

1. INTRODUÇÃO

Aterramento é a arte de se fazer uma conexão com toda a terra. A conexão terra é na realidade a interface entre o sistema de aterramento e toda a terra, e é por esta interface que é feito o contato elétrico entre ambos ("terra" e sistema de aterramento).

O aterramento elétrico, com certeza, é um assunto que gera um número enorme de dúvidas quanto às normas e procedimentos no que se refere ao ambiente elétrico industrial. Muitas vezes, o desconhecimento das técnicas para realizar um aterramento eficiente, ocasiona a queima de equipamentos, ou pior, o choque elétrico nos operadores desses equipamentos.

Para que um Sistema de Energia Elétrica opere corretamente, com uma adequada continuidade de serviço, com um desempenho seguro do sistema de proteção e, mais ainda, para garantir os limites (dos níveis) de segurança pessoal, é fundamental que o quesito Aterramento mereça um cuidado especial. Esse cuidado deve ser traduzido na elaboração de projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam consideradas todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido.

Os objetivos principais do aterramento são:

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

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

2.1 – Conceitos Básicos

Um dado importante, na elaboração do projeto de aterramento é o do conhecimento das características do solo, principalmente sua resistividade elétrica. Esta, além da importância para a engenharia elétrica, em termos de proteção e segurança, auxilia também em outras áreas como: Geologia, na localização de jazidas de minerais, lençol de água, petróleo, gás, etc.

O aterramento elétrico tem três funções principais:

- Proteger o usuário do equipamento das descargas atmosféricas, através da viabilização de um caminho alternativo para a terra, de descargas atmosféricas.
- “Descarregar” cargas estáticas acumuladas nas carcaças das máquinas ou equipamentos para a terra.
- Facilitar o funcionamento dos dispositivos de proteção (fusíveis, disjuntores, etc.), através da corrente desviada para a terra.

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

- as conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado ao solo);
- terra que envolve os eletrodos.

Existem várias maneiras para aterrar um sistema elétrico, que vão desde uma simples haste, passando por placas de formas e tamanhos diversos, chegando às mais complicadas configurações de cabos enterrados no solo. O ponto do sistema que se deseja conectar ao solo, dependendo da aplicação, este pode constituir-se em uma trilha numa placa de circuito impresso, na carcaça de um motor ou de um computador, ou ainda, no neutro de um sistema elétrico. Também os eletrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada. Basicamente, o eletrodo se constitui em qualquer corpo em qualquer corpo metálico enterrado no solo. Podem ser enumeradas algumas configurações usuais, como cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas em reticulado. A forma, assim como a disposição geométrica dos eletrodos no solo são as mais variadas, de acordo com a aplicação.

Destacam-se :

- **as hastes verticais** : usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade, e que são muito práticas, por serem de fácil cravação;
- **os eletrodos horizontais** : enterrados usualmente a profundidade da ordem de 0,5 metros, são usados principalmente quando a maior preocupação é o controle do gradiente de potencial na superfície do solo.

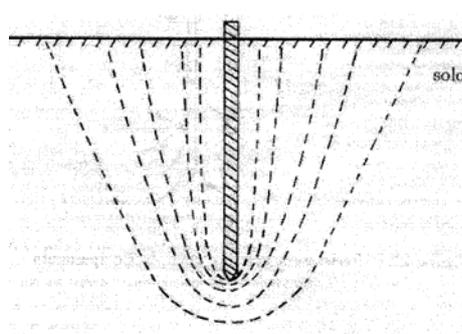


Fig.2.1-Constituição de um aterramento

Para se avaliar a natureza dos aterramentos, deve ser considerado que, em geral, uma conexão à terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para terra. A perspectiva na qual o sistema enxerga o aterramento pode ser expressa através de sua impedância. A **impedância de aterramento** pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante.

Esta impedância pode ser apresentada através de uma representação simplificada de aterramento por meio de um circuito equivalente, conforme a figura a seguir e explica sucintamente a origem da sua configuração.

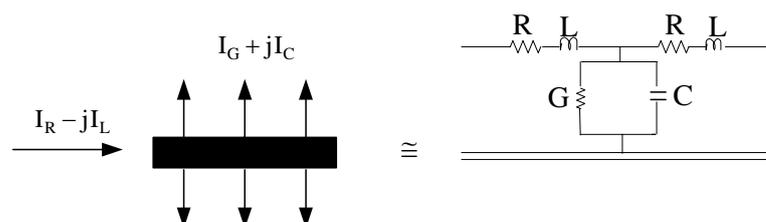


Fig.2.2-Componentes de corrente no solo

Se uma porção limitada do eletrodo é considerada, pode-se notar que a corrente dissipada para o solo é composta pelas quatro componentes representadas na figura. A corrente que é injetada no eletrodo é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o comprimento restante do eletrodo. Nesta última parcela, a corrente longitudinal, é observada as perdas internas ao condutor e um campo magnético é estabelecido na região em volta dos caminhos da corrente (interior e exterior do condutor). Em termos de circuito equivalente, a soma das energias correspondentes pode ser feito por meio de uma resistência e uma indutância em série. Por outro lado, o campo elétrico no solo (um meio de resistividade ρ e permissividade ϵ), determina o fluxo de correntes condutiva e capacitiva no meio. A relação entre estas correntes não depende da geometria dos eletrodos, mas da relação $\sigma/\omega\epsilon$, onde σ refere-se à condutividade do solo e ω à frequência angular. A energia associada ao fluxo dessas correntes transversais pode ser computada por meio de uma capacitância e uma condutância, colocadas em paralelo no circuito equivalente,(fig.2.2).

Em muitas aplicações, não se refere à impedância de aterramento, mas à sua resistência. Isto se deve ao fato de que, nas condições dessas aplicações, os efeitos reativos são muito reduzidos. O valor da resistência de aterramento pode ser quantificado pela relação entre a tensão aplicada a um aterramento e a corrente resultante (neste caso, entende-se por tensão o potencial adquirido pelo aterramento referido ao infinito):

$$R_T = V/I \quad (2.1)$$

Para se estabelecer uma idéia da ordem de grandeza deste valor, deve-se considerar inicialmente que a terra não é um bom condutor de eletricidade, isto é, possui uma alta resistividade. Contudo, a seção reta do caminho percorrido por uma corrente no solo pode ser bastante ampla, de forma que, a despeito da alta resistividade do solo, sua resistência pode ser pequena. A presença do aterramento se manifesta, na perspectiva do sistema, quando flui corrente pelos seus eletrodos. Na ausência da mesma, tem-se um potencial nulo nos eletrodos (mesmo potencial de um ponto infinitamente afastado). A resistência de aterramento pode afetar o sistema de duas formas:

- **Através de uma influência ativa** : o seu valor pode ser determinante na limitação do valor da corrente que flui para o solo;
- **Numa perspectiva passiva**: deve-se considerar que o fluxo de corrente pelo aterramento resulta numa elevação de potencial no solo, transmitida ao ponto de aterramento do sistema, e que o valor dessa elevação de potencial V_T é diretamente proporcional ao valor da resistência de aterramento.

$$V_T = R_T I \quad (2.2)$$

2.2 – Aterramento de Sistema e Sistema de Aterramento

Cabe estabelecer a distinção entre Sistema de aterramento e Aterramento de sistemas. O primeiro termo relaciona-se ao sistema físico requerido. O segundo corresponde à forma como o sistema elétrico é conectado ao solo. Neste caso, existem basicamente três tipos de aterramento:

- **Sistema isolado**: não existe conexão condutiva proposital entre o sistema elétrico e o solo. O acoplamento entre ambos é fraco e se faz prioritariamente de forma capacitiva. O nível das máximas sobretensões possíveis neste tipo de sistema é elevado e existem dificuldades na localização de eventuais faltas para terra.
- **Sistema solidamente aterrado**: alguns pontos do sistema elétrico são conectados diretamente à terra, procurando-se um caminho de mínima impedância à passagem de eventual corrente de falta para o solo. Os valores elevados da corrente, resultante nesta eventualidade, sensibilizam os dispositivos de proteção, que prontamente comandam o desligamento da parte faltosa do sistema.

- **Sistema aterrado por impedância** : neste caso é interposta propositalmente uma impedância (resistência ou reatância) entre o sistema elétrico e seu aterramento físico, que procura limitar o valor da corrente de eventual falta, sem contudo eliminar a ligação condutiva do sistema ao solo. Tal forma de aterramento tenta implementar uma condição intermediária entre as duas alternativas citadas anteriormente, reunindo as vantagens de cada uma delas.

3. RESISTIVIDADE DO SOLO

3.1 – Conceitos Básicos

Na maioria dos projetos de aterramento, este é dimensionado para atender a solicitações lentas, como as correntes de curto-circuito. As frequências representativas desse tipo de ocorrência são baixas, sendo próximas da frequência fundamental dos sistemas, de valor 60 ou 50 Hz. Como o aterramento pode, também, estar sujeito a ocorrências associadas a fenômenos rápidos, é prática usual ajustar algumas correções localizadas no aterramento projetado para condições de baixas frequências, para ajustar a sua configuração, complementando-a para também atender às solicitações rápidas.

