

**PROJETO DE ATERRAMENTO E S.P.D.A.
DE SUBESTAÇÕES ABRIGADAS**

ALEX RODRIGO MAGALHÃES PESSOA

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em ____ de _____ de 2012

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Supervisor**

**Silvério Visacro Filho - Dr.
Coordenador do CESEP**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	3
2. AS SUBESTAÇÕES ABRIGADAS	4
2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	4
2.2 CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA	7
3. CONSIDERAÇÕES SOBRE O SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS (SPDA)	10
3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS TÉCNICAS E MATERIAIS APLICÁVEIS	10
3.2 A UTILIZAÇÃO DE COMPONENTES NATURAIS DA EDIFICAÇÃO.....	13
3.2.1 <i>Telhas Metálicas</i>	13
3.2.2 <i>Considerações Relativas às Emendas das Ferragens</i>	15
3.2.3 <i>A Utilização das Fundações da Subestação como Eletrodos de Aterramento</i>	18
3.3 OBSERVAÇÕES RELATIVAS AO SUBSISTEMA DE DESCIDA.....	18
4. CONCEPÇÃO DA MALHA DE ATERRAMENTO	21
4.1 INTRODUÇÃO.....	21
4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO	22
4.3 POTENCIAIS MÁXIMOS PERMISSÍVEIS.....	24
4.4 A RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO E A EFICIÊNCIA DA MALHA	25
4.5 CONFIGURAÇÃO DA MALHA DE ATERRAMENTO	25
4.5.1 <i>Configuração Básica</i>	25
4.5.2 <i>Resistividade Aparente do Solo</i>	26
4.5.3 <i>Cálculo da Resistência de Aterramento da Malha</i>	28
4.5.4 <i>Cálculo dos Potenciais no Solo</i>	29
4.6 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO E CORRENTE QUE CIRCULA NA MALHA.....	31
4.7 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES	32
4.8 ATERRAMENTO DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS (EES).....	35
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.1 CONCLUSÃO	37
5.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE	38

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RESUMO

Nesta monografia é abordado o projeto do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento de subestações abrigadas, que são instalações amplamente encontradas nas plantas industriais brasileiras. Inicialmente são apresentadas as suas características construtivas e configurações elétricas, possibilitando a identificação dos pontos de maior destaque no projeto dos sistemas de interesse. Na sequência são tratados assuntos relativos ao S.P.D.A. das subestações abrigadas, tais como a utilização de componentes naturais da edificação na composição deste sistema e a influência da resistividade do solo na quantidade de descidas a serem utilizadas. O projeto do sistema de aterramento é apresentado em etapas, que contemplam observações sobre as medições de resistividade do solo, determinação da resistividade aparente, cálculo dos potenciais de segurança pessoal permissíveis e previstos no solo, cálculo da resistência de aterramento e dimensionamento dos condutores, dentre outros. São seguidas ao máximo e analisadas algumas premissas das normas brasileiras NBR 5419 e NBR 15751.

ABSTRACT

This text approaches the design of lightning protection and grounding system of indoor substations, widely found at Brazilian industrial plants. At the beginning their constructive features and electrical configurations are presented, enabling the identification of the most interesting points in the design of the systems under study. In sequence issues related to the L.P.S. of indoor substations are dealt, for example the utilization of natural components of the building in the composition of this system and the influence of the soil resistivity in the number of downward conductors to be considered. The design of the grounding system is presented in stages, that encompass aspects about the measurements of the soil resistivity, determination of the apparent resistivity, calculation of the allowable and foreseen personnel safety potentials, calculation of the grounding resistance and sizing of conductors and more. Some premises of the Brazilian standards NBR 5419 and NBR 15751 are extremely adopted and analyzed.

1 Introdução

Em geral os processos industriais são divididos em etapas, cujos grupos de equipamentos (por exemplo, compressores, ventiladores, peneiras, moinhos, dentre outros) compõem uma unidade do processo.

A configuração mais comum dos sistemas elétricos industriais brasileiros é aquela onde os grupos de motores e equipamentos elétricos de uma unidade são alimentados por uma subestação, denominada “unitária”.

Além das subestações unitárias há outra, principal, que recebe a alimentação da concessionária de energia e dos geradores internos (caso existam) e a distribui para as subestações primeiras (Figura 1.1).

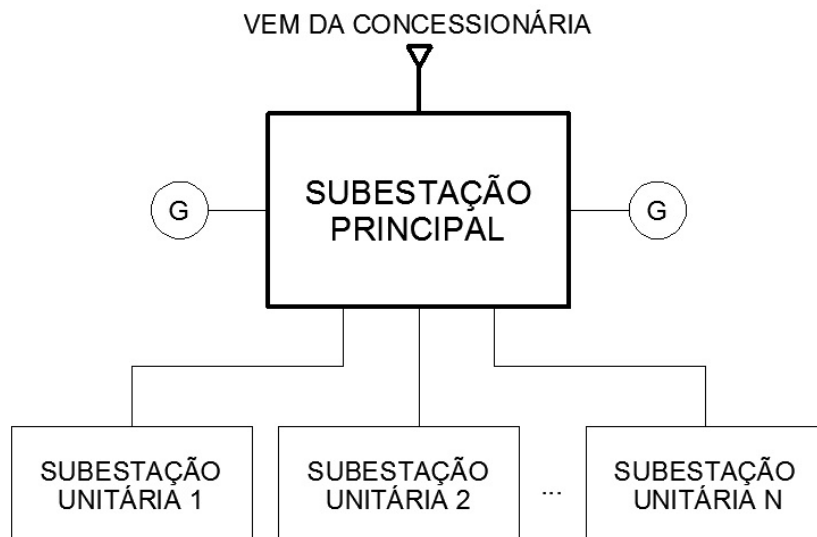


Figura 1.1 - Configuração elétrica comum nas indústrias brasileiras.

Em uma planta industrial de grande porte, portanto, é possível haver dezenas de subestações “de unidade”, que, em geral, podem ser caracterizadas como abrigadas e possuem tensão nominal máxima até 15 kV, podendo, ainda, ser exclusivamente de baixa tensão.

Nesta perspectiva, o projeto dos sistemas de aterramento e proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) das subestações abrigadas constitui um fator essencial para o desempenho satisfatório da planta industrial. Estes sistemas têm a responsabilidade de proteger pessoas, instalações e equipamentos de contingências advindas de fenômenos naturais (raios) ou avarias da instalação (curtos-circuitos), bem como contribuir para a minimização das paradas na produção.

Entretanto, pela variedade, complexidade e aleatoriedade das variáveis envolvidas durante os processos de concepção e de implementação destes sistemas comumente ocorrem equívocos. Estes, em alguns casos, partem do cliente final (a indústria proprietária da subestação), que faz exigências que, em realidade, podem não contribuir para a eficácia destes sistemas. Ainda, por vezes, são os próprios projetistas que adotam sistematicamente práticas sem as devidas comprovações de sua aplicabilidade.

É neste contexto que se insere a presente monografia, cujo maior objetivo é dar uma contribuição para a elucidação do desenvolvimento do projeto de aterramento e SPDA das subestações unitárias abrigadas.

As normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) constituem a principal referência de projeto de instalações elétricas no Brasil. Destaca-se que não há no seu conjunto publicações específicas sobre SPDA e malha de aterramento deste tipo de instalação.

Existem textos aplicáveis às subestações abrigadas nas normas brasileiras, e ao longo desta monografia são seguidas ao máximo suas recomendações, sendo estas complementadas sempre que necessário. Segue abaixo relação das principais normas:

- NBR 5419:2005 – Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas [1];
- NBR 15751:2009 – Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos [2];
- NBR 7117:1981 – Medição de resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner) – Procedimento [3].

No que se refere ao projeto de malha de aterramento, convém ressaltar que estão incluídas no escopo da NBR 15751 todas as subestações de energia elétrica acima de 1 kV. Portanto, encontram-se neste grupo a quase totalidade das subestações abrigadas.

Porém, fica claro no desenvolvimento da respectiva norma que a mesma se refere a subestações ao tempo, com pátio e casa de controle, características das instalações dos sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, que não é o foco do presente trabalho.

1.1 Organização do Texto

Em um primeiro momento, no capítulo 2, são apresentadas as características típicas encontradas nas subestações abrigadas industriais:

- Construtivas: composição de ambientes, arquitetura, tecnologia empregada.
- Elétricas: níveis de tensão, principais equipamentos, filosofia de aterramento.

Entende-se que os pontos acima são pertinentes, uma vez que representam dados de entrada para o projeto dos sistemas em questão.

O assunto do capítulo 3 é o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas, no qual são abordados:

- Os materiais aplicáveis e suas especificidades;
- A utilização de componentes naturais da edificação na captação e descida;
- A definição da filosofia de proteção;
- Considerações relativas ao subsistema de descida;
- Detalhamento do projeto.

