalidades, sendo uma delas a de ser um ponto de fuga para a corrente que circula no sistema de aterramento. Este ponto serve para atrair a corrente de descarga atmosférica para longe da instalação, desviando assim os transitórios e campos indesejados gerados no aterramento. Esta malha é a malha atratora e tem pequenas dimensões, o que facilita a sua colocação em camadas de solo de alta condutividade. A malha atratora pode ser considerada o terra do terra. A interligação desta com o sistema de aterramento deve ser feita por mais de um cabo para se ter uma baixa impedância na interligação.

12.2 RESISTIVIDADE APARENTE DA MALHA

A malha de aterramento em geral está em um solo de multicamadas. Este solo pode ser reduzido para um solo equivalente de duas camadas a fim de simplificar o cálculo. Para maiores simplificações estas duas camadas podem ser transformadas em um solo homogêneo com uma resistividade equivalente. O processo de reduzir o solo a duas camadas é o mesmo mostrado para os eletrodos de terra. Para reduzir estas duas camadas a uma única homogênea, deve-se multiplicar a resistividade da camada da superfície pela função N tal que:

$$\rho_a = N \rho_{superfície}$$

em que:

ρ_a – resistividade aparente do solo para a malha em questão [$\Omega.m$];

$\rho_{superfície}$ – resistividade da camada superior [$\Omega.m$];

N – função de transformação (ver curvas no apêndice).

Exemplo 12.1

Qual a resistividade aparente para uma malha de terra em um solo de duas camadas? A primeira camada tem uma profundidade 2 m e uma resistividade de 150 $\Omega.m$, a resistividade da segunda camada é de 1.000 $\Omega.m$. A malha está a uma profundidade de 0,5 m e tem o lado de 200 m.

Cálculo:

Sendo:

$$\rho_a = N \rho_{superfície}$$

e

$$\alpha = a/d$$

$$\alpha = 400/28,3 = 14,14$$

$$\rho_{\infty} / \rho_{superfície} = 1.000/150 = 6,7$$

$N = 2,67$ e substituindo os valores:

$$\rho_a = 2,67 \times 150 = 400 \Omega.m$$

#

12.3 RESISTÊNCIA E IMPEDÂNCIA DA MALHA

A resistência da malha de aterramento é obtida aproximadamente por:

$$R_m = \rho_a \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L} \right) \quad [\Omega]$$

ou por:

$$R_m = \rho_a \left(\frac{0,53}{\sqrt{A}} + \frac{1,75}{(Ln)^{1/3}} \right) \left(1 - 0,8 \frac{100hd}{n\sqrt{A}} \right)^{1/4} \quad [\Omega]$$

em que:

ρ_a – resistividade aparente do solo para a malha [$\Omega \cdot m$];

h – profundidade [m];

d – diâmetro do cabo [m];

L – maior dimensão da malha [m];

n – número de quadrículas em uma direção + 1;

A – área da malha [m^2].

Para uma malha com hastes de terra:

$$R_m = 0,13 \frac{\rho_a}{\sqrt{A}} \left(1 + \frac{H}{3\sqrt{A}} \right) \log_{10} \left(\frac{\sqrt{A}}{n} \right) \quad [\Omega]$$

em que H é o comprimento de uma haste, todas as hastes com o mesmo comprimento.

A primeira equação é do IEEE *standard* 80 e tem melhor precisão para malhas com muitas quadrículas. A segunda tem dependência com a profundidade da malha e tem melhor precisão com

poucas quadrículas. A terceira equação considera uma malha com hastes em cada nó. Todas as equações são simples aproximações.

A impedância da malha de terra só pode ser obtida adequadamente por meio de computação digital. O montante de cálculo é muito grande para ser feito à mão.

12.4 TENSÃO APLICADA NA PESSOA

12.4.1 Tensão de passo – baixa frequência

O campo elétrico tangencial na superfície do solo determina a tensão de passo. A tensão de passo da malha para baixa frequência pode ser obtida por:

$$V_{passo} = K_p K_{pi} \rho_a i_g / L \quad [\text{V}]$$

em que:

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

$$K_{pi} = 0,65 + 0,172n;$$

$$L = 0,75L_C + 0,85L_R;$$

L_C – total de condutores horizontais da malha [m];

L_R – comprimento de uma haste [m];

D – lado da quadrícula [m];

h – profundidade da malha [m], $0,25 < h < 2,5$;

i_g – corrente da malha para a referência [A];

n – número de condutores em paralelo em uma direção, se a malha for retangular pegar o maior valor.

Os limites de aplicação desta equação são: $d < 0,25h$ e $D > 2,5$, valores em metros. A passada considerada é de 1 m. Dependendo do formato da malha esta equação pode ter um erro de até 100%. Quanto mais próxima a malha for da forma de um quadrado mais preciso é o resultado sendo que para malhas de outros formatos o resultado é inaceitável.

Esta equação é útil para se ter uma primeira aproximação da tensão de passo não devendo ser utilizada em projetos. A tensão de passo em baixas frequências para malhas de qualquer geometria deve ser calculada por meio de cálculo computacional, os quais fornecem a precisão necessária. Estes procedimentos de cálculo fornecem o potencial elétrico na superfície do solo em relação a um referencial no infinito.

Exemplo 12.2

Qual a tensão de passo considerando uma malha que tenha as seguintes características:

número de quadrículas = 4;

lado da quadrícula = 10 m;

profundidade da malha = 1 m;

corrente injetada na malha = 8.000 A;
resistividade aparente do solo = 400 Ω.m ?

Cálculo:

$$K_p = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2 \times 1} + \frac{1}{10 + 1} + \frac{1}{10} \left(1 - 0,5^{4-2} \right) \right) = 0,212$$

$$K_{pi} = 0,65 + 0,172 \times 5 = 1,51$$

A tensão de passo é

$$V_{passo} = (0,212)(1,51) (400)(8.000)/400 = 2.560,96 \text{ V}$$

#

É estabelecido pelo IEEE *standard* 80 que a corrente de baixa frequência (60 Hz) máxima suportada por uma pessoa saudável de 50 kg, para $0,03 \text{ s} < t < 3,0 \text{ s}$, é de

$$I_{pessoa_{max}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad [\text{A}]$$

t é o tempo de duração da aplicação da corrente no corpo da pessoa, para este tempo é usado o tempo de atuação do disjuntor da subestação.

Considerando a resistência ôhmica de uma pessoa sendo de 500 Ω a 1.500 Ω a corrente através da pessoa pode ser obtida pela equação:

$$I_{pessoa} = \frac{V_{passo}}{Z_{pessoa} + 6\rho_{superfície}} \quad [\text{A}]$$

em que Z_{pessoa} – impedância da pessoa.

Se

$$I_{pessoa} > I_{pessoa_{max}}$$

então a tensão de passo ultrapassa o limite suportado pela pessoa.

Exemplo 12.3

Sendo $Z_{pessoa} = 1.000 \Omega$, uma camada superior de brita e a tensão de passo da malha de 2.658,16 V, qual a corrente através de uma pessoa?

Cálculo:

$$I_{pessoa} = \frac{2.658,16}{1.000 + 6 \times 3.000} = 0,140 \text{ [A]}$$

Sendo o tempo de atuação do disjuntor de 0,5 s é esta tensão de passo suportável?

$$I_{pessoa_{max}} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} = \frac{0,116}{\sqrt{0,5}} = 0,164 \text{ [A]}$$

Como

$$I_{pessoa} = 0,140 < 0,164 = I_{pessoa_{max}}$$

então a tensão de passo é suportável.

#

Tensão de passo máxima suportada por uma pessoa:

$$V_{Pm\acute{a}x} = I_{pessoa_{max}} \left(Z_{pessoa} + 6\rho_{superf\acute{i}cie} \right) \text{ [V]}$$

A tens\~ao de passo em estado estacion\~ario, 60 Hz, \u00e9 diferente para a tens\~ao de passo durante transit\u00f3rios. As descargas atmosf\u00e9ricas levam a transit\u00f3rios mais rigorosos e a elevadas tens\u00f5es de passo.

12.4.2 Tens\~ao de toque – baixa frequ\u00eancia

Tens\~ao de toque da malha para baixa frequ\u00eancia pode ser obtida por:

$$V_{toque} = K_T K_{Ti} \rho_a i_g / L \text{ [V]}$$

em que:

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

;

para malhas com hastes nos v\u00e9rtices, no per\u00edmetro ou em todos os cruzamentos $K_{ii} = 1$;

para malhas com poucas hastes

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

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

$h_o = 1$ m (profundidade de referência da malha);

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

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P}$$

$n_b = 1$ para malhas quadradas;

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}}$$

para os demais casos;

$n_c = 1$ para malhas quadradas e retangulares;

$$n_c = \left(\frac{L_x L_y}{A} \right)^{\frac{0,7A}{L_x L_y}}$$

para os demais casos;

$n_d = 1$ para malhas quadradas, retangulares e em formato de L;

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

para os demais casos;

L_p – perímetro da malha [m];

A – área da malha [m²];

L_x – comprimento máximo da malha na direção x;

L_y – comprimento máximo da malha na direção y;

D_m – distância máxima entre dois pontos da malha [m];

d – diâmetro do condutor [m];

$K_{\bar{n}} = 0,644 + 0,148n$;

$L = L_C + L_R$ para malhas com poucas hastes e sem hastes no perímetro;

$$L = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] L_R$$

para malhas com hastes nos vértices no perímetro e em todos os cruzamentos.

Esta equação tem os mesmos limites de aplicabilidade que a equação de tensão de passo para baixas frequências.

Exemplo 12.4

Qual é a tensão de toque gerado por uma malha considerando que tenha as seguintes características:

número de quadrículas = 4;

lado da quadrícula = 10 m;

profundidade da malha = 1 m;

diâmetro do condutor = 0,003338 m;

corrente injetada na malha = 277 A;
 resistividade aparente do solo = 400 Ω .m ?

Cálculo:

$$K_T = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{10^2}{16 \times 1 \times 0,003338} + \frac{(10 + 2 \times 1)^2}{8 \times 10 \times 0,003338} - \frac{1}{4 \times 0,003338} \right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \ln \left(\frac{8}{\pi(2 \times 5 - 1)} \right) \right] = 1,386$$

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d = 5 \times 1 \times 1 \times 1 = 5$$

$$n_a = \frac{2L_C}{L_P} = \frac{2 \times 400}{160} = 5$$

$$L_C = 400 \text{ m}; L_P = 160 \text{ m.}$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}} = \sqrt{1 + \frac{1}{1}} = \sqrt{2}$$

$$K_{Ti} = 0,644 + 0,148 \times 1 = 1,384;$$

A tensão de toque é

$$V_{Toque} = K_T K_{Ti} 400 \frac{277}{400} = 531,3 \text{ [V]}$$

#

Tensão de toque máxima suportada por uma pessoa:

$$V_{Tm\acute{a}x} = I_{pessoa_{max}} (Z_{pessoa} + 1,5\rho_{superf\acute{i}cie}) \text{ [V]}$$

Corrente através da pessoa:

$$I_{pessoa} = \frac{V_T}{Z_{pessoa} + 1,5\rho_{superf\acute{i}cie}} \text{ [A]}$$

Exemplo 12.5

Qual é a corrente através de uma pessoa sendo $V_T = 828,9 \text{ V}$ e a resistividade do solo da superfície $3.000 \text{ }\Omega\cdot\text{m}$?

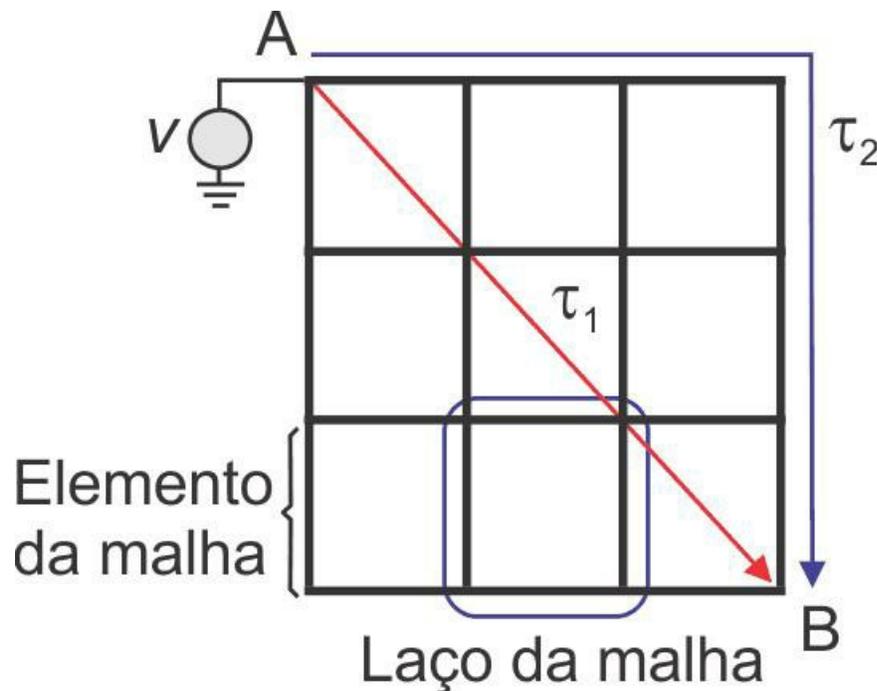
$$I_{pessoa} = \frac{828,9}{1.000 + 1,5 \times 3.000} = 0,151 \text{ A}$$

#

12.5 PERFORMANCE EM TRANSITÓRIOS

É de extrema importância conhecer a performance de uma malha de terra, durante transitórios rigorosos, assim como em 60 Hz ou 50 Hz. Conhecer o comportamento nestas situações é relevante para a proteção de pessoal e das instalações. Uma malha de terra adequadamente calculada melhora o desempenho dos equipamentos de proteção, da compatibilidade eletromagnética entre os dispositivos aterrados a esta e principalmente garante a proteção do pessoal da instalação. É interessante notar que o ponto B da malha será afetado por uma injeção de corrente no ponto A em razão dos efeitos eletromagnéticos vindos por dois caminhos diferentes e em tempos diferentes, [Figura 12.1](#). Este efeito não é relevante para o estado estacionário em baixas frequências mas deve ser levado em consideração para proteger o pessoal e para aumentar a compatibilidade dos equipamentos conectados a malha.

Para a análise transitória, deve-se achar um circuito elétrico equivalente à malha de aterramento. Este circuito representa a malha por indutores, capacitores e resistores, a fim de que se possa verificar as tensões na malha e o campo na superfície do solo durante situações transitórias como os impulsos atmosféricos e de chaveamento. Com tal circuito é possível conhecer extensamente as mais diversas situações de corrente de modo comum, tensões de transferência, indução e tensões injetadas a pessoas durante impulsos aplicados nos mais diversos pontos da malha.



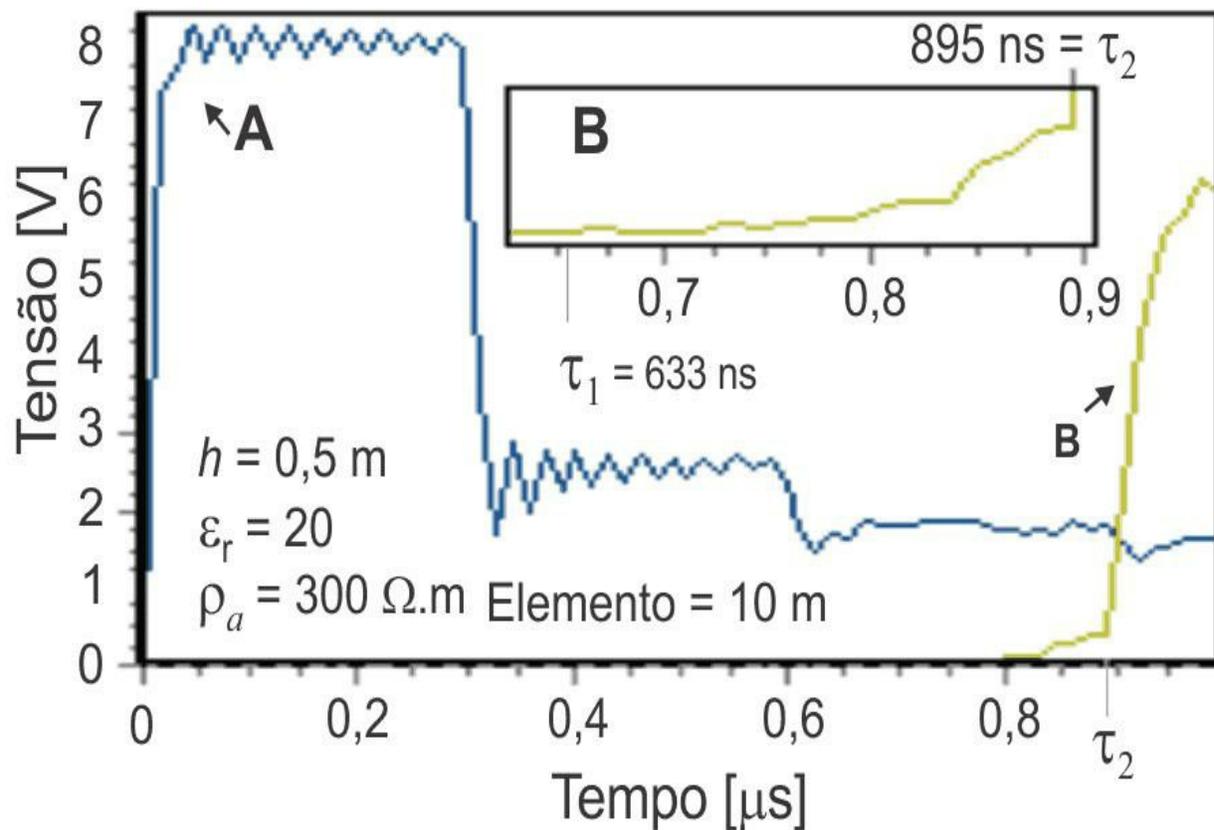


Figura 12.1: Malha de terra e o tempo de propagação, τ_2 , da corrente elétrica do ponto A ao ponto B, e o tempo de propagação, τ_1 , do campo elétrico

12.5.1 Indutância da malha

Uma malha de terra tem, em geral, elevada indutância se comparada com a capacitância da malha. Em várias análises de comportamento da malha de aterramento pode-se desconsiderar o efeito capacitivo.

12.5.2 Área efetiva

A área efetiva define a área ótima da grade para dissipar um determinado impulso.

12.6 ALGUMAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Para obter as características da malha de terra deve-se conhecer as correntes a que ela estará eventualmente sujeita, os parâmetros do solo e as tensões de passo e de toque suportáveis. Atualmente critérios de compatibilidade eletromagnética estão sendo incluídos no projeto de malhas de aterramento.

A corrente máxima a que estará sujeita deverá vir de um curto-circuito, de uma descarga atmosférica ou de componentes harmônicas múltiplas de três.

12.6.1 Corrente de curto-circuito da instalação

A corrente de curto-circuito da instalação é a corrente de curto fase terra que ocorre no lado de baixa tensão do transformador de entrada. A obtenção desta corrente pode ser feita de modo simplificado como mostrada no exemplo 12.6, ou de modo mais complexo levando em consideração diversos componentes do sistema em questão.

Exemplo 12.6

Determine a corrente de curto-circuito para uma instalação com as seguintes características:

transformador Y:Y solidamente aterrado: 13.800:480 V

potência: 1.500 kVA

reatância indutiva do transformador: 6,0%

Cálculo:

Para o cálculo da corrente de curto foram consideradas a reatância do transformador e a resistência do aterramento, esta considerada 5 Ω e 0,5 Ω .

$$Z_{terra} = 5 \Omega$$

$$X_{pu} = 0,06 \text{ pu}$$

$$S_{Trafo} = 1.500 \text{ kVA}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{13.800^2}{1.500.000} = 126,96 \Omega$$

$$X_{Trafo} = Z_{base} X_{pu} = 126,96 \times 0,06 = 7,6176 \Omega$$

$$|I_{CC}| = \left| \frac{V_{base}}{Z_{Terra} + jX_{Trafo}} \right| = \left| \frac{13.800}{5 + j7,6176} \right| = 1.514,5$$

A.

Considerando a contribuição dos motores, a corrente utilizada para calcular a malha é
 $5 \times 1.514,5 = 7.572,5A$.

$$Z_{terra} = 0,5 \Omega$$

$$|I_{CC}| = \left| \frac{V_{base}}{Z_{Terra} + jX_{Trafo}} \right| = \left| \frac{13.800}{0,5 + j7,6176} \right| = 1.807,7$$

A.

#

Em instalações de grande importância, cálculos computacionais de curto-circuito são feitos levando em consideração diversos elementos do sistema elétrico de potência.

12.6.2 Dimensionamento dos condutores

A bitola dos condutores utilizados na construção da malha deve atender as necessidades das correntes a serem escoadas. O condutor deve suportar o calor gerado pela maior corrente prevista e suportar esforços mecânicos durante a construção e durante a passagem da maior corrente. Pois forças magnéticas intensas estarão presentes no escoamento de correntes de curto-circuito, de descargas atmosféricas e harmônicas de ordem múltipla de três (180 Hz, 540 Hz, 720 Hz etc.).

A bitola do condutor de aterramento é obtida a partir de:

$$\phi = \sqrt{\frac{I_{CC}^2 t \rho_{cu} K_T}{4,1868 m_e C_e \ln \left(\frac{T_{m\acute{a}x} - T_{amb}}{1/K_T - 20 + T_{amb}} + 1 \right)}} \quad [\text{mm}^2]$$

em que:

I_{CC} – corrente [A];

t – tempo [s], sendo que $0 \leq t \leq 1$ s;

$T_{m\acute{a}x}$ – temperatura máxima [°C];

T_{amb} – temperatura ambiente [°C];

K_T – coeficiente de variação da resistividade térmica [°C⁻¹];

m_e – massa específica [g/cm³];

C_e – calor específico [cal/g°C];

ρ_{cu} – resistividade elétrica do condutor [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$].

Dados para o condutor tipo *copperweld* 30% IACS:

- Coeficiente de variação: 0,0037 °C⁻¹;
- Massa específica: 8,15 g/cm³;
- Calor específico: 0,110 cal/g°C;
- Resistividade: 0,0574 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$;
- Temperatura máxima para solda exotérmica: 850 °C.

Exemplo 12.7

Curto-circuito

$I_{CC} = 8.000 \text{ A}$ – corrente de curto-circuito

$t = 0,5 \text{ s}$ – tempo de operação da proteção

$T_{m\acute{a}x} = 850 \text{ °C}$

$T_{amb} = 30 \text{ °C}$

$K_T = 0,0037 \text{ °C}^{-1}$

$m_e = 8,15 \text{ g/cm}^3$

$$C_e = 0,110 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$\rho_{cu} = 0,0574 \text{ } \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$$

A bitola requerida é

$$\phi = \sqrt{\frac{8.000^2 \times 0,5 \times 0,0574 \times 0,0037}{4,1868 \times 8,15 \times 0,110 \times \ln\left(\frac{850-30}{1/0,0037-20+30} + 1\right)}} = 36,37$$

mm².

A bitola do condutor comercial será 50 mm².

#

Exemplo 12.8

Descarga Atmosférica

Seja uma descarga atmosférica com componente contínua de 1.000 A e de duração de 0,5 s, neste caso:

$$\phi = \sqrt{\frac{1.000^2 \times 0,5 \times 0,0574 \times 0,0037}{4,1868 \times 8,15 \times 0,110 \times \ln\left(\frac{850-30}{1/0,0037-20+30} + 1\right)}} = 4,55$$

mm².

#

Exemplo 12.9

Harmônicas

Seja uma instalação com alimentada por um transformador de 1.500 kVA e 480 V. A corrente nominal é de:

$$|I_N| = \left| \frac{1.500.000/3}{480/\sqrt{3}} \right| = 1.804,2 \text{ A}$$

Sendo 1% a componente de terceira harmônica, a corrente total das três fases é

$$|I_H| = 3 \times 0,01 \times \left| \frac{1.500.000/3}{480/\sqrt{3}} \right| = 54,1 \text{ A}$$

A.

Se a componente chegar a 10% da corrente nominal, a corrente para malha será de 541 A. Neste caso, a bitola do condutor deve ser obtida para 60 Hz.

#

12.6.3 Hastes verticais no perímetro da malha

A indutância da malha de terra dificulta a eliminação de altas frequências ou variações rápidas de correntes, di/dt grandes. Para facilitar o escoamento destas correntes são adicionadas no contorno da malha hastes verticais. Estas hastes reduzem a indutância no local a que estão conectadas, facilitando assim a passagem de altas frequências e de di/dt mais elevados.

Para baixas frequências as hastes curtas são inefetivas, contribuem muito pouco com o escoamento da corrente para o solo.

12.6.4 Hastes

Para evitar a circulação de altas frequências e di/dt elevados (impulsos), de origem em casas de controle e monitoração, na malha de terra costuma-se fazer um terra local para estes equipamentos porém interligado com a malha. Este terra local pode ser de hastes verticais em série fora da região onde se encontra a malha, ou ter outro arranjo conforme a necessidade.

12.6.5 Brita ou asfalto

Uma camada de brita para a proteção da área da malha é colocada com 10 cm de espessura ou mais. Esta camada de brita evita a evaporação de água, mantendo o solo úmido. A brita também proporciona maior resistência de contato com uma pessoa de pé acima da malha, reduzindo deste modo a tensão de passo.

Uma camada asfáltica pode ser usada para manter a umidade no subsolo. Estas camadas, em razão de sua pouca espessura, não têm grande influência no cálculo da resistividade aparente

da malha.

12.6.6 Malha atratora

Para evitar a circulação das elevadas correntes de descargas atmosféricas na malha de terra, pode-se ligá-la a uma outra malha com dimensões menores instalada nas proximidades.

Esta malha menor, por ser pequena, é construída na camada do solo de menor resistividade, geralmente mais profunda, veja a [Figura 12.2](#). A ligação entre as malhas deve ser feita com fitas ou feixe de condutores por terem menor impedância, facilitando assim a passagem da corrente impulsiva. A interligação das malhas deve ser feita por dois ou mais condutores, sendo preferível um feixe de condutores em paralelo ou uma fita.

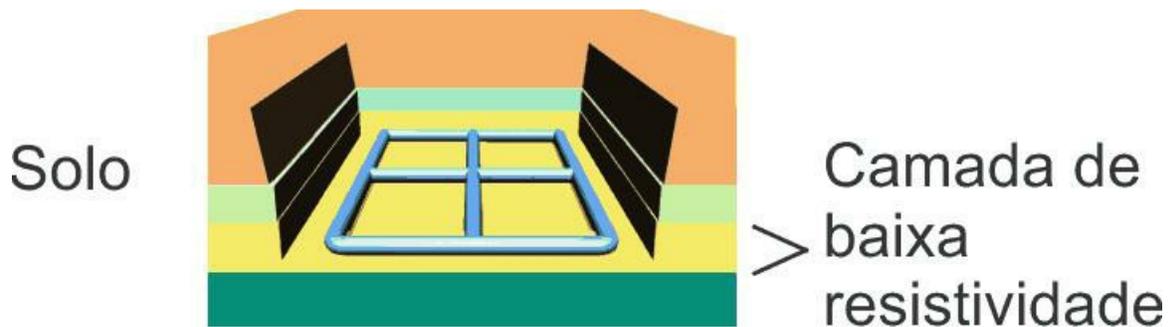


Figura 12.2: A malha atratora fica na camada de solo de mais baixa resistividade.

12.7 MODELO PARA TRANSITÓRIOS

Para analisar uma malha de terra deve-se levar em consideração apenas os aspectos mais relevantes no estudo.

O modelo mostrado a seguir tem algumas limitações que são:

- Modelamento adotado é para grades retangulares, na prática nada impede que formas adversas sejam usadas;
- As dimensões da malha devem ficar em até 100 x 100 m;
- As frequências envolvidas estão entre 0 e 10 MHz;
- Não é considerado o efeito corona no subsolo;
- A capacitância da grade é desprezada;
- O efeito da propagação é desconsiderado;
- Solo de baixa resistividade.

As formas de onda de corrente injetadas na malha podem ser as mais diversas como as utilizadas em ensaios de transformadores, que é de 1,2/20 μ s e outras 0,1/50 μ s, 1,2/50 μ s, 6/12 μ s, 10/350 μ s, 8/20 μ s, senoides, componentes harmônicas etc.

Para o circuito elétrico equivalente da malha alguns parâmetros básicos devem ser conhecidos, tais como os apresentados a seguir.

12.7.1 Resistência do elemento

Resistência do elemento é a resistência de cada elemento da grade de aterramento que por ser muito pequena, foi desprezada no circuito equivalente. Esta resistência é a do cabo, cordoalha ou tubo que constituem a malha.

12.7.2 Indutâncias

O parâmetro que mais influi no cálculo do desempenho dos sistemas de aterramento são as indutâncias. Leva-se em conta a indutância própria de cada elemento e a indutância mútua entre os condutores.

Indutância própria

A indutância de um fio enterrado horizontalmente pode ser obtida pela equação:

$$L = 0,002m \left[\ln \left(\frac{2m}{a} \right) - 1 \right] [\mu\text{H}]$$

em que:

m – comprimento do elemento da grade [m];

a – raio do elemento da grade [m].

Exemplo 12.10

Qual a indutância própria de um cabo terra horizontal a uma profundidade de 4 m e raio de 5 mm.

Cálculo:

$$m = 4 \text{ m}$$

$$a = 5 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$L = 0,002 \times 4 \times \left[\ln \left(\frac{2 \times 4}{5 \times 10^{-3}} \right) - 1 \right]$$

A indutância própria do cabo de terra horizontal é $L = 0,051 \mu\text{H}$

#

Exemplo 12.11

Qual a reatância indutiva para o cabo do exemplo 12.10, submetido a uma frequência de 100 MHz?

Cálculo:

$$L = 0,051 \mu\text{H} = 0,051 \times 10^{-6} \text{ H}$$

$$f = 100 \text{ MHz} = 10^8 \text{ Hz}$$

$$X_L = 2\pi fL = (2\pi)(10^8)(0,051 \times 10^{-6})$$

A reatância indutiva é $X_L = 32,04 \Omega$.

#

Indutância Mútua

A indutância que aparece entre dois condutores cilíndricos enterrados pode ser obtida a partir das equações seguintes:

$$M = m \times 10^{-7} \left[\alpha \operatorname{arcsenh} \left(\frac{\alpha}{h} \right) - 2\beta \operatorname{arcsenh} \left(\frac{\beta}{h} \right) + d \operatorname{arcsenh} \left(\frac{d}{h} \right) - \sqrt{\alpha^2 + h^2} + 2\sqrt{\beta^2 + d^2} - \sqrt{d^2 + h^2} \right] \quad [\text{H}]$$

em que: $\alpha = 2m+d$; $\beta = m+d$.

Se, como na [Figura 12.3](#), os condutores se sobrepõem deve entrar com valor de d negativo.

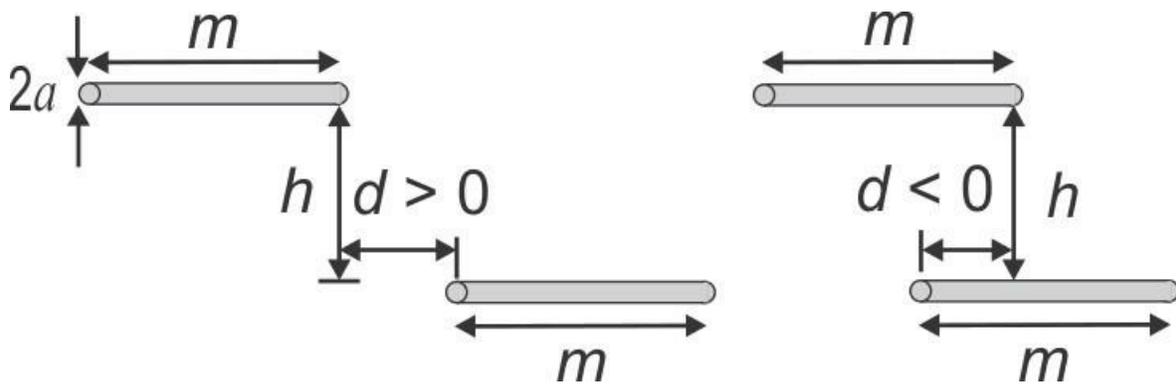


Figura 12.3: Parâmetros geométricos entre dois elementos da malha de terra

Exemplo 12.12

A [Figura 12.4](#) mostra os parâmetros geométricos entre dois elementos de uma malha de terra.