A figura a seguir, fig. 3.1, apresenta o circuito resultante da aplicação das simplificações cabíveis nas condições de baixa frequência. Em função do valor reduzido da frequência, a reatância longitudinal e a susceptância transversal podem ser desprezadas. A resistência interna do condutor é muito reduzida devido à alta condutividade dos eletrodos metálicos e à usual dimensão da seção desses condutores. Assim, o aterramento pode ser basicamente representado por um conjunto de condutâncias conectadas em paralelo, assegurando-se a inclusão dos efeitos mútuos condutivos entre as mesmas. Com esta perspectiva, o sistema aterrado deixa de enxergar o aterramento como uma impedância complexa, passando a visualizá-lo como uma resistência, Resistência de Aterramento (R_T), equivalente à solução do conjunto de condutâncias.

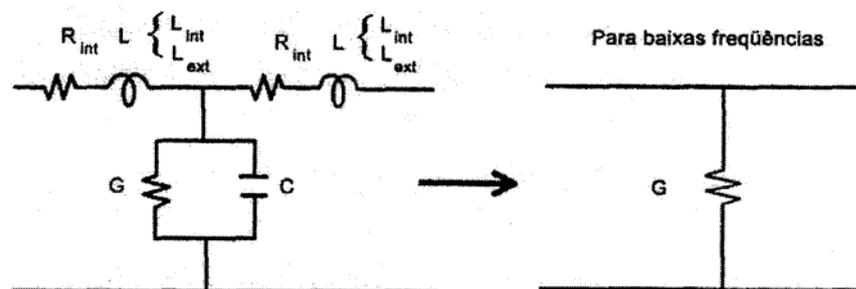


Fig. 3.1 – Circuito equivalente de uma porção do aterramento em condições de baixa frequência

Tem-se que a Resistência de Aterramento é diretamente proporcional à resistência do solo (ρ), em que os eletrodos estão colocados. A constante de proporcionalidade K , expressa apenas os efeitos geométricos (dimensões) dos eletrodos:

$$R_T = K \cdot \rho \quad (3.1)$$

Pela relação anterior(2.1), percebe-se que os parâmetros que influenciam o valor da resistividade do solo, exercem uma influência na mesma proporção sobre a resistência de aterramento.

3.2 – Resistividade do Solo

3.2.1 - Conceitos

Define-se a resistividade do solo (ρ), como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta ℓ de 1 m , área das faces A de 1m^2), preenchido com este solo. Sua unidade é " $\Omega\cdot\text{m}$ ".

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \text{ ou } \rho = R \frac{A}{\ell} \quad (3.2)$$

O solo em seu estado natural é um mau condutor de eletricidade. Se for considerado totalmente seco, ele se comporta como um material isolante.

Sua resistividade é muito elevada se comparada a dos condutores convencionais.

Condutor	Resistividade ($\Omega\cdot\text{m}$)
Cobre Puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	5 a 20.000

Tab. 3.1 – Ordem de grandeza da resistividade de certos materiais

3.2.2 – Fatores que determinam a resistividade do solo

Consideram-se como os principais parâmetros que influenciam no valor da resistividade do solo, bem como a direção desta influência:

▪ Tipo de Solo:

Os tipos de solo não são claramente definidos. A experiência mostra que, usualmente, são encontrados valores diferentes de resistividade para a mesma variedade de solo de localidades distintas. Este é um dos fatores que não é possível atribuir-se um valor específico de resistividade a um tipo de solo. É possível caracterizar faixas de valores para os diferentes tipos de solo.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ($\Omega\cdot\text{m}$)
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Tab.3.2 – Valores usuais de resistividade de certos tipos de solo.

▪ **Umidade do Solo :**

A condutividade do solo é sensivelmente afetada pela quantidade de água nele contida, sendo que o aumento da umidade do solo implica na diminuição da sua resistividade. A água é o principal elemento de condução de corrente no solo, o que pode ser comprovado, por exemplo, pelo comportamento da condutividade do solo quando lhe é alterada a concentração de sais minerais.

Na figura a seguir, é apresentado um gráfico que estabelece a relação entre a resistividade e umidade para um solo arenoso. Observa-se que a resistividade diminui sensivelmente com o aumento da quantidade de água diluída no solo para variações do índice de 0 a 18%.

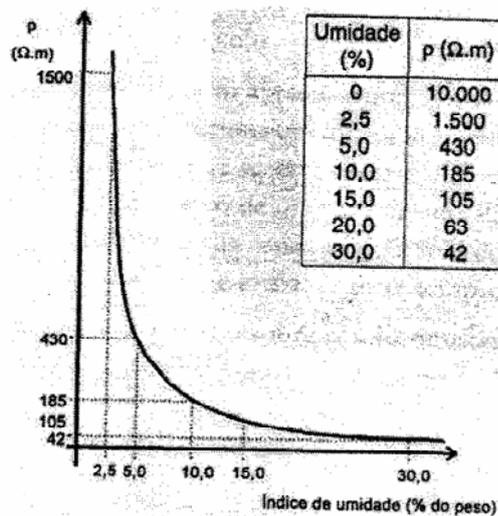


Figura 3.2 – Efeito da Umidade na resistividade do solo

▪ **Concentração e Tipos de sais dissolvidos na água**

Sendo a resistividade de um solo dependente da quantidade de água retida neste, e conhecendo-se o fato de que a resistividade da água é governada pelos sais dissolvidos nesta (condição eletrolítica), conclui-se que a resistividade do solo é influenciada pela quantidade e pelos tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo.

A tabela, a seguir apresenta a relação entre a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso, de umidade de 15% (Percentual em peso) e temperatura de 17°C, e sua resistividade.

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade ($\Omega.m$) Solo arenoso
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Tabela 3.3 – Influência da concentração de sais na resistividade do solo

▪ Temperatura do Solo

Deve-se encarar os efeitos da temperatura sobre a resistividade do solo em dois aspectos distintos:

- uma temperatura elevada provoca maior evaporação, diminuindo a umidade do solo. Desta forma, um aumento de temperatura tende a aumentar a resistividade.

- considerando que a resistividade do solo é sensivelmente influenciada pela água nele contida e sabendo-se que a água possui alto coeficiente negativo de temperatura, é razoável supor que a resistividade tende a crescer para uma diminuição da temperatura.

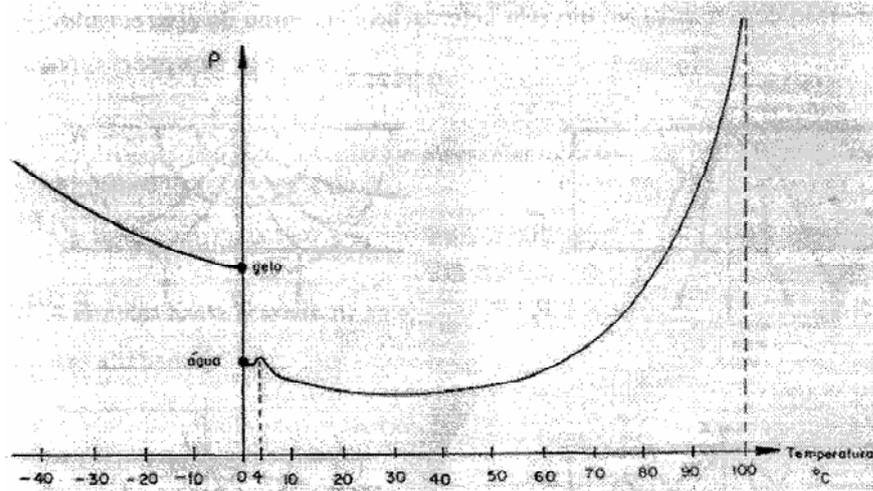


Fig. 3.3 – Comportamento da Resistividade da água em função da temperatura.

Dados coletados experimentalmente mostram que, para um solo cuja umidade é mantida aproximadamente constante, o comportamento da resistividade em função da temperatura é bem aproximado daquele apresentado na figura anterior (Fig.3.3).

Temperatura	Resistividade do solo ($\Omega.m$)
+20	72
+10	33
0 (água)	138
0 (gelo)	300
-5	790
-15	3.300

Tabela 3.4 – Efeito da temperatura na resistividade do solo

▪ Compacidade do Solo

Um solo mais compacto apresenta uma maior continuidade física, o que proporciona um menor valor de resistividade. Recomenda-se a espera de um certo tempo após a instalação de um aterramento elétrico, para se fazer a medição de sua resistência. O solo demora um pouco para se acomodar e tornar-se mais compacto.

Um aumento na pressão sobre o solo ocasiona geralmente maior compacidade deste, com redução de sua resistividade.

▪ Granulometria do solo

São de reconhecida importância no estabelecimento da resistividade do solo a dimensão e a presença de grãos de diversos tamanhos. Deve-se considerar essa influência em dois aspectos:

- capacidade de retenção de água nas camadas do solo;
- continuidade física do solo.

Em ambos aspectos, a influência de uma granulometria maior tende aumentar a resistividade (menor capacidade de retenção de água no solo, deixando-a fluir para camadas mais profundas ou evaporar-se ; menor contato entre os grãos resultando em menor continuidade elétrica).

▪ Estratificação do solo

Quando se pensa na resistividade do solo de um certo local, atribui-se normalmente a esta, um valor da resistividade do material que o compõe. A composição do solo é geralmente estratificada em várias camadas de formação diferente (conseqüentemente de diferentes resistividades) superpostas.

O solo apresenta características anisotrópicas, quando por exemplo camadas mais profundas afloram em locais determinados, ocasionando descontinuidades na superfície. A resistividade pode variar dependendo da direção considerada e, para tratar do solo de um certo local, passa-se a atribuir-lhe o valor médio das resistividades das diversas partes que o compõem, denominado resistividade efetiva deste solo.

