Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

NORMA
BRASILEIRA

ABNT NBR 16527

Primeira edição
06.10.2016

Aterramento para sistemas de distribuição

Grounding for distributions systems

ICS 29.080.01

ISBN 978-85-07-06591-3

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

Número de referência
ABNT NBR 16527:2016
129 páginas

© ABNT 2016

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016
Todos os direitos reservados. A menos que especificado de outro modo, nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida ou utilizada por qualquer meio, eletrônico ou mecânico, incluindo fotocópia e microfilme, sem permissão por escrito da ABNT.

ABNT
Av.Treze de Maio, 13 - 28º andar
20031-901 - Rio de Janeiro - RJ
Tel.: + 55 21 3974-2300
Fax: + 55 21 3974-2346
abnt@abnt.org.br
www.abnt.org.br

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Sumário

Página

Prefácio ix
1 Escopo 1
2 Referências normativas 1
3 Termos e definições 1
4 Requisitos gerais 3
5 Requisitos específicos 4
5.1 Elementos de projeto para aterramento 4
5.2 Limitações impostas aos aterramentos para adequado escoamento de surtos atmosféricos 4
5.3 Metodologia para determinação do valor máximo da resistência de aterramento 5
5.4 Aterramento de redes de distribuição 5
5.4.1 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados 5
5.4.2 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário contínuo 11
5.4.3 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo 16
5.4.4 Sistemas monofilares com retorno por terra (MRT) 16
5.5 Aterramento de equipamentos 17
5.5.1 Objetivo 17
5.5.2 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados 18
5.5.3 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário contínuo 18
5.5.4 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo 18
5.5.5 Sistemas monofilares com retorno por terra (MRT) 18
5.6 Dimensionamento do condutor de aterramento 23
5.6.1 Determinação da seção do condutor em função da corrente 23
5.6.2 Determinação das correntes de curto-circuito a serem consideradas no dimensionamento 24
5.6.3 Características dos condutores de aterramento 26
5.7 Aterramento de consumidores 28
5.7.1 Consumidores atendidos em tensão secundária de distribuição (baixa tensão) 28
5.7.2 Consumidores atendidos em tensão primária de distribuição 30
5.8 Verificação e manutenção das características originais de projeto 30
5.8.1 Considerações gerais 30
5.8.2 Verificação das características de projeto 30
5.8.3 Acompanhamento das características de projeto 31
5.9 Aterramento de cerca 33
5.9.1 Cercas transversais à rede de distribuição 33
5.9.2 Cercas paralelas à rede de distribuição 34
5.9.3 Cercas próximas a aterramentos do sistema primário 35
5.10 Aterramento de estais 36
5.10.1 Sistemas trifásicos a quatro fios ou sistemas a três fios com neutro secundário contínuo 36
5.10.2 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo 36

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo A (normativo) **Elementos de projeto para aterramento** 38
A.1 Resistividade do solo 38
A.1.1 Considerações gerais 38
A.1.2 Medição 38
A.1.3 Estratificação do solo 38
A.1.4 Resistividade aparente vista pelas diversas configurações de eletrodos de aterramento 40
A.1.4.1 Aterramento com um único eletrodo vertical 40
A.1.4.2 Aterramento com eletrodo horizontal 41
A.1.4.3 Aterramento com mais de uma haste 41
A.2 Resistência de configurações dos eletrodos de aterramento 43
A.2.1 Resistência de aterramento de eletrodos simples 43
A.2.1.1 Hastes 43
A.2.1.2 Condutor horizontal 44
A.2.1.3 Anel 44
A.2.2 Resistência de aterramento de hastes interligadas em paralelo 45
A.2.2.1 Hastes alinhadas 47
A.2.2.2 Paralelismo de hastes 47
A.2.3 Solos de alta resistividade e/ou limitação de área 48
A.2.3.1 Tratamento do solo 48
A.2.3.2 Eletrodos verticais profundos 49
A.3 Potenciais no solo e configurações dos eletrodos de aterramento 50
A.3.1 Condições de segurança 50
A.3.1.1 Haste com cabeça na superfície 50
A.3.1.2 Haste com a cabeça enterrada 50
A.3.2 Aterramento com condutor horizontal 51
A.3.3 Aterramento com hastes alinhadas 52
A.3.4 Aterramento em anel 54
A.4 Impedância de surto dos aterramentos 55
A.4.1 Conceito de comprimento efetivo e impedância de surto Z_0 56
A.4.2 Cálculo do diâmetro, comprimento efetivo e da impedância de surto de eletrodos 56
Anexo B (informativo) **Aplicação de cálculo da resistência de aterramentos com hastes alinhadas conforme Figuras B1 e B2** 57
B.1 Exemplo de cálculo da resistência de um aterramento com quatro hastes alinhadas 57
B.1.1 Parâmetros do solo 57
B.1.2 Configuração do aterramento 57
B.1.3 Determinação da resistividade aparente do solo 58
B.1.4 Determinação da resistência de aterramento de cada haste 58
B.1.5 Cálculo da resistência de aterramento das quatro hastes em paralelo 59
B.1.6 Cálculo do coeficiente de redução *K* 59
B.1.7 Tabulação de parâmetros usuais 59
Anexo C (informativo) **Distribuição de corrente entre condutor e hastes em aterramentos com hastes alinhadas** 67

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

C.1 Cálculo de *f*(*n*) a partir do comprimento de material condutor envolvido 67
C.2 Cálculo de *f*(*n*) a partir do número de hastes 67
C.3 Cálculo de *f*(*n*) para associação de uma única haste e condutor horizontal 68
C.4 Cálculo de I_h e I_c 68
C.5 Distribuição de corrente nas hastes 68
Anexo D (informativo) Metodologia para determinação do valor máximo da resistência de aterramento 72
D.1 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados 72
Anexo E (informativo) Parâmetros para cálculo do valor máximo da resistência de aterramento, tendo em vista o adequado escoamento de surtos 76
E.1 Correntes máximas nos aterramentos dos para-raios 77
E.2 Limitação de potencial no neutro 79
Anexo F (informativo) Exemplos de aplicação do método para determinação do valor máximo de resistência de aterramento, para adequado escoamento de surtos 81
F.1 Sistema trifásico a quatro fios multiaterrado 81
F.2 Sistema trifásico a três fios com neutro da baixa tensão contínuo 86
F.3 Sistema trifásico a três fios com neutro de baixa tensão descontínuo 89
Anexo G (informativo) Exemplos de cálculo de aterramento de redes de distribuição 94
G.1 Sistema a quatro fios, multiaterrado 94
G.2 Sistema a três fios com neutro secundário contínuo 99
Anexo H (informativo) Exemplo de cálculo de aterramento de equipamentos 106
H.1 Sistema a três fios com neutro secundário descontínuo 106
Anexo I (informativo) Cálculo da impedância de surto de eletrodos de aterramento 111
I.1 Determinação do diâmetro efetivo 112
I.2 Impedância de surto de uma haste 112
I.2.1 Sem ionização do solo ($E \leq E_0$) 112
I.2.2 Com ionização do solo ($E > E_0$) 112
I.3 Impedância de surto de condutor horizontal 113
I.3.1 Cálculo do comprimento efetivo de condutor de aterramento 113
I.3.1.1 Cálculo do comprimento efetivo, L_e, em eletrodos horizontais – Modelo sem ionização do solo 113
I.3.1.2 Cálculo do comprimento efetivo, L_e, em eletrodos horizontais – Modelo com ionização do solo 114
I.3.2 Impedância de surto de condutor horizontal com comprimento inferior ao comprimento efetivo 114
I.3.3 Impedância ao surto de condutor horizontal com comprimento superior ou igual ao comprimento efetivo 115
I.3.4 Avaliação do efeito redutor no modelo sem ionização do solo 115
I.3.5 Avaliação do efeito redutor no modelo com ionização do solo 116
I.4 Impedância ao surto de aterramentos com hastes alinhadas 116
I.4.1 Sem ionização do solo ($E \leq E_0$) 117
I.4.2 Com ionização do solo ($E > E_0$) 117
Anexo J (informativo) Sistemas primários monofilares com retorno por terra (MRT) 118

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

J.1 Características do sistema MRT 118
J.2 Tipos de rede MRT 118
J.2.1 Rede “não isolada” da linha trifásica 118
J.2.2 Rede “isolada” da linha trifásica 118
J.3 Valores admissíveis em aterramentos MRT 119
J.4 Construção de aterramentos MRT 120
J.5 Acompanhamento das instalações 124
J.6 Avaliação técnica dos níveis aceitáveis de segurança para aterramentos 124
J.7 Exemplo de aplicação 127
J.7.1 Segurança para animais na situação de regime 128
J.7.2 Segurança do aterramento na situação de falta 128
J.7.3 Conclusão 128
Bibliografia 129

Figuras

Figura 1 – Seccionamento e aterramento de cercas transversais à rede de distribuição 33
Figura 2 – Aterramento e seccionamento de cercas paralelas à rede 34
Figura 3 – Seccionamento e aterramento de cerca paralela à configuração de aterramento 35
Figura 4 – Seccionamento e aterramento de cerca transversal à configuração de aterramento 36
Figura A.1 – Solo estratificado em (*n* + *1*) camadas 39
Figura A.2 – Perfil de resistividade do solo com as *n* camadas reduzidas a uma camada equivalente 40
Figura A.3 – Eletrodo cravado em solo estratificado 41
Figura A.4 – Determinação da resistividade aparente para um solo com duas camadas estratificadas 42
Figura A.5 – Seções de hastes 43
Figura A.6 – Configurações usuais com hastes em paralelo 47
Figura A.7 – Hastes alinhadas 47
Figura A.8 – Solo estratificado em duas camadas (ou reduzido a duas camadas) 49
Figura A.9 – Localização de um ponto *V* em relação a um condutor horizontalmente enterrado 52
Figura A.10 – Distribuição de corrente entre condutor e hastes em aterramentos com hastes alinhadas 52
Figura A.11 – Coordenadas para aterramento em anel 54
Figura A.12 – Efeito da ionização do solo no comprimento do eletrodo 56
Figura A.13 – Variação de Z_0 com o comprimento do eletrodo e definição do comprimento efetivo 56
Figura B.1 – Dados do solo 57
Figura B.2 – Configuração do aterramento 57
Figura C.1 – Distribuição de correntes em hastes alinhadas 70
Figura D.1 – Ligação de um equipamento em um sistema trifásico a quatro fios 72

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Figura E.1 – Propagação da corrente de descarga atmosférica no aterramento de um para-raios 77
Figura E.2 – Forma de onda do pulso de tensão 79
Figura G.1 – Estratificação do solo em quatro camadas 94
Figura G.2 – Solo estratificado em duas camadas 95
Figura G.3 – Estratificação do solo em três camadas 99
Figura G.4 – Solo estratificado em duas camadas 100
Figura H.1 – Estratificação do solo em quatro camadas 106
Figura H.2 – Solo estratificado em duas camadas 106
Figura J.1 – Rede monofilar não isolada da linha trifásica 118
Figura J.2 – Rede monofilar isolada da linha trifásica 119
Figura J.3 – Aterramento com hastes alinhadas em uma única direção 121
Figura J.4 – Aterramento com hastes alinhadas em mais de uma direção 121
Figura J.5 – Aterramento com uma ou mais hastes emendadas 121
Figura J.6 – Associação de condutor (ou hastes alinhadas) com anel 122
Figura J.7 – Associação de condutor (ou hastes alinhadas) com anel 123
Figura J.8 – Associação de condutor (ou hastes alinhadas) com anel 123
Figura J.9 – Tensões de passo admissíveis 126
Figura J.10 – Tensões de toque admissíveis 127

Tabelas

Tabela 1 – Correntes de cargas para diversos transformadores de 5 kV A a 25 kV A 18
Tabela 2 – Faixa de valores dos fatores $P_{d\ (\%)}$ e P_f (%) 24
Tabela 3 – Valores dos parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em malhas de aterramento 28
Tabela 4 – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura 29
Tabela A.1 – Potenciais na superfície do solo em relação ao potencial do anel (%) 56
Tabela B.1 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (K) para hastes alinhadas de 2,4 m por 0,0128 m (para uma haste: $R = 0{,}44\ \rho_a$) 62
Tabela B.2 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 2,4 m por 0,0143 m (para uma haste: $R = 0{,}42\ \rho_a$) 63
Tabela B.3 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 2,4 m por 0,0173 m (para uma haste: $R = 0{,}41\ \rho_a$) 64
Tabela B.4 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 3 m por 0,0128 m (para uma haste: $R = 0{,}36\ \rho_a$) 65
Tabela B.5 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 3 m por 0,0143 m (para uma haste: $R = 0{,}35\ \rho_a$) 66
Tabela B.6 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 3 m por 0,0173 m (para uma haste: $R = 0{,}34\ \rho_a$) 67
Tabela C.1 – Distribuição de correntes nas hastes – Frequência de aparecimento de coeficientes multiplicativos de I_h/N 70
Tabela D.1 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados 75
Tabela E.1 – Parâmetros para cálculo de R_{AT} máximo 77

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela F.1 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 40 Ω 83
Tabela F.2 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 50 Ω 84
Tabela F.3 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 60 Ω 85
Tabela F.4 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 55 Ω 86
Tabela F.5 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, multiaterrados, neutro de BT contínuo (R_{AT} de 40 Ω) 88
Tabela F.6 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, multiaterrados, neutro de BT contínuo (R_{AT} de 50 Ω) 89
Tabela F.7 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, neutro de BT descontínuo (R_{AT} de 40 Ω) 91
Tabela F.8 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, neutro de BT descontínuo (R_{AT} de 30 Ω) 92
Tabela F.9 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, neutro de BT descontínuo (R_{AT} de 35 Ω) 93
Tabela J.1 – Valores recomendados de resistência de aterramento 120

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Prefácio

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Foro Nacional de Normalização. As Normas Brasileiras, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais (ABNT/CEE), são elaboradas por Comissões de Estudo (CE), formadas pelas partes interessadas no tema objeto da normalização.

Os Documentos Técnicos ABNT são elaborados conforme as regras da ABNT Diretiva 2.

A ABNT chama a atenção para que, apesar de ter sido solicitada manifestação sobre eventuais direitos de patentes durante a Consulta Nacional, estes podem ocorrer e devem ser comunicados à ABNT a qualquer momento (Lei nº 9.279, de 14 de maio de 1996).

Ressalta-se que Normas Brasileiras podem ser objeto de citação em Regulamentos Técnicos. Nestes casos, os Órgãos responsáveis pelos Regulamentos Técnicos podem determinar outras datas para exigência dos requisitos desta Norma.

A ABNT NBR 16527 foi elaborada no Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-003), pela Comissão de Estudo de Aterramentos Elétricos (CE-003:102.001). O seu 1º Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 12, de 15.12.2014 a 13.02.2015. O seu 2º Projeto circulou em Consulta Nacional conforme Edital nº 06, de 13.06.2016 a 11.08.2016.

O Escopo em inglês desta Norma Brasileira é o seguinte:

Scope

This Standard provides guidelines for elaboration of grounding projects for distribution systems, in alternating voltages up to 34.5 kV.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Aterramento para sistemas de distribuição

1 Escopo

Esta Norma fornece diretrizes para a elaboração de projetos de aterramento de sistemas elétricos de distribuição, em tensões até 34,5 kV.

2 Referências normativas

Os documentos relacionados a seguir são indispensáveis à aplicação deste documento. Para referências datadas, aplicam-se somente as edições citadas. Para referências não datadas, aplicam-se as edições mais recentes do referido documento (incluindo emendas).

ABNT NBR 5410, *Instalações elétricas de baixa tensão*

ABNT NBR 5456, *Eletricidade geral – Terminologia*

ABNT NBR 5460, *Sistemas elétricos de potência*

ABNT NBR 7117, *Medição de resistividade e determinação da estratificação do solo*

ABNT NBR 15749, *Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento*

ABNT NBR 15751:2009, *Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos*

ABNT NBR 16254-1, *Materiais para sistemas de aterramento – Parte 1: Requisitos gerais*

3 Termos e definições

Para os efeitos deste documento, aplicam-se os termos e definições das ABNT NBR 5456, ABNT NBR 5460, ABNT NBR 7117, ABNT NBR 15749, ABNT NBR 15751 e ABNT NBR 16254-1, e os seguintes.

3.1
coeficiente de impulso
relação entre impedância ao surto de um aterramento e seu valor de resistência à frequência industrial

3.2
comprimento efetivo de condutor de aterramento
comprimento do eletrodo, a partir do qual não são verificadas mudanças apreciáveis em sua impedância de surto

3.3
condutor horizontal de aterramento
condutor empregado na interligação de eletrodos verticais

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.4
curva de tempo
curva do tempo total que a proteção leva para eliminar o defeito ocorrido no local do aterramento, ou seja, é o tempo total que a pessoa ou animal fica exposto à tensão de passo ou tensão de toque

3.5
eletrodo horizontal
eletrodo de aterramento na forma de condutor retilíneo ou em anel, enterrado horizontalmente no solo

3.6
eletrodo vertical
eletrodo de aterramento enterrado verticalmente no solo

3.7
eletrodo vertical profundo
eletrodo, obtido pelo acoplamento mecânico e elétrico de mais de uma seção de eletrodo (haste/condutor)

3.8
haste de aterramento
eletrodo de aterramento constituído por uma haste rígida cravada no solo

3.9
impedância de surto de um aterramento
relação entre o valor máximo da queda de tensão nele desenvolvida e o valor máximo da corrente escoada

3.10
ionização do solo
fenômeno dado pela elevação dos gradientes de potencial no solo, excedendo seu gradiente crítico e implicando sua disrupção

3.11
resistividade equivalente do solo
resistividade obtida pela redução do perfil de resistividades das *n* camadas do solo a apenas duas camadas

3.12
sistemas primários a quatro fios, multiaterrados
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 modo a constituir uma rede de terra contínua e de baixa impedância. Convém que o condutor neutro seja também interligado ao neutro de outros alimentadores, quando disponíveis, inclusive daqueles originários de outras subestações

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

3.13
sistemas primários 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

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

3.14
sistemas primários a três fios com neutro secundário descontínuo
sistemas primários idênticos aos citados em 3.14, onde nem todos os neutros de baixa tensão dos diversos transformadores de distribuição são interligados

3.15
sistemas primários monofilares com retorno por terra MRT
sistemas providos de um único condutor-fase que alimenta um ou mais transformadores de distribuição em que o retorno da corrente é feito pelo solo

3.16
sistemas secundários isolados
sistemas secundários em que o ponto neutro da fonte de suprimento não é interligado à terra

3.17
sistemas secundários aterrados
sistemas secundários em que o ponto neutro só é interligado à terra junto ao transformador de distribuição

3.17.1
sistemas secundários a quatro fios
sistemas secundários em que o condutor neutro é interligado ao aterramento do transformador de distribuição e aterrado nos pontos de utilização

NOTA 1 Para fins de projeto de aterramento, enquadram-se nesta classificação todos os sistemas secundários monofásicos, a dois fios (fase × neutro) e a três fios (fase × fase × neutro).