O capítulo 4 trata do projeto do sistema de aterramento, contemplando:

- Informações necessárias para dimensionamento da malha de aterramento;
- Pontos de atenção referentes ao processo de medição da resistividade do solo;
- Tensões de toque e passo permissíveis;
- Obtenção da resistividade aparente do solo;
- Cálculo da resistência de aterramento da malha;
- Potenciais de passo e toque máximos da malha;
- Determinação da configuração dos eletrodos;
- Dimensionamento dos condutores da malha.

Por fim, no capítulo 5 segue o desfecho desta monografia, onde são apresentadas as considerações finais.

2 As Subestações Abrigadas

2.1. Características Construtivas

As subestações unitárias, em geral, possuem as características construtivas a seguir descritas. Ressalta-se que abaixo são apresentados os detalhes mais comuns das instalações, não havendo, portanto, uma regra geral a ser seguida.

Os painéis elétricos são abrigados em uma sala principal, que pode ser construída ao nível do terreno ou acima, em um segundo nível. A título de ilustração, ver Figura 2.1.



Figura 2.1 - Sala de painéis¹.

¹ As fotos de subestações e instalações deste trabalho foram retiradas do acervo técnico da empresa Orteng-MPN.

Quando a sala de painéis é construída ao nível do terreno, as interligações de força e controle entre os painéis são feitas por meio de canaletas no piso. Já no outro caso, quando a sala de painéis é superior, as interligações são executadas na sala ao nível do terreno (sala de cabos). Há situações onde esta sala de cabos encontra-se parcialmente ou totalmente enterrada no subsolo, quando é então denominada porão de cabos (ver figura 2.2).



Figura 2.2 - Sala de cabos.

Os transformadores, presentes em boa parte das subestações abrigadas, se localizam externamente à sala de painéis, se forem resfriados por óleo isolante ou em sala própria, se forem secos.

É comum a existência de outros ambientes, como sala de baterias, sala exclusiva para painéis e racks de automação ou telecomunicação, sala de supervisão e operação, sala de máquinas de ar-condicionado, dentre outros.

Também são possíveis, apesar de menos comuns, outros arranjos, como por exemplo, sala de painéis, sala de cabos e transformadores, cada qual em um nível distinto.

A configuração física e as tecnologias de construção da subestação variam em função de alguns fatores, como no caso de unidades produtivas com equipamentos concentrados em uma

grande edificação (galpão), onde a subestação pode ser construída dentro deste ou anexa, conforme se verifica na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Exemplo de subestação abrigada anexa à outra edificação.

Na cobertura das subestações abrigadas é comum tanto o uso de telhas metálicas quanto de telhas de concreto protendido. Em edificações menores, principalmente nas mais antigas são encontrados casos onde há somente o telhado, sem que haja laje embaixo.

Vem se tornando cada vez mais comum a utilização de peças de concreto pré-moldadas na construção de subestações. Esta técnica é geralmente empregada para fabricação das colunas, vigas e lajes (Figura 2.4).



Figura 2.4 - Subestação abrigada com peças de concreto pré-moldado, em fase de construção.

Em função das especificidades de cada empreendimento, talvez seja mais vantajoso em termos de custos e prazos de execução a utilização ou não deste modo construtivo.

Porém, é grande a concentração de ferragens nas estruturas de fundação e sustentação do prédio, independentemente da adoção ou não de peças de concreto pré-moldado. Este fato possibilita a utilização dos componentes naturais da edificação na composição dos sistemas de aterramento e SPDA. Tal ponto é abordado de forma mais detalhada no capítulo 3 desta monografia.

2.2. Configuração Elétrica

Devido ao elevado volume de motores de baixa tensão presentes nas plantas industriais, a grande maioria das subestações de unidade apresenta um ou mais painéis do tipo CCM (centro de controle de motores), de tensão nominal até 690 V, que alimentam, além dos motores, os demais equipamentos, como tomadas para máquinas de solda, transformadores e painéis auxiliares.

Em função da ordem de grandeza das distâncias entre a subestação principal e as subestações unitárias, em geral é utilizado o nível de tensão 13,8 kV, por meio de cabos subterrâneos isolados instalados em eletrodutos ou por redes aéreas de distribuição.

Isto faz com que sejam necessários um transformador abaixador (comumente conectado em delta-estrela) e um painel de entrada em média tensão (13,8 kV) na subestação abrigada.

Esta é a configuração elétrica mais simples deste tipo de subestação e está representada na Figura 2.5.

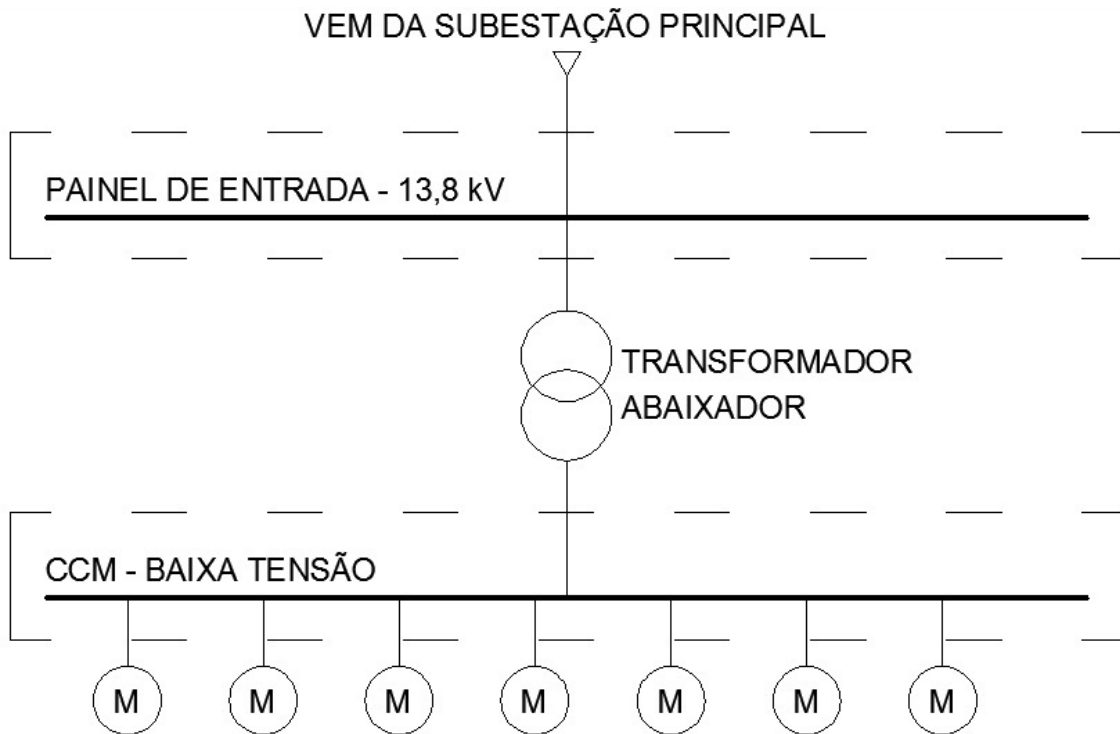


Figura 2.5 - Diagrama unifilar - subestação abrigada elementar.

São encontrados ainda os seguintes tipos de painéis nestas salas elétricas:

- CCM's de média tensão (por exemplo 13,8 kV ou 4,16 kV) para alimentação de motores de grande porte;
- Painéis de distribuição em média ou baixa tensão, também conhecidos como Quadro Geral (QG) ou Centro de Distribuição de Cargas (CDC), para alimentação de CCM's e motores de maiores potências;
- Painéis de inversores de frequência de baixa e média tensão;
- Painéis com controladores lógicos programáveis, remotas, transdutores, multimedidores e outros equipamentos de sistemas de controle, supervisão e monitoração.

Na figura 2.6 é apresentada uma configuração mais elaborada de subestação unitária.