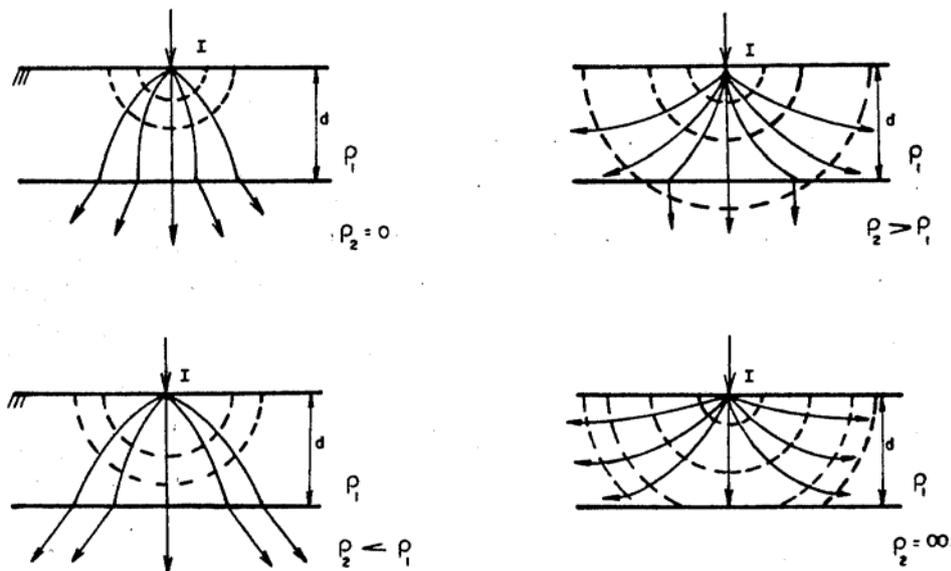


Fig.3.4 – Estratificação do solo em duas camadas

Existem casos em que as camadas se apresentam inclinadas e até verticais, devido a alguma falha geológica. Estudos apresentados para pesquisa do perfil do solo as consideram aproximadamente horizontais, uma vez que outros casos são menos típicos.

Como resultado da variação da resistividade das camadas do solo, tem-se a variação da dispersão de corrente. A fig. 3.4 apresenta o comportamento dos fluxos de dispersão de correntes em um solo heterogêneo, em torno do aterramento. As linhas pontilhadas são as superfícies equipotenciais e as linhas cheias são as correntes elétricas fluindo no solo.

4. RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

4.1 – Conceituação

Uma conexão à terra, apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para o solo. Em princípio, não deve se pensar apenas numa resistência de aterramento, mas numa impedância.

Para condições de baixa frequência, baixas correntes e valores de resistividade do solo não muito elevados, são desprezíveis os efeitos capacitivos e de ionização do solo e o mesmo comporta-se praticamente como uma resistência linear.

Nas aplicações de alta frequência (por exemplo, em telecomunicações), é necessário considerar-se o efeito capacitivo, principalmente nos solos de alta resistividade e, também, a influência da reatância indutiva ao longo dos condutores e eletrodos. Tais efeitos estão também presentes para as ondas impulsivas de corrente e tensão, como aquelas associadas a descargas atmosféricas, pois as frequências representativas desse tipo de onda são bastantes elevadas.

4.2 – Quantificação da Resistência de Aterramento.

Entende-se por aterramento a ligação elétrica de um equipamento ou componente de um sistema elétrico à terra por meio de dispositivos condutores de eletricidade adequados. Ao ser percorrido por uma corrente, o aterramento comporta-se como uma impedância complexa. Em condições de baixa frequência, tal impedância aproxima-se de uma resistência.

O termo adotado para designar a resistência oferecida à passagem de uma corrente elétrica para o solo através de um aterramento é resistência de aterramento, também conhecida como resistência de terra.

A quantificação do valor da resistência de aterramento pode ser traduzida através da relação entre o valor da tensão resultante no eletrodo e o valor da corrente injetada no solo através do mesmo.

$$R_T = \frac{V_T}{I}$$

4.3 – Natureza da Resistência de Aterramento

A resistência oferecida à passagem da corrente elétrica através de um eletrodo para o solo tem três componentes principais:

- **Resistência própria** do eletrodo e das ligações elétricas ao mesmo (usualmente de valor muito reduzido, dada a alta condutividade dos metais empregados);
- **Resistência de contato** entre o eletrodo e a terra adjacente ao mesmo (de valor desprezível se o eletrodo estiver isento de qualquer cobertura isolante, e se a terra estiver bem comprimida de encontro à superfície do eletrodo);
- **Resistência da terra circunvizinha** (componente fundamental, que efetivamente determina o valor da resistência de um aterramento bem instalado, e que depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição de corrente provinda do eletrodo, esta determinada principalmente pela forma e dimensão do mesmo).

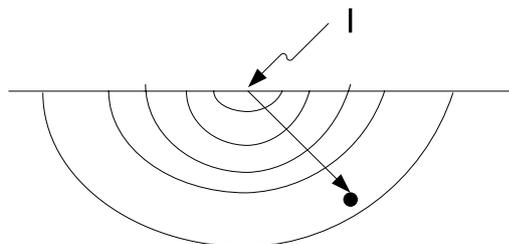


Fig. 4.1 – Modelo de solo homogêneo

Cada fatia do solo apresenta um certo valor de resistência. A soma da resistência de todas as fatias até uma distância infinita resulta no valor da Resistência de Aterramento.

Como a espessura é a mesma para todas as fatias, quanto mais próxima do eletrodo está uma fatia, maior é a sua resistência, pois a área atravessada pela corrente é menor. Por outro lado, quando a distância ao eletrodo é muito significativa, a área da fatia em consideração torna-se tão ampla que a sua resistência fica desprezível. Portanto quem determina efetivamente o valor da resistência de aterramento é a terra mais próxima do eletrodo, sendo muito reduzida a contribuição das fatias de solo mais distantes.

4.4 – Determinação da Resistência de Aterramento

O cálculo da resistência de aterramento requer a realização de desenvolvimentos analíticos, que podem ser simples ou complicados, dependendo da configuração dos eletrodos.

Já foi observado, que a resistência de aterramento é definida pela relação entre a elevação do potencial referido e a corrente que o gerou. Tomando como referência a figura 4.1, o desenvolvimento a seguir ilustra a determinação de tal resistência no caso do eletrodo hemisférico.

Inicialmente, calcula-se o potencial promovido num ponto X qualquer do solo, a uma distância R_x da fonte de corrente, devido ao fluxo dessa corrente em direção ao infinito.

$$V_{r_x} - V_{\infty} = - \int_{\infty}^{r_x} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \text{ ou } \vec{E} = \rho \vec{J}$$

$$\text{No caso : } J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad \text{e} \quad - \int_{\infty}^{r_x} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{\rho}{2\pi} I \left(\frac{1}{r} \right)_{\infty}^{r_x}$$

$$\text{Logo : } V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi r_x} I$$

Quando se considera o ponto x sobre a superfície do eletrodo, pode se determinar a elevação de potencial do eletrodo em relação ao infinito, devido ao fluxo de corrente I

$$V_{\text{eletrodo}} = \frac{\rho}{2\pi r_{\text{eletrodo}}} I$$

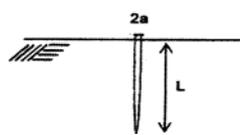
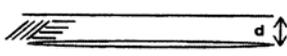
A partir daí, determina-se o valor da resistência de aterramento:

$$R_T = \frac{V_{\text{eletrodo}}}{I} \quad \therefore R_T = \frac{\rho}{2\pi r_{\text{eletrodo}}}$$

A determinação da resistência de aterramento de outras configurações de aterramento segue o mesmo procedimento básico.

A diferença fica por conta da forma de distribuição da densidade de corrente do solo, que depende da forma e dimensão do eletrodo e que determina uma formulação específica para o campo elétrico.

Nas tabelas, a seguir, são apresentadas expressões para cálculo da resistência de aterramento de algumas configurações típicas de aterramento.

Eletrodo	Tipo / Expressão
	Haste Vertical $R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
	Eletrodo horizontal $R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{4L}{d} - 2 + \frac{2d}{L} + \dots \right)$

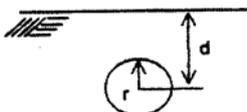
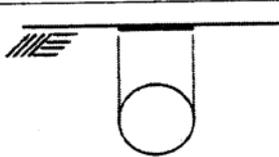
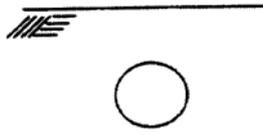
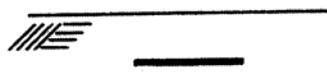
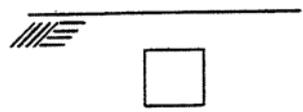
Eletrodo	Tipo / Expressão
	Semi-esfera ao nível do solo $R_T = \frac{\rho}{2\pi r}$
	Esfera colocada à profundidade "d" $R_T = \frac{\rho}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2d} \right)$
	Disco horizontal ao nível do solo $R_T = \frac{\rho}{4r}$
	Disco vertical à profundidade "d" $R_T = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi d} \left(1 + \frac{7}{24} + \frac{r^2}{4d^2} + \dots \right)$
	Disco horizontal à profundidade "d" $R_T = \frac{\rho}{8r} + \frac{\rho}{8\pi d}$
	Superfície quadrada vertical Mesma resistência que a de um disco de mesma área, colocado à mesma profundidade

Figura 4.5 – Configurações típicas de aterramento e suas respectivas expressões.