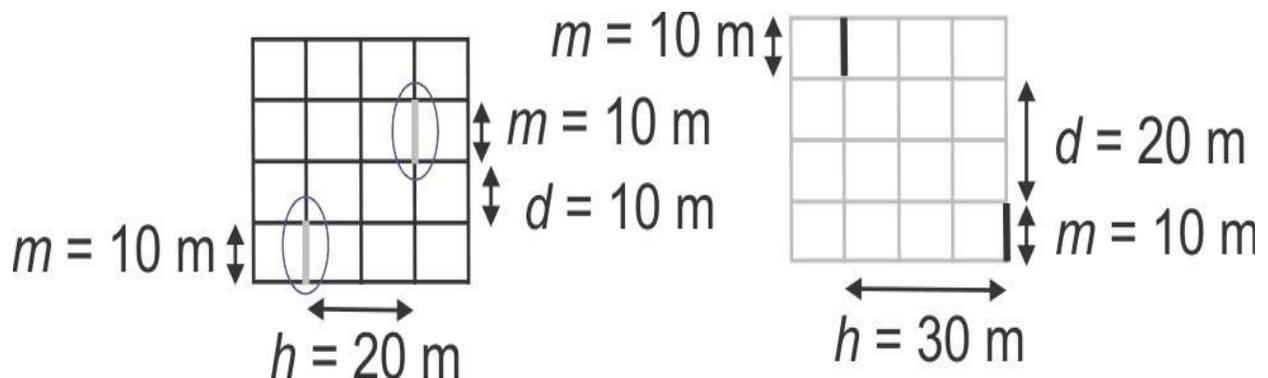


Figura 12.4: Malhas de terra e as dimensões entre dois elementos

12.7.3 Condutância

A condutância é o inverso da resistência para o terra de cada elemento horizontal da grade de aterramento. Esta resistência é a condutância distribuída para a referência que é obtida por:

$$G = \frac{\pi m}{\rho_a} \left[\ln \left(\frac{2m}{\sqrt{2ah}} \right) - 1 \right]^{-1} \text{ [S]}$$

em que:

h – profundidade do aterramento [m];

m – comprimento do condutor [m].

Exemplo 12.13

Avaliar a resistência de terra de um cabo de 4 m de comprimento a uma profundidade de 0,5 m e de raio 5 mm, em solo de limo.

Cálculo:

$$m = 4 \text{ m}$$

$$a = 5 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$h = 0,5 \text{ m}$$

$$\rho = 100 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

$$R_{terra} = \frac{1}{G} \Rightarrow$$

$$G = \frac{\pi \times 4}{100} \left[\ln \left(\frac{2 \times 4}{\sqrt{2 \times 5 \times 10^{-3} \times 0,5}} \right) - 1 \right]^{-1}$$

$$G = 0,0337 \text{ S} \Rightarrow R_{\text{terra}} = 26,67 \Omega$$

#

12.7.4 Capacitância

A capacitância do elemento da malha é formada pelo elemento e a referência. Esta capacitância é muito pequena e é desprezada neste modelo de malha. Isto pode facilmente ser comprovado se tomarmos como um valor típico de capacitância da ordem de 10 nF/m para um solo com constante dielétrica de 10,0 e resistividade inferior a 3.000 $\Omega \cdot \text{m}$.

12.7.5 Cálculo transitório

Para o cálculo transitório é utilizado um Π para representação de um elemento horizontal, desde que eletricamente curto, que é representado na [Figura 12.5](#).

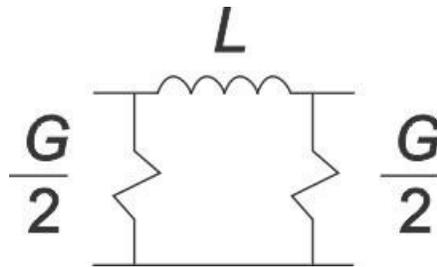


Figura 12.5: Representação do elemento horizontal, L – indutância do trecho; G – condutância do trecho

Exemplo 12.14

Qual o circuito Π equivalente de um cabo de 4 m enterrado a 0,5 m e de raio 5 mm?

Cálculo:

Os parâmetros do circuito Π equivalente foram obtidos nos exemplos 12.1, 12.2 e 12.4. O resultado é mostrado na [Figura 12.6](#).

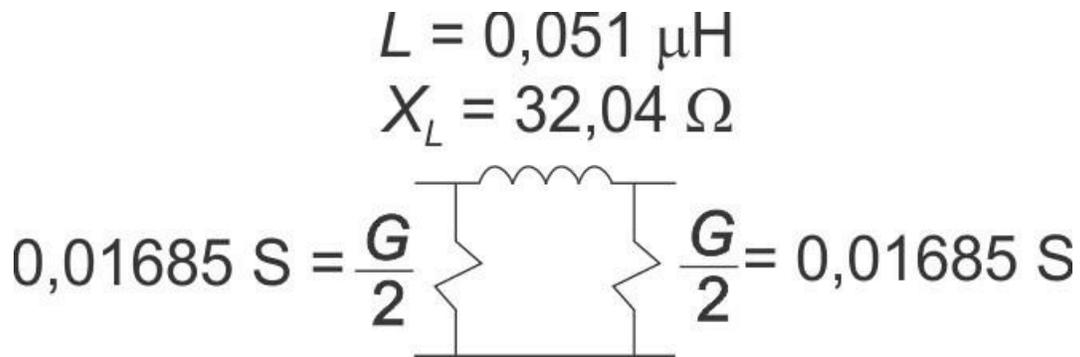


Figura 12.6: Circuito II equivalente de um cabo enterrado de 4 m, a uma profundidade de 0,5 m. Para $f = 100 \text{ Hz}$, $X_L = 32,04 \Omega$.

#

A representação da malha de terra para estudos de transitórios por meio de circuitos lineares simples pode ser feita como mostrado pela [Figura 12.7](#). Um dos nós da malha é escolhido como ponto de injeção de corrente e por meio das leis dos nós ou dos laços são obtidas as tensões nos demais nós da malha.

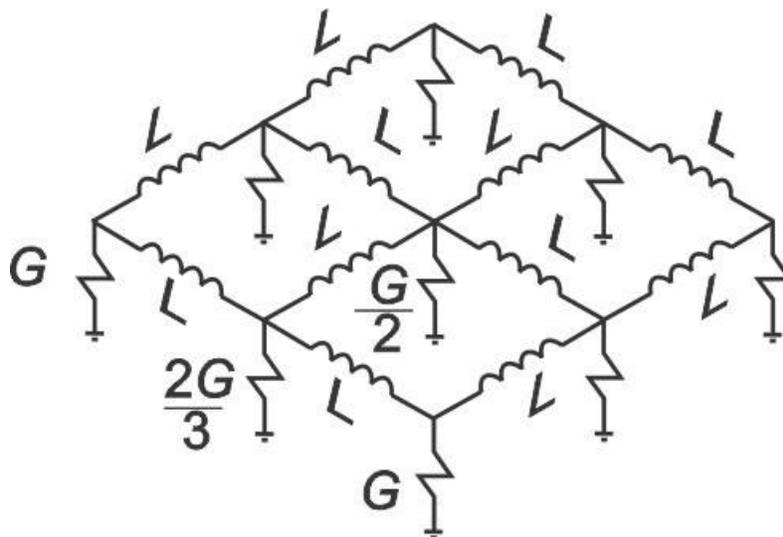


Figura 12.7: Representação por circuito elétrico de uma malha de terra 2 X 2

Equacionando o sistema através da análise nodal de circuitos, temos o cálculo necessário para prever a performance da malha de terra durante transitórios.

As vantagens deste método são:

- Pode-se tomar qualquer configuração de grade de aterramento;
- Como a tensão pode ser determinada em qualquer nó, a impedância ao impulso, definida como a máxima taxa de tensão induzida, é facilmente determinada;
- Alterando o vetor de corrente de injeção nodal, consideraremos a injeção do impulso em diferentes nós da grade;
- As barras verticais podem ser modeladas com facilidade.

Esse processo considera que o aterramento está em solos uniformes de baixa resistividade ($\rho_a = 100 \Omega.m$), o que nos permite desprezar a possibilidade de ionização do solo, que poderia complicar a realização do aterramento já que elementos não-lineares teriam que ser acrescentados.

Como entrada para excitação pode ser adotado um impulso de corrente descrito por uma dupla exponencial 6/12 μs , em que:

$$i(t) = I_0 \left(e^{-0,1135t} - e^{-0,231t} \right) \text{ [A]}$$

Outras formas de onda de corrente injetadas podem ser usadas para estudar a performance da malha de terra sob situações adversas. A área efetiva da malha de terra pode ser verificada a partir de cálculos feitos com diversos tipos de fonte de corrente.

Maiores impedância e tensão em uma malha de terra aparecem nos vértices. Esta afirmação está calcada em medições e simulações numéricas. A [Figura 12.8](#) ilustra o que ocorre com a impedância de entrada vista pelo impulso. Na [Figura 12.8a](#), a impedância dos elementos é vista em paralelo pelo impulso, isto é, a impedância é a metade da impedância do elemento. Na [Figura 12.8c](#), em que quatro elementos se juntam, a impedância vista pelo impulso de entrada é igual a 1/4 da impedância do elemento.

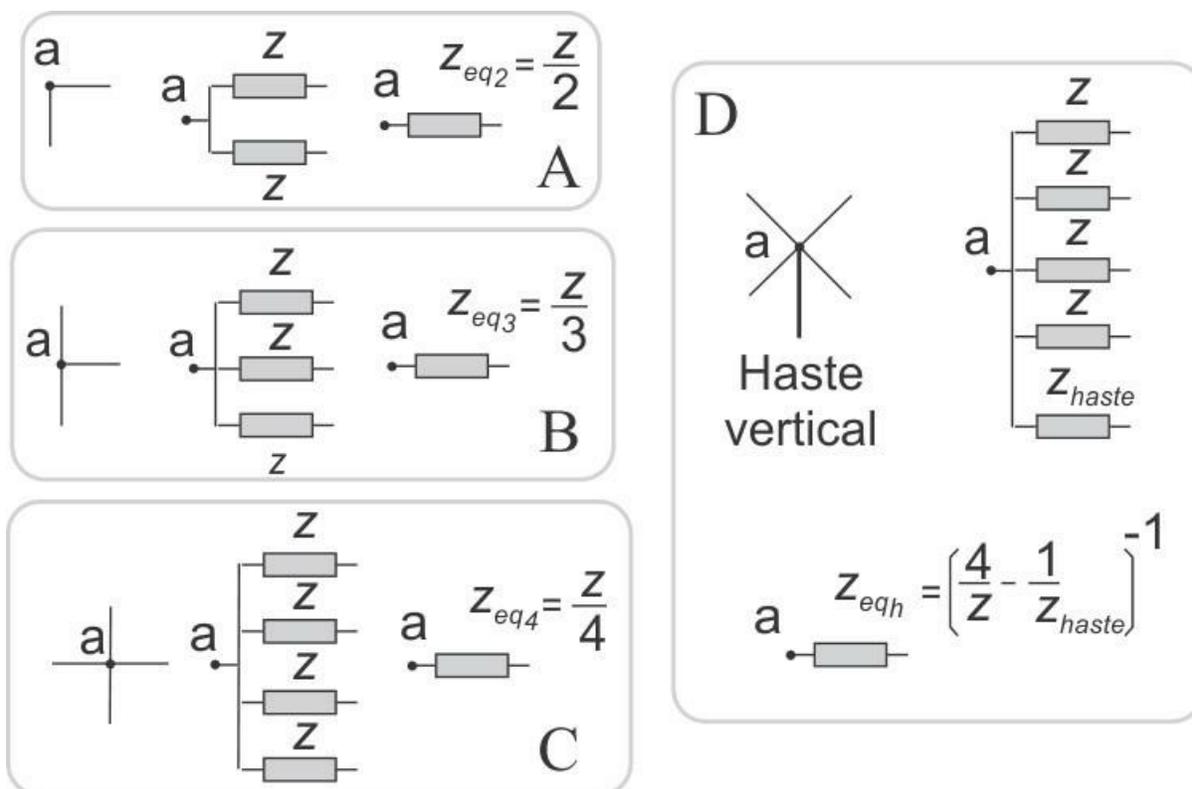


Figura 12.8: Impedância vista por um impulso injetado no ponto a de uma malha de terra: A - o pulso é injetado no vértice da malha; B - o pulso é injetado na borda da malha; C - o pulso é injetado no meio da malha; D - o pulso é injetado no meio da malha com uma haste vertical neste nó.

Para melhorar o aterramento de frequências elevadas costuma-se colocar uma haste de terra no nó da malha em que se aterra um equipamento gerador de corrente de alta frequência. Esta técnica é a aplicação do caso D da [Figura 12.8](#).

A [Figura 12.9](#) exemplifica os casos A, B e C mostrados na [Figura 12.8](#). Sendo considerado a malha da [Figura 12.1](#) com resistividade aparente de $52 \Omega.m$ e uma fonte dupla exponencial de $1,2/50 \mu s$ de 1 A de pico injetada no vértice $a = (1,1)$ para o caso A, injetada no vértice $a = (1,2)$ para o caso B e injetada no vértice $a = (2,2)$ para o caso C. Notar a redução do pico de tensão no nó da fonte.

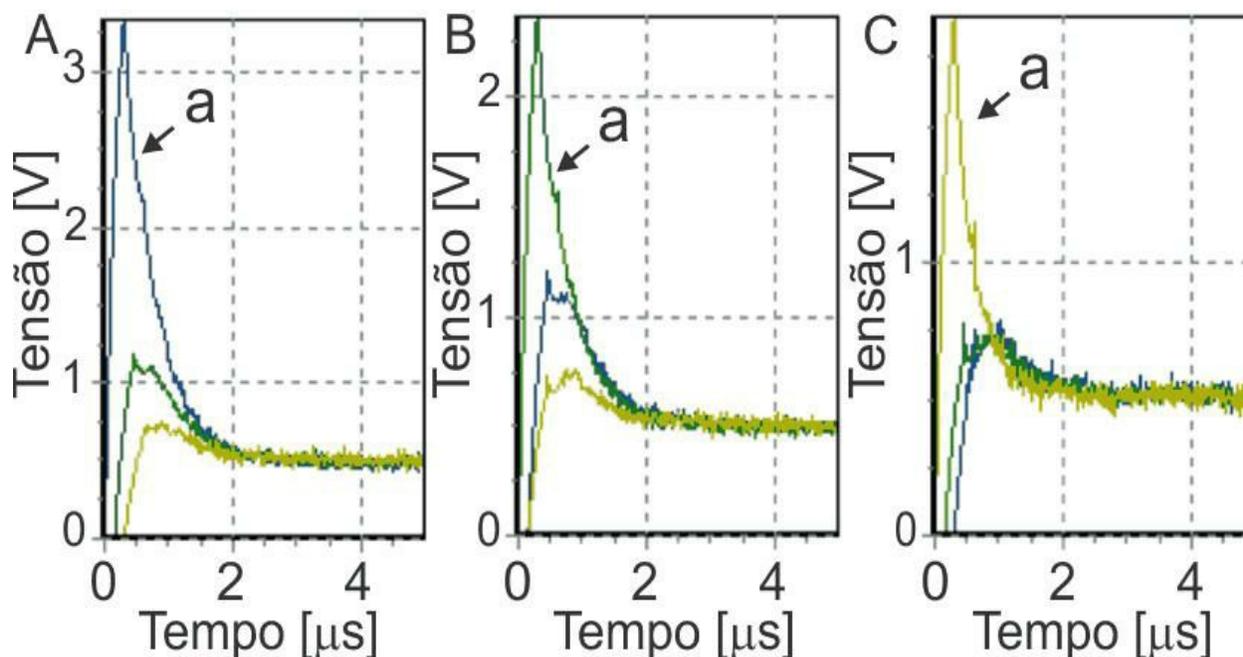


Figura 12.9: Impulso $1,2/50 \mu s$ injetado em três diferentes nós da malha da [Figura 12.1](#), tensões nos nós (1,1), (1,2) e (2,2); A) fonte no nó $a = (1,1)$; B) fonte no nó $a = (1,2)$ e C) fonte no nó $a = (2,2)$

12.8 CAMPO ELÉTRICO E MAGNÉTICO

O campo magnético que aparece nas retículas da malha de terra, ver [Figura 12.10](#), atingirá a superfície, pois o solo tem uma permeabilidade magnética próxima à do ar. Este fluxo magnético é gerado pela corrente que circula na malha. Quando a frequência envolvida faz da retícula eletricamente pequena, o campo magnético radiado pode ser desconsiderado.

Um elemento da malha se comporta como um dipolo elétrico ou uma sequência de dipolos elétricos curtos radiando campo elétrico. Este campo elétrico radiado é que é responsável pela tensão de passo na superfície do solo. Cada um desses elementos da malha também é considerado uma linha de transmissão, esta linha será eletricamente curta ou longa dependendo da frequência envolvida. O campo elétrico entre os elementos da malha tende a se contraporem o que contribui para reduzir a tensão de passo. Este efeito é o que motivou o uso inicial das malhas de aterramento.

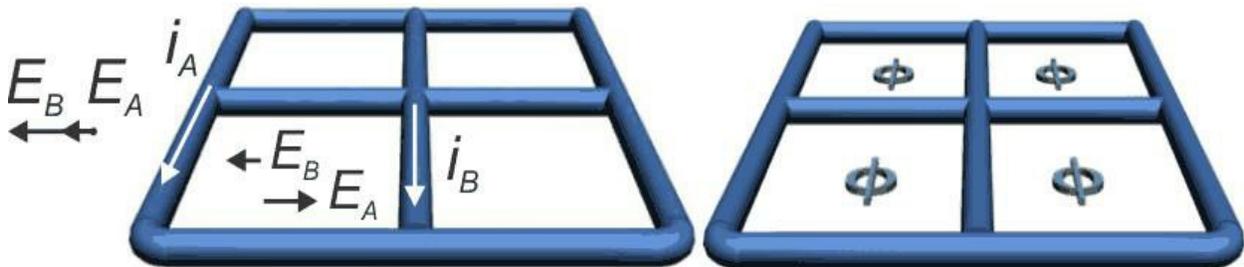


Figura 12.10: O campo magnético gerado na malha aparece como um fluxo magnético, ϕ , nas quadrículas

Uma estimativa da resistência de malha de terra é $R = 2\rho_d/\text{perímetro}$. A malha deve estar enterrada a um mínimo de 50 cm. Queda de tensão de até 3 V/m é aceita. A bitola mínima do cabo de cobre deve ser de 25 mm² e de 90 mm² para aço protegido contra corrosão.

13 MEDIÇÕES

13.1 INTRODUÇÃO

Para conhecermos os parâmetros elétricos do solo é necessário fazer medições. Estas medições, para fins de aterramento elétrico, são realizadas com o terrômetro, com injeção de corrente no solo e em laboratório. Os parâmetros a serem considerados são a resistência do eletrodo em questão, a resistividade do solo, a estratificação e a permissividade do solo.

O equipamento usado na prática para a medição da resistência de terra é o terrômetro (Megger é o nome de um fabricante de terrômetros). Estas medições não podem ser feitas em tempo chuvoso ou sujeito à chuva. A umidade afeta fortemente a medição. Para medições que envolvem estruturas de concreto, devem-se esperar dois dias de sol para que possam secar. É recomendado que a medição seja repetida a 90° do alinhamento original, quando possível. Deve-se observar que estruturas metálicas, concreto armado, canos e outros metais podem influenciar as medições e a resistência de terra. Durante a medição o aterramento deve ser desligado do sistema ou equipamento elétrico. Este procedimento é indispensável durante o uso do terrômetro de hastes. Para terrômetros tipo alicate, o cabo de aterramento tem de estar conectado ao eletrodo de terra.

Quando o eletrodo de aterramento é a própria estrutura de fundação da edificação, é praticamente inviável a medição da resistência de terra desta estrutura em razão de suas grandes dimensões. Os resultados das medições feitas em grandes aglomerados urbanos são de difícil avaliação dos resultados. Isto ocorre pela presença de muitas vigas, estacas e canalização no subsolo, além de correntes de terra de diversas origens.

13.2 RESISTÊNCIA DE ELETRODOS

Para medir a resistência de terra de um eletrodo de terra usa-se o esquema mostrado na Figura 13.1. Os eletrodos P e C do equipamento de medição são hastes curtas e devem ser colocados no solo com as mãos, quando possível, para evitar danos mecânicos. Estes eletrodos devem estar alinhados. A resistência de terra é obtida da equação $R = V/I$. A tensão V é a diferença de potencial entre o eletrodo T e a haste P. A corrente I é a que circula entre o eletrodo T e a haste C.

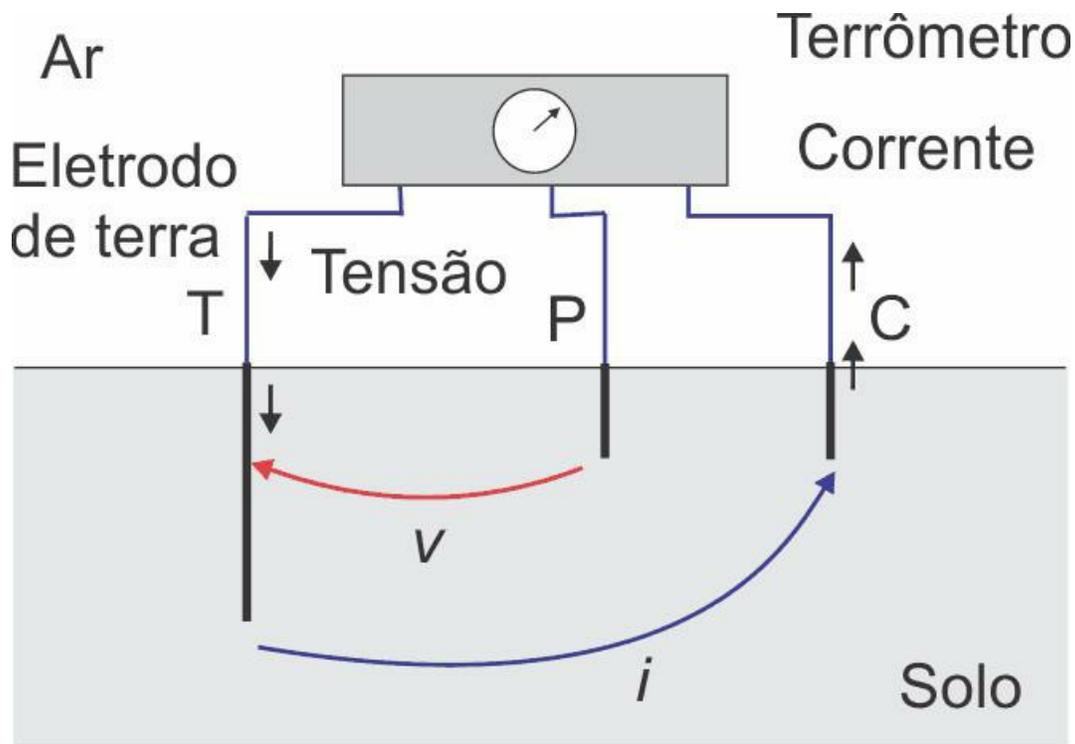


Figura 13.1: Esquema para medição da resistência de terra de um eletrodo

Esse equipamento trabalha com uma frequência diferente da frequência industrial (frequência nominal da concessionária; no Brasil é de 60 Hz), isto ocorre para evitar a influência da frequência industrial nas medições. Cuidado também é tomado para evitar as componentes harmônicas (frequências múltiplas de 60 Hz; ex.: 120 Hz, 180 Hz etc.). Alguns equipamentos permitem a variação da frequência usada na medição. Medições com corrente contínua induzem erros de leitura, pois os íons no solo se alinham eletricamente com o campo elétrico gerado pelo terrômetro.

13.2.1 Distância entre os eletrodos

Os eletrodos P e C devem estar fora da influência do eletrodo de aterramento. A distância destes eletrodos é dependente das características geométricas do eletrodo de aterramento. Simplificando, quanto maior for o eletrodo de aterramento maior é a sua área de influência e, portanto, maior a distância entre os eletrodos T, P e C. Este é um dos motivos por que, até o momento, impossível medir a resistência de aterramento de prédios. As características elétricas

do solo também afetam essa distância.

Uma forma de determinarmos a distância a que devemos colocar os eletrodos P e C é por tentativa e erro mas de forma direcionada. Primeiramente cravam-se estes eletrodos próximos ao eletrodo de aterramento, anota-se a leitura. Afastam-se os eletrodos P e C do eletrodo de aterramento, mede-se novamente, se o resultado for igual ao primeiro, então é o resultado desejado. Se o resultado for diferente do anterior afastam-se os eletrodos mais um pouco e faz nova medição, se for igual à leitura anterior, este é o resultado. Este processo segue até que duas leituras sejam iguais. Deve-se variar também a distância entre os eletrodos P e C. Devido à irregularidade do solo, nunca haverá duas medições exatamente iguais, deve-se levar em conta uma pequena variação entre as duas medições corretas.

Este processo é válido porque os eletrodos P e C vão ficando cada vez menos influenciados pelo eletrodo de aterramento e menos influentes entre si. A medição será correta quando esta influência for bem pequena, sendo insignificante quando aumentar mais a distância.

13.3 MEDIÇÃO POR INJEÇÃO DE CORRENTE

O medidor de aterramento tipo alicate injeta corrente no eletrodo de terra por meio de indução magnética. Uma bobina dentro do gancho do alicate produz um campo magnético que induz uma corrente no circuito terra, é o efeito transformador em que o primário é a bobina do alicate e o secundário é o circuito do eletrodo de terra. Para haver circulação de corrente no terra o circuito deste deve estar fechado, assim a corrente injetada entra pelo eletrodo onde está o alicate circula pelo solo até outros eletrodos e retorna ao eletrodo inicial pelas conexões aéreas. Para conhecer a resistência de terra do eletrodo em questão, uma outra bobina no alicate medi a corrente que foi injetada no circuito, como a tensão da fonte do alicate é conhecida a resistência do circuito de terra pode ser obtida.

Este procedimento de medição de resistência de aterramento só se aplica adequadamente quando há um grande número de eletrodos de aterramento envolvidos, um total de n eletrodos. Desta forma, os $n-1$ eletrodos de retorno da corrente injetada pelo alicate formam uma resistência muito pequena que pode ser considerada desprezível. A resistência obtida neste processo é, então, praticamente a resistência de terra do eletrodo onde está o alicate.

Deve-se lembrar que esse aparelho de medição só é eficaz quando há um grande número de eletrodos de terra interligados pelo ar.

13.4 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

O conhecimento da resistividade do solo é de extrema importância, no entanto, o procedimento de medição é trabalhoso e sujeito a muitos erros inerentes ao processo. Uma das dificuldades está em que a resistividade deve ser conhecida para cada camada de solo, ao menos para as que mais influenciam o aterramento. O processo requer várias medições e alguns cálculos. O resultado final deste algoritmo é a resistividade e a espessura de algumas camadas do solo. Há vários procedimentos para a obtenção destes parâmetros, a norma NBR 7117 traz um destes processos em detalhe.

Como o solo é muito variável em suas características elétricas e geométricas é fundamental que a resistividade seja obtida para cada eletrodo a ser instalado. É recomendada que seja feita uma medição de resistividade a cada 500 m para linhas de distribuição. As medições devem ser feitas de preferência na periferia da área em questão.

A Figura 13.2 ilustra um equipamento de medição de resistividade. Este aparelho tem quatro eletrodos, sendo dois de corrente e dois de potencial. Pelos eletrodos de corrente circula-se uma corrente e mede-se a tensão nos eletrodos de tensão. Isto possibilita conhecer aproximadamente a resistividade a uma profundidade p , igual à distância entre os eletrodos de tensão. O valor de p deve ser de 1, 2, 4, 8, 16 e 32 m.

Os objetos condutores assim próximos a área de medição afetarão os resultados, é recomendado que as medições sejam repetidas a 90° da original (alguns autores recomendam 60° e outros 45°).

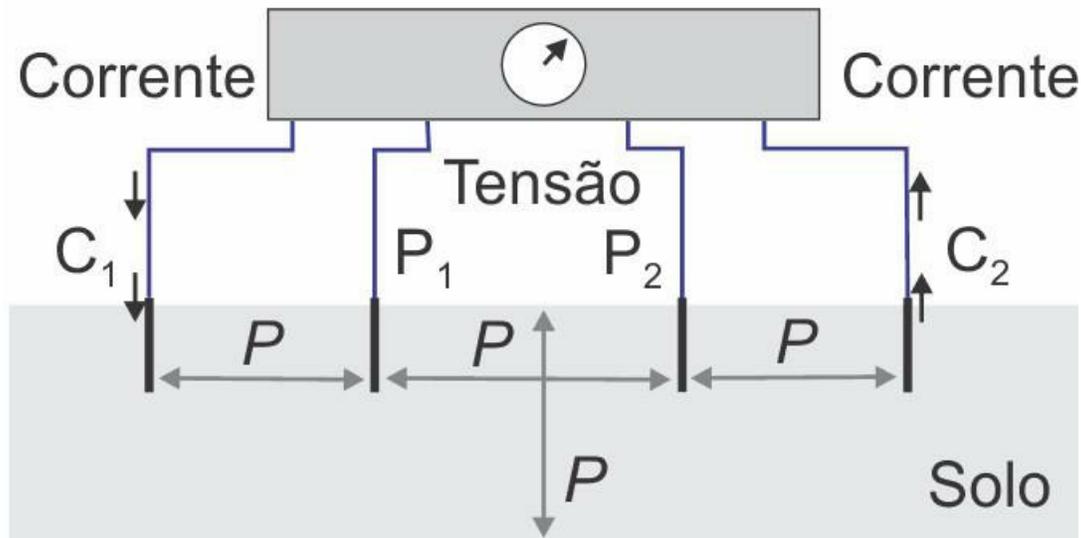


Figura 13.2: Medição de resistividade pelo método das quatro hastes, alinhadas e com mesma profundidade e diâmetro

13.5 MÉTODO PRÁTICO

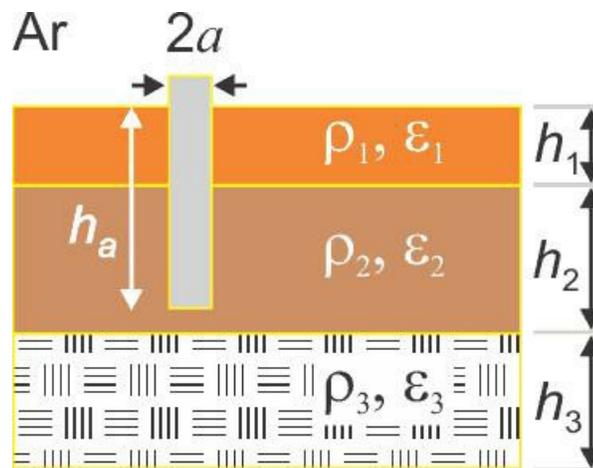
Existem vários tipos de processos para obter a resistividade aparente do solo. Em geral são de execução complexa. Uma forma simples e prática de obter a resistividade aparente do solo é cravar uma haste e medir a resistência de terra desta. A partir do valor da resistência da haste medida é possível obter a resistividade aparente do solo. Deve-se observar que a resistividade aparente varia com a profundidade da haste e com o perfil da seção reta (se for haste cilíndrica, com o diâmetro da haste). Esta deve ser cravada na profundidade que se deseja ter o eletrodo de terra final à base de hastes. Este processo só é válido para obter a resistividade aparente de eletrodos em haste.

A resistividade aparente, ρ_a , para um conjunto de hastes de igual geometria é obtida a partir de uma única haste cravada e calculada a partir da equação:

$$\rho_a = \frac{2\pi h R_{medida}}{\ln\left(\frac{4h}{2a}\right)} \quad [\Omega.m]$$

em que R_{medida} é a resistência de terra medida de uma haste de profundidade h e diâmetro $2a$.

O valor da resistividade aparente obtido por esse processo pode ser utilizado no cálculo da resistência de terra de eletrodos com mais de uma haste cravada em paralelo. Isto é válido desde que a haste usada na medição seja igual às hastes utilizadas no eletrodo final. A Figura 13.3 mostra três hastes verticais com geometrias diferentes, para cada caso haverá uma resistividade aparente correspondente, aproximadamente igual as demais. Na Figura 13.3 se $h_b = h_c$, ρ_a ainda poderá ser diferente para cada caso. O valor de ρ_a calculado pela aproximação dada no capítulo “Características elétricas do solo” será próximo a estes valores obtidos por medição.



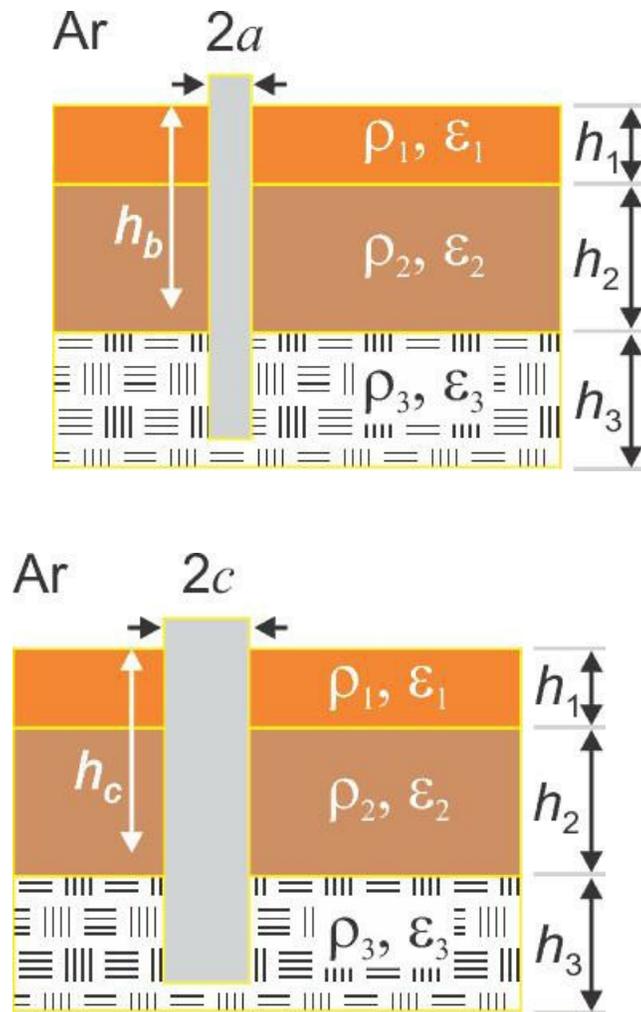


Figura 13.3: Hastes cravadas em diferentes profundidades e diferentes diâmetros

Caso a profundidade das hastes finais não seja conhecida, é possível cravar uma longa haste aos poucos (a cada meio metro, por exemplo) e ir fazendo anotações do valor da resistência medida. Os eletrodos P e C devem estar convenientemente distantes para garantir uma leitura correta para as diferentes profundidades.

