

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	1 de 106

NORMA TÉCNICA CHESP

NTD - 010

Critérios para Projetos e Procedimentos para Execuções de Aterramentos de Redes Aéreas e Subestações de Distribuição

(Norma compilada da NTC-60 CELG D)

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	2 de 106

Controle de Revisão			
Versão	Motivo da Revisão/Alteração	Data de Vigência	Situação
1.00	Versão aprovada para implantação – Norma compilada da NTC-60 CELG-D.	01/05/2016	Atual.
<p>O DOCUMENTO ORIGINAL ASSINADO ENCONTRA-SE ARQUIVADO NA COORDENAÇÃO DA QUALIDADE. ENTREGA NÃO CONTROLADA PARA CONSUMIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA.</p>			
<p>ELABORADO POR: Norma compilada da CELG-D.</p>		 REVISADO POR: Glauber José Ribeiro Firmo Gerente do Departamento Técnico	
 <p>APROVADO POR: Raufin Gonçalves de Souza em 23/05/2016 Diretor Técnico-Comercial</p>			

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	3 de 106

ÍNDICE

SEÇÃO	TÍTULO	PÁGINA
1.	OBJETIVO	5
2.	CAMPO DE APLICAÇÃO	5
3.	NORMAS E DOCUMENTOS COMPLEMENTARES	5
4.	TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES	6
5.	CONDIÇÕES GERAIS	8
6.	CRITÉRIOS PARA ATERRAMENTOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO	8
6.1	Redes Aéreas Urbanas com Condutores Nus	8
6.2	Redes Aéreas Compactas	9
6.3	Redes Aéreas Rurais	9
7.	CONSTRUÇÃO E ACOMPANHAMENTO DOS ATERRAMENTOS	10
7.1	Construção	10
7.2	Acompanhamento das Instalações	10
7.3	Avaliações Técnicas dos Aterramentos	11
7.4	Inspeção dos Aterramentos	11
8.	ATERRAMENTO DE CERCAS	12
8.1	Redes de Distribuição	12
8.2	Subestações	13
9.	ATERRAMENTO DE ESTAIS	14
10.	CRITÉRIOS PARA ATERRAMENTO DAS ENTRADAS DE SERVIÇO	14
10.1	Consumidores Atendidos em Tensão Secundária de Distribuição	14
10.2	Consumidores Atendidos em Tensão Primária de Distribuição	15
10.3	Centro de Medição em Edifício de Uso Coletivo	15
11.	NÍVEIS DE SEGURANÇA ACEITÁVEIS PARA OS ATERRAMENTOS	16
11.1	Desempenho Elétrico	16
11.2	Desempenho Mecânico	16
11.3	Avaliações das Medições em Campo	16
12.	MATERIAIS PADRONIZADOS	18
12.1	Aterramentos em Redes de Distribuição	18
12.2	Aterramentos em Subestações	19
13.	METODOLOGIAS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ATERRAMENTO	19
13.1	Projeto de Aterramento de Subestação	19
13.2	Projeto de Aterramento de Redes de Distribuição	24
ANEXO A	TABELAS e GRÁFICOS	26
TABELA 1	SEÇÕES MÍNIMAS PARA O CONDUTOR DE PROTEÇÃO	26
GRÁFICO 1	TENSÕES DE PASSO ADMISSÍVEIS	27
GRÁFICO 2	TENSÕES DE TOQUE ADMISSÍVEIS	28
ANEXO B	DESENHOS	29
DESENHO 1	SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE CERCA TRANSVERSAL À REDE DE DISTRIBUIÇÃO	29
DESENHO 2	SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE CERCA PARALELA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO	30
DESENHO 3	SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE CERCA PARALELA À CONFIGURAÇÃO DO ATERRAMENTO	31
DESENHO 4	SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE CERCA TRANSVERSAL À CONFIGURAÇÃO DO ATERRAMENTO	31
DESENHO 5	PRINCIPAIS ELEMENTOS FÍSICOS A SEREM CONSIDERADOS EM CÁLCULOS E SIMULAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DE UMA	32

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	4 de 106

	MALHA DE TERRA	
DESENHO 6	SISTEMA DE POTÊNCIA TÍPICO EM CONDIÇÃO DE FALTA PARA A TERRA, SEM CABO PARA-RAIOS OU NEUTRO	32
DESENHO 7	SISTEMA DE POTÊNCIA TÍPICO EM CONDIÇÃO DE FALTA PARA A TERRA, COM CABO PARA-RAIOS OU NEUTRO	33
DESENHO 8	FLUXOGRAMA PARA INSPEÇÃO DE ATERRAMENTO DESENERGIZADO	34
DESENHO 9	FLUXOGRAMA PARA INSPEÇÃO DE ATERRAMENTO ENERGIZADO	35
ANEXO C	MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO	36
ANEXO D	ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO	40
ANEXO E	PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÕES DE POTENCIAIS DE PASSO, TOQUE E TRANSFERÊNCIA	49
ANEXO F	PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM SISTEMA ENERGIZADO E DESENERGIZADO	53
ANEXO G	CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO	66
ANEXO H	EXEMPLO DE PROJETO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO UTILIZANDO HASTES	73
ANEXO I	RECOMENDAÇÕES PARA SOLOS DE ALTA RESISTIVIDADE	80
ANEXO J	DIRETRIZES PARA PROJETOS DE ATERRAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO	84

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	5 de 106

1. OBJETIVO

A presente norma estabelece os critérios básicos e as exigências técnicas mínimas que devem ser obedecidas para elaboração de projetos e nas execuções dos aterramentos nas redes e subestações de distribuição de energia elétrica na área de concessão da CHESP.

Apresenta as metodologias e procedimentos a serem aplicados na implementação das seguintes atividades:

- medição de resistividade do solo;
- estratificação do solo;
- medições de potenciais de passo, toque e transferência;
- medição de resistência de aterramento com sistema energizado e desenergizado.

2. CAMPO DE APLICAÇÃO

Esta norma aplica-se a todas as atividades que envolvam projeto e execução de aterramentos destinados a equipamentos, instalações consumidoras, redes aéreas urbanas e rurais, além de subestações de distribuição de energia elétrica.

3. NORMAS E DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

NORMA DA CELG - D

- NTC-19 Preformados - Especificação e Padronização.
NTC-02 Ferragens para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica - Especificação e Padronização.

NORMA CHESP

- NTD-002 Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Secundária de Distribuição.
NTD-001 Fornecimento de Energia Elétrica em Tensão Primária de Distribuição - Classes 15 e 36,2 kV.
NTD-006 Estruturas para Redes de Distribuição Rural Tensões 13,8 e 34,5 kV - Padronização.
NTD-004 Critérios de Projetos de Redes de Distribuição Rural.
NTD-003 Critérios de Projetos de Redes de Distribuição Aéreas Urbanas - Classes 15 e 36,2 kV.
NTD-016 Estruturas de Redes de Distribuição Aéreas Protegidas - Classe 15 kV.
NTD-008 Estruturas para Redes Aéreas Isoladas em Tensão Secundária de Distribuição.

NORMA BRASILEIRA

- NBR 7117 Medição da resistividade do solo pelo método dos quatro pontos (Wenner) (em revisão pelo Projeto de Norma 03:102.01-004).
NBR 5370 Conectores de cobre para condutores elétricos em sistemas de potência
NBR 5410 Instalações elétricas de baixa tensão.
NBR 5456 Eletricidade geral - Terminologia.
NBR 5460 Eletrotécnica e eletrônica - Sistemas elétricos de potência - Terminologia.
NBR 5909 Cordoalhas de fios de aço zincados, para estais, tirantes, cabos mensageiros e usos similares.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	6 de 106

NBR 6323	Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente - Especificação.
NBR 8120	Fio de aço-cobre encruado para fins elétricos.
NBR 8158	Ferragens eletrotécnicas para redes aéreas, urbanas e rurais de distribuição de energia elétrica.
NBR 8159	Ferragens eletrotécnicas para redes aéreas, urbanas e rurais de distribuição de energia elétrica - Formatos, dimensões e tolerâncias.
NBR13571	Hastes de aterramento aço-cobreada e acessórios.
NBR14039	Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.
Projeto de Norma 03:102.01-001	Materiais utilizados em aterramentos elétricos.
Projeto de Norma 03:102.01-002	Medição da resistência de aterramento e dos potenciais na superfície do solo.
Projeto de Norma 03:102.01-003	Projeto de Aterramento de Sistemas de Distribuição.
Projeto de Norma 03:102.01-005	Sistema de aterramento de subestações - critérios e procedimentos.
IEC 60479-1	Effects of Current Passing Through the Human Body – General Aspects.
IEEE 80/2000	Guide for Safety in AC Substation Grounding.

4. TERMINOLOGIA E DEFINIÇÕES

Para efeito desta norma, aplicam-se as definições das NBR 5456 e NBR 5460. São reproduzidas, a seguir, as definições dos termos que são específicos desta norma.

Aterramento: Ligação intencional de parte eletricamente condutiva à terra, através de um sistema de aterramento.

Condutor de Aterramento (rabicho): Condutor ou elemento metálico, que faz a ligação elétrica entre uma parte de uma instalação que deve ser aterrada e o eletrodo de aterramento.

Circuito Terra: Circuito elétrico formado pelos componentes responsáveis pelo escoamento da corrente de falta fase-terra (ou de uma fração da mesma) para o solo.

Corrente de Falta: Corrente que flui de um condutor para outro e/ou para a terra, no caso de uma falta e no local desta. No texto, a corrente de falta é a corrente de curto-circuito assimétrica fase-terra.

Corrente de Interferência (em medições de aterramento): Qualquer corrente estranha ao processo de medição capaz de influenciar seus resultados.

Corrente de Malha: Parcela da corrente de falta dissipada pela malha de aterramento para o solo.

Eletrodo de Aterramento: Condutor enterrado no solo, eletricamente ligado a ele, ou condutor embutido em concreto que, por sua vez, está em contato com o solo através de uma grande área.

Eletrodo Natural de Aterramento: Elemento condutor ligado diretamente à terra, cuja finalidade original não é de aterramento, mas que se comporta naturalmente como um eletrodo de aterramento.

Falta (elétrica): Contato ou arco acidental entre partes sob potenciais diferentes e/ou de uma ou mais dessas partes para a terra, num sistema ou equipamento elétrico energizado.

Haste de Aterramento: Eletrodo de aterramento constituído por uma haste rígida cravada no solo.

Malha de Aterramento: Conjunto de condutores nus, interligados e enterrados no solo.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	7 de 106

Potenciais Perigosos: Potenciais que podem provocar danos quando aplicados ao elemento tomado como referência.

Potencial Transferido: Valor do potencial transferido para um ponto remoto de um dado sistema de aterramento.

Rede de Distribuição Rural (RDR): Parte do sistema de distribuição de energia elétrica implantada fora do perímetro urbano de cidades, distritos, vilas e povoados.

Rede de Distribuição Urbana (RDU): Parte do sistema de distribuição de energia elétrica implantada dentro do perímetro urbano de cidades, distritos, vilas e povoados.

Rede Primária: Parte de uma rede de distribuição que alimenta transformadores de distribuição e/ou pontos de entrega em tensão primária de distribuição.

Rede Secundária: Componente da rede de distribuição energizada pelos secundários de transformadores de distribuição.

Resistência de Aterramento (de um eletrodo): Resistência ôhmica entre eletrodo de aterramento e o terra de referência.

Resistividade Aparente do Solo: Valor da resistividade resultante da avaliação das condições locais e do tratamento estatístico dos resultados de diversas medições de resistividade do solo para um dado espaçamento efetuada numa determinada área ou local e que possa ser considerado como representativo das características elétricas do solo.

Resistividade Elétrica do Solo (resistividade do solo): Resistência entre faces opostas do volume de solo, consistindo de um cubo homogêneo e isotrópico cuja aresta mede uma unidade de comprimento.

Sistema Aterrado: Sistema ou parte de um sistema elétrico cujo neutro é permanentemente ligado à terra.

Sistema de Aterramento: Conjunto de todos os eletrodos e condutores de aterramento, interligados ou não entre si, assim como partes metálicas que atuam direta ou indiretamente com a função de aterramento, tais como: cabos pára-raios, torres e pórticos; armaduras de edificações; capas metálicas de cabos, tubulações e outros.

Sistema de Distribuição: Parte de um sistema de potência destinado ao transporte de energia elétrica a partir do barramento secundário de uma subestação (onde termina a transmissão ou subtransmissão) até os pontos de consumo.

Sistema Diretamente Aterrado: Sistema aterrado sem interposição intencional de uma impedância.

Subestação (SE): Parte de um sistema de potência, concentrada em um dado local, com os respectivos dispositivos de manobra, controle e proteção, incluindo as obras civis e estruturas de montagem, podendo incluir também transformadores, equipamentos conversores e/ou outros equipamentos.

Tensão Máxima do Sistema de Aterramento: Tensão máxima que um sistema de aterramento pode atingir relativamente ao terra de referência, quando da ocorrência de injeção de corrente para o solo.

Tensão de Passo: Diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerado igual a 1,0 m.

Tensão de Toque: Diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa, considerado igual a 1,0m.

Terra: Massa condutora do solo num dado local ou, por extensão, uma massa metálica a ele ligada permanentemente.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	8 de 106

Terra de Referência: Região do solo suficientemente afastada da zona de influência de um eletrodo ou sistema de aterramento, tal que a diferença de potencial entre dois quaisquer de seus pontos, devido à corrente que circula pelo eletrodo para a terra, seja desprezível. É uma superfície praticamente equipotencial que se considera como zero para referência de tensões elétricas.

5. CONDIÇÕES GERAIS

- a) Os critérios e procedimentos aqui estabelecidos foram elaborados observando as normas da ABNT, bem como as padronizações contidas nas normas da CHESP.
- b) O sistema de distribuição da CHESP é composto, de modo geral, por redes aéreas com neutro contínuo, multi-aterrado e isolado da malha de terra da subestação de distribuição nas áreas urbanas e, nas áreas rurais, por redes aéreas trifásicas e monofásicas, com ou sem neutro contínuo.
- c) As tensões primárias nominais das referidas redes de distribuição são:
 - 13,8 kV e 34,5 kV, para sistema trifásico;
 - $13,8/\sqrt{3}$ kV e $34,5/\sqrt{3}$ kV, para sistema monofásico.
- d) As tensões secundárias nominais são:
 - 440/220 V, para transformador monofásico;
 - 380/220 V, para trifásico;
 - 220/127 V, para trifásico (somente particular).
- e) Os materiais utilizados nos aterramentos das redes de distribuição devem ser especificados, recebidos e instalados de acordo com a NTC-02 e normas da ABNT.
- f) Os condutores de aterramento devem ser contínuos e não devem ter em série nenhuma parte metálica de equipamentos elétricos ou ferragens.
- g) Nos aterramentos de redes de distribuição, a distância entre hastes não deve ser inferior ao comprimento das mesmas, enquanto que a mínima da haste em relação ao poste deve ser 1,0 m.
- h) Os aterramentos devem ser construídos em conformidade com esta norma e demais padronizações contidas em outras normas CHESP.
- i) A concessionária efetuará vistorias durante a execução dos aterramentos e, quando necessário, realizará medições dos valores da resistência de aterramento e potenciais de toque e passo para verificar se estão dentro dos máximos permitidos.
- j) Os casos omissos e outros de características excepcionais devem ser previamente submetidos à apreciação da CHESP.
- k) Esta norma poderá ser parcial ou totalmente alterada, por razões de ordem técnica, sem prévia comunicação, motivo pelo qual os interessados devem periodicamente consultar a CHESP quanto a eventuais modificações.
- l) As normas da CHESP encontram-se disponíveis na Internet, através do site www.chesp.com.br.

6. CRITÉRIOS PARA ATERRAMENTO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

6.1. Redes Aéreas Urbanas com Condutores Nus

- a) Devem ser aterrados todos os pára-raios e tanques dos transformadores, religadores, reguladores de tensão, capacitores e chaves.
- b) O condutor neutro deve ser aterrado aproximadamente a cada 300 m e não ser interrompido.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	9 de 106

- c) Não deve haver ponto de circuito secundário afastado mais de 200 m com relação a um aterramento.
- d) Todo final de rede primária e secundária deve ter o neutro aterrado.
- e) A ligação à terra dos tanques de equipamentos deve ser comum ao aterramento dos pára-raios e interligado ao neutro da rede.
- f) Nas redes com condutor neutro multi-aterrado, os aterramentos devem ser feitos de acordo com os seguintes critérios:
- condutor neutro ao longo e em finais de rede: uma haste de aço, galvanizada, tipo cantoneira dimensões 5 x 25 x 25 x 2400 mm; utilizando como condutor de aterramento cordoalha de aço galvanizado com 6,4 mm (1/4");
 - pára-raios, transformadores e equipamentos especiais (reliadores, capacitores e chaves): três hastes de aço cobreado diâmetro 16 mm, 2400 mm de comprimento e condutor de aterramento em aço cobreado diâmetro 5,20 mm (4 AWG);
 - equipamentos especiais (reliadores, capacitores, chaves e reguladores de tensão) em redes primárias sem neutro disponível: elaborar o projeto de aterramento específico para cada caso.

6.2. Redes Aéreas Compactas

- a) O mensageiro da rede compacta deve ser interligado ao neutro da secundária nas estruturas onde houver aterramento.
- b) O mensageiro deve ser aterrado nos seguintes pontos:
- a cada 200 m;
 - nas transições entre redes protegidas e convencionais;
 - nas estruturas com instalações de pára-raios e equipamentos;
 - finais de rede.
- c) Os pára-raios e equipamentos instalados em redes aéreas compactas devem ser aterrados de acordo com os mesmos critérios utilizados para as convencionais com condutores nus.

Devem ser previstos pontos definitivos para aterramento temporário, em locais estratégicos da rede, através de conector tipo estribo cunha, com capa protetora, ou conector estribo a compressão, espaçados no máximo 500 m.

6.3. Redes Aéreas Rurais

- a) Devem ser aterrados todos os pára-raios e tanques dos equipamentos elétricos (transformadores, reliadores, reguladores de tensão, capacitores e chaves).
- b) O condutor neutro deve ser contínuo e aterrado a cada 400 m, no máximo.
- c) Todo fim de rede primária deve ter o neutro aterrado.
- d) A ligação à terra deve ser comum aos pára-raios, ao tanque do equipamento a ser protegido e ao condutor neutro.
- e) Nas redes primárias com o neutro disponível os aterramentos devem obedecer às orientações abaixo descritas:
- neutro ao longo e em finais de rede: uma haste tipo cantoneira em aço galvanizado, dimensões 5 x 25 x 25 x 2400 mm e condutor de aterramento em cordoalha de aço galvanizado diâmetro 6,4 mm (1/4");

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	10 de 106

- em solos agressivos utilizar hastes de aço cobreado diâmetro 16 mm, 2400 mm de comprimento, condutor de aterramento em aço cobreado, diâmetro 5,20 mm (4 AWG) ou cobre com seção mínima 25 mm²;
- pára-raios e transformador: três hastes de aço cobreado diâmetro 16 mm, comprimento 2400 mm e condutor de aterramento em aço cobreado diâmetro 5,20 mm (4 AWG);
- equipamentos especiais (relogadores e chaves): três hastes de aço cobreado diâmetro 16 mm, comprimento 2400 mm e condutor de aterramento em aço cobreado, diâmetro 5,20 mm (4 AWG);
- capacitores e reguladores de tensão: elaborar projeto que atenda às condições de toque e passo permissíveis para o tipo de solo local, independente do vínculo com o condutor neutro;
- equipamentos especiais (relogadores, capacitores, chaves e reguladores de tensão) em redes primárias sem neutro disponível: elaborar projeto específico que atenda às condições de toque e passo admissíveis pelo tipo de solo local.

7. CONSTRUÇÃO E ACOMPANHAMENTO DOS ATERRAMENTOS

7.1. Construção

- a) Os aterramentos das redes devem ser construídos obedecendo rigorosamente ao estabelecido no projeto.
- b) Após a construção deve ser realizada medição da resistência de aterramento e se o valor medido for superior aos máximos obtidos segundo o item 13.2, o processo deve ser reavaliado.
- c) O condutor de aterramento não deve possuir emendas e; caso seja estritamente necessário esta deve ser executada na conexão com o eletrodo de aterramento.
- d) De modo a garantir maior segurança e confiabilidade na manutenção da ligação do sistema à terra, o condutor de aterramento, situado na descida junto ao poste, deve ser protegido adequadamente até a altura mínima de 3 metros, por meio de eletroduto de PVC rígido, diâmetro 32 mm.
- e) Num eventual rompimento ou desconexão do condutor de aterramento, devem ser tomadas precauções imediatas, evitando-se o contato de pessoas ou animais com a estrutura, pelo fato das partes superiores das prumadas rompidas poderem estar energizadas com tensões perigosas.
- f) Em situações de elevados potenciais de superfície na região do aterramento primário, pode ser avaliada a necessidade de colocação de uma camada com 5 cm de brita, num raio de 1 metro junto à estrutura.
- g) Para as instalações de equipamentos em locais com solos de alta resistividade, podem ser elaborados projetos específicos que resultem em valores de resistência de aterramento superiores aos recomendados, desde que respeitados os limites adequados para os gradientes de potencial de superfície.

7.2. Acompanhamento das Instalações

- a) O acompanhamento dos aterramentos tem por objetivo gerar informações que permitirão obter dados relacionados ao desempenho dos materiais utilizados e manutenções necessárias aos aterramentos em toda a área de concessão da empresa.
- b) No primeiro ano de confecção do aterramento deve-se efetuar as medições de resistência e

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	11 de 106

potenciais de superfície, bem como acompanhar a evolução da carga.

- c) Sempre que uma equipe técnica da empresa dirigir-se ao local da instalação deve-se realizar inspeção visual no aterramento.
- d) A corrosão verificada nos cabos condutores, hastes galvanizadas e conexões, caracteriza-se como um dos principais fatores que determinam a vida útil do aterramento. É fundamental, portanto, o acompanhamento desse fenômeno com o decorrer do tempo.
- e) Recomenda-se que a cada cinco anos (a norma ABNT cita que independente da constatação ou não de possíveis irregularidades, a frequência de verificações através de medições da resistência de aterramento não deve ser superior a 1/3 da durabilidade prevista para o sistema de aterramento) seja feita uma inspeção, na qual se comprove as características elétricas principais do aterramento, notadamente, a estabilidade do valor da referida resistência ao longo do tempo, a sua capacidade de condução das correntes de regime e falta, além de seu desempenho frente às sobretensões originárias de surtos atmosféricos que o atingiram.
- f) Do ponto de vista mecânico, as inspeções devem avaliar o comportamento do material do aterramento face à corrosão imposta pelas características do solo, possíveis rompimentos do cabo de descida, dobramento ou flambagem das hastes e deterioração das conexões durante sua vida útil.
- g) Como a resistividade do solo varia diretamente com a umidade nele existente, as medições devem ser realizadas preferencialmente em período seco, ou após, pelo menos, três dias consecutivos sem chuva.
- h) Para redes de distribuição, o número mínimo de pontos de aterramentos a ser inspecionado deve ser 10% do universo em estudo.
- i) O critério de avaliação do resultado das medições recomendado pela norma ABNT é:
 - caso 60% ou mais das leituras apresentem valores superiores a 150% dos de referência, efetuar medições em cada aterramento do universo considerado e renovar os que se apresentarem com valores superiores ao limite fixado;
 - caso 21 a 59% apresentem valores superiores a 150% dos de referência, proceder a nova amostragem aleatória; persistindo acima de 30% das novas medições um valor superior ao exigido, executá-las em todos os outros pontos, procedendo à necessária renovação;
 - caso 20% ou menos apresentem valores superiores a 150% do exigido, nenhuma providência se fará necessária.
- j) É importante frisar que há necessidade de se vincular qualquer tipo de inspeção nos aterramentos, à abertura prévia da conexão com a rede primária

7.3. Avaliações Técnicas dos Aterramentos

Quanto à segurança e aos valores aceitáveis das resistências de aterramento e potenciais na superfície do solo devem ser realizadas conforme item 11.

7.4. Inspeção dos Aterramentos

- a) Generalidades:
 - o inspetor deve possuir conhecimentos relacionados ao projeto de aterramento, tais como: estratificação do solo, configuração, melhorias efetuadas, valores esperados, etc.;
 - observar se existem cercas próximas à estrutura do equipamento e/ou aterramento, existindo, verificar se estão seccionadas e/ou aterradas corretamente.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	12 de 106

b) Materiais

Verificar os utilizados nos aterramentos novos ou existentes e se atendem, no mínimo, às seguintes condições:

- conformidade com os padronizados (aterramentos existentes) / especificados no projeto (aterramentos novos);
- são adequados ao tipo de solo (aterramentos existentes);
- as conexões são apropriadas a cada material (para os aterramentos existentes);
- as conexões foram corretamente executadas (aterramentos novos);
- existe a possibilidade de ocorrência de corrosão em quaisquer dos materiais (aterramentos novos);
- existe indício de corrosão (aterramentos existentes);
- existe massa calafetadora nas conexões de aperto (aterramentos novos e existentes).

c) Estrutura do Equipamento

Vistoriar as condições de montagem e execução dos aterramentos nas estruturas de redes e subestações, observando, no mínimo, se:

- os terminais de aterramento dos equipamentos estão conectados ao condutor de aterramento; o neutro da rede está conectado ou isolado do condutor de aterramento do equipamento;
- o condutor de aterramento está devidamente protegido;
- o condutor de aterramento está convenientemente conectado ao sistema de aterramento.

d) Nos Desenhos B-8 e B-9 do Anexo B encontram-se fluxogramas com as etapas necessárias para avaliação e liberação de aterramentos em redes/subestações desenergizadas e energizadas, respectivamente.

8. ATERRAMENTO DE CERCAS

8.1. Redes de Distribuição

Cercas constituídas de material condutor (em geral arame de aço zincado), localizadas até 30 m das redes de distribuição, podem vir a ser energizadas, tanto por contatos físicos acidentais, resultantes de eventuais rompimentos de condutores, como por acoplamento eletrostático e/ou eletromagnético nos casos das paralelas à rede. Como solução, essas cercas devem ser seccionadas e aterradas conforme procedimentos descritos em 8.1.1. a 8.1.3, a seguir.

8.1.1. Cercas Transversais às Redes (Cruzamentos)

- a) Devem ser seccionadas a uma distância mínima de 30 metros, de cada lado, em relação ao eixo das referidas redes. O seccionamento deve ser feito mediante o uso de seccionadores preformados com características conforme NTC-19.
- b) No trecho situado dentro da faixa estabelecida deve ser executado aterramento, com uma haste, no seu ponto central. Este não deve ser conectado ao sistema de aterramento da rede de distribuição. No Desenho B-1 é apresentado esquema de seccionamento e aterramento para este tipo de situação.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	13 de 106

8.1.2. Cercas Paralelas às Redes

- a) Neste caso devem ser seccionadas a cada 250 m, ao longo de todo o trecho, enquanto houver paralelismo situado a até 30 m do eixo da rede.
- b) Os trechos encontrados dentro da faixa estabelecida devem ser aterrados com uma haste em cada extremidade. Os aterramentos devem ser eletricamente independentes. No Desenho B-2 é mostrado esquema de seccionamento e aterramento para este caso específico.
- c) Para as situadas em locais onde seja evidente a presença de animais e/ou pessoas, recomenda-se que sejam realizados estudos de aterramentos e seccionamentos que considerem as análises dos valores de tensões de toque e passo permissíveis.

8.1.3. Cercas Próximas aos Aterramentos de Redes de Distribuição

Adicionalmente, cuidados especiais devem ser tomados com relação às cercas localizadas dentro das zonas de influência dos aterramentos em redes primárias, tendo em vista prevenir que:

- elevações de potencial no solo, ao redor do aterramento primário, sejam transferidas para pontos remotos, através dos aterramentos das cercas;
- pessoas localizadas dentro das referidas zonas de influência (também sujeitas a eventuais elevações de potencial), possam ser submetidas a diferenças de potencial elevadas, através de contato com trechos de cercas remotamente aterrados.

Não sendo viável a execução de estudos específicos para cada caso, a observância das seguintes diretrizes minimizará a probabilidade de condições inseguras.

8.1.4. Cercas Paralelas à Configuração do Aterramento

Seccionar o trecho com comprimento correspondente ao dobro da dimensão do aterramento, simetricamente à sua configuração, conforme Desenho B-3. Não existindo possibilidade de contato acidental dos condutores fase com o trecho resultante deste seccionamento, este deve ser mantido isolado da terra. Caso contrário, esta parte da cerca deve ser provida de um aterramento composto de uma haste, em seu ponto central.

8.1.5. Cercas Transversais à Configuração do Aterramento

Seccionar o trecho de comprimento correspondente ao quádruplo da maior dimensão do aterramento simetricamente à sua configuração, conforme Desenho B-4. Não havendo possibilidade de contato acidental dos condutores fase com o trecho resultante deste seccionamento, este deve ser mantido isolado da terra, caso contrário, a parte seccionada deve ser aterrada:

- em ambas as extremidades, se o aterramento do primário cruzá-la;
- apenas em seu ponto central, caso não haja esse cruzamento.

8.2. Subestações

- a) As cercas, alambrados e divisórias de áreas energizadas, devem ser conectadas na malha de terra da subestação.
- b) As cercas externas (ou muros de alvenaria encabeçados por material metálico, portões metálicos), bem como as divisórias de terreno, devem ser seccionadas e aterradas adequadamente, de forma isolada do aterramento da malha de terra da subestação.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	14 de 106

- c) As cercas externas e as divisórias de terreno, devem ser seccionadas e aterradas sempre que ocorrer a passagem de LTs e/ou RDRs por sobre as mesmas, independente do ângulo de cruzamento.
- d) O(s) aterramento(s) dos trechos de cercas externas e divisórias de terreno, poderá(ão) ser realizados em uma das opções abaixo:
- no centro, através de uma única haste;
 - nas extremidades, através de duas hastes;
 - nas extremidades, através de duas hastes interligadas por condutor de equalização.

Situações estas, dependentes dos potenciais de superfície gerados no local.

- e) Na ocorrência de cercas externas e divisórias de terreno, muito próximas de condutores periféricos da malha de terra, onde não seja possível um desacoplamento elétrico entre ambos, deve ser elaborado um estudo específico que considere seccionamentos e aterramentos diferenciados para os diversos trechos de cerca, existindo ainda, a possibilidade de se manter determinado trecho desta flutuante, a critério do projetista.

9. ATERRAMENTO DE ESTAIS

- a) Como medida de segurança, os estais devem ser aterrados para minimizar as conseqüências de eventual contato simultâneo, por uma pessoa ou animal, no estai e no aterramento adjacente, quando da ocorrência de um contato acidental de um condutor energizado com o mesmo.
- b) Quando a rede possuir o condutor neutro, este deve ser conectado aos estais.
- c) Caso o neutro não seja disponível, os estais devem ser efetivamente aterrados ou isolados.
- d) Quando necessário os aterramentos dos estais devem ser feitos da mesma maneira que os de rede.
- e) A isolação do estai deve ser feita seccionando a cordoalha de aço com isolador tipo castanha, com características adequadas ao sistema, instalado a uma altura que represente um compromisso entre um eventual contato da fase com o estai e o contato de pessoa ou animal com a porção aterrada do estai.

10. CRITÉRIOS PARA ATERRAMENTO DAS ENTRADAS DE SERVIÇO

É de fundamental importância que todos os pontos de utilização de energia sejam providos de um adequado e confiável aterramento, a fim de viabilizar o escoamento de eventuais sobretensões, garantindo a segurança pessoal dos consumidores.

São a seguir apresentadas as recomendações pertinentes ao aterramento dos diversos tipos de instalações consumidoras.

10.1. Unidades Consumidoras Atendidas em Tensão Secundária de Distribuição

- a) Para até duas unidades consumidoras monofásicas, o neutro da entrada de serviço deve ser aterrado em um único ponto, partindo da caixa de medição, com, no mínimo, uma haste, independente do valor da resistência de aterramento obtida. Esse procedimento deve ser confiável e executado de acordo com os critérios da NTD-002.
- b) Para medições agrupadas devem adotados os seguintes critérios:
- com três unidades consumidoras:
- deve ser previsto o aterramento do neutro da entrada de serviço em um único ponto, partindo do quadro para medidores, com um mínimo de duas hastes, espaçadas de pelo menos seu

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	15 de 106

comprimento. O condutor de aterramento deve ser de cobre nu, seção mínima conforme Tabela 1 da NTD-002.

- com mais de três unidades consumidoras:

o neutro da entrada de serviço deve ser aterrado em um único ponto, partindo do quadro para medidores com, no mínimo, três hastes, espaçadas de pelo menos seu comprimento. O condutor de aterramento deve ser de cobre nu de seção mínima conforme Tabela 1 da NTD-002.

- c) Como regra geral, as unidades consumidoras atendidas por transformadores instalados em redes aéreas primárias com o neutro secundário contínuo e multiterrado, devem ser orientados para executar suas instalações internas no sistema TN, em consonância com as recomendações da NBR 5410.
- d) Nos casos em que o aterramento do sistema de distribuição não viabilize a limitação dos potenciais passíveis de serem transferidos às unidades consumidoras de BT a valores adequados, como nos casos de sistemas primários com o neutro do secundário descontínuo, o consumidor deve ser orientado a utilizar nas instalações internas o esquema TT, previsto na NBR 5410, além da necessidade de instalação de dispositivo de proteção diferencial residual.
- e) Para as unidades consumidoras atendidas por redes com cabos isolados pode ser recomendada a adoção do esquema TN, devido à impossibilidade de contato eventual dos condutores fase com o neutro.

10.2. Unidades Consumidoras Atendidas em Tensão Primária de Distribuição

Juntamente com o projeto elétrico da subestação deve ser apresentado o projeto do sistema de aterramento, desenvolvido em função da corrente de curto-circuito e das características do solo, contendo: memorial de cálculo contemplando os critérios estabelecidos nas normas brasileiras pertinentes e obedecendo às exigências da NTD-001; desenhos com configuração da malha de terra; detalhes construtivos e especificações dos materiais.

O projeto do aterramento deve prever auto-suficiência, de modo a garantir as condições operacionais e de segurança, independente da sua interligação ao eventual condutor neutro do sistema supridor.

Nos cálculos dos valores dos potenciais de toque e passo permissíveis deve ser levado em consideração o tempo total para as atuações das proteções.

10.3. Centro de Medição em Edifício de Uso Coletivo

Atendidos com Transformador até 300 kVA (inclusive)

Em edifício atendido através de transformador instalado na rede aérea, o neutro e a(s) caixa(s) para medição e proteção, devem ser aterrados com, no mínimo, três hastes espaçadas de pelo menos seu comprimento e interligadas por cabo de cobre nu 50 mm². O condutor de proteção deve ser de cobre nu com seção mínima conforme Tabela A-1.

Atendidos com Transformador de Potência Superior a 300 kVA

- a) Para edifício atendido através de posto de transformação ou subestação instalado dentro da propriedade particular, deve ser elaborado projeto da malha de terra, dimensionado de modo que não apresente potenciais perigosos quando da ocorrência de curtos-circuitos. No centro de medição, o neutro e a(s) caixa(s) para medidor devem possuir um sistema de aterramento dimensionado para evitar o surgimento de potenciais perigosos em sua proximidade.
- b) Todas as partes metálicas, tais como, portas, janelas de ventilação, suportes e carcaças de equipamentos, grades, etc., devem ser interligadas ao sistema de aterramento.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	16 de 106

c) O condutor de aterramento dos equipamentos, pára-raios e partes condutoras normalmente sem tensão, deve ser cabo de cobre nu com seção mínima 35 mm². O referido condutor deve ser contínuo, isto é, sem nenhuma ligação em série com partes metálicas da instalação.