4.5 – Fatores que influenciam no valor da Resistência de um Aterramento

Vários fatores influenciam na resistência de um aterramento de um eletrodo ou de uma associação deles. Como já mencionado, das componentes desta resistência, pesa realmente a resistência de terra mais circunvizinha aos eletrodos.

De uma certa forma, pode-se resumir os fatores em dois grupos:

- resistividade do solo nas adjacências dos eletrodos;
- geometria dos eletrodos (dimensão e forma).

Se a resistividade é um fator de influência, também o são todos aqueles fatores que determinam o seu valor.

Quanto aos eletrodos, pode-se considerar as suas dimensões, formas, número empregado, o posicionamento relativo e o espaçamento entre eles.

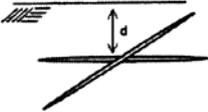
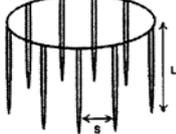
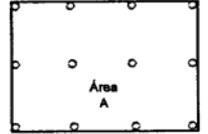
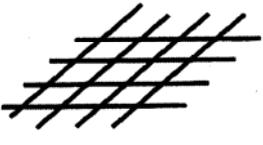
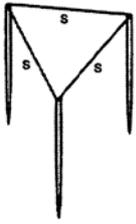
Eletrodos	Tipo / Expressão
	<p>Estrela de 4 pontos colocada num plano horizontal de profundidade "d" (raio do eletrodo: a)</p> $R_T = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{L}{d} + 2,91 - 1,07 \frac{2d}{L} \dots \right)$
	<p>n hastes verticais dispostas em círculo ($s \gg L$)</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \ln \frac{2n}{\pi} \right)$
	<p>n hastes verticais dispostas uniformemente na área A</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \frac{4L}{a} - 1 + 2 \cdot \frac{K_1 L}{\sqrt{A}} (\sqrt{n} - 1)^2 \right]$ <p>K_1 = constante que depende da profundidade da parte superior da hastes {25}</p>
	<p>n hastes verticais dispostas em linha reta ($s \gg L$)</p> $R_T = \frac{1}{n} \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 + \frac{L}{d} \ln \frac{1,781 \cdot n}{2,718} \right)$
	<p>Malha constituída por reticulado formado com eletrodos horizontais, cobrindo a área A e comprimento total de condutores L</p> $R_T \cong 0,443 \frac{\rho}{\sqrt{A}} + \frac{\rho}{L}$
	<p>Conjunto de 3 hastes verticais interligadas, dispostas no vértice de um triângulo equilátero (aplicação típica de aterramento de pára-raios)</p> $R_T = R_{11} \cdot \frac{1+2r/s}{3} \quad R_{11} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$ $\frac{\rho}{2\pi r} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$ <p>r: raio do hemisfério que possui o mesmo valor de resistência de uma haste (R_{11})</p>

Figura 4.6 – Expressões para configurações típicas de sistemas de aterramento

5. SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Os sistemas de aterramento podem atender cada uma das funções abaixo relacionadas:

▪ O "Terra" ou Ponto Referência de Terra.

Todo sistema elétrico ou eletrônico deve ser referenciado à terra. Este tipo de aterramento é chamado normalmente de "Terra". O ponto de "terra" neste caso, providencia uma referência comum para os circuitos dos sistemas. Em muitos casos, o valor de resistência dos pontos de referência é de pequena importância. Para estes pontos, a referência de terra irá satisfazer apenas os requisitos funcionais. Estes sistemas são normalmente independentes não requerendo interconexões com a terra, exceto quando necessário proporcionar segurança às pessoas, não permitindo a presença de potenciais perigosos. Um exemplo típico é um terminal de computador, onde o fio verde (terceiro pino da tomada) é o ponto de referência.

▪ O aterramento de neutralização de um sistema de pára-raios.

Normalmente o aterramento de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas é tratado como mencionado no item acima, mas na realidade ele é bem diferente. Na realidade este "terra" deveria ser chamado de "sistema de neutralização de cargas", devido a natureza da eletricidade atmosférica e ao mecanismo das descargas atmosféricas. As nuvens de tempestade induzem na superfície do solo, uma sombra de cargas elétricas de igual, porém opostos potenciais. Quando uma descarga elétrica atinge um ponto ou estrutura na terra, o canal ionizado (condutor de eletricidade) então formado entre estes dois corpos (terra e nuvem), permitirá a equalização das cargas opostas. Neste momento, toda a carga elétrica induzida pela nuvem de tempestade (na superfície da terra, nas estruturas das edificações, nos sistemas elétricos e eletrônicos, e em tudo que estiver abaixo da nuvem), deverá se mover em direção ao ponto de contato da descarga, e a neutralização deverá ser processada em 20 microsegundos ou menos. Desta forma, os sistemas elétrico, eletrônico, ou qualquer outra parte do local sob influência da nuvem, deverão ter um caminho de baixa resistência e baixa impedância em direção ao ponto de contato de uma descarga atmosférica. Desta forma, os requisitos de funcionamento de um aterramento de pára-raios não devem se restringir apenas nos baixos valores de resistência ôhmica (CC- Corrente Contínua), mas também no caminho de baixa impedância.

▪ O aterramento de interface com o solo.

Deverá proporcionar um contato efetivo com o solo ao redor. Isto é, quanto menor a resistência ôhmica entre os componentes do sistema e o solo em volta, melhor, mais eficiente e seguro o aterramento será. Estes sistemas normalmente necessitam também de um ponto de referência à terra, uma capacidade de neutralização das cargas elétricas induzidas pelas nuvens de tempestade e uma interface de baixa impedância com a terra.

Pelo exposto acima, e em particular no item 2, podemos entender a necessidade de critérios ao se projetar e instalar um sistema de proteção contra as descargas atmosféricas. A interligação dos diferentes aterramentos e condutores de descidas dos sistemas tem fundamental importância para a efetividade e segurança desejada. Entretanto, alicerçadas na aleatoriedade de ocorrência de raios e nos períodos longos que podem ocorrer entre um evento e outro, muitas empresas prestadoras de serviços da área insistem em direcionar seus objetivos para alternativas de baixo custo e confiabilidade duvidosa. Voltamos a afirmar, uma proteção efetiva não dispensa os requisitos fundamentais: materiais de qualidade e apropriados para o uso e em quantidade necessária a atender os conceitos da boa técnica e da evolução da tecnologia. Logicamente, os custos estão diretamente relacionados a estes parâmetros, ou seja, recebemos pelo que pagamos.

Existem 4 itens de extrema importância em um sistema de aterramento:

- Baixa indutância- conseguida com eletrodos ou hastes de aterramento de excelente qualidade.
- Baixa Impedância – conseguida com tratamento de solo, o que proporcionará boa resistividade e consequentemente garantia de condutividade elétrica entre haste e solo.
- Conectores que não permitam fuga de tensão.
- E finalmente sistema de aterramento mantido sempre úmido, conseguida desde que deixe- s uma maneira de receber água sempre que necessário.

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

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

A haste de aterramento normalmente, é feita de uma alma de aço revestida de cobre. Seu comprimento pode variar de 1,5 a 4,0m. As de 2,5m são as mais utilizadas, pois diminuem o risco de atingirem dutos subterrâneos em sua instalação.

O valor ideal para um bom aterramento deve ser menor ou igual a 5W. Dependendo da química do solo (quantidade de água, salinidade, alcalinidade, etc.), mais de uma haste

pode se fazer necessária para nos aproximarmos desse valor. Caso isso ocorra, existem duas possibilidades: tratamento químico do solo e o agrupamento de barras em paralelo.

Uma boa regra para agruparem-se barras é a da formação de polígonos.

A fig.5.1, mostra alguns passos. Notem que, quanto maior o número de barras, mais próximo a um círculo ficamos. Outra regra no agrupamento de barras é manter sempre a distância entre elas, o mais próximo possível do comprimento de uma barra.

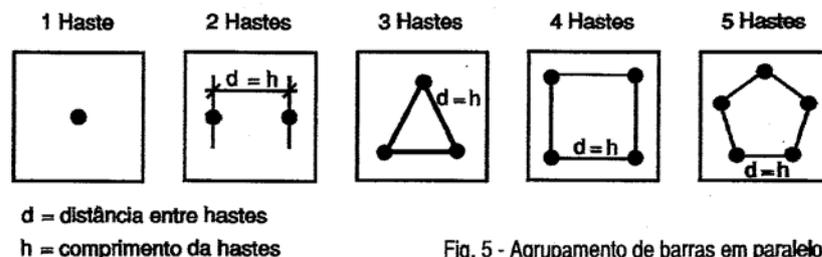


Fig. 5 - Agrupamento de barras em paralelo.

Fig. 5.1 - Agrupamento de barras em paralelo

O tipo de sistema de aterramento a ser adotado, depende da importância do sistema de energia elétrica envolvido, do local e do custo. O sistema mais eficiente é, evidentemente, a malha de terra.

5.1–Tipos de Sistemas de Aterramento

A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) possui uma norma que rege o campo de instalações elétricas em baixa tensão. Essa norma é a NBR 5410, a qual, como todas as demais normas da ABNT, possui subseções. As subseções: 6.3.3.1.1, 6.3.3.1.2, e 6.3.3.1.3 referem-se aos possíveis sistemas de aterramento que podem ser feitos na indústria.