É interessante destacar que a resistividade aparente representa o conjunto do solo com todas as suas camadas e mesmo eventuais objetos condutores ou isolantes enterrados. Este conjunto é que influenciará o eletrodo de aterramento final. Sendo minimizados ao máximo os erros de cálculo e de processos de medição.

13.6 MEDIÇÃO DA PERMISSIVIDADE E RESISTIVIDADE EM VÁRIAS FREQUÊNCIAS

A permissividade embora fundamental para alguns tipos de aterramento é ainda de difícil medição. Até o momento esta é feita em laboratórios com amostras do solo.

Existem vários processos de medição da permissividade do solo, aqui serão mencionados dois destes métodos, Figura 13.4. Estas técnicas de medição são feitas em laboratório e com amostras do solo. Para medir a permissividade e a resistividade do solo em uma faixa de frequências usa-se o mesmo procedimento para medir a permissividade em uma frequência fixa que é mostrado a seguir.

13.6.1 Preparação das amostras

As amostras são discos finos com diâmetro de 5 cm e uma relação diâmetro espessura > 10:1, assim a espessura terá 5 mm. Esta razão e geometria reduz erros devido às capacitâncias parasitas. A concentração de água tem influência na permissividade da amostra. O arranjo da medição pode ser outro.

13.6.2 Arranjo e considerações

O arranjo com quatro eletrodos tem uma dificuldade prática que é a de inserir os dois eletrodos internos sem alterar as características da amostra.

Os eletrodos devem ter contato de platina. A leitura do sinal deve ser feita com um analisador de espectro com variação de , pelo menos, de 10 Hz a 10 MHz, amplitude de 1 V. A medição deve iniciar após 20 minutos da tensão aplicada, em estado estacionário. Os devidos cuidados devem se tomados com relação a compatibilidade eletromagnética do circuito de medição. As capacitâncias e indutâncias parasitas, devidas ao acoplamento dos campos gerados pelo circuito de medição, podem afetar os resultados. As impedâncias dos cabos de medição, da fonte de corrente, dos conectores, dos contatos com a amostra, mútua entre os cabos de corrente e tensão são dependentes da frequência e devem ser eliminadas ou pelo menos reduzidas ao mínimo e os seus efeitos retirados dos valores medidos. Para testar a precisão do arranjo deve-se utilizar um disco padrão com permissividade conhecida.

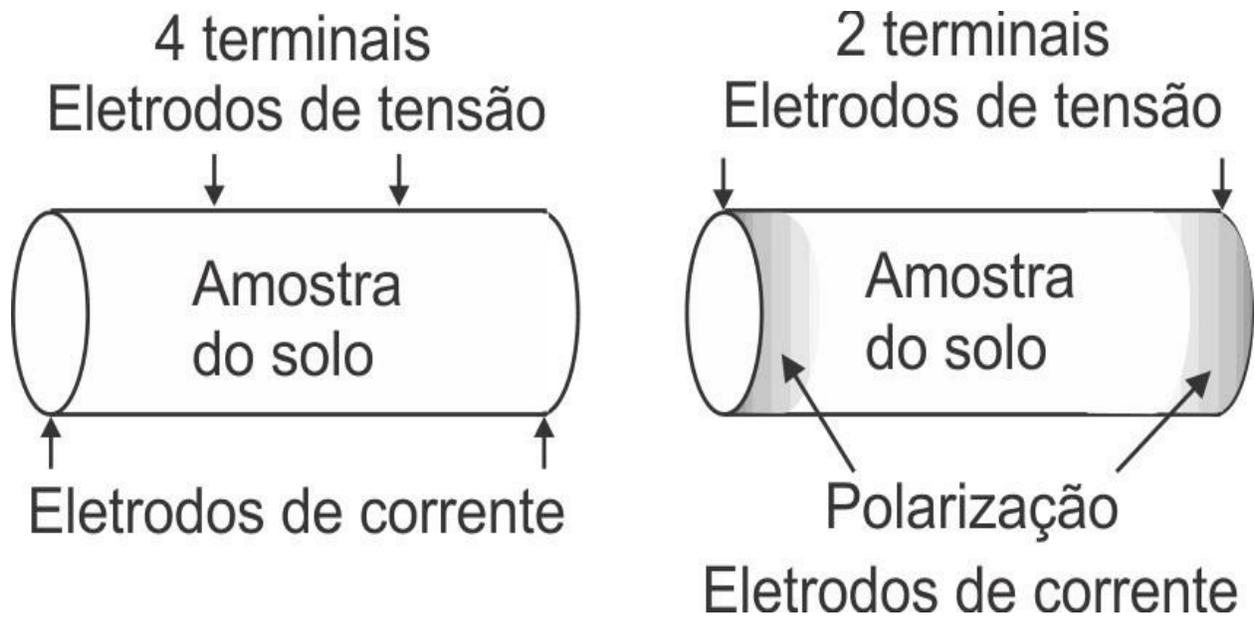


Figura 13.4: A direita arranjo com dois eletrodos, esta configuração introduz erros devido a polarização, junto aos eletrodos, para baixas frequências (< 10 kHz), os valores medidos são maiores que os reais. A esquerda arranjo com quatro eletrodos, como os eletrodos de tensão são colocados fora da região de ionização o resultado é mais preciso.

13.7 EQUIPAMENTOS DIGITAIS

Cada vez mais é comum o uso de equipamentos digitais de medição de grandezas elétricas relacionadas ao aterramento. Neste item algumas características destes equipamentos são apresentadas.

13.7.1 Resolução vertical

A resolução vertical de um instrumento de medição digital é a capacidade de distinguir entre dois pontos, Figura 13.5, este processo também é chamado de quantização.

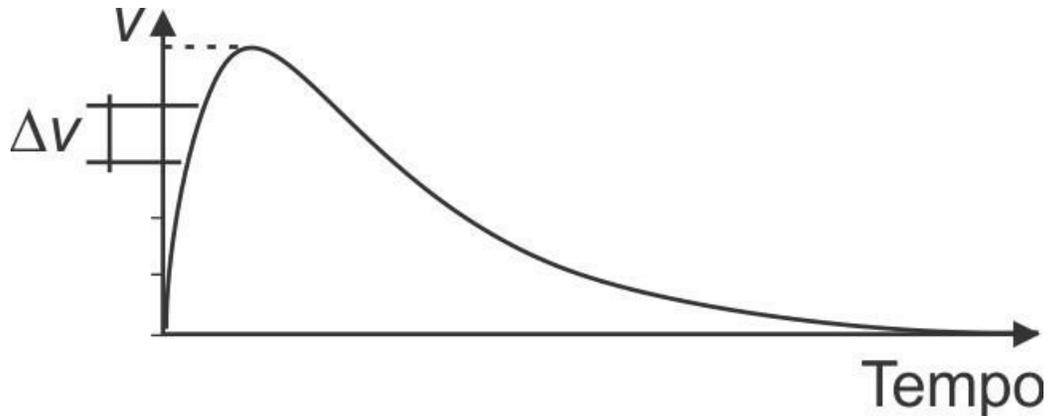


Figura 13.5: ΔV é a resolução vertical

Em geral a resolução vertical é medida em bits, tal como: 8 bits, 10 bits, 12 bits etc. A resolução de 8 bits = 255 decimal é de 1/255.

13.7.2 Taxa de amostragem

A taxa de amostragem define quantas vezes em um intervalo de tempo são feitas amostras de um sinal. A resolução horizontal é o intervalo entre duas medições como ilustrado na Figura 13.6.

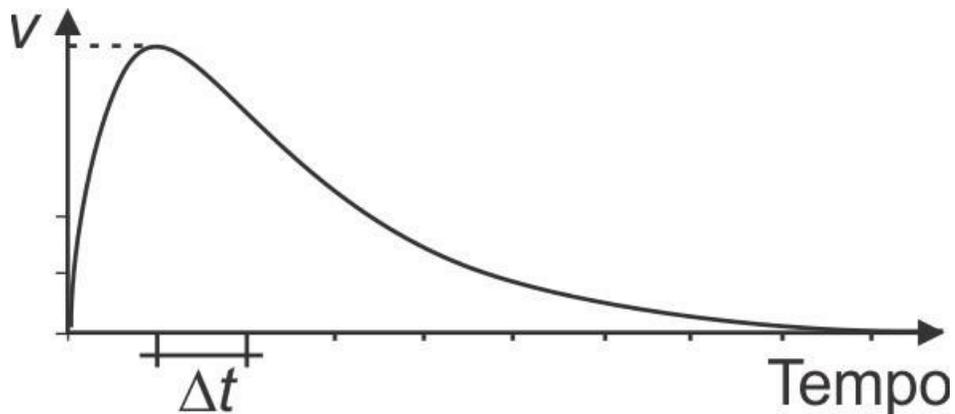


Figura 13.6: Intervalo de amostragem Δt

O número de pontos medidos por unidade de tempo, no sistema SI, é amostras/segundo. A

frequência de amostragem é o inverso da taxa de amostragem.

13.7.3 Nyquist

A frequência de Nyquist é a maior frequência que se pode representar com um intervalo Δt de amostragem e corresponde a $1/(2\Delta t)$.

13.7.4 Capacidade de armazenamento

A capacidade de armazenamento é o tamanho da memória de armazenamento do equipamento de medição (osciloscópio digital, digitalizador etc.). Sua unidade de medida em geral é em *bytes*.

14 INSTALAÇÕES PREDIAIS

14.1 ATERRAMENTO EM PRÉDIOS

Os aterramentos em prédios e edificações podem ser feitos de três formas básicas:

- Aterramento em ilhas de terra interconectadas por apenas um ponto;
- Aterramento estrela, todos os condutores do prédio são interligados;
- Aplicação combinada dos dois tipos anteriores.

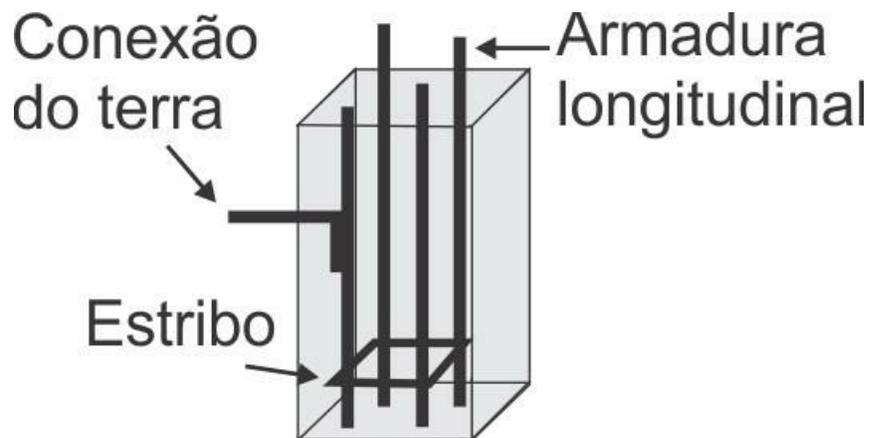
14.2 USO DA ESTRUTURA METÁLICA

Usa-se a estrutura de vergalhões do concreto armado como um caminho para a terra. Como estes são muitos, a impedância para a terra é bastante reduzida. Aparentemente o sistema convencional de amarração dos vergalhões antes da concretagem é suficiente para permitir uma boa passagem para a corrente. Em alguns casos as ferragens das vigas são soldadas com as ferragens dos pilares para garantir uma passagem confiável da corrente. O processo de soldagem deve ser acompanhado por técnicos especializados, uma vez que altas temperaturas podem vir a enfraquecer os vergalhões.

O aterramento no solo é feito por meio das estacas (concreto armado). Essas, por serem várias e por atingirem uma grande profundidade, levam a uma baixa impedância de terra. Elas também permitem que a corrente seja espalhada em um maior volume de solo, minimizando a tensão de passo.

Verificações dos danos que as descargas atmosféricas possam causar na ferragem mostram que é perfeitamente satisfatório o uso destas estruturas como via para escoar a corrente de terra. O aço usado na construção civil, quando aquecido a determinadas temperaturas, enfraquece. Uma descarga atmosférica possui componentes de corrente elétrica de grande energia e duração. A influência do aquecimento causado por estas correntes em vergalhões de pequena bitola ainda não foi verificada satisfatoriamente. Um modo de minimizar o superaquecimento da ferragem seria usar o sistema de proteção contra descargas atmosféricas convencional em adição à estrutura de concreto armado.

A conexão à ferragem deve ser feita por meio de rabichos de aço soldados nos vergalhões das vigas antes da concretagem. Esta conexão de terra é do mesmo tipo de aço usado na ferragem para evitar a corrosão galvânica. Esses rabichos devem ficar a altura das caixas de tomadas de energia elétrica, telefone etc. (em geral a ~30 cm do contrapiso ou na altura da caixa de disjuntores ou painel), observe a [Figura 14.1](#).



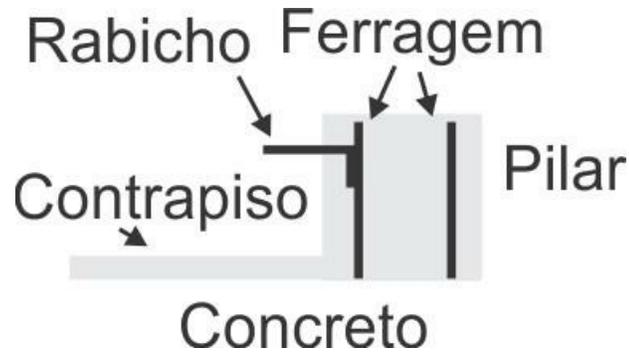


Figura 14.1: Aterramento em ferragens do concreto armado

14.2.1 Pilares

Os pilares de sustentação contribuem para a redução da resistência e da indutância de aterramento.

14.2.2 Contrapiso

O contrapiso das edificações deve ser feito de concreto armado com uma malha de vergalhões de 1 x 1 m, $\phi = 5 \text{ mm}^2$ (mínimo). No ambiente em que ficar a instalação de controle e monitoração, deve-se usar malha industrial fornecida pelas siderúrgicas ou malha de 10 x 10 cm, $\phi = 5 \text{ mm}^2$ (ou conforme necessidade). Neste caso, a malha também pode ser montada no local, os vergalhões devem ser soldados a cada cruzamento. As malhas devem ser soldadas a cada ponto com a armação das vigas baldrame. É recomendada uma ligação do ponto mais próximo da ferragem do contrapiso à barra de equalização local.

O cálculo da resistência de terra do contrapiso é feito a partir da equação:

$$R_m = \rho_a \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{L_C} \right) \quad [\Omega]$$

em que

A – área do contrapiso [m^2];

L_C – comprimento total do ferro utilizado [m], condutores horizontais.

Exemplo 14.1

Sala com 12 x 12 m, quadrículas de 1 x 1 m e resistividade aparente 400 Ω (a primeira camada é de concreto com 90 $\Omega \cdot \text{m}$):

$$R_m = 400 \times \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{144}} + \frac{1}{312} \right) \leq 16,053 \, \Omega$$

#

14.3 ATERRAMENTO ESTRELA

O aterramento estrela visa a unir o maior número possível de condutores para obter uma grande massa condutora, [Figura 14.2](#). Esta técnica é de fácil instalação mas tem uma desvantagem, colocar todos os tipos de ruídos de terra diretamente em contato.

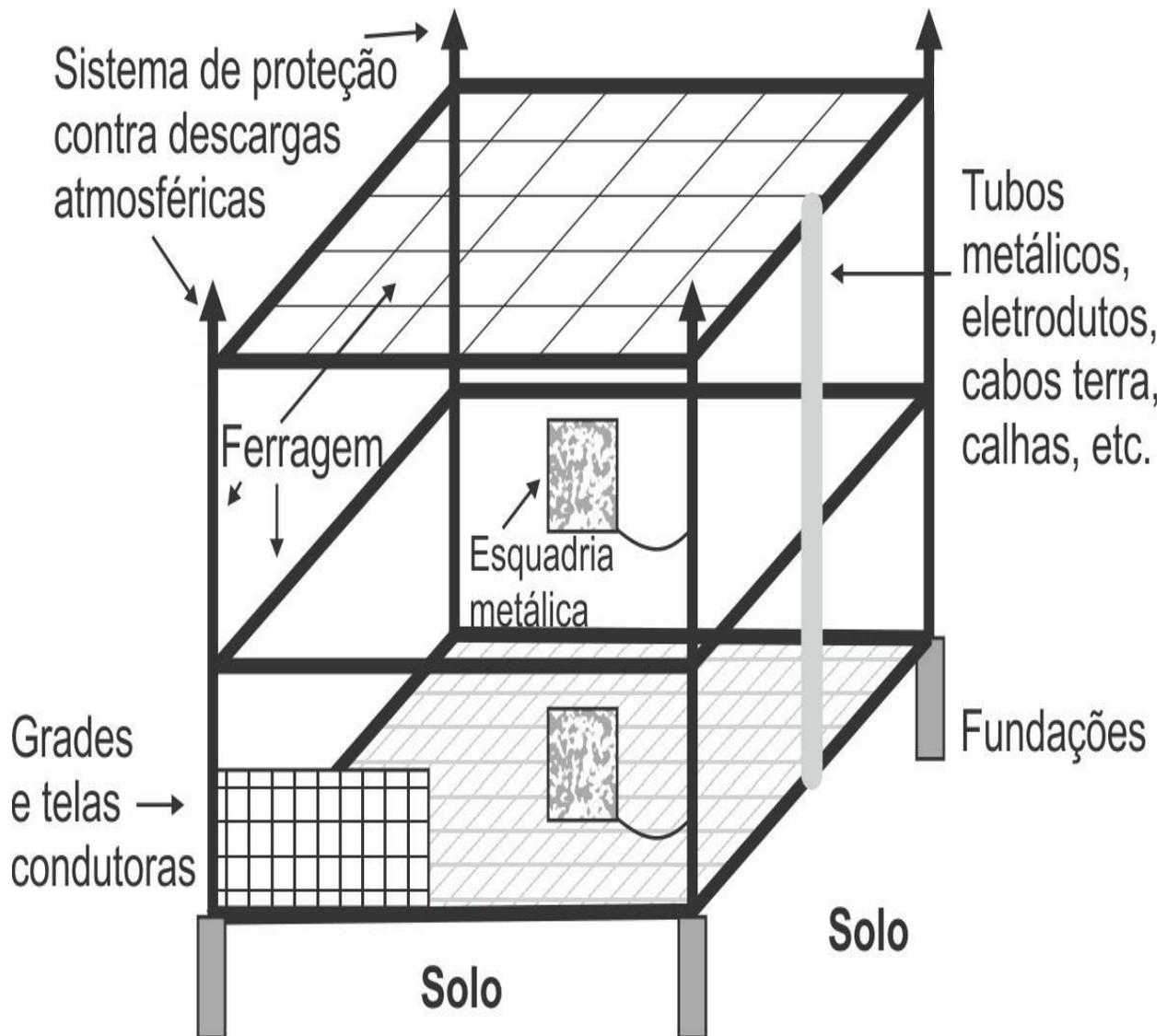


Figura 14.2: Interligação dos metais em uma edificação

Para calcular os parâmetros elétricos dos condutores de descida considera-se a teoria das imagens e os parâmetros de linhas de transmissão.

14.4 ATERRAMENTO EM ILHAS

No aterramento em ilhas, os equipamentos são distribuídos em planos terra isolados do plano terra geral do pavimento, [Figura 14.3](#). Estes planos de terra são chamados de ilhas de terra ou zonas de terra. Os equipamentos são agrupados nestas ilhas de terra de acordo com o tipo de ruído de terra emitido por estes. A interconexão das ilhas de aterramento é feita por meio de um caminho com origem em um único ponto em cada ilha. Por esta via passam os cabos de sinal, de potência ou de terra, [Figura 14.4](#).

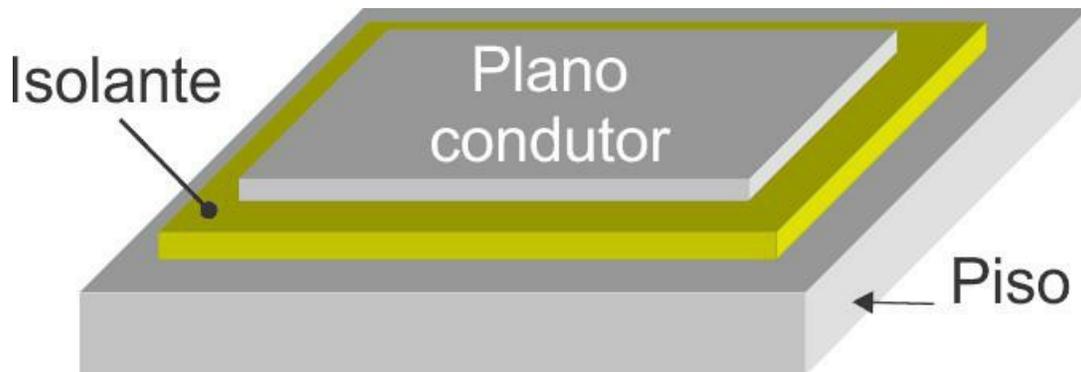


Figura 14.3: Esquema para construção de planos de terra ilhados

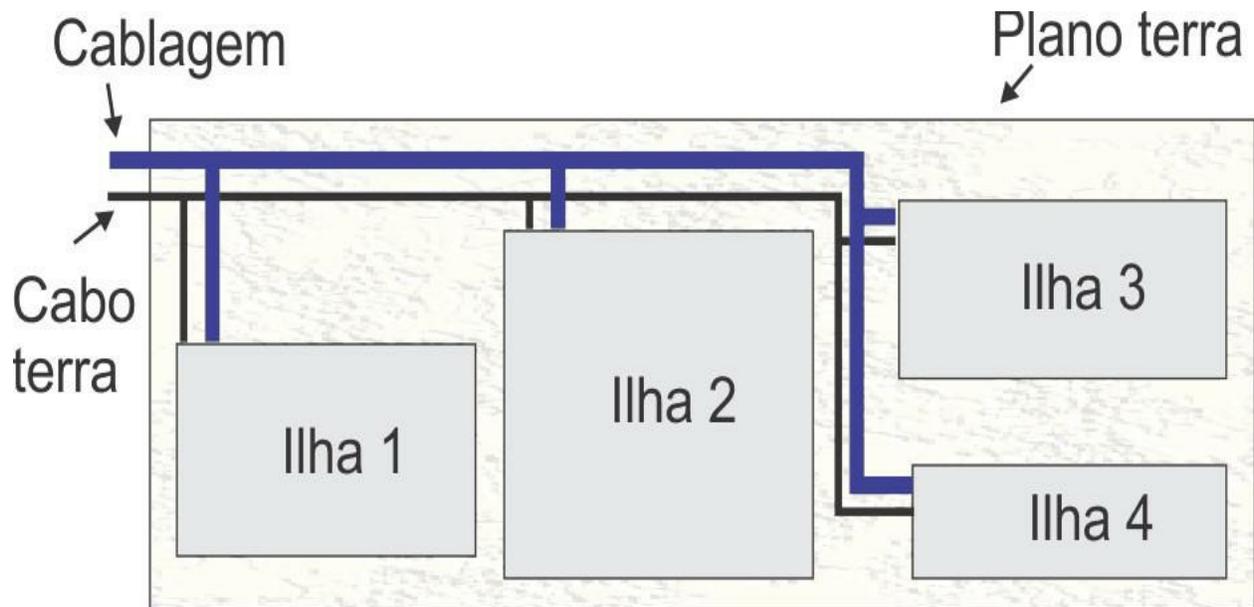


Figura 14.4: Ambiente com ilhas de terra

A cablagem de terra se une em multiponto ou em um único ponto. Em cada andar ou ambiente de uma edificação há pelo menos um ponto de aterramento que está ligado ao terra geral da estrutura.

Aparecem dificuldades de manutenção deste sistema. Descuidos na instalação de novos

equipamentos no prédio podem danificar o sistema de aterramento. O plano de terra e o plano isolante têm apenas alguns milímetros de espessura e fragilidade mecânica. Cuidados adicionais devem ser tidos na limpeza do ambiente.

14.5 PLANOS TERRA

Os planos de terra são feitos por placas metálicas condutoras ou por malhas metálicas e têm baixa indutância e alta capacitância para o terra. Quando a corrente de terra é contínua ou de baixa frequência a equipotencialização na placa é praticamente atingida. Para transitórios e altas frequências (10 MHz a 1.000 MHz), não há equipotencialização nas dimensões de uma sala comercial, ver o capítulo “Caminho de retorno” e [Figura 14.5](#).

Como nos planos de terra de placas de circuito impresso, os planos de terra de ilhas de aterramento proporcionam o menor caminho para a corrente de retorno e a menor impedância. A tensão superficial fica reduzida ao mínimo.

Grades de aço ou grades feitas com aço para a construção civil são usadas dentro do piso de concreto; no subsolo são usadas grades de material não corrosivo como o cobre. Nas grades feitas com vergalhões para a construção civil, os vergalhões devem ser soldados a cada vértice. Algumas vezes telas de arame galvanizado usadas em alambrados e galinheiros podem ser uma boa opção. Quanto menor o tamanho da quadrícula mais próximo de um plano contínuo é a grade.

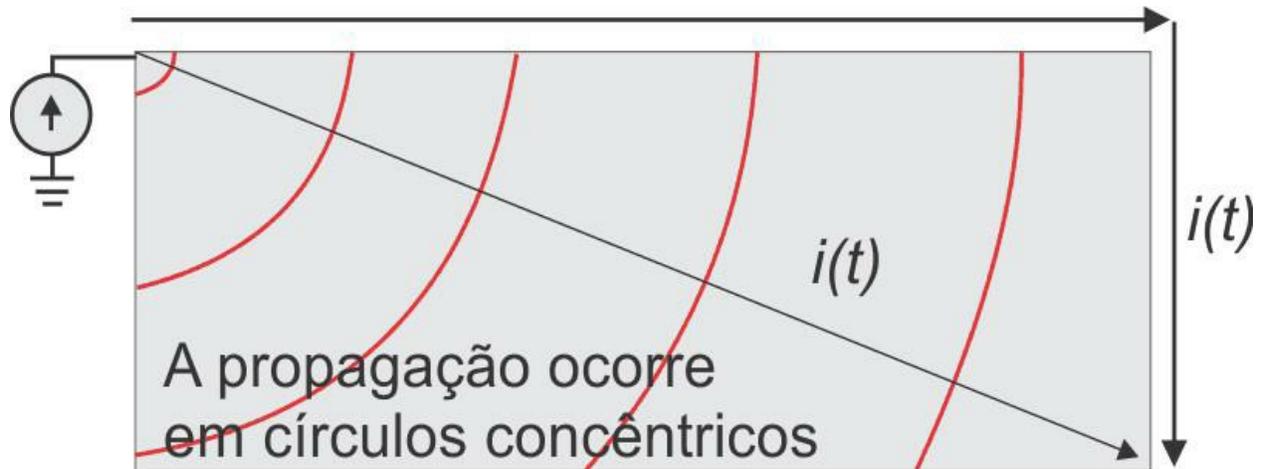


Figura 14.5: Propagação de corrente em plano condutor

14.6 USO COMBINADO

Equipamentos muito sensíveis ou muito emissivos podem ficar em zonas de terra e o restante da instalação elétrica e equipamentos eletrônicos ficam ligados em estrela.

14.7 BARRAS DE EQUALIZAÇÃO

A barra de equalização de terra, [Figura 14.6](#), é uma barra de cobre onde são ligados os condutores terra vindos das diversas partes do sistema elétrico. A barra de equalização deve sempre estar ligada à caixa metálica do quadro elétrico.

A barra de equalização de terra é diferente da barra de equalização do neutro.

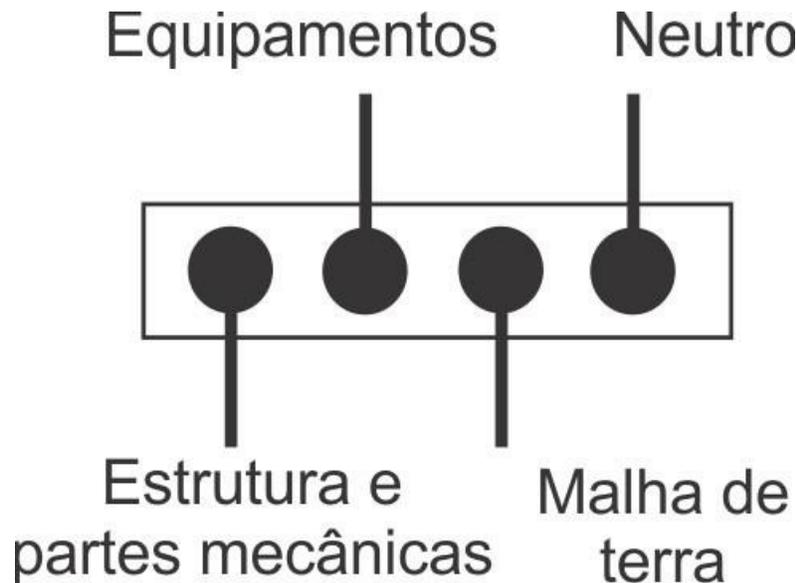


Figura 14.6: Barra de equipotencialização geral

A barra de equalização fica instalada em um quadro elétrico, [Figura 14.7](#), ou em outro local da instalação. Outros locais comumente encontrados para instalar a barra de terra são aqueles próximos ao piso, próximos ao teto e à entrada de cablagem etc.

No quadro elétrico também é encontrada a barra de equalização do neutro. Esta barra poderá estar ou não diretamente ligada à barra de terra.