NOTA 2 Quando supridos por sistemas primários a quatro fios, o condutor neutro é geralmente único, comum aos sistemas primário e secundário.

3.17.2
sistemas secundários em núcleos MRT
reunião de pequenas propriedades alimentadas pela baixa tensão de um único transformador de distribuição monofilar com retorno por terra MRT

4 Requisitos gerais

A origem dos sistemas de distribuição de energia elétrica está associada a redes isoladas de terra, cujos índices de disponibilidade eram otimizados pela redução do envolvimento de eventuais falhas, por meio da desenergização manual do menor trecho necessário à execução dos reparos. Contudo, a necessidade de provimento de condições adequadas de segurança, associada à progressiva elevação das tensões primárias utilizadas nesses sistemas (consequência da evolução das densidades de carga), passaram a exigir a utilização de sistemas primários aterrados, como forma de viabilizar soluções técnico-econômicas para proteção contra sobrecorrentes e sobretensões.

Tendo em vista o provimento das condições adequadas de segurança anteriormente mencionadas, o aterramento de um sistema de distribuição deve atingir, cumulativamente, os seguintes objetivos:

a) viabilizar adequado escoamento de sobretensões, limitando as tensões transferidas ao longo da rede, em consequência das descargas de surtos diretas ou indiretas;

b) garantir a segurança dos usuários do sistema por meio da limitação das diferenças de potencial entre o condutor neutro e a terra, resultantes da circulação das correntes de desequilíbrio;

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

c) garantir a efetividade do aterramento do sistema, limitando 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 as tensões resultantes da passagem das correntes de curto-circuito;

e) outras condições, como:

— continuidade do fornecimento no caso específico dos sistemas MRT;

— tensões de transferência compatíveis;

— minimização de falhas de equipamentos por deficiência de aterramento;

— qualidade do fornecimento (por exemplo, valor e configuração do aterramento dos para-raios).

A forma de se alcançar os objetivos anteriormente citados depende do tipo de sistema que se venha construir. Portanto, a elaboração do projeto específico para aterramento de um sistema de distribuição deve ser sempre precedida da definição do tipo de sistema que se pretende implantar. Face às múltiplas consequências desta escolha, ela deve ser baseada em análise técnico-econômica global em que sejam avaliadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de sistema de acordo com as características específicas da instalação. Nesta análise, devem ser contemplados todos os aspectos técnicos envolvidos, desde a definição de tensão suportável de impulso até a especificação e escolha de todos os materiais, equipamentos e estruturas necessários, que são sensivelmente afetados pela definição da distância de escoamento dos isoladores e pela limitação dos níveis máximos de curto-circuito.

5 Requisitos específicos

5.1 Elementos de projeto para aterramento

Os elementos de projeto para aterramento estão descritos no Anexo A.

5.2 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, 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 destes dispositivos com o tanque do equipamento é suficiente à 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 deve se estabelecer entre os componentes do sistema elétrico e a terra, em função da passagem da corrente de impulso nesta 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 condutor 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), deve se propagar ao longo do circuito primário.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Destes 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 de impulso das estruturas, de forma a evitar disrupção nos isoladores, que, não raro, são inclusive danificados pela corrente de curto-circuito subsequente.

5.3 Metodologia para determinação do valor máximo da resistência de aterramento

Para o cálculo das elevações de potenciais resultantes das descargas de surtos, devem ser estimados valores de resistência de aterramento (R), de forma a permitir a definição do seu valor-limite.

O valor máximo de resistência de aterramento deve corresponder ao maior dos valores que vier a resultar em tensões no condutor neutro e nos condutores-fase, inferiores a limites previamente estabelecidos, em função dos critérios adotados para proteção contra sobretensões.

A metodologia para determinação do valor máximo da resistência de aterramento está descrita no Anexo D.

5.4 Aterramento de redes de distribuição

Nesta subseção, são apresentadas metodologias adequadas à determinação das condições mínimas a serem satisfeitas pelo projeto do aterramento de forma a atender, simultaneamente, a todos os requisitos apresentados na Seção 4. Face às 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;

c) sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo;

d) sistemas monofilares com retorno por terra.

Nos sistemas a quatro fios e três fios com neutro secundário contínuo, permanece em estudo a padronização de uma sistemática para cálculo preciso das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para entradas consumidoras supridas em tensões secundárias de distribuição, por ocasião de curtos-circuitos fase e neutro nas redes de média tensão associadas, valores estes a serem compatibilizados com os limites de suportabilidade.

5.4.1 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados

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

a) garantir a efetividade do aterramento do sistema; condição, na prática, satisfeita quando a resistência do aterramento equivalente se situa na faixa de 0,1 Ω 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 condutor neutro;

c) garantir a manutenção dos potenciais de passo dentro de limites toleráveis, em condições de defeito; condição restrita aos potenciais de passo, por não ser sempre viável a manutenção dos potenciais de toque e de transferência, em condições de defeito, dentro dos limites toleráveis,

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

tendo em vista os tempos de operação dos dispositivos de proteção usuais. Proteção parcial para os potenciais de toque é obtida, ou por meio da colocação do condutor de aterramento interno ao poste (casos de instalações novas de postes de concreto), ou por proteção eletromecânica (canaleta) até a altura de 3 m no solo quando o condutor de aterramento for externo ao poste (caso de postes de madeira e postes de concreto já instalados). Esta proteção é totalmente inviável nos casos de postes metálicos onde a própria estrutura é utilizada como condutor de aterramento.

5.4.1.1 Dados de entrada

k é o comprimento de rede primária, expresso em quilômetros (km).

NOTA 1 No caso de regiões com alta densidade de carga, onde o comprimento da rede primária é pequeno comparado ao comprimento total do neutro (que acompanha também toda a rede secundária), considerar o comprimento total do neutro (rede primária + rede secundária).

z é o módulo da impedância própria do condutor neutro, expresso em ohms por quilômetro (Ω/km).

NOTA 2 Caso a bitola do neutro não seja uniforme, considerar a menor bitola utilizada.

n é o número de entradas consumidoras por poste (valor médio).

ρ_s é a resistividade superficial do solo, expressa em ohms-metro (Ω.m)

NOTA 3 ρ_s é a resistividade determinada a partir da medição com a menor distância entre eletrodos (se disponível). Caso contrário, considerar a resistividade da 1ª camada do solo.

kVA é a demanda máxima prevista para o alimentador, expressa em quilovolts-ampere (kVA).

kV é a tensão nominal entre fases do sistema, expressa em quilovolts.

j é o vão médio entre postes, expresso em metros (m).

L é o comprimento da haste padronizada para consumidores, expresso em metros (m).

d é o diâmetro da haste padronizada para consumidores, expresso em metros (m).

$\sum$ é a parcela da demanda máxima admitida como desequilíbrio no neutro, por unidade.

α é a resistência de aterramento equivalente requerida para garantir a efetividade do aterramento do sistema, expressa em ohms (Ω).

NOTA 4 $0,1 \leq \alpha \leq 0,3$.

τ é o coeficiente de segurança que leva em consideração o grau de eficiência dos aterramentos do consumidor.

NOTA 5 $1 < \tau < 10$.

R_{SE} é a resistência de aterramento da subestação onde se origina o alimentador, expressa em ohms (Ω).

X_{1T} é a reatância de sequência positiva do transformador da subestação, expressa em ohms (Ω).

X_{0T} é a reatância de sequência zero do transformador da subestação, expressa em ohms(Ω).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

r_{1c} é a resistência de sequência positiva do condutor-fase, expressa em ohms por quilômetro (Ω/km).

X_{1c} é a reatância de sequência positiva do condutor-fase, expressa em ohms por quilômetro (Ω/km).

r_{0c} é a resistência de sequência zero do condutor-fase, expressa em ohms por quilômetro (Ω/km).

X_{0c} é a reatância de sequência zero do condutor-fase, expressa em ohms por quilômetro (Ω/km).

5.4.1.2 Processamento

5.4.1.2.1 Determinar a resistência equivalente de aterramento por quilômetro de neutro necessária para assegurar a efetividade do aterramento do sistema ou manutenção do neutro em 10 V.

ETAPA 1

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

$$R_1 = \tau \times \frac{\rho\alpha}{2 \times \pi \times L} \times \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (1)$$

ETAPA 2

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

$$R_2 = \frac{R_1 \times j}{1\,000 \times k \times n} \quad (2)$$

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

$$R_2 = \frac{R_1}{m} \quad (3)$$

ETAPA 3

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

$$R_3 = \frac{\alpha \times R_2}{R_2 - \alpha} \quad (4)$$

NOTA Se o cálculo de R_3 resultar em valor negativo ou nulo, significa que os aterramentos dos consumidores são suficientes para garantir a efetividade do aterramento do sistema. Neste caso, para a continuação da rotina de cálculo, considerar R_3 = infinito.

ETAPA 4

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

$$R_4 = k \times R_3 \quad (5)$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.4.1.2.2 Determinar a resistência equivalente de aterramento por quilômetro de neutro necessária a sua manutenção a um potencial de 10 V em condições normais de operação.

ETAPA 1

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

$$R_5 = k \times R_2 \tag{6}$$

ETAPA 2

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

$$R_6 = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10 \times k - \sum \times kVA \times z}{\sum \times kVA} \tag{7}$$

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

ETAPA 3

Cálculo da resistência equivalente de aterramento por quilômetro de neutro necessária à sua manutenção a um potencial de 10 V em condições normais de operação (R_7).

$$R_7 = \frac{R_5 \times R_6}{R_5 - R_6} \tag{8}$$

NOTA Se o cálculo de R_7 resultar em valor negativo ou nulo, significa serem os aterramentos dos consumidores 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 R_7 = infinito.

5.4.1.2.3 Determinar a resistência máxima equivalente de aterramento por quilômetro de neutro (R_8).

R_8 = menor valor resultante da comparação de R_4 com R_7.

NOTA Caso $R_8 > R_{AT\ máx./2}$ (*RAT* máx.calculada conforme D-1), adotar, para continuação dos cálculos, $R_8 = R_{AT\ máx./2}$, visando atender aos requisitos a) e b) de 5.4.1.2.4.

5.4.1.2.4 Determinar o valor máximo de resistência de cada aterramento (R_9) e do número mínimo de aterramentos por quilômetro *(x)*.

A determinação do binômio (R_9, x) deve satisfazer a seguinte inequação:

$$\frac{R_9}{x} \leq R_8 \tag{9}$$

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

a) $x \geq 2$, condição necessária para se garantir, com coeficiente de segurança igual a 2, a existência em qualquer hipótese de pelo menos um aterramento por quilômetro feito pela concessionária, independentemente dos aterramentos dos consumidores;

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

b) $R_9 \leq R_{AT\ máx.}$ (calculado com base em D.1), pelo menos nos pontos de instalação de dispositivos de proteção contra sobretensão, por ser condição essencial à sua operação adequada.

NOTA Por se tratar de um binômio cujas variáveis são estreitamente dependentes, recomenda-se que a sua determinação seja feita pelo método das tentativas.

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

— número médio de equipamentos instalados por quilômetro:

  Como o valor de R_9 é comum a todo o alimentador, o número médio de equipamentos por quilômetro deve ser considerado quando da escolha do número de aterramentos (x), pois cada equipamento implica na existência de um aterramento, de forma a evitar que, em quilômetro com elevado número de equipamentos, o aterramento seja superdimensionado ou, em quilômetros com pequeno número de equipamentos, seja necessário prover muitos aterramentos adicionais;

— valor da resistência de aterramento de cada haste no solo em questão:

  Este fator deve ser considerado na escolha do valor de R_9, de forma a evitar que sejam aventadas hipóteses de valores muito abaixo que requeiram número elevado de hastes em paralelo (nos casos de solo de elevada resistividade), ou hipóteses de valores elevados de R_9, que desperdicem resultados obtidos com a cravação de poucas hastes por aterramento (nos casos de solos de resistividade favorável). A sequência de cálculo recomendada é a seguinte:

ETAPA 1

Com base nas diretrizes anteriormente citadas, supor um binômio de valores para R_9 e x.

ETAPA 2

Com base na sistemática de cálculo de A.1.4.3, determinar o número de hastes necessárias e o valor exato de R_9 obtido.

ETAPA 3

Com base no valor de R_9 determinado na ETAPA 2, definir o número real de aterramentos por quilômetro pela seguinte equação:

$$x = \frac{R_9}{R_8} \tag{10}$$

5.4.1.2.5 Para verificar o potencial em condições de defeito, devem ser adotadas as seguintes etapas:

ETAPA 1

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

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\sqrt{(A)^2 + (B)^2}} \tag{11}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

$$A = 3 \times R_{SE} + \frac{3}{2}\left[\frac{z \times R_5 \times R_9}{(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} \times (2 \times r_{1c} + r_{0c}) \quad (12)$$

$$B = 2 \times X_{1t} + X_{0t} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} \times (2 \times X_{1t} + X_{0t}) \quad (13)$$

ETAPA 2

Determinação do tempo de operação do dispositivo de proteção de terra da subestação, equivalente a I_{cc} calculada na ETAPA 1.

Este 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.

ETAPA 3

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

$$L_c = \frac{0,1 \times \rho_1 \times \sqrt{t} \times I_{cc} \times \sqrt{z \times R_5 \times R_9}}{(116 + 0,7 \times \rho_s)\left(\sqrt{z \times R_5 \times R_9} + 2 \times R_9 \times \sqrt{x \times R_5 + R_9}\right)} \quad (14)$$

ETAPA 4

Para o cálculo do comprimento real de eletrodo disponível (L_e), deve-se adotar a orientação da ETAPA 2, de 5.4.1.2.4; a determinação do valor “exato” de R_9 e, consequentemente, do número de hastes necessárias, deve ser feita com base na sistemática de cálculo de A.1.4.3. A partir dos resultados deste cálculo, o comprimento real de eletrodo disponível (L_e) pode ser obtido por:

$$L_e = f \times L_r + (f - 1) \times e \quad (15)$$

onde

L_r é o comprimento da haste padronizada pela concessionária para aterramento de rede, expresso em metro (m);

f é o número de hastes em paralelo, necessário à obtenção de R_9;

e é o espaçamento entre hastes adjacentes, expresso em metros (m).

ETAPA 5

Comparação do comprimento mínimo de eletrodo necessário (L_c) com o comprimento real de eletrodo disponível (L_e).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

— a condição indispensável para segurança do aterramento é:

$$L_e \geq L_c \quad (16)$$

— caso esta condição seja satisfeita, os valores de R_9 e x são adequados à utilização no projeto;

— caso esta condição não seja satisfeita, retornar a 5.4.1.2.4 e definir outro valor (menor) para R_9 e o x correspondente, reprocessando toda a rotina.

5.4.1.3 Elaboração do projeto

Para elaboração de projeto, recomenda-se que os valores de R_9 e x, definidos pela rotina apresentada, representem as condições mínimas requeridas 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 neutro e aterrados com resistência igual ou inferior a R_9 (aterramento-padrão);

b) o neutro deve ser aterrado em todo fim de rede primária com o aterramento-padrão R_9;

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 quilômetro de rede;

d) o neutro deve ser também aterrado em todo fim de rede secundária;

NOTA Neste caso, é dispensável a exigência de R_9, bastando a utilização de uma haste ou um anel padronizado.

e) a validade dos valores de R_9 e x deve ser ainda ratificada por análise comparativa das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para as entradas consumidoras 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;

— aumento do valor de x e/ou redução do valor de R_9 nestes primeiros quilômetros;

— adoção do esquema TT para aterramento das entradas consumidoras supridas em BT, adicionando todas proteções necessárias contra choque elétrico recomendadas pela ABNT NBR 5410;

f) nos casos de redes excessivamente curtas em que o dimensionamento do aterramento pela metodologia indicada se torna inviável, mesmo que considerado o comprimento total do neutro (rede primária e rede secundária), o projeto deve ser desenvolvido conforme critérios recomendados para os sistemas a três fios com o neutro secundário descontínuo (ver 5.4.3).

No Anexo G, é apresentado um exemplo de aplicação da rotina anteriormente descrita.

5.4.2 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário contínuo

Nesta subseção, são válidos os comentários iniciais feitos em 5.4.1.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Cabe ressaltar que, neste caso, o 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), restringe-se à zona de influência de cada transformador de distribuição, implicando no seu confinamento, quase que total, ao neutro do circuito.

5.4.2.1 Definições

k é o comprimento do neutro da rede secundária, expresso em quilômetros (km);

z é o módulo da impedância própria do condutor neutro, expresso em ohms por quilômetro (Ω/km);

NOTA 1 Caso a bitola do neutro não seja uniforme, considerar a menor bitola utilizada.

n é o número de entradas consumidoras por poste (valor médio);

ρ é o perfil de resistividade do solo, obtido conforme a ABNT NBR 7117;

ρ_s é a resistividade superficial do solo, expressa em ohms-metro (Ω.m);

NOTA 2 ρ_s é a resistividade determinada a partir da medição com menor distância entre hastes (se disponível); caso contrário, considerar que ρ_s é a resistividade da 1ª camada do solo estratificado (ρ_1).

kV é a tensão nominal entre fases do sistema de AT, expressa em quilovolts (kV);

L é o comprimento da haste padronizada para consumidores, expresso em metros (m);

j é o vão médio entre postes, expresso em metros (m);

d é o diâmetro de haste padronizada para consumidores, expresso em metros (m);

α é a resistência de aterramento equivalente requerida para garantir a efetividade do aterramento do sistema secundário, expressa em ohms (Ω);

NOTA 3 $0{,}1 \leq \alpha \leq 0{,}3$

τ é o coeficiente de segurança que leva em consideração o grau de eficiência dos aterramentos dos consumidores;

NOTA 4 $1 < \tau < 10$

R_{SE} é a resistência de aterramento da subestação onde se origina o alimentador, expressa em ohms (Ω);

X_{1T} é a reatância de sequência positiva do transformador da subestação, expressa em ohms (Ω);

X_{0T} é a reatância de sequência zero do transformador da subestação, expressa em ohms (Ω);

R_i é a resistência do resistor de aterramento do neutro do transformador da subestação, expressa em ohms (Ω), quando existir;

X_i é a reatância do reator de aterramento do neutro do transformador, expressa em ohms (Ω), quando existir.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.4.2.2 Processamento

5.4.2.2.1 Determinar a resistência equivalente de aterramento por quilômetro de neutro necessária para assegurar a efetividade do aterramento do sistema.