A NBR 5410:2004, item 4.2.2.2 apresenta cinco exemplos de esquemas de aterramento de sistemas elétricos trifásicos comumente utilizados. Deve-se observar que “as massas indicadas não simbolizam um único, mas sim qualquer número de equipamentos elétricos”. Pode-se observar também que “uma mesma instalação pode eventualmente abranger mais de uma edificação. As massas devem necessariamente compartilhar o mesmo eletrodo de aterramento, se pertencentes a uma mesma edificação, mas podem, em princípio, estar ligadas a eletrodos de aterramentos distintos”. São eles:

▪ Esquema TN :

Tem como característica “possuir um ponto de alimentação diretamente aterrado, sendo as massas ligadas a este ponto através de condutores de proteção”. São consideradas três variantes de esquema TN, de acordo com a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção”. Podem ser:

Sistema TN-S:

O condutor neutro e o condutor de proteção são distintos.

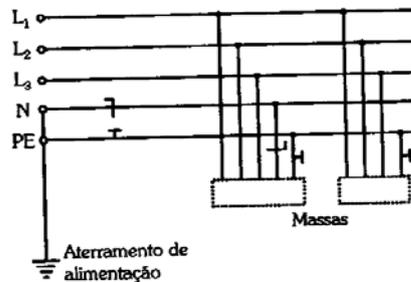


Fig. 5.2 –Esquema TN-S

Pela figura 5.3, temos um exemplo: o secundário de um transformador (cabine primária trifásica) ligado em Y. O neutro é aterrado logo na entrada, e levado até a carga . Paralelamente, outro condutor identificado como PE é utilizado como fio terra , e é conectado à carcaça (massa) do equipamento.

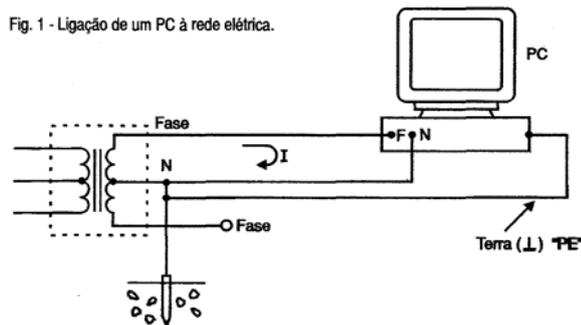


Fig. 1 - Ligação de um PC à rede elétrica.

Figura 5.3 - Ligação de um PC á rede elétrica

• Sistema TN-C:

As funções de neutro e de condutor de proteção são combinados em um único condutor ao longo de toda instalação

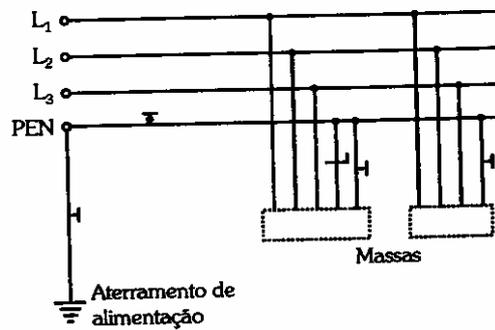


Fig. 5.4 – Esquema TN-C

Esse sistema, embora normalizado, não é aconselhável, pois o fio terra e o neutro são constituídos pelo mesmo condutor. Dessa vez, sua identificação é PEN (e não PE, como o anterior). Podemos notar pela figura 5.5 que, após o neutro ser aterrado na entrada, ele próprio é ligado ao neutro e à massa do equipamento.

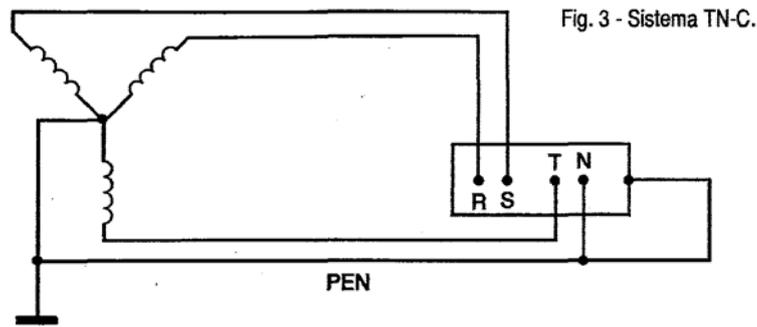


Fig. 5.5– Sistema TN-C

▪ Sistema TN-C-S

As funções de neutro e de condutor de proteção são combinadas em um único condutor em uma parte da instalação.

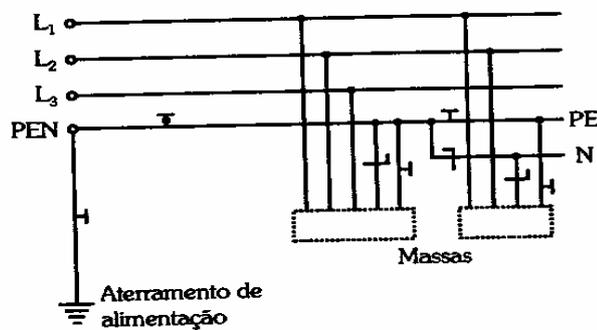


Fig. 5.6 –Esquema TN-C-S

A confiabilidade do esquema TN, particularmente quando a proteção contra contatos indiretos for realizada por dispositivos à sobrecorrente, fica condicionada à integridade do neutro, o que, no caso de instalações alimentadas por rede pública em baixa tensão, depende das características do sistema da concessionária.

Significado das Letras:

▪ Primeira letra :- Situação da alimentação em relação à terra:

T: um ponto diretamente enterrado;

I: isolamento de todas as partes vivas em relação à terra ou aterramento através de uma impedância.

▪ Segunda Letra: - Situação das massas da instalação em relação à terra:

T: massas diretamente aterradas, independentemente do aterramento eventual de um ponto de alimentação;

N: massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado (em corrente alternada, o ponto aterrado é normalmente o ponto neutro).

▪ Outras Letras: Disposição do condutor neutro e do condutor de proteção:

S: funções de neutro e de proteção asseguradas por condutores distintos;

C: funções de neutro e de proteção combinadas em um único (Condutor PEN)

▪ Esquema TT:

Esquema no qual as correntes de falta direta fase-massa são inferiores a uma corrente de curto-circuito, podendo, todavia, ser suficiente para provocar o surgimento de tensões perigosas. O esquema TT possui um ponto de alimentação diretamente aterrado, estando as massas da instalação ligadas a eletrodos de aterramento eletricamente distintos do eletrodo de aterramento da alimentação.

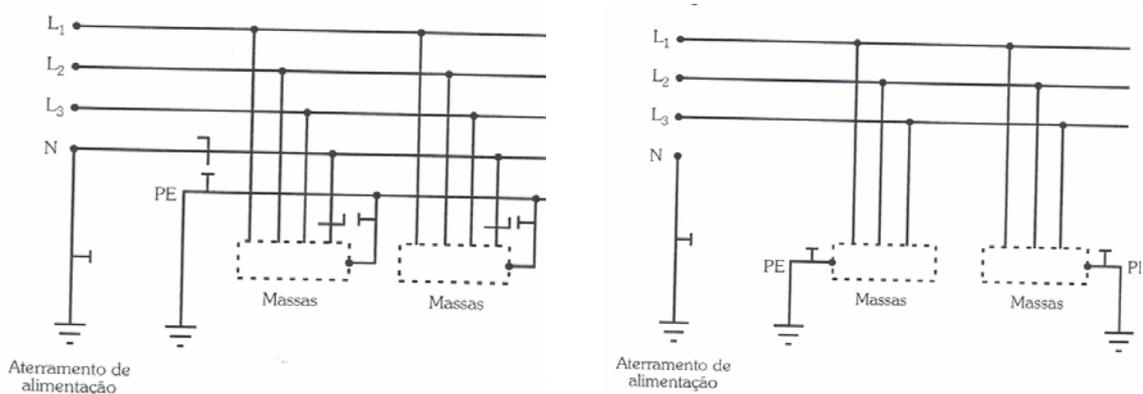


Fig. 5.7 – Esquema TT

Esse sistema é o mais eficiente de todos. Na Fig. 5.8, temos o neutro aterrado logo na entrada e segue (como neutro) até a carga (equipamento). A massa do equipamento é aterrada com uma haste própria, independente da haste de aterramento do neutro.

Geralmente, o próprio fabricante do equipamento especifica qual sistema é melhor para sua máquina, porém, como regra geral, temos:

a) Sempre que possível, optar pelo sistema TT em 1º lugar.

b) Caso, por razões operacionais e estruturais do local, não seja possível o sistema TT, optar pelo sistema TN-S.

c) Somente optar pelo sistema TN C em último caso, isto é, quando realmente for impossível estabelecer qualquer um dos dois sistemas anteriores.

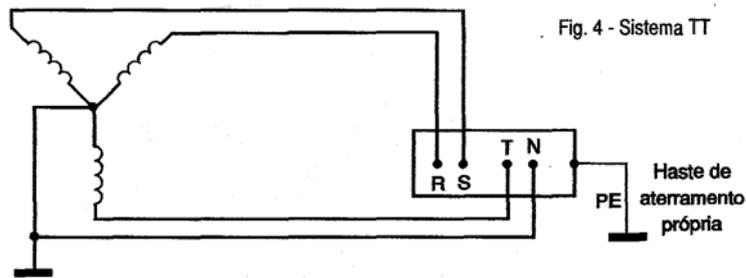


Fig. 5.8 - Sistema TT

▪ **Esquema IT:**

É o esquema em que "todas as partes vivas são isoladas da terra ou um ponto da alimentação é aterrado através da impedância. As massas da instalação são aterradas, verificando-se as seguintes possibilidades:

- Massas aterradas no mesmo eletrodo de aterramento da alimentação, se existente";
- Massas aterradas em eletrodo(s) de aterramento próprio(s), seja porque não há eletrodo de aterramento da alimentação, seja porque o eletrodo de aterramento das massas é independente do eletrodo de aterramento da alimentação".