Quadro
elétrico

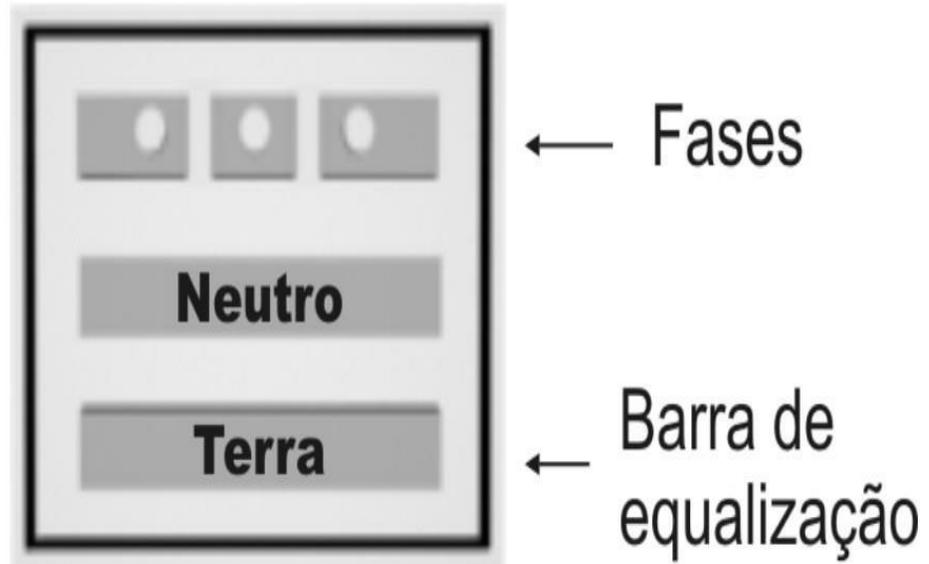


Figura 14.7: Quadro elétrico com três pontos para ligação das três fases, barra para ligar o neutro e barra de equalização de terra

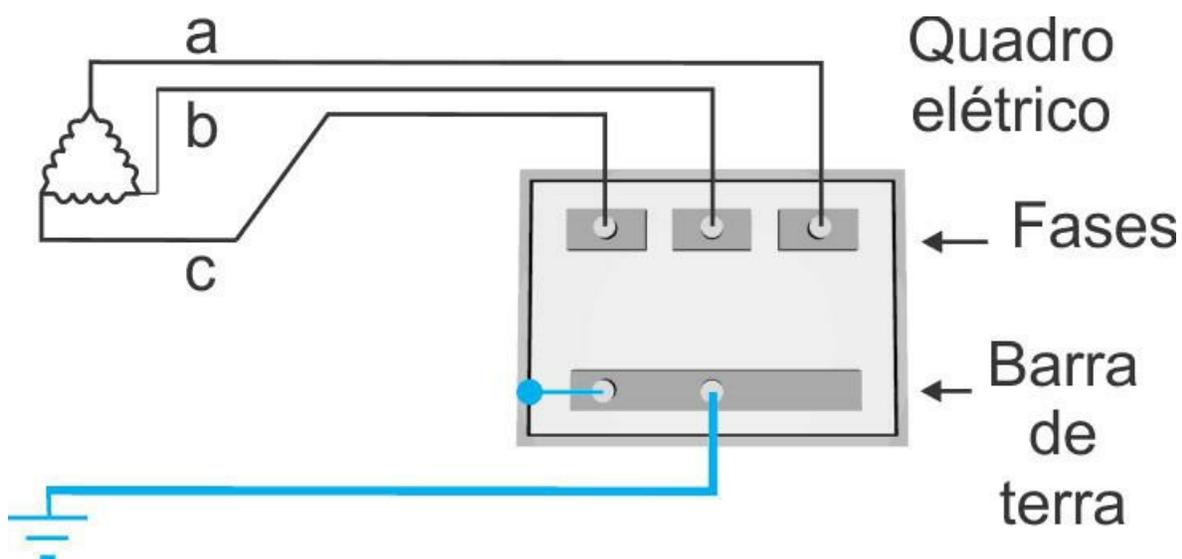
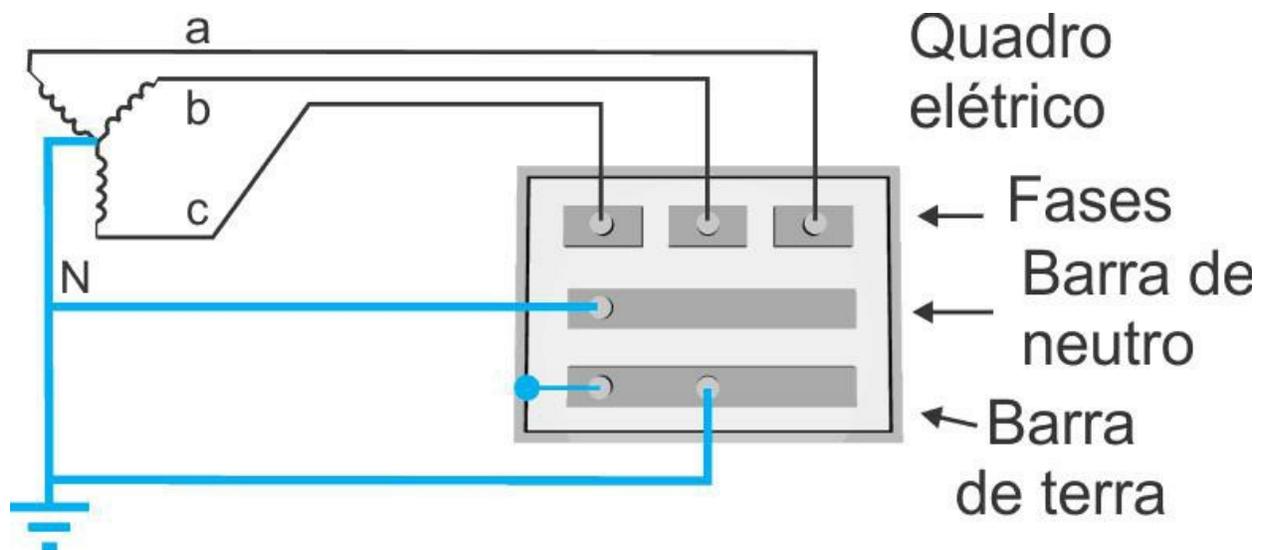
Havendo diferença de tensão significativa entre o neutro e o terra deve-se aumentar a bitola do neutro. Outras causas são possíveis para o aparecimento desta tensão. O importante é que a tensão neutro-terra fique dentro de limites toleráveis ou previstos em norma quando o sistema estiver operando na carga máxima.

Quando não houver ligação direta entre a barra de terra e a barra de neutro, surtos de tensão poderão ser prejudiciais. Neste caso, a inclusão de protetores elétricos entre o terra e o neutro amenizarão os efeitos do surto.

14.7.1 Barra de equipotencialização – entrada de energia

As barras de equipotencialização são de cobre e serão ligados ao anel horizontal no subsolo ao redor da edificação, à estrutura de aço do concreto armado, às partes mecânicas da edificação (canalização, estruturas metálicas de suporte etc.) e ao PE (*protective earth*) que é o terra de referência. À barra da subestação (SE) deve ser também ligado o neutro do transformador.

Estas barras estarão junto à entrada de cabos e junto à conexão do condutor de descida ao anel externo. A [Figura 14.8](#) ilustra três situações do uso da barra de equipotencialização do terra na entrada de energia.



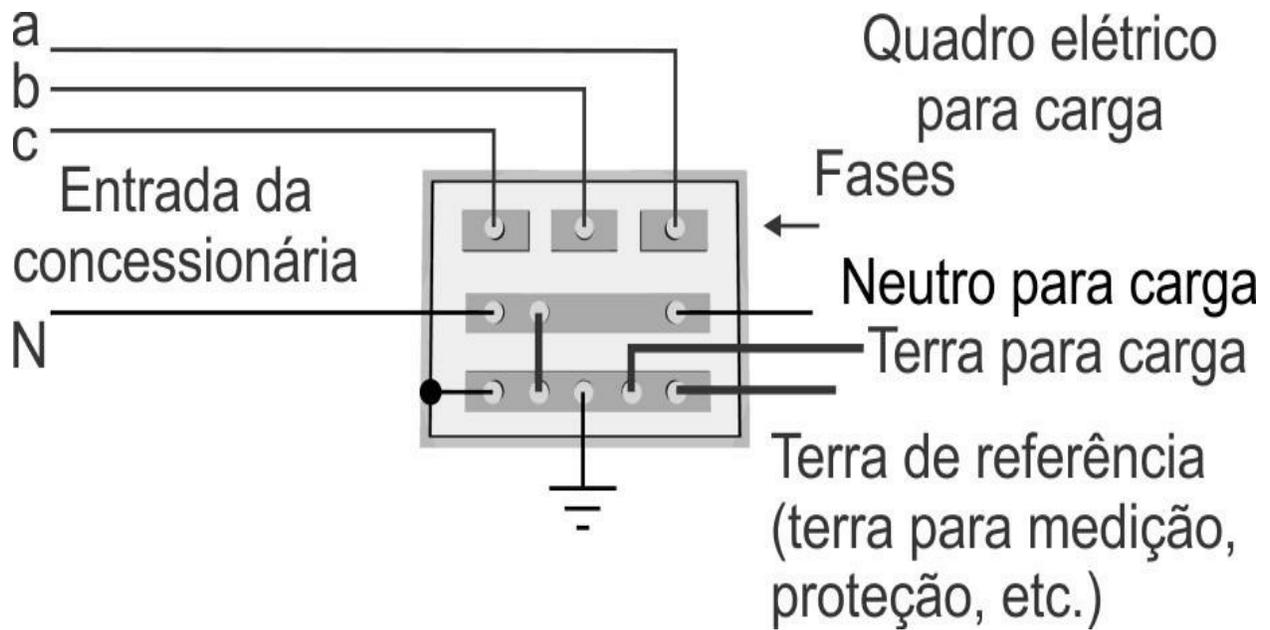


Figura 14.8: Ligações do terra na entrada de energia

Para quadros próximos ao terra do neutro, a ligação da barra de neutro deve ser feita diretamente ao eletrodo de aterramento. Para quadros distantes do terra do neutro, além da ligação direta da barra de neutro com o terra do neutro, deve haver uma interligação com a barra de terra. Isto decorre por estar o aterramento da instalação próximo à barra de terra.

Havendo mais de uma entrada de energia deverá haver uma interligação dos terras das barras através da malha de terra da instalação, [Figura 14.9](#). Uma barra de terra deve estar há um máximo de 30 m de outra barra de terra.

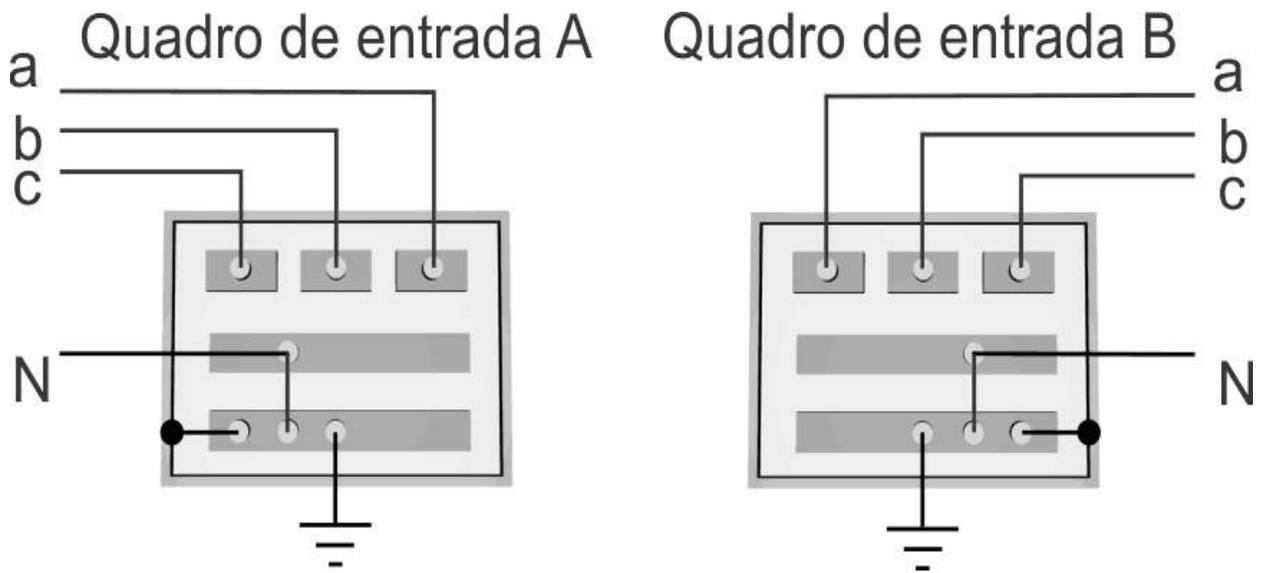


Figura 14.9: Barras de equalização de entrada interligadas pela malha de terra

Nos casos em que o sistema elétrico é suprido por apenas duas fases, as interligações do terra e do neutro devem seguir os esquemas da [Figura 14.10](#). Em ambos os casos o neutro é ligado diretamente ao neutro do transformador ou da rede elétrica. A barra de equalização deve ser aterrada diretamente no terra do neutro em caso de proximidade física. Para barras de equalização distantes do terra do neutro, deve-se fazer um novo aterramento próximo e interligar este terra com o terra do neutro. Neste último caso é preferível que o cabo de interligação dos dois pontos de terra seja subterrâneo.

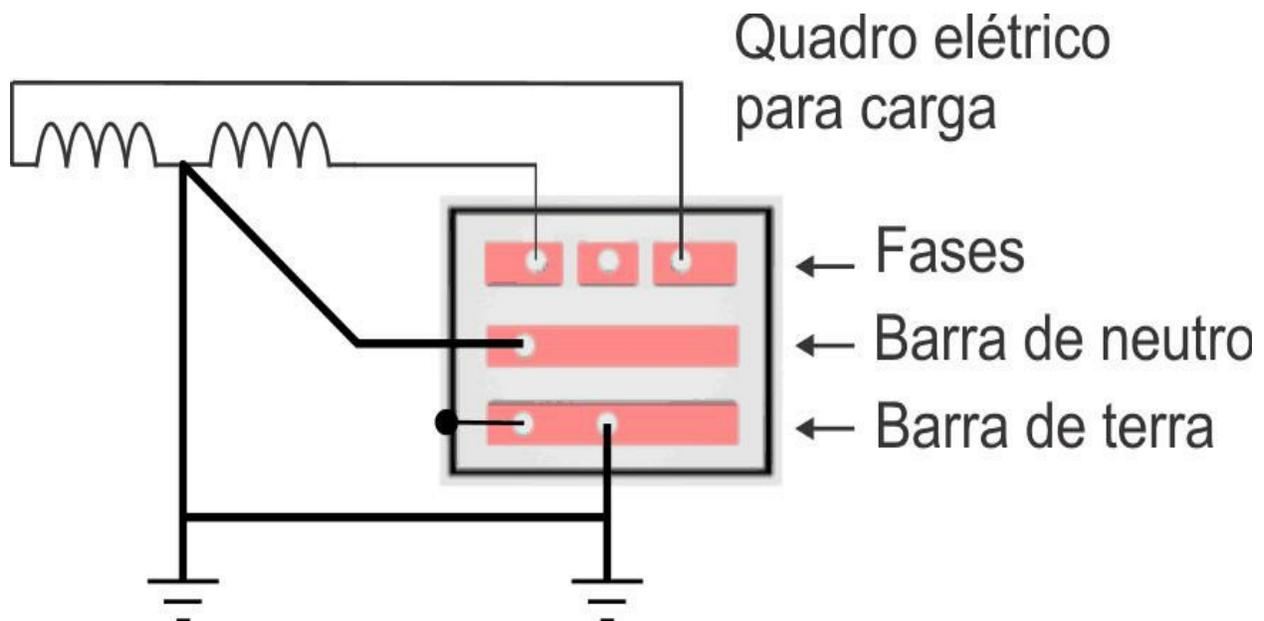


Figura 14.10: Sistema bifásico e ligações com o terra

14.7.2 Barras de equipotencialização local

As barras de equalização de terra local, [Figura 14.7](#), devem estar ligadas à barra de equalização principal, ver [Figura 14.11](#).

Uma barra de equalização local pode ser a barra de equalização principal para outra barra de equalização local.

Nos casos em que a barra de terra local esteja mais próxima da malha de terra do que da barra de equalização principal, a barra de terra local deverá estar ligada ao ponto mais próximo da malha de terra.

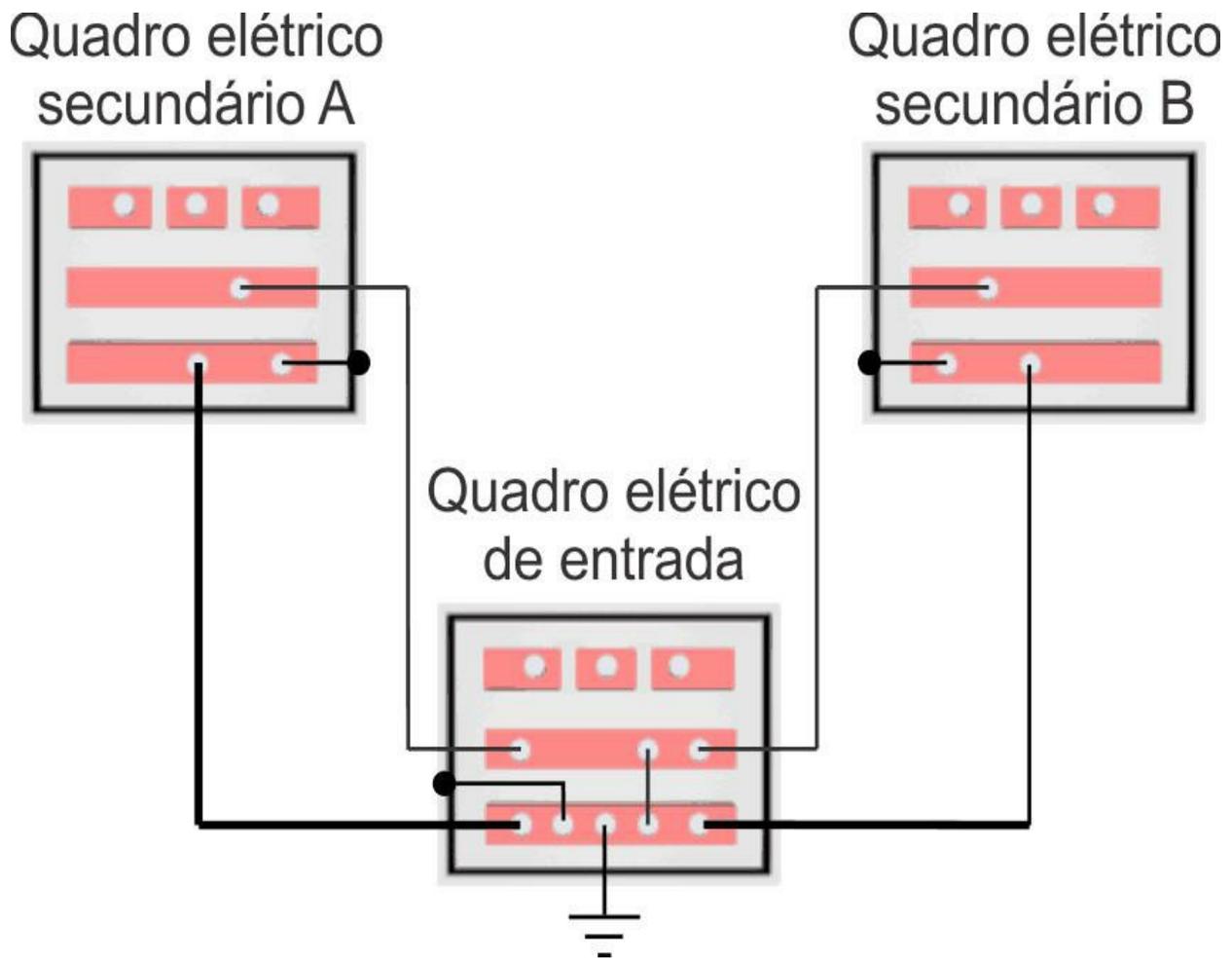


Figura 14.11: Barras de equalização locais ligadas à barra de equalização da entrada de energia

A [Figura 14.12](#) mostra as impedâncias, Z_A , Z_B , Z_E , e os tempos de propagação, τ_A , τ_B , τ_E , nos circuitos de terra e de neutro formados pelos quadros locais A e B com o quadro de entrada e o eletrodo de aterramento. Nesta figura também aparece ilustrada a impedância do eletrodo de aterramento Z_T . Reflexões múltiplas poderão ocorrer em caso de transitório. Estes transitórios podem ter origem em desligamentos, religamentos, curtos-circuitos, surtos induzidos, eletrostática, surtos atmosféricos, acoplamento capacitivo, acoplamento indutivo etc.

A presença das impedâncias indica que uma perfeita equipotencialização não será atingida. A ligação das barras de terra e de neutro nos quadros locais depende da sensibilidade dos equipamentos instalados. A interligação poderá ser feita por meio de protetores elétricos para prevenir danos em caso de sobretensão.

Quadro elétrico secundário A

Quadro elétrico secundário B

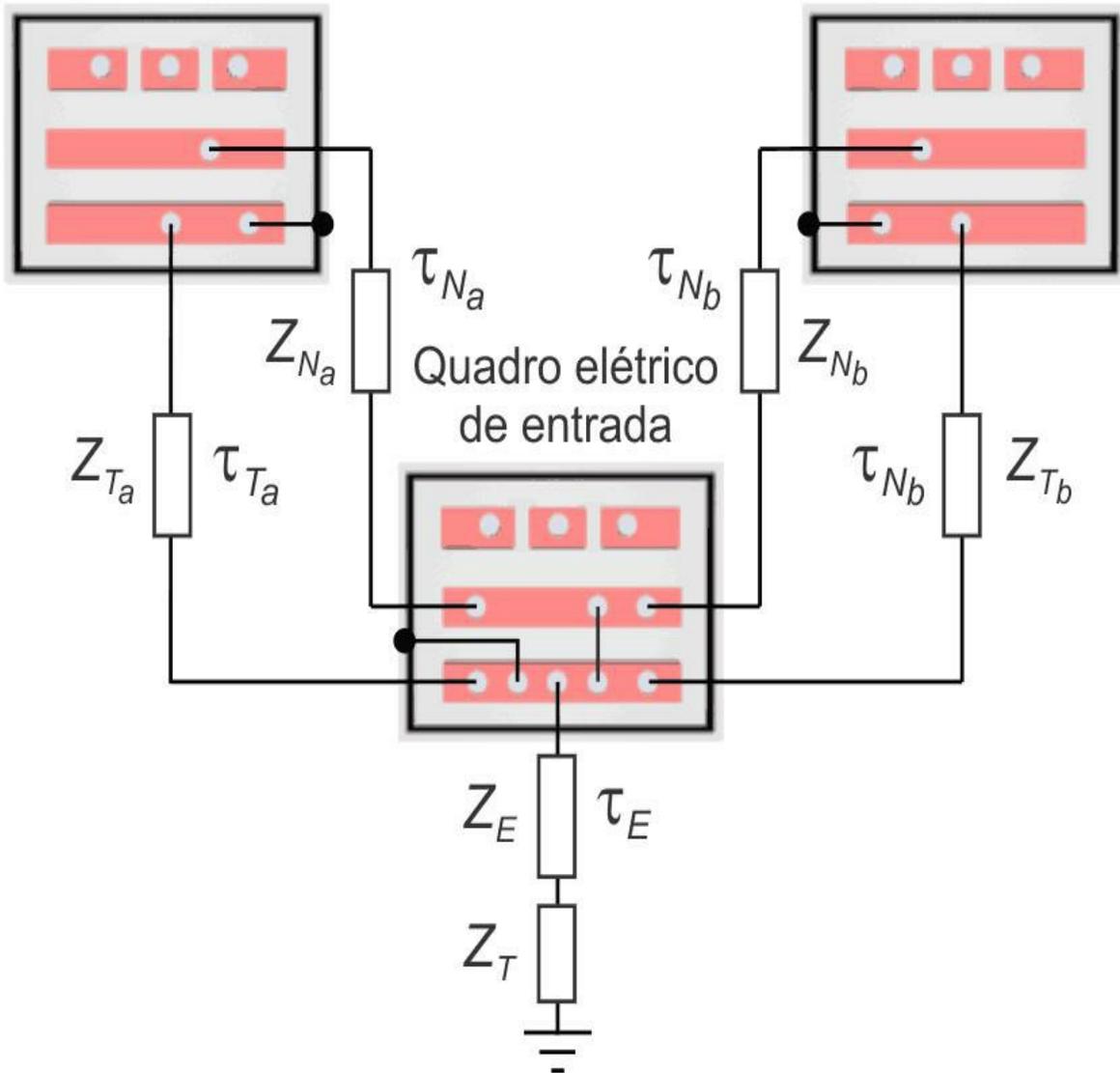


Figura 14.12: Barras de equalização locais ligadas à barra de equalização da entrada de energia com as respectivas impedâncias e tempos de propagação

A [Figura 14.13](#) exemplifica um caso em que existem três barras de terra. Duas estão localizadas na SE e outra no prédio da instalação residencial, industrial ou comercial. Na SE têm-se uma barra para a instrumentação, iluminação e controle; e outra barra é para equalização do neutro com a estrutura e com a barra para instrumentos. Para SE de pequenas dimensões não há necessidade para duas barras. Na barra localizada no prédio estão ligados o terra de proteção, PE, o terra da estrutura, e as partes metálicas. A interligação das duas barras principais é feita pela malha de aterramento da instalação.

Quando ocorre circulação de corrente no sistema de aterramento haverá tensão entre as barras de terra. Esta tensão deve ser observada a fim de não causar mau funcionamento ou queima de equipamentos.

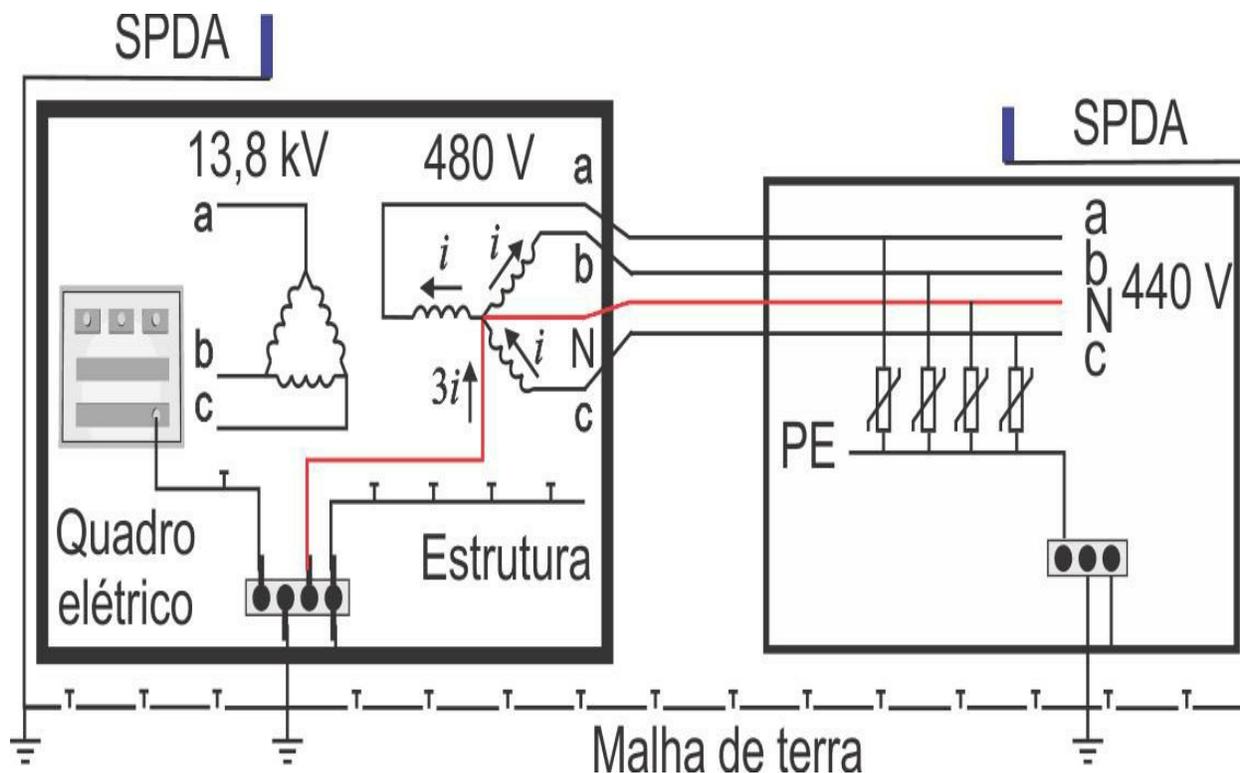


Figura 14.13: Barras de equalização na subestação e no prédio. O i indica a corrente de sequência zero. A linha contínua com T's representa um condutor terra aéreo, quando a linha é contínua é um condutor terra no subsolo.

14.7.3 Primeiro piso da edificação escritório

O primeiro piso está sendo considerada uma área de escritório, de controle e monitoração da fabricação. Na área de escritório o fio terra deve seguir os conduítes da instalação elétrica. Em cada tomada deve haver uma terminação do cabo terra, tomada de três pinos. Os suportes das luminárias e espelhos dos interruptores metálicos devem ser aterrados. Os fios terra devem ser conectados a uma barra de equalização de potencial local instalada no quadro de energia do piso.

A área de controle e monitoração deve seguir com a instalação do terra como anteriormente e adicionar pontos de terra diretamente ligados ao terra do contrapiso. A ferragem do contrapiso deve estar ligada à barra de equalização local.

Sempre quando possível ou necessário os terras devem segregar os tipos de ruídos. Por caminhos separados seguem para o terra geral ruídos de comunicação, de informática, máquinas elétricas, centelhadores, partes metálicas etc.

Os equipamentos de informática e de alta frequência devem estar aterrados em uma malha própria e isolada. Esta malha terá apenas ligação diretamente com o terra, preferencialmente com

uma barra de equipotencialização de terra, [Figura 14.14](#) e [Figura 14.15](#).

14.7.4 Demais pisos

Os demais pisos sendo áreas de escritório portanto o fio terra deve seguir os conduítes da instalação elétrica. Cada tomada deve ser de três pinos, fase, neutro e terra. Como antes, os suportes das luminárias e espelhos metálicos dos interruptores devem ser aterrados. Os fios terra devem ser conectados a barra de equalização de potencial local instalada no quadro de energia do piso.

As barras de equalização em cada piso, por sua vez, estarão interligadas por meio de um cabo, barra ou estrutura metálica do prédio. A barra de terra principal receberá este cabo ou barra.

Devido à impedância do cabo ou barra de interligação e mesmo da estrutura metálica, haverá diferença de potencial entre as barras de terra de cada piso. Equipamentos interligados e aterrados em pisos diferentes poderão sofrer com tensões e correntes de modo comum.

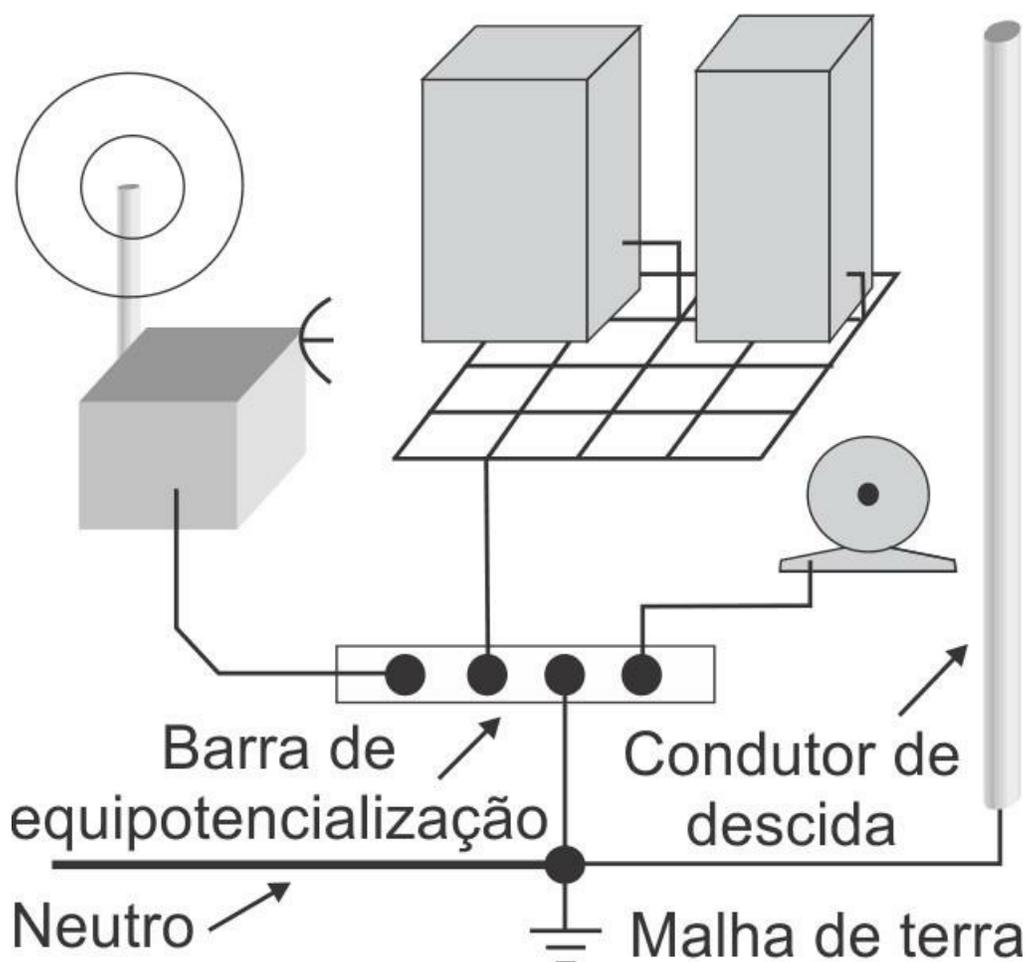


Figura 14.14: Aterramento de instalação por meio de barra de Equipotencialização: Informática

Para aterramento de equipamentos de informação deve-se colocá-los encima de uma grade

condutora de 30 x 30 cm isolada do piso e com apenas uma conexão com a barra de equalização. Os equipamentos serão aterrados a grade por meio de condutores de cobre isolados (mínimo 25 mm²) os mais curtos possíveis. Estes mesmos equipamentos terão uma conexão direta com a barra de equalização que segue o caminho das fases. Isto é, o cabo terra segue o cabo de energia até o quadro elétrico onde é aterrado na barra de terra.