O condutor de aterramento deve ser interligado ao sistema de aterramento por processo de solda exotérmica. As ligações por meio de conectores de aperto são permitidas somente em pontos acessíveis por caixa de inspeção.

d) A construção do sistema de aterramento deve obedecer rigorosamente ao estabelecido no projeto.

e) As blindagens metálicas dos cabos de média tensão, quando a alimentação do posto de transformação for subterrânea, devem ser interligadas ao sistema de aterramento da subestação, somente em um dos lados do cabo.

11. NÍVEIS DE SEGURANÇA ACEITÁVEIS PARA OS ATERRAMENTOS

11.1. Desempenho Elétrico

As malhas de aterramento devem:

- apresentar um valor de resistência de aterramento estável ao longo do tempo; para a obtenção desta característica não se deve utilizar na confecção da malha, materiais que possam ser lixiviados ou tenham suas propriedades alteradas dentro da vida útil prevista para esta;
- apresentar capacidade de condução de corrente compatível com os valores aos quais estará submetida, o que implica material especificado para a confecção das mesmas e do cabo de descida apresentem curvas tempo x corrente, compatíveis com os tempos de operação da proteção contra sobrecorrentes, associada;
- garantir um valor de resistência de aterramento compatível com os requisitos de proteção de equipamentos e da rede, limitando as sobretensões originárias de surtos atmosféricos a valores suportáveis por equipamentos e estruturas;
- evitar flutuações de tensão do neutro, garantindo que o potencial deste condutor seja sempre o mais próximo possível do potencial de terra.

A verificação do valor da resistência deve ser feita logo após a execução do projeto. Para sistemas que dispõem do condutor neutro, o número de pontos de aterramento a serem inspecionados, escolhidos aleatoriamente, não deve ser inferior a 10% em relação ao universo projetado.

11.2. Desempenho Mecânico

As malhas de aterramento devem:

- a) apresentar previsão de durabilidade compatível com a vida útil do equipamento ou sistema ao qual se destinam, com materiais resistentes à corrosão dentro das características do solo onde encontram-se instaladas;
- b) garantir resistência mecânica suficiente, de modo a evitar danos ao material utilizado para sua confecção, tais como rompimento do cabo de descida, dobramento ou flambagem das hastes, bem como deterioração das conexões durante sua vida útil.

11.3. Avaliações das Medições em Campo

11.3.1. Procedimentos

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	17 de 106

- a) Desenergizar o transformador, através da abertura das chaves primárias ou desconectando-o da rede primária.
- b) Desconectar a prumada do aterramento das demais ligações (para-raios, equipamentos, neutro, etc.).
- c) Medir a resistência de aterramento.
- d) Injetar no aterramento uma corrente através de uma fonte auxiliar (p. ex. 0,30 A).
- e) Medir as tensões de passo e toque.
- f) Calcular a mínima corrente de curto-circuito fase-terra (I_{ccftm}).
- g)
- h) Referir a tensão de passo ou toque medida, para a corrente de curto-circuito calculada.

Exemplo: $V_{passo\ medida} = 1,20\ V$ (utilizando uma corrente de 0,30 A)

Corrente de curto-circuito fase-terra mínima calculada = 100 A

$V_{passo} = (V_{passo\ medida} \times I_{ccftm}) / 0,30A = (1,20 \times 100) / 0,30 = 400\ V$

- i) Com o valor da tensão e resistividade superficial do solo, determina-se um ponto no Gráfico A-1 - Tensões de Passo Admissíveis e no Gráfico A-2 - Tensões de Toque Admissíveis, respectivamente.
- j) Caso este ponto se situe ABAIXO da curva de tempo total de atuação da proteção, os potenciais de passo ou toque estão dentro dos níveis de segurança.
- k) Caso este ponto se situe ACIMA da curva anteriormente referida, os potenciais de passo ou toque não estão dentro dos níveis de segurança.
- l) Para que os valores das tensões fiquem dentro dos níveis aceitáveis de segurança, devem ser analisadas algumas alternativas:
 - diminuir os ajustes de tempo de atuação das proteções, diminuindo-se conseqüentemente, o tempo de exposição a essas tensões;
 - trabalhar a configuração do aterramento de modo a homogeneizar as tensões de passo nos pontos críticos;
 - isolar o cabo de descida até a altura de 3 m do solo, quando houver problema com o potencial de toque;
 - trabalhar o solo de forma a aumentar o valor da resistividade da camada superficial.

11.3.2. Exemplo de Aplicação

a) Dados de entrada:

- Resistividade superficial = 2890 $\Omega.m$.
- $I_{ccftm} = 100\ A$.
- Tensão de passo = 1,20 V para 0,30 A.
- Tensão de toque = 0,45 V para 0,30 A.
- Curva de tempo = 7 s.

b) Análises dos níveis de segurança em condição de falta:

Condição de segurança:

Os pontos determinados por "resistividade superficial x tensão de passo máxima admissível" e "resistividade superficial x tensão de toque máxima admissível" devem ficar abaixo das curvas

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	18 de 106

identificadas pelo tempo total de atuação da proteção nos Gráficos A-1 e A-2, "Tensões de Passo Admissíveis" e "Tensões de Toque Admissíveis", respectivamente.

Referindo-se às tensões de passo e toque medidas, 1,20 e 0,45 V, respectivamente, para a corrente de curto-circuito fase-terra mínimo, ($I_{ccftm} = 100 \text{ A}$), tem-se:

$$V_{passo} = 1,20 \text{ V} \times \frac{100 \text{ A}}{0,30 \text{ A}} = 400 \text{ V}$$

$$V_{toque} = 0,45 \text{ V} \times \frac{100 \text{ A}}{0,30 \text{ A}} = 150 \text{ V}$$

Com as tensões de passo e toque referidas e sabendo que a resistividade superficial é $2890 \Omega.m$, localizam-se os pontos nos respectivos gráficos do Anexo A.

Gráfico A-1 - Tensões de passo admissíveis (400 V, $2890 \Omega.m$)

Gráfico A-2 - Tensões de toque admissíveis (150 V, $2890 \Omega.m$)

Localizados esses pontos nos gráficos, verificar se estão dentro dos níveis aceitáveis de segurança, ou seja, encontram-se abaixo da curva de tempo determinada pelo tempo total de atuação da proteção para uma falta fase-terra no local.

Com o tempo de atuação da proteção (no exemplo 7 s), observa-se que os pontos situados nos respectivos gráficos, estão abaixo das curvas, concluindo-se assim, que o aterramento apresenta segurança para a condição de falta.

c) Conclusão:

O aterramento é viável, sob os aspectos de segurança, para a condição de falta.

12. MATERIAIS PADRONIZADOS

12.1. Aterramentos em Redes de Distribuição

12.1.1. Eletrodos

Devem ser utilizados eletrodos dispostos horizontal ou verticalmente no solo, formados basicamente por:

- cabo de cobre nu com seção mínima 50 mm^2 ;
- cabo de aço cobreado com seção mínima 50 mm^2 ;
- cordoalha de aço galvanizado com seção mínima 95 mm^2 ;
- hastes de aço cobreado com 16 mm de diâmetro e 2400 mm de comprimento;
- hastes de aço cobreado rosqueáveis 16 ou 19 mm de diâmetro e 2400 mm ou 3000 mm de comprimento, com luva de emenda de latão;
- hastes de aço galvanizado tipo cantoneira com dimensões $5 \times 25 \times 25 \times 2400 \text{ mm}$.

12.1.2. Condutor de Aterramento

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	19 de 106

Os condutores de ligação dos equipamentos a serem aterrados à malha de terra devem ser, uma das opções abaixo listadas:

- cabo de cobre nu 25 mm²;
- fio de aço cobreado, diâmetro 5,2 mm (4 AWG);
- cordoalha de aço galvanizado SM, diâmetro 6,4 mm (1/4").

12.1.3. Conexões

Quando entre condutores de cobre ou condutores e hastes de aço cobreado, devem ser feitas através de solda exotérmica ou conectores em bronze ou liga de cobre fundido.

Sendo realizadas com conectores de aperto deverão ser envoltas com massa calafetadora.

12.1.4. Seccionamento e Aterramento de Cerca

O seccionamento deve ser feito com seccionador preformado com capacidade de ruptura mínima 450 daN (cercas de arame farpado) e 900 daN (cercas de arame liso), características conforme NTC-19 da CELG D.

O aterramento deverá ser processado através de haste cantoneira com dimensões 5 x 25 x 25 x 2400 mm e cordoalha de aço diâmetro 6,4 mm (1/4"), ambas em aço galvanizado.

12.2. Aterramentos em Subestações

Os materiais a serem empregados nos aterramentos de subestações serão determinados pelo projeto da malha de aterramento da mesma e devem ser dimensionados para suportar a todos os esforços provenientes da corrente de falta a que estarão submetidos, sem causar danos elétricos, mecânicos, químicos ou perigos térmicos às pessoas. Os dimensionamentos devem ser feitos em concordância com os critérios definidos no Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005.

Os materiais devem ainda atender aos requisitos mínimos estabelecidos no Projeto de Norma 03:102.01-001 - Materiais de Aterramento, da ABNT.

13. METODOLOGIAS PARA ELABORAÇÃO DE PROJETO DE ATERRAMENTO

13.1. Projeto de Aterramento de Subestação

- a) Os critérios e procedimentos para dimensionamento do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica, acima de 1 kV, quando sujeitas a solicitações em frequência industrial, são definidos no Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005 Sistema de aterramento de subestações, o qual estabelece, também, as condições de segurança para pessoas e instalações dentro e fora dos limites da subestação.
- b) O projeto do referido sistema deve ser realizado para a condição de falta para a terra e envolve o dimensionamento dos condutores da malha, para suportar os esforços térmicos decorrentes da circulação de correntes de curto-circuito, bem como o estabelecimento de uma geometria de malha adequada para o controle dos potenciais de passo e toque, causados pelo processo de dissipação da malha para o solo de parte ou toda a corrente de falta.
- c) O dimensionamento do sistema de aterramento é composto, basicamente, das seguintes etapas.

13.1.1. Modelagem do Solo (Estratificação do Solo)

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	20 de 106

- a) A modelagem do solo do local ou de uma região onde será elaborado o projeto de aterramento deve ser realizada através de medições de curvas de resistividade aparente em diversos pontos, com o objetivo de definir as camadas verticais, suas profundidades e respectivas resistividades.
- b) A estratificação do solo deve ser feita de acordo com os métodos apresentados no Anexo D desta norma, em compatibilidade com a norma NBR-7117 (em revisão pelo Projeto de Norma 03:102.01-004) que estabelece os critérios para a determinação da referida modelagem.

13.1.2. Geometria Básica da Malha

- a) A etapa inicial do dimensionamento de uma malha de aterramento consiste na seleção de uma geometria básica, a qual deve considerar a delimitação da área a ser abrangida pela mesma e o arranjo inicial dos condutores.
- b) Uma vez escolhida a referida área, deve-se determinar uma configuração inicial para o lançamento dos eletrodos que constituirão a malha. O critério de definição da geometria inicial da mesma deve levar em consideração a distribuição dos equipamentos e edificações existentes no interior da área em questão, bem como o modelo de solo (já previamente determinado).
- c) Dentre as características de geometria básica de uma malha de aterramento de subestação cabe citar:
 - profundidade de enterramento mínima 0,50 m, recomendada por razões mecânicas, sendo admitido 0,25 m em áreas de piso de concreto ou devido a um substrato rochoso muito superficial;
 - condutor periférico no entorno das edificações (1 m para fora das paredes externas, sempre que possível).

Nota:

No caso particular de instalações onde a SE é apenas um elemento em um conjunto bem mais amplo, o qual pode inclusive incluir outras subestações, áreas de processo etc., pode ser necessária a elaboração de algumas alternativas de sistemas de aterramento, integrados ou não, tendo em vista a minimização dos valores de elevação e transferência de potencial entre as diversas instalações componentes do complexo.

13.1.3. Cálculo Preliminar da Resistência de Aterramento

- a) É recomendável calcular, de forma aproximada, a resistência de aterramento da malha, antes da geometria definitiva, o que é possível pela consideração inicial de que essa resistência é função da área ocupada pela malha de aterramento e da resistividade do solo onde esta se localizará.

Esta relação é expressa por:

$$R = \frac{\rho_a}{4r} \quad [1]$$

onde:

R - resistência de aterramento (Ω).

ρ_a - resistividade aparente do solo ($\Omega.m$) (para o cálculo da resistividade aparente consultar o Anexo D).

r - raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento constituído pelos eletrodos horizontais (m).

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	21 de 106

b) A partir da geometria inicial da malha, o comprimento aproximado dos condutores a serem enterrados pode ser obtido pelo somatório das extensões dos eletrodos horizontais lançados, permitindo que a resistência de aterramento seja calculada pelas expressões a seguir:

I - Para malhas enterradas a uma profundidade até 0,25 m:

$$R = \frac{\rho_a}{4r} + \frac{\rho_a}{L_t} \quad [2]$$

II - Para malhas enterradas numa profundidade compreendida entre 0,25 e 2,5 m:

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{L_t} \right) + \left[\frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \right] \cdot \left[1 + \frac{1}{(1 + H \cdot \sqrt{20 \cdot A})} \right] \right\} \quad [3]$$

onde:

Lt - comprimento total de condutores enterrados, em m;

H - profundidade da malha, em m;

A - área ocupada pela malha, em m².

Os cálculos das resistências de aterramento acima são conservativos no caso de malhas contendo hastes verticais.

13.1.4. Dimensionamento do Condutor da Malha

O condutor da malha de terra deve ser dimensionado considerando os esforços mecânicos e térmicos que este pode suportar, de acordo com os critérios do Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005 - Sistema de aterramento de subestações - critérios e procedimentos.

O dimensionamento deve considerar a corrente de curto-circuito plena. Esta corrente circulará pelo condutor de aterramento no ponto de ocorrência do curto, e se subdividirá na malha proporcionalmente às resistências equivalentes no ponto de injeção da corrente. Isto leva à possibilidade de utilização de condutores de malha, dimensionados para correntes inferiores à de curto plena.

13.1.4.1. Dimensionamento mecânico

Os condutores de aterramento e da malha devem suportar corrosão e os esforços mecânicos.

As seções mínimas dos condutores da malha de aterramento são:

- cabo de cobre nu: 50 mm²;
- cordoalha de aço galvanizado: 38 mm² (Ø 5/16").

13.1.4.2. Dimensionamento térmico

O condutor deve ter uma seção capaz de suportar a circulação de uma corrente de falta máxima durante um tempo, sem que a temperatura se eleve acima de um valor limite suportável, considerando uma temperatura ambiente e que toda energia térmica fica retida no condutor devido à pequena duração da corrente de curto. A seção mínima do condutor de aterramento deve ser calculada de acordo com a formulação contida no Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005.

13.1.5. Cálculo das Tensões Permissíveis

Para um sistema de aterramento ser considerado seguro para qualquer condição de defeito é necessário definir os valores máximos permissíveis para as tensões de passo e toque.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	22 de 106

Os potenciais de passo e toque toleráveis são estabelecidos em função do tempo de eliminação do defeito (t) e da resistividade da camada superficial do solo.

Deve ser verificada a necessidade do estabelecimento de níveis de suportabilidade diferenciados para diversas áreas no interior e na periferia das instalações, face à existência de diferentes tipos de cobertura do solo (natural, brita, concreto, asfalto, etc.).

O tempo (t) deve ser escolhido de forma conservativa, de acordo com a filosofia de proteção adotada e com as características dos equipamentos de proteção utilizados.

Devem ser considerados dois casos:

- a) defeitos com duração determinada pelo sistema de proteção: a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chcd}), é dada pela expressão:

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}} \text{ (A)} \quad [4]$$

- b) defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção: a corrente permissível pelo corpo humano (I_{chld}) é dada pela tabela abaixo:

Corrente limite de longa duração (I_{chld})		
Percentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99,5%	9 mA	6 mA
50%	16 mA	10,6 mA

13.1.6. Tensões de Passo e Toque

Devem ser calculados os valores dessas tensões para cada situação, considerando as resistências envolvidas e correntes de curto-circuito de curta e de longa duração, de modo que os valores sejam inferiores às respectivas tensões máximas permissíveis pelo corpo humano.

As tensões de passo e toque devem ser calculadas de acordo com as formulações contidas no Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005.

13.1.7. Cálculo da Corrente de Malha

O sistema de aterramento de uma subestação é tipicamente constituído pela sua malha de aterramento e por todos os elementos metálicos a ela conectados, tais como cabos pára-raios, aterramentos de torres e postes de linhas de transmissão e subtransmissão, blindagem de cabos isolados, neutro multiterrado de redes de distribuição e malhas de aterramento de subestações vizinhas (ver Desenho B-5).

Quando da ocorrência de uma falta de curta duração para a terra, a corrente de falta (I_f) inicialmente injetada na malha de aterramento se dividirá por todo este sistema interligado, cabendo então a cada um dos seus componentes a função de escoar uma fração desta corrente. A corrente de malha (I_m) é a parcela da corrente de falta que escoar para o solo através da malha.

Deve-se considerar também a presença de corrente de malha de longa duração (I_{mld}) que retorna ao sistema pela malha, proveniente de sistemas com configuração capaz de gerar tal corrente, tais como rede de distribuição com transformadores monofásicos ligados entre fase e neutro.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	23 de 106

O circuito a ser considerado no dimensionamento da malha de aterramento inclui os condutores fase, neutro e terra, mutuamente acoplados. O condutor fase é responsável pelas contribuições do sistema para a corrente de falta; o neutro em conjunto com a malha, escoar esta corrente (ou uma fração da mesma) para o solo.

Os Desenhos B-6 e B-7 apresentam duas situações de distribuição da corrente de falta pelos vários caminhos existentes para retorno à fonte, sendo a corrente de malha representada por I_m . Estão representados os esquemas de um sistema de potência de transmissão ou distribuição, radial, com alimentação por apenas um lado, sujeito a uma falta à terra em uma subestação cuja malha se pretende analisar.

No Desenho B-6, onde está representada uma linha de transmissão ou distribuição que não possui cabos pára-raios, a corrente I_f fluirá integralmente da malha para o solo, sendo, portanto $I_m = I_f$. Neste caso, a corrente I_m terá um valor superior ao verificado no caso de haver condutor pára-raios (ou neutro) multiaterrado.

No Desenho B-7 são mostradas a corrente total de falta (I_f), a corrente de (I_m) e a que flui pelo circuito formado pelos cabos pára-raios e torres da linha de transmissão. Cabe observar que devido ao acoplamento magnético entre a fase em condição de falta e os cabos pára-raios, pode-se decompor a corrente que circula por estes últimos em duas parcelas, uma devido a este acoplamento (I_{mutua}) e a outra em razão da impedância dos cabos pára-raios (ou neutro) multi-aterrados (representados no Desenho B-7 por I_1 e I_2). Verifica-se que o condutor pára-raios vai drenar parte da corrente de falta, diminuindo desta forma a corrente de malha (I_m).

A formulação para o cálculo da corrente de malha simétrica eficaz e dos fatores de multiplicação que devem ser considerados para a determinação da "corrente de malha final" que será utilizada no dimensionamento da malha de terra, deve ser de acordo com o estabelecido no Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005.

13.1.8. Cálculo de Potenciais no Solo

No dimensionamento de malhas de aterramento é necessária a verificação do surgimento de potenciais perigosos, interna e externamente, quando da ocorrência de curtos-circuitos ou existência de correntes de desequilíbrios de neutro para o terra do sistema. Para tanto, deve-se calcular os valores máximos de tensão de toque e passo que podem ocorrer, bem como verificar possibilidades de ocorrência de transferência de potencial para ambas as situações.

Deve-se assim, garantir a manutenção dos valores das tensões de passo e toque calculados para cada situação (curto-circuito de curta e longa duração), abaixo das respectivas tensões máximas permissíveis.

13.1.9. Aterramento dos Equipamentos

Os aterramentos dos equipamentos e componentes da subestação devem ser feitos conforme os critérios estabelecidos no Projeto de Norma da ABNT 03:102.01-005.

13.1.10. Orientações para Construção

- a) Nas saídas de subestações, os aterramentos das redes de distribuição devem ser completamente independentes da malha da respectiva SE, sendo que o primeiro aterramento da rede deve estar afastado no mínimo 50 m da periferia da malha de terra da subestação.
- b) No caso de redes isoladas e compactas, o encabeçamento do neutro (mensageiro) no pórtico da subestação deve ser feito com a utilização de um isolador tipo bastão, classe 15 kV.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	24 de 106

- c) Nas subestações deve ser prevista a colocação de brita para atender aos valores de tensões de toque e passo admissíveis.
- d) Os portões metálicos e cercas divisórias do terreno das subestações não devem ser conectados à malha de terra destas (ver item 8.2).

13.2. Projeto de Aterramento de Redes de Distribuição

Para elaboração do referido projeto e determinação do valor máximo da resistência de aterramento de redes de distribuição e seus equipamentos de maneira a atender às condições de segurança, devem ser levados em consideração os seguintes fatores:

- possibilidade da ocorrência de riscos relacionados aos gradientes de potencial na superfície do solo superiores a 12 V/m, vizinhos aos sistemas de aterramento, em regiões com criação de gado ou circulação destes ou outros animais;
- corrente máxima permissível de 10 mA para pessoas, na situação de regime;
- para situações de defeito, considerar a corrente de curto-circuito e o tempo de atuação do sistema de proteção.

Do exposto, verifica-se a importância do conhecimento das características do solo, visto que, dependendo da resistividade superficial, os potenciais desenvolvidos pela configuração do aterramento, aflorarão à superfície com maior ou menor intensidade.

13.2.1. Delimitação de Valores para a Resistência do Aterramento

Apresenta-se a seguir um conjunto de quatro condições, das quais a de menor valor deverá ser adotada como sendo a resistência máxima para o aterramento.

Condição 1:

Adota-se a corrente permissível ($I_{perm.}$) para o indivíduo com resistência $R_{c.h.}$ e uma resistência de contato R_c com a superfície do solo, calculada com base na estratificação, para a situação de corrente de regime para a terra (I_{terra}).

$$R_{at} = \frac{I_{perm.}(R_{c.h.} + 0,5 \cdot R_c)}{I_{terra} \cdot (1 - P_d \%)} \quad (\Omega) \quad [5]$$

onde: R_{at} – valor máximo da resistência de aterramento para a condição 1, ou ainda:

$$r_{at} = \frac{I_{perm.}(R_{c.h.} + 0,5 \cdot R_c)}{(1 - P_d \%)} \quad (\Omega/A) \quad [6]$$

onde: r_{at} – valor da resistência de aterramento por ampère de corrente de terra de regime.

Condição 2:

Toma-se como base a corrente máxima permissível ($I_{perm.}$) a um indivíduo, segundo Dalziel:

($I_{perm.} = 0,116/\sqrt{t}$) e com os demais parâmetros considerados na condição 1, levados para a situação de curto-circuito com duração t ($0,3 \text{ s} < t < 3 \text{ s}$), teremos:

$$R_{at} = \frac{I_{perm.}(R_{c.h.} + 0,5 \cdot R_c)}{I_{cc} \cdot (1 - P_d \%)} \quad (\Omega) \quad [7]$$

onde: R_{at} – valor máximo da resistência de aterramento para a condição 2, ou ainda:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	25 de 106

$$r_{at} = \frac{I_{perm.}(R_{c.h.} + 0,5 \cdot R_c)}{(1 - P_d\%)} \quad (\Omega/A) \quad [8]$$

onde: r_{at} – valor da resistência de aterramento por ampère de corrente de curto-circuito para terra, para um tempo definido pela abertura da proteção.

Condição 3:

Nos pontos externos à configuração do aterramento, para uma corrente de terra (I_{terra}), limita-se o máximo gradiente de potencial a 12 V/m, o que leva à escolha e definição de valores de tensão de passo máxima suportável por um animal, nessa situação.

$$R_{at} = \frac{12}{I_{terra} \cdot (\Delta P_f\%)} \quad (\Omega) \quad [9]$$

onde: R_{at} – valor máximo da resistência de aterramento para a condição 3.

Condição 4:

Assumindo os mesmos parâmetros da condição 2 em pontos externos à configuração. O fator F ($F > 1$) representa o grau de exigência que determina as faixas de valores de resistências de aterramento R_{at} , compatíveis com aqueles obtidos nas outras condições, podendo dessa forma tanto a configuração como a seletividade do sistema indicarem o valor adequado para o referido fator.

$$R_{at} = \frac{I_{perm.} \cdot (R_{c.h.} + 2 \cdot R_c)}{I_{cc} \cdot (\Delta P_f\%) \cdot F} \quad (\Omega) \quad [10]$$

Notas:

- 1) Os fatores $P_d\%$ e $\Delta P_f\%$ são extraídos da prática de utilização (ver programa de formulação numérica) e representam:
 - $P_d\%$ - o menor valor percentual do potencial de aterramento refletido da configuração para a superfície do solo, em pontos internos a uma determinada configuração ($P_d\% < 1$), dos quais se possa tocar o aterramento;
 - $\Delta P_f\%$ - o valor percentual do potencial de aterramento refletido da configuração para a superfície do solo, em pontos imediatamente externos a uma determinada configuração e separados de 1 metro ($\Delta P_f\% < 1$).
- 2) A corrente permissível ao organismo humano para a situação de regime é aqui fixada em 10 mA.
- 3) A resistência $R_{c.h.}$, em média, é tomada como 1000 Ω .
- 4) A resistência de contato R_c é dada aproximadamente por $R_c = 3 \rho_{sup}$, onde ρ_{sup} é a resistividade superficial do solo.
- 5) O valor máximo da resistência de aterramento deve ser limitado a 100 Ω , em função do escoamento de surtos.
- 6) No caso de solos com alta resistividade, projetos específicos poderão ser desenvolvidos, os quais resultem em valores de resistência de aterramento superiores aos obtidos pelos equacionamentos acima, desde que respeitados os limites adequados para os gradientes de potencial de superfície.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	26 de 106

ANEXO A

TABELAS E GRÁFICOS

TABELA 1

SEÇÕES MÍNIMAS PARA O CONDUTOR DE PROTEÇÃO

Seção dos condutores fase S (mm ²)	Seção mínima do condutor de proteção (mm ²)
$S \leq 16$	S
$16 < S \leq 35$	16
$S > 35$	$S/2$

Fonte: NBR-5410

GRÁFICO 1

TENSÕES DE PASSO ADMISSÍVEIS

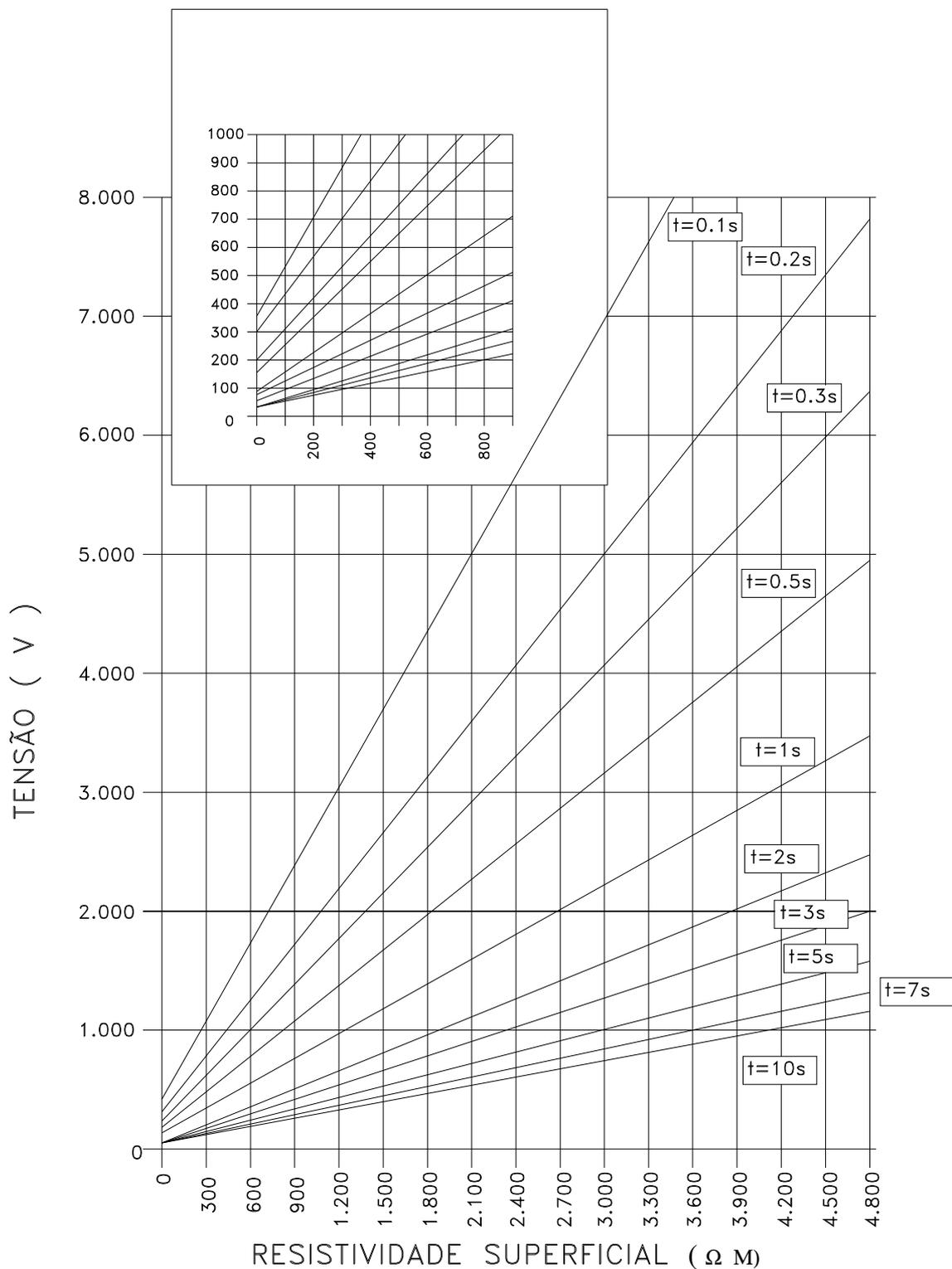
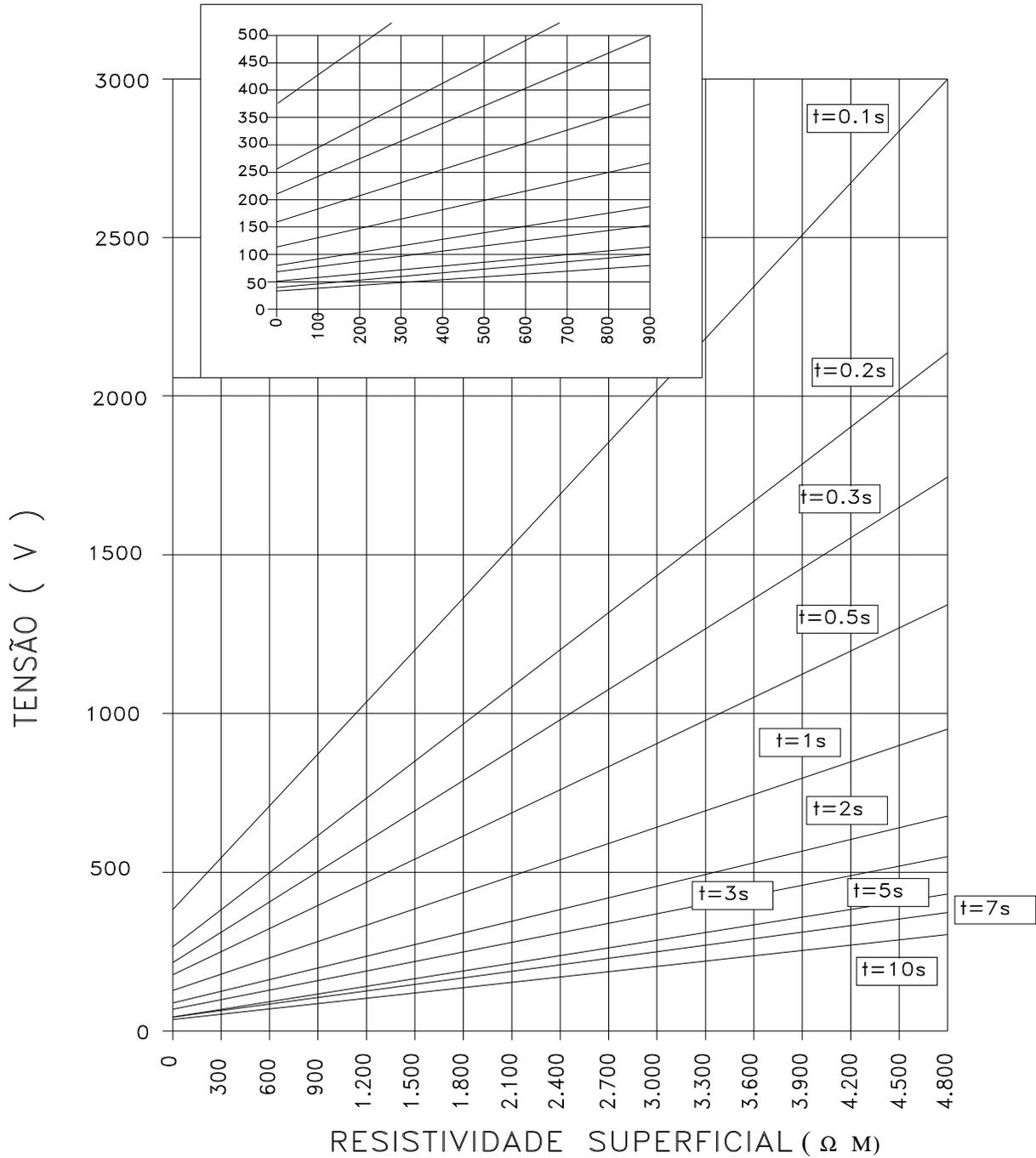