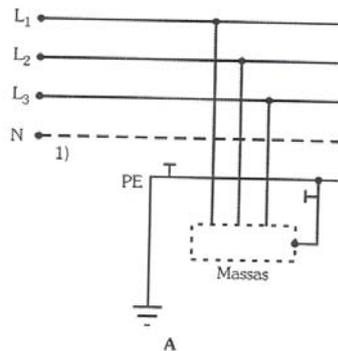


Fig. 5.8 A - Sistema IT

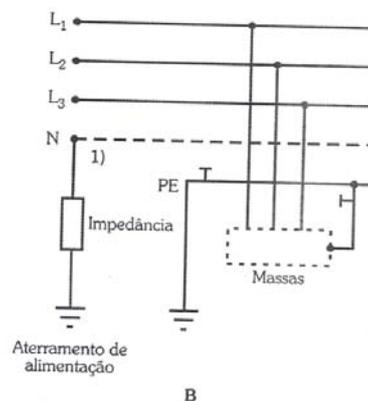


Fig.5.8 B - Sistema IT

Observações :

1) O neutro pode ser ou não distribuído;

Fig.A = sem aterramento;

Fig.B = alimentação aterrada através de impedância;

Fig.B1 = massas aterradas em eletrodos separados e independentes do eletrodo de aterramento da alimentação;

Fig.B2 = massas coletivamente aterradas em eletrodo independente do eletrodo de aterramento da alimentação;

Fig.B3 = massas coletivamente aterradas no mesmo eletrodo da alimentação

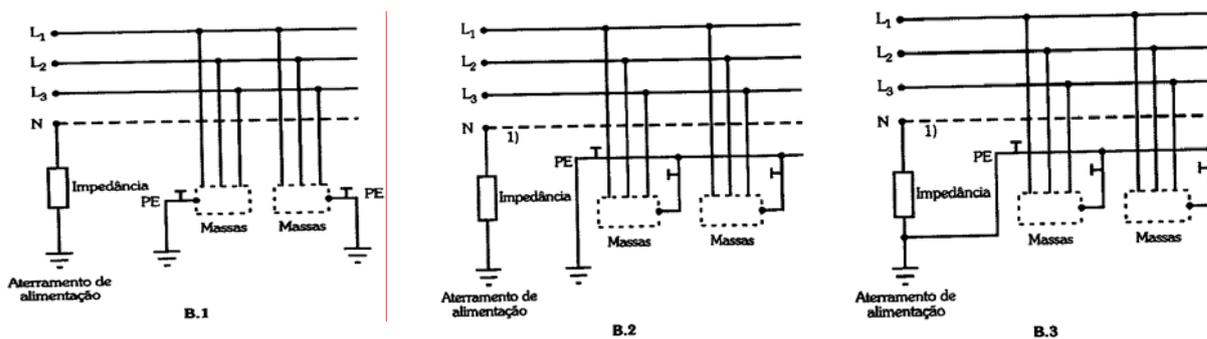


Fig.5.9 – B1,B2,B3 – Sistema IT

5.2–Aterramento e Equipotencialização

Nas instalações elétricas existem, basicamente, dois tipos principais de aterramento:

▪ Aterramento Funcional

Consiste na ligação à terra de um dos condutores do sistema (geralmente o neutro), e está relacionado com o funcionamento correto, seguro e confiável da instalação.

▪ Aterramento de Proteção

Consiste na ligação à terra das massas e dos elementos condutores estranhos à instalação, cujo objetivo é a proteção contra choques elétricos por contato indireto.

Além destes dois tipos, pode-se fazer, eventualmente um **aterramento de trabalho**, que tem por finalidade tornar possíveis, sem perigo de acidente, atividades de manutenção em partes da instalação normalmente sob tensão, colocadas fora de serviço para este fim. É um tipo de aterramento provisório, que deve ser desfeito no final dos trabalhos de manutenção.

A **NBR5410:2004, item 6.4.1.1.1**, determina que o aterramento é uma infra-estrutura e faz parte da integridade da edificação, denominada de "**eletrodo de aterramento**".

Todo sistema (infra-estrutura) de aterramento deve:

- Proporcionar confiabilidade e satisfazer todos os requisitos de segurança;
- Conduzir as correntes de falta à terra sem risco de danos térmicos, termomecânicos e eletromecânicos, ou de choques elétricos causados por estas correntes;
- Quando aplicável, atender também aos requisitos funcionais da instalação.

Um bom aterramento depende além dos fatores mencionados pela norma, de outros fatores, tais como:

- resistividade do solo;
- comprimento de cada haste (eletrodo);
- volume de dispersão disponível para cada haste (eletrodos);
- número de hastes (eletrodos) ligadas(os) em paralelo.

Na prática, são utilizados eletrodos constituídos por hastes(eletrodos).

6. MEDIÇÃO DE ATERRAMENTO

O instrumento clássico para medir a resistência do terra é o **terrômetro**.

Esse instrumento possui 2 hastes de referência, que servem como divisores resistivos conforme a figura 11. Na verdade, o terrômetro "injeta" uma corrente pela terra que é transformada em "quedas" de tensão pelos resistores formados pelas hastes de referência e pela própria haste de terra. Através do valor dessa queda de tensão, o mostrador é calibrado para indicar o valor ôhmico da resistência do terra.

Uma grande dificuldade na utilização desse instrumento é achar um local apropriado para instalar as hastes de referência. Normalmente, o chão das fábricas são concretados, e com certeza, fazer dois "buracos" no chão (muitas vezes até já pintado) não é algo agradável.

Infelizmente, caso haja a necessidade de medir-se o terra, não temos outra opção a não ser essa.

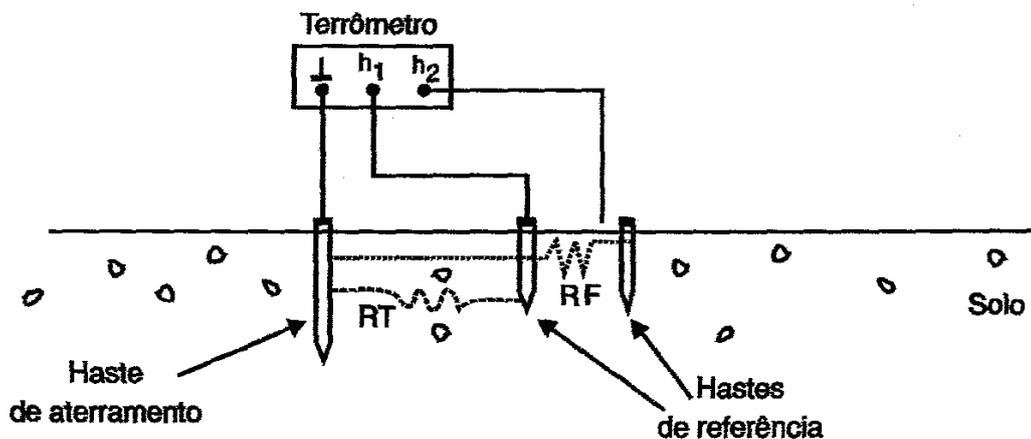


Fig.6.1-Terrômetro

6.1 – Periodicidade de Medições de Aterramento

O solo, normalmente, não apresenta condições ideais, como homogeneidade, umidade constante, etc. Assim, por melhor que tenha sido o projeto, convém realizar uma medição de verificação freqüentemente.

Apesar de não haver uma exigência única, a norma NBR-5419 (2005), especifica intervalos de 3 anos no caso geral, e de 1 ano nas instalações mais críticas, entre cada medição, enquanto outras normas especificam outros períodos, o que não impede que se faça medições em períodos menores, para um melhor controle. É interessante realizar medições com o solo seco, pois, dessa maneira, estaremos medindo, possivelmente, o pior valor de resistência para aquele aterramento, uma vez que seu valor será maior se o solo estiver seco.

6.2-Conseqüências de um Mau Aterramento

Ao contrário do que muitos pensam, os problemas que um aterramento deficiente pode causar não se limitam apenas aos aspectos de segurança. É bem verdade que os principais efeitos de uma máquina mal aterrada são choques elétricos ao operador, e resposta lenta (ou ausente) dos sistemas de proteção (fusíveis, disjuntores). Mas outros problemas operacionais podem ter origem no aterramento deficiente.

Abaixo segue uma pequena lista do que já observamos em campo.