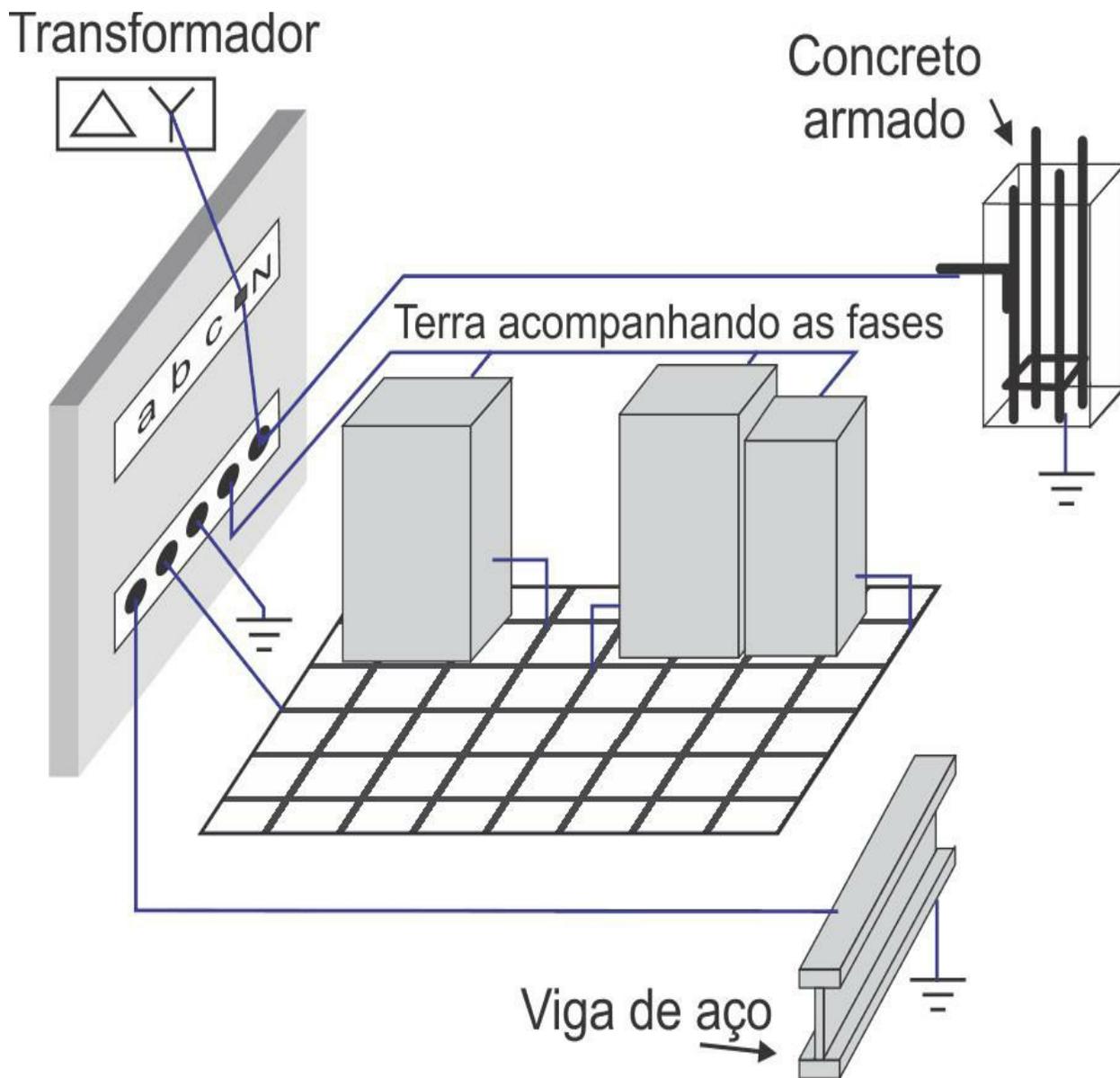


Figura 14.15: Aterramento para informática

No caso de diversas grades, estas deverão estar interligadas por um sistema radial em que a extremidade está ligada na barra de equalização de principal ou o eletrodo de terra geral. Este sistema radial poderá ser independente dos demais terras, tendo um único ponto de contato

externo ao terra de informática. Para isto utilizar fio de cobre isolado (mínimo 25 mm²). Neste caso, além da barra de aterramento usual no quadro elétrico haverá uma outra barra de terra exclusiva para as ilhas com equipamentos de informática. A barra de terra para informática deverá ser isolada dos demais terras e condutores. Para escoar mais facilmente as altas frequências a utilização de fita de cobre isolada de aterramento é indicada, desde que suporte a mesma corrente do fio de cobre. Emendas no condutor terra deverão ser evitadas ao máximo.

15 INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS

15.1 INTRODUÇÃO

As instalações industriais devem ser analisadas caso a caso. Cada instalação tem as suas particularidades que exigem procedimentos de aterramento adequados. Neste capítulo, algumas instalações são mostradas com os respectivos sistemas de aterramento. Estes sistemas de terra podem ser usados como base para outras plantas e de acordo com suas características gerais podemos adequá-los a outras situações.

15.2 MANUTENÇÃO

As garras-jacaré para aterramento devem ser mantidas sempre limpas para garantir uma boa passagem da corrente. Conexões com porcas e parafusos têm de estar sempre bem apertadas, a verificação periódica é importante, principalmente em locais com vibrações mecânicas. Deve-se verificar se as conexões estão sempre livres de tintas e vernizes. Os cabos terra têm de estar sempre à mostra para facilitar a inspeção. Em locais de passagem os cabos devem ser protegidos de rodas metálicas, pneus, pés, caixas e caixotes etc.

15.3 INTERIORES

15.3.1 Inflamáveis e explosivos

Devem ser conectados as estantes metálicas, portas condutoras, pontes rolantes, grades e outros utensílios em almoxarifados e galpões para guardar produtos inflamáveis e explosivos, sempre ao terra.

Aterrar sempre os motores elétricos e as esteiras rolantes. Em instalações com atmosfera inflamável, aterrar todas as bombonas metálicas, tonéis, misturadores, carrinhos, baldes, tubos em geral. As flanges das conexões dos tubos têm sempre um *by-pass* (fala-se *baipas*) para garantir a boa ligação com a terra, ver [Figura 15.1](#). Em alguns casos podem ser necessários sapatos especiais para o pessoal, os quais mantém o indivíduo aterrado; isto descarrega a descarga estática acumulada na pessoa. A umidificação do ambiente é um meio de evitar a descarga eletrostática.

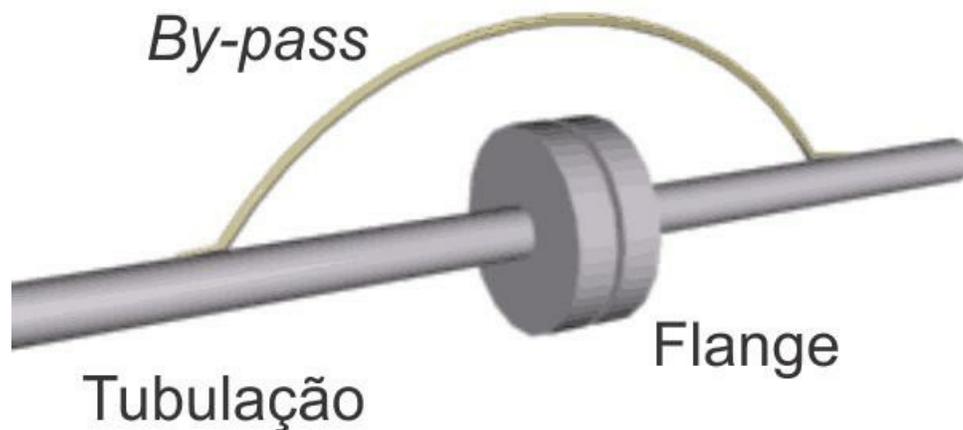


Figura 15.1: *By-pass* para garantir a passagem da corrente de terra

Os caminhões-tanque e outros veículos de transporte de material inflamável ou explosivo são aterrados por correntes ou por tiras condutoras que ficam em permanente contato com a pavimentação ou solo.

Cuidado deve ser tomado no momento da conexão com o terra. Neste instante poderão surgir centelhas.

15.3.2 Controle, fabricação, transporte

Em instalações em que haja muitos equipamentos de controle, monitoração, fabricação e dispositivos eletrônicos como *microchips* e placas de circuito impresso atenção especial deve ser dada ao aterramento para escoar a eletricidade estática. Pulseiras especiais de aterramento são usadas pelo pessoal de fabricação e manuseio de *microchips*, placas de circuito impresso, e dispositivos eletrônicos em geral. Os painéis, as portas, as estantes, os caminhões, as esteiras rolantes e tudo o mais têm de estar aterrados. Descargas eletrostáticas indesejadas podem causar mau funcionamento ou parada do sistema eletrônico, trazendo grande prejuízo com a interrupção do fornecimento de serviço.

15.3.3 Escritórios

Os aparelhos de fax, modems, computadores, impressoras, máquinas de escrever, fotocopiadoras etc. devem estar aterrados. Em escritórios com atmosfera seca (com ar refrigerado ou localizados no centro-oeste brasileiro durante o inverno e em outras regiões secas), fitas de aterramento (calcanheiras) podem ser usadas nos sapatos das pessoas para mantê-las sem eletricidade estática. Este aterramento de pessoas elimina choques elétricos desconfortáveis em toques em outras pessoas e em partes metálicas como carros, maçanetas, arquivos, equipamentos etc. As descargas eletrostáticas em equipamentos digitais causam envelhecimento acelerado ou destruição dos *microchips*. A perda de memória eletrônica ou interferência nos sinais digitais são outros efeitos das descargas eletrostáticas.

15.3.4 Técnicas de aterramento da eletricidade estática

Aterrar todas as partes metálicas. Isto significa colocar sempre em contato direto com o solo ou o sistema de aterramento os equipamentos, maquinarias e pessoas. O aterramento possibilita o contínuo escoamento da carga estática gerada para a terra, deixando os equipamentos, maquinaria e indivíduos sem cargas. O material isolante não permite que a carga flua para a terra quando aterrados.

Para aterrar a pele humana, que é um material condutor, deve-se fazer via uma resistência de 1 M Ω (um milhão de ohms). Esta resistência possibilita o escoamento da carga estática para a terra sem causar transitórios de corrente elétrica relevantes. Pulseiras, fitas condutoras passando por dentro do sapato e por fora deste (calcanheira usada em ambiente de escritórios) e sapatos especiais (ambiente de fábrica) são usados para esta função. Estes sapatos e pulseiras são encontrados no mercado.

15.4 INSTALAÇÕES

15.4.1 Bandeamento

As bandejas devem ser seguidas por cabos terra para suportar altas correntes. Caso as bandejas não sejam de material condutor, deve-se colocar uma fita condutora no leito da calha. Sendo bandejas condutoras a continuidade elétrica deve ser assegurada por meio de soldagem. A bandeja metálica ou fita devem ser conectadas ao cabo, [Figura 15.2](#). O cabo, a bandeja ou a fita devem ser conectados ao sistema de terra mecânico que está ligado à barra de equipotencialização.

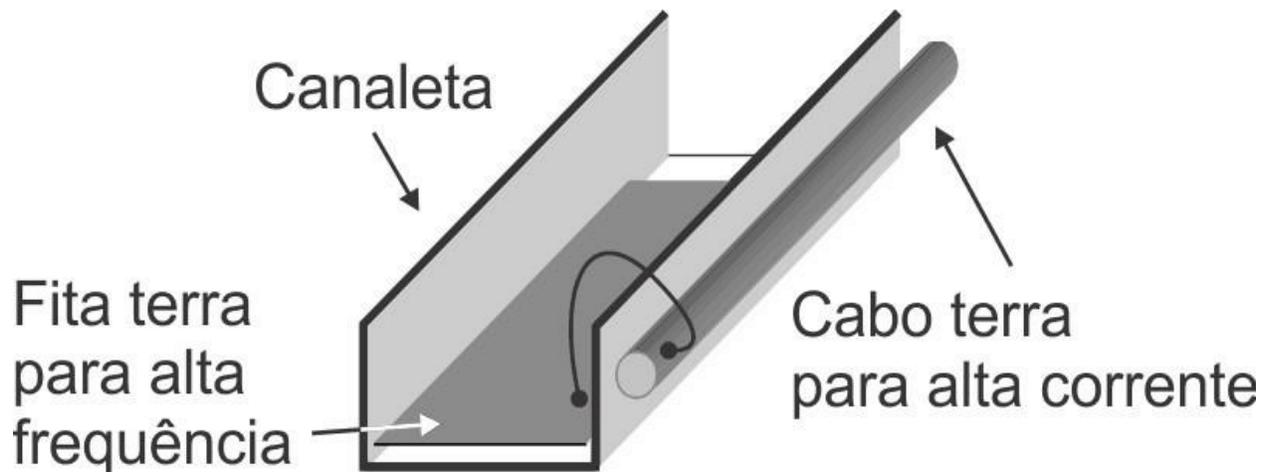


Figura 15.2: Bandeja dielétrica com fita condutora e cabo terra

Mesmo os cabos de baixa frequência como os cabos de força das três fases estão sujeitos a impulsos e a frequências elevadas. Estas frequências e impulsos são de origem diversas no sistema elétrico, como chaveamento eletrônico, chaveamento da rede, partida de motores, descargas atmosféricas distantes etc.

15.4.2 Torre de telecomunicações

As torres de telecomunicações são bastante comuns, como as torres de microondas, televisão, transmissão e retransmissão. Um anel de condutores terra interliga os pés metálicos da torre e a armação do concreto, como na [Figura 15.3](#). Um outro anel interliga as descidas do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e as ferragens do contrapiso da estação de instrumentos de telecomunicação.

Estes dois anéis estão ligados a uma pequena malha de terra construída para ter baixa impedância de terra; C na [Figura 15.3](#). Esta malha é geralmente montada a uma profundidade maior, buscando uma menor condutividade do solo o que atrai as correntes de terra para longe de A e B evitando problemas nessas instalações.

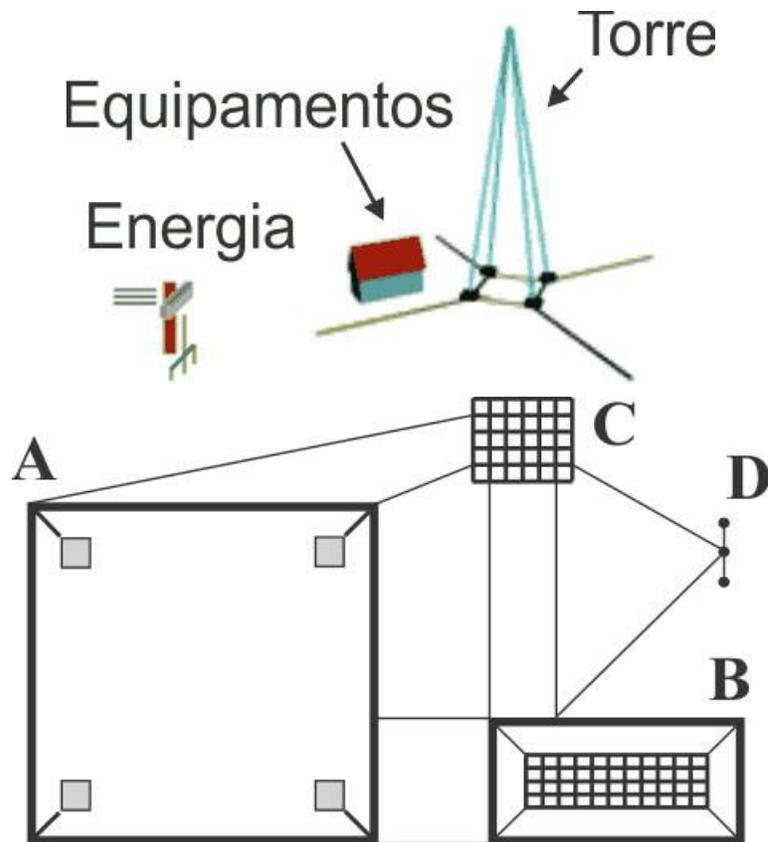


Figura 15.3: Aterramento de telecomunicação. A - anel de terra ligando os pés da torre; B - anel de terra da estação; C - malha de terra de baixa impedância; D - terra do neutro e proteção.

Uma outra configuração adotada para malha de terra de torres de comunicação é a mostrada na [Figura 15.4](#). Pode haver a necessidade de dois ou mais anéis ligando os cabos em X.

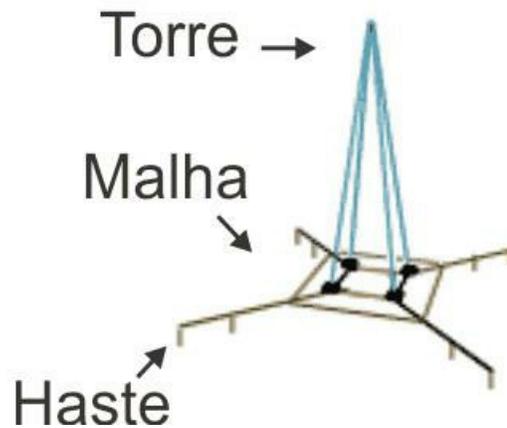


Figura 15.4: Torre de comunicação com a malha de terra e hastes

Em situações em que haja um solo de baixa condutividade, um estudo cuidadoso deve ser

feito para minimizar a resistência de terra. Ligações muito longas até um solo com menor condutividade podem ser inefectivas, pois a impedância total da ligação se torna maior do que os valores desejados. É recomendado o uso de feixes de condutores ligando **A** com **C** e **B** com **C**. Na [Figura 15.5](#) é mostrado o esquema geral de aterramento na estação onde ficam os equipamentos eletrônicos e elétricos para a transmissão e recepção.

Algumas torres atuam como antenas monopolo e para isto precisam de um plano terra com características próximas às de um plano condutor perfeito. Neste caso, uma malha de terra como a representada na [Figura 15.6](#) é empregada para a obtenção deste plano de terra. O plano de terra é formado por 120 raias com comprimento de $0,25 \lambda$ a $0,35 \lambda$. Para uma eficiência de 95% é necessário que a malha desta torre tenha 2Ω .

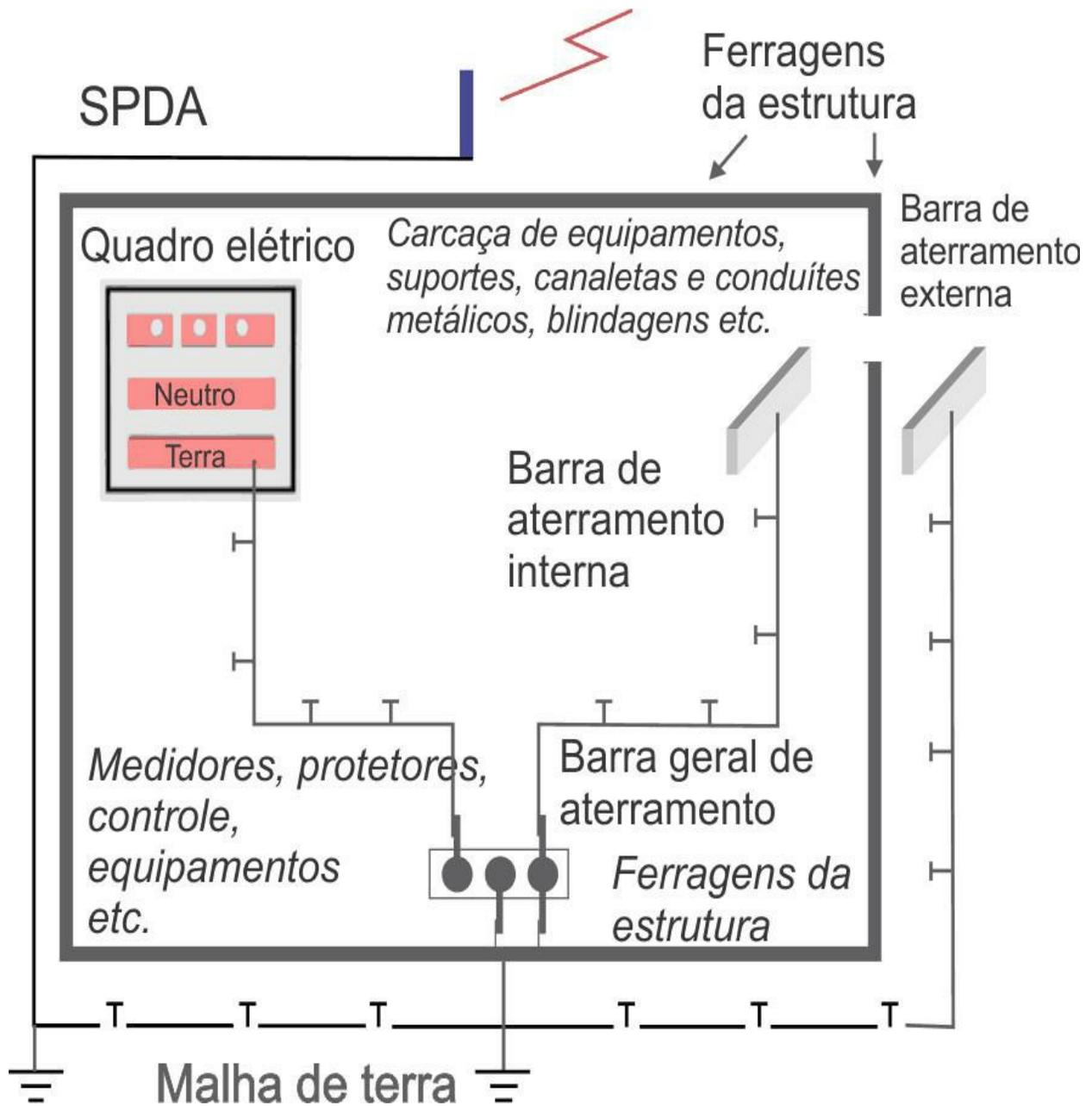


Figura 15.5: Estação com equipamentos de telecomunicação

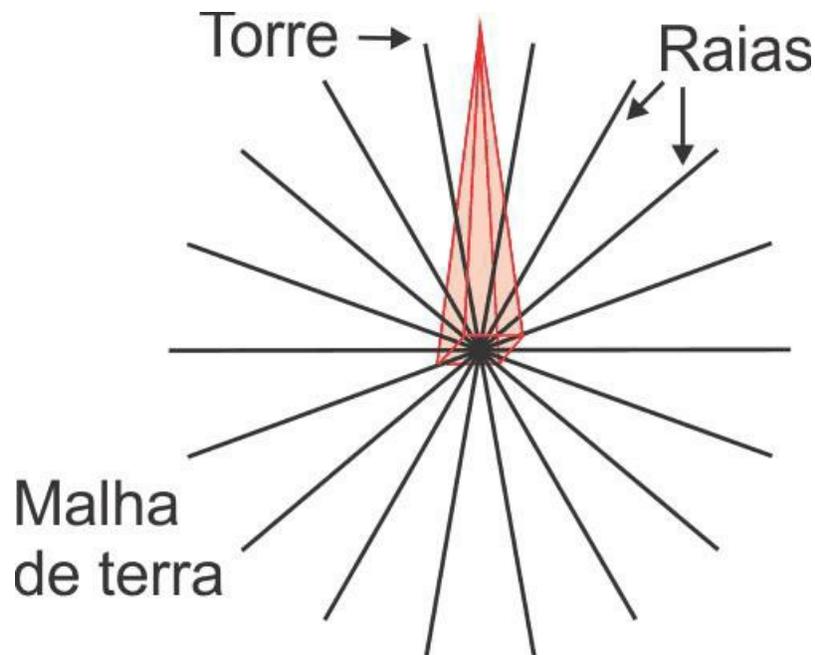


Figura 15.6: Torre transmissora de radiofrequência, antena tipo monopolo com plano de terra

As torres de sustentação de antenas de televisão e de rádio deverão estar aterradas diretamente no solo e na barra de equalização de terra. Os aparelhos de rádio e de televisão também deverão estar ligados à mesma barra de equalização.

15.4.3 Torre de transmissão

As torres de transmissão são enormes torres de aço com pedestais de concreto armado usadas para sustentar linhas de transmissão de potência de energia elétrica. O aterramento destas torres ou o aterramento das linhas de transmissão são chamados de contrapeso.

Como já foi mencionado, o concreto é condutor, então a conexão da estrutura metálica da torre com o terra deve ser feita via pedestal de concreto armado. Os cabos de aterramento devem estar conectados à ferragem do concreto armado e com a estrutura metálica da torre. Esta conexão com os vergalhões usados na caixaria do concreto deve ser feita de modo a evitar a corrosão. A conexão pode ser feita em uma ponta por meio de um rabicho de vergalhão soldado na caixaria e na outra no condutor de cobre. A corrosão galvânica aparecendo atuará no rabicho.

O uso de barras ou cabos de aço para o aterramento de torres pode encarecer ao longo do tempo devido à manutenção. A corrosão do solo exigirá um acompanhamento periódico das condições dos cabos contrapeso. É sabido que existe a possibilidade de furto no caso dos cabos de cobre, assim deve-se estabelecer uma relação econômica entre o uso do cobre e do cabo de aço.

15.4.4 Torre no alto de morro

As torres no alto de morro, em que onde o morro é rocha pura (granito etc.) o aterramento fica dificultado. A alta resistividade da rocha faz com que a malha de terra tenha uma alta impedância. Neste caso, haverá grandes reflexões na malha de terra até que a corrente de terra escoe totalmente. Estas reflexões múltiplas causarão desbalanços de tensão, provocarão queda de

tensão com relação a um ponto terra distante e gerarão campos elétricos e magnéticos.

A equipotencialização é indispensável para que o equipamento a ser protegido tenha um referencial de tensão único. Este procedimento evitará quedas de tensão no interior da instalação. Restará ainda o problema do referencial distante e dos campos eletromagnéticos

Havendo terreno de baixa resistividade na base do morro ou próximo, é recomendado que a ligação entre a torre e o eletrodo na base do morro seja feita com um feixe de cabos em paralelo (simulando uma fita), ver. Figura 5.9. Desta forma, a impedância do feixe será menor que a de um cabo apenas. Isto possibilitará um escoamento melhor dos impulsos atmosféricos para longe da instalação.

Esse feixe, depois de colocado na superfície da rocha até o eletrodo de terra, pode ser coberto com concreto. O concreto, além de proteção mecânica, diminuirá a impedância da ligação, devido à sua característica higroscópica.

As diversas reflexões de corrente na malha de terra ocorridas durante o processo de escoamento do impulso podem ser graves à instalação, levando a falhas e até mesmo a queima de componentes e dispositivos. Uma análise detalhada deste tipo de instalação só é possível com o auxílio de simuladores computacionais. Estes programas calculam o impacto da corrente impulsiva da descarga atmosférica no sistema de aterramento. Isto permite obter os pontos a serem melhorados no sistema de terra para um escoamento adequado da corrente elétrica.

15.4.5 Edificações no alto de morro

No alto de morros podem ser encontrados hotéis, condomínios residenciais, casas, estações de telecomunicação etc. Neste tipo de edificação o aterramento não será de boa qualidade se houver apenas rocha (granito etc.). Uma solução possível é formar uma pequena malha de terra na superfície da rocha e cobri-la com terra orgânica onde poderá ser formado um jardim. A baixa resistividade da terra orgânica criará uma superfície como um eletrodo de superfície placa (disco, retângulo etc.).

A busca da equipotencialização é um ponto importante a se observar nestes casos, muito embora transitórios de origem atmosférica e outros passam geram correntes e tensões refletidas.

15.4.6 Subestações

As subestações têm equipamentos de 60 Hz e vários equipamentos de medição, monitoração, controle e comunicação. No pátio com os equipamentos de potência, instala-se uma malha de terra, próximo à sala de controle usam-se hastes alinhadas para o terra de sinal, [Figura 15.7](#). Os eletrodos devem ser específicos para cada tipo de corrente enviada para o terra, que por sua vez estão ligados à malha de terra principal. A conexão com a malha principal deve ser feita por pelo menos dois pontos. Para a sala de controle constrói-se um anel para o sistema de proteção contra descargas atmosféricas, como ilustrado na Figura. 15.7.

A profundidade da malha, o tipo de solda, a bitola dos condutores, a frequência envolvida etc. são aspectos indispensáveis para se ter o aterramento da subestação. Uma das principais características de uma malha de terra é proporcionar uma tensão de passo tolerável ao pessoal que atua na instalação. Nestas subestações, correntes de curto-circuito e de descargas atmosféricas têm valores elevados, causando grande geração de calor. A frequência elevada também está presente devido aos equipamentos de informática (ondas trapezoidais) e de comunicação e às descargas atmosféricas (dupla exponencial) etc.

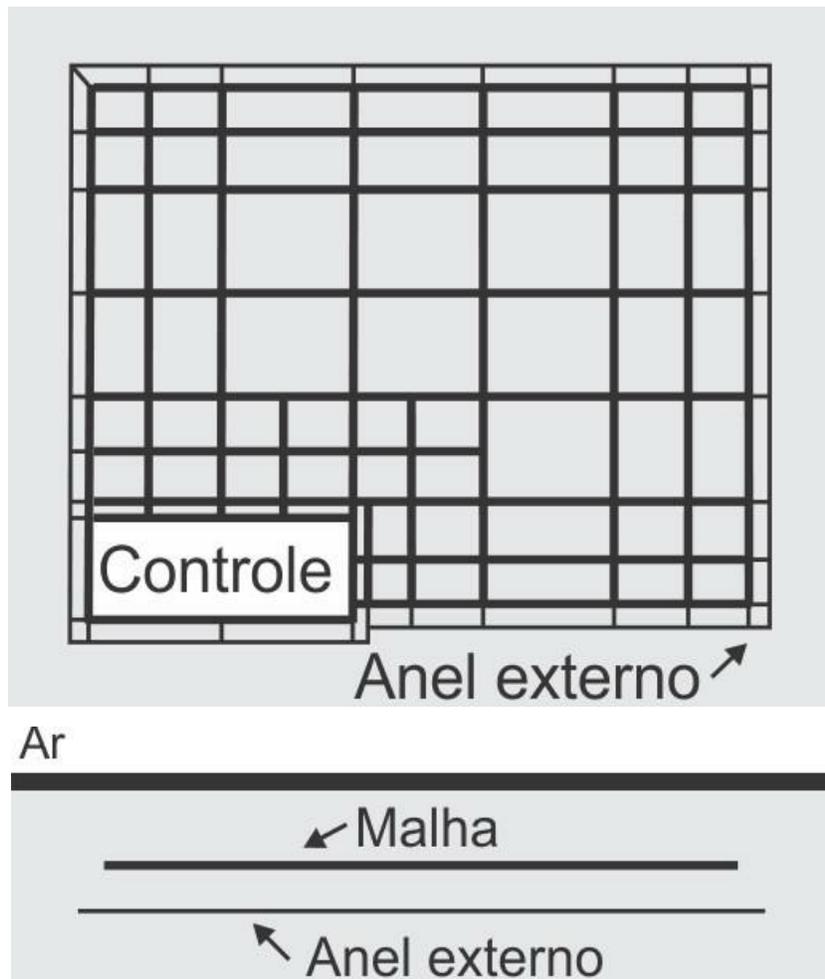


Figura 15.7: Sistema de aterramento de subestações. Vista de cima e vista em corte

O sistema de aterramento de uma subestação é bastante complexo. Neste sistema, várias técnicas de aterramento e de compatibilidade eletromagnética são levadas em consideração. O espaço dedicado neste texto é insuficiente para um estudo de aterramento adequado a uma instalação de uma grande subestação.

Pode-se colocar um resistor de aterramento entre o neutro da estrela do transformador e o terra para limitar a corrente de curto-circuito. Um valor convencionalmente adotado para a corrente máxima de curto-circuito nestes casos é de 400 A, sendo que o resistor de aterramento é obtido a partir deste valor.

A bitola do condutor de aterramento utilizada na malha deve ser obtida a partir da capacidade do condutor de suportar a corrente de terra pelo tempo em que esta estiver sendo escoada. Para limitar a corrente de terra impedâncias de terra muitas vezes são instaladas na ligação do neutro do estrela com a malha de terra, [Figura 15.8](#), isto possibilita uma corrente de terra menor em curtos-circuitos e por consequência uma menor bitola dos cabos de terra.

Transformador delta-estrela

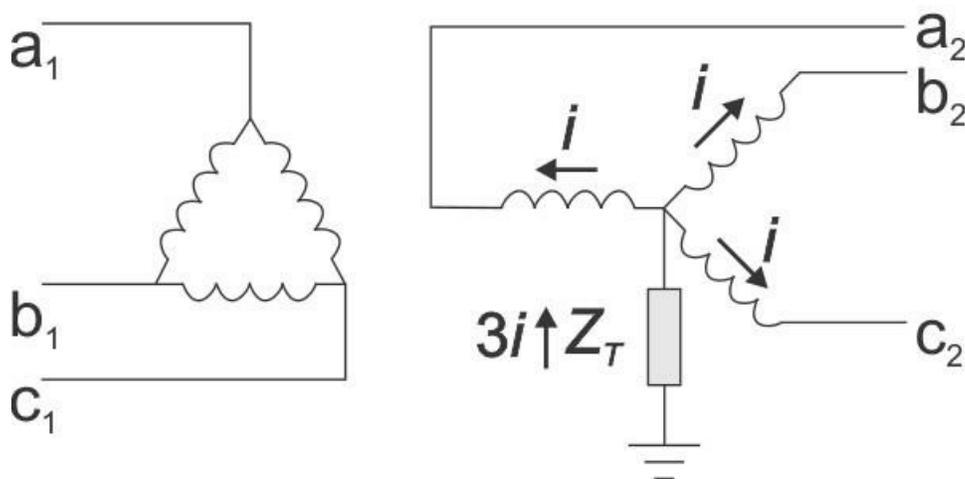


Figura 15.8: Impedância de aterramento limitadora de corrente de curto-circuito; corrente de terra $3i$, corrente de modo comum (sequência zero)

Em uma subestação ou outra instalação de alta-tensão aterram-se, entre outros, os seguintes itens:

- Todos os suportes metálicos destinados à fixação de isoladores e aparelhos;
- As proteções metálicas tais como telas, alambrados, portas, portões, janelas;
- Carcaças de transformadores, geradores, capacitores, transformadores de medição, os volantes dos disjuntores de alta-tensão etc.;
- Tampas metálicas das valas, tubulações metálicas;
- Neutro do transformador;
- Condutores do sistema de proteção contra descargas atmosféricas;
- Estruturas metálicas, pés de torre.