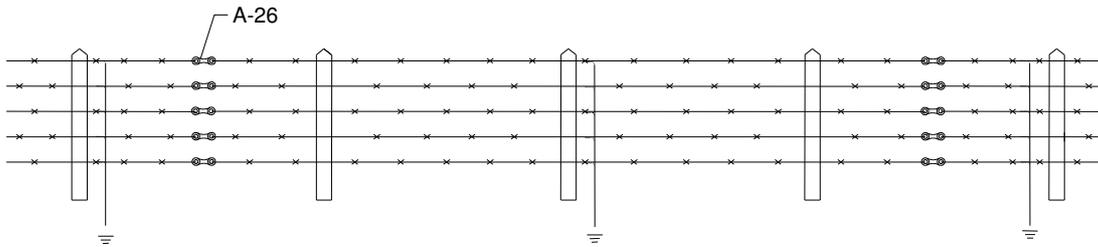
GRÁFICO 2

TENSÕES DE TOQUE ADMISSÍVEIS

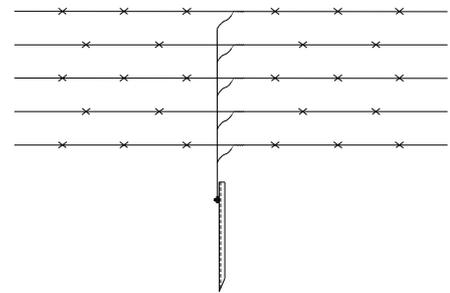


NTD	010
VERSÃO	1.00
VIGÊNCIA	01/05/16
PÁGINA	29 de 106

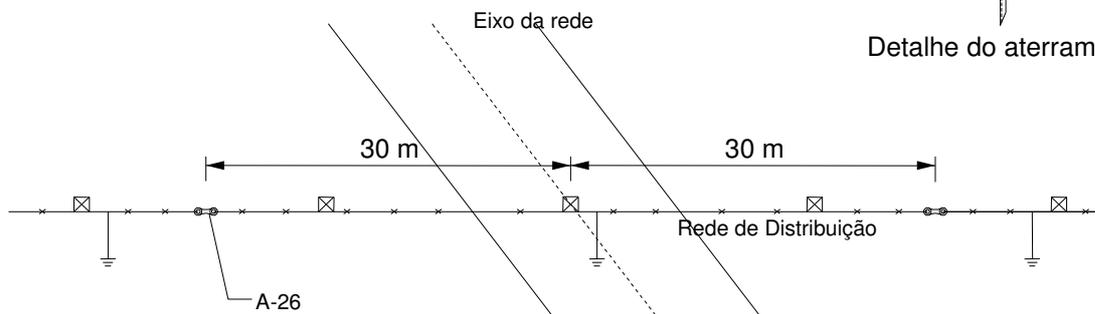
ANEXO B
DESENHOS
DESENHO 1



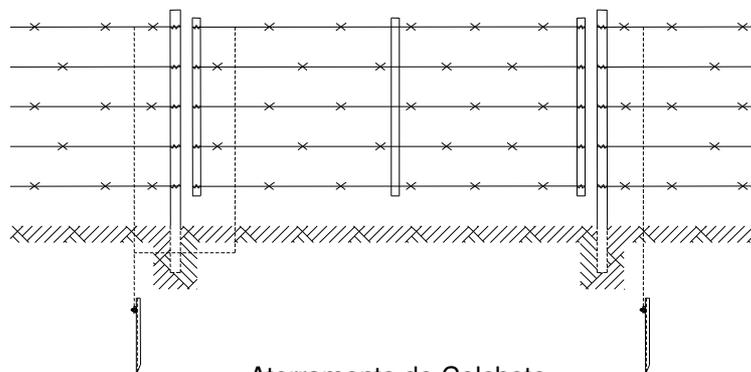
Vista Frontal



Detalhe do aterramento



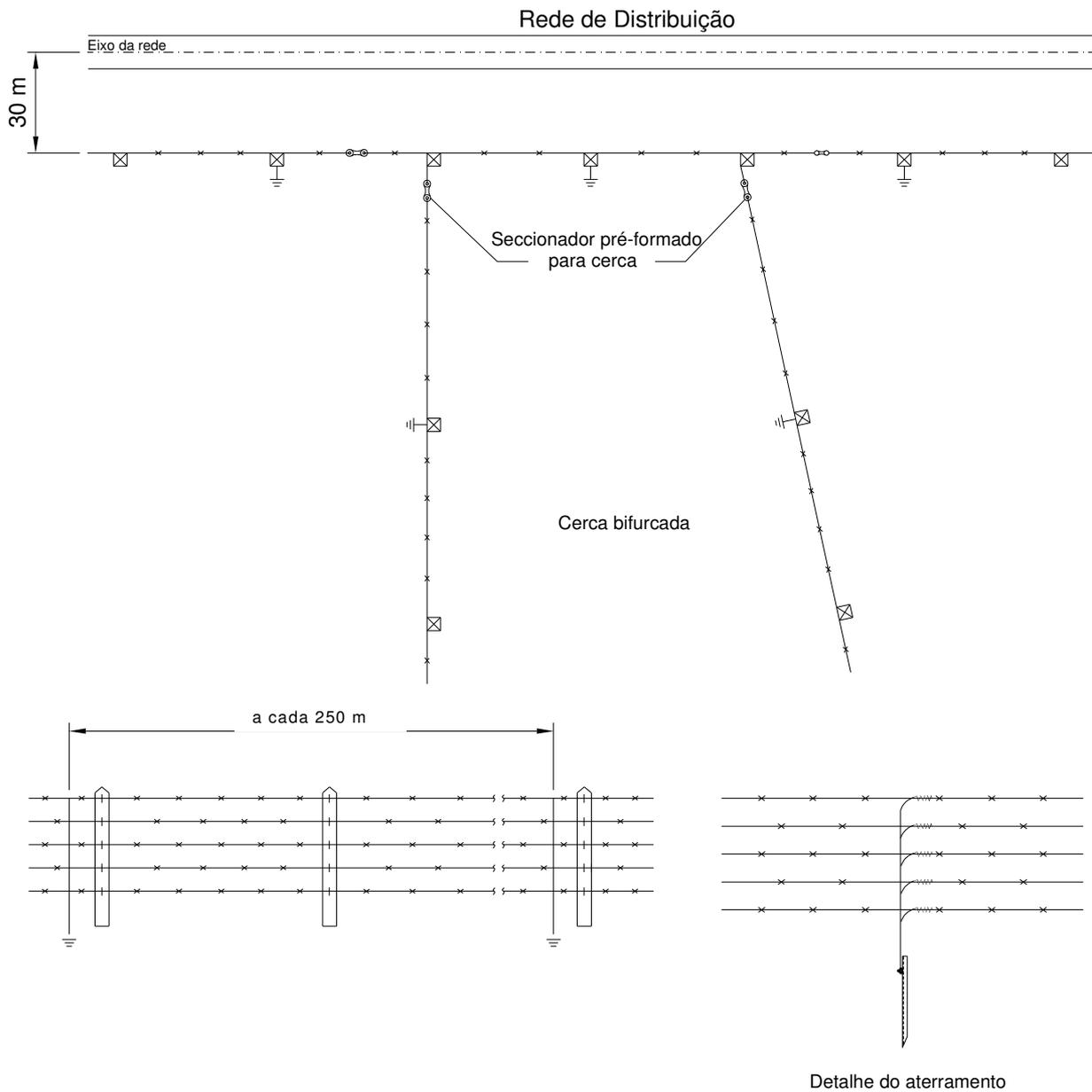
Planta



Aterramento de Colchete

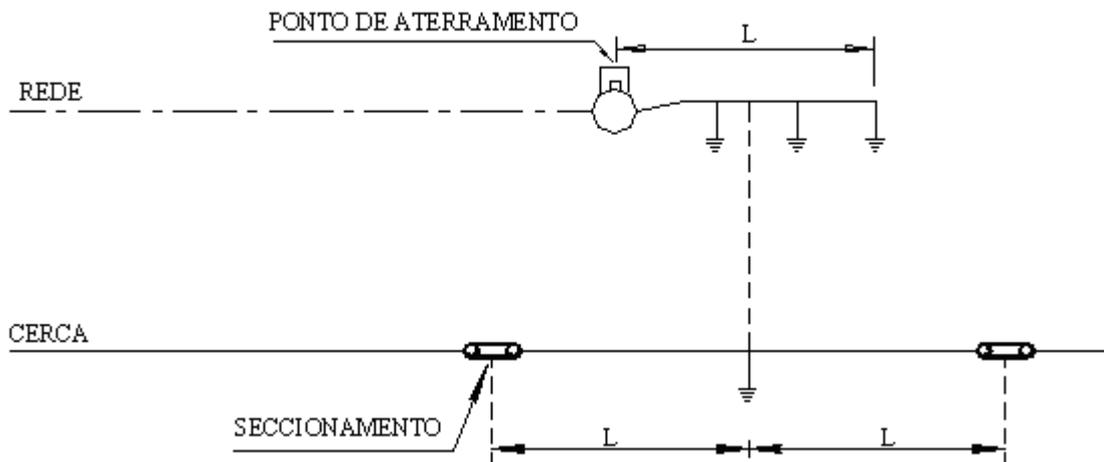
DESENHO 2

SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE
CERCA PARALELA À REDE DE DISTRIBUIÇÃO



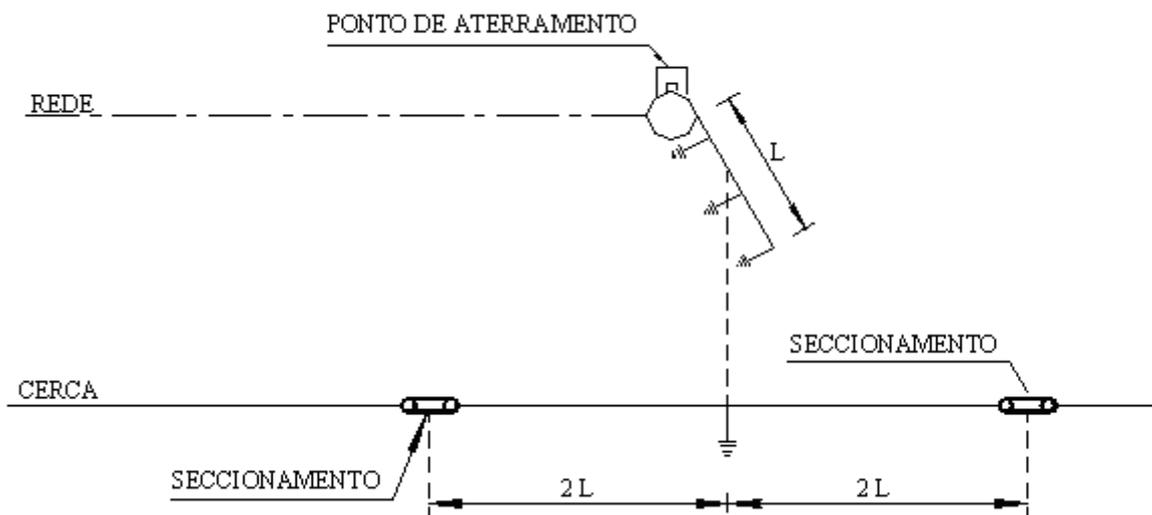
DESENHO 3

SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE CERCA PARALELA À CONFIGURAÇÃO DO ATERRAMENTO



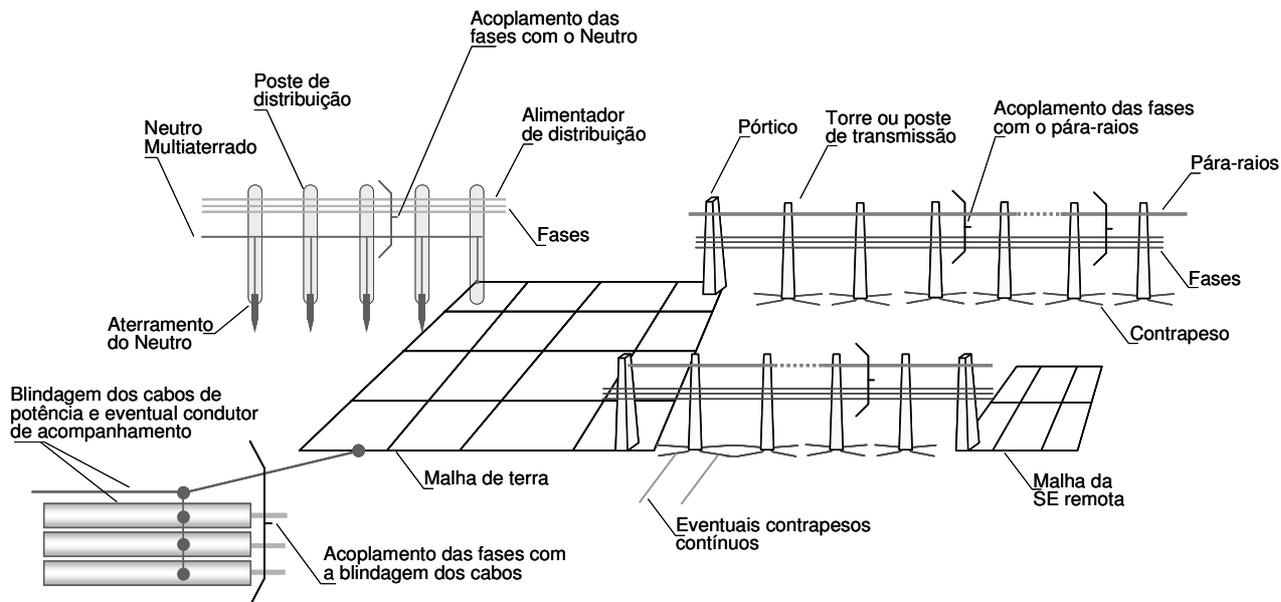
DESENHO 4

SECCIONAMENTO E ATERRAMENTO DE CERCA TRANSVERSAL À CONFIGURAÇÃO DO ATERRAMENTO



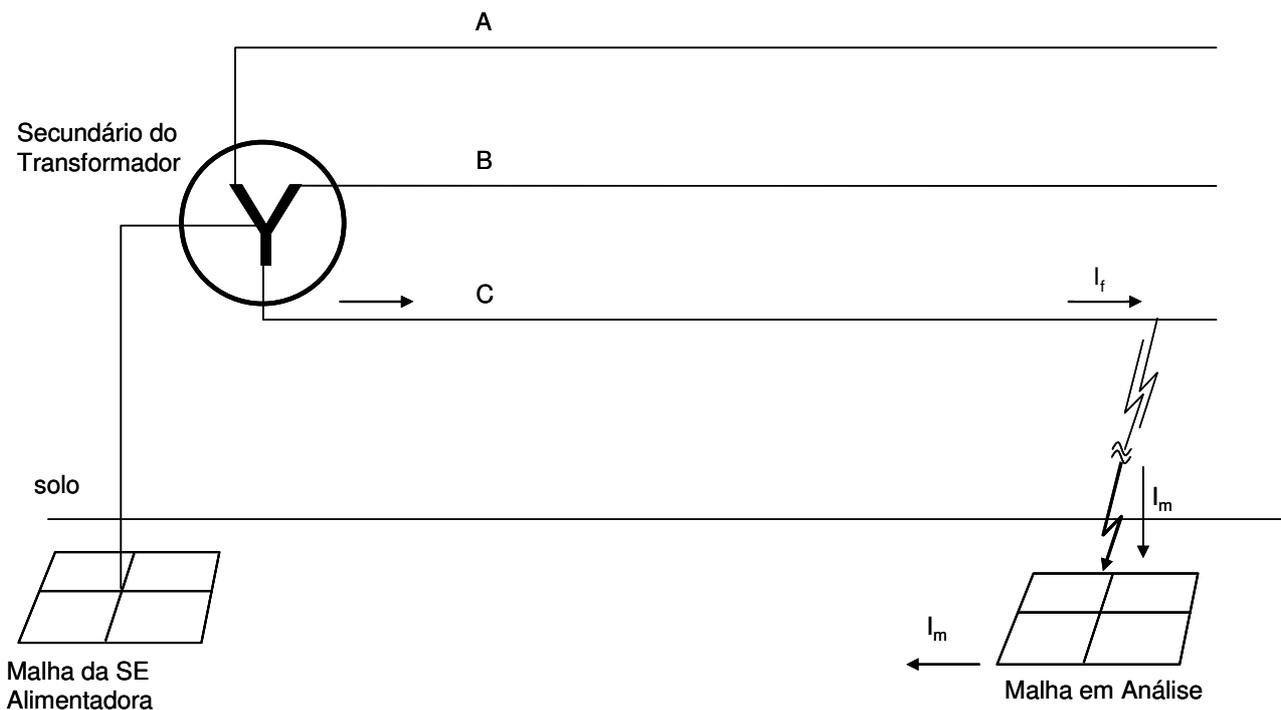
DESENHO 5

PRINCIPAIS ELEMENTOS FÍSICOS A SEREM CONSIDERADOS EM CÁLCULOS E SIMULAÇÕES PARA O DIMENSIONAMENTO DE UMA MALHA DE TERRA



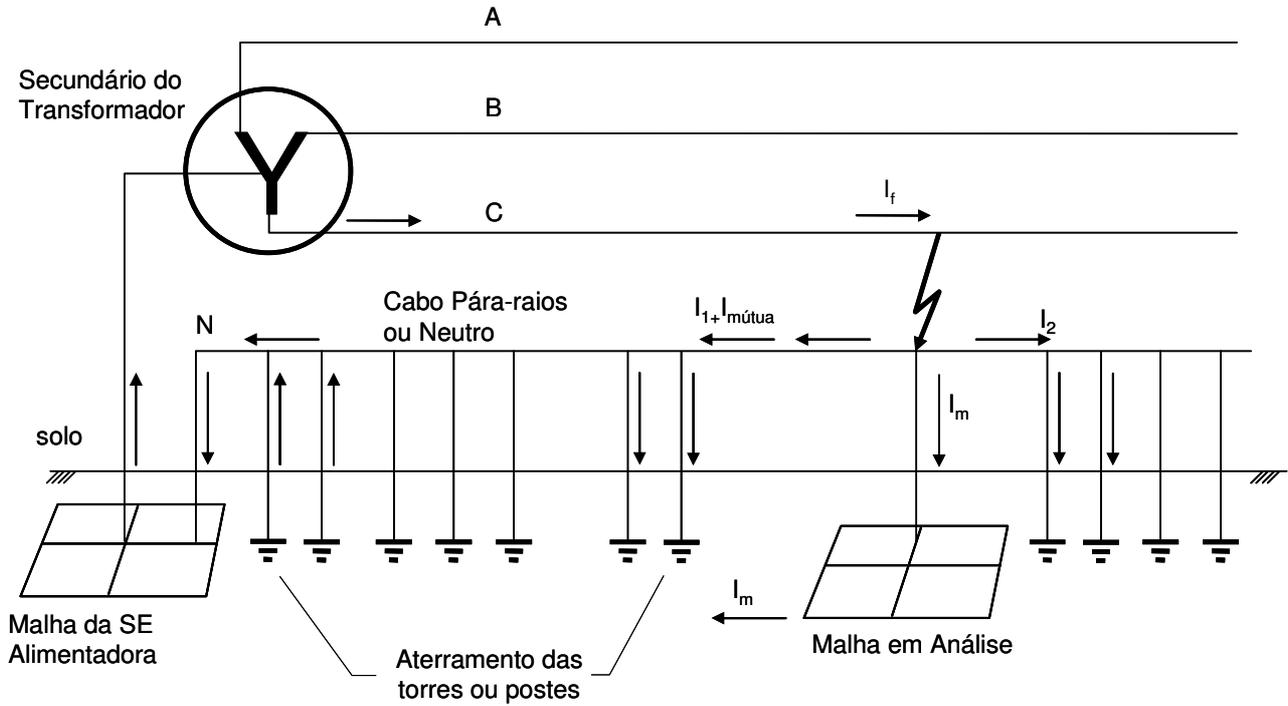
DESENHO 6

SISTEMA DE POTÊNCIA TÍPICO EM CONDIÇÃO DE FALTA PARA A TERRA, SEM CABO PÁRA-RAIOS OU NEUTRO

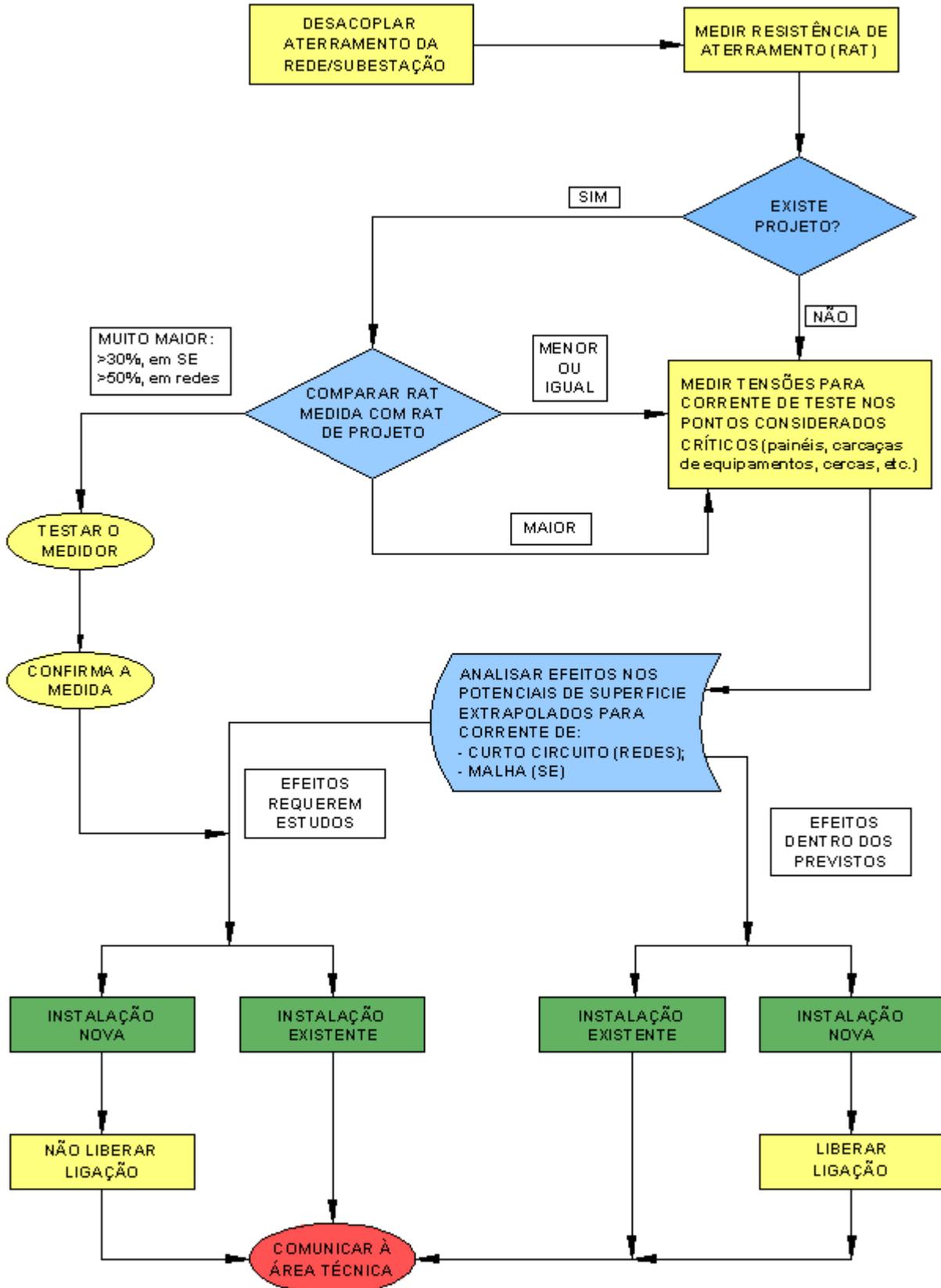


DESENHO 7

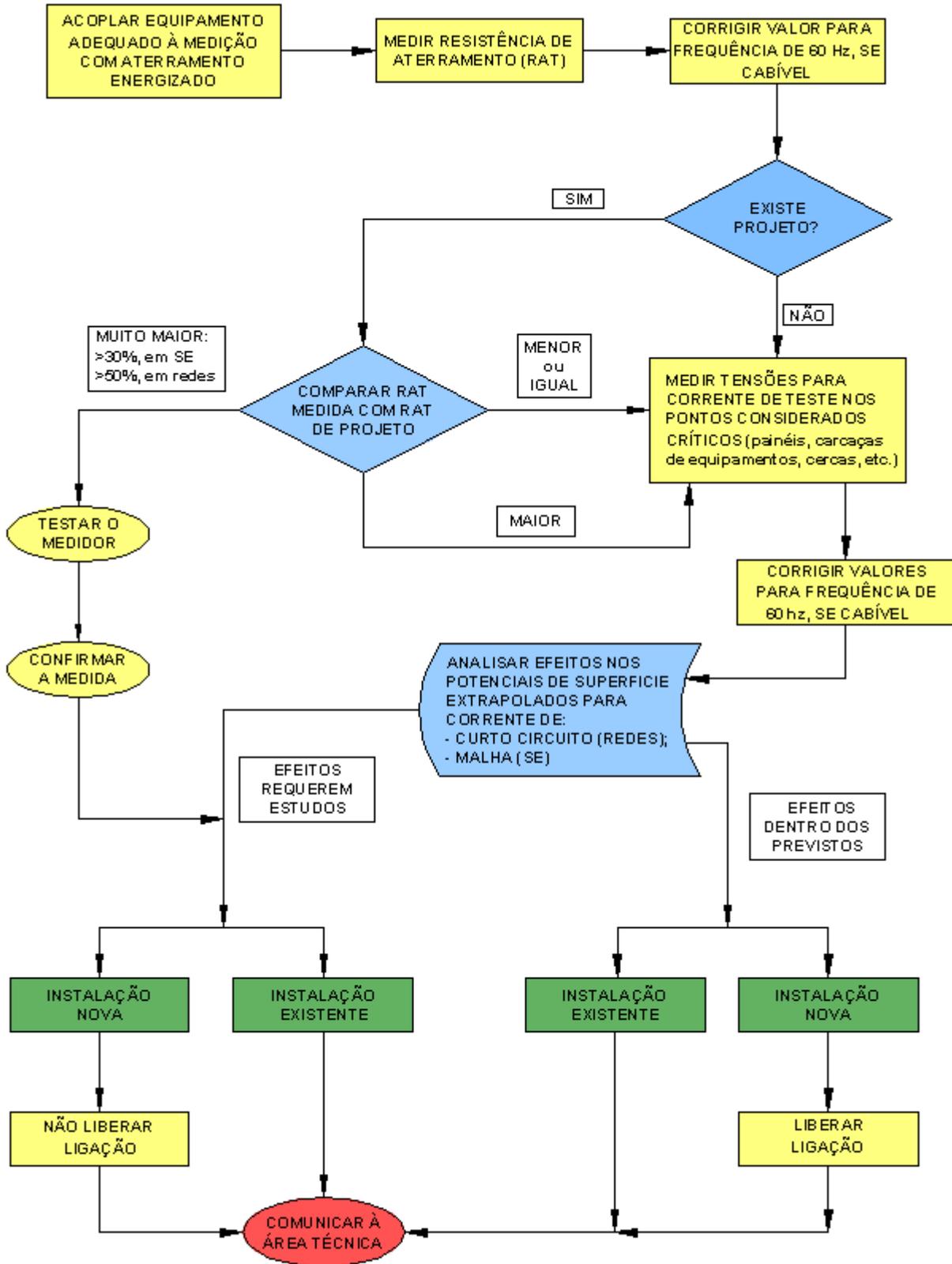
**SISTEMA DE POTÊNCIA TÍPICO EM CONDIÇÃO DE FALTA
PARA A TERRA, COM CABO PÁRA-RAIOS OU NEUTRO.**



DESENHO 8 - FLUXOGRAMA PARA INSPEÇÃO DE ATERRAMENTO DESENERGIZADO



DESENHO 9 - FLUXOGRAMA PARA INSPEÇÃO DE ATERRAMENTO ENERGIZADO



	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	36 de 106

ANEXO C - MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

C.1 GENERALIDADES

A resistividade do solo é a primeira informação necessária para o cálculo da resistência de aterramento e elaboração de um projeto de aterramento.

O valor da resistividade varia de acordo com a profundidade, percentual de umidade, tipo de material que compõe o solo, temperatura, idade de formação geológica, etc.

Para ilustrar, nas Tabelas C-1 a C-3, a seguir, são mostrados os valores típicos orientativos, para a resistividade em conformidade com as características do local.

**TABELA C-1 - VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDADE DO SOLO
DE ACORDO COM O TIPO DE TERRENO**

Tipo de Solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Alagadiços, limo, humo, lama	até 150
Argila	300 a 5000
Areia	1000 a 8000
Calcário	500 a 5000
Granito	1500 a 10000
Basalto	Acima de 10000

**TABELA C-2 - RESISTIVIDADE DO SOLO DE ACORDO COM O
RESPECTIVO ÍNDICE DE UMIDADE**

ÍNDICE DE UMIDADE (% por peso)	Resistividade ($\Omega.m$) (solo arenoso)
0	> 100.000
2,5	1.500
5,0	500
10,0	200
15,0	100
20,0	60
30,0	40

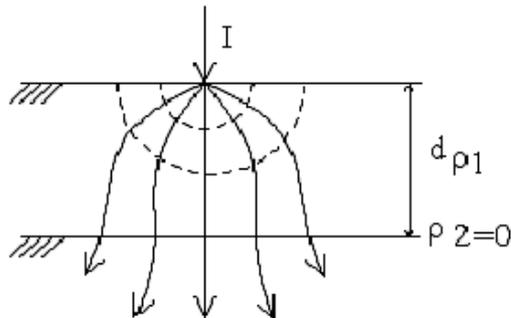
TABELA C-3 - RESISTIVIDADE DO SOLO DE ACORDO COM A TEMPERATURA

TEMPERATURA (°C)	RESISTIVIDADE (Ω.m) (solo arenoso)
20	50
10	100
0 (água)	150
0 (gelo)	300
-5	1000
-15	3000

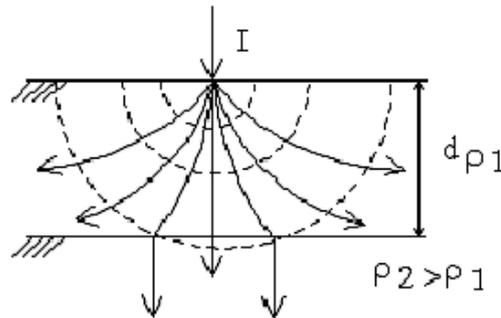
Os solos, em sua maioria, não são homogêneos e, sim, formados por diversas camadas com resistividades diferentes. Estas camadas são normalmente horizontais e paralelas à superfície do solo. Existem situações em que elas se apresentam inclinadas e até verticais devido a alguma falha geológica. Porém, os estudos apresentados para pesquisa do perfil do solo consideram-nas aproximadamente horizontais, uma vez que outros casos são mais raros.

Como conseqüência da variação de resistividade nas camadas do solo, tem-se a variação na dispersão de corrente.

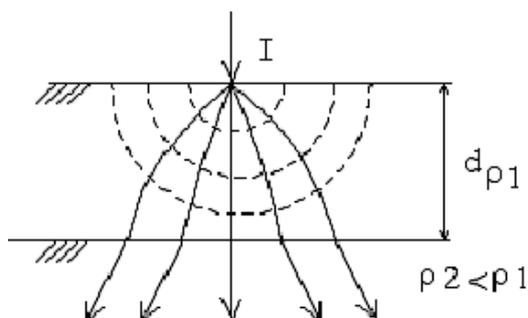
Nos Desenhos C-1 a C-4 abaixo podem ser observados os comportamentos dos fluxos de dispersão de corrente em um solo heterogêneo em torno de um aterramento.



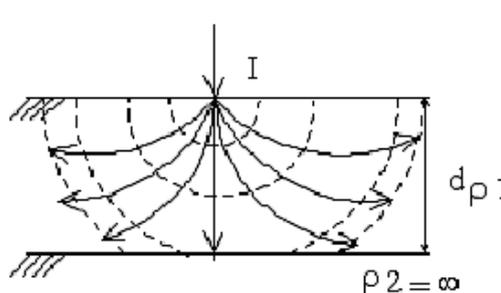
DESENHO C-1



DESENHO C-2



DESENHO C-3



DESENHO C-4

É de suma importância, portanto, o levantamento dos valores através de medições em campo, utilizando-se métodos de prospecção geoeletricos entre os quais o mais conhecido e utilizado, pela sua facilidade operacional e precisão fornecidas, é o de Wenner.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	38 de 106

C.2 MÉTODO DE WENNER

a) Consiste na utilização de quatro eletrodos, dois de corrente e dois de potencial, onde uma corrente "I" é injetada e uma diferença de potencial medida, obtendo-se assim um valor de resistência "R", o qual deve ser interpretado como a resistência do solo em uma profundidade igual à separação entre os eletrodos.

b) O valor da resistividade é calculado pela seguinte expressão:

$$\rho = 2 \pi a R (\Omega.m) \quad [C-1]$$

onde:

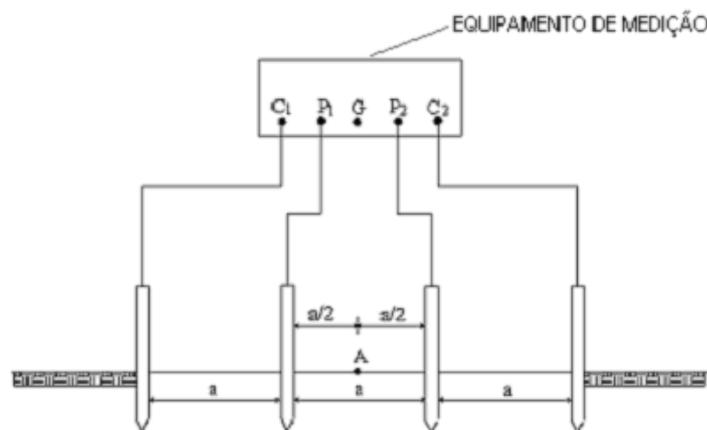
a - distância entre os eletrodos (m);

R - valor indicado pelo equipamento de medição (Ω).

c) O valor "ρ" obtido através da expressão [C-1] é o da resistividade do solo até uma profundidade igual ao espaçamento entre eletrodos.

C.3 PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÕES

a) O aparelho utilizado deve permitir uma montagem com a seguinte configuração:



DESENHO C-5

- b) É recomendado o uso de equipamento com filtro para eliminação de interferências, o qual injete corrente em frequência diferente de 60 Hz.
- c) Os eletrodos utilizados devem possuir ponteira e ter 30 ou 40 cm de comprimento, com diâmetro entre 10 e 15 mm. Deve ser preferencialmente de material não sujeito à corrosão e apresentar resistência mecânica suficiente para suportar os impactos de cravação.
- d) Os cabos de interligação devem ter isolamento de acordo com o nível de tensão aplicado pelo equipamento, além de flexibilidade e resistência mecânica adequadas. Devem ser munidos de garra tipo "jacaré" numa das extremidades, visando a facilidade de conexão aos eletrodos.
- e) Os eletrodos devem estar sempre alinhados, isentos de óxidos e gorduras, bem como serem cravados a uma profundidade aproximada de 20 cm, ou até que apresentem resistência mecânica de cravação aceitável que defina uma resistência ôhmica de contato.
- f) As distâncias entre os eletrodos devem ser sempre iguais.
- g) Se a indicação do equipamento oscilar, significa que existe alguma interferência, caso em que, o ponto de medição deve ser deslocado até ser eliminada ou minimizada a interferência.
- h) Para equipamentos que possuam o terminal "GROUND", este deverá ser utilizado para minimizar as interferências, interligando-o, através de um eletrodo, ao ponto do solo (A) objeto de medição, conforme indicado no Desenho C-5.
- i) Deverá ser anotada a condição atual do solo (seco, úmido, etc.).

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	39 de 106

- j) O croqui de locação dos pontos onde foram executadas as medidas deverá acompanhar os resultados na planilha de medição.

C.4 ESCOLHA DO LOCAL

O local escolhido para as medições deve ser sempre distante de áreas sujeitas a interferências, tais como: torres metálicas de transmissão e respectivos contrapesos, pontos de aterramento do sistema com neutro aterrado, torres de telecomunicações, solos com condutores ou canalizações metálicas, cercas aterradas, etc.