ETAPA 1

Cálculo da resistência de aterramento de cada entrada consumidora supondo a utilização de uma única haste padronizada (R_1), conforme a Equação (1). Nesta equação, foi usada a resistividade aparente ρ_a, calculada conforme A.1.3.

ETAPA 2

Cálculo da resistência equivalente dos aterramentos de todas as entradas consumidoras supridas pelo alimentador (R_2), conforme a Equação (2).

O valor da resistência equivalente dos aterramentos das entradas consumidoras supridas por cada quilômetro de alimentador (R_5) é calculada conforme a Equação (6).

ETAPA 3

Cálculo da resistência equivalente de aterramento do neutro que, em paralelo com R_2, garante a efetividade do aterramento do sistema (R_3), conforme a Equação (4).

NOTA Se o cálculo de R_3 resultar em valor negativo ou nulo, significa que os aterramentos dos consumidores são suficientes para garantir a efetividade do aterramento do sistema.

Neste caso, para a continuação da rotina de cálculo, considerar $R_3 =$ infinito.

ETAPA 4

Cálculo da resistência equivalente de aterramento por quilômetro de neutro necessária para assegurar a efetividade do aterramento do sistema (R_4), conforme a Equação (5).

5.4.2.2.2 Para determinação da resistência máxima equivalente de aterramento por quilômetro de neutro (R_8) adotar:

R_8 = menor valor resultante da comparação de R_4 com $R_{ATmáx} / 2$

($R_{ATmáx}$ calculada conforme E.2).

NOTA O critério para a definição de R_8 visa atender às condições de 5.4.2.2.3 a) e b).

5.4.2.2.3 Determinar o valor máximo da resistência de cada aterramento (R_9) e do número mínimo de aterramentos por quilômetro (x).

A determinação dos valores de R_9 e x deve satisfazer a Inequação (9). Além disso, analisadas individualmente, estas variáveis devem satisfazer as seguintes condições:

a) $x \geq 2$ é a condição necessária para se garantir, com coeficiente de segurança igual a 2, a existência, em qualquer hipótese, de pelo menos um aterramento por quilômetro feito pela concessionária, independentemente dos aterramentos dos consumidores;

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

b) $R_9 \leq R_{ATmáx}$ (calculado com base em E.2), pelo menos nos pontos de instalação de dispositivos de proteção contra sobretensão, por ser condição essencial à sua adequada operação.

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

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

— número médio de equipamentos instalados por quilômetro:

como o valor de R_9 é comum a todo o alimentador, o número médio de equipamentos por quilômetro deve ser considerado quando da escolha do número de aterramentos (x), pois cada equipamento implica a existência de um aterramento, de forma a evitar que, em quilômetros com elevado número de equipamentos, o aterramento seja superdimensionado, ou, em quilômetros com pequeno número de equipamentos, seja necessário prover muitos aterramentos adicionais;

— valor da resistência de aterramento de cada haste no solo em questão:

Este fator deve ser considerado na escolha do valor de R_9, de forma a evitar que sejam aventadas hipóteses de valores muito baixos que requeiram número elevado de hastes em paralelo (nos casos de solo de elevada resistividade) ou hipóteses de valores elevados de R_9 que desperdicem resultados obtidos com a cravação de poucas hastes por aterramento (nos casos de solos de resistividade favorável).

A sequência de cálculo recomendada é a seguinte:

ETAPA 1

Com base nas diretrizes anteriormente citadas, supor um binômio de valores para R_9 e x.

ETAPA 2

Com base na sistemática de cálculo de A.1.4.3, determinar o número de hastes necessárias e o valor exato de R_9 obtido.

ETAPA 3

Com base no valor de R_9 determinado na ETAPA 2, definir o número real de aterramentos por quilômetro pela Equação (10).

Para verificação dos potenciais de passo em condições de defeito, deve ser adotadas as etapas:

ETAPA 1

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

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\left\{\left[3 \times R_{SE} + 3\left(\frac{z \times R_5 \times R_9}{x \times R_5 + R_9}\right)^{0,5} + 3 \times R_i\right]^2 + (2 \times X_{1T} + X_{0T} + 3 \times X_i)^2\right\}^{0,5}} \quad (17)$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 2

Determinar o tempo de operação do dispositivo de proteção de terra da subestação, equivalente a I_{cc} calculada na ETAPA 1.

Este 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.

ETAPA 3

Cálculo do comprimento mínimo de eletrodo (L_c) necessário à manutenção de potenciais de passo toleráveis em condição de defeito:

$$L_c = \frac{0{,}1 \times \rho_1 \times \sqrt{t} \times I_{cc} \times \sqrt{z \times R_5 \times R_9}}{(116 + 0{,}7 \times \rho_s)\left(\sqrt{z \times R_5 \times R_9} + R_9 \times \sqrt{x \times R_5 + R_9}\right)} \quad (18)$$

ETAPA 4

Para o cálculo do comprimento real de eletrodo disponível (L_e), conforme orientação da ETAPA 2 de 5.4.2.2.3 a determinação do valor exato de R_9 e, consequentemente, do número de hastes necessárias, deve ser feita com base na sistemática de cálculo de A.1.4.3.

A partir dos resultados deste cálculo, o comprimento real de eletrodo disponível (L_e) pode ser obtido pela Equação (15).

ETAPA 5

Para comparação do comprimento mínimo de eletrodo necessário (L_c) com o comprimento real de eletrodo disponível (L_e), a condição indispensável para a segurança do aterramento é conforme a Equação (16).

— caso esta condição seja satisfeita, os valores R_9 e x devem ser adequados à utilização no projeto;

— caso esta condição não seja satisfeita, retornar a 5.4.2.2.3 e definir outro valor (menor) para R_9 e o x correspondente, reprocessando toda a rotina.

5.4.2.3 Recomendação para elaboração de projeto

Para elaboração de projeto, os valores de R_9 e x definidos pela rotina apresentada representam os requisitos mínimos requeridos para cada quilômetro de rede, além de considerar:

a) todos os equipamentos devem ser conectados ao neutro e aterrados com resistência igual ou inferior a R_9 (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 quilômetro de rede;

c) neutro deve ser também aterrado em todo fim de rede secundária;

NOTA Neste caso, é dispensável a exigência do valor de R_9, bastando a utilização de uma haste ou anel padronizado.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

d) a validade dos valores de R_9 e x deve ser ainda ratificada por análise comparativa das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para as entradas consumidoras supridas em BT, com os limites de suportabilidade. Caso seja inviável a obtenção de condições adequadas de segurança, devem ser avaliadas as seguintes alternativas:

   — limitação das correntes disponíveis de curto-circuito fase-neutro pela instalação de impedância no aterramento do neutro da SE;

   — adoção do esquema TT para aterramento das entradas consumidoras supridas em BT, conforme previsto na ABNT NBR 5410;

e) nos casos em que o dimensionamento do aterramento pela metodologia indicada se torne inviável, mesmo que considerado o comprimento total do neutro (rede primária e rede secundária), o projeto deve ser desenvolvido conforme critérios recomendados para os sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo (ver 5.4.3).

No Anexo G, é apresentado um exemplo de aplicação da rotina anteriormente descrita.

5.4.3 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo

5.4.3.1 Neste caso, devido ao fato de ser inviável a limitação das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para as entradas consumidoras supridas em baixa tensão a valores adequados, resta como alternativa o provimento de aterramentos independentes para os equipamentos de alta-tensão (inclusive transformadores) e para o neutro da rede secundária.

5.4.3.2 Aterramento primário – os aterramentos de equipamentos de alta-tensão devem ser projetados conforme rotina apresentada em 5.5.4, para aterramentos de equipamentos.

5.4.3.3 Aterramento secundário – quanto à rede de baixa tensão, devem ser providos aterramentos compostos de hastes alinhadas:

a) nos pontos de instalação de transformadores de distribuição (mínimo de três hastes distribuídas em relação ao condutor de descida de aterramento), com afastamento em relação ao aterramento de alta-tensão, que limite a valores adequados às tensões nele induzíveis por curtos na rede primária;

b) a intervalos de até 150 m (três hastes distribuídas);

c) em todo fim de rede secundária (mínimo uma haste).

5.4.4 Sistemas monofilares com retorno por terra (MRT)

5.4.4.1 Rede primária

Somente devem ser projetados aterramentos nos pontos de instalação das subestações de isolamento e distribuição, salvo a necessidade de instalação de dispositivos de proteção contra sobretensão em outros pontos da rede.

O condutor neutro deve ser contínuo entre o transformador e as instalações consumidoras. Deve-se, entretanto, tomar o cuidado de não vinculá-lo ao aterramento do poste do transformador, e sim ao do poste de medição.

Por questões de segurança, o poste de medição deve situar-se a uma distância mínima de 30 m do aterramento do poste do transformador.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.4.4.2 Confinamento de corrente

No sistema MRT, para confinar as correntes que retornam pelo solo, deve-se utilizar um transformador de isolamento para evitar as possíveis interferências na proteção da linha supridora. Sua relação de transformação depende do planejamento elétrico da área, podendo ser ainda ser utilizado o transformador de isolamento para adequar as tensões na linha supridora, bem como as derivações MRT, apresentando, para tanto, um enrolamento primário adequado às tensões de fase da linha supridora e um enrolamento secundário ao qual liga-se o ramal MRT.

5.4.4.3 Corrente nos aterramentos

Nos sistemas MRT, as correntes de carga dos transformadores de distribuição passam necessária e continuamente pelos aterramentos destes. Desta forma, pela função essencial que cumprem para o desempenho do sistema e para a segurança de pessoas e animais, os aterramentos devem ser executados de forma criteriosa, envolvendo a medição da resistividade do solo, o projeto, a construção e o acompanhamento periódico.

As características necessárias ao sistema de aterramento dos transformadores nas redes MRT, sejam eles de distribuição ou de isolamento, são determinadas em função de segurança, levando-se em consideração a corrente de carga e a máxima corrente de falta prevista para o ponto.

Na Tabela 1, encontram-se os valores de correntes de cargas que podem circular entre o sistema de aterramento e o solo, para transformadores MRT de até 25 kVA (consideradas suas correntes de carga nominais).

Tabela 1 – Correntes de cargas para diversos transformadores de 5 kV A a 25 kV A

Transformador MRT kV A	**Corrente** A	
	13,8/√ 3 kV	34,5/√ 3 kV
5	0,63	0,25
10	1,26	0,50
15	1,88	0,75
25	3,14	1,26

Como exemplo, pode-se verificar o cálculo da corrente nominal com carregamento de 100 % do transformador monofásico de 15 kVA, 13 800 /√3 V, conforme a Equação 19 :

$$I = \frac{P\,(VA)}{U\,(V)} = \frac{15\,000}{\frac{13\,800}{\sqrt{3}}} = \frac{15\,000\,\sqrt{3}}{13\,800} = 1{,}88\ A \qquad (19)$$

NOTA No Anexo J, são apresentados mais detalhes sobre as redes MRT.

5.5 Aterramento de equipamentos

5.5.1 Objetivo

O objetivo do aterramento de equipamentos é assegurar a operação rápida e efetiva dos dispositivos de proteção, na ocorrência de defeitos devido a rupturas no isolamento, e limitar a valores não perigosos às tensões de toque, passo e transferência, durante a passagem da corrente à terra.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.5.2 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados

Nesse tipo de sistema, face à filosofia de projeto para aterramento do condutor neutro definida em 5.4.1 para garantir a sua manutenção a um potencial inferior a 10 V em condições normais de operação, bem como a efetividade do seu aterramento e a limitação de potenciais a níveis toleráveis em condições de defeito, recomenda-se que:

a) o aterramento de todos os equipamentos seja projetado de forma idêntica aos aterramentos do condutor neutro;

b) as carcaças e/ou ferragens de todos os equipamentos sejam sempre conectadas ao neutro;

c) em cada estrutura, a interligação à malha seja feita por meio de um único condutor de aterramento.

5.5.3 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário contínuo

Para o aterramento de equipamentos instalados neste tipo de sistema, são válidas as mesmas recomendações contidas em 5.5.2, uma vez que as filosofias para projeto de aterramento do neutro são idênticas, para os dois casos.

5.5.4 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo

Em sistemas a três fios em que o neutro secundário não é contínuo, devido ao fato de ser inviável a compatibilização das tensões passíveis de serem transferidas pelo neutro para as entradas consumidoras supridas em baixa tensão, com os limites de suportabilidade, restou como alternativa o provimento de aterramentos independentes para os equipamentos (inclusive transformadores) e para o neutro da rede secundária, conforme definido em 5.4.3.

Em vista disso, os procedimentos adequados para os aterramentos de equipamentos passam a ser:

a) aterrar as carcaças e/ou ferragens de todos os equipamentos;

b) projetar estes aterramentos, de forma a serem autossuficientes, isto é, garantir as condições operacionais e de segurança citadas na introdução deste item, conforme rotina descrita em , 5.5.6 em cada ponto prover a interligação às malhas de terra por meio de condutores de aterramento independentes para os sistemas primário e secundário, sendo este último devidamente isolado;

c) instalar o condutor de aterramento primário internamente ao poste ou, quando impraticável, protegê-lo eletromecanicamente até uma altura mínima de 3 m.

NOTA Esta medida visa prevenir condições de potenciais de toque perigosos, o que se torna inviável nos casos de postes de ferro onde a própria estrutura é utilizada como condutor de aterramento.

5.5.5 Sistemas monofilares com retorno por terra (MRT)

5.5.5.1 Para todas as instalações transformadoras no sistema MRT, deve ser elaborado o projeto do sistema de aterramento.

5.5.5.2 Nas vizinhanças desses aterramentos, os gradientes de tensão no solo devem ser mantidos suficientemente baixos, evitando-se colocar em risco a vida de pessoas e animais.

5.5.5.3 Se, pelos métodos utilizados convencionalmente, o valor de projeto da resistência de terra apresentar-se fora dos limites recomendados, deve-se necessariamente elaborar projeto tendo em vista não só o valor da resistência desse aterramento, mas também, e principalmente, a obtenção de valores seguros de gradientes de potencial na superfície do solo, próximo ao transformador e à instalação consumidora.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.5.5.4 Com relação às condições de segurança e sua implicação no valor da resistência de aterramento, é possível a ocorrência de risco para gradientes de potencial na superfície do solo superiores a 12 V/m nas vizinhanças dos sistemas de aterramento em regiões pecuaristas ou que apresentem possibilidade de circulação de animais.

Para pessoas, na situação de regime, fixar corrente de 10 mA, como a máxima permissível.

Para situações de defeito, devem ser considerados a corrente de curto-circuito e o tempo de atuação do sistema de proteção.

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

5.5.5.6 Em cada instalação transformadora, são executados dois aterramentos distintos. No aterramento denominado “aterramento primário”, são interligados o terminal H2 do enrolamento de alta-tensão do chamado transformador (se existir), sua respectiva carcaça e o para-raios nele instalado. O outro aterramento, denominado “aterramento secundário” ou do padrão de entrada do consumidor, destina-se exclusivamente à conexão do neutro do circuito de baixa tensão.

5.5.5.7 A filosofia adotada para os transformadores de distribuição MRT é de aterramentos independentes, o que permite a manutenção das condições de segurança quando de um eventual rompimento do condutor do aterramento primário, independentemente de qualquer exigência complementar no que se refere aos valores de resistências dos demais aterramentos secundários (redes e consumidores).

5.5.5.8 Basta que o aterramento secundário seja composto por uma única haste de referência; independentemente de seu valor ôhmico, com a separação entre aterramentos primário e secundário, estará minimizando se não evitando a transferência de potenciais ao consumidor.

5.5.5.9 Mesmo na ocorrência de circulação de corrente de curto-circuito pelos dois aterramentos, se o aterramento primário for projetado e construído corretamente (perfeita dissipação de potenciais no solo) comparativamente ao aterramento secundário, a circulação deve ocorrer preferencialmente pelo primário, minimizando os potenciais indesejáveis na região do padrão do consumidor.

5.5.5.10 A perda da interligação entre transformador e aterramento primário deve implicar sempre no desligamento da carga.

5.5.5.11 Registra-se que, por ocasião da descarga de surtos por meio dos para-raios, existirá a possibilidade de aparecimento de sobretensões indesejáveis no enrolamento secundário. Por esse fato, em função da configuração de aterramento adotada, deve ser definido um afastamento mínimo a ser observado entre os aterramentos primário e secundário, a fim de prevenir e minimizar a indução de potenciais neste último.

5.5.6 Aterramento do lado primário do equipamento

Para definição do projeto de aterramento, deve ser obedecida a seguinte rotina:

a) dados necessários:

— I'_{cc} é a corrente de curto-circuito fase-terra, franco, disponível no ponto de instalação do equipamento (kA);

— *RS*E é a resistência de aterramento da subestação, expressa em ohms (Ω);

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

— ρ_1 é o perfil de resistividade do solo, obtido conforme a ABNT NBR 7117;

— ρ_s é a resistividade superficial do solo, expressa em ohms (Ω);

— *kV* é a tensão entre fases do sistema, expressa em quilovolts (kV);

— ρ_{eq} *é a* resistividade equivalente do solo, expressa em ohms (Ω).

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

b) processamento:

ETAPA 1

Reduzir o perfil de resistividade do solo a apenas duas camadas, determinando, desta maneira, a resistividade equivalente das *n* camadas do solo (ρ_{eq}).

ETAPA 2

Calcular o comprimento mínimo, expresso em metros, do eletrodo inicialmente estimado (L_c), necessário à manutenção de potenciais de passo toleráveis em condição de defeito:

$$L_c = \frac{\frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3 \times 0{,}1 \times \rho_1}{116 + 0{,}7 \times \rho_s} - 6 \times \rho_{eq}}{\frac{\sqrt{3} \times kV}{I'_{cc}} + 3 \times R_{SE}} \quad (20)$$

NOTA Se $L_c \leq 0$, fazê-lo igual ao comprimento de uma haste para continuação dos cálculos.