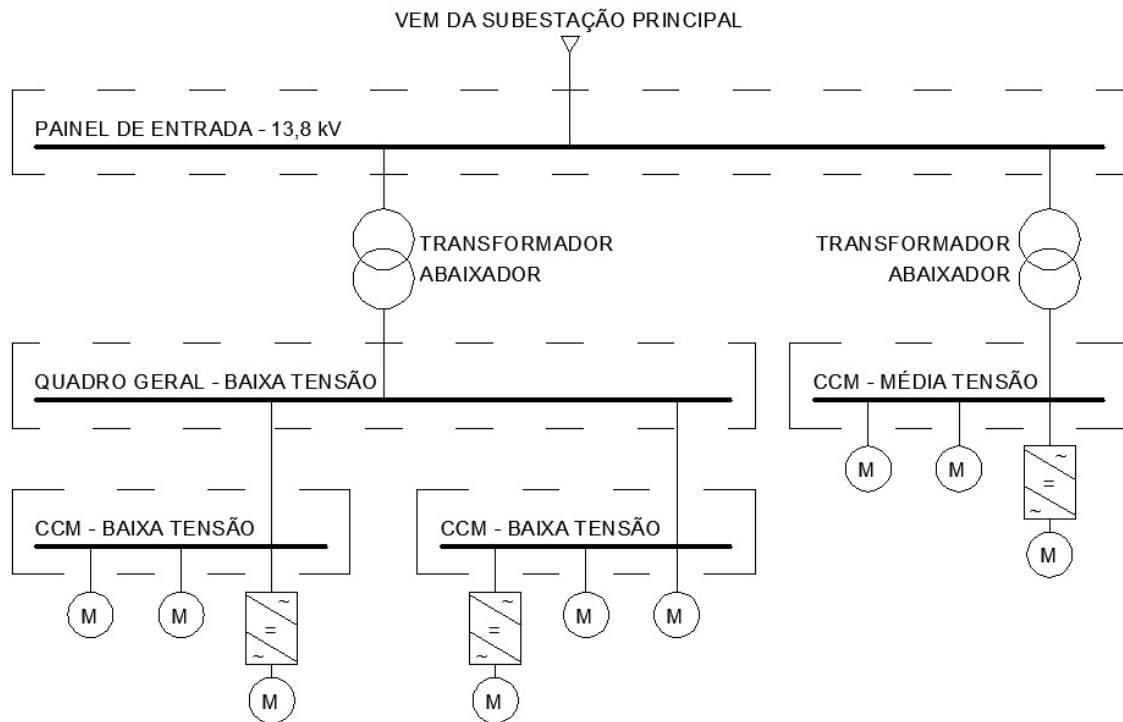


Figura 2.6 - Diagrama unifilar - subestação abrigada com diversos tipos de painéis.

A filosofia de aterramento mais comumente aplicada nas subestações abrigadas é o neutro do secundário do transformador abaixador aterrado por resistência.

Para secundário em média tensão adota-se resistor de baixo valor ôhmico (R.B.V.O.) e para secundário em baixa tensão adota-se resistor de alto valor ôhmico (R.A.V.O.).

Os R.B.V.O. em geral possuem corrente nominal de falta de centenas de Amperes e a suportam por 10 s.

Já os R.A.V.O. possuem corrente nominal de 1 a 5 A e podem conduzi-la continuamente.

Ressalta-se que não é raro encontrar nas indústrias o secundário do transformador abaixador solidamente aterrado.

O grande impacto da escolha de uma destas filosofias de aterramento refere-se à amplitude da corrente que circula pelo mesmo e a severidade dos efeitos decorrentes.

3 Considerações sobre o Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA)

O autor entende que a metodologia da norma NBR 5419:2005 contempla o projeto do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas de subestações abrigadas plenamente, não sendo necessário, portanto, apresentar cada uma das etapas.

Entretanto, há pontos que merecem destaque quando se trata deste tipo de instalação e estes constituem o escopo do presente capítulo.

3.1. Considerações sobre as Técnicas e Materiais Aplicáveis

São pertinentes esclarecimentos referentes aos materiais aplicáveis à execução dos diferentes subsistemas do SPDA, uma vez que estes se relacionam diretamente com os custos da instalação.

Dentre estes materiais, destacam-se cobre, alumínio, aço comum, aço galvanizado, aço inoxidável, aço cobreado, chumbo, latão e bronze.

Em geral os mesmos são aplicados nos seguintes elementos [4]:

- Cobre: presilhas, grampos, fixadores, condutores e barras de equipotencialização;
- Alumínio: terminais aéreos, bases para mastros, presilhas, grampos, conectores, condutores, porcas, parafusos, rebites e caixas de inspeção;
- Aço comum: caixas de equipotencialização e SPDA estrutural (utilizando componentes naturais da edificação);
- Aço galvanizado: condutores, terminais aéreos, mastros, postes, conectores, abraçadeiras e SPDA estrutural;
- Aço inoxidável: parafusos, porcas, arruelas e captos tipo Franklin;
- Aço cobreado: hastes de aterramento e condutores;
- Latão: captos tipo Franklin, terminais aéreos, conectores, fixadores, presilhas, grampos, tensionadores, terminais de conexão, fitas e telas para equipotencialização;
- Bronze: grampos e conectores.

A escolha adequada das composições deve levar em consideração, dentre outros:

- Características do ambiente: determinadas substâncias presentes no ar ou no solo podem acelerar processos de corrosão de materiais do SPDA [5];
- Compatibilidade entre metais: dependendo dos pares bimetálicos formados na instalação pode ocorrer o processo de corrosão galvânica [1,7];
- Custo / disponibilidade: em boa parte dos casos há mais de uma opção, nestes casos o custo e a disponibilidade / praticidade tornam-se preponderantes na escolha;
- Padronizações: por vezes o cliente industrial adota configurações típicas (detalhes de montagem) em suas instalações, por motivos variados.

Para verificação dos metais aplicáveis a uma atmosfera industrial específica é aconselhável consultar o cliente ou sujeitar a escolha à sua aprovação.

No que se refere à corrosão galvânica, na última coluna da tabela 5 da NBR 5419 [1] são informadas as incompatibilidades entre metais. Sugere-se também a consulta de [7].

Convém ressaltar que segundo a tabela 5 da norma europeia IEC 62305 [6], pode haver corrosão galvânica do chumbo com o cobre ou o aço inoxidável, informação esta não apresentada pela norma brasileira.

Porém, apesar deste material ser listado nas normas técnicas, atualmente não é costumeiro se empregar o chumbo no SPDA de subestações abrigadas.

Segundo o PROCOBRE [7], praticamente não há corrosão entre elementos de cobre e barras de ferro de fundações de edificações embutidas em concreto. Também é possível evitar o par galvânico entre cobre e aço ou ferro enterrados por meio de conexões por solda exotérmica entre estes metais.

Além da composição também há outras variações relativas aos materiais, como, por exemplo, na opção de se utilizar cabo nu ou barra chata, para condutores captores e do sistema de descida (Figura 3.1).

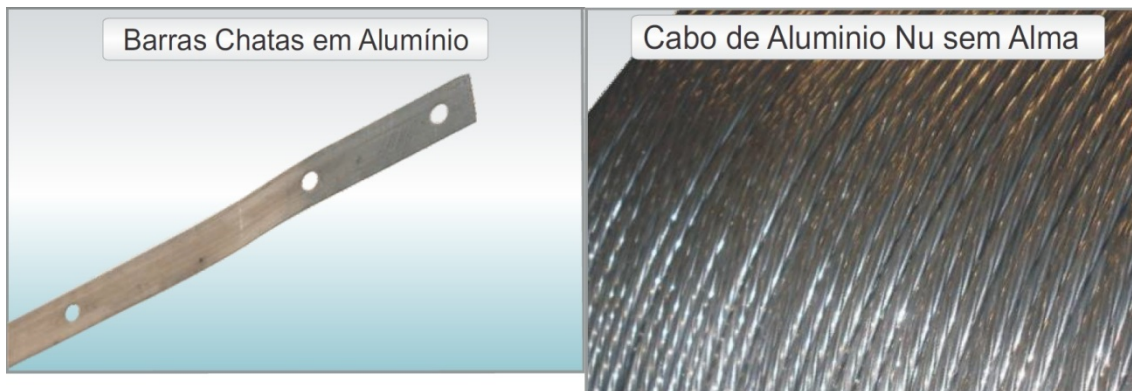


Figura 3.1 - Barra chata e cabo nu de alumínio (retirado de [4]).

Apesar de seu uso não ser tão difundido em subestações abrigadas, a barra chata possui a vantagem de ser de fácil fixação (necessita apenas de parafuso e bucha) além de ser bem mais agradável esteticamente. No caso do alumínio e do aço galvanizado o custo por metro da barra e do cabo são equivalentes. O mesmo não se aplica ao cobre¹.

Desta forma, é conveniente estudar adequadamente a melhor solução técnica e financeira, em cada caso.

¹ Os dados comparativos de custos constantes no presente trabalho são realizados com base na planilha de custos dos itens do fabricante Termotécnica, disponibilizada para o autor pelo representante Comar em 07/03/2012.

3.2. A Utilização de Componentes Naturais da Edificação

Devem ser destacados dois fatores importantes em relação à utilização dos componentes naturais da edificação na composição do SPDA:

- A norma brasileira NBR 5419 [1] recomenda esta prática;
- As subestações abrigadas possuem características construtivas, conforme exposto anteriormente, que possibilitam a adoção desta concepção.