C.5 MEDIDAS DE SEGURANÇA NAS MEDIÇÕES DE RESISTIVIDADE DO SOLO

Devem ser tomadas as seguintes medidas de segurança relativas aos potenciais perigosos que podem aparecer próximos a sistemas de aterramento ou estruturas condutoras aterradas, passíveis de serem energizadas acidentalmente:

- utilizar os equipamentos de proteção individual (EPI) e coletiva (EPC) exigidos para a atividade;
- evitar a realização de medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade de ocorrência de descargas atmosféricas;
- não tocar nos eletrodos durante as medições, evitando ainda que pessoas estranhas e animais se aproximem do local.

C.6 NÚMERO DE PONTOS A SEREM MEDIDOS

Será determinado pela dimensão e importância do local, bem como pela variação dos valores encontrados nas diversas medições efetuadas.

C.7 RESISTIVIDADE MÉDIA

- a) É calculada através da média aritmética dos valores de resistividade (para cada afastamento entre eletrodos) obtidos nas séries de medições realizadas, para assim traçar a curva de resistividade média do local.
- b) O critério de aceitação do valor médio será o seguinte:
 - se o referido valor apresentar um desvio menor que 50% em relação à média dos valores, esse será aceito como representativo;
 - caso o desvio seja superior a 50%, esse valor deve ser desprezado, efetuando-se outra medição nas proximidades desse ponto; se a segunda ainda apresentar desvio percentual maior que o citado, a região deve ser considerada à parte, necessitando de outra estratificação do solo; essa situação acontece geralmente, em localidades que apresentam variações bruscas de tipo de solo, devido a acidentes geográficos.
- c) Para projetos de linhas e redes, devem ser realizadas medições de resistividade do solo de 500 em 500 m ao longo do traçado.
- d) No caso de projeto de aterramento de equipamento, basta uma medição no ponto de instalação.
- e) Quando se tratar de localidades, devem ser realizadas diversas medições em sua periferia. Nesta situação, o valor médio obtido será usado para efeito de estabelecimento de um padrão local.
- f) Caso se pretenda executar um projeto de aterramento em uma região específica, deve-se proceder ao levantamento de resistividade no exato local de execução do mesmo. Devem ser consideradas, ainda neste caso, variações desta grandeza elétrica durante o decorrer do ano, para estabelecimento de valores limites para este aterramento.
- g) Na hipótese de sistemas de aterramento interligados, como o do sistema multiaterrado da distribuição, não se deseja esse nível de precisão, visto que existe a compensação de valores quando se interligam em paralelo esses aterramentos através do condutor neutro, resultando, ainda, numa baixa resistência de aterramento equivalente para o referido sistema.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	40 de 106

ANEXO D (ORIENTATIVO) - MÉTODOS ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

D.1 GERAL

A estratificação do solo tem por objetivo definir as camadas verticais, suas profundidades e respectivas resistividades que o compõem.

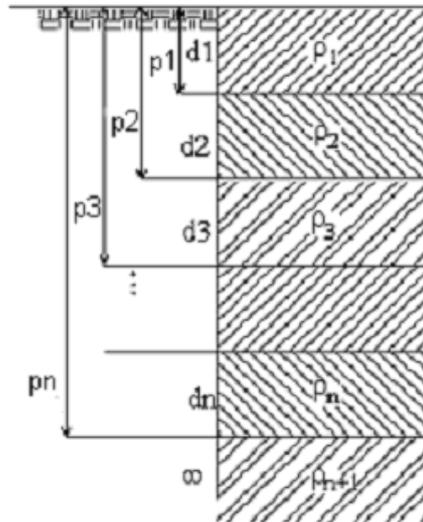
Nesta norma serão abordados com detalhes os métodos: Gráfico e Simplificado.

D.2 MÉTODO GRÁFICO

D.2.1 Procedimento

Para determinação da estratificação do solo pelo Método Gráfico deve ser adotado o seguinte:

- a) na obtenção do perfil de resistividades são utilizadas duas famílias de curvas, identificadas como Desenho D-6 - "Curvas Padrão" e Desenho D-7 - "Curvas Auxiliares";
- b) com os valores de resistividade média obtidos através de medição em campo, traçar a curva " $\rho \times a$ " representativa do local; esta curva deve ser traçada em papel semitransparente com escalas logarítmicas;
- c) dividir a referida curva em trechos ascendentes e descendentes;
- d) colocar a curva citada sobre as "Curvas Padrão" e pesquisar com qual delas o primeiro trecho da curva " $\rho \times a$ " mais se identifica, deslocando-se para tal, as curvas padrão, mantendo os eixos paralelos;
- e) escolhida a curva com uma determinada relação ρ_2/ρ_1 , transcrever a origem da curva padrão no gráfico " $\rho \times a$ ";
- f) na curva " $\rho \times a$ ", são lidas as coordenadas do pólo 01, ou seja, p_1 e ρ_1 , os quais representam a profundidade e a resistividade da primeira camada do solo, respectivamente;
- g) a resistividade da segunda camada (ρ_2) será calculada, através do valor ρ_2/ρ_1 , da curva padrão que mais se identificou com o trecho inicial da curva " $\rho \times a$ " e de ρ_1 , obtidos através de 01;
- h) a seguir, colocar o gráfico " $\rho \times a$ " sobre as "Curvas Auxiliares", de maneira que o pólo 01 coincida com a origem dessas curvas;
- i) com linha tracejada marcar na curva " $\rho \times a$ ", em análise, a curva de relação ρ_2/ρ_1 , igual a da escolhida no item d);
- j) voltar às "Curvas Padrão", fazer coincidir o pólo 01 com a origem das mesmas; deslizar a curva tracejada obtida no item acima sobre a origem das "Curvas Padrão", até que se consiga outra que se assemelhe ao segundo trecho da curva " $\rho \times a$ " em análise; ao deslizar a curva tracejada sobre a origem, deverá ser mantido o paralelismo entre as linhas verticais e horizontais da curva " $\rho \times a$ ", respectivamente, com as mesmas linhas das curvas padrão;
- k) escolhida a nova curva padrão, marcar a origem dessa sobre a curva " $\rho \times a$ "; esse ponto fornecerá o pólo 02;
- l) obtêm-se assim os valores de resistividade ρ'_2 , equivalentes da primeira e segunda camadas em relação a "P" e "a"; desde que ρ_3/ρ'_2 , neste caso, corresponda ao valor ρ_2/ρ_1 das curvas padrão, ρ_3 pode ser calculado a partir de ρ_3/ρ'_2 e de ρ'_2 , obtido a partir de 02; o valor de p_2 (profundidade da segunda camada) será obtido diretamente da leitura da abscissa de 02;
- m) havendo mais partes ascendentes e/ou descendentes, prosseguir analogamente, obtendo-se outros pólos 03, 04, etc.;
- n) de posse dos valores das resistividades das camadas do solo e suas respectivas profundidades, construir o perfil de resistividade, conforme Desenho D-1.



DESENHO D-1

D.2.2 Resistividade Aparente do Solo

- É um valor equivalente das camadas de diversas resistividades que compõem um solo não homogêneo, calculado para uma determinada dimensão do sistema de aterramento em estudo.
- Caracteriza os efeitos de dispersão, pelas camadas do solo, da corrente imposta por este sistema de aterramento.
- Num projeto de sistema de aterramento não pontual, será considerado, portanto, a resistividade aparente.
- O procedimento para determinação é o seguinte:
 - a partir da estratificação do solo, fazer a redução das suas (n+1) camadas para apenas duas;
 - a redução deve ser feita considerando-se o paralelismo de duas a duas camadas, a partir da superfície, utilizando-se a expressão a seguir:

$$\rho_{eq1,2} = \frac{d_1 + d_2}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2}} \quad [D-1]$$

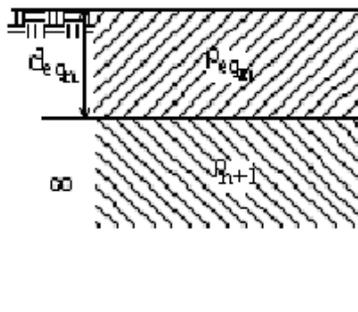
- A expressão geral para redução direta de "n" camadas é:

$$\rho_{eq1,2} = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + \dots + d_n}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3} + \dots + \frac{d_n}{\rho_n}} \quad [D-2]$$

Onde:

$\rho_{eq1,2}$ - resistividade equivalente reduzida a 2 (duas) camadas do solo ($\Omega.m$).
 $d_1, d_2, d_3 \dots d_n$ - espessuras das camadas de resistividades $\rho_1, \rho_2, \rho_3 \dots \rho_n$

- Assim, chega-se a apenas duas camadas de solo, conforme Desenho D-2.



DESENHO D-2

- f) A partir das dimensões do sistema de aterramento, determina-se o coeficiente α , o qual será dado por:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eqn}} \quad [D-3]$$

onde:

d_{eqn} - profundidade da camada equivalente obtida na redução das camadas.

r - raio do círculo equivalente que abrange a área considerada para o sistema de aterramento, dado por:

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad [D-4]$$

No caso específico de hastes alinhadas, r é dado por:

$$r = \frac{(n-1) \cdot e}{2} \quad [D-5]$$

onde:

n - número de hastes de aterramento

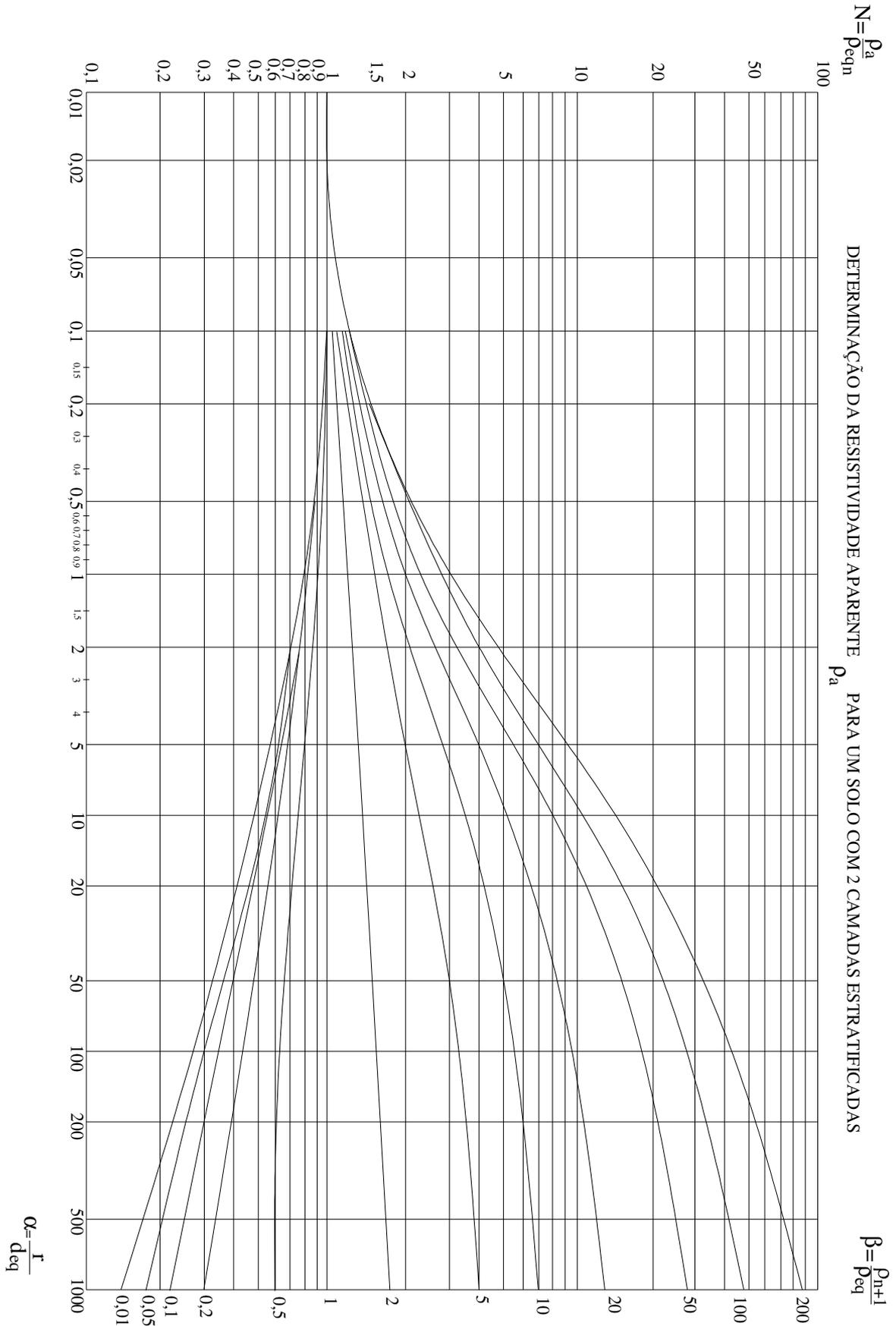
e - espaçamento entre hastes (m)

- g) De posse do coeficiente α e da relação $\beta = \frac{\rho_n + 1}{\rho_{eqn}}$, através do Gráfico do Desenho D-3,

determinar a relação $N = \frac{\rho_a}{\rho_{eqn}}$, da qual extrai-se a resistividade aparente através da expressão:

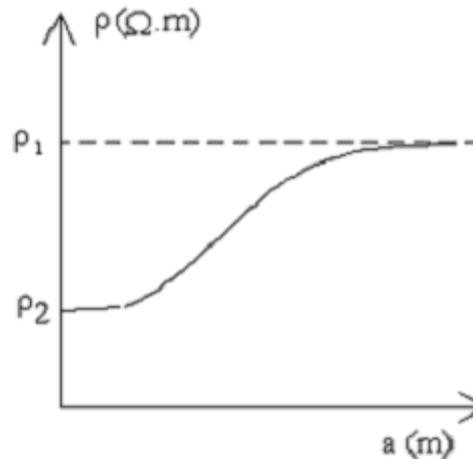
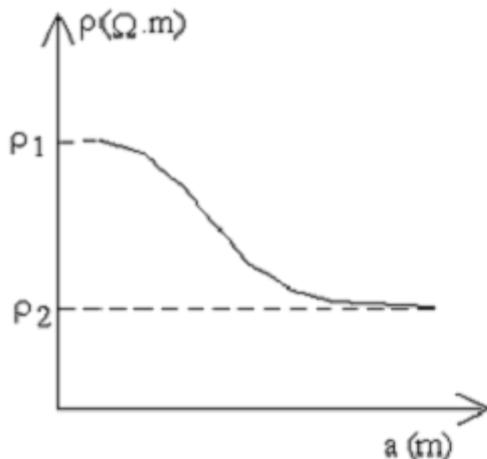
$$\rho_a = N \cdot \rho_{eqn} \quad [D-6]$$

DESENHO D-3 - DETERMINAÇÃO DA RESISTIVIDADE APARENTE ρ_A PARA UM SOLO COM DUAS CAMADAS ESTRATIFICADAS



D.3 MÉTODO SIMPLIFICADO

a) Oferece resultados razoavelmente precisos quando o solo puder ser considerado estratificável em duas camadas, ou seja, quando a curva " $\rho \times a$ " tiver uma das formas típicas indicadas nos Desenhos D-4 e D-5.



b) Definida a curva de resistividade " $\rho \times a$ ", a rotina a ser seguida para a estratificação do solo deve ser a descrita:

- prolongar a curva até interceptar o eixo das ordenadas e determinar o valor da resistividade da camada superior do solo (ρ_1);
- traçar a assíntota à curva de resistividade e prolongá-la até o eixo das ordenadas; sua interseção com esse eixo indicará o valor da resistividade da camada inferior do solo (ρ_2);
- calcular a relação ρ_2/ρ_1 ;
- a partir do resultado da relação acima, determinar o valor de M_o na Tabela D-1;
- calcular o valor de $\rho_m = M_o \cdot \rho_1$;
- com ρ_m definido acima, entrar na curva de resistividade " $\rho \times a$ " e determinar a espessura (d) da primeira camada do solo (camada superior);
- para a determinação da resistividade aparente do solo (ρ_a), proceder conforme descrito no item 2.2, obtendo-se os valores de α e β e utilizando as curvas do Desenho D-3.

$$\rho_1 = \rho_{eq} \cdot n$$

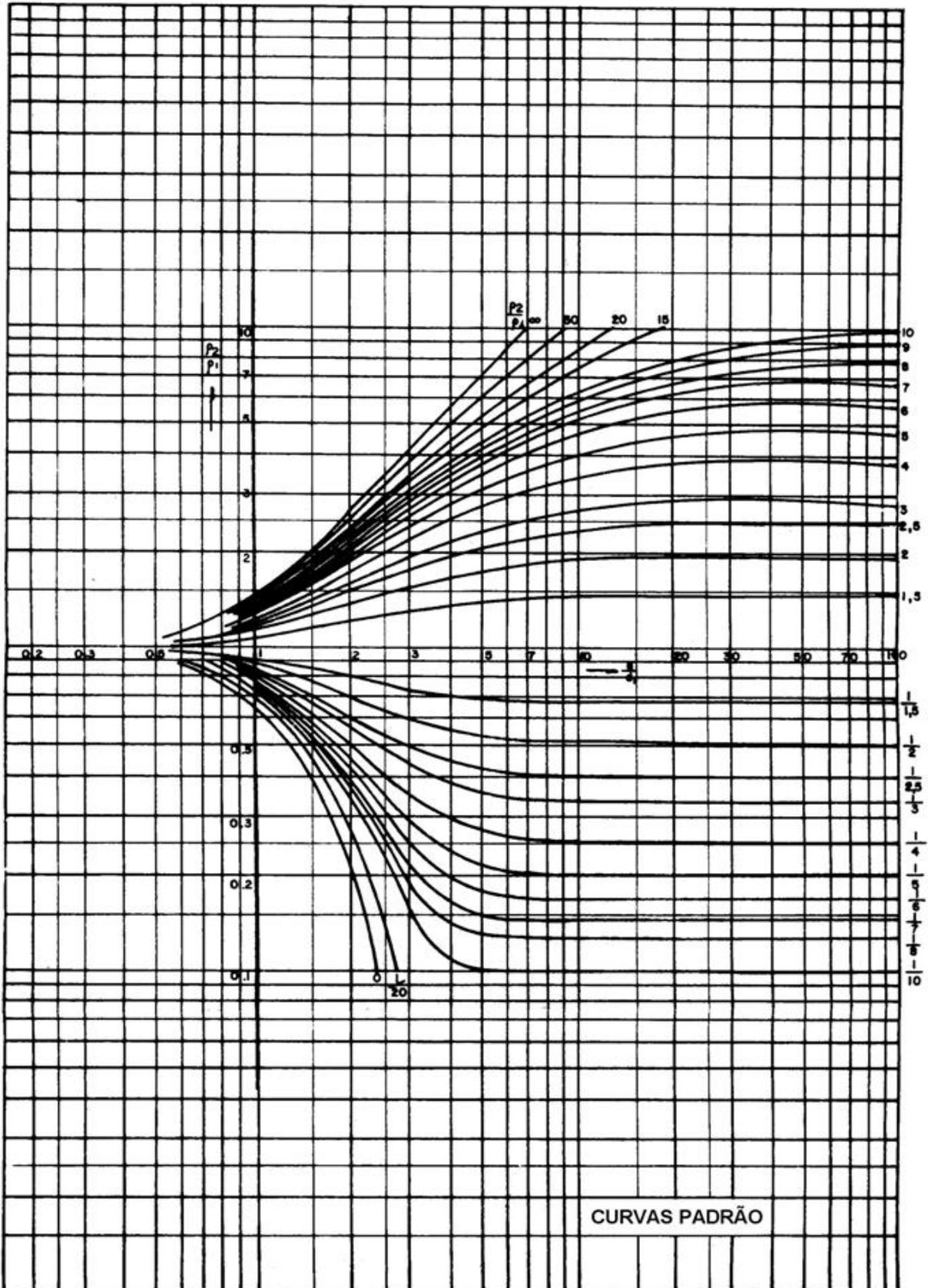
$$\rho_2 = \rho_n + 1$$

$$d = d_{eq} \cdot n$$

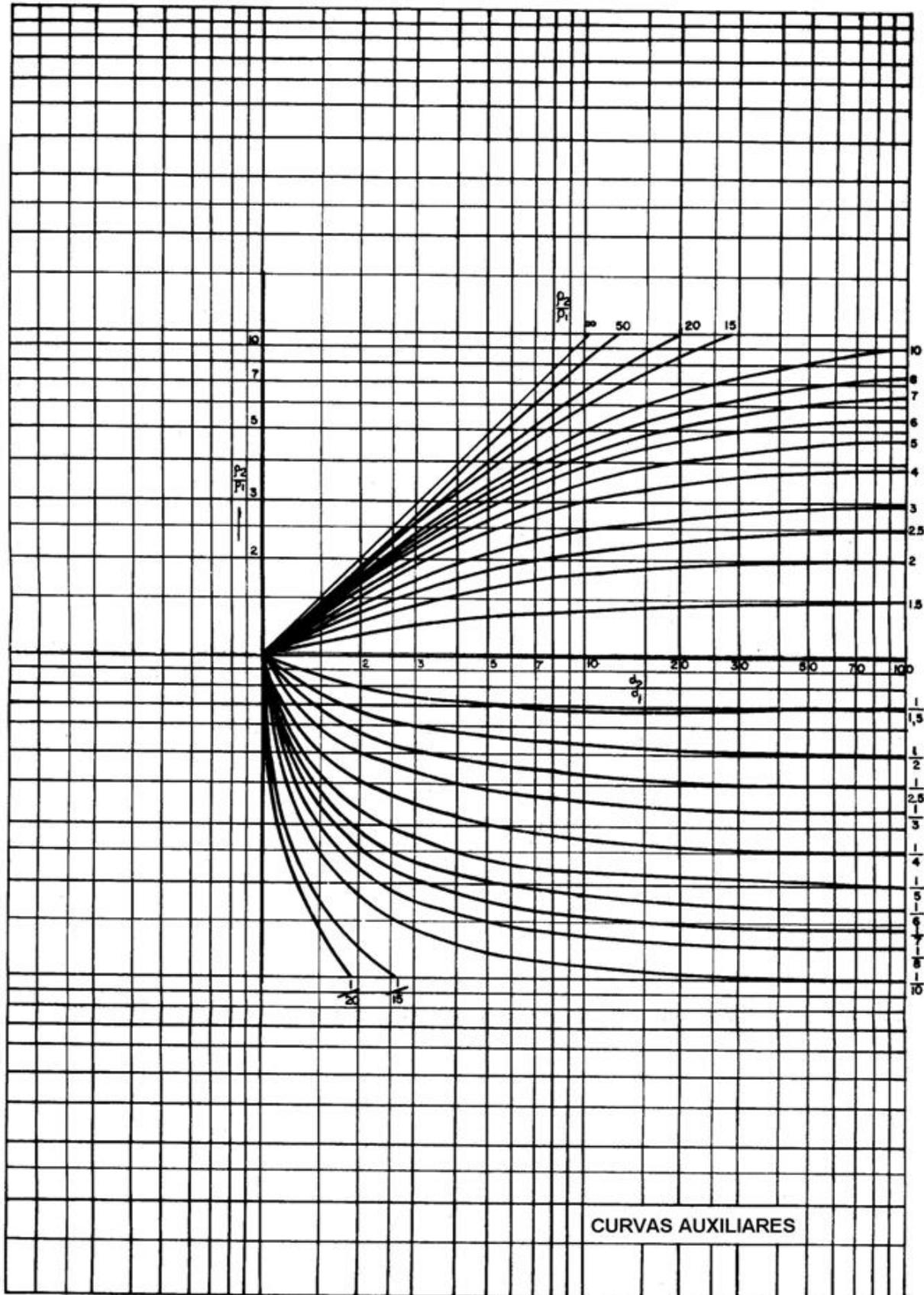
TABELA D-1

ρ_2/ρ_1	M_0	ρ_2/ρ_1	M_0	ρ_2/ρ_1	M_0	ρ_2/ρ_1	M_0
0,0010	0,6839	0,30	0,8170	6,50	1,331	19,00	1,432
0,0020	0,6844	0,35	0,8348	7,00	1,340	20,00	1,435
0,0025	0,6847	0,40	0,8517	7,50	1,349	30,00	1,456
0,0030	0,6850	0,45	0,8676	8,00	1,356	40,00	1,467
0,0040	0,6855	0,50	0,8827	8,50	1,363	50,00	1,474
0,0045	0,6858	0,55	0,8971	9,00	1,369	60,00	1,479
0,005	0,6861	0,60	0,9107	9,50	1,375	70,00	1,482
0,006	0,6866	0,65	0,9237	10,00	1,380	80,00	1,484
0,007	0,6871	0,70	0,9361	10,50	1,385	90,00	1,486
0,008	0,6877	0,75	0,9480	11,00	1,390	100,00	1,488
0,009	0,6882	0,80	0,9593	11,50	1,394	110,00	1,489
0,010	0,6887	0,85	0,9701	12,00	1,398	120,00	1,490
0,015	0,6914	0,90	0,9805	12,50	1,401	130,00	1,491
0,020	0,6940	0,95	0,9904	13,00	1,404	140,00	1,492
0,030	0,6993	1,00	1,0000	13,50	1,408	150,00	1,493
0,040	0,7044	1,50	1,078	14,00	1,410	160,00	1,494
0,050	0,7095	2,00	1,134	14,50	1,413	180,00	1,495
0,060	0,7145	2,50	1,177	15,00	1,416	200,00	1,496
0,070	0,7195	3,00	1,210	15,50	1,418	240,00	1,497
0,080	0,7243	3,50	1,237	16,00	1,421	280,00	1,498
0,090	0,7292	4,00	1,260	16,50	1,423	350,00	1,499
0,10	0,7339	4,50	1,278	17,00	1,425	450,00	1,500
0,15	0,7567	5,00	1,294	17,50	1,427	640,00	1,501
0,20	0,7781	5,50	1,308	18,00	1,429	1000,00	1,501
0,25	0,7981	6,00	1,320	18,50	1,430		

DESENHO D-6 - CURVAS PADRÃO



DESENHO D-7 - CURVAS AUXILIARES



CURVAS AUXILIARES

MODELO DE FORMULÁRIO PARA ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

LOCAL: _____ REGIONAL: _____

INSTALAÇÃO: _____

COORDENADAS: _____ / _____

CONDIÇÕES DO SOLO

MUITO ÚMIDO

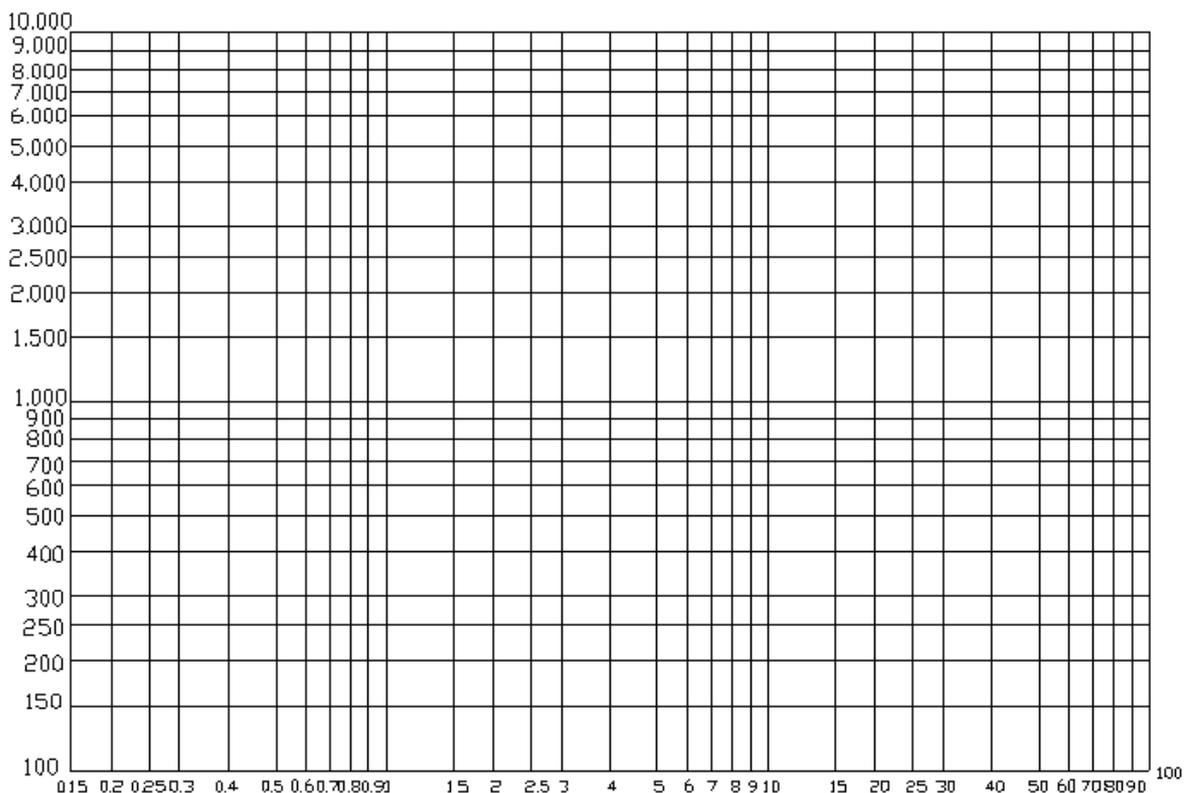
ÚMIDO

NORMAL

SECO

DATA ___/___/___

a (m)	R (Ω)	2πa	ρ = 2 π a R (Ω x m)
2		12.56	
4		25.12	
8		50.25	
16		100.50	
32		200.1	



	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	49 de 106

ANEXO E - PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÕES DE POTENCIAIS DE PASSO E TOQUE

E.1 MÉTODO A SER UTILIZADO

O método recomendado para a medição dos potenciais na superfície do solo é o da injeção de corrente (ver também método de medição da resistência de um sistema de aterramento).

E.1.1 Princípio

O método de injeção de corrente consiste em fazer circular uma corrente entre o sistema de aterramento (do qual se pretende os potenciais de superfície) e o solo, através de um eletrodo auxiliar de corrente, e medir os potenciais na superfície do mesmo através de um eletrodo auxiliar de potencial.

E.2 MEDIÇÃO DOS POTENCIAIS

E.2.1 Potenciais de Toque

A medição deve ser realizada entre as partes condutoras, tais como, estruturas metálicas, carcaças de equipamentos ligadas ao sistema de aterramento e o eletrodo de potencial cravado no solo, a 1 m de distância da referida parte envolvida (ver Desenho E-1).

E.2.2 Potenciais de Passo

Esta medição deve ser feita entre dois eletrodos de potencial cravados no solo e afastados 1 m (ver Desenho E-2).

E.2.3 Corrente a Ser Injetada no Solo

Como regra prática, pode-se estabelecer que uma elevação de potencial do sistema de aterramento, da ordem de 100 V é, na maioria das vezes, suficiente para produzir tensões na superfície do solo na faixa de Volts.

Assim, a corrente mínima a ser injetada será $I_{\min} = 100/R$, onde R é a resistência do sistema de aterramento do qual se deseja medir os potenciais.

E.2.4 Correção dos Valores de Tensão Medidos

As tensões medidas devem ser referidas ao valor real de corrente de malha (I_{malha}) determinada para a pior condição de defeito para a terra:

$$V_{\text{real}} = V_{\text{medida}} \times I_{\text{malha}} / I_{\text{ensaio}} \quad [E-1]$$

E.2.5 Medição com Pesos

Utiliza-se dois pesos de 35 kg cada (simulando uma pessoa com 70 kg) e duas resistências, uma de 1000 Ω (simulando a resistência do corpo humano) e outra de 3000 Ω (Desenhos E-3 e E-4).

E.2.6 Tensão Sobre a Pessoa

A tensão que surge sobre a pessoa é a medida nos terminais da resistência de 1000 Ω .

E.2.7 Resistência de Contato Pé-Brita (ou Solo)

Para determinação desta resistência são necessárias duas medições, com resistência de 1000 e 3000 Ω .