ETAPA 3

A partir do comprimento (*L*) das hastes a serem utilizadas e do espaçamento (*e*) a ser mantido entre elas, considerando a configuração alinhada, determinar o número (*n*) de hastes, necessário à obtenção do comprimento de eletrodos (L_c) calculado na ETAPA 2.

$$n = \frac{L_c + e}{L + e} \quad (21)$$

ETAPA 4

Calcular a resistividade aparente do solo correspondente ao número de hastes determinado na ETAPA 3, conforme roteiro descrito em A.1.3

ETAPA 5

Conhecidos o número de hastes a ser utilizado e a respectiva resistividade aparente do solo, calcular o valor real da resistência do aterramento suposto (R_{ATreal}), conforme as Equações A.2 e A.3.

NOTA Se $R_{ATreal} > R_{ATmáx.}$ (definido conforme D.1), proceder igual a $R_{ATmáx.}$ para continuação dos cálculos.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 6

Calcular o comprimento real de eletrodo disponível (L_e):

$$L_e = n \times L + (n-1) \times e \quad (22)$$

ETAPA 7

Calcular a corrente de curto-circuito máxima, viável de circular por este aterramento (I_{cc}), por meio da Equação 23:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3 \times I'_{cc}}{\sqrt{3} \times kV + 3 \times I'_{cc} \times (R_{AT\text{real}} + R_{SE})} \quad (23)$$

ETAPA 8

Calcular o comprimento mínimo real do eletrodo (L_{cR}), necessário a garantir a limitação dos potenciais de passo a níveis aceitáveis, nas condições de aterramento definidas na ETAPA 5.

$$L_{cR} = \frac{\sqrt{t} \times 0,1 \times \rho_1 \times I_{cc}}{116 + 0,7 \times \rho_s} \quad (24)$$

onde

I_{cc} é a corrente de curto-circuito calculada no ETAPA 7, expressa em ampères (A);

t é o tempo acumulado de operação do dispositivo de proteção do alimentador, instalado na SE, correspondente à I_{cc}, expresso em segundos (s).

NOTA A equação aqui apresentada só é válida para valores de t entre 0,03 e 3 s. Caso o tempo acumulado de operação da proteção seja superior a 3 s, recomenda-se providenciar ou a redução da temporização do dispositivo de proteção ou o aumento de I_{cc} pela redução do valor da resistência do aterramento.

ETAPA 9

Comparar o valor de *LcR* obtido na ETAPA 8 com o valor de L_e da ETAPA 6.

Se $L_{cR} \approx L_e$, passar para a ETAPA 11.

Se $L_{cR} \neq L_e$, passar para a ETAPA 10.

ETAPA 10

Determinar o número (n_1) de hastes, necessário à obtenção do comprimento de eletrodo (*LcR*), calculado no ETAPA 8, considerando os novos valores de comprimento de haste (L_1) e de espaçamento (e_1) a serem adotados.

$$n_1 = \frac{L_{cR} + e_1}{L_1 + e_1} \quad (25)$$

A partir dos valores (n_1), (L_1) e (e_1) reprocessar a rotina a partir da ETAPA 4, substituindo por estes os dados obtidos na ETAPA 3.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 11

O projeto do aterramento está definido tendo como resultados o número de hastes (n_1) definido na ETAPA 10, e a resistência definida na ETAPA 5.

A rotina aqui apresentada foi toda desenvolvida partindo da premissa da utilização de hastes usuais, dispostas na configuração alinhada.

Para os casos de solos de alta resistividade, as soluções disponíveis são aquelas descritas em A.2.3. A mesma rotina para cálculo do aterramento de equipamentos pode ser utilizada, com pequenas adaptações adequadas a cada caso.

No Anexo F, é apresentado um exemplo de aplicação da rotina anteriormente descrita.

5.5.6.1 Delimitação de valores para a resistência do aterramento de transformadores MRT

Particularmente, para as unidades de transformadores MRT, apresenta-se, a seguir, um conjunto de quatro condições, das quais a de menor valor deve ser adotada como sendo a resistência máxima do aterramento.

a) condição 1: adota-se a corrente permissível para indivíduo com resistência R_{ch} e uma resistência de contato R_c com a superfície do solo calculada com base na sua estratificação, para a situação de corrente de carga (I_{carga}):

$$R_{AT} = \frac{I_{perm}\,(R_{ch} + R_c)}{I_{carga} \times P_d\,(\%)} \tag{26}$$

b) condição 2: toma-se como base a corrente máxima permissível a um indivíduo, segundo Dalziel ($I_{perm} = 0{,}116 / \sqrt{t}$), e com os demais parâmetros considerados já citados na condição 1, levados para a situação de curto-circuito com uma duração de t segundos (0,03 s < t < 3 s),

$$R_{AT} = \frac{I_{pern}\,(R_{ch} + R_c)}{I_{cc} \times P_d\,(\%)} \tag{27}$$

c) condição 3: nos pontos externos à configuração do aterramento, para uma corrente de carga I_{carga}, 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 (por exemplo, recomenda-se para gado bovino o valor de $\Delta V_{máx.} = 18$ V);

$$R_{AT} = \frac{\Delta V_{máx}}{I_{carga} \times P_f\,(\%)} \tag{28}$$

d) condição 4: assume-se 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, desta forma, tanto a configuração como a seletividade do sistema indicarem o valor de F adequado.

$$R_{AT} = \frac{I_{perm} \times (R_{ch} + R_c)}{I_{cc} \times P_f\,(\%) \times F} \tag{29}$$

NOTA 1 Os fatores $P_d\,(\%)$ e $P_f\,(\%)$ são extraídos da prática de utilização de *software* específico e representam o máximo valor porcentual do potencial de aterramento refletido da configuração para a superfície do solo, respectivamente nos pontos internos e externos a uma determinada configuração ($P_d\,(\%)$ e $P_f\,(\%) < 1$).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

NOTA 2 A corrente permissível ao corpo humano para a situação de regime, como já citado, foi fixada em 10 mA.

NOTA 3 A resistência R_{ch} em média é tomada como 1 000 Ω.

NOTA 4 A resistência de contato R_c é dada aproximadamente por $R_c = 6\ \rho_{eq}$, em que ρ_{eq} é a resistividade equivalente do solo estratificado em duas camadas.

Na Tabela 2, apresenta-se um resumo da faixa de valores encontrados para P_d (%) e P_f (%), em função das principais configurações de aterramento.

Tabela 2 – Faixa de valores dos fatores $P_{d\ (\%)}$ e P_f (%)

Configurações	P_d (%)	P_f (%)
Um ou mais condutores em forma de anel	7	11
Condutor em forma de anel associado a hastes verticais	6	13
Condutor em forma de anel associado a condutores horizontais	8	9
Condutor horizontal	15	19
Condutores horizontais radiais (até sete radiais)	8	4
Condutores horizontais radiais (oito radiais)	11	13

5.6 Dimensionamento do condutor de aterramento

A metodologia de cálculo apresentada nesta subseção deve ser utilizada, tanto para o dimensionamento do condutor de aterramento, ou seja, do condutor de interligação entre os componentes do sistema a serem aterrados e os eletrodos de aterramento, como para a determinação da seção transversal adequada aos eletrodos horizontais, também conhecidos como cabos de contrapeso, e ainda para aqueles destinados à interligação de vários eletrodos (hastes), constituindo uma malha de aterramento. No desenvolvimento do texto, é visto que o dimensionamento destes condutores é feito em função dos tipos de sistemas a que se destinam.

5.6.1 Determinação da seção do condutor em função da corrente

Em qualquer tipo de sistema, os condutores de aterramento, bem como os de interligação de eletrodos, devem ser dimensionados de forma a suportar as máximas correntes de falta que podem ser impostas a estes e que podem circular para a terra.

No caso de aterramento de sistemas de distribuição, face aos níveis de curto-circuito usuais e aos respectivos tempos de operação da proteção, estes condutores podem ser constituídos de um mesmo material, compatível com o especificado para os demais componentes do aterramento e apresentar, preferencialmente, a mesma seção transversal, calculada por:

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

$$I = \left[\frac{S^2 (4{,}186\ 8 \times \gamma \times C) \times ln\left(1 + \frac{\Delta\theta}{(1/\alpha) - 20 + \theta_a}\right)}{t \times \rho_{20} \times \alpha \times F_r} \right]^{0{,}5} \quad (30)$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

S é a seção do condutor, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

I é o máximo valor da parcela de I_{cc} possível de ser conduzida à terra (ver 5.6.2), expresso em ampères (A);

t é o tempo total de operação do dispositivo de proteção da SE, correspondente à corrente de curto-circuito I_{cc}, expresso em segundos (s);

ρ_{20} é a resistividade do condutor a 20 °C em cc., expressa em ohms milímetro quadrado por metro ($\Omega\ mm^2/m$);

α é o coeficiente de variação da resistência, expresso pelo inverso do grau Celsius ($°C^{-1}$);

F_r é o fator de relação entre as resistividades do condutor em corrente alternada e contínua;

γ é a massa específica do condutor, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm^3);

C é o calor específico do condutor, expresso em calorias por grama-graus Celsius (cal/g.°C);

θ_a é a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C).

$\Delta\theta = \theta_m - \theta_a$

θ_m é a temperatura máxima admissível para as conexões utilizadas, expressa em graus Celsius (°C).

NOTA 1 Para condutores monometálicos, não ferrosos, $F_r = 1$.

NOTA 2 Para condutores ferrosos ou com núcleo de aço, $1 \leq F_r \leq 1{,}2$.

5.6.2 Determinação das correntes de curto-circuito a serem consideradas no dimensionamento

Quando da elaboração dos cálculos para dimensionamento do condutor de aterramento, devem ser consideradas as correntes de curto-circuito definidas em 5.6.2.1 a 5.6.2.3:

5.6.2.1 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados

Supondo a pior condição, isto é, a falha coincidindo com um ponto de aterramento, a condição em que a corrente circula pelo aterramento (I) é dada por:

$$I = \frac{I_{cc} \times \sqrt{z \times R_5 \times R_9}}{\sqrt{z \times R_5 \times R_9} + 2 \times R_9 \times \sqrt{x \times R_5 + R_9}} \quad (31)$$

onde

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\left[(A)^2 + (B)^2\right]^{0,5}} \quad (32)$$

$$A = 3 \times R_{SE} + \frac{3}{2}\left[\frac{z \times R_5 \times R_9}{(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z\ (x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} \times (2 \times r_{1c} + r_{0c}) \quad (33)$$

$$B = 2 \times x_{1T} + x_{0T} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z\ (x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} \times (2 \times\ x_{1c} + x_{0c}) \quad (34)$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

R_5 é o menor valor da resistência equivalente dos aterramentos das entradas consumidoras supridas, por quilômetro dos alimentadores do sistema, expresso em ohms (Ω);

R_9 é o menor dos valores máximos de resistência dos aterramentos do sistema, expresso em ohms (Ω);

R_{SE} é o menor valor de resistência de aterramento das subestações, expresso em ohms (Ω);

kV é a tensão entre fases do sistema, expressa em quilovolts (kV).

NOTA A mesma equação para cálculo de I_{cc} pode ser apresentada como a seguir:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\left\{\left[3 \times R_{AT} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} (2 \times r_{1c} + r_{0c})\right]^2 + \left[2 \times x_{1T} + x_{0T} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} (2 \times x_{1c} + x_{0c})\right]^2\right\}^{0,5}} \quad (35)$$

5.6.2.2 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário contínuo

Não sendo o neutro conectado à malha de terra da subestação, considera-se como pior condição a corrente de curto-circuito fase-terra disponível na SE. Desta forma, a corrente que circula pelo aterramento (I) é dada por:

$$I = \frac{I_{cc} \times \sqrt{z \times R_5 \times R_9}}{\sqrt{z \times R_5 \times R_9} + R_9 \times \sqrt{x \times R_5 + R_9}} \quad (36)$$

Sendo

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\left\{\left[3 \times R_{SE} + 3 \times R_i + 3\left(\frac{z \times R_5 \times R_9}{x \times R_5 + R_9}\right)^{0,5}\right]^2 + (2 \times x_{1T} + x_{0T} + 3 \times x_i)^2\right\}^{0,5}} \quad (37)$$

Sendo

R_{SE} é o menor valor de resistência de aterramento das SE do sistema, expresso em ohms (Ω);

x_{1T} é a menor reatância de sequência positiva de transformador de SE do sistema, expressa em ohms (Ω);

x_{0T} a menor reatância de sequência zero do transformador de SE do sistema, expressa em ohms (Ω);

R_i,x_i a menor resistência ou reatância para limitação de I_{cc}, se for o caso, expressa em ohms (Ω).

5.6.2.3 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo

Neste caso, admite-se que toda a corrente de curto-circuito pode circular pelo aterramento. Contudo, na determinação desse valor total, considera-se como pior hipótese, em série no circuito de sequência zero, metade do menor valor individual de resistência de aterramento (R_{AT}).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

sendo

$$I = I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\left[\left(3 \times R_{SE} + 3 \times R_i + \frac{3}{2} \times R_{AT}\right)^2 + (2 \times x_{1T} + x_{0T} + 3 \times x_i)^2\right]^{0,5}} \quad (38)$$

onde

kV é a tensão nominal entre fases do sistema, expressa em quilovolts (kV);

R_{SE} é o menor valor de aterramento das subestações do sistema, expresso em ohms (Ω);

R_{AT} é o menor valor individual de resistência de aterramento determinada de acordo com 5.5.4, expresso em ohms (Ω);

x_{1T} é o menor valor de reatância de sequência positiva de transformador da subestação, expresso em ohms (Ω);

x_{0T} é o menor valor de reatância de sequência zero de transformador da subestação, expresso em ohms (Ω);

R_i, x_i é a menor resistência ou reatância para limitação de I_{cc}, se for o caso, expressa em ohms (Ω).

5.6.3 Características dos condutores de aterramento

Como parte dos requisitos mínimos da especificação dos materiais a serem utilizados nos projetos de aterramento, podem ser considerados: os diâmetros mínimos a serem considerados para hastes de aterramento, as seções mínimas a serem consideradas para os condutores de aterramento e as espessuras mínimas a serem consideradas para fitas ou chapas.

Os produtos a serem definidos devem atender às Normas Brasileiras específicas. Critérios de aceitação, ensaios e especificação dos produtos estão descritos nas normas pertinentes.

5.6.3.1 São apresentadas na Tabela 3 as características técnicas dos condutores normalmente utilizados nas descidas dos aterramentos, dados estes necessários ao seu dimensionamento, conforme rotina definida em 5.6.1.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela 3 – Valores dos parâmetros para os tipos de condutores mais utilizados em malhas de aterramento

Tipo do condutor	Condutância	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão [a]	Resistividade	*TCAP*
	%	α_0 (0 °C)	α_r (20 °C)	°C	ρ_r (20 °C) em ($\mu\Omega$.cm)	[J/(cm^3 °C)]
Cobre (macio)	100,0	0,004 27	0,003 93	1 083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97,0	0,004 13	0,003 81	1 084	1,777	3,422
Aço cobreado 53 %	53,0	0,004 08	0,003 78	1 084	3,318	3,846
Aço cobreado 40 %	40,0	0,004 08	0,003 78	1 084	4,397	3,846
Aço cobreado 30 %	30,0	0,004 08	0,003 78	1 084	5,862	3,846
Aço cobreado 21 %	21,0	0,004 08	0,003 78	1 084	8,374	3,846
Haste de aço cobreado [a]	20,0	0,004 08	0,003 78	1 084	8,621	3,846
Fio de alumínio	61,0	0,004 39	0,004 03	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	53,5	0,003 80	0,003 53	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	52,5	0,003 73	0,003 47	660	3,284	2,598
Aço-alumínio	20,3	0,003 88	0,003 60	660	8,480	2,670
Aço 1020	10,8	0,001 65	0,001 60	1 510	15,90	3,284
Haste de aço revestido em aço inoxidável [b]	9,8	0,001 65	0,001 60	1 400	17,50	4,443
Aço-carbono zincado	8,5	0,003 41	0,003 20	419	20,1	3,931
Aço inoxidável COPAN T 30304	2,4	0,001 34	0,001 30	1 400	72,0	4,032

[a] Aço cobreado baseado em uma espessura de 254 μm de cobre.

[b] Baseado em barra de aço COPANT 1020 revestido em aço inoxidável COPANT 30304, camada 508 μm.

5.6.3.2 Com relação ao condutor de cobre, que é o mais comumente empregado, as temperaturas máximas recomendáveis são as especificadas na Tabela 4.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela 4 – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura

Conexão	T_m °C
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850 [a]
Emenda à compressão	850 [b]

[a] Solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, cuja conexão é feita por meio da fusão obtida pela ignição e combustão de uma formulação em um molde.

[b] Obtida por meio de conectores à compressão.

Devido a requisitos mecânicos e de segurança, a seção transversal do condutor de aterramento não pode ser inferior a 16 mm^2. Em consequência, considerada a elevação máxima de temperatura de 210 °C, compatível com a existência de conexões por pressão ($\theta_{máx.}$ = 250 °C), fica a corrente suportável limitada em 2 070 A, o que implica dizer que, para correntes máximas de curto-circuito fase-terra de um sistema até esse valor, nenhum cálculo necessita ser feito para o seu dimensionamento.

Raciocínio semelhante pode ser desenvolvido no caso do emprego de outros materiais, desde que respeitada a condição de rigidez mecânica mínima compatível com a seção transversal de 16 mm^2.

5.7 Aterramento de consumidores

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.

Além disso, é importante também salientar que a metodologia desenvolvida em 5.4 leva em consideração a contribuição destes aterramentos (de consumidores), tanto para garantia da efetividade do aterramento do sistema como para a manutenção do neutro a potenciais inferiores a 10 V em condições normais de operação.

São apresentadas em 5.7.1 a 5.7.2 as recomendações pertinentes ao aterramento dos diversos tipos de instalações consumidoras.

5.7.1 Consumidores atendidos em tensão secundária de distribuição (baixa tensão)

Como regra geral, nos casos de sistemas primários a quatro fios e a três fios com neutro secundário contínuo, desde que os aterramentos providos pela concessionária tenham sido projetados de acordo com as recomendações contidas nesta Norma, os consumidores devem ser orientados para executarem suas instalações internas em consonância com as recomendações da ABNT NBR 5410, para esquema TN.

Apenas nos casos especiais em que o projeto de aterramento do sistema distribuidor não viabilize a limitação dos potenciais passíveis de serem transferidos para os consumidores de BT a valores adequados, é que a eles deve ser recomendada a utilização do esquema previsto na ABNT NBR 5410.