Entretanto, convém ressaltar que nem sempre é adotada a utilização dos componentes naturais neste tipo de projeto.

Sendo assim, nesta monografia é abordado este tema, com o objetivo de incentivar sua aplicação, sempre que possível.

3.2.1. Telhas Metálicas

Para a utilização de telhas metálicas no subsistema de captação deve-se atentar para alguns detalhes.

Inicialmente, devem ser atendidas as prescrições do item 5.1.1.4.2 da NBR 5419 [1].

Adicionalmente, recomenda-se a instalação de terminais aéreos nas telhas, pois devido ao “poder das pontas” [8], estes materiais constituem um ponto preferencial, evitando que a descarga atmosférica incida diretamente na telha e provoque danos nesta. Assim o telhado atuaria na dispersão da corrente do terminal para os condutores de descida.

Neste caso, devem ser utilizados terminais cuja área de contato com a telha seja maior, por exemplo, do tipo com base (Figura 3.2).



Figura 3.2 - Terminais aéreos com base (retirado de [4]).

Conforme foi comprovado por SUETA em [9], correntes intensas circulando do terminal para a telha podem provocar estragos consideráveis na mesma, caso a área de contato entre os materiais seja reduzida.

Uma forma sugerida no respectivo texto [9] de tentar garantir que as incidências das descargas atmosféricas ocorram nos terminais aéreos é posicioná-los com um espaçamento tal que a esfera fictícia rolante do método eletrogeométrico não toque o telhado.

Seguindo este raciocínio, na Tabela 3.1 são apresentadas as distâncias máximas entre os terminais aéreos ou hastes captoras instaladas sobre as telhas. Aqui são apresentados apenas os valores referentes ao nível de proteção I da NBR 5419:2005[1] (raio de atração 20 m), que julga-se ser a condição de projeto de subestações abrigadas.

Os valores desta tabela correspondem à distância entre captadores dispostos nos lados de um retângulo, que é formato mais comum das subestações abrigadas. Ou seja, a distância máxima entre captadores encontra-se na diagonal deste quadrilátero.

Altura do captor (m)	Distância entre captores consecutivos em um mesmo lado do retângulo (m)
0,25	4,5
0,35	5,3
0,5	6,3
0,6	6,9
1	8,8
2	12,3
3	14,9
4	17,0
5	18,7
6	20,2
7	21,5
8	22,6
9	23,6
10	24,5

Tabela 3.1 – Espaçamento máximo nas laterais de retângulos entre terminais aéreos ou hastes captoras, para nível de proteção I, obedecendo ao método eletrogeométrico (retirado de [9]).

3.2.2. Considerações Relativas às Emendas das Ferragens

Um dos pontos mais controversos no que se refere à utilização das ferragens estruturais das edificações é a possibilidade da ocorrência de danos ao concreto que envolve as ferragens devido à alta intensidade das correntes de descargas atmosféricas.

Nas experimentações de SUETA em [9] visando esclarecer o assunto foram ensaiados corpos de prova com as seguintes características: colunas de seção quadrada com lado igual a 15 cm e 42 cm de altura, feitas de concreto de tipo utilizado em colunas de concreto armado de edificações.

Em cada coluna foram inseridas duas peças de vergalhão de aço com superfície nervurada e diâmetro nominal 1 cm e região de trespasse de 20 cm (20 vezes o diâmetro, conforme item 5.1.2.5.4 de [1]), representando uma emenda de ferragem.

A região de trespasse é o trecho em que as extremidades das peças estão paralelas.

Foram construídas peças contemplando diferentes tipos de emenda:

- a) Nenhuma – vergalhões distanciados aproximadamente 5 mm um do outro;
- b) Solda exotérmica executada em um ponto;
- c) Solda elétrica executada em três pontos;
- d) Amarração com arame de aço torcido em três pontos;
- e) Luva especial para conexão de ferragens (sem trespasse, obviamente).

Os corpos de prova foram submetidos à aplicação de impulsos de corrente de até 30 kA de pico e tempo de subida inferior a 10 μ s e pulsos de corrente contínua de mais de 600 A por tempos superiores a 0,4 s. A resistência elétrica das emendas foi medida antes e depois da concretagem e após os ensaios.

Também foram retiradas radiografias dos corpos concretados antes e depois dos testes, possibilitando a visualização das emendas dentro do concreto.

As conclusões obtidas por SUETA encontram-se a seguir.

Os corpos de prova b), c) e e) não apresentaram variação significativa de resistência (no máximo 7%).

O corpo de prova d) apresentou aumento da resistência após a concretagem, provavelmente devido à penetração do concreto entre as partes metálicas, e diminuição desta resistência após os ensaios.

Este corpo de prova foi quebrado e verificou-se a formação de pequenos pontos de solda nos locais de amarração.

Com o corpo de prova a) também ocorreu fusão dos vergalhões em uma das extremidades, o que fez com que a sua resistência elétrica diminuísse de 4,6 M Ω para 1,7 m Ω , conforme mostra a figura 3.3.



Figura 3.3 – Detalhe da emenda do corpo de prova a) após os ensaios, já sem o concreto em volta (retirado de [9]).

Apesar desta alteração drástica e da constatação do processo de soldagem não foram observadas trincas ou rupturas nesta coluna de concreto, o que nos leva a crer que não há problemas em se utilizar as ferragens como parte integrante do SPDA.

Deve-se ressaltar que a subestação possui várias colunas com normalmente quatro ou mais vergalhões cada e, portanto, diversos caminhos paralelos para a corrente de descarga atmosférica. Assim dificilmente circularão 30 kA em uma única emenda, conforme foi adotado nos ensaios.

Conforme exposto por VISACRO em [8], as descargas atmosféricas plenas (“flashes”) negativas são as mais comuns e as descargas individuais (“strokes”) negativa primeira ou única possuem valor de corrente de pico mediano igual a 45 kA, segundo registros na estação de medição do Morro do Cachimbo, situada em Minas Gerais.

Destaca-se que a resistência medida entre topo e base de alguns pilares e entre as armaduras de pilares diferentes da subestação abrigada deve resultar em resistências inferiores a 1Ω , comprovando a continuidade das ferragens (item 5.1.2.5.5 e Anexo E de [1]) para sua aplicação no SPDA.

3.2.3. A Utilização das Fundações da Subestação como Eletrodos de Aterramento

SUETA [9] também executou experimentos práticos para verificar a eficiência das fundações da subestação como parte integrante do sistema de aterramento.

Foram construídos corpos de prova compostos por um vergalhão envolvido por uma coluna de concreto de seção 10 x 10 cm.

Estes corpos de prova foram inseridos em um tanque metálico cilíndrico preenchido com terra, onde foram aplicadas correntes impulsivas representativas de descargas atmosféricas.

Também foram executados estes ensaios com hastes de aço cobreado.

Observou-se que para sinais de mesmo nível de tensão e corpos de prova atingindo a mesma profundidade na terra a impedância impulsiva de aterramento da haste foi aproximadamente quatro vezes menor que a do corpo de prova que representa uma fundação (vergalhão envolvido por concreto).

Como as fundações da subestação abrigada são interligadas, compreendem toda a sua área e possuem geralmente grande profundidade, sua resistência e impedância de aterramento equivalentes resultantes tendem a ter valor reduzido, dentro dos padrões aceitáveis para escoamento de corrente de descargas atmosféricas e controle de potenciais perigosos devido à circulação de correntes de curto-circuito.

Portanto a recomendação de utilizar as fundações da subestação abrigada como parte integrante do seu sistema de aterramento é pertinente.

3.3. Observações Relativas ao Subsistema de Descida

O subsistema de descida merece atenção especial em relação a alguns aspectos.

Para tal, se fazem necessários esclarecimentos relativos ao subsistema de aterramento.

Uma configuração de eletrodos de aterramento pode ser representada como uma impedância, composta de [10]:

- resistência e indutância longitudinais, inerentes à corrente que percorre os eletrodos;
-

- condutância e capacitância transversais, inerentes à corrente que é dispersada no solo.

Para o caso de “fenômenos lentos”, como correntes de curto-circuito à frequência industrial, é possível desprezar os demais parâmetros e considerar somente a condutância transversal, cujo inverso é a resistência de aterramento, diretamente relacionada à resistividade do solo.

No caso de SPDA, não é possível fazer esta simplificação, devido às características das ondas de tensão e corrente associadas às descargas atmosféricas.

Entretanto, apesar de não ser o único fator a ser considerado, a condutância transversal influencia majoritariamente na impedância de aterramento.

Quando maior esta condutância, mais fácil é a dispersão de corrente no solo; de onde é possível concluir que para dispersar uma corrente de mesma intensidade solos de baixa resistividade necessitam de eletrodos de menores comprimentos do que solos de alta resistividade.