Esta resistência na situação de toque será:

$$R_{\text{contato}_{\text{TOQUE}}} = 2 \times \frac{(V_{3k} - V_{1k})}{\left(\frac{V_{1k}}{1000} - \frac{V_{3k}}{3000} \right)} \quad [\text{E-2}]$$

A resistência de contato pé-brita na situação de passo será:

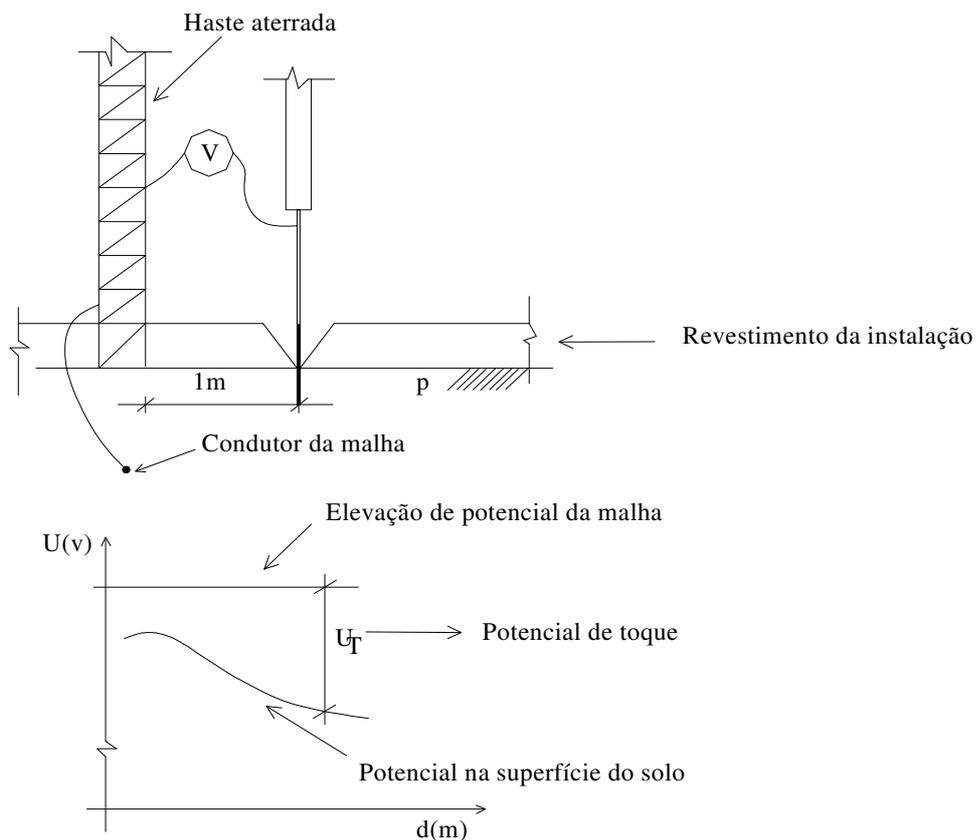
$$R_{\text{contato}_{\text{PASSO}}} = \frac{(V_{3k} - V_{1k})}{\left(\frac{V_{1k}}{1000} - \frac{V_{3k}}{3000} \right)} \quad [\text{E-3}]$$

Onde:

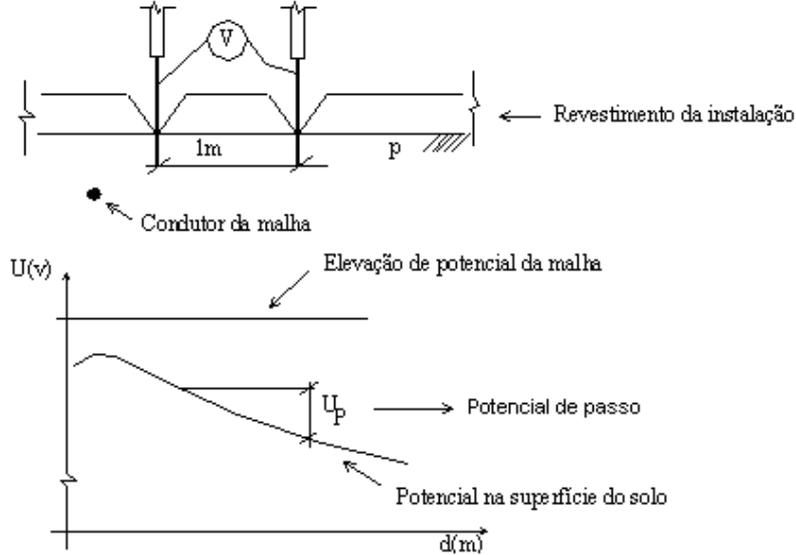
V_{1k} – tensão medida com a resistência de 1000 Ω (V)

V_{3k} – tensão medida com 3000 Ω (V)

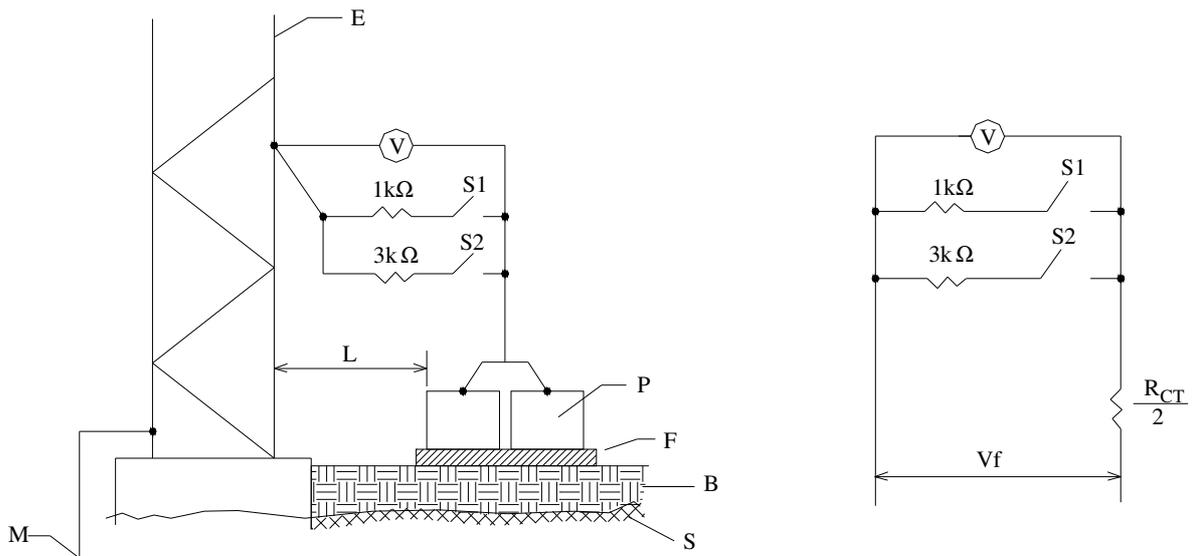
DESENHO E-1 - MEDIÇÃO DE POTENCIAL DE TOQUE



DESENHO E-2 - MEDIÇÃO DE POTENCIAL DE PASSO



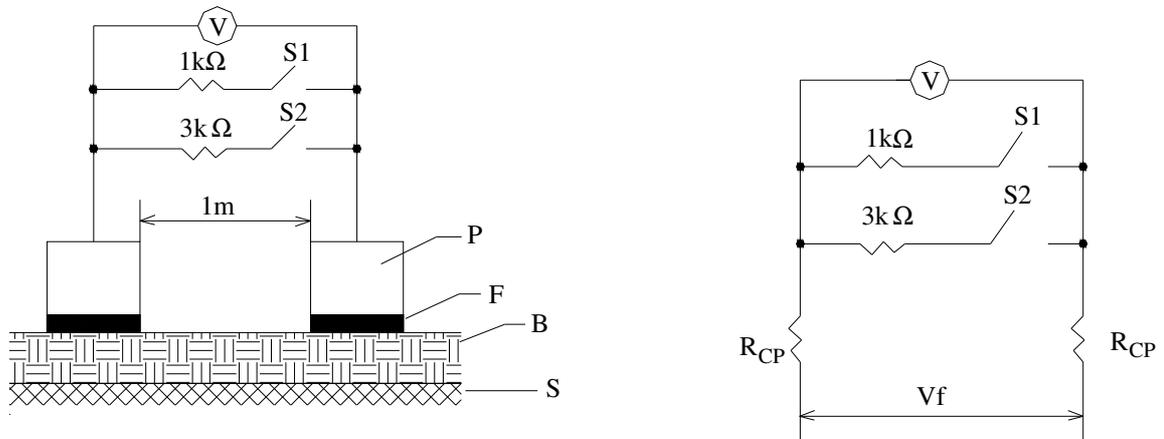
DESENHO E-3 - MEDIÇÃO DE POTENCIAL DE TOQUE COM PESOS



Onde:

- E – estrutura metálica aterrada
- M – malha de terra
- S – solo
- B – pedra britada
- F – feltro embebido em água e sal
- P – peso de 35 kg
- L – 1,0 metro para tensão de toque
- V – voltímetro eletrônico

DESENHO E-4 - MEDIÇÃO DE POTENCIAL DE PASSO COM PESOS



Onde:

- S – solo
- B – pedra britada (brita)
- F – feltro embebido em água e sal
- P – peso de 35 kg
- L – 1,0 metro para tensão de passo
- V – voltímetro eletrônico

ANEXO F - PROCEDIMENTOS PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO COM SISTEMA ENERGIZADO E DESENERGIZADO

F.1 SISTEMA DESENERGIZADO

F.1.1 Método da Queda de Potencial

É recomendado para medição da resistência de aterramento através de medidor específico.

F.1.2 Princípio

Consiste em fazer circular uma corrente através do sistema de aterramento sob ensaio (E) por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente (C) e em seguida medir a tensão entre o sistema citado e o terra de referência (terra remoto) por meio de um eletrodo auxiliar de potencial (P).

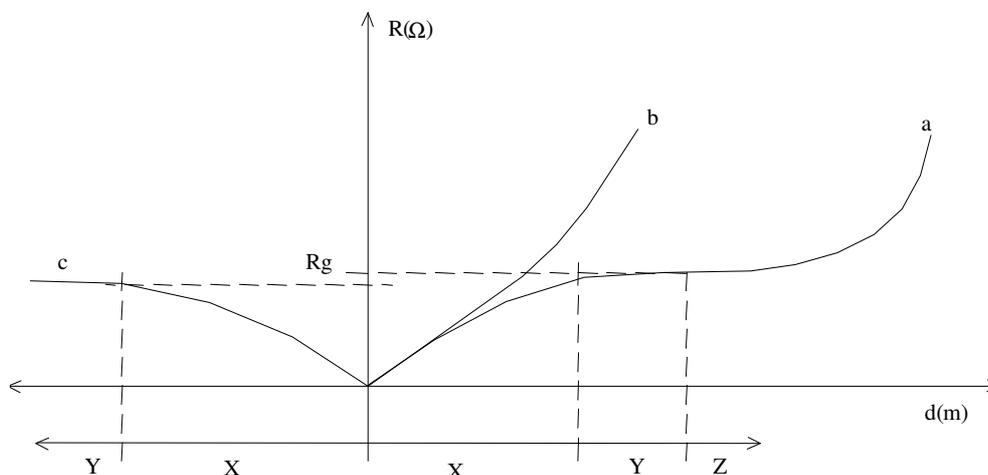
F.1.3 Conexões

Os cabos pára-raios e contrapesos contínuos de todas as linhas de transmissão que chegam à instalação devem ser desconectados do sistema de aterramento sob ensaio, bem como as blindagens dos cabos isolados e os neutros das redes de distribuição.

F.1.4 Curvas de Resistência de Aterramento

As curvas típicas são encontradas no Desenho F-1.

DESENHO F-1 - CURVAS TÍPICAS DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO



Onde:

X – área de influência do sistema de aterramento de corrente (C);

Y – terra remoto;

Z – área de influência do eletrodo de corrente (C);

R_g – resistência de aterramento do sistema sob tensão;

a, b, c - curvas de resistência de aterramento versus espaçamento entre eletrodos de potencial, em função do posicionamento do eletrodo de corrente.

Da análise das curvas do Desenho F-1 pode-se concluir que:

a) se o deslocamento do eletrodo de potencial (P) for coincidente com a direção e sentido do eletrodo de corrente (C), e este último estiver a uma distância satisfatória do sistema sob ensaio (E), é obtida uma curva semelhante à curva "a";

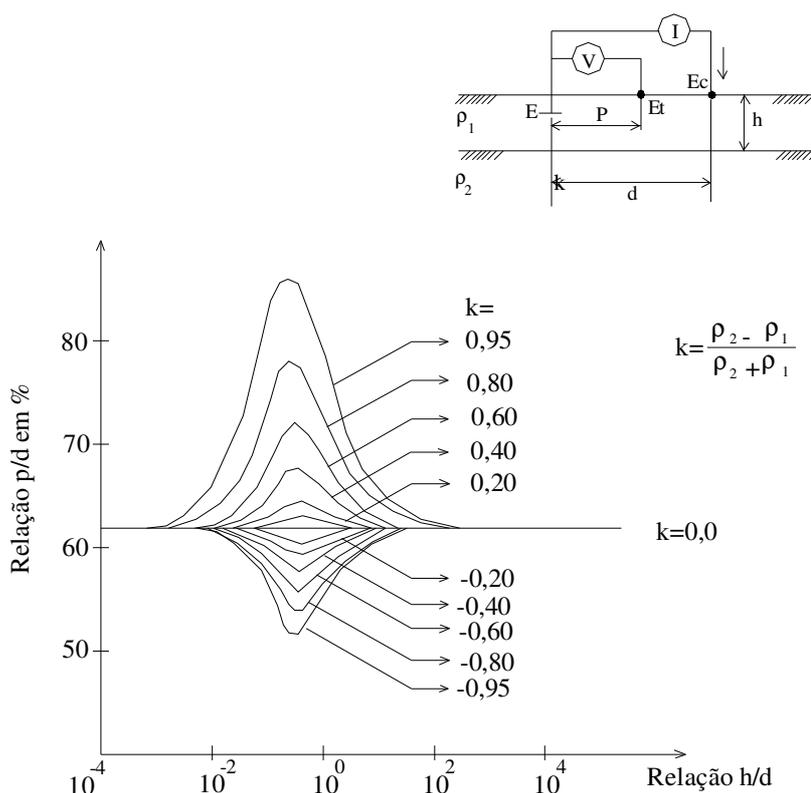
- b) se o deslocamento do eletrodo de potencial (P) for coincidente com a direção e sentido do eletrodo de corrente (C) e este último estiver a uma distância insuficiente do sistema sob ensaio (E) é obtida uma curva semelhante à curva "b";
- c) se o eletrodo de potencial (P) se deslocar na mesma direção e em sentido contrário ao eletrodo de corrente (C) para o outro lado do sistema sob ensaio (E), partindo do princípio que o espaçamento entre C e E seja satisfatório, é obtida uma curva semelhante à curva "c".

F.1.5 Solos Não Homogêneos

Para solos não homogêneos e/ou sistemas de aterramento complexos, torna-se muito difícil determinar a localização adequada do ponto onde se terá o valor da resistência de aterramento.

O Desenho F-2 apresenta para sistemas de aterramento pequenos, um gráfico (orientativo) relacionando a distância p/d (sendo "p" a distância do eletrodo de potencial e "d" a distância do de corrente, ambos em relação, ao aterramento sob ensaio, em valores percentuais), com h/d (sendo h a profundidade da primeira camada do solo não homogêneo), para diversos valores do coeficiente de reflexão k.

DESENHO F-2 - POSIÇÃO DO ELETRODO AUXILIAR DE POTENCIAL NUM SOLO DE DUAS CAMADAS



	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	55 de 106

F.1.6 Alinhamento dos Eletrodos

É fundamental que se observe o alinhamento dos eletrodos auxiliares, sem o qual, consideráveis erros podem ser introduzidos na medição.

F.1.7 Acoplamento Entre os Circuitos de Potencial e de Corrente

O efeito do acoplamento entre os cabos de interligação dos circuitos de corrente e potencial torna-se um fator importante nas medições de resistência de aterramento com valores muito baixos, particularmente envolvendo sistemas de aterramento de grande porte, os quais exigem grandes comprimentos para os mencionados cabos.

Tendo em vista que, na faixa de 60 Hz, o acoplamento indutivo entre dois cabos lançados paralelamente, pode ser tão alto quanto $0,1 \Omega/100 \text{ m}$, os erros cometidos nas medições podem ser consideráveis.

Um outro aspecto é que o acoplamento provoca um crescimento linear na curva resistência de aterramento x distância, na região onde ela deveria ter uma inclinação zero, dificultando a interpretação dos resultados.

Como regra prática, os problemas de acoplamento são:

- a) desprezíveis nas medições de resistência de aterramento acima de 10Ω ;
- b) quase sempre importantes nas medições de resistências abaixo de $1,0 \Omega$;
- c) passíveis de análise, em cada caso, nas medições envolvendo resistências entre $1,0$ e 10Ω .

Nota:

O procedimento usual para evitar (ou minimizar) os efeitos do acoplamento entre os condutores de interligação é afastar fisicamente os dois circuitos. A alternativa recomendada é lançar os cabos do circuito de potencial, fazendo um ângulo de 90° em relação aos do circuito de corrente.

F.1.8 Resistência do Eletrodo de Corrente

- a) A resistência de aterramento deste eletrodo usualmente deve ser inferior a 500Ω .

Como regra prática, a relação entre a resistência de aterramento do eletrodo de corrente e a resistência do sistema de aterramento sob ensaio não deve exceder $1000:1$, sendo preferíveis as abaixo de $100:1$.

- b) Correntes parasitas

Potenciais galvânicos, polarização e correntes parasitas de corrente contínua podem interferir seriamente nas medições feitas com instrumentos que operam em corrente contínua.

Recomenda-se assim a utilização de equipamentos que funcionem em corrente alternada (não necessariamente senoidal).

- c) Correntes alternadas parasitas, circulando no solo, no sistema de aterramento ou nos circuitos de ensaio, apresentam complicações adicionais. O procedimento mais comum para minimizar o problema é realizar os ensaios com uma frequência diferente das correntes parasitas presentes.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	56 de 106

F.1.9 Limitações

Em determinadas situações torna-se muito difícil, ou mesmo impossível a aplicação do método de queda de potencial conforme descrito. Dentre essas destacam-se as seguintes:

- a) em instalações densamente povoadas, freqüentemente é impossível lançar os circuitos de corrente e potencial nas distâncias necessárias para se fazer uma medição confiável;
- b) sistemas de aterramento de grandes dimensões:
 - a medição da resistência de aterramento desses sistemas apresenta várias dificuldades; a mais evidente é a necessidade de se estender os circuitos de corrente e potencial a distâncias consideráveis, às vezes de vários quilômetros, dificultando muito a medição; outro aspecto importante é que estes sistemas apresentam, usualmente, resistências muito baixas (inferiores a $1,0 \Omega$). Nestes casos, a incerteza quanto aos resultados obtidos em decorrência de vários fatores (acoplamento, impedâncias de circuito de ensaio, sensibilidade do instrumento e outros) pode ser apreciável;
 - além disso, nesses sistemas, a reatância não é desprezível quando comparada com a resistência e, a rigor, seria mais adequado falar em impedância (que é função da freqüência) cuja medição deveria ser feita injetando-se correntes com freqüências próximas a 60 Hz;
- c) instalações energizadas ou próximas de regiões atravessadas por linhas de transmissão e alimentadores energizados.

F.2 SISTEMA ENERGIZADO

F.2.1 Método da Corrente Injetada pelo Sistema

F.2.1.1 Campo de Aplicação

Este método se aplica à medição de resistência em malhas de aterramento energizadas, empregando-se a corrente de seqüência zero do sistema (I_0) como fonte.

Pode ser utilizado especialmente em malhas de subestações de dimensões pequenas, da qual se deseja o valor aproximado de resistência, de modo rápido seguro; desde que observados os procedimentos a seguir expostos.

Neste método, a corrente é medida e somada vetorialmente com transdutores corrente/tensão do tipo alicate, em pontos relevantes da subestação. Simultaneamente, mede-se também a tensão da malha com relação a um eletrodo remoto. Os sinais de corrente (I_0) e tensão (V_m) são observados em osciloscópio, de modo a verificar sua correspondência.

O valor da resistência da malha (R_m) pode ser dado por: $R_m = V_m / I_0$.

Comparativamente ao método convencional, o eletrodo remoto pode situar-se muito mais próximo da subestação.

F.2.1.2 Componentes da Corrente de Seqüência Zero

A corrente de seqüência zero é constituída de várias componentes. No caso das subestações 34,5/13,8 kV, possuindo transformador com primário ligado em delta e secundário em estrela aterrada, típicos da CHESP, as componentes de I_0 são as que circulam pelas ligações entre a malha de terra e as buchas de neutro "Ho" dos

transformadores de força (TF), de serviço auxiliar (TSA) e do transformador de aterramento (TA).

Outra componente de I_0 é a que circula pela ligação à terra do neutro do banco de capacitores.

Quando se mede o somatório das componentes de I_0 , de forma simultânea (Desenho F-3), obtém-se a corrente " I_0 líquida" que naquele instante está sendo injetada na malha.

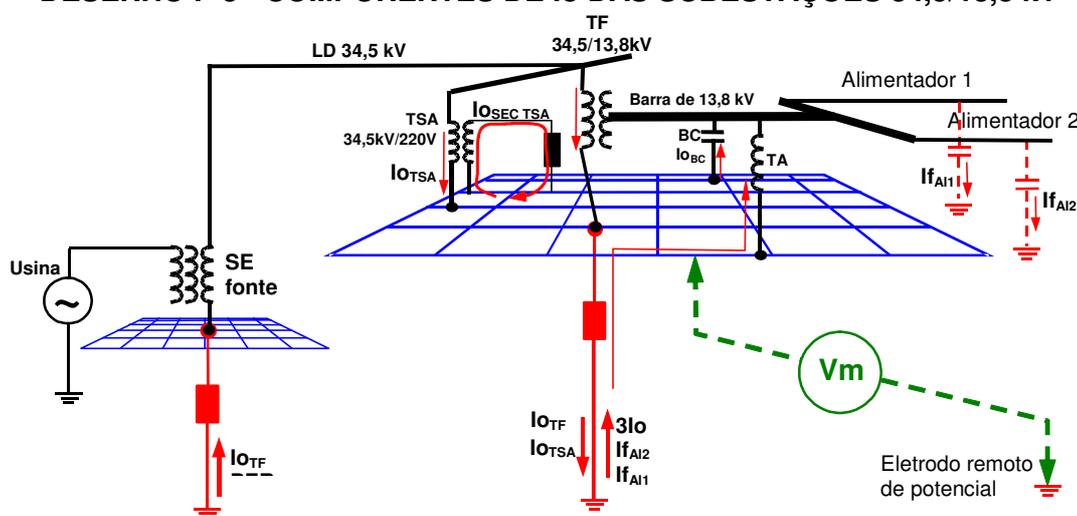
Observar que as linhas que alimentam as subestações 34,5/13,8 kV da CHESP, bem como seus alimentadores, não empregam cabo(s) pára-raios, de modo que as malhas dessas subestações não estão interligadas a outras, como acontece com sistemas interligados, onde a aplicação desse método implicaria em desconectar os referidos cabos das linhas de transmissão.

F.2.1.3 Medições de Resistência em Malhas Energizadas

F.2.1.3.1 Procedimento para Medição da Corrente I_o

Nas subestações 34,5/13,8 kV, esquema conforme Desenho F-3, as componentes de I_o são as que circulam pelas ligações entre a malha de terra e as buchas de neutro "Ho" de transformadores de força (TF), do primário do transformador de serviço auxiliar (TSA) e do transformador de aterramento (TA), além da que circula pela ligação à terra do neutro dos bancos de capacitores e dos reguladores de tensão, ligados em estrela aterrada.

DESENHO F-3 - COMPONENTES DE I_o DAS SUBESTAÇÕES 34,5/13,8 kV



O somatório destas correntes compõe a corrente " I_o líquida", sendo obtido pela interligação (série) dos sinais de saída de transdutores de corrente/ tensão, com cabo tipo par trançado, $2 \times 0,14 \text{ mm}^2$. Observar que a corrente I_o do secundário do transformador de serviço auxiliar (TSA), não precisa ser medida, uma vez que fecha o circuito pela carga da própria subestação, não sendo propriamente "injetada" no solo pela malha de terra.

Recomenda-se o emprego de transdutores de corrente do tipo alicate (para enlaçar e não interromper as conexões de terra), com ganho não inferior a 300 mV/A , na escala de 10 A.

Antes de posicionar os transdutores de corrente é necessário investigar a ordem de grandeza das correntes de seqüência zero, uma vez que os arranjos físicos das subestações podem variar bastante.

Os transdutores devem ter impedância de saída compatível com a impedância de entrada dos medidores de tensão (osciloscópio ou multímetro digital). Como exemplo, transdutores usados em medição de qualidade de energia, possuem impedância de saída da ordem de $5 \text{ k}\Omega$, compatível com a entrada de multímetros ou osciloscópios digitais, de vários $\text{M}\Omega$.

Cuidados adicionais devem ser observados quanto ao fechamento dos transdutores, pois ferrugem ou sujeira nos entreferros pode diminuir o ganho, comprometendo a medição.

F.2.1.3.2 Procedimento para Medição da Tensão V_m

O eletrodo remoto de potencial deve ser colocado a uma distância de $8r_{heq}$.

Um fio isolado com comprimento adequado deve ser ligado ao mesmo eletrodo, de maneira a servir de referência para a medição da tensão V_m , na subestação. Em regime normal, este valor chega a dezenas de volts, podendo atingir dezenas de kV durante um curto-circuito fase-terra.

Para minimizar riscos de choque elétrico para os profissionais de manutenção, deve ser utilizado um jogo de pontas de prova para alta tensão.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	58 de 106

O procedimento completo recomendado considera que quem estende o fio já ligado ao eletrodo remoto de potencial deve segurar a ponta de prova deste fio ao ingressar no terreno da subestação. O fio deve ter comprimento adequado para ser estendido até o centro da subestação, onde normalmente se posicionam os instrumentos de ensaio, para registro.

F.2.1.3.3 Simultaneidade das Medições

Deve ser garantida para as leituras de I_o e V_m .

Recomenda-se efetuar um mínimo de três leituras antes de se proceder à média dos resultados.

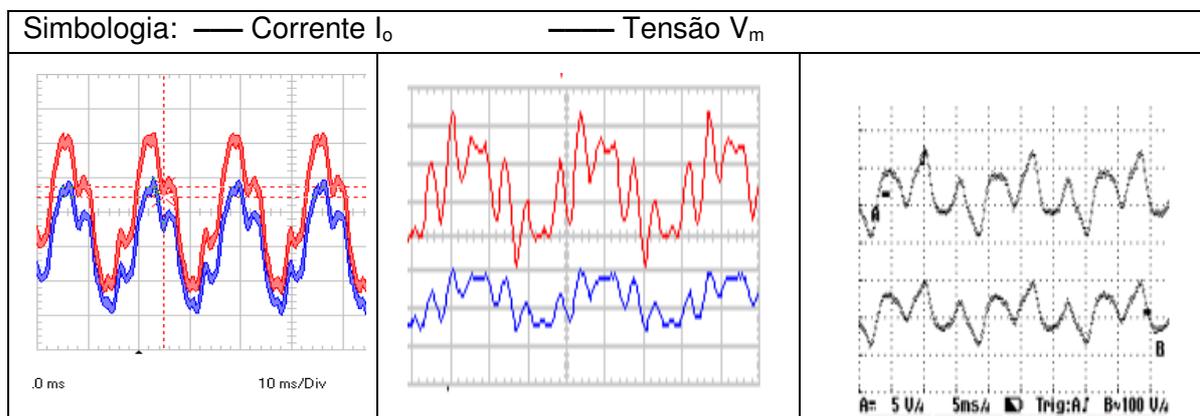
Recomenda-se o uso de um osciloscópio portátil, com autonomia adequada, para oferecer praticidade e reduzir problemas de eventuais surtos pela alimentação, durante operações de manobras automáticas da operação.

F.2.1.3.4 Cuidado na Avaliação da Resistência R_m

a) Recomenda-se, antes de efetuar o cálculo da resistência da malha a partir dos valores de I_o e V_m , a observação das formas de onda dos sinais em osciloscópio, de maneira a se constatar que se trata de sinais tipicamente resistivos, o que permite o cálculo da referida resistência por consequência, $R_m = V_m/I_o$.

Os gráficos do Desenho F-4 mostram formas de onda típicas obtidas com osciloscópios digitais portáteis.

DESENHO F-4 - EXEMPLOS DAS FORMAS DE ONDA DE TENSÕES E CORRENTES MEDIDAS



Ao se calcular a resistência, uma correção deve ser feita para a condição ideal de um terra verdadeiramente remoto.

Para o caso de um afastamento de 8rheq deve-se aplicar o fator 1,125.

b) O método fornece valores inferiores aos obtidos pelo método convencional

As diferenças podem ser explicadas pelo fato das correntes de seqüência zero, em 60 Hz, retornarem até a subestação fonte por caminhos diferentes daqueles percorridos pelas correntes injetadas por fontes dos terrômetros usuais (provavelmente por regiões do solo mais profundas e de menor resistividade).

Considerando-se que a umidade afeta principalmente a superfície do terreno, o método deverá ter mais repetibilidade e estar mais de acordo com a situação real de operação, uma vez que lida com correntes com freqüências maiores que 60 Hz, enquanto que os terrômetros usuais trabalham com mA, kHz, além de distâncias menores.

Registre-se que mesmo para uma estratificação do solo diferente da assumida (homogênea), o erro dos valores medidos será mantido, caso o ponto remoto for o mesmo em medições sucessivas. Assim, o método é aplicável na avaliação de alterações significativas, independente do grau de incerteza do resultado, como referência.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	59 de 106

F.2.1.4 Aspectos de Segurança para Realizar as Medições

Além dos cuidados normais recomendados pelas normas pertinentes para outros métodos de medição, como a aplicação de EPIs (botas, óculos e luvas de alta tensão) para todos os envolvidos na medição e da observação de condições atmosféricas favoráveis, o método requer o uso de pontas de prova adequadas para alta tensão.

F.2.1.5 Cuidados Necessários em Subestações com Grandes Dimensões

Em princípio, o método é aplicável também a subestações com dimensões maiores que as 34,5/13,8 kV. Alguns aspectos, no entanto, devem ser considerados, como:

- a) o aumento da distância de posicionamento do eletrodo remoto de potencial, proporcionalmente às dimensões da subestação, o que implicará certamente em maior tempo para a execução do ensaio;
- b) a necessidade de utilização de mais transdutores de corrente, além do maior cuidado na avaliação da ordem de grandeza das componentes de Io da subestação;
- c) a interrupção dos cabos pára-raios das torres de transmissão, no pórtico da subestação, ou na primeira torre, de modo a excluir as resistências (em paralelo) das malhas das torres das referidas linhas à subestação sob teste.

F.2.2 Método de Injeção de Alta Frequência

Um equipamento deste tipo deve permitir a determinação da resistência de aterramento do sistema constituído de todos os sistemas de aterramentos interconectados.

A configuração para esta medição é similar à medição de resistência de aterramento de um sistema qualquer, com a particularidade de que, os pontos de fixação dos eletrodos de potencial serão nas regiões limítrofes da malha.

Importante registrar que não será necessário especificar a quantidade e o tipo dos aterramentos dos sistemas interconectados, visto que, para a medição da resistência da malha, a alta frequência injetada deve garantir o desacoplamento das demais instalações.

F.2.2.1 Da Medição em Alta Frequência

O instrumento deve operar numa frequência tal que a impedância indutiva do(s) cabo(s) pára-raios de uma ou mais linhas de transmissão acopladas à subestação, num vão de comprimento normal, seja razoavelmente alta, a ponto de se reduzir o efeito dos aterramentos adjacentes ao que se está medindo.

A utilização de uma frequência alta nas medições deve permitir que se teste o aterramento numa condição mais próxima daquela em que este será solicitado para dissipar um surto típico de chaveamento ou mesmo de descarga atmosférica.

Compensação da componente reativa

O instrumento deve possuir um módulo que permita a introdução de capacitâncias, com a finalidade de efetuar a compensação dos reativos presentes na medição.

Para uma subestação da qual partem/chegam linhas de transmissão com seus cabos pára-raios ligados à malha de terra, estima-se, que um instrumento com tal frequência, deve medir somente a resistência da malha de terra em estudo.

F.2.2.1.1 Impedâncias Envolvidas Entre Cabo PR e Retorno Pelo Solo

Exemplo para alta frequência de 25 kHz.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	60 de 106

Para se ter uma idéia da ordem de grandeza das impedâncias envolvidas nos circuitos das linhas de transmissão, utiliza-se a formulação de Carson para a freqüência de 60 Hz e a em análise.

Para a freqüência 60 Hz

Cálculo de Z_{mutua} entre cabo PR e fases:

$$Z_{mutua} = R_e + j\omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{659/DMG \cdot \sqrt{\rho a/f}\} = 0,060 + j0,446 \Omega/km$$

$$\text{ou} = 0,450 \text{ e } j82,34 \Omega/km$$

onde:

$$R_e = 0,06 \Omega/km$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 376,992 \text{ rad/s}$$

Cálculo da $Z_{própria}$ da malha formada pelo PR e retorno pelo solo:

$$Z_{própria} = R_{própria \text{ caboPR}/2 + R_e + j\omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{659/C \cdot \sqrt{\rho a/f}\} \Omega/km$$

$$Z_{própria} = 1,772 + j0,770 \text{ ou } 1,932 \text{ e } j23,49 \Omega/km$$

$$C = \sqrt{(RMG \text{ do cabo terra}) \cdot (Dist. \text{ entre caboPR})} = 0,086718$$

Para a freqüência 25 kHz:

Cálculo de Z_{mutua} entre cabo PR e fases:

$$Z_{mutua} = R_e + j\omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{659/DMG \cdot \sqrt{\rho a/f}\} = 0,060 + j91,020 \Omega/km$$

$$\text{ou} = 91,020 \text{ e } j89,96 \Omega/km$$

onde:

$$R_e = 0,06 \Omega/km$$

$$f = 25000 \text{ Hz}$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 157080 \text{ rad/s}$$

Cálculo da $Z_{própria}$ da malha formada pelo PR e retorno pelo solo:

$$Z_{própria} = R_{própria \text{ caboPR}/2 + R_e + j\omega \cdot 0,0002 \cdot \ln\{659/C \cdot \sqrt{\rho a/f}\} \Omega/km$$

$$Z_{própria} = 1,772 + j226,060 \text{ ou } 226,067 \text{ e } j89,55 \Omega/km$$

$$C = \sqrt{(RMG \text{ do cabo terra}) \cdot (Dist. \text{ entre caboPR})} = 0,086718$$

Observar que para esta freqüência, a impedância mútua aumenta cerca de 200 vezes, enquanto que a impedância própria aumenta por volta de 100 vezes, passando o ângulo para próximo de 90°.

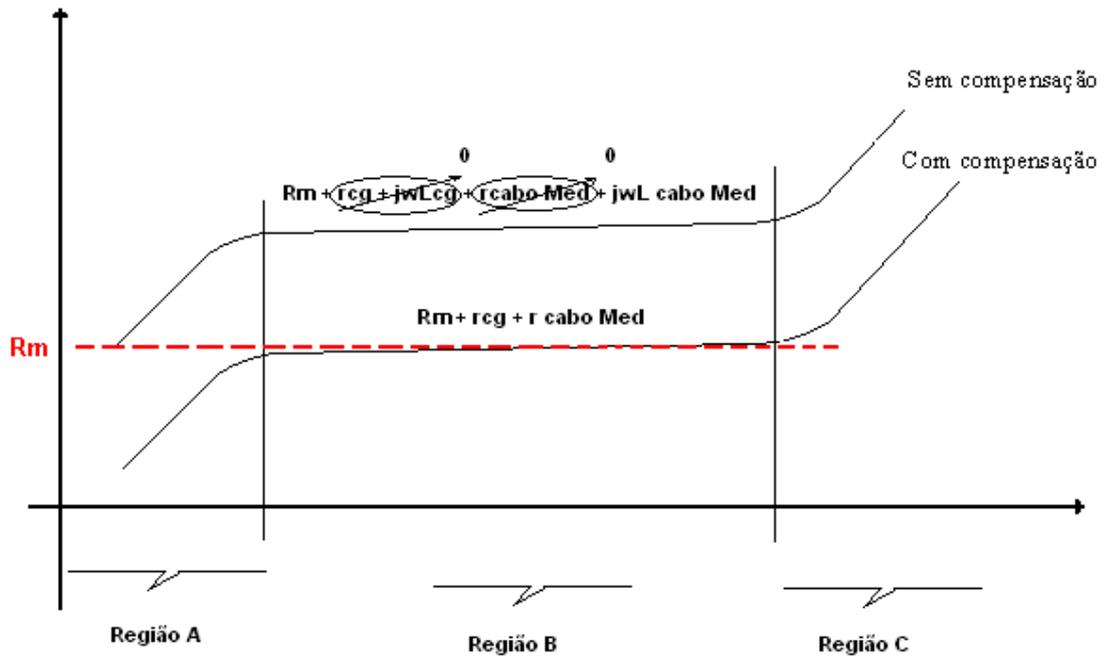
Dessa forma, os parâmetros (Resistência + Reatância) dos cabos pára-raios tendem a infinito, ou seja, passam a ser excluídos da medição em alta freqüência.

Assim sendo, a corrente de alta freqüência tenderá a circular na sua totalidade pelo circuito formado agora, pela malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente, elevando os potenciais de superfície junto aos mesmos.

Em consequência, ao se deslocar o eletrodo auxiliar de potencial numa região livre das influências tanto da malha de aterramento sob ensaio quanto do eletrodo auxiliar de corrente (patamar da curva com compensação obtida na região B), obter-se-á o valor procurado para a resistência da malha.

O Desenho F-5 mostra a tendência das curvas sem e com compensação de reativos.