Nos casos de sistemas a três fios com neutro secundário descontínuo, face à possibilidade de eventuais contatos de condutores-fase do primário (partidos) com o condutor neutro, aos consumidores deve ser sempre recomendada a adoção do esquema TT em suas instalações internas.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Não sendo fisicamente possível esse tipo de contato (por exemplo, nos casos de redes isoladas), aos consumidores pode ser recomendada a adoção do esquema TN.

5.7.1.1 Recomendações específicas para o esquema TN

Quando adotado pelos consumidores o esquema TN, além da recomendação de interligação (sempre que possível) dos aterramentos às estruturas dos respectivos prédios, devem ser por eles observadas as orientações específicas apresentadas desde 5.7.1.1.1 a 5.7.1.1.3.

5.7.1.1.1 Entradas individuais

Em cada edificação, na medição e na proteção do ramal de entrada, deve ser executado aterramento, com no mínimo uma haste, independentemente do valor da resistência de aterramento obtida. Esse aterramento deve ser confiável e estar de acordo com o padrão de cada empresa, devendo ser exercida sobre ele uma efetiva fiscalização por parte da concessionária, quando da ligação do consumidor ao sistema.

5.7.1.1.2 Entradas coletivas

— com até seis consumidores:

  Em cada edificação, no centro de medição e da proteção, deve ser providenciado aterramento único no ramal de entrada, com número de hastes de terra correspondente no mínimo ao número de consumidores ligados, independentemente do valor de resistência de aterramento obtida. Esse aterramento deve ser confiável e estar de acordo com o padrão de cada empresa, além de sofrer uma efetiva fiscalização por parte da concessionária, quando da ligação dessa entrada coletiva ao sistema;

— com mais de seis consumidores:

  Em cada edificação, no centro de medição e de proteção, deve ser providenciado aterramento único no ramal de entrada, com no mínimo seis hastes, contemplando os critérios estabelecidos, tanto pela Norma Brasileira pertinente quanto pela concessionária.

5.7.1.1.3 Cargas localizadas em vias públicas

Em se tratando de pontos de utilização de energia localizados em vias públicas, é comum a instalação de postes metálicos para sustentação de letreiros luminosos, placas de identificação de ruas, relógios/termômetros etc.

Para esses casos, em adendo às recomendações contidas em 5.7.1.1.1, deve ser prevista a instalação de anéis em torno dos postes conectados ao neutro e às respectivas estruturas, com diâmetro em torno de 600 mm, à profundidade de 200 mm em relação à superfície.

5.7.1.2 Recomendações específicas para o esquema TT

Considerando que a utilização do esquema TT só é recomendada quando possível a transferência de potenciais perigosos pelo condutor neutro, além das recomendações prescritas em 5.7.1.1.1 e 5.7.1.1.2 para aterramento do neutro, o segundo aterramento (do condutor de proteção) deve ser projetado com afastamento suficiente em relação ao primeiro, de forma a prevenir a possibilidade de induções de potencial superiores aos limites toleráveis.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.7.2 Consumidores atendidos em tensão primária de distribuição

5.7.2.1 Subestações simplificadas (transformadores em postes ou plataformas)

Devem ser atendidas as mesmas recomendações feitas em 5.5.

5.7.2.2 Subestações convencionais

5.7.2.2.1 O projeto do aterramento deve prever autossuficiência, de modo a garantir as condições operacionais e de segurança, independentemente da sua interligação ao eventual condutor neutro do sistema supridor.

5.7.2.2.2 Por ocasião do pedido de ligação ou ampliação de uma destas subestações, o consumidor interessado deve apresentar à concessionária, para conhecimento e eventual análise, o projeto do sistema de aterramento, inclusive memorial de cálculo, contemplando os critérios estabelecidos pela Norma Brasileira pertinente e pela concessionária.

5.8 Verificação e manutenção das características originais de projeto

5.8.1 Considerações gerais

O requisito básico que deve atender a um sistema de aterramento projetado conforme metodologia descrita em 5.4 é o de proporcionar o adequado funcionamento dos sistemas de energia elétrica e, sobretudo, garantir as condições de segurança, tanto durante operação normal destes sistemas quanto nas situações de defeito. Para tanto, as malhas de aterramento devem cumprir as exigências de desempenho elétrico e mecânico previstas em projeto e enunciadas em 5.8.2.1 e 5.8.2.2.

5.8.2 Verificação das características de projeto

5.8.2.1 Desempenho elétrico

As malhas de aterramento devem:

a) apresentar um valor de resistência de aterramento estável ao longo do tempo. Para a obtenção desta característica, não se pode utilizar, na confecção da malha materiais que possam ser lixiviados ou que tenham suas propriedades grandemente alteradas dentro da vida útil prevista para a malha;

b) apresentar capacidade de condução de corrente compatível com os valores aos quais está submetida, o que implica em que o material especificado para a confecção das malhas e também do cabo de descida apresentem curvas tempo x corrente, compatíveis com os tempos de operação da proteção contra sobrecorrentes associada;

c) 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;

d) 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 de resistência deve ser feita logo após a execução do projeto. Para sistemas que dispõem do condutor neutro, o número de pontos de aterramentos a serem inspecionados, escolhidos aleatoriamente, não pode ser inferior a 10 % em relação ao universo projetado.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.8.2.2 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, sendo resistentes à corrosão dentro das características do solo no qual encontram-se instaladas;

b) apresentar resistência mecânica suficiente, de modo a evitar danos ao material utilizado durante a confecção da malha, como rompimento do condutor de descida, dobramento ou flambagem das hastes de aterramento e danificação das conexões durante sua vida útil.

A verificação destas características deve ser feita segundo disposições estabelecidas em 5.8.3.

5.8.3 Acompanhamento das características de projeto

O fenômeno da corrosão que se verifica nos condutores de aterramento, hastes de aterramento e conexões caracteriza-se como um dos principais fatores determinantes da vida útil de um aterramento. Desta forma, torna-se imperioso o acompanhamento do sistema de aterramento no decorrer do tempo. A frequência de verificação nunca pode ultrapassar o período de vida útil dos elementos que compõem o sistema de aterramento. Assim, devem ser realizadas medições sempre que surgirem indícios de que o sistema de aterramento distancia-se dos objetivos para os quais foi projetado.

5.8.3.1 Manutenção dos aterramentos

Algumas das recomendações feitas nesta Subseção podem ser de difícil observância para todas as regiões da área de concessão da empresa, tendo em vista a existência de altas densidades de carga e/ou zonas densamente povoadas. No entanto, estas recomendações devem ser obedecidas nas regiões onde se possam realizar as medições necessárias ao acompanhamento do desempenho dos aterramentos, tendo em vista a aquisição de dados e as informações que possibilitem:

a) avaliar o desempenho do sistema de aterramento de forma geral;

b) estimar, com maior margem de segurança, a vida útil dos diversos materiais empregados;

c) proceder a uma avaliação dos critérios de projeto e métodos construtivos.

A análise destes dados permite a alocação de recursos e definição de políticas relativas aos materiais utilizados e à manutenção ou renovação de aterramentos em toda a área de concessão da empresa.

5.8.3.2 Critérios para medição da resistência de aterramento

São os seguintes:

a) periodicidade:

   Independentemente da constatação ou não de possíveis irregularidades, a frequência de verificações por meio de medições da resistência oferecida por um aterramento não pode ser superior a 1/3 da durabilidade prevista para o sistema de aterramento. Entretanto, recomenda-se a realização de medições, tendo em vista a verificação da constância dos valores de resistência em períodos de aproximadamente cinco anos;

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

b) amostragem:

O número de pontos de aterramentos a ser inspecionado deve ser dimensionado de acordo com métodos estatísticos apropriados às condições da região e ao tipo de solo em que se encontram dispostos. Entretanto, o número mínimo a ser considerado para inspeção deve ser de 10 % do universo em estudo. Esta amostra, inicialmente escolhida aleatoriamente, deve ser mantida nas observações seguintes;

c) época da execução:

Como a resistividade do solo varia diretamente com a quantidade de água contida no solo e com a resistividade desta água, as medições devem ser executadas em período seco, de forma a não se obter resultados distorcidos. Em casos excepcionais, deve-se aguardar pelo menos três dias consecutivos sem chuva para a realização das medições.

O primeiro valor medido para acompanhamento é denominado “valor de referência”.

5.8.3.3 Critérios para manutenção dos aterramentos

São os seguintes:

a) redes:

Para um universo de até 100 aterramentos, efetuar sempre dez medições, e, para universos de mais de 100 aterramentos, tomar no mínimo 10 % do total. Destas medições, verificar o seguinte:

— caso 60 % ou mais das medidas apresentem valores superiores a 150 % dos valores 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 % das medidas apresentem valores superiores a 150 % dos valores de referência, proceder a nova amostragem aleatória. Caso persista em mais de 30 % das novas medições um valor superior ao exigido, executar medições em todos os outros pontos, procedendo à necessária renovação;

— caso 20 % ou menos das medidas apresentem valores superiores a 150 % do requerido, nenhuma providência é necessária

b) equipamentos:

Para equipamentos especiais, como religadores, seccionalizadores, reguladores, chaves a óleo e semelhantes, deve ser efetuada no mínimo uma medição de seu sistema de aterramento toda vez que o equipamento passar pela oficina para manutenção. Recomenda-se que o intervalo entre verificações não seja maior que cinco anos;

c) consumidores:

O acompanhamento do desempenho dos aterramentos de unidades consumidoras atendidas em tensão primária deve ser realizado de forma idêntica ao estabelecido para redes. Em caso de necessidade, deve-se renovar o aterramento.

Recomenda-se, para os aterramentos das unidades consumidoras atendidas em tensão secundária, sua manutenção e eventual renovação, sempre que comprovadamente for constatada a sua não efetividade.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.9 Aterramento de cerca

Cercas constituídas de material condutor (em geral, arame farpado), localizadas em até 30 m de 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 de cercas paralelas à rede. Como solução, estas cercas devem ser seccionadas e aterradas conforme rotinas descritas em 5.9.1 a 5.9.3.

5.9.1 Cercas transversais à rede de distribuição

5.9.1.1 Cercas que cruzam a faixa de passagem de redes estão sujeitas a ficarem em contato direto com um condutor, quando este se rompe, ficando desta forma energizadas. A zona de influência do problema deve ser limitada pelo seccionamento da cerca em limites tais que, quando do rompimento de um condutor, mesmo com seu "chicoteamento", este não toque nas partes de cerca fora do trecho seccionado. O seccionamento da cerca deve ser feito com seccionadores adequados ou moirões adicionais (ver Figura 1).

5.9.1.2 Na parte da cerca dentro da faixa estabelecida, devem ser executados aterramentos com apenas uma haste em ambas as extremidades. A fim de equalizar os potenciais, essas hastes devem ser interligadas por um condutor enterrado de material e bitola adequados. Este conjunto não pode ser conectado com o sistema de aterramento da rede de distribuição.

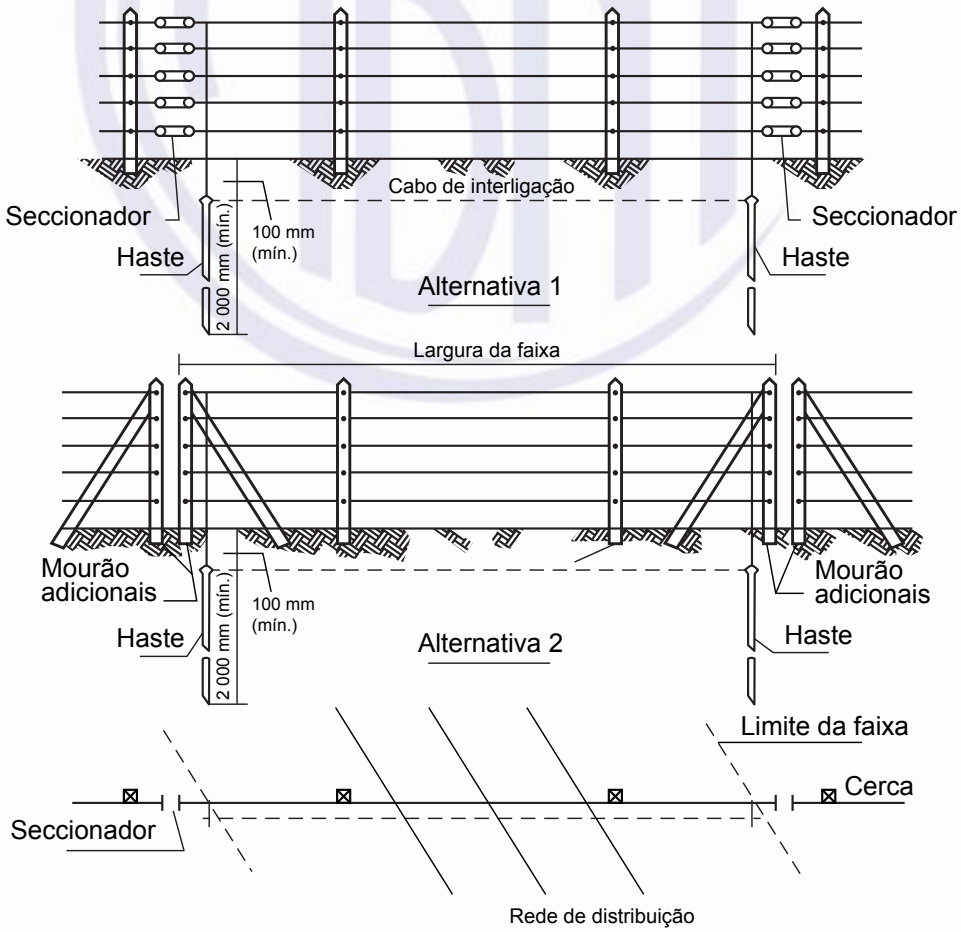


Figura 1 – Seccionamento e aterramento de cercas transversais à rede de distribuição

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.9.2 Cercas paralelas à rede de distribuição

5.9.2.1 No caso de cercas paralelas a redes de distribuição, tensões podem ser induzidas eletromagneticamente, notadamente, durante a ocorrência de faltas no sistema, quando existe corrente de retorno pela terra. A tensão não depende somente do valor da corrente de falta, mas também do comprimento de cerca exposto ao paralelismo, da posição relativa entre a cerca e a linha, da resistividade do solo e da existência ou não do neutro multiaterrado na rede de distribuição. Tensões induzidas eletrostaticamente raramente são de valor apreciável e também dependem de diversos fatores.

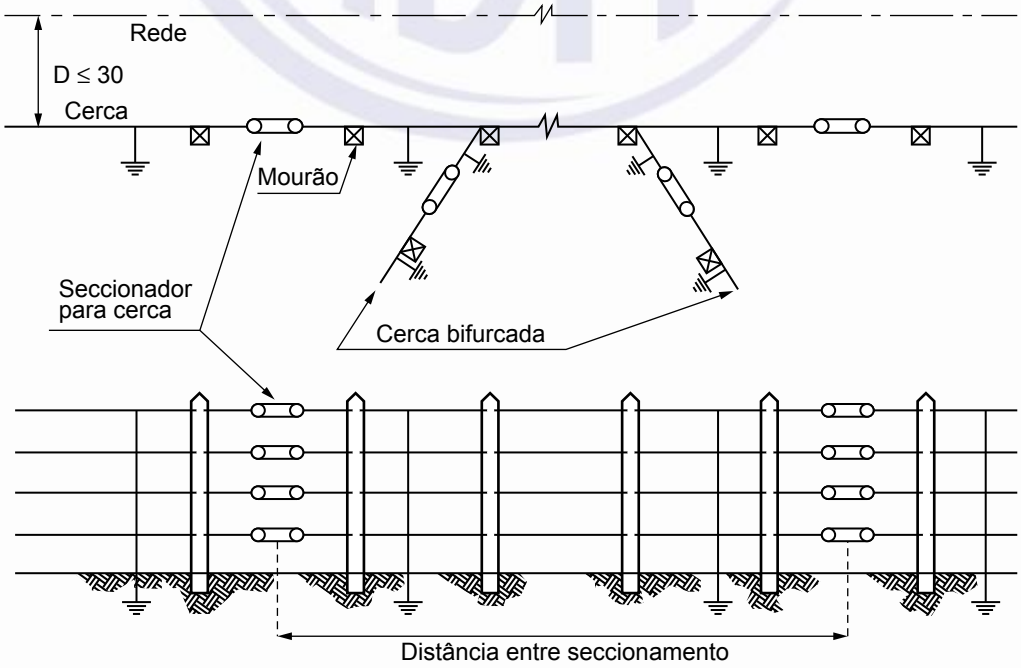
5.9.2.2 A influência dos campos eletrostáticos e eletromagnéticos em cercas situadas a uma distância superior a 30 m do eixo da rede de distribuição é considerada desprezível e, portanto, não exige qualquer providência específica.

5.9.2.3 A mais efetiva medida para limitar estas tensões induzidas é separar eletricamente a cerca em um determinado número de seções.

5.9.2.4 Caso haja possibilidade de queda de um condutor-fase sobre a cerca, esta deve ser aterrada em ambos os lados de cada ponto de seccionamento com pelo menos uma haste, devendo estes dois aterramentos serem eletricamente independentes (ver Figura 2). Tal procedimento, apesar de não propiciar condições totais de segurança, aumenta a probabilidade de operação da proteção do alimentador por ocasião de contatos fase x cerca.

5.9.2.5 Como o número de fatores envolvidos no cálculo das tensões induzidas é muito grande, cada paralelismo deve ser considerado um caso individualizado, para fins de cálculo da distância máxima entre seccionamentos.

5.9.2.6 Em estudos de aterramentos e seccionamentos de cercas, para locais onde seja evidente a presença de animais, sugere-se a consideração de valores mais críticos para limites de tensões de toque permissíveis.



NOTA Estes seccionamentos também podem ser providos pela alternativa 2 da Figura 1.

Figura 2 – Aterramento e seccionamento de cercas paralelas à rede

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

5.9.3 Cercas próximas a aterramentos do sistema primário

Adicionalmente, cuidados especiais devem ser tomados com relação a cercas localizadas dentro das zonas de influência de aterramentos do sistema primário (religadores, postos de transformação, reguladores, aterramentos de neutro etc.), tendo em vista prevenir:

a) que elevações de potencial no solo ao redor do aterramento primário sejam transferidas para pontos remotos por meio dos aterramentos das cercas;

b) que pessoas localizadas dentro das referidas zonas de influência (também sujeitas a eventuais elevações de potencial) possam ser submetidas a diferenças de potencial elevadas pelo contato com trechos de cercas remotamente aterrados.