- Quebra de comunicação entre máquina e PC (CPL, CNC) em modo on-line. Principalmente se o protocolo de comunicação for RS 232.
- Excesso de EMI gerado (interferências eletromagnéticas) .
- Aquecimento anormal das etapas de potência (inversores, conversores), e motorização.
- Em caso de computadores pessoais, funcionamento irregular com constantes "travamentos".
- Falhas intermitentes, que não seguem um padrão.
- Queima de CI's ou placas eletrônicas sem razão aparentes, mesmo sendo elas novas e confiáveis.
- Para equipamentos com monitores de vídeo, interferências na imagem e ondulações, podem ocorrer.[4]

6.3-Cuidados para Realização das Medições

- • Os eletrodos devem ser cravados, aproximadamente, 20 cm no solo, até apresentarem resistência mecânica de cravação aceitável que defina uma resistência ôhmica de contato aceitável; [4]
- • Verificar se o eletrodo encontra-se limpo, sem gorduras ou oxidado;[4]
- • Utilizar calçados adequados, não tocar nos eletrodos durante as medições e evitar aproximação de terceiros; [2]
- • O local de medição deverá estar longe de áreas sujeitas á interferências, tais como torres metálicas de transmissão e seus respectivos contrapesos, pontos de aterramento do sistema com neutro aterrado, torres de comunicações, solos com condutores ou canalizações metálicas não blindadas enterradas, etc; [4]
- • Se tivermos oscilação do ponteiro do instrumento de medição, é bem provável que esteja tendo interferências e influências que ele capta do solo, portanto, deve-se estar atento a este fato;[4]
- • Próximo aos sistemas de aterramento e estruturas metálicas aterradas passíveis de energização acidental, redobrar os cuidados tendo em vista os potenciais perigosos que poderão aparecer; [2]
- • Para uma maior segurança, todos os aterramentos a serem medidos deverão estar desconectados dos equipamentos aos quais estão ligados;[4]
- • O aparelho de medição (terrômetro) deve ficar o mais próximo possível do sistema de aterramento principal, além de estar devidamente calibrado; [3]
- • Não realizar as medições sob condições atmosféricas adversas. [2]

6.4 – Valores Recomendados para a Resistência de Aterramento

De acordo com a NBR-5410 (1990), deve-se conseguir uma resistência de terra da ordem de 10Ω , visto que mais importante que a própria resistência, é uma perfeita equipotencialização de todos os aterramentos do local, a fim de se evitar diferenças de potenciais, ou seja, todos os sistemas de aterramento devem estar interligados. Assim, o valor recomendado pela norma baseia-se num sistema de aterramento de pára-raios, pois, se o mesmo estiver presente, estará conectado ao sistema e será adotado como padrão, uma vez que exige menor valor de resistência de aterramento. Cabe lembrar aqui, que não adianta concentrar muitos eletrodos numa pequena área, é melhor obter um aterramento com 20Ω e baixa impedância do que um com 15Ω e impedância muito elevada, isso sem citar o alto custo que um projeto como esse trás.

Em sistemas de distribuição com neutro contínuo e multiaterrado, os aterramentos estão interligados e se auxiliam mutuamente. Nestes casos o valor da resistência de terra não preocupa, sendo em geral de 20 a 50Ω suficientes.

Para sistemas de distribuição sem neutro contínuo, o aterramento dos equipamentos deve ser auto suficientes, e nestes casos recomenda-se um valor de 10Ω para equipamentos especiais (chaves à óleo, transformadores, reguladores de tensão, religadores, banco de capacitores, seccionadores, etc.) e de 5Ω para malhas de subestações.

7 - Métodos de Medição de Resistência de Aterramento

7.1 – Método da Queda de Potencial

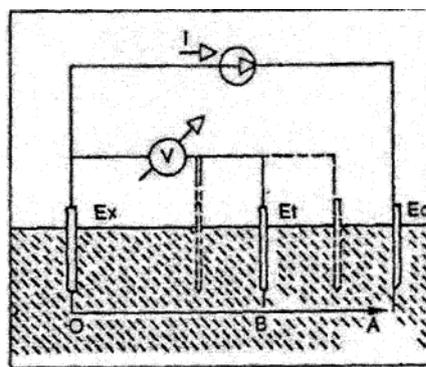


Figura 7.1-Arranjo de medição para o método da queda de potencial

Se cravarmos dois eletrodos na terra, situados a uma distância "a" e fizermos circular uma corrente alternada de amplitude constante entre eles, poderemos obter, colocando um terceiro eletrodo em série com um voltímetro na mesma linha (ver figura acima), um gráfico de tensão em função da distância, conforme pode ser visto na figura a seguir.

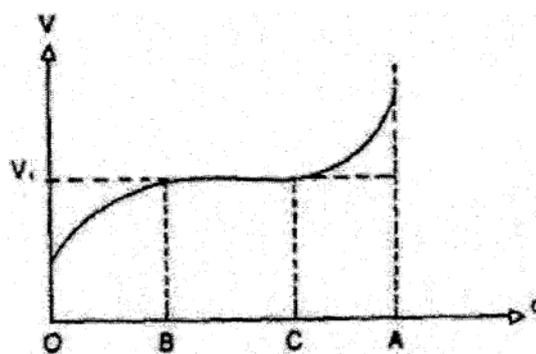


Fig.7.2 - Gráfico da tensão em função da distância entre dois eletrodos

Assim, verificamos que entre os pontos B e C existe uma zona de potencial constante e que as zonas entre OB e CA são de gradiente de potencial elevado, chamadas de zonas de influência. Finalmente podemos verificar que o valor da resistência de aterramento da estaca Ex é dado pelo valor de tensão V_i dividida pelo valor de I ($R = V_i / I$).

Deste simples esquema, podemos deduzir o método da queda de tensão que consiste em cravar uma estaca auxiliar que atua como eletrodo de corrente, e realizar várias leituras de resistência com um terrômetro, cravando uma outra estaca auxiliar E_t em diferentes pontos alinhados entre o ponto a medir e o eletrodo de corrente.

Geralmente, realizam-se 3 medições com a estaca de corrente fora da zona de influência. Para sabermos se a estaca estará ou não na zona de influência, costuma-se coloca-la a uma distância de três a cinco vezes do valor da maior dimensão aterrada.

Feitas as 3 medições fora da área de influência, calcula-se a média entre elas e, caso esta média possuir um erro de $\pm 5\%$ com relação a cada um dos valores, poderemos adotar este valor como verdadeiro.

Num sistema de aterramento onde não se conhece o comprimento do eletrodo enterrado ou a geometria do conjunto do aterramento, devemos colocar a haste de corrente a uma distância de 30m do ponto a ser medido e realizar as 3 medições. Caso não estejam com erro na faixa dos 5%, deve-se aumentar a distância do eletrodo de corrente até obter medidas com erros inferiores a 5% uma das outras.

Esta técnica é útil para a determinação da resistência de pequenos aterramentos e para fins didáticos, já que é de simples compreensão. Já para grandes aterramentos, seriam necessários grandes comprimentos de cabo e distâncias livres perpendiculares ao aterramento o que torna muitas vezes difícil a implementação deste método.

A tensão que se aplica aos eletrodos fixos é baixa e resulta em correntes da ordem de 1 a 10 mA. Porém, em condições normais, deve-se tomar cuidado com as medições, pois, devido à correntes de desequilíbrio de cargas em sistemas aterrados e correntes de consumidores monofásicos com retorno pela terra, circula uma corrente pela terra da ordem de várias centenas de miliampéres. Assim, a tensão resultante no eletrodo móvel será, a soma vetorial da corrente injetada no solo com a já existente. Dessa forma, teremos um erro de medida em função da grandeza da corrente que causa interferência.

7.2-Método da Regra dos 62 %

Para este método supõe-se um solo homogêneo e considera-se que a localização do centro elétrico do aterramento seja conhecido. É de fundamental importância para o método que se conheça a zona de influência do aterramento (ou pelo menos que se tenha uma idéia da sua dimensão) para que se saiba qual a distância para se fixar a estaca de corrente E_c .

Devemos assim, cravar a estaca de corrente (E_c) a uma distância d_c previamente determinada, fora da zona de influência, e após, colocar a estaca de potencial E_t a 62,8% dessa distância, ou seja, $0,628 d_c$ conforme visto na figura a seguir.

Observa-se que a estaca incógnita E_x (aterramento que se deseja medir), a estaca de tensão E_t e a de corrente E_c devem estar alinhadas entre si.

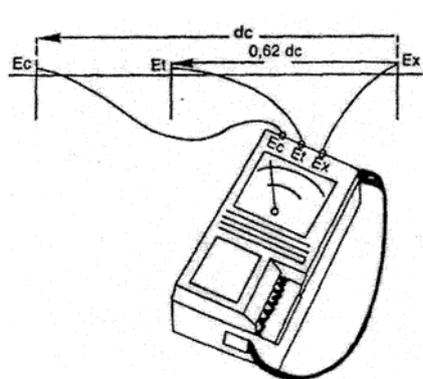


Fig.7.3 - Arranjo para o método de 62 %

Para se confirmar o verdadeiro valor da resistência de aterramento, aconselha-se mover a estaca de corrente E_c alguns metros em direção a estaca E_x e depois essa mesma distância em sentido contrário, movimentando sempre a estaca de tensão E_t uma distância proporcional, para que se mantenha sempre a relação de 62%. Deste modo, devemos verificar que cada uma das 3 determinações de R_x estejam com uma diferença menor que 5% da média obtida das 3 medições. O valor a ser escolhido para R_x , neste caso, será a média das 3 medições obtidas.

Podemos simplificar o método variando-se apenas a distância da estaca E_t uns metros no sentido do aterramento e outro tanto no sentido contrário, permanecendo a estaca E fixa.

Através desse critério, devemos verificar se cada uma das medições está dentro da tolerância admitida com respeito à média das 3 medições. Neste caso, tomaremos como valor verdadeiro para o aterramento aquele cuja medição foi feita exatamente com E_t a 61,8%.