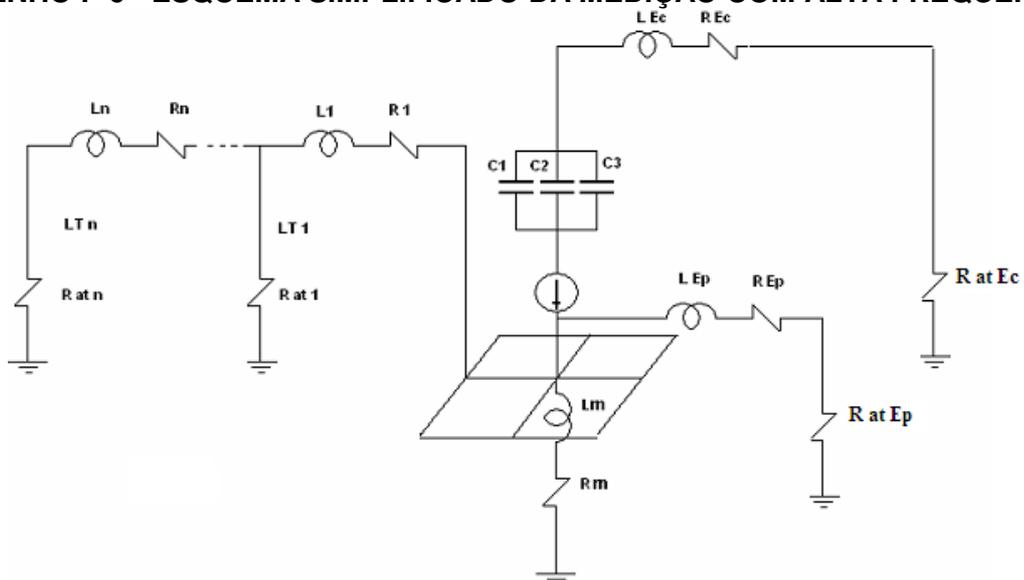
DESENHO F-5 - TENDÊNCIA DAS CURVAS "SEM E COM" COMPENSAÇÃO DE REATIVOS



F.2.2.1.2 Elementos Envolvidos na Medição de Aterramento

No esquema do Desenho F-6 encontram-se de forma simplificada os parâmetros que compõem a medição em alta frequência.

DESENHO F-6 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DA MEDIÇÃO COM ALTA FREQÜÊNCIA



	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	62 de 106

Neste esquema é possível identificar os parâmetros envolvidos na medição, sendo que:

- L1... Ln representam a parte indutiva da impedância do circuito formada pelas torres (cabos pára-raios das linhas de transmissão);
- R1...Rn representam uma parte da resistência do circuito (cabos pára-raios das linhas de transmissão);
- Rat1...Ratn representam as resistências dos aterramentos de cada torre das linhas de transmissão;
- Lm representa a parte indutiva da impedância da malha de aterramento sob ensaio;
- Rm representa a parte resistiva da impedância da malha de aterramento sob ensaio;
- L Ec representa a parte indutiva da impedância do eletrodo de corrente;
- R Ec representa a parte resistiva da impedância do eletrodo de corrente;
- R at Ec representa a resistência de aterramento do eletrodo de corrente;
- L Ep representa a parte indutiva da impedância do eletrodo de potencial;
- R Ep representa a parte resistiva da impedância do eletrodo de potencial;
- R at Ep representa a resistência de aterramento do eletrodo de potencial;
- C1, C2, C3 representam o banco de capacitores utilizado para compensar a parte reativa do circuito.

F.2.2.2 Da Metodologia

F.2.2.2.1 Metodologia Convencional Reduzida

Esta se aplica aos sistemas de aterramento, na condição energizado, em locais com poucas e pequenas áreas disponíveis para colocação dos eletrodos de retorno de corrente e potencial, tais como em regiões semi-urbanas ou rurais.

Nessa metodologia de medição se utiliza o método convencional da queda de tensão, aplicado, porém, a eletrodos de corrente posicionados "relativamente próximos" do sistema de aterramento em teste.

Nessas medições, com freqüências de algumas dezenas de kHz, o posicionamento do eletrodo de corrente se dará a distâncias máximas de 1,25 vezes a maior dimensão do sistema de aterramento. O levantamento da curva de resistência de aterramento em função da distância do eletrodo de potencial se processará tal como definido no levantamento com as instalações desenergizadas, conforme item 1 deste Anexo.

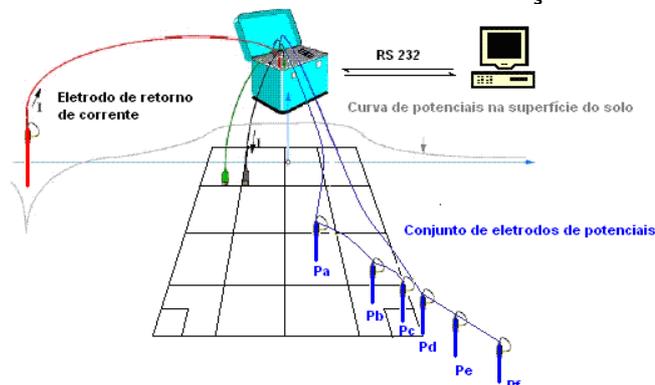
F.2.2.2.2 Metodologia DDPprox (diferenças de potencial em pontos próximos ao sistema de aterramento)

Aplica-se aos sistemas energizados e localizados principalmente em áreas de nenhuma disponibilidade (densamente edificadas) para colocação dos eletrodos de corrente e potencial, a não ser aquela imediatamente adjacente à do sistema em teste.

Nessa metodologia não se utiliza o conceito da queda de potencial em relação a um ponto remoto, o que pode inviabilizar as medições notadamente de sistemas de aterramento de médias e grandes dimensões feitos convencionalmente. São realizadas em espaços bem pequenos, medidas de diferença de potencial em pontos pré-determinados do referido sistema, dependendo do grau de conhecimento que se tenha de sua configuração, relativamente ao ponto de injeção de corrente.

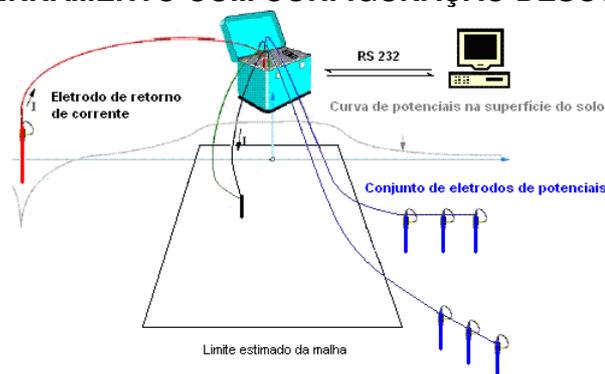
Aplicada a malhas de aterramento com configuração conhecida – definidas as coordenadas limitrofes da configuração, posiciona-se o eletrodo de corrente em função da maior dimensão da malha; os eletrodos de potencial devem ser posicionados em pontos como centro de maior e menor quadrícula, próximos da periferia, e a partir desta, de metro em metro até em torno de 1/10 da distância do eletrodo de corrente.

**DESENHO F-7 - METODOLOGIA DDPprox APLICADAS A MALHAS DE
ATERRAMENTO COM CONFIGURAÇÃO CONHECIDA**



Aplicada a malhas de aterramento com configuração desconhecida. Não se dispõe de informações sobre o sistema de aterramento (dimensões reais, tamanhos de quadrículas, profundidade de condutores, etc.), estimar as coordenadas de um provável condutor periférico previsto a partir da presença de algum elemento (final de camada de brita, alambrado divisorio de área energizada, etc.) e efetuar o posicionamento do eletrodo de corrente; os eletrodos de potencial devem ser posicionados (em número e espaçamentos diferentes e aleatórios em função das características da planta do local), independente de se conhecer a posição relativa do sistema de aterramento, até uma distância em torno de 1/10 da referente ao eletrodo de corrente, para cada direção escolhida.

**DESENHO F-8 - METODOLOGIA DDPprox APLICADA A MALHAS DE
ATERRAMENTO COM CONFIGURAÇÃO DESCONHECIDA**



F.2.2.3 Requisitos do Instrumento

- Deve possuir um módulo gerador de sinal de alta frequência (algumas dezenas de kHz), com sinais de corrente da ordem de dezenas de mA, controlado por um cristal que ofereça estabilidade à frequência e possua filtros, altamente seletivos, dimensionados para eliminar o efeito das correntes parasitas de frequência industrial presentes no solo.
- Deve possuir um módulo de aquisição e armazenamento para os dados coletados dos eletrodos de corrente e potencial.
- Deve conter um módulo de controle dos dados, no qual se efetue a correção de erros e redução de ruídos, bem como a proteção contra sobretensões.
- Imunidade
Deve apresentar imunidade eletrostática segundo a IEC 61000-4-2, à radiação eletromagnética segundo IEC 61000-4-3, EMC segundo IEC 61326-1, além de grau de proteção IP54.
- Influência da resistência dos eletrodos auxiliares.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	64 de 106

Deve dispor de um alto grau de independência para com as altas resistências dos eletrodos auxiliares, características de aterramentos em solos de alta resistividade.

f) Medição dos Potenciais de Passo e Toque

Deve permitir a obtenção dos potenciais de passo e toque em V/A de corrente injetada, para posterior extrapolação ao valor de corrente de malha.

g) Determinação da Continuidade Elétrica entre Elementos Vinculados à Malha da Subestação

O instrumento deve permitir a medição da impedância entre dois pontos do sistema que engloba a malha de aterramento, na condição energizado; como detector de continuidade, o instrumento deve admitir a determinação das resistências vistas por esses dois pontos, concluindo-se por consequência, pela sua continuidade.

F.2.2.4 Da Corrente de Medição e Segurança das Pessoas

A referida corrente deve ser pequena, a ponto de permitir sensibilidade nas medições e garantir segurança às pessoas que estejam na área durante o processo.

Em se tratando de segurança, além dos cuidados normais recomendados pelas normas pertinentes para outros métodos de medição, como a aplicação de EPIs (botas, óculos e luvas de alta tensão) para todos os envolvidos e da observação de condições atmosféricas favoráveis, o método requer o uso de pontas de prova adequadas para alta tensão.

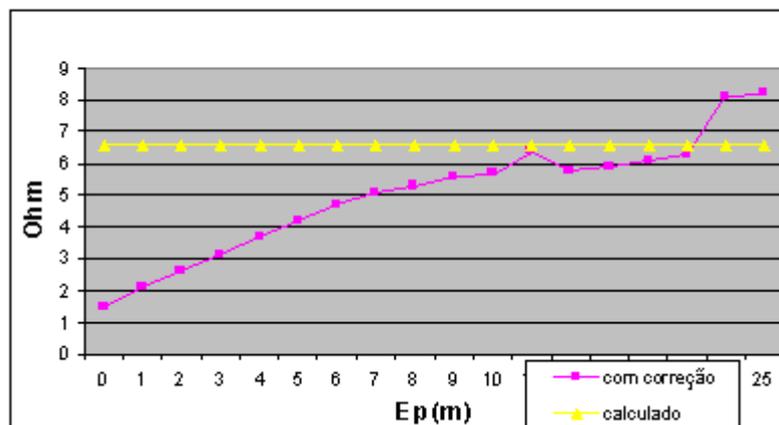
F.2.2.5 Avaliação da Resistência de Aterramento

F.2.2.5.1 Metodologia Convencional Reduzida

Deve-se efetuar o levantamento dos valores de resistência com compensação capacitiva, pelo deslocamento do eletrodo de potencial, a partir da periferia da malha em direção ao eletrodo de corrente posicionado para distâncias da ordem de 1,25 vezes a maior dimensão desta.

A resistência de aterramento procurada será dada pelo patamar da curva com compensação obtida.

DESENHO F-9 - RESISTÊNCIA DA MALHA DE TERRA MÉTODO CONVENCIONAL REDUZIDO



F.2.2.5.2 Metodologia DDPprox

As malhas deverão estar conectadas a outros sistemas de aterramento, via, por exemplo, cabo(s) pára-raios de linhas de transmissão. Nessa condição:

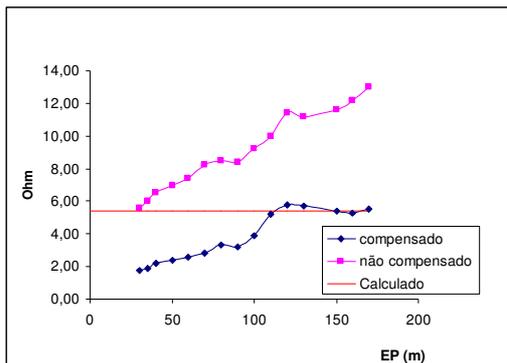
- o **valor mínimo da curva sem compensação** (obtido nas proximidades da periferia da malha) tende ao valor da **resistência** da malha.

- o **valor mínimo da curva com compensação** (obtido nas proximidades da periferia da malha) tende ao valor da **impedância** do sistema.

Pela metodologia DDPprox basta portanto medir o valor da diferença de potencial entre malha e um ponto a 1 m de sua periferia; referenciar à corrente de medição, para obter:

- a resistência específica da malha de terra (valor sem compensação);
- a impedância do sistema (valor com compensação).

DESENHO F-10 - RESISTÊNCIA DA MALHA DE TERRA - MÉTODO DDPprox



	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	66 de 106

ANEXO G (ORIENTATIVO) - CÁLCULO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

G.1 ATERRAMENTOS COMPOSTOS POR CONDUTORES HORIZONTAIS

G.1.1 Resistência de Aterramento de Condutor Horizontal Enterrado

Em solos em que a resistividade aumenta com a profundidade ou em locais com dificuldades mecânicas para cravação de hastes, podem ser utilizados condutores horizontais. A resistência de aterramento é determinada através da expressão:

$$R_{\text{cond.}} = 0,366 \cdot \frac{\rho_a}{L} \cdot \left[\log \frac{3 \cdot L}{2 \cdot d} + \log \frac{3 \cdot L}{8 \cdot p} \right] \quad [\text{G-1}]$$

Onde:

- $R_{\text{cond.}}$ - resistência de aterramento do condutor horizontal, em Ω ;
- ρ_a - resistividade aparente do solo calculada conforme Anexo C, em $\Omega \cdot \text{m}$;
- L - comprimento do condutor horizontalmente enterrado, em m;
- d - diâmetro do condutor, em m;
- p - profundidade do condutor em relação a superfície, em m.

G.1.2 Resistência de Aterramento de Condutor em Anel

A resistência de um aterramento em anel é determinada através da expressão:

$$R_{\text{anel}} = 0,366 \cdot \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi \cdot r_a} \cdot \left[\log \frac{16 \cdot r_a}{d} + \log \frac{4 \cdot r_a}{p} \right] \quad [\text{G-2}]$$

Onde:

- R_{anel} - resistência de aterramento do condutor em anel, em Ω ;
- ρ_a - resistividade aparente do solo calculada conforme Anexo C, em $\Omega \cdot \text{m}$;
- r_a - raio do anel, em m;
- d - diâmetro do condutor que forma o anel, em m;
- p - profundidade do anel no solo em relação à superfície, em m.

G.2 ATERRAMENTOS COMPOSTOS POR HASTES VERTICAIS

G.2.1 Resistência de Aterramento de Uma Haste

O valor da resistência de aterramento de uma única haste enterrada no solo pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$R = \frac{\rho_a}{2 \pi \cdot L} \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad (\Omega) \quad [\text{G-3}]$$

Onde:

- ρ_a - resistividade aparente do solo no local, em $\Omega \cdot \text{m}$;
- L - comprimento cravado da haste, em m;
- d - diâmetro equivalente da haste, em m.

Caso não se consiga o valor de resistência desejado com uma haste, podem ser utilizados vários meios para reduzir o valor, tais como aumentar o diâmetro ou o comprimento da haste, interligar várias hastes em paralelo, tratar quimicamente o solo ao redor desta ou soluções mistas dessas alternativas.

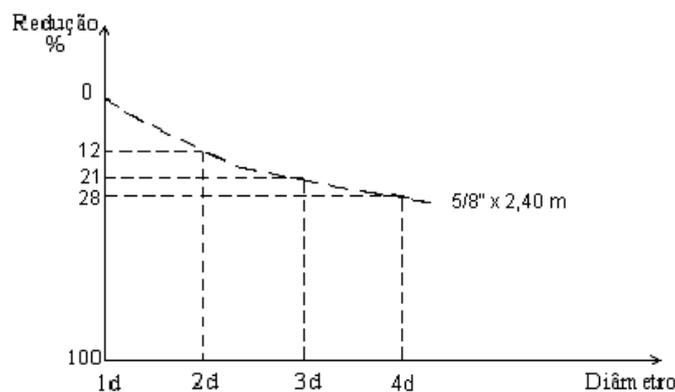
	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	67 de 106

A seguir cada alternativa será analisada em particular, apontando os efeitos na redução da resistência de aterramento, o custo de cada uma e, finalmente, apresentaremos um estudo técnico-econômico que propicie a escolha da melhor.

G.2.2 Aumento do Diâmetro das Hastes

Com a utilização de hastes com diâmetros maiores teremos uma pequena redução no valor da resistência de aterramento, a qual pode ser calculada pela expressão [G-3]. A diminuição da resistência apresenta uma tendência de "saturação" com o aumento do diâmetro da haste, conforme pode ser observado no Desenho G-1, portanto, não existe vantagem econômica em utilizar hastes com diâmetros superiores aos encontrados no mercado.

DESENHO G-1 - REDUÇÃO DO VALOR DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO DE UMA HASTE VERTICAL EM FUNÇÃO DO SEU DIÂMETRO



G.2.3 Aumento do Comprimento das Hastes

A utilização de hastes com comprimentos maiores, efetivamente cravadas no solo, possibilita atingir camadas mais profundas, as quais normalmente apresentam resistividade menor que as superficiais (isto é verificado na maioria dos solos, devido à maior porcentagem de umidade nas camadas profundas). Para solos com camadas inferiores constituídas de leitos rochosos, que possuem alta resistividade, não existem vantagens, porém neste caso, não seria aplicada esta alternativa, devido à impossibilidade de cravação das hastes.

Analisando a expressão [G-3] deste Anexo, observamos que existe uma redução no valor da resistência de aterramento devido ao aumento no comprimento cravado da haste e à diminuição da resistividade.

A utilização de hastes profundas é tecnicamente viável, pois a variação da resistividade do solo nas camadas mais profundas é desprezível e mesmo com as variações sazonais desta grandeza nas superficiais, o valor da resistência de aterramento se mantém praticamente invariável.

Esta alternativa, porém, têm limitações devido aos custos de cravação das hastes a grandes profundidades, por ser necessária a utilização de equipamentos especiais e luvas de emenda.

G.3 ATERRAMENTO COM HASTES INTERLIGADAS EM PARALELO

G.3.1 Cálculo da Resistência de Aterramento Equivalente

A utilização de hastes interligadas em paralelo diminui o valor da resistência de aterramento equivalente, entretanto, devido à superposição das áreas de influência das hastes quando consideradas individualmente, observa-se uma "saturação" da resistência limitando a quantidade destas.

A resistência de aterramento equivalente de cada haste do conjunto é calculada pelas expressões:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	68 de 106

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1}^n R_{hm} \quad [G-4]$$

$$R_{hm} = 0,183 \cdot \frac{\rho_a}{L_m} \cdot \log \left[\frac{b + L_m}{b - L_m} \right] \quad [G-5]$$

$$b = \sqrt{L_m^2 + e_{hm}^2} \quad [G-6]$$

Onde:

- R_h - resistência de aterramento equivalente de cada haste, em Ω ;
- n - número de hastes em paralelo;
- R_{hh} - resistência individual de cada haste calculada, conforme expressão [G-3], em Ω ;
- R_{hm} - acréscimo da resistência da haste h por influência da haste m , em Ω ;
- ρ_a - resistividade aparente do solo, calculada conforme Anexo C, em $\Omega.m$;
- L_m - comprimento da haste m , em m ;
- e_{hm} - distância horizontal entre haste h e haste m , em m .

Exemplo:

Para um conjunto de (n) hastes em paralelo, a resistência de cada uma é dada por:

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + \dots + R_{1n}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + \dots + R_{2n}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + \dots + R_{3n}$$

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + \dots + R_{nn}$$

Para cálculo da resistência de aterramento do conjunto das (n) hastes em paralelo [$R_p(n)$], não é considerado o efeito do cabo de interligação dessas, uma vez que, em termos de segurança, a exclusão desse efeito conduz a valores mais conservativos. Desta forma, a referida resistência do conjunto é determinada pela expressão:

$$R_p(n) = \frac{1}{\sum_{h=1}^n \frac{1}{R_h}} \quad [G-7]$$

O índice de aproveitamento obtido com a cravação de hastes adicionais é facilmente verificado, na prática, pela análise dos coeficientes de redução (K), definidos como a relação entre o valor de resistência de aterramento do conjunto e o valor da resistência individual de cada uma das hastes componentes:

$$K = \frac{R_p(n)}{R_{hh}} \quad [G-8]$$

Nos itens a seguir são apresentadas configurações usualmente utilizadas com hastes em paralelo e os valores de coeficientes de redução (K) (relação entre o valor da resistência de aterramento das hastes em paralelo e o valor desta para uma única haste), levando-se em conta que a resistividade aparente do solo seja constante no local de cravação.

G.3.2 Hastes Alinhadas

Recomenda-se que na configuração com hastes alinhadas, sejam interligadas em paralelo no máximo seis hastes. A colocação adicional de hastes a partir deste limite contribui pouco para a redução da resistência de aterramento, devido à saturação do solo (vide coeficientes de redução K das tabelas a seguir).

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	69 de 106

Esse limite não é aplicável ao aterramento de equipamentos instalados em sistemas a três fios com neutro secundário descontinuo, condição em que a instalação de hastes adicionais deve ser comparada com as demais alternativas para solos de alta resistividade.

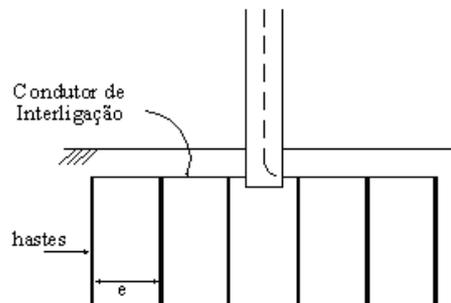


TABELA G-1 - COEFICIENTES DE REDUÇÃO K - HASTES ALINHADAS

Haste de aço cobreado: L = 2400 mm – d = 15,87 mm (5/8")						
Nº de Hastes	e (m)					
	3		4		5	
	R (Ω)	K	R (Ω)	K	R (Ω)	K
2	0,240. ρ_a	0,566	0,233. ρ_a	0,549	0,229. ρ_a	0,539
3	0,173. ρ_a	0,406	0,165. ρ_a	0,388	0,160. ρ_a	0,377
4	0,136. ρ_a	0,321	0,129. ρ_a	0,303	0,124. ρ_a	0,293
5	0,114. ρ_a	0,267	0,106. ρ_a	0,251	0,102. ρ_a	0,240
6	0,098. ρ_a	0,230	0,091. ρ_a	0,214	0,087. ρ_a	0,205
7	0,086. ρ_a	0,203	0,080. ρ_a	0,188	0,076. ρ_a	0,179
8	0,077. ρ_a	0,181	0,071. ρ_a	0,167	0,067. ρ_a	0,159
9	0,070. ρ_a	0,164	0,064. ρ_a	0,151	0,061. ρ_a	0,143
10	0,064. ρ_a	0,151	0,059. ρ_a	0,138	0,055. ρ_a	0,130
11	0,059. ρ_a	0,139	0,054. ρ_a	0,127	0,051. ρ_a	0,120
12	0,055. ρ_a	0,129	0,050. ρ_a	0,118	0,047. ρ_a	0,111
13	0,051. ρ_a	0,121	0,047. ρ_a	0,110	0,044. ρ_a	0,103
14	0,048. ρ_a	0,114	0,044. ρ_a	0,103	0,041. ρ_a	0,097
15	0,046. ρ_a	0,107	0,041. ρ_a	0,097	0,039. ρ_a	0,091

Haste de aço cobreado: L = 3000 mm – d = 15,87 mm (5/8").						
Nº de Hastes	e (m)					
	3		4		5	
	R (Ω)	K	R (Ω)	K	R (Ω)	K
2	0,204. ρ_a	0,579	0,197. ρ_a	0,559	0,192. ρ_a	0,547
3	0,148. ρ_a	0,421	0,140. ρ_a	0,399	0,136. ρ_a	0,386
4	0,118. ρ_a	0,336	0,111. ρ_a	0,314	0,106. ρ_a	0,301
5	0,099. ρ_a	0,281	0,092. ρ_a	0,261	0,087. ρ_a	0,249
6	0,085. ρ_a	0,243	0,079. ρ_a	0,224	0,075. ρ_a	0,213
7	0,076. ρ_a	0,215	0,069. ρ_a	0,197	0,065. ρ_a	0,186
8	0,068. ρ_a	0,193	0,062. ρ_a	0,176	0,058. ρ_a	0,166
9	0,062. ρ_a	0,175	0,056. ρ_a	0,159	0,053. ρ_a	0,150
10	0,057. ρ_a	0,161	0,051. ρ_a	0,146	0,048. ρ_a	0,137
11	0,052. ρ_a	0,149	0,047. ρ_a	0,134	0,044. ρ_a	0,126
12	0,049. ρ_a	0,139	0,044. ρ_a	0,125	0,041. ρ_a	0,117
13	0,046. ρ_a	0,130	0,041. ρ_a	0,117	0,038. ρ_a	0,109
14	0,043. ρ_a	0,122	0,039. ρ_a	0,110	0,036. ρ_a	0,102
15	0,041. ρ_a	0,116	0,036. ρ_a	0,103	0,034. ρ_a	0,096

G.3.3 Hastes em Triângulo

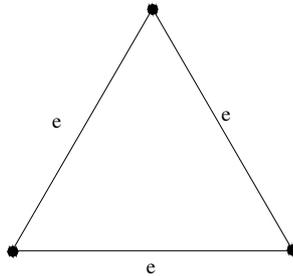


TABELA G-2 - COEFICIENTES DE REDUÇÃO K - HASTES EM TRIÂNGULO

Haste de aço cobreado: L = 2400 mm - d = 15,87 mm (5/8")			
Nº de Hastes	e (m)		
	3	4	5
3	0,432	0,407	0,393

Haste de aço cobreado: L = 3000 mm - d = 15,87 mm (5/8").			
Nº de Hastes	e (m)		
	3	4	5
3	0,452	0,422	0,404

G.3.4 Hastes em Quadrado Vazio

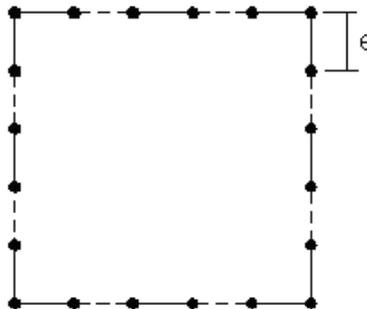


TABELA G-3 - COEFICIENTES DE REDUÇÃO K - HASTES EM QUADRADO VAZIO

Haste de aço cobreado: L = 2400 mm - d = 15,87 mm (5/8")				
Nº de hastes num lado do quadrado	Nº total de hastes	e (m)		
		3	4	5
2	4	0,350	0,325	0,310
3	8	0,209	0,188	0,175
4	12	0,150	0,133	0,123
5	16	0,118	0,104	0,096
6	20	0,098	0,086	0,079
7	24	0,084	0,073	0,067
8	28	0,074	0,064	0,058
9	32	0,066	0,057	0,052
10	36	0,059	0,051	0,047

Haste de aço cobreado: L = 3000 m - d = 15,87 mm (5/8")				
Nº de hastes num lado do quadrado	Nº total de hastes	e (m)		
		3	4	5
2	4	0,370	0,340	0,322
3	8	0,226	0,200	0,185
4	12	0,163	0,143	0,131
5	16	0,129	0,113	0,103
6	20	0,107	0,093	0,084
7	24	0,092	0,080	0,072
8	28	0,081	0,070	0,063
9	32	0,072	0,062	0,056
10	36	0,065	0,056	0,050

G.3.5 Hastes em Quadrado Cheio

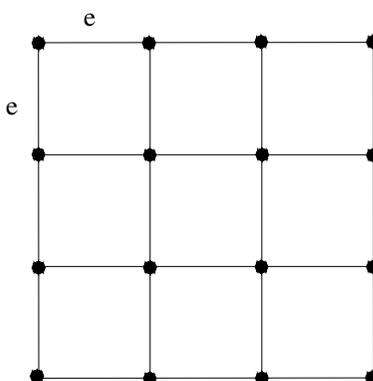


TABELA G-4 - COEFICIENTES DE REDUÇÃO K - HASTES EM QUADRADO CHEIO

Haste de aço cobreado: L = 2400 mm - d = 15,87 mm (5/8")				
Nº de hastes num lado do quadrado	Nº total de hastes	e (m)		
		3	4	5
3	9	0,208	0,184	0,169
4	16	0,141	0,122	0,110
5	25	0,108	0,091	0,081
6	36	0,086	0,071	0,062
7	49	0,071	0,059	0,051
8	64	0,061	0,049	0,043
9	81	0,053	0,043	0,037
10	100	0,047	0,038	0,032

Haste de aço cobreado: L = 3000 mm - d = 15,87 mm (5/8")				
Nº de hastes num lado do quadrado	Nº total de hastes	e (m)		
		3	4	5
3	9	0,227	0,198	0,181
4	16	0,157	0,133	0,119
5	25	0,121	0,101	0,089
6	36	0,097	0,080	0,069
7	49	0,082	0,066	0,057
8	64	0,070	0,056	0,048
9	81	0,061	0,049	0,042
10	100	0,054	0,043	0,036

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	72 de 106

G.3.6 Determinação do Número de Hastes e Espaçamento Entre as Mesmas a Partir de um Valor de Resistência de Aterramento

Para a determinação do número de hastes e espaçamento entre as mesmas a partir de um valor de resistência de aterramento desejado, deve ser adotado o seguinte procedimento:

- a) considerar inicialmente $\rho_a = \rho_{eq}$;
- b) dividir o valor da resistência de aterramento (R_{AT}) por ρ_{eq} ;
- c) comparar o resultado dessa divisão, com os coeficientes da coluna R (Ω) na Tabela G-1, correspondente às hastes padronizadas;
- d) adotar a configuração com número de hastes e espaçamento entre as mesmas, correspondente ao coeficiente igual ou menor que resulte da divisão;
- e) definida a configuração, o valor de R_{AT} deve ser iterativamente recalculado para o valor da resistividade aparente correspondente ao arranjo.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	73 de 106

ANEXO H (ORIENTATIVO) - EXEMPLO DE PROJETO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO UTILIZANDO HASTES

H.1 DADOS DO PROJETO

- Dimensionar um sistema de aterramento utilizando hastes de aço cobreado dimensões 2400 mm x 5/8".
- Resistência de aterramento desejada: 20 Ω .

H.2 DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO

a) Medições efetuadas no local

a (m)	Ponto 1 $R_1 (\Omega)$	Ponto 2 $R_2 (\Omega)$	Ponto 3 $R_3 (\Omega)$	Ponto 4 $R_4 (\Omega)$	Ponto 5 $R_5 (\Omega)$	Ponto 6 $R_6 (\Omega)$	Ponto 7 $R_7 (\Omega)$
2	25	20	22	24	23	27	26
4	15	12	13	22	18	14	17
8	4	6	7	5	3	4	7
16	2	1	2	1,5	1,4	1	1,2
32	0,6	0,6	0,3	0,4	0,5	0,8	0,6

b) Cálculos das resistividades do solo

a (m)	$\rho_1 (\Omega.m)$	$\rho_2 (\Omega.m)$	$\rho_3 (\Omega.m)$	$\rho_4 (\Omega.m)$	$\rho_5 (\Omega.m)$	$\rho_6 (\Omega.m)$	$\rho_7 (\Omega.m)$
2	314,16	251,33	276,46	301,59	289,03	339,29	326,73
4	376,99	301,59	326,73	552,92	452,39	351,86	427,26
8	201,06	301,59	351,86	251,33	150,80	201,06	351,86
16	201,06	100,53	201,06	150,80	140,74	100,53	120,64
32	120,64	120,64	60,32	80,42	100,53	160,85	120,64

$$\rho = 2 \pi a R, \text{ em } \Omega.m$$

[H-1]

Onde:

ρ - resistividade do solo, em $\Omega.m$;

a - distância entre os eletrodos, em m;

R - valor da resistência indicado no medidor de resistividade, em Ω .

c) Determinação dos valores médios de resistência e resistividade do solo

a (m)	$R_{\text{média}} (\Omega)$	$\rho_{\text{média}} (\Omega.m)$
2	23,86	299,80
4	15,86	398,53
8	5,14	258,51
16	1,44	145,05
32	0,54	109,15

d) Determinação dos desvios percentuais em relação à média das resistências de aterramento.

a (m)	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7
2	4,78	16,18	7,80	0,59	3,60	13,16	8,97
4	5,42	24,34	18,03	38,71	13,49	11,73	7,19
8	22,18	16,73	36,19	2,72	41,63	22,18	36,19
16	38,89	30,56	38,89	4,17	2,78	30,56	16,67
32	11,11	11,11	44,44	25,93	7,41	48,15	11,11

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	74 de 106

$$\delta\% = \left| \frac{R_m - R}{R_m} \right| \times 100 \quad [H-2]$$

Nota:

Os desvios máximos em relação à média aritmética estão todos dentro do valor admissível (50%), portanto, todos os pontos serão considerados.

H.3 ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

H.3.1 Curvas de Resistividade

Com os valores de resistividade média obtidos, traçar a curva "ρ x a" representativa do local. Esta curva deve ser traçada no papel semitransparente com escalas logarítmicas, conforme modelo de "Formulário para Estratificação do Solo" deste anexo.