Não sendo viável a execução de estudos específicos para cada caso, a observância das diretrizes descritas em 5.9.3.1 e 5.9.3.2 minimizam a probabilidade de condições inseguras.

5.9.3.1 Cercas paralelas à configuração do aterramento

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

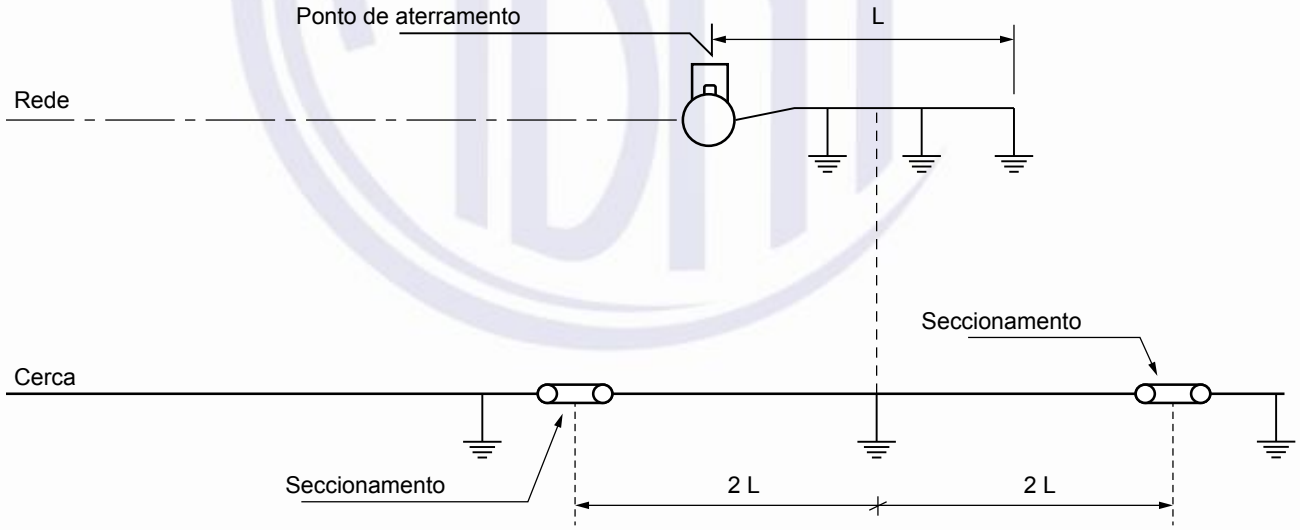


Figura 3 – Seccionamento e aterramento de cerca paralela à configuração de aterramento

5.9.3.2 Cercas transversais à configuração do aterramento

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

a) em ambas as suas extremidades, se o aterramento do primário cruzá-lo; ou

b) apenas em seu ponto central, caso não haja este cruzamento.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

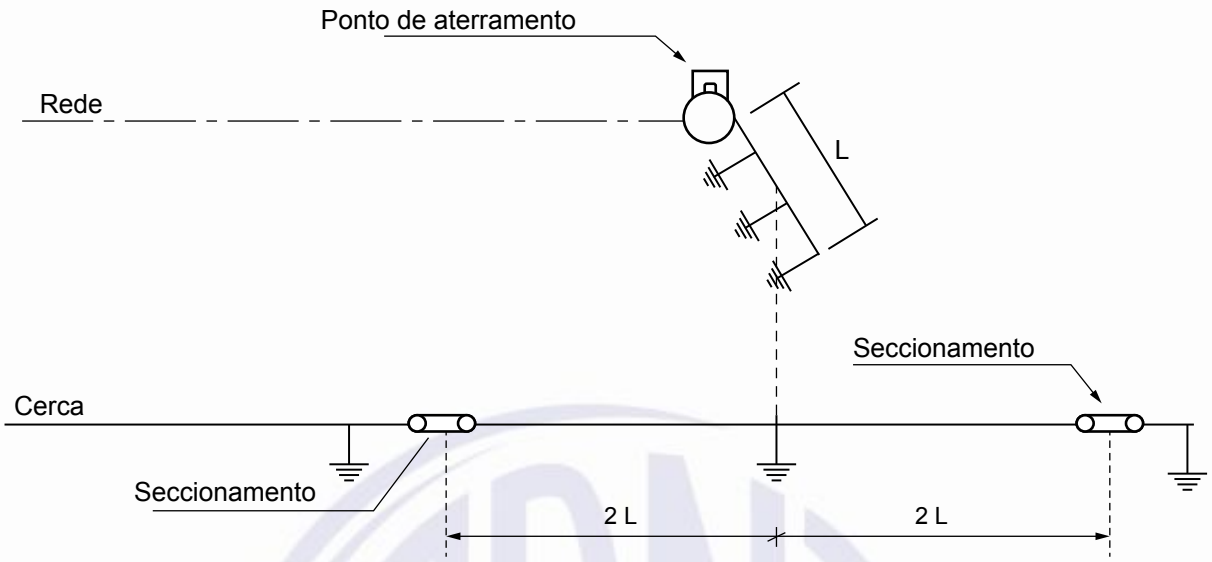


Figura 4 – Seccionamento e aterramento de cerca transversal à configuração de aterramento

5.10 Aterramento de estais

O problema representado pelo estai consiste na possibilidade de contato simultâneo, por uma pessoa ou animal, no estai e no terra adjacente, quando da ocorrência de um contato acidental de um condutor energizado com este. O resultado deste contato pode ser minimizado se o estai estiver efetivamente aterrado por sua própria âncora ou de outra forma semelhante. Pode também ser minimizado caso a parte do estai sujeita a contatos acidentais com condutores-fase seja isolada.

5.10.1 Sistemas trifásicos a quatro fios ou sistemas a três fios com neutro secundário contínuo

Independentemente do tipo de poste (concreto ou madeira), a interligação do estai ao neutro multiaterrado proporciona uma boa segurança quando do contato acidental entre condutor energizado e o estai.

5.10.2 Sistemas trifásicos a três fios com neutro secundário descontínuo

Nestes casos, o estai pode ser efetivamente aterrado ou isolado.

5.10.2.1 Aterramento do estai

Quando se aterra o estai, este deve ser considerado um aterramento de rede. O cálculo é feito utilizando-se a rotina prevista em 5.4. A manutenção deve ser feita de acordo com 5.8. Cabe observar que a obtenção e a manutenção de aterramentos efetivos em estais podem apresentar muitas dificuldades, principalmente no caso de redes rurais em que o número destes é muito grande.

5.10.2.2 Isolação do estai

5.10.2.2.1 O isolador a ser utilizado deve:

a) ter suficiente isolamento para a tensão de linha;

b) ser colocado a uma altura que represente um compromisso entre o eventual contato da fase com o estai e o contato de pessoa ou animal com a porção aterrada do estai;

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

c) no caso de postes de madeira, é recomendável a utilização de isoladores com alta resistência à descarga disruptiva para se evitar a anulação dos efeitos de isolação proporcionados pelo poste.

5.10.2.2.2 Cabe observar que os isoladores de estai introduzem um elemento mecanicamente fraco na construção da linha, e a manutenção de suas características elétricas por longos períodos de tempo é dificultada pela simples razão de que os defeitos não se tornam aparentes como no caso dos isoladores de linha.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo A
(normativo)

Elementos de projeto para aterramento

A.1 Resistividade do solo

Ver ABNT NBR 7117.

O procedimento para obter o valor da resistividade aparente, a ser aplicada no método de cálculo da resistência de aterramento, constante nesta Norma, a partir de solos estratificados, reduzidos a duas camadas, é descrito na ABNT NBR 15751:2009, Anexo A.

A.1.1 Considerações gerais

Para o desenvolvimento de um projeto de aterramento, é fundamental o conhecimento das características do solo, principalmente de sua resistividade elétrica. O conjunto de fatores que determina a resistividade do solo compreende:

a) tipo do solo;

b) composição química dos sais dissolvidos na água retida;

c) concentração desses sais;

d) teor de umidade;

e) temperatura;

f) tamanho e distribuição das partículas (grãos) do material; e

g) pressão.

A.1.2 Medição

A medição prévia da resistividade permite a definição de áreas de características homogêneas, em que um valor médio, quando utilizado, não implica em distorção dos resultados globais a serem obtidos pela aplicação da metodologia proposta. A ABNT NBR 7117 define critérios para medição de resistividade e estratificação do solo.

A.1.3 Estratificação do solo

A.1.3.1 Conforme definido na ABNT NBR 7117, a redução das (n + 1) camadas do solo estratificado resultantes da medição de resistividade (ver Figura A.1), para apenas duas camadas, é feita considerando-se o paralelismo daquelas camadas, duas a duas, a partir da superfície, utilizando-se sucessivamente a equação:

$$\rho_{eq(i,j)} = \frac{\rho_i \times \rho_j \times \rho_j}{\rho_i \times \rho_{j\,(j-1)} + \rho_j \times \rho_i} \quad \text{(A.1)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Sendo

$\rho_{eq(i,j)}$ é a resistividade específica equivalente resultante do paralelismo entre duas camadas *i* e *j*;

ρ_i é a resistividade específica da camada *i*;

ρ_j é a resistividade específica da camada *j*;

p_i a profundidade da camada *i*;

$p_{j\ (j-1)}$ é a diferença entre profundidade da camada *j*(p_j) e profundidade da camada resultante do paralelismo entre as duas camadas anteriores (*pj*-1).

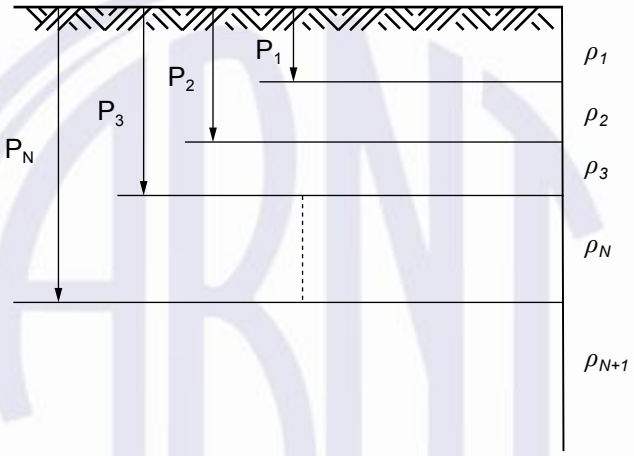


Figura A.1 – Solo estratificado em (*n* + *1*) camadas

A.1.3.2 A equação geral para redução direta de *n* camadas é a seguinte:

$$\rho_{eqn} = \frac{\sum_{i=1}^{n} d_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{d_i}{\rho_i}} \quad \text{(A.2)}$$

Sendo

ρ_{eqn} é a resistividade equivalente das *n* camadas do solo, expressa em ohms (Ω);

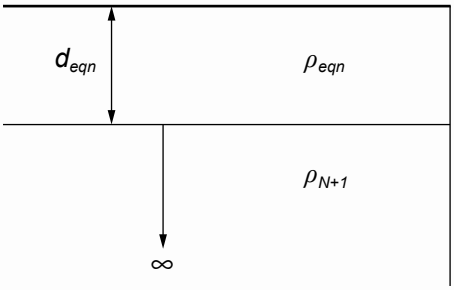
d_i é a espessura da camada de resistividade ρ_i, obtida pelas diferenças entre profundidades, expressa em metros (m).

A.1.3.3 Assim, chega-se a apenas duas camadas de solo, conforme a Figura A.2.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



Legenda

d_{eqn} profundidade da camada equivalente, expressa em metros (m)

Figura A.2 – Perfil de resistividade do solo com as *n* camadas reduzidas a uma camada equivalente

A.1.4 Resistividade aparente vista pelas diversas configurações de eletrodos de aterramento

A.1.4.1 Aterramento com um único eletrodo vertical

Para se calcular a resistência de aterramento de uma única haste de aterramento cravada em um solo não homogêneo, considera-se, para dispersão das correntes, a resistividade equivalente de todas as camadas que compõem este solo. Desta forma, a resistividade aparente a ser considerada corresponde à resistividade equivalente calculada pela Equação A.2.

NOTA A utilização da resistividade equivalente para cálculo da resistência de aterramento de uma única haste de aterramento, apesar de constituir a melhor alternativa técnico-econômica para projeto, implica na obtenção de valores bastante sensíveis aos efeitos da heterogeneidade do solo, razão pela qual recomenda-se, sempre que possível, sua ratificação prévia por meio de medições amostrais de valores de resistência, efetuadas conforme a ABNT NBR 15749.

Nos casos de anéis instalados no solo conforme a Figura A.3, o valor da resistividade aparente deve ser calculado por:

$$\rho_a = \frac{L_1 + L_2 + 2 \times \pi \times R}{\frac{L_1}{\rho_1} + \frac{(L_2 + 2 \times \pi \times R)}{\rho_2}} \quad \text{(A.3)}$$

onde

ρ_a é a resistividade aparente para cálculo da resistência de um anel, expressa em ohms-metro (Ω.m);

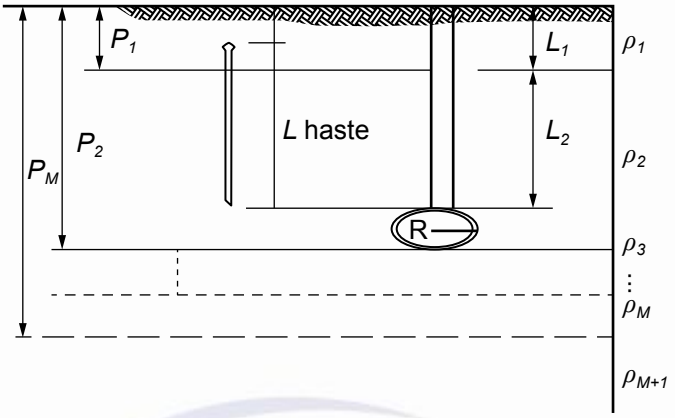
R é o raio do anel, expresso em metros (m).

NOTA Os demais termos já foram definidos anteriormente.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



NOTA Nos casos de anéis com diâmetro superior a 6 m, adotar o valor da resistividade aparente calculada considerando-se o valor de *r* na Equação A.4, como o resultado da aplicação da Equação A.6.

Figura A.3 – Eletrodo cravado em solo estratificado

A.1.4.2 Aterramento com eletrodo horizontal

Em se tratando de condutores horizontalmente enterrados, com comprimento de até 6 m, o valor de sua resistência deve ser determinado com base na resistividade equivalente das camadas do solo localizadas entre a superfície e aquela onde se encontra instalado o eletrodo (inclusive), valor este a ser calculado com base na Equação A.2. Nos casos de condutores com comprimento superior a 6 m, adotar o valor da resistividade aparente calculada considerando-se o valor de *r* na Equação A.4 igual à metade do comprimento do eletrodo horizontal, expresso em metros.

A.1.4.3 Aterramento com mais de uma haste

Determina-se, a partir de suas dimensões, o coeficiente α, dado pela Equação A.4.

$$\alpha = \frac{r}{d_{eqn}} \tag{A.4}$$

onde

r é o raio do círculo equivalente (tomado, em termos práticos, como sendo igual à metade da maior dimensão do sistema de aterramento), expresso em metros (m);

d_{eqn} é a profundidade da camada equivalente obtida na redução de *n* camadas, expressa em metros (m).

Para hastes alinhadas, *r* é dado por:

$$r = \frac{(n-1) \times e}{2} \tag{A.5}$$

onde

n é o número de hastes de aterramento;

e é o espaçamento entre hastes, expresso em metros (m);

r é o raio do círculo equivalente, expresso em metros (m).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Para outras configurações, *r* é dado pela Equação A.6.

$$r = \frac{A}{D} \tag{A.6}$$

onde

A é a área do sistema de aterramento, expressa em metros quadrados (m^2);

D é a maior dimensão do sistema de aterramento, expressa em metros (m).

De posse do coeficiente α e da relação , por meio do gráfico da Figura A.4, determina-se a relação , da qual se extrai a resistividade aparente pela Equação A.7.

$$\rho_a = N \times \rho_{eqn} \tag{A.7}$$

onde

ρ_a é a resistividade aparente correspondente à configuração de aterramento considerada, expressa em ohms metro (Ω m);

ρ_{eqn} é a resistividade equivalente das *n* camadas do solo, expressa em ohms-metros (Ω.m);

N é o coeficiente de relação entre ρ_{eqn} e ρ_a.