Neste método, aconselha-se também realizar testes com as estacas auxiliares alinhadas em direções diferentes às anteriormente adotadas, conforme esquematizado na figura 15 a fim de se verificar a homogeneidade do solo.

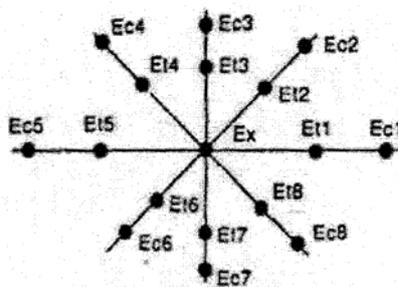


Fig.7.4 - Vários sentidos sugeridos para a localização dos eletrodos

Os principais problemas que encontramos na escolha deste método para determinação de aterramentos de grandes sistemas são os seguintes:

- • As grandes distâncias que devem ser tomadas para cravar a estaca de corrente, (podendo chegar a valores de 1 km) e, por conseqüência, isso traz muitos problemas práticos para se resolver, tais como carregar o peso de um cabo destas dimensões, a indutância que pode afetar as medições, e o mais importante, as prováveis obstruções físicas que impedirão um caminho livre na direção pretendida.
- • O desconhecimento da verdadeira posição do centro elétrico, já que assumimos, para ele, igual posição que a do centro geométrico, mas que para grandes sistemas podem diferir grosseiramente.
- • Assumimos que o solo é homogêneo, e à medida que abarcamos áreas maiores, distanciamos-nos mais desta suposição.

Regra Prática:

Para um terra de 1 haste, a dimensão do aterramento considerada será a mesma da haste. Para duas ou mais hastes alinhadas, a dimensão será a distância entre a primeira e a última haste. Para um aterramento em triângulo, a dimensão será do maior lado deste triângulo desde que este não seja menor que o comprimento das hastes enterradas. Para um aterramento quadrilátero ou qualquer outro formato, adota-se a maior distância entre as hastes desta malha.

7.3-Método dos Três Pontos

Teremos neste método, duas hastes afastadas do terra principal de uma distância equivalente à distância entre o terra principal e o eletrodo de corrente, mostrada na tabela do método dos 62%. Não há neste método o eletrodo móvel.

O esquema a seguir, ilustra o método, sendo A o terra principal e B e C, eletrodos auxiliares.

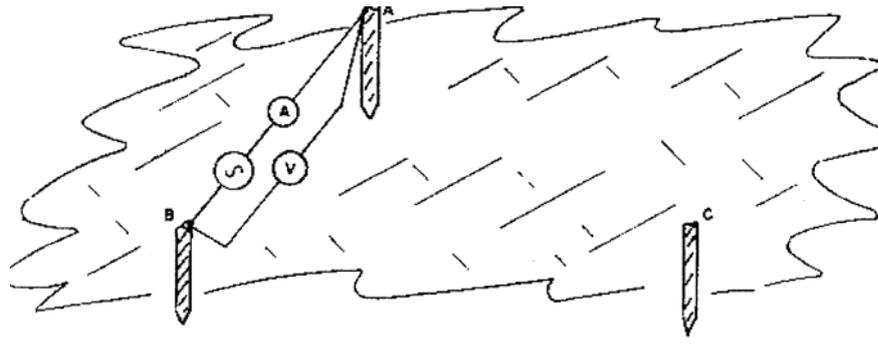


Fig.7.5 – Esquema para medição do sistema de aterramento pelo método dos três pontos

Aplicando-se a fonte de corrente alternada entre A e B, faremos circular uma corrente I_1 , e assim, existirá então, uma diferença de potencial V_1 entre os pontos, relacionada pela expressão abaixo, na qual R_A diz respeito a resistência do aterramento a ser medido, e R_B à resistência do eletrodo de corrente.

$$\frac{V_1}{I_1} = R_1 = R_A + R_B \quad [4]$$

Do mesmo modo, as expressões (5) e (6) relacionam a fonte de corrente entre os pontos A e C, e B e C, respectivamente.

$$\frac{V_2}{I_2} = R_2 = R_A + R_C \quad [5]$$

$$\frac{V_3}{I_3} = R_3 = R_B + R_C \quad [6]$$

Assim, das equações acima, obteremos a seguinte relação para a resistência do aterramento:

$$R_A = \frac{R_1 + R_2 - R_3}{2} \quad [7]$$

Para melhor aproveitamento deste método, devemos promover a redução da influência das interferências do solo na medição, e devemos aplicar uma tensão razoável e diminuir a resistência dos eletrodos auxiliares.

7.4 – Método Volt- Amperímetro

É o método clássico, efetuado por um amperímetro e um voltímetro. Se com o distanciamento empregado não se atingir o patamar, o valor da resistência de terra medida não representa o valor real.

Deve-se então, aumentar a distância da haste auxiliar B, até se conseguir um patamar bem definido.

A fonte geradora de corrente neste processo pode ser:

- Gerador síncrono portátil a gasolina;
- Transformador de distribuição.

Deve-se procurar injetar no solo uma corrente adequada, da ordem de Amperes, de modo a tornar desprezíveis as interferências de outras correntes na terra.

Geralmente, a resistência do aterramento da haste auxiliar B é alta, e limita a corrente elétrica da medição. Deve-se então, colocar neste local uma solução de água e sal.

7.5-Método Usando o Aparelho MEGGER

Existem vários instrumentos usados na medição da resistência como:

- Tipo Universal;
- Tipo Zero Central.

Não se pretende desenvolver o estudo do funcionamento de cada instrumento, mas sim, utiliza-los na medição da resistência de terra.

Tornou-se hábito, na prática, designar todos os aparelhos de medição de resistência de terra, com o nome do conhecido aparelho MEGGER. Este nome é na verdade marca registrada de um fabricante de aparelhos de medição.

A medição da resistência de terra, utilizando-se o aparelho MEGGER é feita de acordo com o esquema da figura 17.

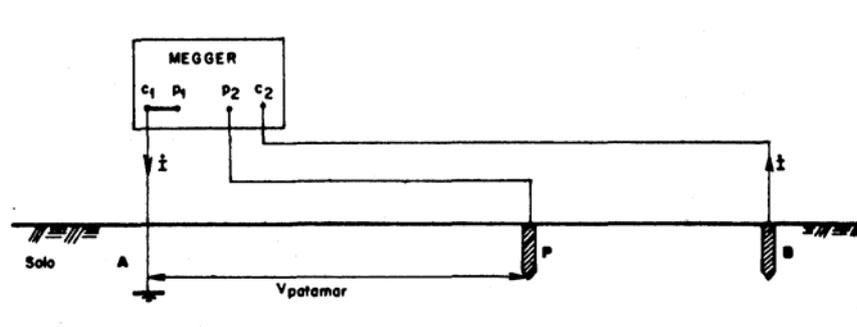


Fig.7.6 - Medição com o MEGGER

A resistência de contato é a resistência da conexão do cabo de referência com os equipamentos aterrados, medida com o MEGGER. A impedância do laço é a resistência do circuito formado pelos cabos de referência dos equipamentos, medida com o Terrômetro. Os terminais C1 e P1, devem ser conectados.

O aparelho injeta no solo pelo terminal de corrente uma corrente elétrica I. Esta corrente retorna ao aparelho pelo terminal de corrente através da haste auxiliar B. Esta circulação de corrente gera potenciais na superfície do solo. O potencial correspondente ao ponto P é processado internamente pelo aparelho, que indicará então o valor da resistência $R(x)$.

Durante a medição deve-se observar o seguinte procedimento:

- Alinhamento do sistema de aterramento principal com as hastes de potencial e auxiliar;
- A distância entre o sistema de aterramento principal e a haste auxiliar deve ser suficientemente grande, para que a haste de potencial atinja a região plana do patamar;
- O aparelho deve ficar o mais próximo possível do sistema de aterramento principal;
- As hastes de potencial e auxiliar devem estar bem limpas e principalmente isentas de óxidos e gorduras, para possibilitar bom contato com o solo;
- Calibrar o aparelho, isto é, ajustar o potenciômetro e o multiplicador do MEGGER, até que o seja indicado o valor zero;
- As hastes usadas devem ser do tipo Copperweld, com 1,2m de comprimento e diâmetro de 16mm;
- Cravar as hastes no mínimo 70cm no solo;
- O cabo de ligação deve ser de cobre com bitola mínima de 2,5mm²;
- As medições devem ser feitas em dias em que o solo esteja seco, para se obter o maior valor de resistência de terra deste aterramento;

Se não for o caso acima, devem-se anotar as condições do solo.

8-Referências Bibliográficas

- [1] FILHO, S. V. Aterramento Elétrico, 1ª Edição, Belo Horizonte, Editora Art Liber, 2002.
- [2] GARCIA, C. H. F. P. CESP — Aterramento dos Sistemas de Distribuição (Medições, Projetos e Cálculos), Centro de Treinamento de Ilha Solteira, 1990.
- [31] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. Aterramento Elétrico, 2 edição, Porto Alegre, Editora SAGRA-DC LUZZATTO, 1992.
- [4] LEON, J. A. M. Sistemas de Aterramento, 3 edição, São Paulo, Editora Erico do Brasil, 1980.
- [5] LEITE, C. M.; FILHO, M. L. P. Técnicas de Aterramentos Elétricos, 2aEdição, São Paulo, Editora Oficina de Mídia, 1996.
- [6] CAVALIN, Geraldo Instalações Elétricas Prediais , 16ª edição, São Paulo, Ed. Érica Ltda.