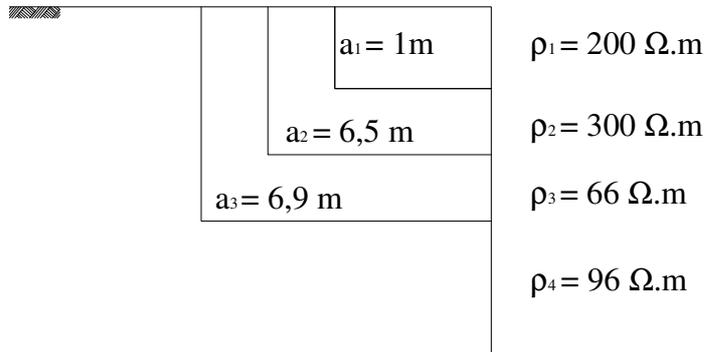
Para a obtenção da estratificação do solo (perfil de resistividades) pelo método gráfico, são utilizadas as "Curvas Padrão" e as "Curvas Auxiliares", conforme Desenhos D-1 e D-2 do Anexo D, respectivamente.

$$\text{Pólo 01} \left\{ \begin{array}{l} \rho_1 = \rho'_1 = 200 \, \Omega \cdot \text{m} \\ a_1 = 1 \, \text{m} \\ \frac{\rho_2}{\rho'_1} = 2,5 \quad \therefore \rho_2 = 2,5 \cdot 200 = 500 \, \Omega \cdot \text{m} \end{array} \right.$$

$$\text{Pólo 02} \left\{ \begin{array}{l} \rho'_2 = 395 \, \Omega \cdot \text{m} \\ a_2 = 6,50 \, \text{m} \\ \frac{\rho_3}{\rho'_2} = \frac{1}{6} \quad \therefore \rho_3 = \frac{395}{6} = 66 \, \Omega \cdot \text{m} \end{array} \right.$$

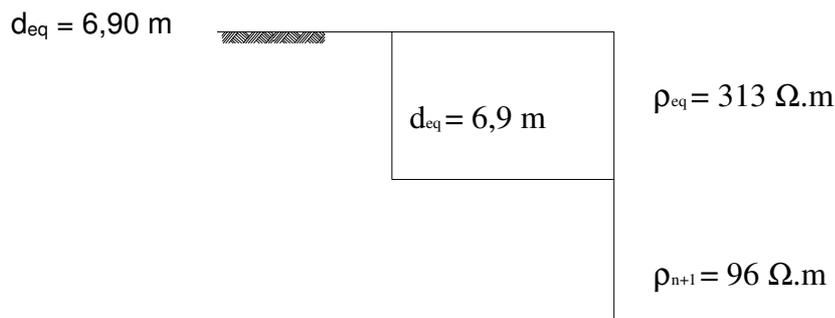
$$\text{Pólo 03} \left\{ \begin{array}{l} \rho'_3 = 290 \, \Omega \cdot \text{m} \\ a_3 = 6,90 \, \text{m} \\ \frac{\rho_4}{\rho'_3} = \frac{1}{3} \quad \therefore \rho_4 = \frac{290}{3} = 96 \, \Omega \cdot \text{m} \end{array} \right.$$

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	75 de 106



H.3.2 Redução das Camadas do Solo:

$$\rho_{eq.} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{\frac{d_1}{\rho_1} + \frac{d_2}{\rho_2} + \frac{d_3}{\rho_3}} = \frac{6,9}{\frac{1}{200} + \frac{6,5-1}{500} + \frac{6,9-6,5}{66}} = 313 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$



H.4 CÁLCULO DO NÚMERO DE HASTES NECESSÁRIAS

a) Utilizando Nove Hastes em Paralelo com Configuração Linear

Para $n = 9$

$$\alpha = \frac{(n-1) \cdot e}{d_{eq}} = \frac{(9-1) \cdot 3}{6,9} = 1,74$$

$$\beta = \frac{\rho_n + 1}{\rho_{eq}} = \frac{96}{313} = 0,31$$

Com os valores acima, através dos gráficos do Desenho D-3 do Anexo D, temos:

$$N = 0,8$$

$$\rho_a = N \times \rho_{eq} = 0,80 \times 313 = 250 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

Resistência de aterramento de uma haste:

$$R_{th} = \frac{\rho_a}{2\pi \cdot L} \ln \frac{4 \cdot L}{d} = \frac{250}{2\pi \cdot 2,40} \ln \frac{4 \cdot 2,40}{0,0254 \cdot \frac{5}{8}} = 106 \text{ } \Omega$$

Pela Tabela G-1 do Anexo G, para $n = 9$ e espaçamento entre hastes de 3 m, o coeficiente de redução para hastes alinhadas (k) é igual 0,164. logo podemos escrever:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	76 de 106

$$R_{at} = k \cdot R_{1h} = 0.164 \times 106 = 17,38 \Omega$$

Considerando que temos $R_{at} < R_{desejada}$, portanto, podemos admitir a possibilidade de aterramento com um número menor de hastes.

b) Utilizando Seis Hastes em Paralelo com Configuração Linear

$$\alpha = \frac{(6 - 1) \cdot 3}{2} = 1,09$$

$$\beta = 0,31$$

Com os valores acima, através dos gráficos do Desenho D-3 do Anexo D, temos:

- $N = 0,86$
- $\rho_a = N \times \rho_{eq} = 0,86 \times 313 = 269 \Omega \cdot m$

Resistência de aterramento de uma haste:

$$R_{1h} = \frac{269}{2\pi \cdot 2,40} \ln \frac{4 \cdot 2,40}{0,0254 \cdot \frac{5}{8}} = 114 \Omega$$

Pela Tabela G-1 do Anexo G, para $n = 6$ e espaçamento entre hastes de 3 m, o coeficiente de redução para hastes alinhadas (k) é igual 0,230.

$$R_{at} = 0,230 \times 114 = 26,2 \Omega$$

$$R_{at} = 26,2 \Omega$$

Temos que $R_{at} > R_{desejada}$, portanto, temos que admitir um número maior de hastes.

c) Utilizando Oito Hastes em Paralelo com Configuração Linear

$$\alpha = \frac{(8 - 1) \cdot 3}{2} = 1,52$$

$$\beta = 0,31$$

Com os valores acima, através dos gráficos do Desenho D-3 do Anexo D, temos:

- $N = 0,81$
- $\rho_a = N \times \rho_{eq} = 0,81 \times 313 = 253,5(\Omega.m)$

Resistência de aterramento de uma haste:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	77 de 106

$$R_{1h} = \frac{253,6}{2\pi \cdot 2,40} \ln \frac{4 \cdot 2,40}{0,0254 \cdot \frac{5}{8}} = 107,7 \quad (\Omega)$$

Pela Tabela G-1 do Anexo G, para $n = 8$ e espaçamento entre hastes de 3 m, o coeficiente de redução para hastes alinhadas (k) é igual 0,181.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	78 de 106

$$R_{at} = 0,181 \cdot 107,7 = 19,49 \Omega$$

Portanto, o sistema de aterramento poderá ser formado por oito hastes em paralelo, com configuração linear.

H.5 ATERRAMENTO COM HASTES EM PARALELO, ALINHADAS, COM TRATAMENTO QUÍMICO

a) Utilizando Três Hastes em Paralelo com Configuração Linear

Para $n = 3$

$$\alpha = \frac{(3-1) \cdot 3}{6,9} = 0,43$$

$$\beta = 0,31$$

Com os valores acima, através dos gráficos do Desenho D-3 do Anexo D, temos:

- $N = 0,90$
- $\rho_a = N \times \rho_{eq} = 0,90 \times 313 = 282 \Omega \cdot m$

Resistência de aterramento de uma haste com tratamento químico: Conforme Anexo I, adotaremos $K_T = 0,35$, portanto temos:

$$R_{1h} = \frac{0,35 \cdot 282}{2\pi \cdot 2,40} \ln \frac{4,2,40}{0,0254 \cdot \frac{5}{8}} = 41,92 \Omega$$

Pela Tabela G-1 do Anexo G, para $n = 3$ e espaçamento entre hastes de 3 m, o coeficiente de redução para hastes alinhadas (k) é igual 0,406.

$$R_{at} = 0,406 \cdot 41,92 = 17,0 \Omega.$$

Considerando que temos $R_{at} < R_{desejada}$, podemos admitir a possibilidade de aterramento com um número menor de hastes.

b) Utilizando Duas Hastes em Paralelo com Configuração Linear

Para $\alpha = 0,22$ e $\beta = 0,31$, temos:

- $N = 0,95$
- $\rho_a = N \times \rho_{eq} = 0,95 \times 313 = 297 \Omega \cdot m$

Resistência de aterramento de uma haste com tratamento químico:

$$R_{1h} = \frac{0,35 \cdot 297}{2\pi \cdot 2,40} \ln \frac{4,2,40}{0,0254 \cdot \frac{5}{8}} = 44,15 \Omega$$

Pela Tabela G-1 do Anexo G, para $n = 2$ e espaçamento entre hastes de 3 m, temos $k = 0,566$, logo,

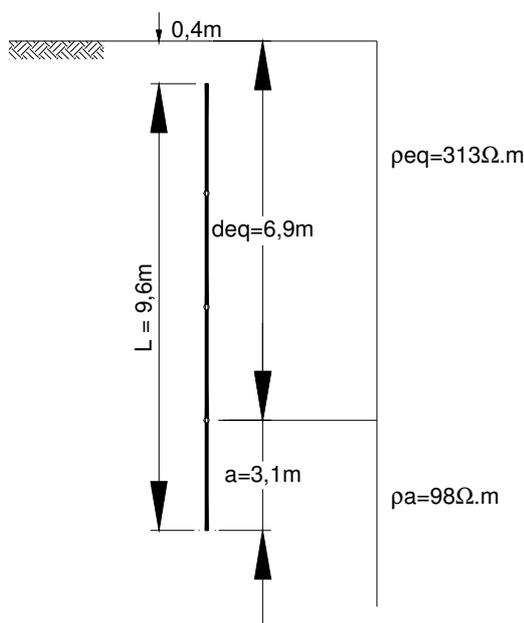
$$R_{at} = 0,566 \cdot 4,15 = 24,99 \Omega$$

Portanto, como $R_{at} > R_{desejada}$ e a resistência procurada não atende, o aterramento deve ser feito com três hastes alinhadas e tratadas quimicamente.

H.6 ATERRAMENTO COM HASTES PROFUNDAS

Pela estratificação do solo, observamos que se for adotado um sistema de aterramento composto por três hastes de 2,40 m emendadas, totalizando 7,20 m a 30 cm de profundidade, não teríamos 20% do comprimento total da haste (1,44 m) na camada de baixa resistividade ($\rho_3 = 66 \Omega.m$).

Portanto, serão utilizadas quatro hastes de 2400 mm emendadas, cravadas a 40 cm de profundidade.



$$L = 4 \cdot 2,40 = 9,60 \text{ m}$$

$$L_x = 3,10 \text{ m} \geq 20\% \text{ de } 9,60 \text{ m} = 1,92 \text{ m} \quad (\text{OK})$$

$$\rho_x = 96 \Omega.m < 200 \Omega.m \quad (\text{OK})$$

$$R_{1h} = \frac{\rho_x}{2\pi \cdot L} \ln \frac{4 \cdot L}{d} = \frac{96}{2\pi \cdot 9,60} \ln \frac{4 \cdot 9,60}{0,0254 \cdot \frac{5}{8}} = 12,4 \Omega$$

$$R_{1h} = 12,4 \Omega$$

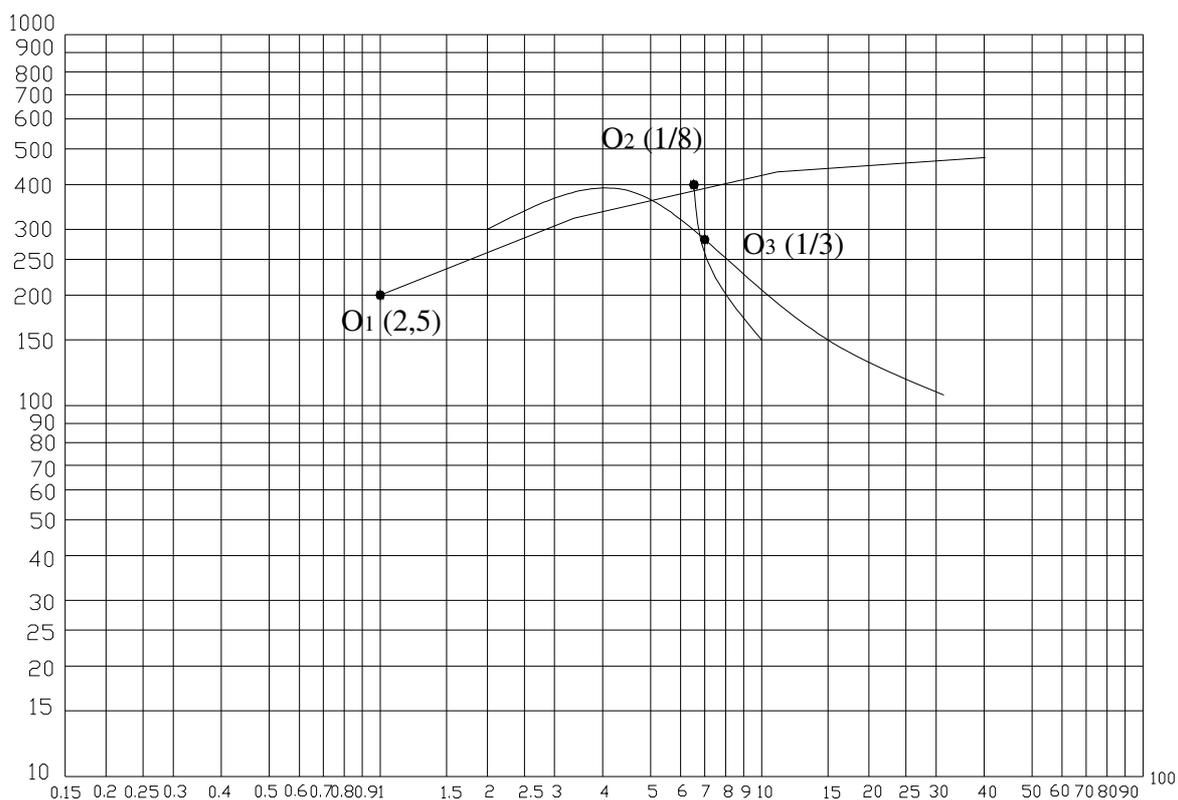
$$R_{at} = R_{1h} < R_{desejada}$$

Conclui-se, portanto, que o sistema de aterramento poderá ser composto por uma única haste profunda com 9,60 m de comprimento.

FORMULÁRIO PARA ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

DATA ___/___/___

a (m)	R (Ω)	$2\pi a$	$\rho = 2 \pi a R (\Omega \times m)$
2	23.86	12.56	300
4	15.86	25.12	398
8	5.14	50.25	258
16	1.44	100.50	145
32	0.54	200.1	109



	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	81 de 106

ANEXO I

RECOMENDAÇÕES PARA SOLOS DE ALTA RESISTIVIDADE

I.1 ALTERNATIVAS PARA SOLOS DE ALTA RESISTIVIDADE

Para solos de alta resistividade, onde o aterramento através do paralelismo de hastes torna-se anti-econômico ou mesmo inviável, são as seguintes as soluções conhecidas e utilizadas atualmente, para se reduzir a resistência dos aterramentos:

- tratamento químico;
- hastes profundas;
- hastes profundas em paralelo;
- conjuntos de aterramentos interligados;
- deslocamento do equipamento.

I.1.1 Tratamento Químico

O processo de tratamento químico do solo visa à diminuição da resistividade e, conseqüentemente, a obtenção de valores menores da resistência de aterramento.

O produto utilizado no processo deve apresentar as seguintes características:

- higroscopia;
- condução de corrente;
- baixa resistividade;
- não ser corrosivo;
- efeito de longa duração (não ser lixiviável);
- facilidade de aplicação;
- quimicamente estável.

A bentonita, que é um mineral argiloso, apresenta as características citadas acima, podendo ser utilizada em maior ou menor escala, dependendo do solo local.

O tratamento químico do solo com sais minerais, simplesmente apresenta bons resultados inicialmente, porém os sais são lavados pela ação das chuvas, além de poderem apresentar problema de corrosão nos materiais onde forem aplicados.

Quando se trata quimicamente uma haste, o valor da sua resistência é diminuído em relação ao inicial. Essa redução (K_T) é função da resistividade do solo, sendo que, quanto maior for esta, maior é a redução obtida. Na prática, encontram-se fatores de redução entre 5 e 50% (0,05 a 0,50).

O valor de K_T poderá ser obtido, para cada caso, cravando-se uma haste no local onde se quer efetuar o aterramento e medindo-se o valor da resistência (R_{antes}).

Efetua-se o tratamento e mede-se o novo valor de resistência (R_{depois}).

Assim obtém-se:

$$K_T = \frac{R_{depois}}{R_{antes}} \quad [I-1]$$

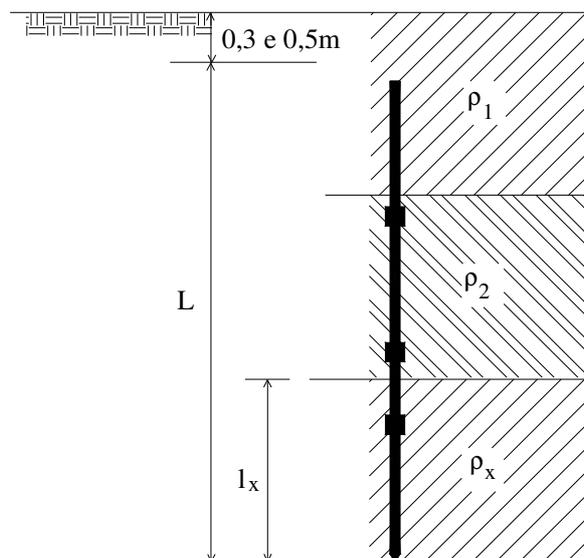
Logo a resistência de uma haste será:

$$R = K_T \cdot \frac{\rho_a}{2\pi \cdot L} \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad [I-2]$$

I.1.2 Haste Profunda

As hastes profundas ou emendáveis são aquelas de maior comprimento, obtidas pelo acoplamento mecânico e elétrico de várias seções. São utilizadas para atingir camadas mais profundas do solo, que normalmente são mais úmidas e, portanto, apresentam menor resistividade, proporcionando um melhor valor para a resistência do aterramento.

Além disso, estas camadas são menos sujeitas às variações de umidade e temperatura o que proporciona um aterramento com resistência praticamente constante ao longo do tempo.



Quando se utilizam hastes profundas, a dispersão de correntes para o solo acontece, em sua maioria, na parte inferior da haste, ou seja, na camada de solo de menor resistividade (ρ_x). A parte superior, situada nas camadas de resistividade maior, funcionará quase somente como um condutor para a dispersão das correntes na parte inferior da haste. Assim sendo, a resistência de uma haste profunda é dada por:

$$R_{th} = \frac{\rho_x}{2\pi \cdot L} \cdot \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad [I-3]$$

Onde:

- L - comprimento total das hastes interligadas, em m;
- ρ_x - resistividade do solo, em $\Omega \cdot m$;
- d - diâmetro da haste, em m.

Logo, deve-se ter o cuidado de prever um comprimento (L_x) de haste cravada na camada de baixa resistividade (ρ_x) para se conseguir um bom desempenho desse aterramento. Uma regra prática indica uma observância de: $L_x \geq 20\% \times L$.

São consideradas camadas de baixa resistividade aquelas que, relativamente, são menores que as camadas superiores ($\rho_x \ll \rho_{eq}$).

Do ponto de vista prático não é recomendável o emprego de hastes emendáveis com comprimento total acima de 9 m.

Ao invés de cravar hastes emendadas, pode ser avaliada a técnica de cavar o buraco no solo com perfuratriz de poço e, em seguida, introduzir uma única haste conectada a um fio longo que vai até a superfície. Os resultados a serem obtidos devem ser

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	83 de 106

avaliados, dada a dificuldade de execução do método, o qual exige a presença de água no local e pessoal especializado.

I.1.3 Hastes Profundas em Paralelo

A resistência de aterramento será dada pela combinação das hastes profundas em paralelo, sendo os coeficientes de redução tabelados a seguir:

TABELA I-1

COEFICIENTES DE REDUÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO PARA HASTES PROFUNDAS EM PARALELO

Nº de hastes	Coeficiente de redução (K)
2	$\frac{1+\gamma}{2}$ [I-4]
3	$\frac{2+\gamma-4\cdot\gamma^2}{6-7\cdot\gamma}$ [I-5]
4	$\frac{12+16\cdot\gamma-23\cdot\gamma^2}{48-40\cdot\gamma}$ [I-6]

Os coeficientes de redução acima foram calculados para um espaçamento entre hastes igual ao comprimento das mesmas cravadas no solo.

γ é dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\ln \frac{4 \cdot L_x}{d}} \quad [I-7]$$

Onde:

L_x - comprimento da parte da haste cravada na camada de baixa resistividade, em m;
 d - diâmetro da haste, em m.

O valor da resistência de aterramento das hastes profundas em paralelo será dado por:

$$R_{at} = K \cdot R_{1h} \quad [I-8]$$

I.1.4 Conjuntos de Aterramentos Interligados

Existem também casos de solos em que as camadas de resistividade baixa são muito profundas ou apresentam camadas de rocha ou outros elementos com alta resistência mecânica à cravação.

Nestes casos, a utilização de hastes profundas não é recomendada.

Como solução pode-se interligar esse aterramento a um ou mais adjacentes, cada um deles formado por hastes alinhadas (com tratamento ou não), através do próprio neutro da rede ou, se este não existir, por meio de condutor enterrado, quando viável.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	84 de 106

A resistência final de aterramento será dada pelo resultado dos dois ou mais aterramentos em paralelo.

Naturalmente, esses aterramentos adjacentes estarão deslocados da instalação que se pretende aterrar, com o objetivo de obter condições de solo mais favoráveis. Entretanto, caso a resistência individual do aterramento no ponto seja superior a 100 Ω , a distância da base do poste aos conjuntos de eletrodos remotos não deverá exceder 30 m, objetivando limitar a impedância do aterramento para a descarga de surtos.

I.1.5 Deslocamento do Equipamento

Nos casos de aterramento de equipamento, onde as condições adversas do solo não sejam facilmente contornadas pelas soluções anteriormente propostas, deve ser verificada a possibilidade de relocar o equipamento.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	85 de 106

ANEXO J (ORIENTATIVO)

DIRETRIZES PARA PROJETOS DE ATERRAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE DISTRIBUIÇÃO

J.1 OBJETIVO

- a) Fixar diretrizes que orientem na elaboração de projetos de aterramento de sistemas elétricos de distribuição, em tensões alternadas inferiores ou iguais a 34,5kV.
- b) Esta metodologia não se aplica aos Sistemas Monofilares com Retorno por Terra - MRT.

J.2 DEFINIÇÕES

Além das definições e terminologias citadas no item 4 desta norma, são adotadas as seguintes:

J.2.1 Condutor Horizontal de Aterramento

Condutor empregado na interligação de eletrodos verticais.

J.2.2 Eletrodo Horizontal

Eletrodo de aterramento na forma de condutor retilíneo ou em anel, enterrado horizontalmente no solo.

J.2.3 Eletrodo Vertical

Eletrodo de aterramento enterrado verticalmente no solo.

J.2.4 Haste Profunda

Haste de maior comprimento, obtida pelo acoplamento mecânico e elétrico de mais de uma seção de eletrodo.

J.2.5 Impedância ao Surto de um Aterramento

Relação entre o valor máximo da queda de tensão nele desenvolvida e o valor máximo da corrente escoada.

J.2.6 Sistemas Primários

Para fins de definição da metodologia para cálculo do aterramento, os sistemas primários de distribuição são classificados em J.2.6.1 a J.2.6.3.

J.2.6.1 Sistemas a Quatro Fios, Multi-aterrados

Sistemas em que o condutor neutro, oriundo da malha de aterramento da fonte de suprimento (subestação), comum aos circuitos primário e secundário, acompanha toda a rede primária, sendo regularmente conectado à terra, em pontos definidos, de maneira a constituir uma rede de terra contínua e com baixa impedância. Esse condutor deve ser também interligado ao neutro de outros alimentadores, quando disponíveis, inclusive daqueles originários de outras subestações.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	86 de 106

Nota:

Para fins de projeto de aterramento, enquadram-se nesta classificação todos os ramais primários monofásicos (fase x neutro) e bifásicos (fase x fase x neutro), que são sempre derivados de troncos trifásicos a quatro fios.

J.2.6.2 Sistemas a Três Fios com Neutro Secundário Contínuo

Sistemas primários em que o condutor neutro não é interligado à malha de aterramento da fonte de suprimento (subestação), ficando restrito ao sistema secundário correspondente (neutro de baixa tensão). São considerados como de neutro secundário contínuo, aqueles em que o neutro de baixa tensão interliga todos os transformadores de distribuição.

J.2.6.3 Sistemas a Três Fios com Neutro Secundário Descontínuo

Sistemas primários idênticos aos citados em J.2.6.2, onde nem todos os neutros de baixa tensão dos diversos transformadores de distribuição são interligados.

J.2.7 **Sistemas Secundários**

J.2.7.1 Sistemas Isolados

Sistemas secundários em que o ponto neutro da fonte de suprimento não é interligado à terra.

J.2.7.2 Sistemas Aterrados

J.2.7.2.1 Sistemas a três fios

Sistemas secundários em que o ponto neutro só é interligado à terra junto à fonte de suprimento.

Nota:

Para fins de definição da metodologia para cálculo do aterramento, devem ser enquadrados em J.2.6.3.

J.2.7.2.2 Sistemas a quatro fios

Sistemas secundários em que o condutor neutro é interligado ao aterramento da fonte de suprimento (transformador de distribuição) e aterrado nos pontos de utilização.

Notas:

- 1) *Para fins de projeto de aterramento, enquadram-se nesta classificação todos os sistemas secundários monofásicos a dois fios (fase e neutro) e a três fios (2 fases e neutro).*
- 2) *Quando suprido por sistemas primários a quatro fios, o condutor neutro é geralmente único, comum aos sistemas primário e secundário.*

J.3 **CONDIÇÕES GERAIS**

Para prover as condições adequadas de segurança, o aterramento de uma rede de distribuição deve atender, cumulativamente, às seguintes condições:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	87 de 106

- a) viabilizar adequado escoamento de sobretensões, limitando as tensões transferidas ao longo da rede, em consequência da descarga de surtos;
- b) garantir a segurança dos usuários do sistema através da limitação das diferenças de potencial entre o condutor neutro e a terra, resultantes da circulação das correntes de desequilíbrio;
- c) garantir a efetividade do aterramento do sistema, limitando a valores adequados os deslocamentos do neutro por ocasião da ocorrência de faltas à terra;
- d) assegurar a operação rápida e efetiva dos dispositivos de proteção de sobrecorrente, na ocorrência de faltas à terra, limitando a valores não perigosos as tensões resultantes da passagem das correntes de curto-circuito.

A elaboração do projeto específico de aterramento de uma rede de distribuição deve ser precedida da verificação do tipo de sistema de maneira a alcançar os objetivos citados acima.

J.4 ELEMENTOS PARA PROJETO DE ATERRAMENTO

J.4.1 Resistividade do Solo

- a) Para o desenvolvimento de um projeto desta natureza é fundamental o conhecimento das características do solo, principalmente de sua resistividade elétrica.
- b) A medição prévia da resistividade permite a definição de áreas de características homogêneas, onde a utilização de um valor médio não implica em distorção dos resultados globais, obtidos pela aplicação da metodologia para medição de resistividade e estratificação do solo dos Anexos C e D, respectivamente.

J.4.2 Resistência de Aterramento de Eletrodos Simples

As metodologias para cálculo da resistência de aterramento para as configurações mais utilizadas nos sistemas de distribuição estão apresentadas no Anexo G.

J.4.3 Solos de Alta Resistividade

Para esses solos, nos quais o aterramento através do paralelismo de hastes alinhadas torna-se anti-econômico ou mesmo inviável, deve ser adotada uma das alternativas para redução da resistência dos aterramentos, indicadas no Anexo I.

J.5 ELEVAÇÕES DE POTENCIAL NO SOLO

Para fins de avaliação das condições de segurança do sistema de aterramento, são apresentadas, a seguir, as rotinas de cálculo adequadas para a determinação das elevações de potencial resultantes da circulação de correntes de carga e curtos-circuitos, através das configurações mais usuais para aterramento de sistema de distribuição.

Com base nesses valores podem ser calculados potenciais de passo, toque e transferência, essenciais ao desenvolvimento de estudos sobre aterramentos especiais.

Registre-se que os equacionamentos a seguir apresentados não inibem a utilização de aplicativos computacionais que, por sua vez, propiciariam cálculos mais refinados para aterramentos com configurações complexas.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	88 de 106

J.5.1 Aterramento com Uma Haste Vertical

J.5.1.1 Haste Vertical com Cabeça na Superfície

A elevação de potencial no solo a qualquer distância (X) da haste, desde que $X \neq 0$, é dada pela expressão:

$$V_x = \frac{\rho_a \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{\sqrt{L^2 + X^2} + L}{X} \quad [J-1]$$

Onde:

V_x - elevação de potencial a uma distância X da haste, em V;

ρ_a - resistividade aparente do solo, em $\Omega \cdot m$;

I - corrente que escoou pela haste, em A;

L - comprimento da haste, em m;

X - distância da haste ao ponto considerado, em m.

J.5.1.2 Haste Vertical com a Cabeça Enterrada

Para uma haste enterrada a uma profundidade P em relação à superfície do solo, a elevação de potencial, a uma distância X do ponto de cravação da haste, desde que $X \neq 0$, é dada por:

$$V_x = \frac{\rho_a \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{\sqrt{P^2 + X^2} - P}{\sqrt{(L+P)^2 + X^2} - (L+P)} \quad [J-2]$$

Onde:

V_x - elevação de potencial a uma distância X da haste, em V;

ρ_a - resistividade aparente do solo, em $\Omega \cdot m$;

I - corrente que escoou pela haste, em A;

L - comprimento da haste, em m;

P - profundidade da haste em relação à superfície do solo, em m;

X - distância da haste ao ponto considerado, em m.

J.5.2 Aterramento com Condutor Horizontal

A elevação de potencial em um ponto V do solo em relação a um condutor de aterramento horizontal (Desenho J-1), enterrado a uma profundidade P do solo, é dada pela expressão:

$$V_v = \frac{\rho_a \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{|X| + L/2 + \sqrt{(|X| + L/2)^2 + P^2 + Y^2}}{|X| - L/2 + \sqrt{(|X| - L/2)^2 + P^2 + Y^2}} \quad [J-3]$$

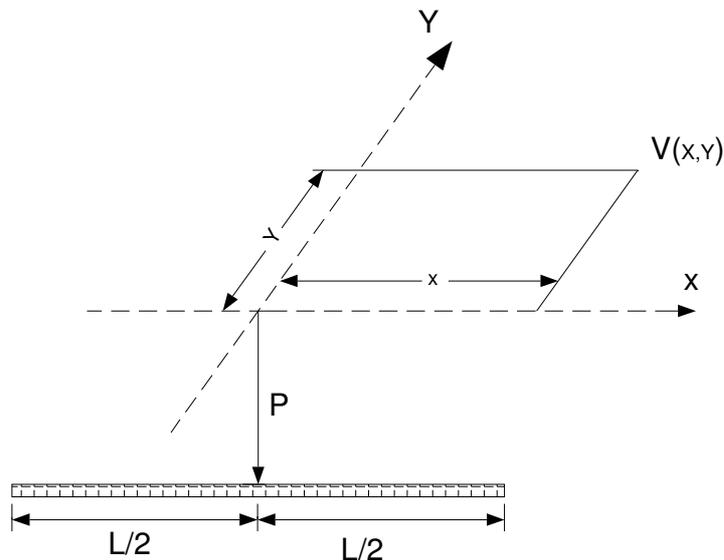
Onde:

V_v - elevação de potencial no ponto V, devido ao escoamento de corrente para a terra através de um condutor horizontalmente enterrado a uma profundidade P do solo, em V;

ρ_a - resistividade aparente do solo, em $\Omega \cdot m$;

I - corrente que escoou pelo condutor horizontal, em A;

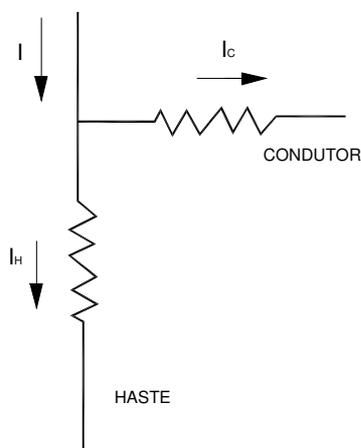
- L - comprimento do condutor horizontal, em m;
X - distância do ponto X ao centro do condutor horizontal na direção da abscissa, em m;
Y - distância do ponto V ao centro do condutor horizontal na direção da ordenada, em m;
P - profundidade do condutor horizontal em relação à superfície do solo, em m.



Desenho J-1
Localização de um ponto V em relação a um condutor horizontalmente enterrado

J.5.3 Aterramento com Hastes Verticais Alinhadas

- Por ocasião do escoamento de uma corrente para a terra através de um sistema de aterramento com hastes verticais alinhadas, para determinação da elevação de potencial em um ponto qualquer na superfície do solo devem ser cumulativamente considerados tanto os efeitos da dispersão através de cada uma das hastes componentes do conjunto como aquele resultante da dissipação de corrente pelo condutor de interligação.
- A distribuição das correntes deve ser considerada inversamente proporcional às respectivas resistividades aparentes vistas pelo condutor e pelo conjunto de hastes envolvidas, e diretamente proporcional aos comprimentos desses dois tipos de eletrodos (Desenho J-2). Definido o valor da função $f(N)$, as correntes dissipadas pelas hastes e pelo condutor de interligação podem ser determinadas pelas expressões J-4 e J-5.



Desenho J-2
Distribuição de corrente entre condutor e hastes
em aterramentos com hastes alinhadas

$$I_C = I \cdot \frac{f(n)}{1 + f(n)} \quad [J-4]$$

$$I_H = I \cdot \frac{1}{1 + f(n)} \quad [J-5]$$

Onde:

- I_C - corrente dissipada pelo condutor de interligação, em A;
- I_H - corrente dissipada pelas hastes, em A;
- $f(n)$ - relação entre os comprimentos de condutor e hastes envolvidas;
- I - corrente dissipada pelo aterramento, em A.

c) O valor da elevação de potencial em um ponto V do solo, devido à dispersão pelo conjunto de hastes, é dado pela expressão:

$$V_h = \frac{\rho_a}{2 \cdot \pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{I_{hi}}{L_i} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{P^2 + X_i^2} - P}{\sqrt{(L_i + P)^2 + X_i^2} - (L_i + P)} \right) \quad [J-6]$$

Onde:

- V_h - elevação de potencial no ponto V devido ao escoamento de corrente à terra através do conjunto de hastes envolvidas, em m;
- ρ_a - resistividade aparente correspondente à configuração do aterramento, em $\Omega \cdot m$;
- P - profundidade da cabeça das hastes, em m;
- X_i - distância do ponto V a cada uma das hastes h_i envolvidas, em m;
- L_i - comprimento de cada uma das hastes h_i envolvidas, em m;
- n - número de hastes h_i que compõem o aterramento;
- I_{hi} - fração de corrente em cada uma das hastes individuais.

d) Para a determinação da elevação de potencial devido ao escoamento de corrente pelo condutor horizontal deve ser utilizada a expressão [J-3], considerando-se: $\rho_a = \rho_c$ e $I = I_c$. A elevação de potencial total no ponto V é dada pela soma deste

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	91 de 106

resultado ao valor obtido pela expressão [J-6].

Nota:

ρ_c = resistividade aparente correspondente a um aterramento composto apenas pelo condutor de interligação envolvido, em $\Omega.m$.

J.6 LIMITAÇÕES IMPOSTAS AOS ATERRAMENTOS PARA ADEQUADO ESCOAMENTO DE SURTOS ATMOSFÉRICOS

Os aterramentos dos dispositivos de proteção contra sobretensão objetivam viabilizar o adequado escoamento de eventuais surtos, garantindo a manutenção da confiabilidade do sistema e a segurança dos usuários de seus serviços. No que concerne à proteção específica do equipamento junto ao qual são instalados, o valor da resistência dos aterramentos não tem maior influência. Desde que especificados os dispositivos de proteção adequados e utilizado condutor de aterramento único, a limitação do comprimento das interligações desses dispositivos com a carcaça é suficiente para a obtenção de adequado grau de proteção. Entretanto, o valor de resistência oferecido pelo aterramento dos dispositivos de proteção contra sobretensão é fundamental para a determinação da diferença de potencial que se estabelecerá entre os componentes do sistema elétrico e a terra, em função da passagem da corrente de impulso nessa resistência.

A elevação de potencial até o ponto de conexão do condutor de aterramento com o condutor neutro (afetada, também, pela queda de tensão no cabo de descida), é transmitida para os pontos de utilização, enquanto que a diferença de potencial entre os condutores fase no topo da estrutura e a terra (afetada, também, pela tensão residual dos dispositivos de proteção), se propagará ao longo do circuito primário. Desses potenciais, os transmitidos pelo condutor neutro devem garantir condições de segurança para os usuários; os transmitidos pelos condutores fase da rede primária, devem ser inferiores ao valor da tensão suportável nominal de impulso atmosférico das estruturas, de forma a evitar disrupção nos isoladores, que, não raro, são inclusive danificados pela corrente de curto-circuito subsequente.