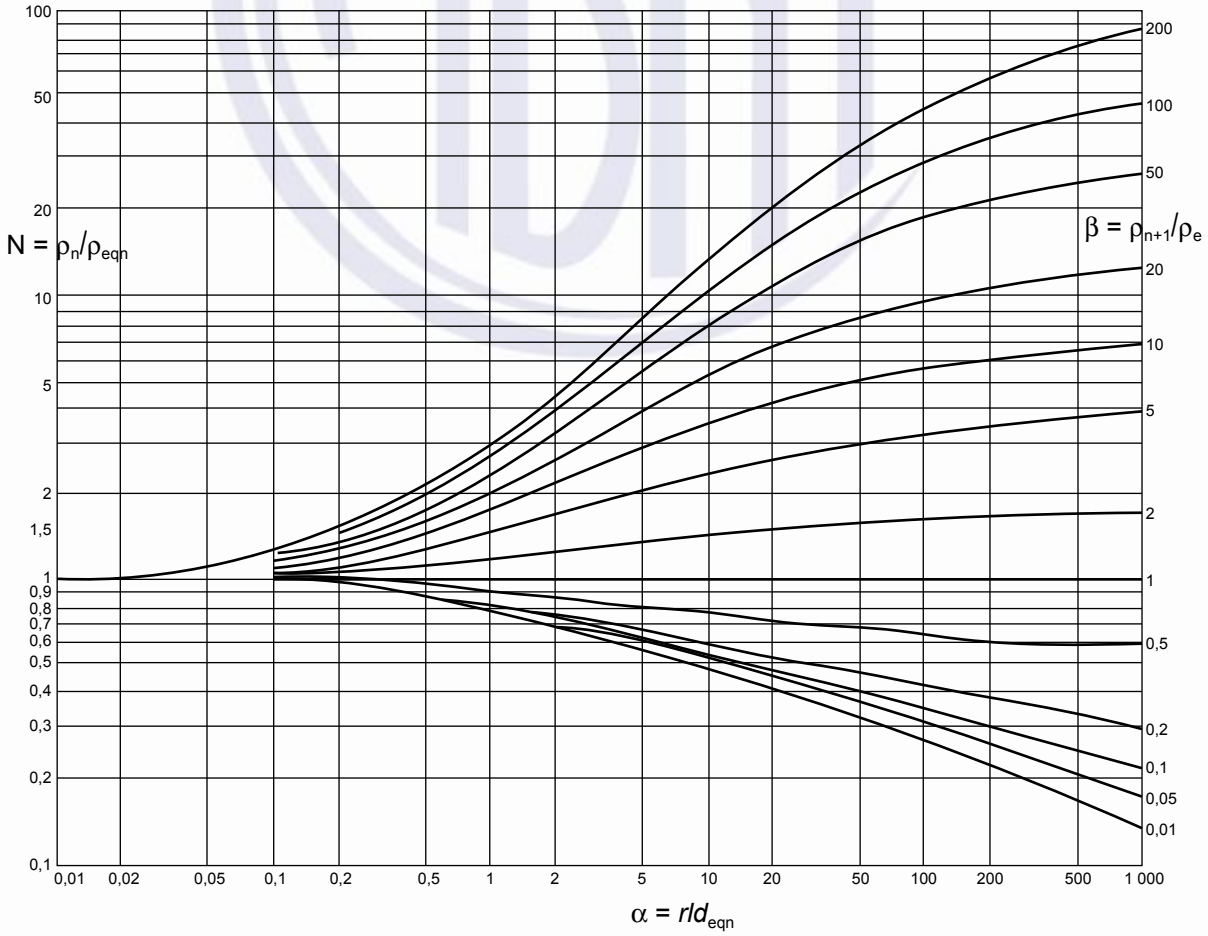


Figura A.4 – Determinação da resistividade aparente para um solo com duas camadas estratificadas

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.2 Resistência de configurações dos eletrodos de aterramento

A.2.1 Resistência de aterramento de eletrodos simples

São três os tipos de eletrodos mais utilizados nos aterramentos de sistemas de distribuição, conforme A.2.1.1.a A.2.1.3.

A.2.1.1 Hastes

Sua resistência é determinada por meio da Equação A.8:

$$R_{1h} = \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right) \quad \text{(A.8)}$$

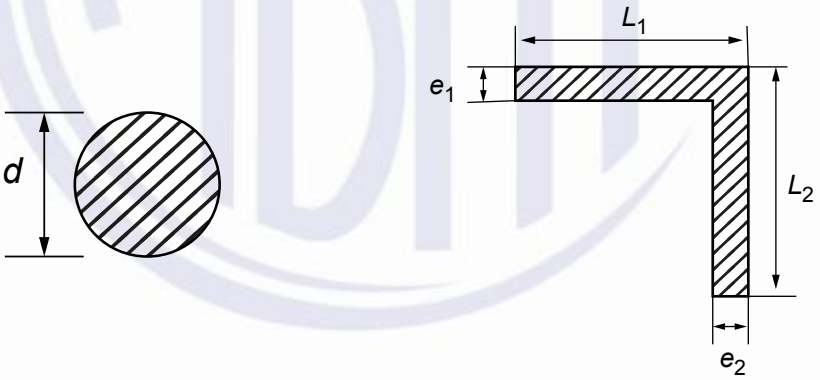
onde

$R1h$ é a resistência de uma haste, expressa em ohms (Ω);

ρ_a é a resistividade aparente do solo, em ohms-metro (Ω.m), calculada conforme A.1.4;

L é o comprimento de haste, expresso em metros (m);

d é o diâmetro equivalente da haste, expresso em metros (m).



a) Haste de seção circular **b) Haste tipo cantoneira**

Figura A.5 – Seções de hastes

Para hastes de seção transversal circular (S):

$$d = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} \quad \text{(A.9)}$$

Para hastes cantoneiras, d é o diâmetro do círculo equivalente à área transversal da haste (S), sendo S dado por:

$$S = L_1 \times e_1 + L_2 \times e_2 - e_1 \times e_2 \quad \text{(A.10)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.2.1.2 Condutor horizontal

Em solos em que a resistividade aumenta com a profundidade, ou em que dificuldades mecânicas para cravação de hastes são verificadas, a utilização exclusiva de condutor horizontal é uma opção razoável. Sua resistência de aterramento é determinada por meio da Equação A.11:

$$R_{cond} = \frac{\rho_a}{\pi \times L} \times ln\left(\frac{L}{1{,}92 \times \sqrt{r \times p}}\right) \quad \text{(A.11)}$$

onde

R_{cond} é resistência de aterramento do condutor horizontal, expressa em ohms (Ω);

ρ_a *é a* resistividade aparente do solo, em ohm-metro (Ω.m), calculada conforme A.1.4;

L é o comprimento do condutor horizontalmente enterrado, expresso em metros (m);

r é o raio do condutor, expresso em metros (m);

p *é* a profundidade do condutor em relação a superfície, expressa em metros (m).

A.2.1.3 Anel

Sua resistência de aterramento é determinada por meio da equação:

$$R_{anel} = 0{,}366 \times \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times r} \times \left[\log\left(\frac{16 \times r}{d}\right) + \log\left(\frac{4 \times r}{p}\right)\right] \quad \text{(A.12)}$$

a Equação A.12a também pode ser utilizada:

$$R_{anel} = \frac{\rho_a}{4 \times \pi^2 \times r} \times ln\left(\frac{32 \times r^2}{p(d/2)}\right) \quad \text{(A.12a)}$$

onde

ρ_a é a resistividade aparente do solo, expressa em ohms-metro (Ω.m), calculada conforme A.1.4;

R *é* o raio do anel, expresso em metros (m);

d *é* o diâmetro do condutor, expresso em metros (m);

p é a profundidade do anel no solo em relação à superfície, expressa em metros (m).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.2.2 Resistência de aterramento de hastes interligadas em paralelo

A interligação de hastes em paralelo tem como consequência uma superposição das áreas de influência das hastes consideradas individualmente, implicando na alteração do valor do conjunto. Para reduzir os efeitos dessa superposição, a distância entre hastes deve ser no mínimo igual ao comprimento da maior das hastes. A resistência (R_h) de aterramento de cada haste do conjunto, em ohms, é calculada pelas equações:

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1}^{n} R_{hm} \quad \text{(A.13)}$$

onde

n é o número de hastes em paralelo;

R_{hh} é a resistência individual de cada haste de aterramento, expressa em ohms (Ω), dada por A.8

$$R_{hh} = \frac{\rho_a}{2\pi L} ln \frac{4L}{d} \quad \text{(A.14)}$$

onde

L é o comprimento da haste h, expresso em metros (m);

ρ_a é a resistividade aparente correspondente à configuração do aterramento utilizado, calculada conforme A.1.4, expressa em ohms-metro (Ω.m);

R_{hh} é o acréscimo da resistência da haste h por influência da haste m, expresso em ohms (Ω).

$$R_{hm} = 0{,}183 \times \frac{\rho_a}{L_m} \times \log\left(\frac{b + L_m}{b - L_m}\right) \quad \text{(A.15)}$$

onde

L_m é o comprimento da haste m, expresso em metros (m);

e_{hm} é a distância horizontal entre haste h e haste m, expressa em metros (m).

$$b = \sqrt{\left(L_m^2 + e_{hm}^2\right)} \quad \text{(A.16)}$$

NOTA R_{hm} só é definido para h ≠ m.

EXEMPLO Para um conjunto de n hastes em paralelo, a resistência de cada haste do conjunto é dada por:

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

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

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

$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + ... + R_{nn}$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Para o cálculo da resistência de aterramento do conjunto de *n* hastes em paralelo *Rp(n)*, não é considerado o efeito do cabo de interligação dessas hastes, uma vez que, em termos de segurança, a exclusão desse efeito conduz a valores mais conservativos. Desta forma, a resistência (Ω) do conjunto é determinada pela Equação A.17:

$$R_{p(n)} = \frac{1}{\sum_{h=1}^{n}\left(\frac{1}{R_h}\right)} \quad \text{(A.17)}$$

O acréscimo ilimitado do número de hastes em paralelo, em um conjunto, não é viável, face às limitações impostas pela saturação do solo à redução do valor da resistência equivalente.

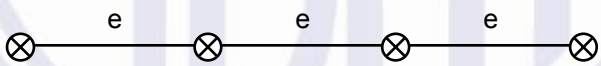
O índice de aproveitamento obtido com a cravação de hastes adicionais é facilmente verificado, na prática, pela análise dos coeficientes de redução (*K*), definidos como a relação entre o valor de resistência de aterramento do conjunto e o valor da resistência individual de cada uma das hastes componentes:

$$K = \frac{R_{p(n)}}{R_{hh}} \quad \text{(A.18)}$$

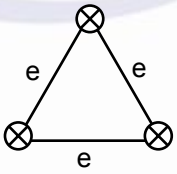
As configurações usualmente utilizadas com hastes em paralelo são mostradas na Figura A.6.

A metodologia de cálculo apresentada para determinação da resistência de aterramento de um conjunto de hastes interligadas em paralelo é válida para quaisquer dos arranjos da Figura A.6.

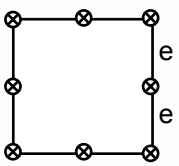
Sua aplicação a cada um deles prova ser a configuração com hastes alinhadas a mais favorável, em termos de resistência equivalente do conjunto.



a) Hastes alinhadas



b) Hastes em triângulo



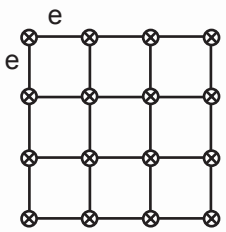
c) Hastes em quadro vazio

Figura A.6 (continua)

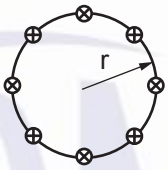
© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]



d) Hastes em quadro cheio



e) Hastes em círculo

Figura A.6 – Configurações usuais com hastes em paralelo

A.2.2.1 Hastes alinhadas

A disposição dos eletrodos deve ser tal que seu alinhamento fique paralelo à via pública, quando for o caso (ver Figura A.7).

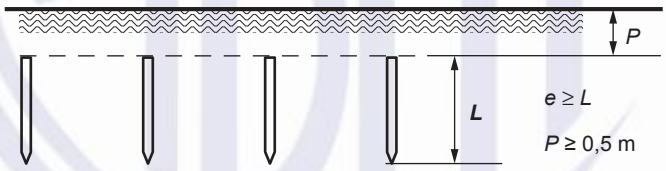


Figura A.7 – Hastes alinhadas

As hastes são cravadas mantendo um espaçamento mínimo entre si igual ao seu comprimento, e a profundidade de suas cabeças de pelo menos 0,50 m. Os condutores de interligação são instalados nesta mesma profundidade mínima. O condutor de aterramento deve ser conectado, preferencialmente, a uma das hastes centrais.

A distância mínima a ser mantida entre o poste e a haste mais próxima é de 1 m.

O Anexo B apresenta, além de um exemplo de cálculo da resistência de um aterramento com hastes alinhadas, a tabulação das resistências de aterramento e respectivos coeficientes de redução correspondentes às hastes mais comumente utilizadas.

A.2.2.2 Paralelismo de hastes

O número máximo de hastes a serem interligadas em paralelo, na configuração alinhada, é igual a seis. A colocação adicional de hastes a partir deste limite contribui pouco para a redução da resistência de aterramento devido à saturação do solo, tornando-se antieconômico (ver coeficientes de redução *K* das Tabelas B.1 a B.6.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

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

A.2.2.3 Determinação do número de hastes e espaçamento entre estas a partir de um valor de resistência de aterramento (R_{AT})

a) considerar inicialmente $\rho_a = \rho_{eq}$;

b) dividir R_{AT} por ρ_{eq};

c) comparar o resultado dessa divisão, com os coeficientes da coluna R (Ω) das Tabelas B.1 a B.6 correspondente à haste a ser utilizada. Para coeficiente igual ou menor que o resultado da divisão, verificar o número de hastes e espaçamento entre estas;

d) definida a configuração, o valor de R_{AT} deve ser iterativamente recalculado para o valor da resistividade aparente correspondente ao arranjo, determinada conforme B.1.3.

A.2.3 Solos de alta resistividade e/ou limitação de área

Para solos de alta resistividade, em que o aterramento por meio do paralelismo de hastes alinhadas torna-se antieconômico ou mesmo inviável, são disponíveis as seguintes alternativas para redução da resistência dos aterramentos.

A.2.3.1 Tratamento do solo

A.2.3.1.1 A resistividade decresce com o aumento da presença de sais no solo. Portanto, o tratamento de um solo de alta resistividade, por meio da adição de sais minerais à sua composição química, naturalmente resulta na obtenção de resistências de aterramento também menores. São propriedades essenciais a um tratamento químico adequado:

a) estabilidade química;

b) insolubilidade em presença d'água;

c) higroscopia;

d) não ser corrosivo;

e) ter efeito de longa duração;

f) não conter substâncias tóxicas.

A.2.3.1.2 Quando se aplica este tipo de tratamento, observam-se alterações das características do solo ao redor dos eletrodos, resultando em redução do valor da resistividade traduzido por um "coeficiente de redução de tratamento" (K_T). Este coeficiente é tanto menor quanto maior for a resistividade do solo, conforme diversas experiências já realizadas, e é determinado na prática por meio da relação entre a resistência do eletrodo tratado e a resistência do eletrodo sem o tratamento. Como exemplo, a resistência de uma haste tratada, R_{1hT}, é dada por:

$$R_{1hT} = \frac{K_T \times \rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right) \quad \text{(A.19)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

ρ_a é a resistividade aparente calculada conforme A.1.4, expressa em ohms-metro (Ω.m);

L é o comprimento da haste, expresso em metros (m);

d é o diâmetro do eletrodo, expresso em metros (m);

K_T é a relação entre a resistência após o tratamento/resistência antes do tratamento.

Os coeficientes de redução (K_T) obtidos na prática variam de 0,05 a 0,50.

A.2.3.2 Eletrodos verticais profundos

A.2.3.2.1 São adequados para atingir as camadas mais profundas do solo, que normalmente são mais úmidas e, portanto, apresentam menor resistividade, resultando em menor valor para a resistência do aterramento. Além disso, estas camadas são menos sujeitas às variações de umidade e temperatura, o que proporciona um aterramento de resistência praticamente constante ao longo do tempo.

A.2.3.2.2 Quando são utilizados eletrodos verticais profundos, a dispersão de correntes para o solo acontece, em sua maioria, na parte inferior do eletrodo, ou seja, na camada de solo de menor resistividade (ρ_2).

Nestes casos, desde que ρ_2 seja um valor substancialmente inferior às resistividades das demais camadas e que L_2 corresponda a pelo menos 20 % do comprimento total do Eletrodo sua parte superior, situada nas camadas de resistividade maior, funciona quase que somente como um condutor para a dispersão das correntes na parte inferior do eletrodo.

Para solos estratificáveis em múltiplas camadas, a camada ρ_1 da Figura A.8 representa a resistividade das camadas superiores obtida pelo processo de redução da ABNT NBR 7117.

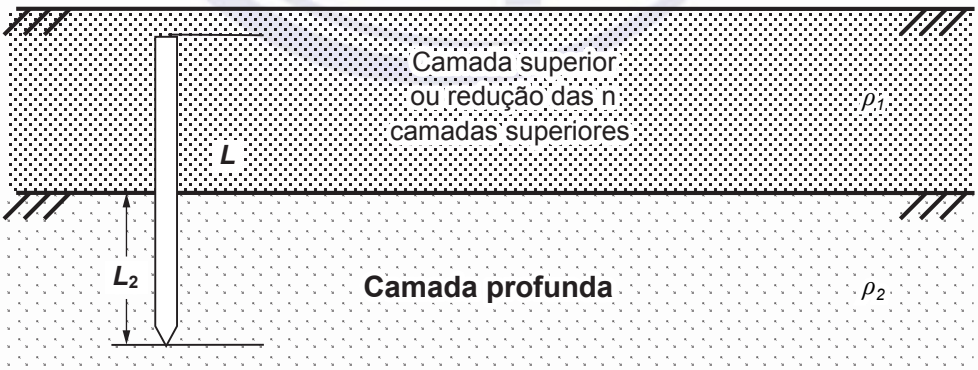


Figura A.8 – Solo estratificado em duas camadas (ou reduzido a duas camadas)

A resistência de um eletrodo vertical profundo, neste tipo de solo é dada por:

$$R_{1h} = \frac{\rho 2}{2 \times \pi \times L_2} \times ln\left(\frac{4 \times L_2}{d}\right) \quad \text{(A.20)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.2.3.2.3 Muitas vezes, o solo se apresenta com resistividades altíssimas, tanto na camada superficial quanto nas camadas mais profundas. Para estes casos, são disponíveis soluções mistas de aterramento, como a seguir:

Paralelismo de eletrodos verticais profundos: de forma a reduzir os efeitos da superposição das respectivas zonas de influência, eletrodos verticais profundos em paralelo não podem ser instaladas a distâncias menores que o maior dos valores de *L* considerados em seus projetos individuais. Para cálculo do valor da resistência de aterramento do conjunto, adotar a metodologia descrita em A.2.2.

A.3 Potenciais no solo e configurações dos eletrodos de aterramento

A.3.1 Condições de segurança

Para fins de avaliação das condições de segurança do sistema de aterramento, são apresentadas, a seguir, as rotinas de cálculo adequadas à determinação das elevações de potencial resultantes da circulação de correntes (curta duração, longa duração e surtos) em função das configurações mais usuais para aterramentos de sistemas de distribuição.

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

A.3.1.1 Haste com cabeça na superfície

A elevação de potencial no solo a qualquer distância (*X*) da haste, desde que $X \neq 0$, é dada pela Equação A.21:

$$V_x = \frac{\rho_a \times I}{2 \times \pi \times L} ln\left(\frac{L + \sqrt{L^2 + X^2}}{X}\right) \quad \text{(A.21)}$$

Sendo

V_x é a elevação de potencial a uma distância *X* da haste, expressa em volts (V);

ρ_a é a resistividade aparente calculada conforme A.1.4, expressa em ohms-metro (Ω.m);

I é a corrente que escoa pela haste, expressa em ampères (A);

L é o comprimento da haste, expresso em metros (m);

X é a distância da haste ao ponto considerado, expressa em metros (m).