Esta é uma abordagem simplificada visando auxiliar a determinação da quantidade de descidas do SPDA. Para mais detalhes é sugerida a referência [10], onde são abordados itens como:

- comprimento efetivo de um eletrodo;
- dependência dos parâmetros do solo com a frequência;
- distribuição de campo e efeitos de propagação de ondas eletromagnéticas no solo;
- efeitos da densidade de corrente (ionização).

Em seu trabalho, VISACRO demonstra [11], por meio de simulações computacionais, que em solos de baixa resistividade o aumento da quantidade de descidas do SPDA reduz substancialmente a impedância de aterramento.

Em solos de baixa resistividade, a eficiência do SPDA cresce consideravelmente com o aumento da quantidade de descidas, devido à atenuação que as ondas de alta frequência, presentes nas descargas atmosféricas, experimentam ao percorrerem os eletrodos de aterramento.

Devem ser tomados cuidados no que se refere a possíveis problemas de compatibilidade eletromagnética devido à proximidade ou conexão intencional dos condutores de descida com equipamentos ou materiais metálicos de infraestrutura (eletrodutos de iluminação externa, por exemplo).

4 Concepção da Malha de Aterramento

4.1 – Introdução

Conforme exposto em [12], os dados de entrada para o projeto da malha de aterramento de uma subestação são:

- a) Estratificação do solo;
- b) Resistividade e espessura da camada superficial (concreto, no caso das subestações abrigadas);
- c) Corrente de curto-circuito fase-terra máxima;
- d) Tempo máximo para eliminação da corrente de curto-circuito fase-terra;
- e) Área máxima que pode ser ocupada pela malha (em geral é a área da subestação);
- f) Valor máximo da resistência de aterramento, de modo que esta seja capaz de sensibilizar o sistema de proteção.

O item a) é obtido por meio da medição da resistividade do solo local. Para mais detalhes ver item 4.2 a seguir.

A resistividade do concreto b), conforme tabela 5 de [2] varia entre 1200 a 280.000 Ωm , caso este esteja seco e entre 21 a 100 Ωm , caso esteja molhado.

É prática comum a elaboração de estudos elétricos relativos à subestação a ser implantada, como, por exemplo, relatórios de avaliação das correntes de curto-circuito e da coordenação da proteção. Nestes documentos é possível encontrar as informações c), d) e f).

Obviamente, o item e) é um dado simples de ser obtido.

4.2 – Considerações sobre a Medição da Resistividade do Solo

Visto que as características do solo são dados de entrada para o projeto da malha de aterramento, não é o foco desta monografia apresentar em detalhes o procedimento de medição de resistividade, que pode ser encontrado na norma NBR 7117:1981 [3].

Porém, convém expor alguns comentários pertinentes.

Nenhum solo real é perfeitamente homogêneo [13], sendo a estratificação a sua representação em camadas homogêneas de diferentes resistividades.

Em geral a medição de resistividade do solo para obtenção de um modelo de camadas homogêneas estratificadas é executada pelo método de Wenner [3,13].

Durante a execução das medidas devem ser tomados cuidados especiais, principalmente nos casos onde há estruturas metálicas no solo onde a futura subestação será construída. Estes metais podem interferir nas medições, levando à obtenção de resultados não confiáveis [13].

Na figura 4.1 é possível observar um caso real onde uma subestação abrigada foi construída sobre eletrodutos metálicos e tubulação de drenagem oleosa metálica, todos estes enterrados no solo. A fotografia foi realizada durante o processo de construção das fundações do prédio.

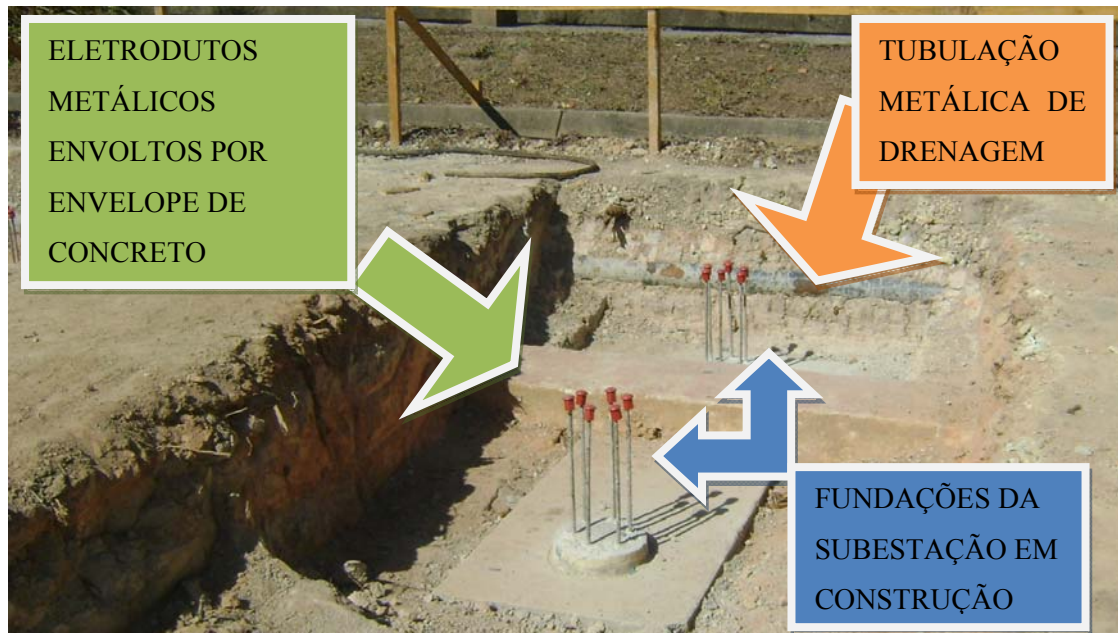


Figura 4.1 – Exemplo de materiais metálicos no solo.

Nestes casos, para evitar erros nas medições devem ser observadas as recomendações da norma NBR 7117:1981 [3], item 7.1.4, no que se refere às distâncias mínimas entre os pontos de medição e os objetos metálicos existentes.

Em casos extremos, onde a medição torna-se inviável, podem ser utilizados outros recursos.

Em se tratando de indústrias, é possível utilizar dados de outras medições em locais próximos daquele de interesse.

É também possível adotar o processo de medição por amostragem [13].

Neste procedimento, é coletada uma amostra do solo e este material é inserido em uma cuba retangular. Duas faces opostas da cuba são eletrodos. As demais faces são isolantes. É medida a resistência elétrica desta porção de solo e calculada a resistividade elétrica correspondente.

Entretanto, não é possível garantir que o solo apresente, dentre outras características, a mesma compacidade e umidade desde a sua coleta até a deposição na cuba.

Também não é possível identificar neste processo de medição a anisotropia e a heterogeneidade do solo do local onde será instalada a futura malha de aterramento.

Por estes motivos, esta técnica não deve ser utilizada isoladamente.

4.3 – Potenciais Máximos Permissíveis

De posse das informações listadas em 4.1, é possível calcular os potenciais de passo e de toque máximos permissíveis na subestação, pelas equações 4.1, 4.2 e 4.3 abaixo [2]:

$$E_p = (1000 + 6\rho_s C) \cdot I \quad (V) \quad \text{equação (4.1)}$$

$$E_{tcd} = (1000 + 1,5\rho_s C) \cdot I \quad (V) \quad \text{equação (4.2)}$$

Onde:

- E_p é a tensão de passo máxima permissível pelo corpo humano, em V;
- E_{tcd} é a tensão de toque máxima permissível pelo corpo humano, em V;
- ρ_s é a resistividade do recobrimento do solo, em $\Omega \cdot m$ (concreto);
- C é o fator de redução que depende da espessura da camada de concreto, conforme equação 4.3;
- I é a máxima corrente de curta duração (≤ 3 s) admissível pelo corpo humano (em A), conforme equação 4.

$$C = 1 - 0,106 \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2h_s + 0,106} \right] \quad \text{equação (4.3)}$$

Nesta equação, ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo (em $\Omega \cdot m$), abaixo do concreto, h_s é a profundidade deste último (em m) e ρ_s é o mesmo já definido acima.

$$I = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \quad (A) \quad \text{equação (4.4)}$$

Na equação 4.4, t é o tempo de duração do choque. Deve ser considerado o tempo máximo de atuação da proteção de retaguarda, em geral menor do que 1 s, para sistemas industriais.

4.4 – A Resistência de Aterramento e a Eficiência da Malha

Convém, neste ponto, comentar a respeito de uma premissa largamente exigida como parâmetro de aceitação do projeto da malha: a limitação da sua resistência de aterramento máxima.

Esta resistência é obtida pelo produto da resistividade do solo por um fator obtido pelas características geométricas e dimensionais dos eletrodos.