As tensões de toque e de passo devem ser mantidas dentro dos limites estabelecidos nas normas técnicas.

A barra de equipotencialização de subestações de pequeno porte deve ter o neutro conectado neste ponto, ver [Figura 15.9](#).

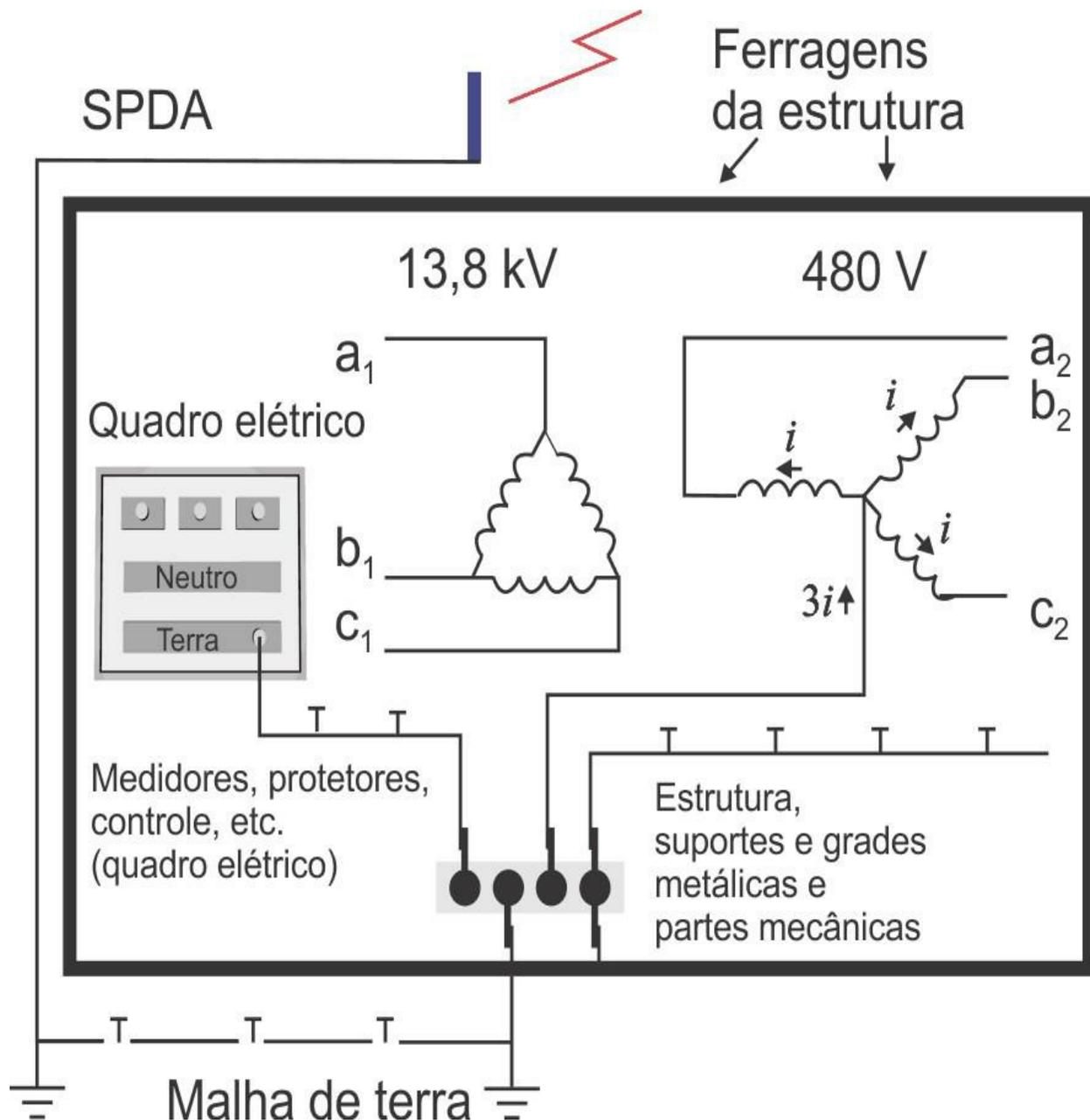


Figura 15.9: Barra de equipotencialização da subestação

15.4.7 Cercas

O aterramento das cercas deve sempre respeitar as condições de tensão de passo e de toque. A interligação do terra da cerca com a malha de terra da subestação deve ser evitada caso a cerca não esteja sobre a área coberta pela malha. No caso de a cerca estar fora da área da malha, é possível fazer uma malha local sob a cerca para garantir as tensões de passo e de toque na cerca. Na condição anterior pode-se interligar o terra da cerca com a malha da subestação.

Gas insulated substation (GIS)

As técnicas adotadas de aterramento mostradas até o momento também se aplicam a instalações isoladas por FS6. Cuidados adicionais e sofisticações no aterramento podem ser incluídos neste tipo de subestação.

15.4.8 Rede de distribuição

Em geral o aterramento da rede de distribuição é feito a cada 300 m. A distância entre um terra e outro depende da resistividade do solo, dos parâmetros elétricos da linha de distribuição e das necessidades de proteção elétrica. A distância ideal deve ser obtida a partir de dados da rede e do solo inseridos em um simulador de transitórios e de estado estacionário. Em regiões urbanas, onde o número de para-raios é grande, esta distância é bem reduzida.

15.4.9 Planta I

Todas as edificações, guaritas, torres, subestações e quaisquer outras instalações devem ter as suas malhas de terra interligadas. A [Figura 15.10](#) ilustra uma planta imaginária com três edificações, uma subestação e uma torre de telecomunicações com as respectivas malhas de aterramento. Este sistema minimiza as diferenças de potencial de uma malha de terra para outra.

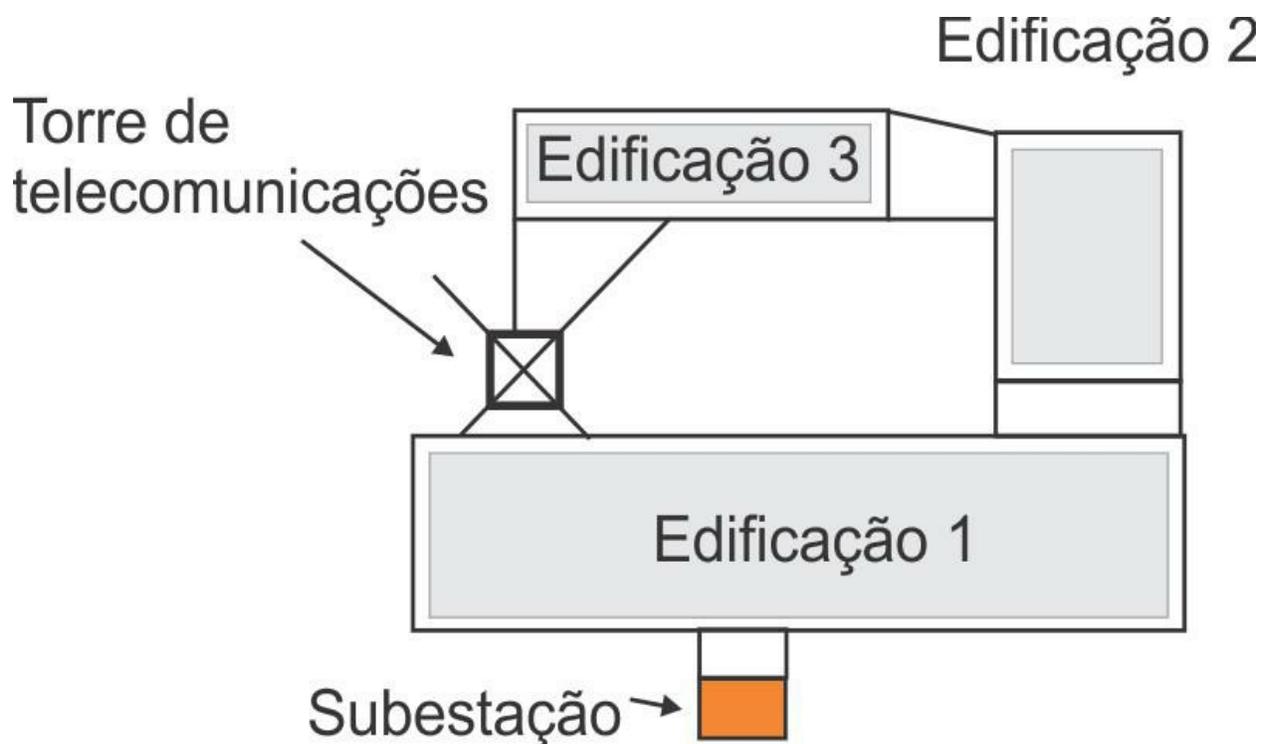


Figura 15.10: Planta com três edificações, torre de comunicação e uma subestação; malha de terra em negrito

A análise das correntes e potenciais de terra desta instalação pode ser feita com modelos elétricos como os mostrados na [Figura 15.11](#). As impedâncias nesta figura representam as malhas de cada edificação da instalação. As tensões e correntes envolvidas nestes sistemas de

aterramento são importantes para que se possa avaliar a eficiência destes. Têm sido empregados para análise desde circuitos simples até complexos sistemas de simulação computacional que incluem o efeito da propagação. Estes programas computacionais permitem uma análise mais detalhada, a qual proporciona uma melhor localização e definição de dispositivos de proteção e filtragem. Uma prática de cálculo mais precisa previne contra um maior número de falhas e interrupções.

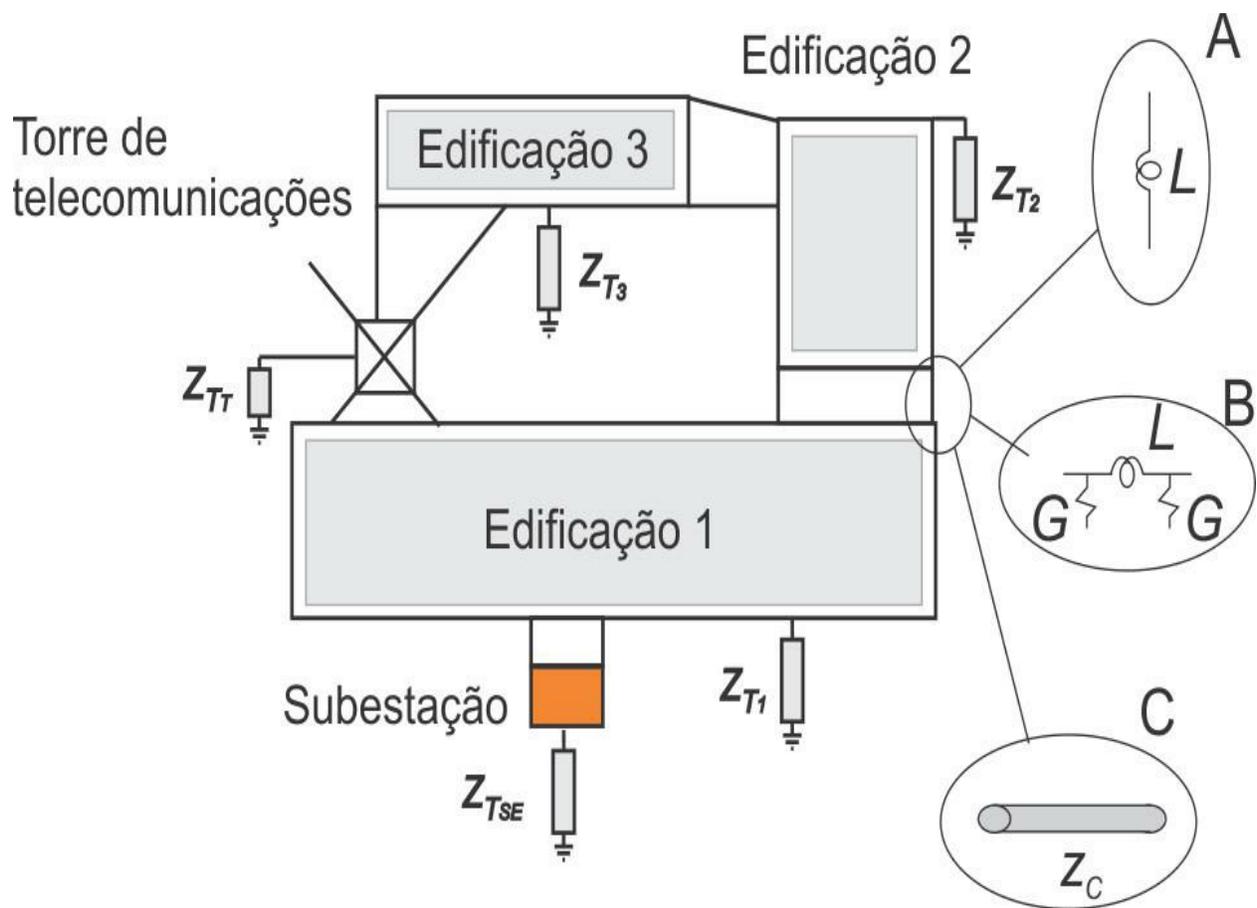


Figura 15.11: Modelos elétricos para a representação da ligação entre o aterramento da edificação 1 e da edificação 2: A - indutor série; B - circuito π ; C - linha de transmissão.

Exemplo 15.1

Qual a indutância e a resistência de uma ligação de 5,0 m a 50 cm de profundidade, diâmetro do condutor 12,7 mm, entre a edificação 1 e a edificação 2? Considerar o solo arenoso seco.

Solução:

Para avaliarmos a indutância da ligação, tomamos a equação da indutância própria de um elemento de malha de terra:

$$L = 0,002m \left[\ln\left(\frac{2h}{a}\right) - 1 \right] \quad [\mu\text{H}]$$

Para uma avaliação da resistência de terra da ligação, consideramos a resistência de uma linha enterrada:

$$\rho = 1.000 \Omega \cdot \text{m}$$

$$h = 0,5 \text{ m}$$

$$m = 5,0 \text{ m}$$

$$2a = 12,7 \text{ mm} \text{ então } a = 12,7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$R = \frac{\rho a}{2\pi m} \left[\ln\left(\frac{2m}{a}\right) + \ln\left(\frac{m}{h}\right) - 2 + \frac{2h}{m} - \frac{h^2}{2m^2} + \frac{h^4}{16m^4} \right] \quad [\Omega]$$

$$L = 0,0337 \text{ mH} \text{ e } R = 171,31 \Omega$$

#

15.4.10 Planta II

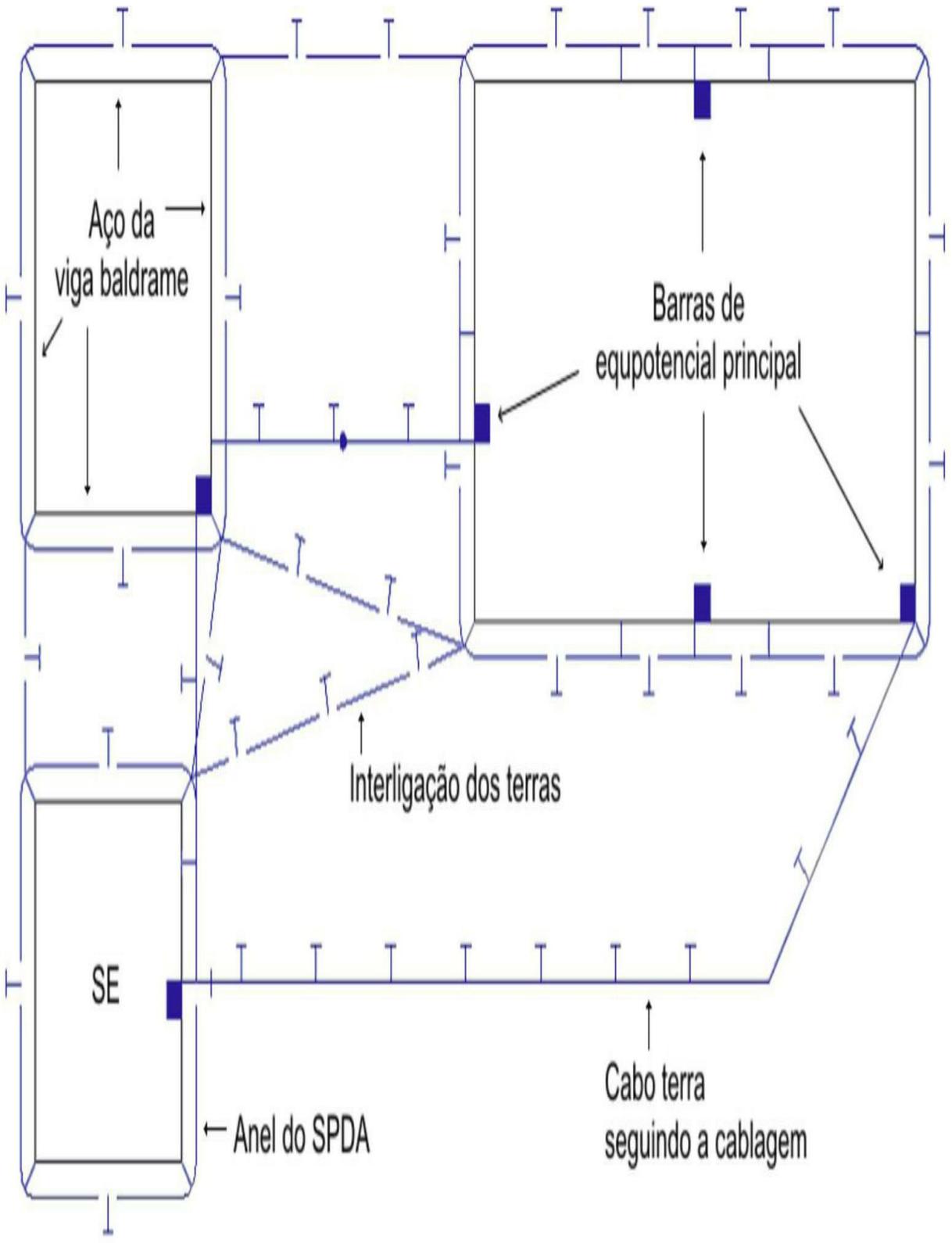
Nas Figuras 15.12 e 15.13 são ilustrados quatro sistemas de aterramento. Na [Figura 15.12](#) são mostrados os anéis de sistema de proteção contra descarga atmosférica (SPDA) conectados com a estrutura metálica das edificações e a interligação destes anéis. A linha contínua com T representa um caminho para o terra dentro de eletrocaldas e a linha interrompida por T representa um condutor enterrado. Nessas figuras são ilustradas três edificações: uma subestação (quadrado menor), um prédio de escritório e um prédio retangular de produção. As barras de equalização são representadas por quadrados hachurados.

O primeiro piso é uma área de escritório e de controle e monitoração da fabricação. Na área de escritório o fio terra deve seguir os conduítes da instalação elétrica. Em cada tomada deve haver uma terminação do cabo terra, tomada de três pinos. Os suportes das luminárias e espelhos dos interruptores metálicos devem ser aterrados. Os fios terra devem ser conectados a uma barra de equalização de potencial local instalada no quadro de energia do piso.

A área de controle e monitoração deve seguir com a instalação do terra como anteriormente e adicionar pontos de terra diretamente ligados ao terra do contrapiso. A ferragem do contrapiso deve estar ligada à barra de equalização local.

Na [Figura 15.13](#) são ilustradas três configurações de sistemas de aterramento mais complexos. Nestes casos existem malhas finas localizadas no contrapiso de cada edificação. Estas malhas garantem menores tensões de passo e de toque no interior das instalações. A fina grade no contrapiso reduz a impedância de terra facilitando o escoamento das correntes de terra de alta frequência e a equipotencialização.

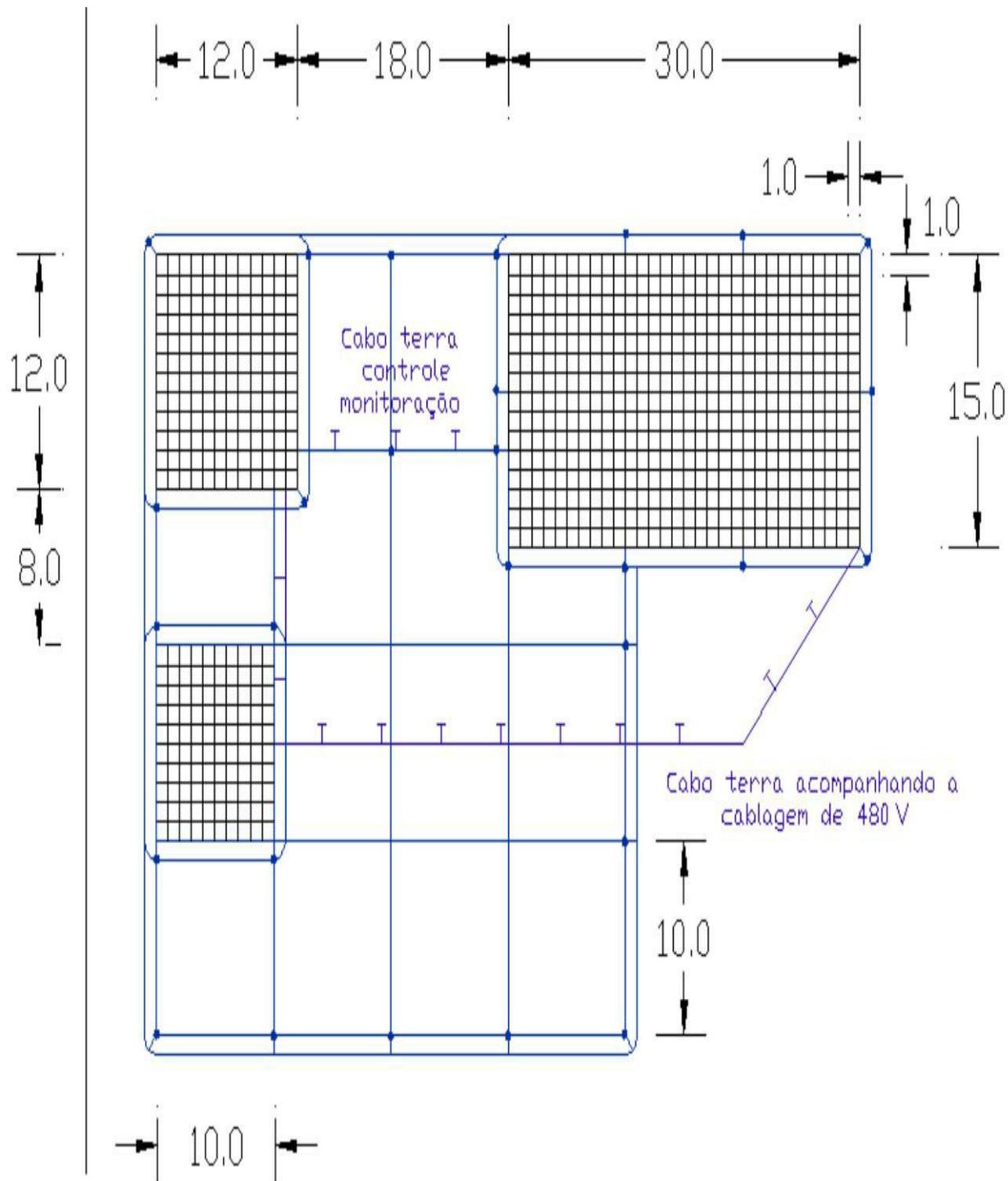
As dimensões das malhas externas às edificações dependem das características do solo, resistividade e permissividade, e das necessidades de proteção de pessoal na superfície. A obtenção das dimensões da malha externa inicia com o conhecimento da corrente de curto-circuito máxima da instalação, das descargas atmosféricas e de correntes de sequência zero. A partir do conhecimento destas correntes poderão ser obtidas as bitolas dos condutores, o espaçamento entre os condutores e a disposição da malha.

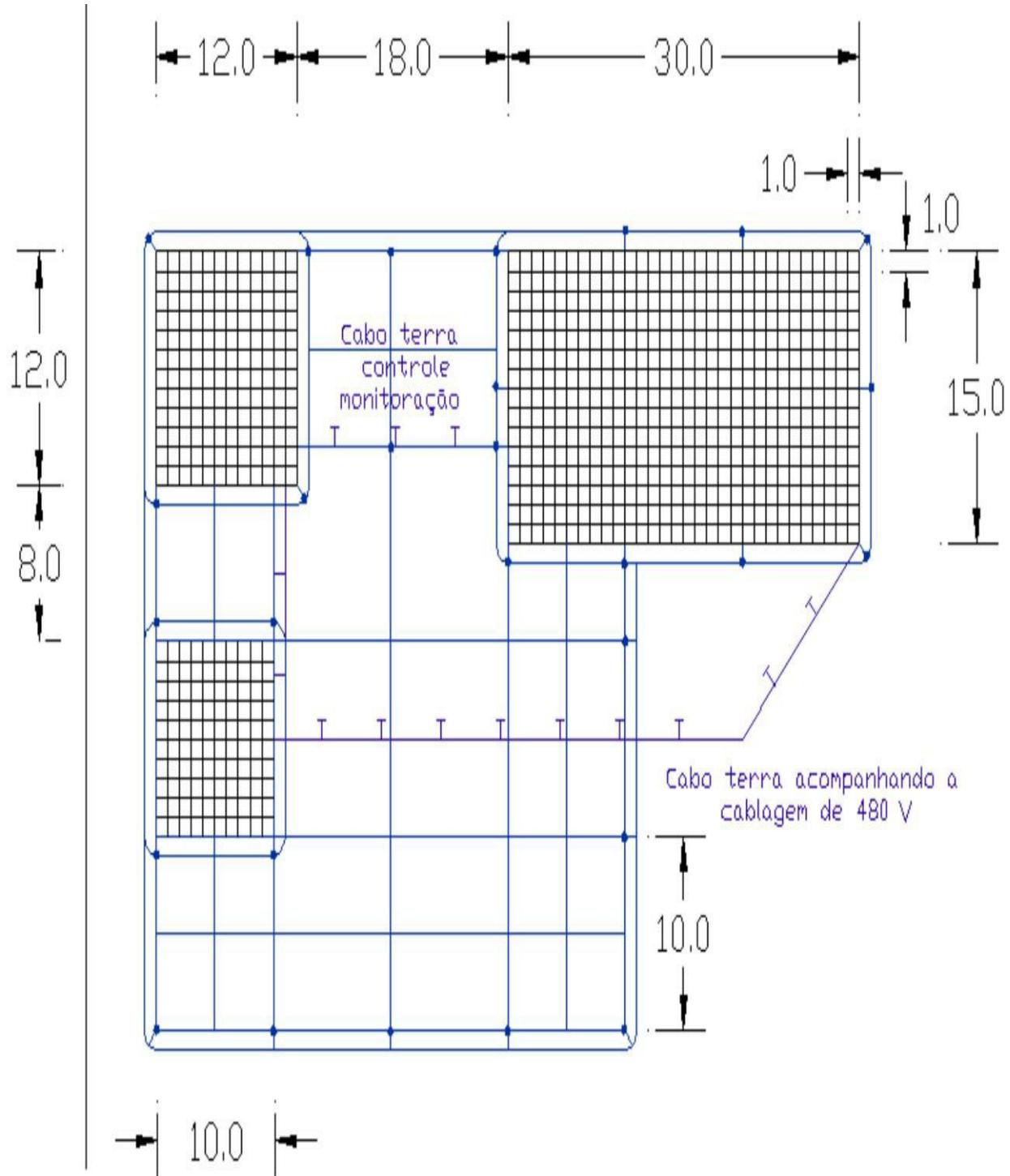


13,8 kV / 480 V

■ Barra de equipotencialização

Figura 15.12: Malha de aterramento e localização das barras de equipotencialização principais





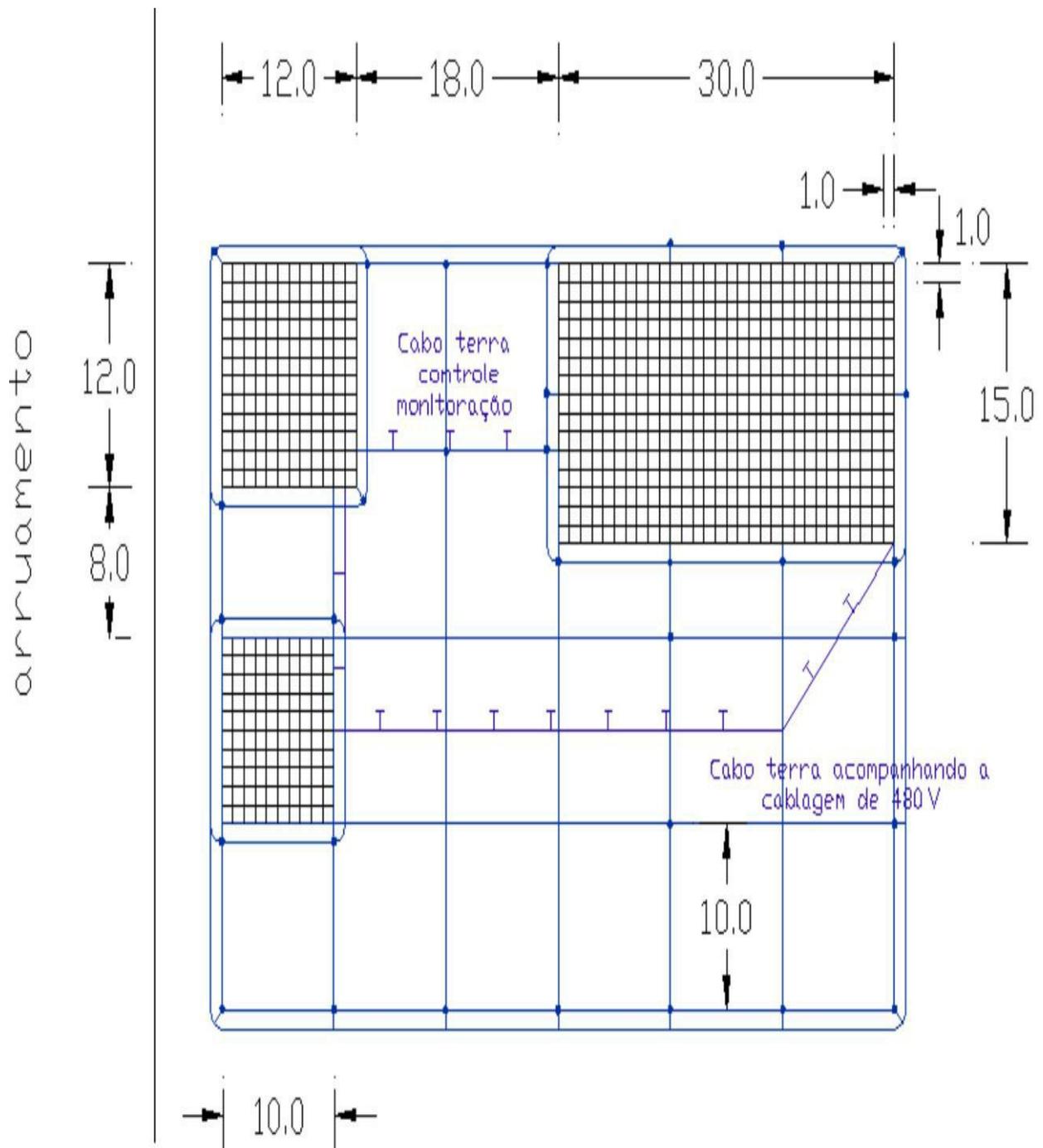


Figura 15.13: Malhas de terra alternativas, valores em metros

15.4.11 Alta frequência

Instalações de televisão, rádio (AM, FM etc.), microondas, laboratórios (de testes e certificação, educacionais etc.) trabalham com alta frequência. Nestes casos é recomendado o uso

de fitas (cobre ou alumínio) para o aterramento dos equipamentos envolvidos. Muitas vezes os equipamentos de áudio têm alta frequência associada, de modo desejado ou indesejado), nestes casos também é recomendado o uso de fitas.

A interligação de equipamentos aterrados em pontos distintos deve ser analisada com cuidado para evitar correntes e tensões de modo comum entre estes. Estas correntes e tensões têm origem nas diferentes tensões nos pontos de terra.

16 EQUIPAMENTOS

16.1 INTRODUÇÃO

Para um funcionamento seguro e dentro das especificações de fábrica devem ser aterrados os equipamentos eletrônicos: medidores, equipamentos de monitoração, dispositivos de proteção, repetidor, estações de trabalho, impressoras, servidores de impressão, transceptores, rede local, roteador, servidor, modems, portões eletrônicos, sistemas de alarme, circuito interno de TV, microcomputadores etc.

Também devem ser aterrados os equipamentos industriais: transformadores, motores, quadros de medidores coletivos, banco de capacitores, câmaras transformadoras, cabines, estações particulares, seccionadores, transformadores rurais, rede com neutro multiterrado, chaves a óleo, reguladores, religadores, para-raios etc.

Neste capítulo são apresentados aspectos do aterramento interno e externo de equipamentos.