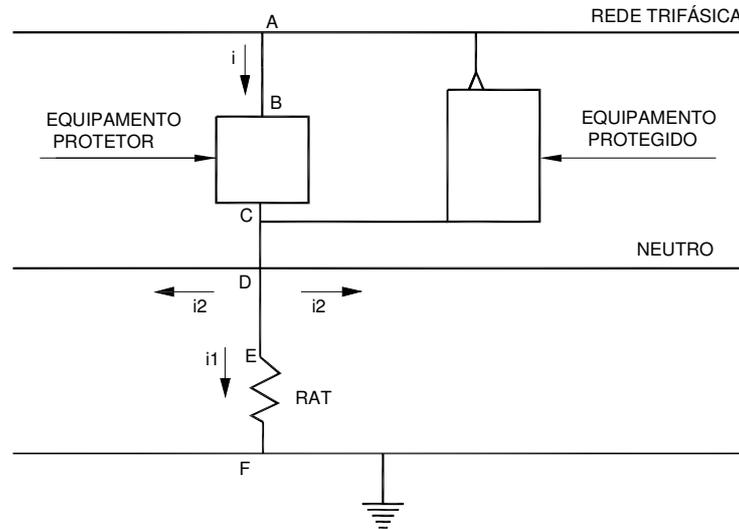
J.6.1 Metodologias para Determinação do Valor Máximo da Resistência de Aterramento para o Escoamento de Surtos

São a seguir apresentados para cada tipo de sistema de distribuição, roteiros para cálculo das elevações de potencial resultantes das descargas de surtos, que devem ser processados para diversos valores de resistência de aterramento (R_{AT}), de forma a permitir a definição do seu valor limite.

O valor máximo de R_{AT} corresponderá ao maior dos valores que vier a resultar em tensões no condutor neutro e nos condutores primários de fase, inferiores a limites previamente estabelecidos, em função dos critérios adotados para proteção contra sobretensões. Os parâmetros para definição desses limites são apresentados no Anexo C.

J.6.1.1 Sistemas Trifásicos a Quatro Fios, Multi-aterrados

J.6.1.1.1 O Desenho J-3 apresenta um esquema simplificado da ligação de um equipamento em um sistema trifásico a quatro fios, adotado como base para o desenvolvimento a seguir apresentado:



Desenho J-3

Esquema de ligação de um equipamento em um sistema trifásico a quatro fios

Onde:

- i - valor de crista da corrente de descarga, em kA;
- i_1 - valor de crista da parcela de i que escoa pelo aterramento no ponto considerado, em kA;
- i_2 - valor de crista da parcela de i que circula pelo condutor neutro do sistema, em kA.

J.6.1.1.2 Considerando uma impedância ao surto para o condutor neutro (Z_{sn}):

$$i_1 = i \cdot \frac{Z_{sn} / 2}{R_{AT} + Z_{sn} / 2} \quad [J-7]$$

Para a condição limite, tem-se:

a) tensão máxima no neutro (V_{DF})

$$V_{DF} = V_{DE} + V_{EF} \quad [J-8]$$

b) tensão máxima nas fases primárias (V_{AF})

$$V_{AF} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} + V_{DE} + V_{EF} \quad [J-9]$$

$$V_{AB} + V_{CD} = L \cdot (AB + CD) \cdot \frac{di}{dt} \quad [J-10]$$

Onde:

- V_{BC} = tensão residual do equipamento de proteção, em kV;
- L - indutância do condutor = 1,214 mH/km;
- di/dt - taxa de crescimento da onda de corrente no tempo zero ($di/dt = 2,72 \cdot i/t$);
- t - tempo real de crista, em $\mu s = 125\%$ do tempo de crista da onda de surto considerada.

$$V_{DE} = L \cdot DE \cdot \frac{di_1}{dt} \quad [J-11]$$

$$V_{EF} = R_{AT} \cdot i_1$$

[J-12]

As parcelas V_{AB} , V_{CD} e V_{DE} , têm seus valores máximos somados algebricamente, por terem as correntes i e i_1 o mesmo tempo de crista. Contudo, a acumulação desse subtotal com os valores de V_{BC} e V_{EF} é feita a partir do preenchimento da Tabela J-1, de acordo com as instruções apresentadas a seguir.

**TABELA J-1
ELEVAÇÕES DE POTENCIAL EM SISTEMAS A QUATRO FIOS, MULTI-ATERRADOS**

CORRENTE		V RESIDUAL DO DISP.		QUEDA DE TENSÃO NO		QUEDA DE					
TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO	TENSÃO				
TEMPO	DE DESCARGA	PROTEÇÃO	(VBC)	CONDUTOR DE ATERRAMENTO	NO	NO	NO				
ATERRAMENTO	NO	NAS FASES									
pu	(μs)	pu	i(kA)	i1(kA)	pu	(kV)	VAB + VCD	VDE	VEF	VDF	VAF
						(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)	(kV)
0	0			0		1,00					
0,05	0,125			0,730		0,87					
0,10	0,230			0,890		0,75					
0,20	0,430			0,975		0,60					
0,30	0,590			0,990		0,48					
0,40	0,720			1,000		0,38					
(A)	(B)	(C)		(D)		(E)	(F)	(G)	(H)	(I)	
0,50	0,810			1,000		0,29					
0,60	0,880			0,990		0,22					
0,70	0,930			0,980		0,15					
0,80	0,970			0,975		0,09					
0,90	0,990			0,965		0,04					
1,00	1,000			0,950		0					

- (A) Coluna a ser preenchida a partir do tempo real de crista da onda de corrente, em μs , que corresponderá a 1,00 pu. Para a forma de onda padronizada (pulso de tensão de $1,2 \times 50 \mu s$), o tempo real de crista é: 125% de $1,2 \mu s = 1,5 \mu s$.
- (B) Coluna a ser preenchida a partir do valor de pico da máxima corrente de descarga, em kA, que corresponderá a 1,00 pu.
- (C) Coluna a ser preenchida a partir do valor de pico da parcela da corrente de descarga, em kA, que circulará pela resistência de aterramento, calculada segundo a expressão [J-7], que corresponderá a 1,00 pu.

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	94 de 106

- (D) Coluna a ser preenchida a partir do valor máximo da tensão residual do equipamento de proteção, equivalente à corrente de descarga de 5 kA, que corresponderá a 1,00 pu.
- (E) O valor máximo de $V_{AB} + V_{CD}$, em kV, que corresponderá a 1,00 pu, deve ser obtido mediante a seguinte expressão:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i \cdot (L_{AB} + L_{CD})}{0,3048 \cdot t} \quad [J-13]$$

Onde:

L_{AB} - comprimento de condutor no trecho AB (m);

L_{CD} - comprimento de condutor no trecho CD (m).

- (F) O valor máximo de V_{DE} , em kV, que corresponderá a 1,00 pu, é obtido pela seguinte expressão:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \cdot L_{DE}}{0,3048 \cdot t} \quad [J-14]$$

Onde:

L_{DE} - comprimento de condutor no trecho DE (m).

- (G) Coluna a ser preenchida com o resultado da multiplicação dos valores de corrente da coluna (C), pelo valor da resistência ôhmica do aterramento (R_{AT}).
- (H) Coluna a ser preenchida com o resultado da adição dos valores correspondentes às colunas (F) e (G).
- (I) Coluna a ser preenchida com o resultado da adição dos valores correspondentes às colunas (D), (E) e (H).

Nota:

Os tempos correspondentes aos valores máximos das colunas (H) e (I), podem não coincidir nem com o da máxima tensão residual do equipamento de proteção, nem com o da máxima queda de tensão no condutor de aterramento; nem mesmo com o tempo da máxima queda de tensão na resistência de aterramento.

J.6.1.1.3 Após o preenchimento da Tabela J-1 para diversos valores de R_{AT} , o seu limite máximo corresponderá ao maior dos valores que não implique em ultrapassagem dos limites de tensão previamente definidos, tanto para V_{DF} (coluna H – adotar 80 kV), como para V_{AF} (coluna I – adotar NBI dos transformadores no caso de redes urbanas e nível de isolamento das estruturas no caso de redes rurais). A metodologia apresentada neste item é também aplicável a ramais monofásicos (Fase-Neutro), que são sempre derivados de troncos trifásicos a quatro fios.

J.6.1.2 Sistemas Trifásicos a Três Fios com Neutro Secundário Contínuo

Para a determinação do valor máximo adequado da resistência dos aterramentos desse tipo de sistema é integralmente válida a metodologia de cálculo apresentada em J.6.1.1.

J.7 ATERRAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Neste item são apresentadas metodologias adequadas à determinação das condições mínimas a serem satisfeitas pelo projeto do aterramento de forma a atender, simultaneamente, a todos os objetivos fixados no item J.3.1 deste anexo. Face às

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	95 de 106

características inerentes a cada tipo de sistema, a apresentação é feita em itens específicos, abordando:

- a) sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados;
- b) sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário contínuo.

J.7.1 **Sistemas Trifásicos a Quatro Fios, Multi-aterrados**

Nesse tipo de sistema, os aterramentos do neutro efetivados ao longo da rede (multi-aterramento), além de propiciarem adequado escoamento dos surtos, devem satisfazer aos seguintes requisitos básicos:

- a) garantir a efetividade do aterramento do sistema; condição na prática satisfeita sempre que a resistência do aterramento equivalente se situar na faixa de 0,1 a 0,3 Ω ;
- b) garantir a manutenção do neutro, em condições normais de operação, a um potencial inferior a 10 V em relação à terra; condição que assegura não ser alcançado o limite de 10 mA quando de um eventual toque no referido condutor;
- c) garantir a permanência dos potenciais de passo dentro de limites toleráveis, em condições de defeito;
- d) por não ser viável a manutenção dos potenciais de toque e de transferência, em condições de defeito, dentro dos limites toleráveis, tendo em vista os tempos de operação dos dispositivos de proteção usuais, deve ser prevista proteção parcial para os potenciais de toque através da colocação do condutor de aterramento interno ao poste (postes de concreto circular), ou em eletroduto ou canaleta, até a altura de 3 m no solo, quando o referido condutor for externo ao poste.

J.7.1.1 Dados de Entrada

Para os cálculos e elaboração do projeto de aterramento de uma rede de distribuição são necessários os seguintes dados:

k - comprimento da rede primária, em km;

Nota:

No caso de regiões com alta densidade de carga, onde o comprimento da rede primária é pequeno quando comparado ao comprimento total do neutro (o qual acompanha toda a rede secundária), considerar o comprimento total do neutro deste condutor (rede primária + rede secundária).

z - módulo da impedância própria do condutor neutro, em Ω /km;

Nota:

Caso a bitola do neutro não seja uniforme considerar a menor utilizada.

n - número de entradas de serviço por poste (valor médio);

ρ - perfil de resistividade do solo, obtido conforme Anexo D (modelo conforme Desenho J-4);

ρ_s - resistividade superficial do solo, em Ω .m;

Nota:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	96 de 106

ρ_s = resistividade determinada a partir da medição com menor distância entre hastes (se disponível); caso contrário considerar ρ_s = resistividade da 1ª camada do solo estratificado (ρ_1).

kVA - demanda máxima prevista para o alimentador, em kVA;

kV - tensão nominal entre fases do sistema, em kV;

j - vão médio entre postes, em m;

L - comprimento da haste padronizada, em m;

d - diâmetro da haste padronizada, em m;

Σ - parcela da demanda máxima admitida como desequilíbrio no neutro (pu);

α - resistência de aterramento equivalente requerida para garantir a efetividade do aterramento do sistema, em Ω , onde: $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$;

τ - coeficiente de segurança que leva em consideração o grau de eficiência dos aterramentos das unidades consumidoras, onde: $1 < \tau < 10$;

R_{SE} - resistência de aterramento da subestação onde se origina o alimentador, em Ω ;

X_{1T} - reatância de sequência positiva do transformador da subestação, em Ω ;

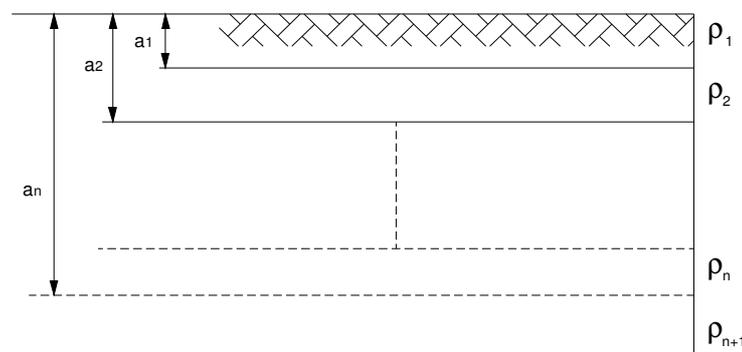
X_{0T} - reatância de sequência zero do transformador da subestação, em Ω ;

R_{1C} - resistência de sequência positiva do condutor fase, em Ω/km ;

X_{1C} - reatância de sequência positiva do condutor fase, em Ω/km ;

R_{0C} - resistência de sequência zero do condutor fase, em Ω/km ;

X_{0C} - reatância de sequência zero do condutor fase, em Ω/km .



Desenho J-4 – Perfil de resistividade do solo

J.7.1.2 Processamento

J.7.1.2.1 Determinação da resistência equivalente de aterramento por km, referente ao condutor neutro necessária para assegurar a efetividade do aterramento do sistema.

PASSO 1:

Cálculo da resistência de aterramento de cada entrada de serviço, supondo a utilização de uma única haste vertical padronizada (R_1).

$$R_1 = \tau \cdot \frac{\rho_a}{2\pi L} \cdot \ln \frac{4L}{d} \quad [J-15]$$

Nota:

ρ_a deve ser calculada conforme Anexo D.

PASSO 2:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	97 de 106

Cálculo da resistência equivalente dos aterramentos de todas as entradas de serviço supridas pelo alimentador (R_2).

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot j}{1000 \cdot k \cdot n} \quad [J-16]$$

Nota:

Caso seja conhecido o valor real do número de entradas de serviço supridas pelo alimentador (m), R_2 pode ser calculada por.

$$R_2 = \frac{R_1}{m} \quad [J-17]$$

PASSO 3:

Cálculo da resistência equivalente de aterramento do neutro que, em paralelo com R_2 , garante efetividade ao aterramento do sistema (R_3).

$$R_3 = \frac{\alpha \cdot R_2}{R_2 - \alpha} \quad [J-18]$$

Nota:

Se o cálculo de R_3 resultar em valor negativo ou nulo, significa serem os aterramentos das unidades consumidoras suficientes para garantir a efetividade do aterramento do sistema. Neste caso, para a continuação da rotina de cálculo, considerar $R_3 = \text{infinito}$.

PASSO 4:

Cálculo da resistência equivalente de aterramento por km de neutro necessária para assegurar a efetividade do aterramento do sistema (R_4).

$$R_4 = k \cdot R_3 \quad [J-19]$$

J.7.1.2.2 Determinação da resistência equivalente de aterramento por km referente ao condutor neutro, necessária à sua manutenção a um potencial de 10 V em condições normais de operação.

PASSO 1:

Cálculo da resistência equivalente dos aterramentos das entradas de serviço supridas por km de alimentador (R_5).

$$R_5 = k \cdot R_2 \quad [J-20]$$

PASSO 2:

Cálculo da máxima resistência equivalente de aterramento por km, necessária a assegurar a manutenção do neutro ao potencial de 10 V, em condições normais de operação (R_6).

$$R_6 = \frac{10 \cdot \sqrt{3} \cdot kV \cdot k - \sum kVA \cdot z}{\sum kVA} \quad [J-21]$$

Nota:

Se o cálculo de R_6 resultar em valor negativo ou nulo significa ser impossível manter o neutro a 10 V nas condições supostas. Deve ser verificada a

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	98 de 106

possibilidade de aumentar a bitola do condutor neutro e/ou reduzir a corrente de desequilíbrio admitida.

PASSO 3:

Cálculo da resistência equivalente de aterramento por km, referente ao condutor neutro necessária à sua manutenção a um potencial de 10 V, em condições normais de operação (R7).

$$R7 = \frac{R5 \cdot R6}{R5 - R6} \quad [J-22]$$

Nota:

Se o cálculo de R7 resultar em valor negativo ou nulo, significa serem os aterramentos das unidades consumidoras suficientes para garantir a manutenção do neutro a um potencial de 10 V, em condições normais de operação. Neste caso, para a continuação da rotina de cálculo, considerar R7 = infinito.

J.7.1.2.3 Determinação da máxima resistência equivalente de aterramento por km, referente ao condutor neutro (R8)

R8 = menor valor resultante da comparação entre R4 e R7.

Caso $R8 > \frac{R_{AT\ max}}{2}$, adotar para continuação dos cálculos $R8 = \frac{R_{AT\ max}}{2}$, visando atender às condições (a) e (b) de J.7.1.2.4.

J.7.1.2.4 Determinação do valor máximo da resistência de cada aterramento (R9) e do número mínimo de aterramentos por km (x)

A determinação do binômio (R9,x) deve satisfazer à seguinte inequação:

$$\frac{R9}{x} \leq R8 \quad [J-23]$$

Além disso, analisadas individualmente, essas variáveis devem satisfazer às seguintes condições:

- a) $x \geq 2$, necessária para se garantir, com coeficiente de segurança igual a 2, a existência, em qualquer hipótese de pelo menos um aterramento por km, feito pela CHESP, independentemente dos pertencentes às unidades consumidoras;
- b) $R9 \leq R_{AT\ máx.}$ (calculado com base no item J.6), pelo menos nos pontos de instalação de dispositivos de proteção contra sobretensão, por ser condição essencial à sua adequada operação.

Nota:

Por se tratar de um binômio cujas variáveis são estreitamente dependentes, sua determinação terá que ser feita pelo método das tentativas.

Como balizamento para a escolha de valores a serem atribuídos a essas variáveis, devemos considerar:

1) Número médio de equipamentos instalados por km

Como o valor de R9 é comum a todo o alimentador, esse número deve ser considerado quando da escolha da quantidade de aterramentos (x), pois cada equipamento implica na existência de um aterramento, de maneira a evitar

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	99 de 106

que em quilômetro com elevado número de equipamentos, o aterramento seja super dimensionado ou, em quilômetros com pequeno número desses, seja necessário prover muitos aterramentos adicionais.

- 2) Valor da resistência de aterramento de cada haste cravada no solo em questão. Este fator deve ser considerado na escolha do valor de R9, de forma a evitar que sejam aventadas hipóteses de valores muito abaixo as quais requeiram número elevado de hastes em paralelo (nos casos de solo com elevada resistividade), ou hipóteses de valores elevados de R9, os quais desperdicem resultados obtidos com a cravação de poucas hastes por aterramento (nas situações de solos com resistividade favorável). A sequência de cálculo recomendada é a seguinte:

PASSO 1:

Com base nas diretrizes anteriormente citadas, supor um binômio de valores para R9 e x.

PASSO 2:

Tendo como base a sistemática de cálculo do item J.5.1, determinar o número de hastes necessárias e o valor exato de R9 obtido.

PASSO 3:

De posse do valor de R9 determinado no passo 2, definir o número real de aterramentos, por quilômetro, através da seguinte expressão:

$$x = \frac{R9}{R8} \quad (\text{real}) \quad [J-24]$$

J.7.1.2.5 Verificação dos potenciais de passo em condições de defeito

PASSO 1:

Cálculo da máxima corrente de curto-circuito, disponível para circulação nos aterramentos:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \cdot kV \cdot 10^3}{\sqrt{\left[3 \cdot R_{SE} + \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{z \cdot R5 \cdot R9}{z \cdot R5 + R9}} + (2 \cdot R1_C + R0_C) \cdot \sqrt{\frac{R5 \cdot R9}{z \cdot (x \cdot R5 + R9)}} \right]^2 + \left[2 \cdot X1_T + X0_T + (2 \cdot X1_C + X0_C) \cdot \sqrt{\frac{R5 \cdot R9}{z \cdot (x \cdot R5 + R9)}} \right]^2}} \quad [J-25]$$

PASSO 2:

Determinação do tempo de operação do dispositivo de proteção de terra da subestação, equivalente à Icc calculada no passo 1.

Esse tempo deve ser determinado a partir das curvas tempo x corrente dos dispositivos de proteção de terra, considerando-se também, as religações automáticas e o tempo necessário à extinção total do arco.

O tempo acumulado não pode exceder 3 s, tendo em vista os critérios adotados para limitação das tensões de passo toleráveis.

PASSO 3:

Cálculo do comprimento mínimo de eletrodo (Lc), necessário à manutenção de potenciais de passo toleráveis, em condições de defeito:

$$Lc = \frac{0,1 \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{t} \cdot I_{cc} \cdot \sqrt{z \cdot R5 \cdot R9}}{(116 + 0,7 \cdot \rho_s) \cdot (\sqrt{z \cdot R5 \cdot R9} + 2 \cdot R9 \sqrt{x \cdot R5 + R9})} \quad [J-26]$$

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	100 de 106

PASSO 4:

Cálculo do comprimento real de eletrodo disponível (Le).

Conforme orientação do passo 2, do item J.7.1.2.4, a determinação do valor "exato" de R9 e, conseqüentemente, do número de hastes necessárias, deve ser realizada com base na sistemática de cálculo do paralelismo de hastes verticais alinhadas. A partir dos resultados desse cálculo, o comprimento real de eletrodo disponível (Le) pode ser obtido por:

$$Le = f \cdot Lr + (f - 1) \cdot e \quad [J-27]$$

Onde:

- Lr - comprimento da haste padronizada para aterramento de rede (m);
- f - número de hastes em paralelo, necessário à obtenção de R9;
- e - espaçamento entre hastes adjacentes (m).

PASSO 5:

Comparação do comprimento mínimo de eletrodo necessário (Lc) com o real de eletrodo disponível (Le).

- a condição indispensável para segurança do aterramento é :
 $Le \geq Lc$ [J-28]
- caso essa condição seja satisfeita, os valores de R9 e x são adequados à utilização no projeto;
- não sendo satisfeita, retornar ao item J.7.1.2.4 e definir outro valor (menor) para R9 e o x correspondente, reprocessando toda a rotina.

J.7.1.3 **Recomendações Finais para Elaboração do Projeto:**

Os valores de R9 e x, definidos pela rotina apresentada, representam as condições mínimas exigidas para cada quilômetro de rede. Quando da elaboração do projeto em si, devem ser ainda consideradas as seguintes recomendações:

- a) todos os equipamentos devem ser conectados ao condutor neutro e aterrados com resistência igual ou inferior a R9 (aterramento padrão);
- b) o condutor neutro deve ser aterrado em todo fim de rede primária através do aterramento padrão R9;
- c) após a localização dos aterramentos recomendados em (a) e (b) devem ser alocados, se necessário, os demais aterramentos essenciais à obtenção de x aterramentos em qualquer km de rede;
- d) o condutor neutro deve ser também aterrado em todo fim de rede secundária;

Nota:

Nesse caso é dispensável a exigência de R9, bastando a utilização de uma haste ou anel padronizado.

- e) a validade dos valores de R9 e x deve ser ainda ratificada por análise comparativa das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para as entradas de serviço supridas em BT, com os limites de suportabilidade. Caso seja inviável a obtenção de condições adequadas de segurança devem ser avaliadas as seguintes alternativas:
 - aumento da seção do condutor neutro nos primeiros quilômetros de rede, a partir da subestação;

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	101 de 106

- aumento do valor de x e/ou redução do valor de $R9$ nesses primeiros quilômetros;
- padronização do esquema TT para aterramento das entradas de serviço supridas em BT, conforme previsto na NBR 5410.

J.7.2 Sistemas Trifásicos a Três Fios com Neutro Secundário Contínuo

Neste tipo de sistema os aterramentos do neutro secundário efetivados ao longo da rede (multi-aterramento), além de propiciarem adequado escoamento dos surtos, devem satisfazer aos seguintes requisitos básicos:

- a) garantir a eficácia do aterramento do sistema; condição satisfeita sempre que a resistência do aterramento equivalente se situa na faixa de $0,1$ a $0,3 \Omega$;
- b) assegurar a manutenção dos potenciais de passo dentro de limites toleráveis, em condições de defeito;
- c) por não ser viável a manutenção dos potenciais de toque e transferência em condições de defeito, dentro dos limites toleráveis, tendo em vista os tempos de operação dos dispositivos de proteção usuais, deve ser prevista proteção parcial para os potenciais de toque através da instalação do condutor de aterramento interno ao poste (concreto circular), ou em eletroduto ou canaleta, até a altura de 3 m no solo, quando o referido condutor for externo ao mesmo.

Cabe ressaltar que, nesse caso, o condutor neutro, em condições normais de operação, é sempre mantido a um potencial inferior a 10 V em relação à terra, já que a circulação da corrente de desequilíbrio (no caso de BT), se restringe à zona de influência de cada transformador de distribuição, implicando no seu confinamento, quase que total, ao neutro do circuito.

J.7.2.1 Dados de Entrada

Para os cálculos e elaboração do projeto de aterramento de uma rede de distribuição são necessários os seguintes dados:

- k - comprimento do condutor neutro da rede secundária, em km;
- z - módulo da impedância própria do condutor neutro, em Ω/km ;

Nota:

Caso a seção do neutro não seja uniforme considerar a menor utilizada.

- n - número de entradas de serviço por poste (valor médio);
- ρ - perfil de resistividade do solo, obtido conforme Anexo D;
- ρ_s - resistividade superficial do solo, em $\Omega \cdot \text{m}$;

Nota:

ρ_s é a resistividade determinada a partir da medição com menor distância entre hastes (se disponível); caso contrário, considerar $\rho_s =$ resistividade da 1ª camada do solo estratificado (ρ_1).

- kV - tensão nominal entre fases do sistema de AT, em kV;
- L - comprimento da haste padronizada, em m;
- j - vão médio entre postes, em m;
- d - diâmetro de haste padronizada, em m;
- α - resistência de aterramento equivalente requerida para garantir a efetividade do aterramento do sistema secundário, em Ω , onde: $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$;
- τ - coeficiente de segurança que leva em consideração o grau de eficiência dos aterramentos das unidades consumidoras, onde: $1 < \tau < 10$;

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	102 de 106

R_{SE} - resistência de aterramento da subestação onde se origina o alimentador, em Ω ;
 X_{1T} - reatância de sequência positiva do transformador da subestação, em Ω ;
 X_{0T} - reatância de sequência zero do transformador da subestação, em Ω ;
 R_i - resistência do resistor de aterramento do neutro do transformador da subestação, quando existir, em Ω ;
 X_i - reatância do reator de aterramento do neutro do transformador, quando existir, em Ω .

J.7.2.2 Processamento

J.7.2.2.1 Determinação da resistência equivalente de aterramento por km, referente ao condutor neutro, necessária a assegurar a efetividade do aterramento do sistema.

PASSO 1:

Cálculo da resistência de aterramento de cada entrada de serviço supondo a utilização de uma única haste padronizada (R_1).

$$R_1 = \tau \cdot \frac{\rho_a}{2\pi L} \cdot \ln \frac{4L}{d} \quad [J-15]$$

Nota:

ρ_a deve ser calculada conforme Anexo D.

PASSO 2:

Cálculo da resistência equivalente dos aterramentos de todas as entradas de serviço supridas pelo alimentador (R_2).

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot j}{1000 \cdot k \cdot n} \quad [J-16]$$

Nota:

Caso seja conhecido o valor real do número de entradas de serviço supridas pelo alimentador (m), R_2 pode ser calculada por:

$$R_2 = \frac{R_1}{m} \quad [J-17]$$

O valor da resistência equivalente dos aterramentos das entradas de serviço supridas por quilômetro de alimentador (R_5) é calculada por:

$$R_5 = k \cdot R_2 \quad [J-20]$$

PASSO 3:

Cálculo da resistência equivalente de aterramento do neutro que, em paralelo com R_2 , garante a efetividade do aterramento do sistema (R_3).

$$R_3 = \frac{\alpha \cdot R_2}{R_2 - \alpha} \quad [J-18]$$

Nota:

Se o cálculo de R_3 resultar em valor negativo ou nulo significa serem os aterramentos das unidades consumidoras suficientes para garantir a efetividade

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	103 de 106

do referido aterramento. Neste caso, para a continuação da rotina de cálculo, considerar $R3 = \text{infinito}$.

PASSO 4:

Cálculo da resistência equivalente de aterramento por km, referente ao condutor neutro necessária a assegurar a efetividade do aterramento do sistema ($R4$).

$$R4 = k \cdot R3 \quad [J-19]$$

J.7.2.2.2 Determinação da máxima resistência equivalente de aterramento por km, referente ao condutor neutro ($R8$).

$R8 =$ menor valor resultante da comparação de $R4$ com $\frac{R_{AT\text{máx}}}{2}$, onde:

$R_{AT\text{máx}}$ calculada conforme item J.6.1.

Nota:

O critério para a definição de $R8$ visa atender às condições (a) e (b) de J.7.2.2.3.

J.7.2.2.3 Determinação do máximo valor da resistência de cada aterramento ($R9$) e do número mínimo de aterramentos por km (x).

A determinação dos valores de $R9$ e x deve satisfazer à seguinte inequação:

$$\frac{R9}{x} \leq R8 \quad [J-23]$$

Além disso, analisadas individualmente, essas variáveis devem satisfazer às condições abaixo:

- a) $x \geq 2$ - necessária para se garantir, com coeficiente de segurança igual a 2, a existência, em qualquer hipótese de pelo menos um aterramento por km feito pela concessionária, independente dos aterramentos das unidades consumidoras;
- b) $R9 \leq R_{AT\text{máx}}$ (calculado com base no item J.6.1), pelo menos nos pontos de instalação dos dispositivos de proteção contra sobretensão, por ser condição essencial à sua adequada operação.

Nota:

Por se tratar de um binômio cujas variáveis são estreitamente dependentes, sua determinação terá que ser feita pelo método das tentativas.

Como balizamento para a escolha de valores a serem atribuídos a essas variáveis, considerar:

a) número médio de equipamentos instalados por km:

Como o valor de $R9$ é comum a todo o alimentador, o número médio por km deve ser considerado quando da escolha da quantidade de aterramentos (x), pois cada equipamento implica na existência de um aterramento, de forma a evitar que em quilômetros com elevado número de equipamentos, o aterramento seja superdimensionado, ou, naqueles com pequeno número de equipamentos, seja necessário prover muitos aterramentos adicionais;

b) valor da resistência de aterramento de cada haste cravada no solo em questão:

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	104 de 106

Esse fator deve ser considerado na escolha do valor de R9, de forma a evitar que sejam aventadas hipóteses de valores muito baixos as quais requeiram número elevado de hastes em paralelo (solos com elevada resistividade), ou hipóteses de valores elevados de R9, que desperdicem resultados obtidos com a cravação de poucas hastes por aterramento (solos com resistividade favorável).

A sequência de cálculo recomendada é fornecida a seguir:

PASSO 1:

Com base nas diretrizes anteriormente citadas, supor um binômio de valores para R9 e x.

PASSO 2:

Tendo como referência a sistemática de cálculo do item J.5.1, determinar o número de hastes necessárias e o valor exato de R9 obtido.

PASSO 3:

De posse do valor de R9 determinado no passo 2, definir o número real de aterramento por quilômetro pela seguinte fórmula:

$$x = \frac{R9}{R8} \quad (\text{real}) \quad \text{[J-28]}$$

J.7.2.2.4 Verificação dos potenciais de passo em condição de defeito

PASSO 1:

Cálculo da máxima corrente de curto-circuito disponível para circulação nos aterramentos:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \cdot kV \cdot 10^3}{\sqrt{\left(3 \cdot R_{SE} + 3 \cdot R_i + 3 \cdot \sqrt{\frac{z \cdot R5 \cdot R9}{x \cdot R5 + R9}}\right)^2 + (2 \cdot X_1 T + X_0 T + 3 \cdot X_i)^2}} \quad \text{[J-29]}$$

PASSO 2:

Determinação do tempo de operação do dispositivo de proteção de terra da subestação, equivalente à I_{cc} calculada no passo 1.

Este tempo deve ser determinado a partir das curvas tempo x corrente dos dispositivos de proteção de terra, considerando-se, ainda, as religações automáticas e o tempo necessário à extinção total do arco. O tempo acumulado não pode exceder a 3 s, tendo em vista os critérios adotados para limitação das tensões de passo toleráveis.

PASSO 3:

Cálculo do comprimento mínimo de eletrodo (L_c) necessário à manutenção de potenciais de passo toleráveis em condição de defeito.

$$L_c = \frac{0,1 \cdot \rho_1 \cdot \sqrt{t} \cdot I_{cc} \cdot \sqrt{z \cdot R5 \cdot R9}}{(116 + 0,7 \cdot \rho_s) \cdot (\sqrt{z \cdot R5 \cdot R9} + R9 \sqrt{x \cdot R5 + R9})} \quad \text{[J-30]}$$

PASSO 4:

Cálculo do comprimento real de eletrodo disponível (L_e).

	CRITÉRIOS PARA PROJETOS E PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO	NTD	010
		VERSÃO	1.00
		VIGÊNCIA	01/05/16
		PÁGINA	105 de 106

Conforme orientação do passo 2, item J.7.2.2.3, a determinação do valor exato de R9 e, conseqüentemente, do número de hastes necessárias deve ser feita com base na sistemática de cálculo do item J.4.2.

A partir dos resultados desse cálculo, o comprimento real de eletrodo disponível (Le) poderá ser obtido por:

$$Le = f \cdot Lr + (f - 1) \cdot e \quad [J-27]$$

Onde:

Lr - comprimento da haste padronizada pela concessionária para aterramento de rede (m);

f – número de hastes em paralelo, necessário à obtenção de R9;

e - espaçamento entre hastes adjacentes (m).

PASSO 5:

Comparação do comprimento mínimo de eletrodo necessário (Lc) com o real de eletrodo disponível (Le).

A condição indispensável para a segurança do aterramento é:

$$Le \geq Lc \quad [J-31]$$

- caso essa condição seja satisfeita, os valores R9 e x serão adequados à utilização no projeto;
- caso não seja satisfeita, retornar ao item J.7.2.2.3, e definir outro valor (menor) para R9 e o x correspondente, reprocessando toda a rotina.

J.7.2.3 Recomendações Finais para Elaboração do Projeto

Os valores de R9 e x, definidos pela rotina apresentada, representam as condições mínimas exigidas para cada quilômetro de rede.

Quando da elaboração do projeto em si, devem ser também consideradas as seguintes recomendações:

- a) todos os equipamentos devem ser conectados ao condutor neutro e aterrados com resistência igual ou inferior a R9 (aterramento padrão);
- b) após a localização dos aterramentos recomendados em (a), devem ser alocados, se necessário, os demais aterramentos essenciais à obtenção de x aterramentos em qualquer km de rede;
- c) o condutor neutro deve ser também aterrado em todo fim de rede secundária;

Nota:

Neste caso é dispensável a exigência do valor de R9, bastando a utilização de uma haste ou anel padronizado;

- d) a validade dos valores de R9 e x deve ser ainda ratificada por análise comparativa das tensões passíveis de serem transferidas pelo condutor neutro para as entradas de serviço supridas em BT, com os limites de suportabilidade. Caso seja inviável a obtenção de condições adequadas de segurança devem ser avaliadas as alternativas abaixo:

- limitação das correntes disponíveis de curto-circuito fase x neutro pela instalação de impedância no aterramento do condutor neutro da SE;
- padronização do esquema TT para aterramento das entradas de serviço supridas em BT, conforme previsto na NBR 5410.



**CRITÉRIOS PARA PROJETOS E
PROCEDIMENTOS PARA EXECUÇÕES DE
ATERRAMENTOS DE REDES AÉREAS E
SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO**

NTD	010
VERSÃO	1.00
VIGÊNCIA	01/05/16
PÁGINA	106 de 106