Em geral a área máxima para instalação do sistema de eletrodos de aterramento é limitada ao terreno da subestação. Assim, para solos de alta resistividade é extremamente complicado obter resistências de aterramento abaixo de 10 Ω , que é geralmente o limiar exigido pelas indústrias.

A elevação de potencial de uma malha em relação ao infinito (conhecida pelo termo inglês “ground potential rise” – GPR) é o produto da corrente I injetada no solo durante um curto-circuito (em A) pela resistência de aterramento R_T (em Ω) [12]:

$$GPR = R_T \cdot I \text{ (V)} \quad \text{equação (4.5)}$$

Pela equação 4.5 é notório que a resistência de terra não é o único fator que determina o GPR, pois este é também diretamente proporcional à corrente injetada.

Conclui-se que diferentes combinações de R_T e I podem levar a uma mesma elevação de potencial na malha.

Como os potenciais na superfície do solo e, conseqüentemente, as correntes que circulam pelo corpo das pessoas e podem provocar danos a estas são dependentes do GPR, a eficácia do projeto de aterramento deve, de fato, ser comprovada pela verificação dos potenciais de toque e passo permitidos e previstos na malha. Este detalhe é destacado no item 10.1 da norma NBR 15751:2009 [2].

4.5 – Configuração da Malha de Aterramento

4.5.1 – Configuração Básica

A primeira etapa no projeto da malha de aterramento é a determinação da sua configuração básica.

Devido à geometria comumente retangular das subestações abrigadas e em conformidade com os itens 10.4.24 de [2] e 5.1.3.2.1.b de [1] a configuração mais simples recomendada para esta malha é um anel de condutores contornando a edificação.

A necessidade de aterrar todos os equipamentos e partes metálicas da subestação faz com que seja conveniente a adoção de outros condutores internos, diminuindo o comprimento dos cabos de conexão das massas com a malha (estes cabos são conhecidos como “rabichos”).

A configuração básica previamente definida deve ser consolidada por meio de um processo iterativo de cálculo dos potenciais de passo e de toque previstos no solo para a malha projetada, até que estes estejam em níveis inferiores àqueles permissíveis, calculados em 4.3.

Para aumentar a eficiência da malha no que se refere ao controle dos potenciais perigosos deve-se diminuir a distância entre os condutores da malha (por meio do acréscimo de eletrodos). Em malhas retangulares, como é o caso das subestações abrigadas, trata-se de diminuir as dimensões dos reticulados internos (também denominados quadriculas, retângulos internos ou “mesh”).

4.5.2 – Resistividade Aparente do Solo

Antes de dar prosseguimento ao detalhamento dos cálculos é conveniente apresentar a resistividade aparente do solo.

De acordo com a profundidade de penetração no solo das correntes escoadas pelos eletrodos de aterramento e com a integração entre estes elementos (aterramento e solo) é determinada a resistividade aparente [12]. Trata-se de um solo homogêneo representativo das condições de cada caso.

A seguir é apresentado um procedimento para determinação da resistividade aparente de um solo estratificado em duas camadas. Solos com mais camadas devem ser representados pelo seu equivalente em duas camadas – métodos de redução de camadas (para detalhes, ver a referência [12]).

Inicialmente determina-se um fator α , cujo cálculo depende de duas afirmativas [2]:

- Resistividade da segunda camada menor que da primeira;
- Relação entre as profundidades da malha de aterramento e da primeira camada maior ou igual a 0,9.

Caso ambas afirmativas sejam verdadeiras, utiliza-se a equação 4.6 [2]:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{2 \cdot a_1 \cdot H} \quad \text{equação (4.6)}$$

Do contrário, utiliza-se a equação 4.7 [2]:

$$\alpha = \frac{\sqrt{\frac{A}{\pi}}}{a_1} \quad \text{equação (4.7)}$$

Nestas expressões:

- A é a área da malha de aterramento, em m^2 ;
- a_1 é a profundidade da primeira camada da estratificação do solo, em m;
- H é a profundidade da malha de aterramento, em m.

Conhecendo-se α e a relação entre as resistividades das duas camadas do solo (ρ_2/ρ_1 , sendo ρ_1 a resistividade da primeira camada e ρ_2 a resistividade da segunda camada) e com auxílio da figura 4.2 determina-se o valor do fator N [2].

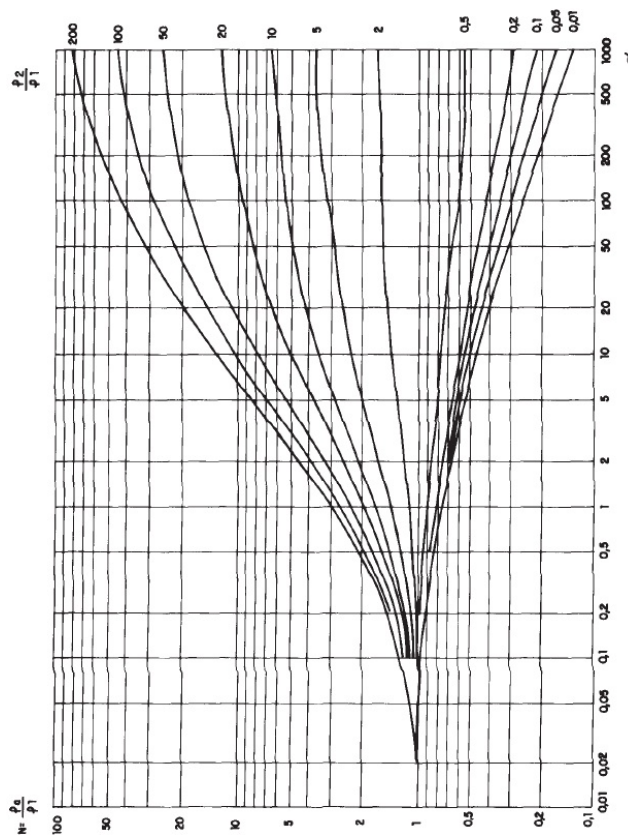


Figura 4.2 – Resistividade aparente ρ_a – solo estratificado em duas camadas (retirado de [2]).

A resistividade aparente em ohms.m é obtida pela equação 4.8 [2]:

$$\rho_a = N \cdot \rho_1 \quad \text{equação (4.8)}$$

4.5.3 – Cálculo da Resistência de Aterramento da Malha

Os principais fatores determinantes para a obtenção do valor da resistência de aterramento de uma malha são a resistividade do solo e a área ocupada pelos eletrodos [2].

Com estes dois elementos é possível estimar a resistência de aterramento.

A norma NBR 15751:2009 [2] sugere a utilização da expressão abaixo para tal.

$$R_T = \frac{\rho_a}{4r} \quad (\Omega) \quad \text{equação (4.9)}$$

Onde ρ_a é a resistividade aparente do solo (em Ωm) e r o raio do círculo equivalente à área da malha.

Esta fórmula, conforme exposto na tabela 2.7 de [13], é para um disco horizontal ao nível do solo.

Entretanto, para configurações retangulares é mais simples utilizar a equação 4.10, extraída de [14], sendo A a área ocupada pela malha, em m^2 . Assim não se faz necessário determinar o raio equivalente.

$$R_T = \frac{\rho_a}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (\Omega) \quad \text{equação (4.10)}$$

Após o desenvolvimento e consolidação da configuração da malha, de acordo com os próximos itens deste capítulo, é possível calcular a resistência final da malha.

A expressão utilizada é conhecida como fórmula de Sverak [12,14], abaixo apresentada.

$$R_T = \rho_a \left\{ \frac{1}{L_t} + \left(\frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \right) \left[1 + \left(\frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \right\} \quad (\Omega) \quad \text{equação (4.11)}$$

Onde:

- ρ_a é a resistividade aparente do solo, em Ωm ;

- L_t é o comprimento total de condutores enterrados, em m;
- A é a área ocupada pela malha, em m²;
- h é a profundidade da malha, em m.

Convém destacar que a norma NBR 15751:2009 [2] apresenta esta fórmula, substituindo o termo $\sqrt{20/A}$ por $\sqrt{20A}$. Atribui-se esta discrepância a um erro de digitação.

4.5.4 – Cálculo dos Potenciais no Solo

A norma NBR 15751:2009 [2] apresenta, em seu anexo B, uma metodologia para cálculo simplificado de potenciais no solo, que respeita as seguintes premissas:

- Condutores horizontais da malha com mesma seção e na mesma profundidade;
- Na malha deve haver no máximo 25 condutores paralelos em cada direção, espaçados no mínimo em 2,5 m;
- A malha deve se situar entre 0,25 e 2,5 m;
- Os condutores da malha devem possuir diâmetro máximo menor que 0,25 m;
- O comprimento da malha deve ser no máximo 2,5 vezes a sua largura.