16.2 GENERALIDADES

É uma boa prática ter um transformador próprio para permitir um controle ótimo da alimentação de escritório, laboratório, oficina de reparos e outros. Com este transformador todas as ligações que produzem ruídos indesejados como motores, aquecedores elétricos, centelhadores, reatores eletrônicos etc. estarão sob controle.

Os fios e cabos para aterramento devem ser o mais curtos possíveis. Estes fios e cabos seguem separados do fio neutro até a entrada de energia do prédio, da casa, da instalação industrial ou comercial. E, ainda, as caixas de disjuntores são instaladas em cada andar ou para conjunto de equipamentos com terminais de terra e neutro separados. Este ponto terra é ligado ao terra geral do andar que, por sua vez, está ligado ao terra geral. A ligação do terra do andar é feita na estrutura metálica da construção (terra geral). Dependendo da segurança e das impedâncias envolvidas nos sistemas de terra e neutro, a ligação do terra e do neutro pode acontecer antes do ponto de entrada de energia na instalação.

16.3 EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS

16.3.1 Placas de circuito impresso

Nas placas de circuito impresso os ruídos devem ser ligados às trilhas ou superfícies de terra por tipo de ruído. As fontes de ruídos digitais devem ser agrupadas em um único ponto; os analógicos de uma mesma faixa de frequência, em outro ponto; os componentes poluidores, em outro; eletrônica de potência, em outro; e assim por diante. Estes diferentes pontos de terra são então ligados ao terra comum do equipamento fora da placa.

Em placas de dupla face o uso de grades de retorno são uma boa solução para reduzir a impedância do terra. Esta grade é construída nos espaços disponíveis entre as trilhas de dados e alimentação. As trilhas que constituem a grade de terra estão dispostas nos dois lados da placa, as trilhas paralelas sempre do mesmo lado.

As trilhas de sinal devem, sempre que permitido, ser ladeadas por trilhas de retorno. Quando houver falta de espaço, coloca-se uma trilha de retorno ladeada por duas de sinal.

16.3.2 Equipamento

O aterramento é feito sempre em uma grande massa de material condutivo, a maior massa disponível nas proximidades. E esta massa é então considerada o referencial. Em equipamentos eletrônicos esta massa condutiva é o gabinete metálico ou os *racks*. Os gabinetes são usados como blindagens de campos eletromagnéticos: os campos gerados internamente são bloqueados por estes, bem como os campos gerados externamente são impedidos de entrar. As correntes geradas nos gabinetes são levadas ao terra pelo ponto de aterramento. Em ambientes com muito ruído o aterramento enviará para o sistema digital ou eletrônico sinais espúrios. Uma forma de minimizar este problema é aterrar o gabinete e o *rack* juntos no terra externo ao gabinete, separadamente das placas de circuito impresso. Barras de cobre internas e isoladas dos gabinetes servem como terra de sinal. Estas barras são ligadas ao terra do ambiente externo ao gabinete com o terra de segurança que liga o gabinete e os *racks*.

A capacitância parasita entre os *racks* e as placas e a capacitância parasita entre o gabinete e as placas devem ser mantidas as mais baixas possível. Estas capacitâncias curto-circuitam as partes metálicas na presença de altas frequências.

As conexões devem ser soldadas e protegidas com material condutor. As conexões mecânicas e a corrosão não garantem uma qualidade constante do aterramento ao longo do tempo, da manufatura até o presente. As ligações entre condutores diferentes geram tensões galvânicas, indesejadas nos sistemas eletrônicos.

O aterramento de equipamentos segue em três ou mais grupos de terra diferentes, como ocorre em placas de circuito impresso: os dispositivos de potência com o terra separado do terra dos dispositivos de sinal e ambos distintos do terra das partes mecânicas. Estes três terras são ligados diretamente em um mesmo ponto no terra externo. Se necessário pode haver subdivisões nestes três tipos de aterramento interno. Esta divisão depende do grau de sensibilidade das partes e de emissividade de ruídos para o terra.

16.3.3 Dois equipamentos

Devido ao distanciamento entre dois equipamentos, A e B na [Figura 16.1](#), pode surgir entre os pontos de aterramento uma tensão, V_{terra} . V_{terra} é o resultado da corrente de terra que circula entre

A e B passando por uma impedância de terra, Z_{terra} , entre estes pontos. Esta corrente pode surgir de três formas diferentes. A primeira forma surge pela falta de equipotencialização dos terras. A tensão entre os terras é gerada por um evento de origem transitória ou de estado estacionário, conforme discutido em capítulos anteriores. A segunda origem é um campo magnético ou elétrico que acopla com a cablagem que interliga os equipamentos A e B, ver [Figura 16.2](#). Por fim, a outra causa desta corrente é um ruído conduzido de origem externa aos equipamentos A e B, ver [Figura 16.3](#).

Dependendo das frequências envolvidas e da precisão requerida, escolhe-se um dentre os quatro modelos sugeridos para representação de Z_{terra} , [Figura 16.1](#). O primeiro modelo é uma impedância série, o segundo é um indutor série, o terceiro um circuito pi e, por fim, uma linha de transmissão. O equipamento B deve receber a tensão V_B mas com a tensão de terra V_{terra} este equipamento vai receber $V_B + V_{ruído}$. Esta tensão será fonte de ruído e deve ser eliminada ou minimizada. Esta situação é comum quando o aterramento é feito no terra da rede elétrica. Em alguns casos esta tensão entre os equipamentos pode causar choque elétrico.

Eliminando um dos pontos terra a tensão V_{terra} desaparece o ruído. Não sendo isto possível, outros métodos podem ser empregados. Em ligações digitais um acoplamento ópticoeletrônico pode ser adotado, em ligações analógicas atenção deve ser dada às frequências envolvidas no sinal. O sistema ópticoeletrônico introduz distorções.

A utilização de blindagens dos cabos entre A e B mitiga apenas a corrente de modo comum causada por campos elétricos ou magnéticos externos. As blindagens são inteiramente inefetivas para os casos das correntes de modo comum geradas por desbalanceamento de terra ou causadas por ruídos introduzidos por condução em um dos equipamentos, Figuras 16.1 e 16.3.

Nos casos das Figuras 16.2 e 16.3 a corrente de modo comum i_c não tem origem no aterramento pois as duas saídas de terra, A e B, estão equipotencializadas.

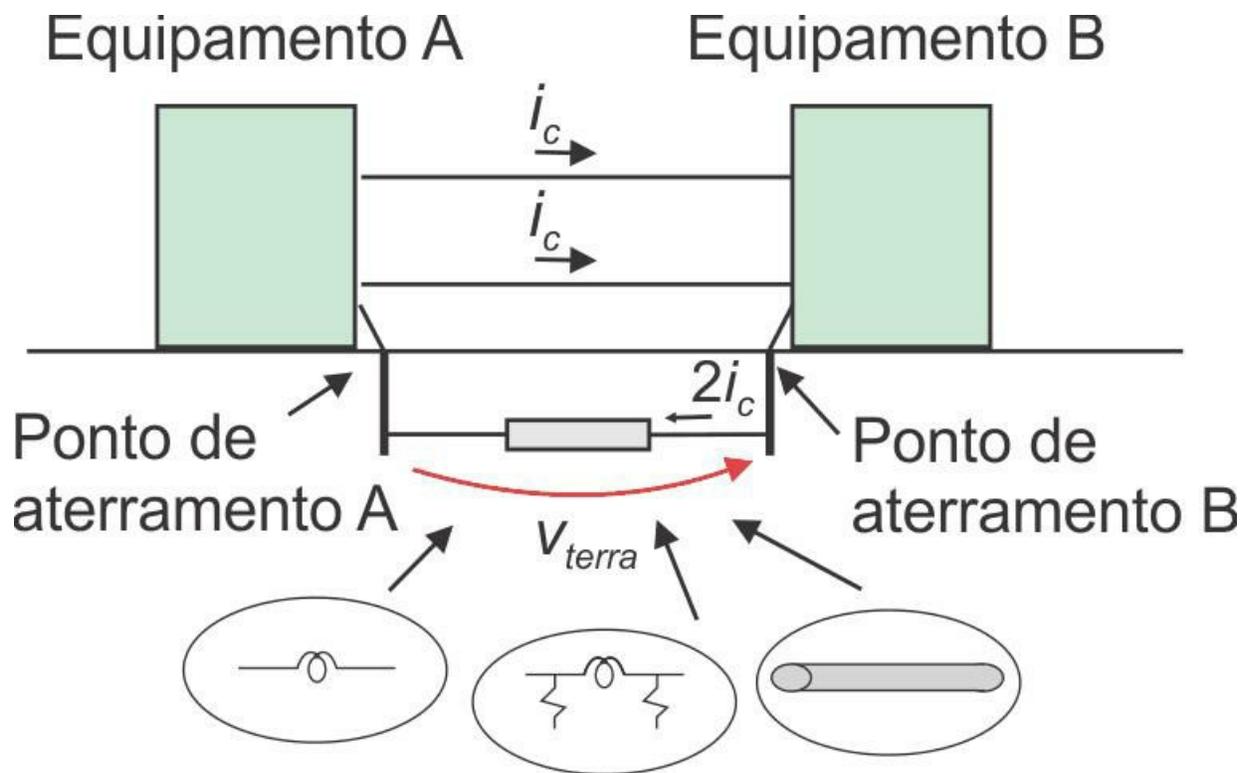


Figura 16.1: Ruído vindo pela terra devido à interligação de dois equipamentos; i_c corrente de modo comum

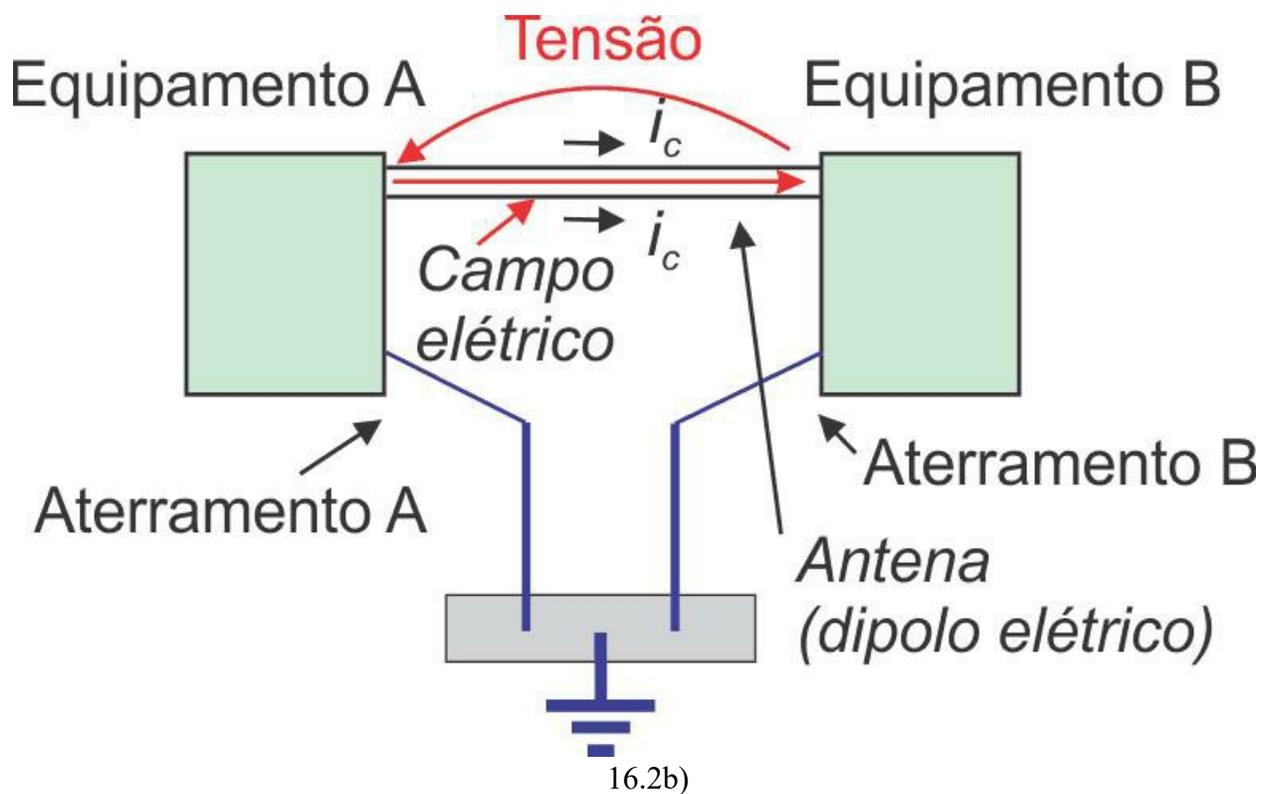
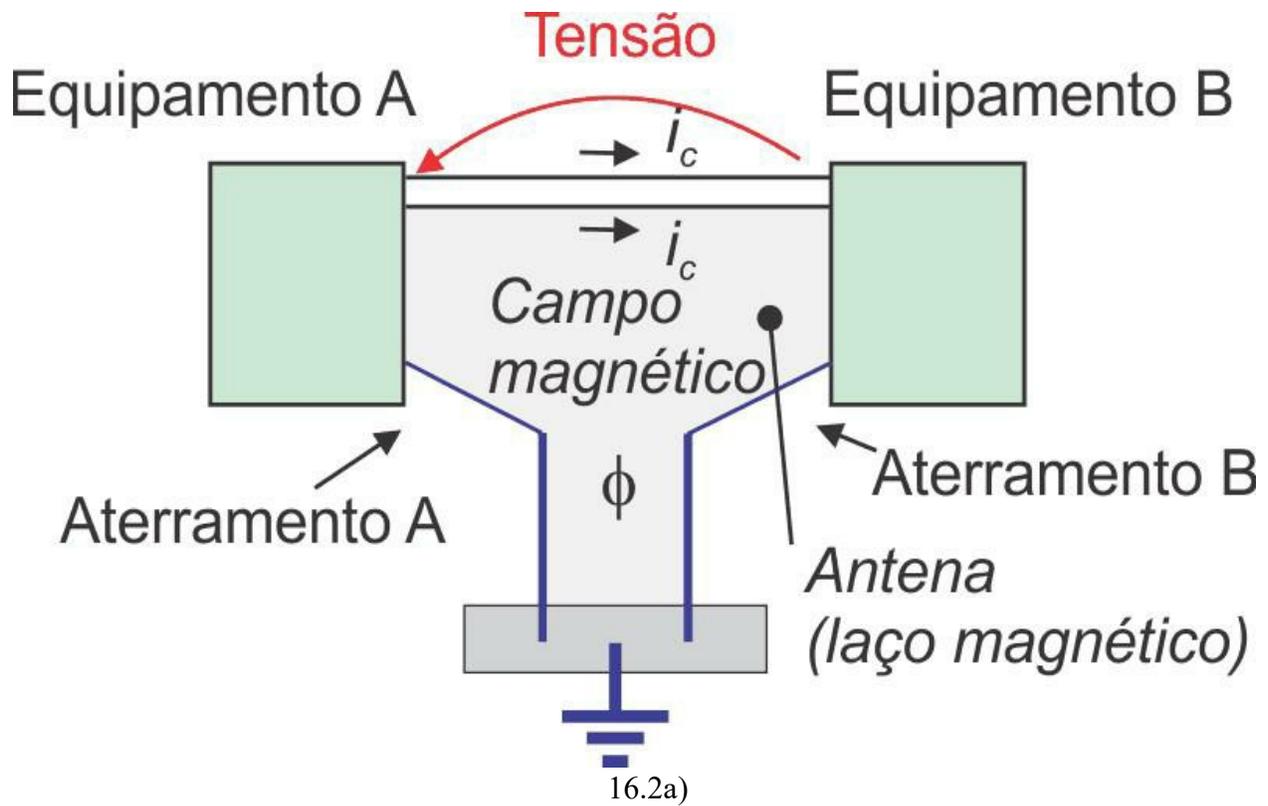


Figura 16.2: a) Interferência causada na antena magnética formada pelo laço constituído pelos condutores terra, pela cablagem ligação entre os equipamentos A e B e pelos próprios

equipamentos. b) Interferência de modo comum causada pela antena elétrica formada pela cablagem de ligação entre os equipamentos A e B.

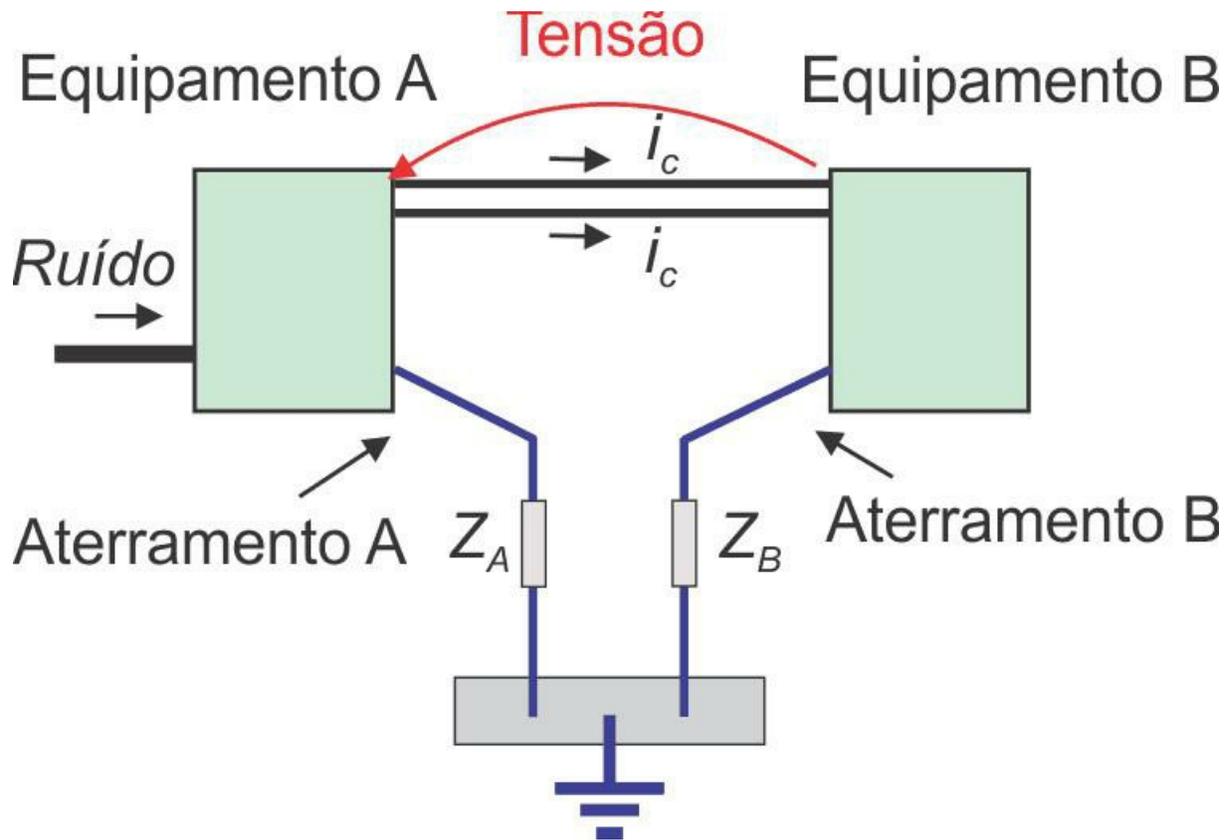


Figura 16.3: Ruído vindo de conexão com outros equipamentos

Um *choke* de modo comum, [Figura 16.4](#), reduz a corrente de modo comum passando entre os equipamentos A e B. Um anel (toroide) de ferrite com os fios enrolados neste constitui um *choke* de modo comum.

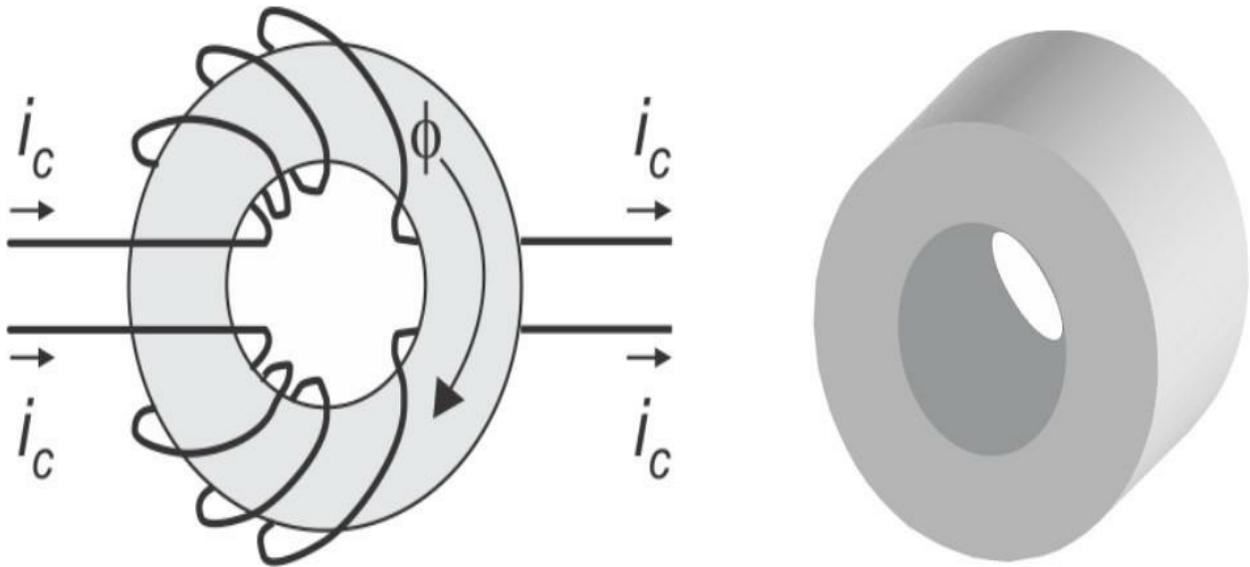


Figura 16.4: Choke de modo comum e ferrite em forma de toroide

Um transformador acoplador fazendo a ligação dos equipamentos A e B reduz a corrente de ruído mas bloqueia a corrente contínua entre estes equipamentos. Transformadores especiais com blindagem elétrica entre as duas bobinas são mais recomendados.

Por fim, um circuito balanceado reduz o ruído, [Figura 16.5](#),

$$V_{\text{ruído}} - V_{\text{ruído}} = 0.$$

Esse processo nem sempre está disponível. Ainda na fase de projeto é possível prever esse sistema.

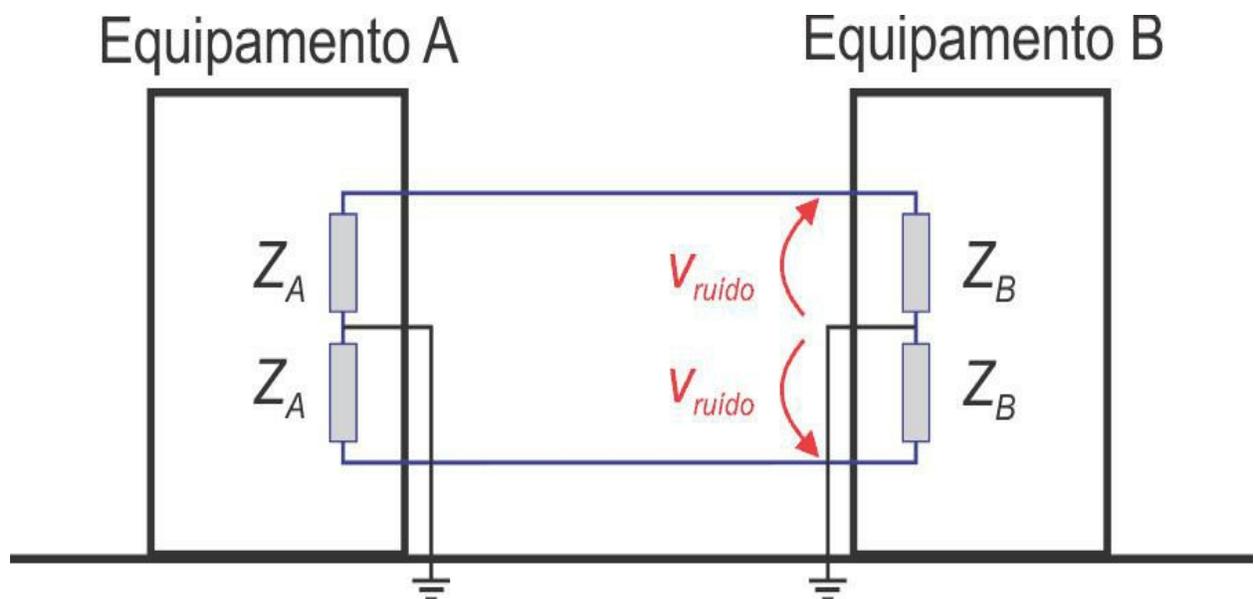


Figura 16.5: Circuito de comunicação balanceado reduz o ruído vindo pelo terra

Exemplo 16.1

Considerar o terra A formado por uma haste vertical de 3 m de profundidade e o terra B também formado por uma haste vertical de 3 m de profundidade. A distância entre A e B é de 10 m. O solo tem resistividade de 200 Ω .m.

A corrente de terra injetada em A é 10 A.

Qual a tensão em B?

Solução:

Resistência mútua de terra é

$$R_{AB} = \frac{0,183\rho_a}{h} \log \left[\frac{(b_{AB} + h)^2 - d_{AB}^2}{d_{AB}^2 - (b_{AB} - h)^2} \right] [\Omega]$$

d_{AB} é a distância [m] entre a haste A e a haste B; ambas as hastes com profundidade h ;

$$b_{AB} = \sqrt{h^2 + d_{AB}^2} \quad [\text{m}]$$

$$b_{AB} = \sqrt{3^2 + 10^2} = 10,44 \text{ m}$$

$$R_{AB} = \frac{0,183 \times 200}{3} \log \left[\frac{(10,44 + 3)^2 - 10^2}{10^2 - (10,44 - 3)^2} \right] = 3,13$$

A resistência de cada eletrodo é

$$R = \frac{\rho a}{2\pi h} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) [\Omega]$$

$$R_A = R_B = \frac{200}{2\pi \times 3} \ln\left(\frac{2 \times 3}{12,7 \times 10^{-3}}\right) = 72,7$$

Ω

O potencial do eletrodo A é

$$V_A = I_A [R_A \parallel (R_A + R_B)] = 10 \left[\frac{72,7 \times (72,7 + 3,13)}{72,7 + (72,7 + 3,13)} \right] = 371,1$$

V

O potencial em B é obtido pelo divisor de tensão:

$$V_B = I_A \left[\frac{R_A}{(R_A + R_{AB})} \right] = 10 \left[\frac{72,7}{(72,7 + 3,13)} \right] = 9,59$$

V

Como não há injeção de corrente em B a tensão $V_{AB} = V_A - V_B = 361,51$ V.

A ligação entre A e B é apenas pelo solo pois não há ligação galvânica entre estes eletrodos de terra.

#

Exemplo 16.2

A resistência de terra do cabo, enterrado horizontalmente a 0,5 m de profundidade, ligando os terras A e B pode ser calculada por:

$$R_{AB} = \frac{\rho_a}{2\pi b_{AB}} \left[\ln\left(\frac{2b_{AB}}{a}\right) - 1 + \ln\left(\frac{b_{AB} + \sqrt{4h^2 + b_{AB}^2}}{2h}\right) + \frac{2h}{b_{AB}} - \frac{\sqrt{4h^2 + b_{AB}^2}}{b_{AB}} \right] \quad [\Omega]$$

em que a é o raio do condutor [m].

$$C_{AB} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \rho_a}{R_{AB}} \quad [F]$$

e

$$L_{AB} = \frac{\mu_0 R_{AB}}{\rho_a} \quad [H]$$

#

16.3.4 Aterramento de cabos blindados

Muitos cabos são blindados para proteger os sinais de comunicação de alta e baixa

frequência. O aterramento destas blindagens assume diversas formas dependendo das necessidades de proteção. Como regra, para cabos eletricamente pequenos, o aterramento deve ser feito no lado da fonte. A ligação é feita no dispositivo e não no ponto de terra externo à deste. No caso dos dois dispositivos aterrados a ligação ao terra é feita nos dois extremos caso queira uma blindagem magnética, caso se queira uma blindagem elétrica aterrar somente em uma das extremidades. Para blindar os dois campos utilizar blindagem dupla, uma para o campo magnético e outra para o campo elétrico.

Em cabos eletricamente longos o aterramento é feito em mais de um ponto: uma ligação ao terra deve existir a cada um sexto do comprimento de onda envolvido ou em mais pontos. O aterramento é sempre feito pelo menos nos dois extremos.

Em cabos submetidos a uma larga faixa de frequências, o aterramento é feito, em um extremo, em curto com o terra do dispositivo e, no outro extremo, é feito com um capacitor ligado ao outro dispositivo, [Figura 16.6](#). Para as frequências baixas haverá apenas um ponto terra. Em alta frequência o capacitor se comporta como um curto-circuito e existirão dois pontos terra.

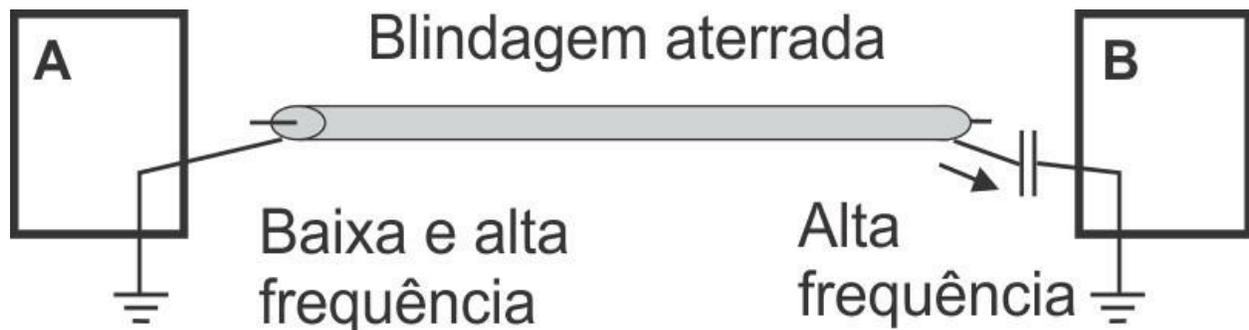


Figura 16.6: Aterramento de blindagem com uma larga faixa de frequências

16.3.5 Aterramento de equipamentos em comunicação (rede de computadores)

Uma rede de comunicação usa nas suas ligações diversos tipos de cabos. Estes cabos devem ser escolhidos tendo em vista vários critérios, inclusive o de aterramento. Nestas ligações os cabos são: coaxial, par trançado sem blindagem, par trançado com blindagem, fibra ótica com proteção metálica.

Os procedimentos já apresentados nas seções anteriores podem ser aplicados nas ligações em que os cabos são metálicos.

Em ligações da rede de sinais em que os equipamentos estão alimentados por transformadores de potência diferentes e localizados em andares ou prédios distintos, deve-se usar fibra ótica.

16.4 EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS

Em aterramentos de equipamentos de potência em campo aberto, é indicado o sistema mostrado na [Figura 16.7](#). Neste sistema o equipamento fica no centro de dois anéis de terra. Estes anéis podem ser mais de dois e têm por função a minimização da tensão de passo próximo ao equipamento quando ocorrer de faltas, surtos de chaveamento e surtos atmosféricos. Estes eletrodos podem ter uma única haste ou mais, as condições do solo determinarão o arranjo ótimo. Para melhorar a tensão de passo, o anel mais central fica mais próximo da superfície que os demais. Os eletrodos alinhados ficam em valas em nível mais baixo que o do anel mais externo. Em situações mais adversas outras linhas radiais com vários eletrodos podem ser consideradas. A resistência de terra requerida deve ser sempre almejada.

Para atingir uma tensão de passo dentro de limites aceitáveis, pode-se colocar brita na superfície do solo próximo ao ponto central do aterramento. Melhor ainda é a colocação de asfalto ou concreto. A colocação de uma malha condutora ou um plano condutor na superfície do solo colocará a tensão de passo dentro de condições ideais.