A maioria das subestações abrigadas satisfazem estas condições.

Entretanto, destaca-se que há atualmente softwares disponíveis que utilizam outras técnicas para efetuar estes cálculos, como, por exemplo, a “potencial constante” [2].

Estas ferramentas facilitam o dimensionamento da malha, pois reduzem o tempo necessário para avaliação dos potenciais e também permitem, por exemplo, a plotagem de gráficos da tensão em função da posição e o cálculo da resistência de aterramento da malha.

Retornando ao método indicado pela norma brasileira, inicialmente, calcula-se o fator geométrico para tensão de toque, pela equação 4.12 [2]:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16 \cdot H \cdot d} + \frac{(D+2H)^2}{8 \cdot D \cdot d} - \frac{H}{4d} \right) + \frac{k_{ii}}{\sqrt{1+H}} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \quad \text{equação (4.12)}$$

Na equação 4.12, tem-se que:

- D é distância entre os condutores paralelos ao longo da malha, em m;

- H é a profundidade da malha, em m;
- d é o diâmetro dos condutores da malha, em m;
- $k_{ii} = 1$ se a malha tiver hastes de aterramento localizadas na periferia ou $k_{ii} = (2n)^{-2/n}$, caso contrário;
- n é o número de condutores paralelos em uma determinada direção.

Em seguida calcula-se o fator de correção da dispersão de corrente K_i [2].

$$K_i = 0,656 + 0,172n \quad \text{equação (4.13)}$$

Desta forma é possível calcular a maior tensão de toque, pela equação abaixo [2]:

$$V_t = \frac{\rho \cdot I \cdot K_m \cdot K_i}{L_t} \quad (V) \quad \text{equação (4.14)}$$

Onde:

- ρ é a resistividade do solo, em ohm.m;
- I é a corrente máxima que circula na malha, em A (ver item 4.6);
- L_t é comprimento total dos condutores enterrados, em m;
- K_m é calculado pela equação 4.12;
- K_i é calculado pela equação 4.11.

Este valor é encontrado dentro dos reticulados das quinças da malha [2], pois a interação entre os condutores no seu interior força o escoamento da corrente pelas bordas [2,12].

O fator geométrico para tensão de passo é determinado pela expressão a seguir [2]. Todas as grandezas presentes na fórmula estão definidas no cálculo da tensão de toque.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad \text{equação (4.15)}$$

A tensão de passo máxima é encontrada externamente à malha, próxima aos condutores periféricos, e seu valor é dado por [2]:

$$V_p = \frac{\rho \cdot I \cdot K_s \cdot K_i}{L_t} \quad (V) \quad \text{equação (4.16)}$$

Convém ressaltar que os fatores geométricos e de correção da dispersão de corrente (K_m , K_i e K_s) devem ser calculados para as duas direções, sendo adotados os valores que conduzem às maiores tensões de passo e toque [2].

Conforme já exposto anteriormente, após o cálculo de V_t e V_p deve ser verificado se estes valores encontram-se abaixo dos valores permissíveis, calculados pelas equações 4.1 e 4.2.

Caso não estejam, é necessário diminuir o mesh da malha de aterramento e refazer os cálculos para esta nova configuração (processo iterativo).

4.6 – Corrente de Curto-Circuito e Corrente que Circula na Malha

Um dos pontos que exige bastante atenção do projetista é a determinação das correntes elétricas a serem consideradas na concepção do sistema de aterramento.

Sempre que há uma falta fase-terra a corrente retorna do ponto de defeito para o aterramento intencional da fonte pelo caminho de menor impedância [15].

Recomenda-se que seja utilizado na concepção da malha de terra o maior nível de curto-circuito monofásico dentre os níveis de tensão presentes nos equipamentos da subestação.

Sistemas com resistores de aterramento, bastante comuns atualmente, possuem baixas correntes de falta, menores que 1 kA.

Quando o neutro é solidamente aterrado exige-se mais atenção. Nestes casos o nível de curto-circuito fase-terra pode alcançar dezenas de milhares de Amperes. Estes valores dificultam a obtenção de uma configuração de eletrodos de aterramento para controlar os potenciais de toque e passo, principalmente em solos com elevada resistividade.

Faz-se necessário, portanto, nestes casos específicos, avaliar qual o valor de corrente a ser considerado.

Neste contexto, os sistemas elétricos industriais englobam uma miscelânea de fatores que os diferem dos sistemas elétricos de transmissão e distribuição de potência de alta e extra-alta tensão, foco da quase totalidade dos textos acadêmicos e normas técnicas referentes a sistemas de aterramento.

Dentre estes fatores, podemos destacar:

- a) Nas indústrias, as distâncias das subestações para as instalações do processo e das subestações entre si não são tão extensas. Isto faz com que exista um efeito mútuo (resistência) entre as suas malhas de aterramento cuja determinação é complexa;
- b) A existência ou não de conexões entre estas malhas é muitas vezes desconhecida e não consta na documentação (projetos) da planta, o que também impacta negativamente nos cálculos. Mesmo conhecendo-se bem todas as

malhas e interligações da planta e dispondo, por exemplo, de algum software de cálculo de malha de aterramento, é necessário determinar um solo equivalente representativo de todas estas áreas, o que não é uma situação tecnicamente plausível;

- c) Os grandes sistemas utilizam quase que exclusivamente linhas de transmissão aéreas, com distâncias bem definidas entre os condutores e destes para o solo. Nas indústrias utilizam-se cabos isolados trafegando por diferentes infraestruturas (eletrodutos, eletrocalhas, leitos) compostos de materiais variados (aço, PVC, fibra de vidro), tanto ao ar livre quanto subterrâneos. Assim é bem mais complicado obter impedâncias equivalentes dos cabos, para determinação da distribuição de correntes entre as malhas na ocorrência de um curto-circuito;
- d) Nas subestações abrigadas, como é de conhecimento, há condutos elétricos, portas, janelas, suportes e outros materiais metálicos que são conectados à malha de aterramento. Esta configuração, juntamente aos componentes do SPDA, resulta em uma imensa quantidade de caminhos paralelos para circulação de correntes elétricas de curtos-circuitos internos ao prédio.

4.7 – Dimensionamento dos Condutores

Os eletrodos de aterramento estão sujeitos a esforços de compressão e cisalhamento [12] e devem ser dimensionados para tal.

Devido à sua larga aplicação, para condutores de cobre a aço as normas brasileiras definem suas seções mínimas que atendem esta premissa.

No caso do cobre, os eletrodos devem ter no mínimo 50 mm² [1] e [2].

Entretanto, há divergência no caso do aço: 80 mm² segundo [1] e 38 mm² segundo [2].

Da mesma forma, os condutores devem suportar a circulação de uma corrente pré-definida (ver item 4.6) por um tempo máximo, sem que sua temperatura ultrapasse o limite de temperatura do tipo de conexão utilizada entre estes ou o limite de temperatura do seu material de composição.

O cálculo é executado pela equação Onderdonk [2]:

$$S = I \sqrt{\frac{t \cdot \alpha_r \cdot \rho_t \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}}} \quad (\text{mm}^2) \quad \text{equação (4.17)}$$

Onde:

- S é a seção em mm^2 ;
- I é a corrente em kA;
- t é o tempo em s;
- α_r é o coeficiente térmico de resistividade do condutor em $^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- ρ_t é a resistividade do condutor de aterramento em $\Omega \cdot \text{cm}$;
- $TCAP$ é o fator de capacidade térmica em $\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$;
- T_m é a temperatura máxima suportável, conforme Tabelas 4.1 e 4.2, $^{\circ}\text{C}$;
- T_a é a temperatura ambiente em $^{\circ}\text{C}$;
- k_0 é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0°C ;
- T_r é a temperatura de referência das constantes do material em $^{\circ}\text{C}$.

Tipo do condutor	Coeficiente térmico de resistividade		Temp. de fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Resistividade pr (20°C)	TCAP $\text{J}/\text{cm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}$
	α_0 (0°C)	α_r (20°C)			
Cobre (macio)	0,00427	0,00393	1083	1,724	3,422
Cobre (duro)	0,00413	0,00381	1084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	0,00408	0,00378	1084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	0,00408	0,00378	1084	5,862	3,846
Haste de aço cobreado	0,00408	0,00378	1084	8,62	3,846
Fio de alumínio	0,00439	0,00403	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	0,00380	0,00353	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	0,00373	0,00347	660	3,284	2,598
Aço-alumínio	0,00388	0,00360	660	8,480	2,670

Tipo do condutor	Coeficiente térmico de resistividade		Temp. de fusão (°C)	Resistividade pr (20 °C)	TCAP J/cm ³ .°C
	α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)			
Aço 1020	0,00165	0,00160	1510	15,90	3,28
Haste de aço	0,00165	0,00160	1400	17,50	4,44
Aço zincado	0,00341	0,00320	419	20,1	3,931
Aço inoxidável 304	0,00134	0,00130	1400	72,0	4,032

Tabela 4.1 – Parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em aterramentos (retirado de [2]).

Conexão	Tm °C
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	250
Solda oxiacetilênica	450
Solda exotérmica	850
Emenda à compressão	850

Tabela 4.2 – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura (retirado de [2]).

É possível simplificar a equação 4.17, adotando um coeficiente K_f que contempla as informações do tipo de condutor e conexão, conforme abaixo:

$$S = I \cdot K_f \cdot \sqrt{t} \quad (\text{mm}^2) \quad \text{equação (4.18)}$$

Por exemplo, para eletrodos de cobre com conexões mecânicas, temos (considerando temperatura ambiente 40°C):

$$S = I \sqrt{\frac{t \cdot \alpha_r \cdot \rho_t \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}}} = I \sqrt{t} \sqrt{\frac{\alpha_r \cdot \rho_t \cdot 10^4}{TCAP \cdot \ln \frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}}} = I \sqrt{t} \sqrt{\frac{0,00393 \times 1,724 \times 10^4}{3,422 \times \ln \left(\frac{(1/0,00427) + 250}{(1/0,00427) + 40} \right)}}$$

$$S = I \sqrt{t} \cdot 5,9$$

Este resultado diverge do valor apresentado na Tabela 3 de [2], que é 11,5.

Calculando para as demais condições, os valores de K_f são aqueles da Tabela 4.3.

Conexão	K_f
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	5,90
Solda oxiacetilênica	4,65
Solda exotérmica	3,79
Emenda à compressão	3,79

Tabela 4.3 – Tipos de conexões e sua constante K_f .

Para o dimensionamento dos condutores de ligação das carcaças dos equipamentos à malha de terra sugere-se a utilização destas mesmas equações.

4.8 – Aterramento de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis (EES)

O crescente desenvolvimento dos sistemas de medição, controle, supervisão, monitoração e automação de processos industriais e instalações elétricas fez com que atualmente seja comum a existência de uma grande concentração de equipamentos eletrônicos nas subestações abrigadas.

Devido à alta susceptibilidade destes equipamentos às interferências eletromagnéticas (EMI) em relação aos equipamentos de potência devem ser estudadas todas as possíveis maneiras de minimizar este problema.

Uma importante ferramenta neste processo é o sistema de aterramento, conforme exposto a seguir [13].

O objetivo aqui é apresentar simplificadaamente o embasamento da utilização da malha de terra de referência nas áreas onde é grande a concentração de equipamentos eletrônicos sensíveis.

Um circuito ou condutor é considerado eletricamente curto quando seu comprimento é, no máximo, igual a um décimo do comprimento de onda de um sinal em questão [16].

Isto significa que a tensão em qualquer ponto do condutor em um determinado instante é aproximadamente a mesma.

Para exemplificar, vamos considerar um condutor medindo 25 cm, o que corresponde a um sinal de comprimento de onda 2,5 m.

Considerando o sinal trafegando na velocidade da luz, temos a seguinte frequência relacionada:

$$f = \frac{3 \cdot 10^8}{2,5} = 120 \text{ MHz}$$

Partindo deste princípio, caso seja construída uma malha de condutores conectados formando quadrículas de 25 cm, a mesma representa uma grande quantidade de caminhos paralelos de baixa impedância para todos os sinais com frequência menor ou igual a 120 MHz.

Esta configuração é denominada malha de terra de referência (M.T.R.), e deve ser instalada o mais próximo possível dos equipamentos a serem protegidos, no máximo a uma distância igual ao mesh (reticulado) [7].

Para equalização de potencial e decorrente aumento da segurança pessoal a MTR deve ser interligada à malha de aterramento em dois pontos, no mínimo [7].

Mais detalhes são encontrados na referência [7].

5 Considerações Finais

5.1 – Conclusão

Neste trabalho são primeiramente contextualizadas as subestações abrigadas, no que se refere a:

- Sua importância no sistema elétrico industrial (capítulo 1);
- Características construtivas gerais, configurações elétricas e equipamentos aplicáveis a este tipo de instalação (capítulo 2).

Todos estes pontos demonstram a importância de se projetar adequadamente a proteção contra descargas atmosféricas e o sistema de aterramento destas edificações.

Em seguida, no capítulo 3, é apresentada uma metodologia de projeto de SPDA, que segue as premissas da norma NBR 5419:2005 [1], com algumas considerações adicionais, dentre elas:

- Quantidade de descidas a serem previstas, em função da resistividade do solo;
- Pontos da norma que merecem destaque no que se refere a subestações abrigadas.

Na sequência (capítulo 4) são detalhados os procedimentos para concepção do projeto da malha de aterramento e suas conexões com os equipamentos da subestação, baseando-se ao máximo nas prescrições da norma NBR 15751:2009[2].

Neste capítulo são tratados diversos pontos de atenção, tais como:

- Cuidados relativos à medição de resistividade do solo;
- Desvinculação da eficiência da malha com o valor de sua resistência de terra;

- Cálculo dos potenciais máximos permissíveis no solo;
- Dimensionamento da malha;
- Especificidades do aterramento de equipamentos eletrônicos sensíveis.

5.2 – Propostas de Continuidade

Durante a incidência direta de descargas atmosféricas no SPDA de uma subestação abrigada, rápidas correntes transitórias fluem pelos seus elementos condutores [8]. Estas correntes podem induzir tensões em fios e cabos localizados dentro do volume protegido e podem causar danos e falhas na operação de sistemas elétricos e eletrônicos. Assim, a determinação destas tensões é extremamente necessária para a avaliação da compatibilidade eletromagnética das instalações no interior da edificação. Uma complementação desta monografia seria a abordagem de métodos de cálculo destas tensões induzidas.

Conforme exposto no item 4.6, determinar a máxima corrente que pode circular pelos condutores da malha de aterramento de uma subestação abrigada é uma tarefa complexa. Este assunto é pouco abordado em textos científicos e normas técnicas da ABNT, constituindo outro ponto de interesse para trabalhos futuros.

Por fim, tem-se a intenção de aprofundar o estudo comparativo do custo de diferentes soluções de aterramento e SPDA para uma mesma instalação, principalmente no que se refere aos tipos de materiais utilizados e mão de obra envolvida para a instalação.

Referências Bibliográficas

- [1] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, “**Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas – NBR 5419**”, 2005.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, “**Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos – NBR 15751**”, 2009.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, “**Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner) – Procedimento – NBR 7117**”, 1981.
- [4] TERMOTÉCNICA, “**Catálogo Comercial de Produtos**”, disponível em www.tel.com.br.
- [5] RIEDER, E. S.; BRUSAMARELLO, V.; BIANCHI, A. L.; BALBINOT, A., “**Investigação dos Principais Processos de Corrosão em Estações de Energia Elétrica do Estado do RS**”, Revista Matéria, vol. 14, nº 3, 2009.
- [6] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION / ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN – IEC / AENOR, “**Proteccion contra el Rayo. Parte 3: Daño Físico a Estructuras y Riesgo Humano – IEC 62305-3**”, 2006.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE – PROCOBRE, “**Aterramento Elétrico**”.
- [8] VISACRO, S. F., “**Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**”, Editora Artliber, São Paulo, 2005.
- [9] SUETA, E. H., “**Uso de Componentes Naturais de Edificações como Parte Integrante do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas: Uma Visão Relativa aos Danos Físicos**”, Universidade de São Paulo, 2005.
- [10] VISACRO, S. F., “**A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents**”, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 22, nº 1, 2007.
- [11] VISACRO, S. F.; SARAIVA, A. C.; SOARES, A. J., “**Avaliação da Eficiência de Configurações Típicas de Aterramentos de Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas, nos Aspectos de sua Impedância e Distribuição de Potencial no Solo**”, Seminário Internacional de Proteção contra Descargas Atmosféricas, São Paulo, 1997.
- [12] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. G., “**Aterramento Elétrico**”, 3ª edição, Editora Sagra-D.C. Luzzatto Editores, Porto Alegre, 1995.
- [13] VISACRO, S. F., “**Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**”, Editora Artliber, São Paulo, 2002.
- [14] THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, “**IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding – IEEE Std 80-2000**”, Estados Unidos da América, 2000.
- [15] STEVENSON JR, W. D., “**Elementos de Análise de Sistemas de Potência**”, Editora Mcgraw-Hill, São Paulo, 1974.
-

- [16] PAUL, C. R., **“Introduction to Electromagnetic Compatibility”**, 2ª edição, Editora John Wiley & Sons, New Jersey, Estados Unidos da América, 2006.
-