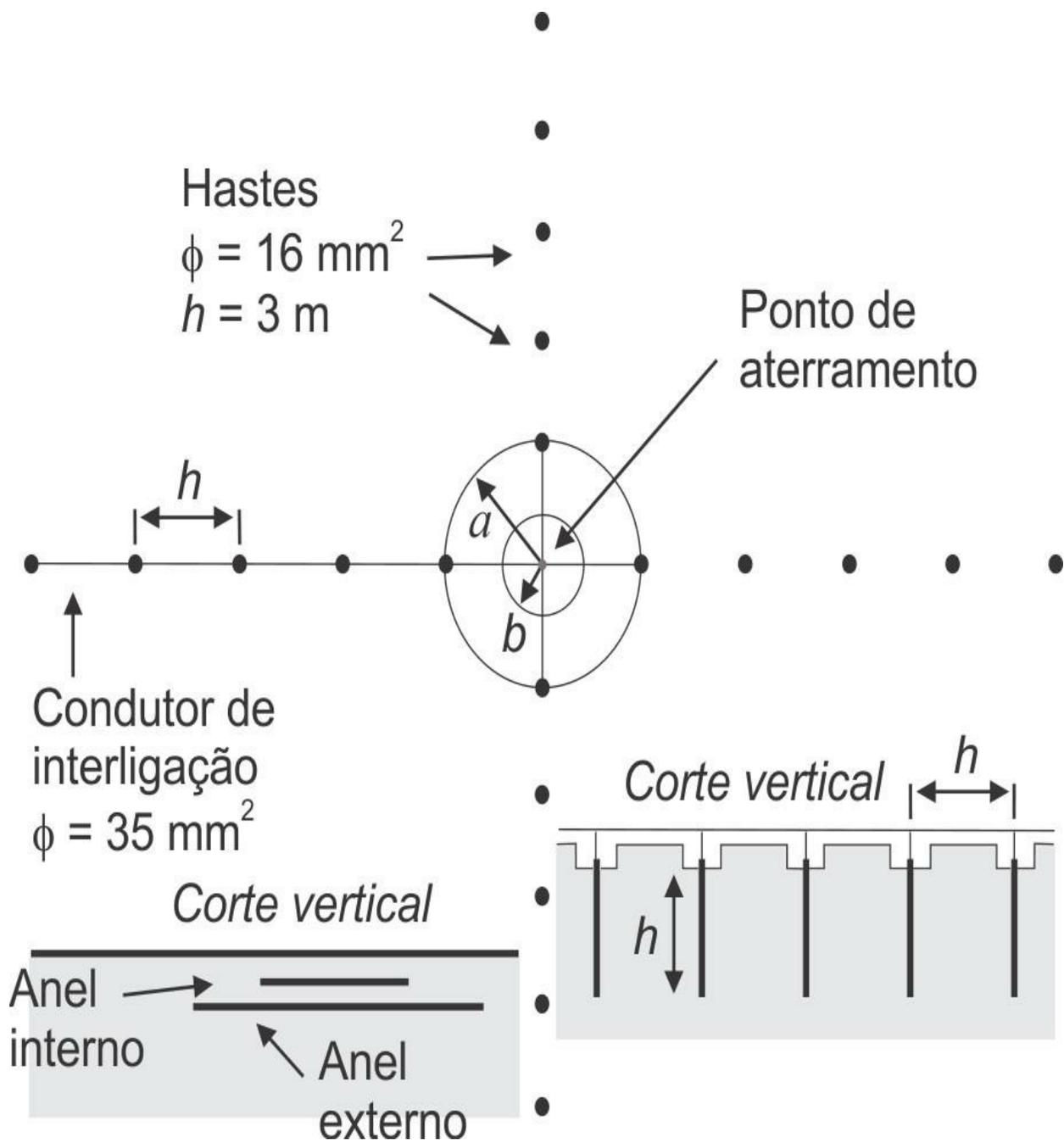


Figura 16.7: Sistema de aterramento para equipamentos de potência e frequência industrial. a é o raio do anel interno e b é o raio do anel externo.

16.5 ELETRODOMÉSTICOS

Todos os eletrodomésticos devem ter um bom aterramento para garantir a segurança do usuário. No caso dos eletrodomésticos digitais, o aterramento visa também à garantia de um funcionamento dentro das especificações. As tomadas devem ser de três condutores: fase, neutro e terra. O terra é ligado a caixa de distribuição (caixa de disjuntores) da residência, a qual está ligada ao terra geral. Um sistema de três pinos permite o uso de dispositivos de proteção mais eficientemente.

Além de aterrar os equipamentos, devem-se aterrar também as partes metálicas junto aos condutores fase como os espelhos metálicos das tomadas e lustres.

16.5.1 Cozinha

Segue uma lista de alguns eletrodomésticos que devem ser aterrados:

- Geladeiras
- *Freezers*
- Torneira para aquecer água
- Forno elétrico
- Forno de microondas
- Ar-condicionado
- Exaustores
- Ventiladores de teto
- Lavadora de prato
- Canalização metálica
- Telefone
- Luminárias
- Televisão
- Rádio

16.5.2 Banheiro

Segue uma lista de alguns eletrodomésticos que devem ser aterrados:

- Chuveiro elétrico
- Hidromassagem
- Canalização metálica
- Espelhos metálicos
- Aquecedores elétricos
- Exaustores
- Luminárias

16.5.3 Área de serviço

Segue uma lista de alguns eletrodomésticos que devem ser aterrados:

- Lavadora de roupa
- Secadora de roupa
- Ferro elétrico

16.5.4 Salas e quartos

Segue uma lista de alguns eletrodomésticos que devem ser aterrados:

- Computadores
- Telefones
- Aquecedores elétricos
- Ar refrigerado
- Luminárias
- Espelhos metálicos de interruptores
- Televisões
- Rádios
- Bicicletas e esteiras elétricas
- Aquário com equipamentos elétricos

16.5.5 Área externa

Segue uma lista de alguns eletrodomésticos que devem ser aterrados:

- Bombas d'água
- Portões e grades metálicas
- Dispositivos eletrônicos de portões
- Postes de iluminação
- Postes de monitoração
- Mastros
- Pedestais de antenas

A APÊNDICE

A1 Técnicas

As técnicas descritas anteriormente devem ser aplicadas após uma análise criteriosa das condições locais, dos sinais envolvidos, das necessidades de segurança e das condições financeiras. As técnicas e dicas listadas a seguir são algumas das que aparecem no livro.

1. Verificar a necessidade de segurança de pessoal.
2. Levantar as frequências (formas de onda) e potências envolvidas antes da escolha do tipo de aterramento.
3. Levantar as condições do ambiente (construções novas ou antigas, tipo de solo etc.).
4. Disponibilidade de recursos.
5. Baixar a impedância da conexão ao terra com o uso de fitas, se necessário.
6. Em malhas de terra, adicionar uma haste no nó em que equipamentos de alta frequência estão conectados.
7. Usar malha atrativa para melhorar a área efetiva (melhorar o escoamento do surto) da malha de terra.
8. Usar tubos de cobre em lugar de cabos ou cordoalhas sempre que for necessário minimizar a ionização do solo (melhorar a linearidade da impedância de terra).
9. Interligar todos os terras sempre que forem necessários para evitar quedas de tensão entre malhas (ou eletrodos) de terra.
10. Separar os diferentes sinais de terra e somente conectar estes terras no ponto de equalização (exemplo: barra de equalização).
11. Minimizar a tensão de passo com camada asfáltica ou de brita.
12. Eliminar os laços de terra (exceto os das malhas com elementos fechados e anéis).
13. Capacitores de aterramento para alta frequência (controle do caminho de retorno do sinal de terra ou separação do sinal de alta frequência, indesejado, do sinal de baixa frequência, desejado).
14. Indutores (baixa indutância) de aterramento para baixas frequências (controle do caminho de retorno do sinal de terra ou separação do sinal de baixa frequência, indesejado, do sinal de alta frequência, desejado).
15. Uso de plano de terra isolado e ligado ao terra geral por apenas um ponto confina o sinal de terra e o plano proporciona alta capacitância.
16. Redução da tensão de passo em interiores por meio do uso da estrutura de armação de aço do contrapiso.
17. Em edificações pequenas já construídas pode-se reduzir a tensão de passo no interior por meio de hastes colocadas por baixo da edificação, e com ângulos pequenos em relação ao plano base da edificação.
18. Afastar os cabos terra dos demais cabos, tais como: cabos de potência, de sinal digital ou sinal analógico (evitando o acoplamento capacitivo).
19. Aproximar tanto quanto possível os cabos, cordoalhas e fitas do plano terra (solo, pavimentação, piso e paredes de interiores e exteriores), promovendo menor indutância no caminho para a corrente de terra.

20. Manter os cabos, cordoalhas e fitas de terra o mais curtos possível (evitando radiação e captação de campos eletromagnéticos e reduzindo a impedância de retorno etc.)
21. Multiaterrar a fim de ter distâncias eletricamente curtas entre dois pontos de terra (esta distância depende do comprimento de onda do sinal a ser aterrado).
22. Para linhas de aterramento eletricamente curtas, aterrar no lado do equipamento.
23. Anéis de aterramento concêntricos em torno de um eletrodo de terra reduzem a tensão de passo próximo a este.
24. A solda exotérmica, ou a solda amarela ou conexão por pressão devem ser usadas em aterramentos de impulsos atmosféricos ou de alta corrente elétrica (exemplo: curto-circuito).
25. Manter livre de umidade o cadinho e o pó químico usado na soldagem exotérmica (secagem do cadinho com maçarico a gás, antes da aplicação do pó químico).
26. Uso de pulseira ou sapatos especiais para eliminar a eletricidade estática do corpo humano (evitar descargas eletrostáticas significa evitar danos na eletrônica, danos em dados, ignição de gases inflamáveis etc.)
27. Uso de material antiestático (evitar a geração de eletricidade estática – carpetes, roupas, móveis etc.)
28. Uso de *choke* de modo comum para barrar correntes de modo comum (vindas pela linha telefônica etc.)
29. Agrupar os sinais de terra semelhantes em malhas de terra específicas, e depois equalizar o potencial com as demais malhas.
30. Usar a estrutura metálica das construções com terra (atenção às condições civis da estrutura. Principalmente no caso de altas correntes: curto-circuito, descarga atmosférica etc.).
31. Construir os eletrodos de terra preferencialmente em lugares úmidos.
32. Em eletrodos de terra com junção de dois ou mais cabos subterrâneos, aterrar nas junções (preferencialmente no nó de maior número de afluência de cabos).
33. Interligação do material condutor com o terra.
34. O aterramento em profundidade (hastes de 10 m, 20 m, 40 m etc.) é usado para reduzir a resistência de terra, em geral eficiente para baixas frequências (para altas frequências a impedância deste eletrodo pode ser suficientemente alta para tornar o aterramento inefetivo).
35. Cabos em paralelos e interligados, com pouca distância entre si, têm um efeito semelhante a fitas de aterramento.
36. Manter limpas as conexões, sempre livres de graxa, poeira, oxidação, tintas etc.
37. Manter sempre bem apertadas as conexões.
38. Em circuitos eletrônicos sensíveis, evitar ligações, no terra, entre metais diferentes (tensões galvânicas aparecem em junções de metais diferentes).
39. Levantar o tipo de solo (resistividade) e obter por cálculo o tipo de eletrodo mais adequado às condições requeridas, daí, então, construir o eletrodo e medir a resistência de terra deste.
40. Medições de resistência e resistividade não podem ser feitas em clima úmido.

41. Aguardar dois ou três dias de sol para realizar medições no solo.
42. A distância de melhor custo-benefício entre duas hastes de aterramento é igual ao comprimento das hastes individualmente (sendo todas as hastes de mesma profundidade).

A2 Curvas de redução do número de camadas

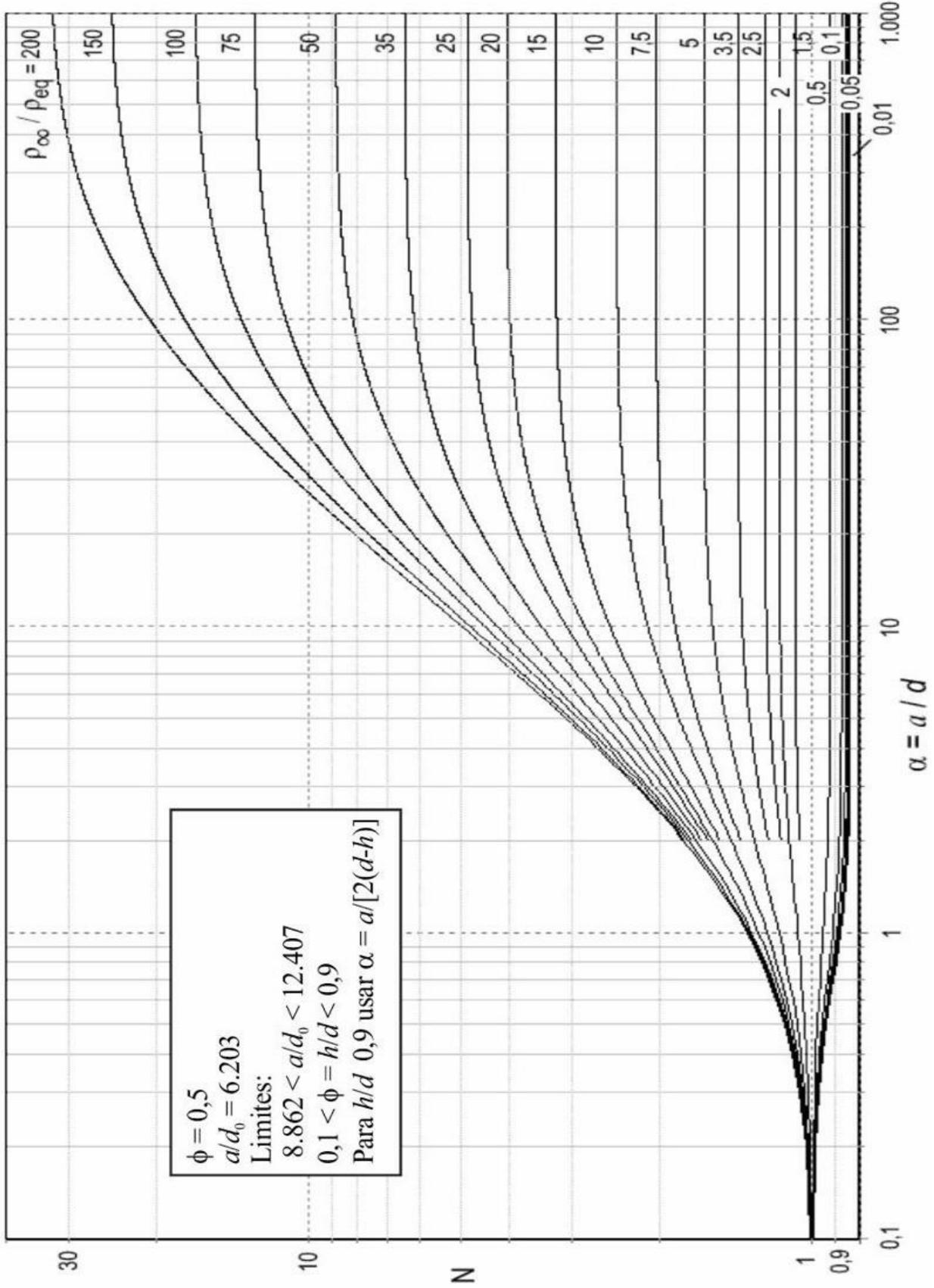


Figura A.1: Parâmetro de resistividade aparente para solo de duas camadas

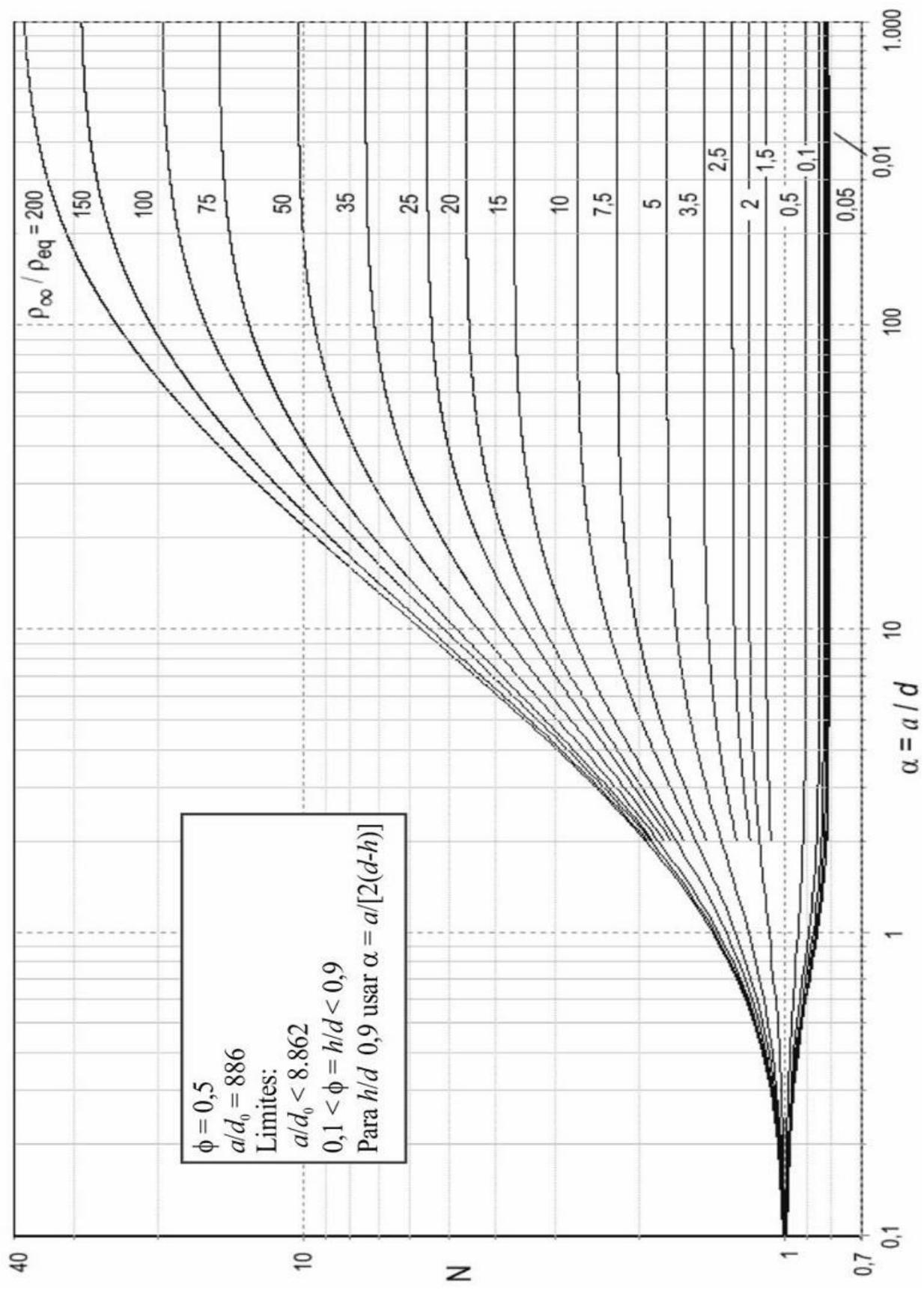


Figura A.2: Parâmetro de resistividade aparente para solos de duas camadas

A3 Geometria

Um círculo tem as seguintes características de interesse para o engenheiro de aterramento:

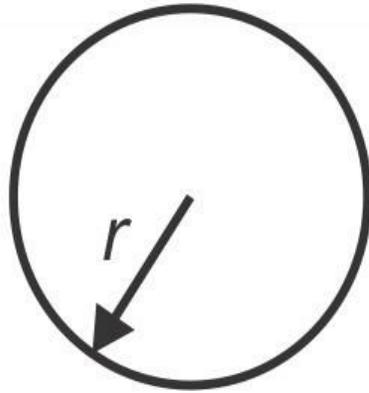
- Raio [m]
- Diâmetro [m]
- Perímetro [m]
- Área [m²]

$$r = \sqrt{\frac{Área}{\pi}}$$

$$Perímetro = 2\pi r$$

Diâmetro

$$d = 2r$$



$$\text{Área} = \pi r^2$$

Figura A.3: Círculo e suas grandezas

A4 Unidades Físicas

As unidades físicas são representadas por letras maiúsculas quando derivadas de nomes próprios, por exemplo, A é Ampère que é o nome do cientista que trabalhou com eletromagnetismo.

Grandeza	Unidade	Nome	Variável usual
Tensão elétrica	V	Volt	v
Corrente elétrica	A	Ampère	i
Potência	W	Watt	s
Energia	J W.h	Joule Watt x hora	E
Resistência elétrica	Ω	Ohm	r
Impedância elétrica	Ω	Ohm	z
Condutividade elétrica	S	Siemens	g
Condutividade elétrica	S/m	Siemens por metro	σ
Resistividade elétrica	$\Omega \cdot m$	Ohm x metro	ρ
Indutância	H	Henry	l
Capacitância	F	Faraday	c
Tempo	s	segundo	t
Frequência	Hz	Hertz	f
Velocidade angular	rad/s	Radiano por segundo	ω

Campo elétrico V/m Volts por metro E

Campo magnético H/m Henry por metro H

São válidas as seguintes relações dimensionais e com as variáveis:

$$\frac{V}{A} = \Omega \quad \frac{v}{i} = r$$

$$V.A = W \quad v.i = S$$

$$S = \frac{1}{\Omega} \quad g = \frac{1}{r}$$

$$\frac{S}{m} = \frac{1}{\Omega.m} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$s = \frac{1}{\text{Hz}} \quad s = \frac{1}{f}$$

Em geral tem sido adotado:

- Letra itálica para variáveis: r , z , $c(\nu)$;
- Letra em negrito indicar que é vetor ou matriz: \mathbf{Z} , \mathbf{H} ;
- Letra maiúscula para variáveis variando na frequência e fasores: V , I ;
- Letra minúscula para variáveis variando no tempo: $i(t)$, $v(t)$.

B BIBLIOGRAFIA

B1 ELETROMAGNETISMO E AFINS

1. J.D.Kraus; *Electromagnetics*, McGraw-Hill, 1985.
2. W.H.Hayt; *Eletromagnetismo*, Rio de Janeiro, 1978.
3. D.H.Staelin; A W. Morgenthaler e J. A Kong; *Electromagnetic Waves*, Prentice Hall, 1998.
4. C.L.Paul; *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, John Wiley & Sons, 1992.
5. R.E.Collin; *Antennas and Radiowave Propagation*, McGrall-Hill,1987.

B2 INSTALAÇÕES

1. W.Pfeil; *Concreto Armado vol. 2*, Livros Técnicos e Científicos, 4ª edição.
2. A.Charoy; *Parasites et Perturbations des Électroniques – Tome II Terres, Masses et Effets Réducteurs*, Dunod, França, 1992.
3. A.M. and F.Martzloff; “The Effect of Neutral Earthing Practices on Lightning Current Dispersion in a Low-Voltage Installation”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 13, No.3, July 1998.
4. F.C.Dart e P.S.A.Rocha; “Requisitos Básicos para Optimização de Sistemas de Aterramento”, *XIV SNPTEE*, Belém, PA, Brasil.
5. C.T.Mata; M.I.Fernandez; V.A.Rakov and M.A.Uman; “EMTP Modeling of a Triggered-Lightning Strike to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, October 2000.
6. R.P.O’Riley; *Electrical Grounding*, Delmar Publishers, 1999.
7. A working-group report for the Power System Relaying Committee; “Generator Ground Protection Guide”, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984.
8. Companhia Paulista de Força e Luz; “Aterramento na Distribuição”, Orientação técnica No 185, 2003.

B3 SOLO

1. A.M.Mousa; “The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes”, *IEEE Transactions Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, July 1994.
2. E.D.Sunde; *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*, Dover Publications, New York, 1968.
3. G.F.Tagg; *Earth Resistances*, Pitman Publishin Corporation, 1964.
4. J.Endrenyi; “Evaluation of Resistivity Tests for Design of Station Grounds in Nonuniform Soil”, *IEEE Transactions*, December 1963.
5. C.Portela; “Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior”, *Proceedings IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers – EMC Society*, Seattle, USA.
6. R.J. Knight, “The Dielectric Constant of Sandstone, 5 Hz to 13 MHz”, Ph.D. dissertation, Department of Geophysics, Stanford University, USA, November 1984.
7. N.Geng; D.R.Jackson and L.Carin; “On the Resonances of a Dielectric BOR Buried in a Dispersive Layered Medium”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 47, No. 8, August 1999.
8. S.Vitebskiy; L.Carin; M.A.Ressler and F.H.Le; “Ultra-Wideband, Short-Pulse Ground-Penetrating Radar: Simulation and Measurement”; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35, No. 3, May 1997.
9. A. K. Moss, X.D. Jing and J.S. Archer; “Wettability of Reservoir Rock and Fluid Systems from Complex Resistivity Measurements”, 6th International Symposium on Evaluation of Reservoir Wettability and Its Effect on Oil Recovery. 27-28 September 2000, Socorro, New Mexico, USA.

B4 ELETRODOS

1. D.S.F.Gomes; F.F.Macedo e S.M.Guilliod; *Aterramento e Proteção contra Sobretensões em Sistemas Aéreos de Distribuição*, EDUFF–Editora da Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1990.
2. S.C.M.Paula; “Análise dos Métodos de Cálculo de Resistência e Potenciais de Aterramentos Elétricos”, dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1996.
3. M.A.F.Mattos; *GPs, Programa de Aterramento e Transitórios, versão 2.1*, Okime, Campinas, 2002.
4. E.E.Oettle; “A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes”, paper No. 87, SM 567-1, *IEEE Power Engineering Society 1987 Summer Meeting*, San Francisco, California, EUA.
5. M.Kurtovic and S.Vujevic; “Earthing Grid Parameters with Conductor Surrounded by an Additional Substance”, *IEE Proceedings Generation Transmission Distribution*, Vo. 147, No. 1, January 2000.

B5 NORMAS

1. *Standard for the Installation of Lightning Protection Systems*, USA, 1997.
2. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE standard 80, 2000.
3. J.Whitfield; *Electricians's Guide – IEE Wiring Regulations*, EPA Press, Inglaterra, 1991.
4. R.P.O'Riley; *Electrical Grounding–based on the 1999 national electrical code*, Delmar Publishers, 1999.
5. *NBR5410, Instalações Elétricas de Baixa Tensão*, ABNT, junho 1993.
6. *NBR5419, Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas*, ABNT, junho 1993.
7. *NBR5444, Símbolos Gráficos para Instalações Elétricas Prediais*, ABNT, fevereiro 1989.
8. *NBR7117, Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner)*, NBR7117 NB716, dezembro 1981.
9. International Electrotechnical Commission, IEC, Technical Committee N° 64, *Effects of Current Passing Through the Human Body, Part 5, Unidirectional Single Impulse Currents of Short Duration*, September 1984.
10. International Electrotechnical Commission, IEC, Technical Committee N° 64, *Effects of current on human beings and livestock, part 1: General aspects*, IEC 479-1, 1994.
11. International Electrotechnical Commission, IEC, Technical Committee N° 64, *Assessment of the risk of damage due to lightning*, IEC 1662, 1995.
12. MIL-STD-1757A, *Lightning Qualification Test Techniques for Aerospace Vehicles and Hardware*, 20 de julho de 1980.
13. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System*, ANSI/IEEE standard 81, 1983.

B6 SUBESTAÇÃO E MALHA

1. M.A.F.Mattos; “GP — Grounding Program”, programa de cálculo de resistências eletrodos de terra, 2003
2. M.A.F.Mattos; “Grounding Grids Transient Simulation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, janeiro 2005.
3. M.A.F.Mattos; “Common Mode Voltage Generated by Grounding Grids, a Time Domain Solution”, *IEEE Symposium on EMC*, 2003.
4. M.A.F.Mattos; “Transitórios em Malhas de Terra”, *XVII SNPTEE*, Uberlândia, MG, Brasil, 19-24 de outubro de 2003.
5. M.A.F.Mattos and AC.Pavão, “Electromagnetic Fields Generated by Transients of Grounding Grids”, *Cigré Symposium on Power System EMC*, Lausanne, Swiss, 1993.
6. M.A.F.Mattos; “Grade”, programa de simulação de transitórios em malhas de terra, 2003.
7. EPRI; “Analysis Techniques for Power Substation Grounding Systems”, October 1982.
8. “EMC Guidelines”, Cigré WG 3604, Barcelona, October 1991.
9. A.P.Meliopoulos and M.G.Moharam; “Transient Analysis of Grounding Systems”, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 2, pp. 389-399, February 1983.
10. R.J.Heppe; “Computational of Potencial at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution”, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, Vol. 98, No. 6, Nov./Dec.,1979.
11. F.C.Dart e P.S.A.Rocha; “Requisitos Básicos para Otimização de Sistemas de Aterramento”, *XIV SNPTEE*, Belém, PA, Brasil.
12. P.M.Miguel; “Projeto de Malha de Terra em Subestações - Otimização da Distribuição de Potencial na Superfície do Solo”, MsC, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1981.
13. IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group; “Modeling Guidelines for Fast Front Transients”; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, January 1996.
14. M.Rammamoorthy, M.M.B.Narayanan, S.Parameswaran e D.Mukhedkar; “Transient Performance of Grounding Grids”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No. 4, October, 1989.
15. C.Portela; “Determinação das resistências de contato com o solo, levando em conta camadas de brita ou revestimento”, *IX SNPTEE*, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1987.
16. C.Portela; “Comportamento de Sistemas de Aterramento para Descargas Atmosféricas, Determinação de Efeitos Relativos à Segurança de Pessoas e Equipamentos e a Interferência em Sistemas de Proteção e Controle”, *XIV SNPTEE*, Belém, PA, Brasil, 1997.
17. C.Portela; “Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, I - Physical and Methodological Aspects”, *International Symposium on EMC, IEEE EMC Society*, Austin, Texas, USA, August 1997.
18. C.Portela; “Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems, II - Practical

- Application Examples”, *International Symposium on EMC, IEEE EMC Society*, Austin, Texas, USA, August 1997.
19. C.T.Mata; M.I.Fernandez; V.A.Rakov and M.A.Uman; “EMTP Modeling of a Triggered-Lightning Strike to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No.4, October 2000.
 20. Substation Committee Working Group, “Safe Substation Grounding – Part I”, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No.9, September 1981.
 21. J.G.Sverak; “Simplified Analysis of Electrical Gradients Above a Ground a Ground Grid – I How Good is The IEEE Method? (A Special Report for WG 78.1)”, *IEEE Transactions Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-103, No.1, January 1984.
 22. B.Thapar; V.Gerez; A.Balakrishnan and D.A.Blank; “Simplified Equation for Mesh and Step Voltage in na AC Substation”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6, No. 2, April 1991.

B7 OUTROS

1. C.Christopoulos; *The Transmission-Line Modeling Method TLM*, IEEE press, 1995.
2. IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group; “Modeling Guidelines for Fast Front Transients”; *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, January, 1996.
3. M.A.F.Mattos and C.Christopoulos; “A Nonlinear Transmission Line Model of the Lightning Return Stroke”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 30, No. 3, August, 1988.
4. A.Grenwood; *Electrical Transients in Power Systems*, John Wiley & Sons.
5. E.Kuffel and W.S.Zaengl, *High Voltage Engineering, Fundamentals*, Pergamon Press, 1984.
6. “Switching Surges-Selection of Typical Waves for Insulation Coordination”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, October 1976.

Contra capa

Escreva para spdaterra@gmail.com

Facebook Spda Terra

GP - é um programa computacional para cálculo de eletrodos de aterramento de autoria de Marcos André Mattos, que foi utilizado para traçar vários gráficos de resistências de eletrodos de terra neste livro.

Esta obra aborda diversas técnicas de aterramento utilizadas atualmente. A questão conceitual do que é e para que serve o aterramento é abordada com detalhes e precisão. O aterramento para baixas frequências (60 Hz ou 50 Hz), para tensões impulsivas (descargas atmosféricas, chaveamento, início de curto circuito etc.) e para altas frequências (sinais de comunicação, informática etc.) é discutido com critério e extensão. O livro está dividido em quatro partes: a primeira levanta o ferramental e os fenômenos presentes nos sistemas de aterramento, a segunda trata das questões comuns a qualquer tipo de aterramento, a terceira aborda o aterramento no solo com diversos gráficos de resistência de eletrodos de terra e por fim, a quarta é pertinente ao aterramento em instalações e equipamentos.

O autor já há vários anos está envolvido com questões de eletromagnetismo aplicado e compatibilidade eletromagnética. Tendo recebido o título de Philosophy Doctor pela Universidade de Nottingham na Inglaterra em janeiro de 1989. É autor de publicações técnicas e científicas no Brasil e no exterior.

Table of Contents

1 INTRODUÇÃO
2 ELETROMAGNETISMO
3 CIRCUITOS
4 EFEITO ANTENA
5 LINHAS DE TRANSMISSÃO
6 MATERIAL DE ATERRAMENTO
7 CAMINHO DE RETORNO
8 RESISTÊNCIA X IMPEDÂNCIA DE TERRA
9 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO
10 ELETRODOS COM HASTES
11 ELETRODOS COM CABOS E OUTROS
12 MALHA DE TERRA
13 MEDIÇÕES
14 INSTALAÇÕES PREDIAIS
15 INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS
16 EQUIPAMENTOS
A APÊNDICE
A1 Técnicas
A2 Curvas de redução do número de camadas
A3 Geometria
A4 Unidades Físicas
B BIBLIOGRAFIA
B1 ELETROMAGNETISMO E AFINS
B2 INSTALAÇÕES
B3 SOLO
B4 ELETRODOS
B5 NORMAS
B6 SUBESTAÇÃO E MALHA
B7 OUTROS
Figura 1.1
Figura 1.2
Figura 1.3
Figura 1.4
Figura 1.5
Figura 1.6
Figura 1.7
Figura 1.8
Figura 1.9
Figura 1.10
Figura 1.11
Figura 1.12
Figura 1.13
Figura 1.14

[Figura 1.15](#)

[Figura 1.16](#)

[Figura 2.1](#)

[Figura 2.2](#)

[Figura 2.3](#)

[Figura 2.4](#)

[Figura 2.5](#)