A.3.1.2 Haste 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 pela Equação A.22 :

$$V_x = \frac{\rho_a \times I}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{P + L + \sqrt{(P+L)^2 + X^2}}{P + \sqrt{P^2 + X^2}}\right) \quad \text{(A.22)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

V_x é a elevação de potencial a uma distância X da haste, expressa em volts (V);

ρ_a é a resistividade aparente calculada conforme A.1.4, expressa em ohms-metro (Ω.m);

I é a corrente que escoa pela haste, expressa em ampères (A);

P é a profundidade da haste em relação à superfície do solo, expressa em metros (m);

L é o comprimento da haste, expresso em metros (m);

X é a distância do ponto de cravação da haste ao ponto considerado, expressa em metros (m).

A.3.2 Aterramento com condutor horizontal

A elevação de potencial em um ponto V do solo localizado conforme a Figura A.9, em relação a um condutor de aterramento horizontal, enterrado a uma profundidade P do solo, é dada pela Equação A.23:

$$V = \frac{\rho_a \times I}{2 \times \pi \times L} \times ln\left[\frac{(|X| + L/2) + \sqrt{(|X| + L/2)^2 + P^2 + |Y|^2}}{(|X| - L/2) + \sqrt{(|X| - L/2)^2 + P^2 + |Y|^2}}\right] \quad (23)$$

onde

V é a elevação de potencial no ponto V, devida ao escoamento de corrente para a terra por meio de um condutor horizontalmente enterrado a uma profundidade P do solo, expressa em volts (V);

ρ_a é a resistividade aparente calculada conforme A.1.4, expressa em ohms-metro (Ω.m);

I é a corrente que escoa pelo condutor horizontal, expressa em ampères (A);

L é o comprimento do condutor horizontal, expresso em metros (m);

X é a distância do ponto V ao centro do condutor horizontal na direção da abscissa, expressa em metros (m);

Y é a distância do ponto V ao centro do condutor horizontal na direção da ordenada, expressa em metros (m);

P é a profundidade do condutor horizontal em relação à superfície do solo, expressa em metros (m).

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

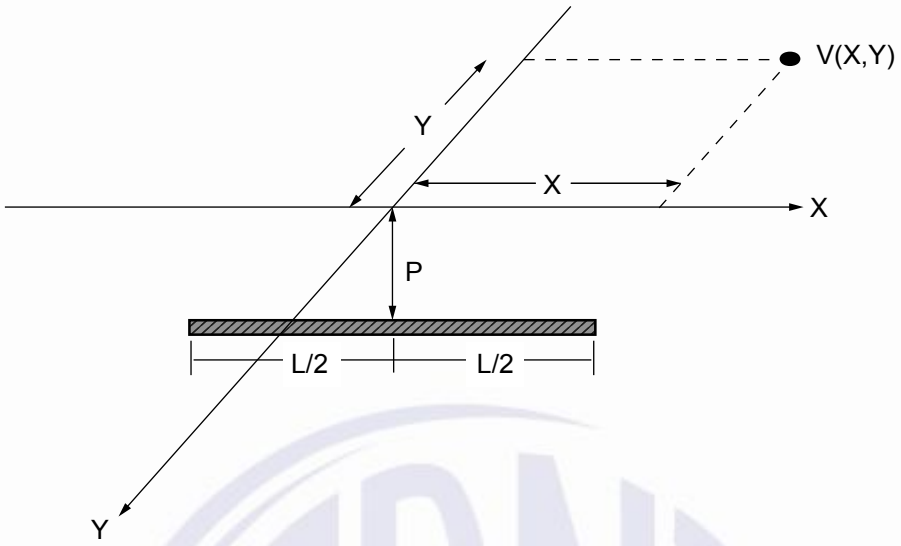


Figura A.9 – Localização de um ponto *V* em relação a um condutor horizontalmente enterrado

A.3.3 Aterramento com hastes alinhadas

A.3.3.1 Por ocasião do escoamento de uma corrente para a terra por um sistema de aterramento com hastes alinhadas, para determinação da elevação de potencial em um ponto qualquer na superfície do solo, devem ser cumulativamente considerados tanto os efeitos da dispersão por meio de cada haste componente do conjunto como aquele resultante da dissipação de corrente pelo condutor de interligação.

A.3.3.2 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 (ver Figura A.10), conforme demonstra o Anexo C. Definido o valor da função $f_{(n)}$, as correntes dissipadas pelas hastes e pelo condutor de interligação podem ser determinadas pelas Equações A.24 e A.25.

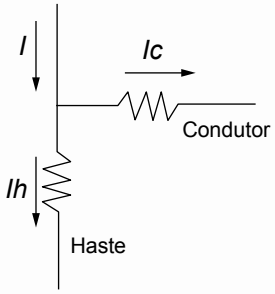


Figura A.10 – Distribuição de corrente entre condutor e hastes em aterramentos com hastes alinhadas

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$$I_c = I\frac{f_{(n)}}{1+f_{(n)}} \quad \text{(A.24)}$$

$$I_h = I\frac{1}{1+f_{(n)}} \quad \text{(A.25)}$$

onde

I_c é a corrente dissipada pelo condutor de interligação, expressa em ampères (A);

I_h é a corrente dissipada pelas hastes, expressa em ampères (A);

$f_{(n)}$ é a relação entre os comprimentos de condutor e as hastes envolvidas;

I é a corrente dissipada pelo aterramento, expressa em ampères (A).

Neste Anexo, encontra-se uma rotina de cálculo para obtenção das distribuições de correntes.

A.3.3.3 O valor da elevação de potencial em um ponto *V* do solo, devido à dispersão pelo conjunto de hastes, é dado pela Equação A.26:

$$V_h = \frac{\rho_h}{2\times\pi}\times\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{I_{hi}}{L_i}\right)\times ln\left[\frac{\sqrt{P^2+X_i{}^2}-P}{\sqrt{(L_i+P)^2+X_i{}^2}-(L_i+P)}\right] \quad \text{(A.26)}$$

onde

V_h é a elevação de potencial no ponto *V* devido ao escoamento de corrente à terra por meio do conjunto de hastes envolvidas, expressa em metros (m);

ρ_h é a resistividade aparente correspondente à configuração do aterramento, expressa em ohms-metros (Ω.m);

P é a profundidade da cabeça das hastes;

X_i é a distância do ponto *V* a cada uma das hastes h_i envolvidas, expressa em metros (m);

L_i é o comprimento de cada uma das hastes h_i envolvidas, expresso em metros (m);

n é o número de hastes h_i que compõem o aterramento;

I_{hi} é a fração de corrente em cada uma das hastes individuais, calculada conforme este Anexo.

A.3.3.4 Para a determinação da elevação de potencial devido ao escoamento de corrente pelo condutor horizontal, deve ser utilizada a Equação A.23, considerando-se: $\rho = \rho_c$ *e* $I = I_c$. A elevação de potencial total no ponto *V* é dada pela soma deste resultado ao valor obtido pela Equação A.26.

NOTA ρ_c é a resistividade aparente correspondente a um aterramento composto apenas pelo condutor de interligação envolvido, expressa em ohms-metro (Ω.m);

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

A.3.4 Aterramento em anel

A elevação de potencial em um ponto *P* qualquer do solo de coordenadas (*x*, *y*, *z*) conforme a Figura A.11, resultante da circulação de uma corrente *I* por um anel horizontalmente enterrado no solo, pode ser calculada, para um solo homogêneo, por meio da Equação A.27, em que o par de coordenadas *x*, *y* é substituído pela definição de um novo eixo *x*, também apresentado na Figura A.11:

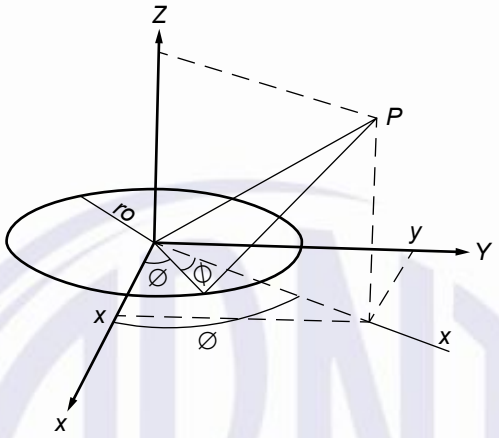


Figura A.11 – Coordenadas para aterramento em anel

$$V(x,z) = \frac{\rho_a \times I}{2 \times \pi^2} \times \frac{1}{\sqrt{(X + r_a)^2 + Z^2}} \times F_{(c)} \quad \text{(A.27)}$$

onde

ρ_a é a resistividade aparente calculada conforme A.1.4, expressa em ohms-metro (Ω.m);

I é a corrente circulante pelo anel, expressa em ampères (A);

x, z são coordenadas do ponto *P*, expressas em metros (m);

r_a é o raio do anel, expresso em metros (m).

$$F_{(c)} = \int_0^{\pi/2} \frac{dw}{\sqrt{1 - C^2 \times \text{sen}^2(w)}} \quad \text{(A.28)}$$

onde

$$w = \frac{\varphi - \pi}{2} \quad \text{(A.29)}$$

$$C = \sqrt{\frac{4 \times r_a [r_a - (d_F / 2)]}{[2 \times r_a - (d_F / 2)]^2}} \quad \text{(A.30)}$$

onde

d_F é o diâmetro do condutor, expresso em metros (m).

NOTA Por $F_{(C)}$ ser uma integral elíptica, portanto, sem solução analítica, sua determinação só se torna viável por processo numérico.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Na Tabela A.1, é apresentado um resumo dos potenciais na superfície do solo para algumas configurações de anel consideradas típicas.

Tabela A.1 – Potenciais na superfície do solo em relação ao potencial do anel (%)

r_a m	Profundidade do anel	Distância *X* do ponto considerado (na superfície do solo) em relação ao centro do anel M							
	(Z)	0	1 r_a	2 r_a	3 r_a	4 r_a	5 r_a	7,5 r_a	10 r_a
1	0,1 r_a	55,0	77,6	29,8	19,1	14,2	11,3	7,0	5,6
	0,5 r_a	58,4	57,2	33,5	22,1	16,7	13,2	8,2	6,6
	0,75 r_a	54,7	50,9	33,2	22,7	17,5	13,9	8,6	6,9
	1 r_a	50,2	45,3	32,0	22,7	17,3	14,0	8,8	7,1
2	0,1 r_a	53,0	74,5	28,9	18,1	13,4	10,7	7,4	5,4
	0,5 r_a	54,2	53,4	31,3	20,6	15,3	12,2	8,4	6,1
	0,75 r_a	51,2	47,2	31,2	20,8	16,0	12,8	8,8	6,4
	1 r_a	46,2	42,1	29,8	21,5	16,5	13,2	9,1	6,6
3	0,1 r_a	51,0	71,1	27,9	17,3	13,5	10,6	7,2	5,2
	0,5 r_a	52,7	51,6	29,7	19,8	15,4	12,1	8,2	5,9
	0,75 r_a	50,0	47,7	29,5	20,5	15,9	12,5	8,5	6,1
5	0,1 r_a	48,4	68,2	25,8	16,7	12,4	9,8	6,7	4,8
	0,2 r_a	50,8	60,7	27,9	18,0	13,4	10,7	7,2	5,2
	0,5 r_a	51,7	51,7	29,3	19,0	14,1	12,1	7,6	5,5
7,5	0,1 r_a	46,7	62,2	25,6	16,4	12,2	9,6	6,0	4,9
	0,2 r_a	50,0	66,7	27,4	17,6	13,1	1,2	6,4	5,2
10	0,1 r_a	47,1	64,7	25,3	16,2	12,1	9,7	6,5	4,7
	0,2 r_a	46,9	59,4	26,9	17,2	12,8	10,3	6,9	5,0

A.4 Impedância de surto dos aterramentos

A descarga de correntes de surto normalmente causa tensões elevadas nos eletrodos de aterramento, resultando em elevados valores de gradientes de potencial no solo (*E*), podendo implicar em disrupção, caso excedido seu gradiente crítico (E_o).

Este fenômeno é conhecido por "ionização do solo" e leva a um comportamento não linear da impedância de aterramento por ocasião da descarga da corrente de surto para o solo, dependendo de parâmetros como: tempo de frente e corrente máxima (ou de pico) do surto, resistividade do solo, ponto de injeção (extremidade ou centro, em eletrodos horizontais).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

O fenômeno da ionização do solo leva a dois efeitos importantes:

a) provoca um aumento do diâmetro em eletrodos curtos (hastes de até 20 m), fazendo com que sua impedância de surto fique menor que sua resistência normal (para baixas frequências). (ver Figuras A.12 a) e A.12 b));

b) causa a diminuição do comprimento efetivo do eletrodo em comprimentos longos (horizontais), como os empregados em contrapesos de torres de LT (ver Figura A.12 c)).

a) Eletrodo muito curto **b) Eletrodo curto** **c) Eletrodo longo**

Figura A.12 – Efeito da ionização do solo no comprimento do eletrodo

A.4.1 Conceito de comprimento efetivo e impedância de surto Z_0

A resistência de aterramento vista por um surto atmosférico costuma ser denominada de resistência de aterramento impulsiva, resistência dinâmica ou impedância de surto. O termo “impedância” preserva a ideia do fenômeno possuir aspectos indutivos e capacitivos.

O comprimento efetivo de um eletrodo de aterramento é definido como o comprimento a partir do qual a impedância de surto não decresce significativamente. Pode-se achar L_e no ponto em que a tangente da curva $Z_0 \times L$ faz um ângulo de 5° com o eixo horizontal. Ver Figura A.13.

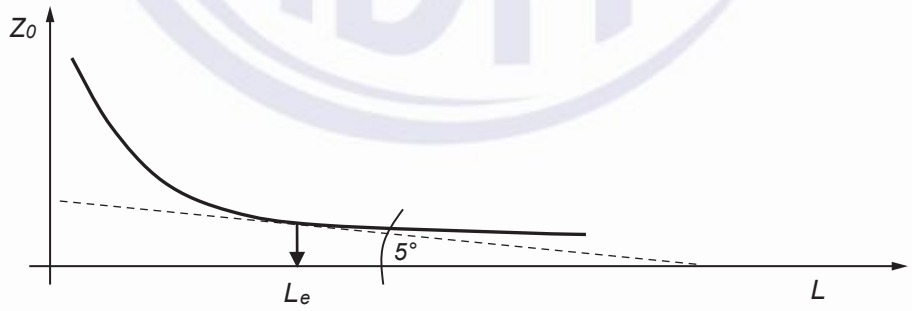


Figura A.13 – Variação de Z_0 com o comprimento do eletrodo e definição do comprimento efetivo

A.4.2 Cálculo do diâmetro, comprimento efetivo e da impedância de surto de eletrodos

O procedimento de cálculo para o diâmetro, comprimento efetivo e impedância de surto de hastes verticais e de eletrodos horizontais é apresentado no Anexo I. As formulações consideram o comportamento não linear de vários fatores, como a resistividade, o tempo de crescimento da corrente de surto e seu valor máximo.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

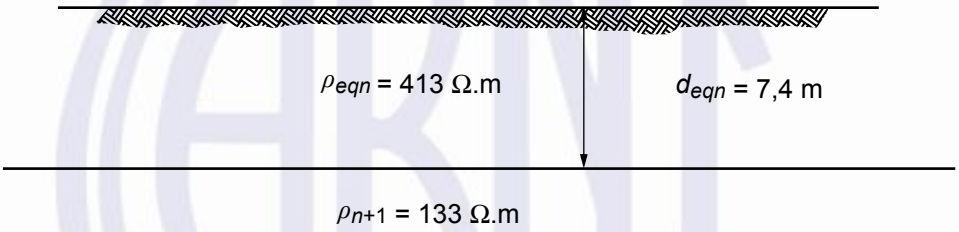
Anexo B
(informativo)

Aplicação de cálculo da resistência de aterramentos com hastes alinhadas conforme Figuras B1 e B2

B.1 Exemplo de cálculo da resistência de um aterramento com quatro hastes alinhadas

B.1.1 Parâmetros do solo

Conforme Figura B.1.



Legenda

ρ_{eqn} resistividade equivalente das *n* camadas do solo, expressa em ohms-metro (Ω.m)

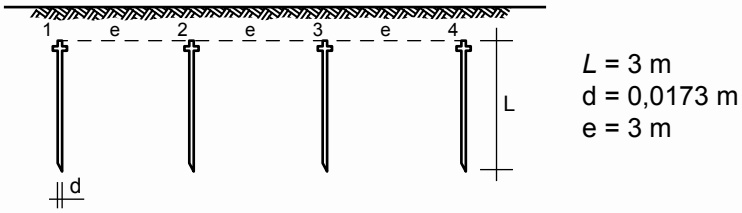
d_{eqn} profundidade da camada equivalente obtida na redução de *n* camadas, expressa em metros (m)

ρ_{n+1} resistividade da camada mais profunda, expressa em ohms-metro (Ω.m)

Figura B.1 – Dados do solo

B.1.2 Configuração do aterramento

Conforme Figura B.2.



Legenda

L comprimento da haste, expresso em metros (m)

d diâmetro da haste, expresso em metros (m)

e distância entre as hastes, expressa em metros (m)

Figura B.2 – Configuração do aterramento

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

B.1.3 Determinação da resistividade aparente do solo

Conforme as equações a seguir

$$r = \frac{(n-1)\times e}{2} = \frac{(4-1)\times 3}{2} = 4{,}5\ \text{m}$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eqn}} = \frac{4{,}5}{7{,}4} = 0{,}608$$

$$\beta = \frac{\rho(n+1)}{\rho_{eqn}} = \frac{133}{413} = 0{,}322$$

Da Figura A.4 → N = 0,9

Logo, $\rho_a = N\ \rho_{eqn} = 0{,}9413 = 372\ \Omega.\text{m}$.

B.1.4 Determinação da resistência de aterramento de cada haste

Conforme a Equação A.13:

$$R_h = R_{hh} + \sum_{m=1}^{n} R_{hm} \qquad \text{(para m diferente de h)}$$

$$R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14}$$

$$R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24}$$

$$R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34}$$

$$R_4 = R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44}$$

$$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = \frac{\rho_a}{2\times\pi\times L} \times ln\left(\frac{4\times L}{d}\right) = 0{,}34\rho_a$$

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = 0{,}183 \times \frac{\rho_a}{L} \times \log\left(\frac{b+L}{b-L}\right)$$

$L = 3$ m

$e_{12} = e_{23} = e_{34} = 3$ m

$$b = \sqrt{L^2 + e^2} = \sqrt{3^2 + 3^2} = 4{,}24\ \text{m}$$

$$R_{12} = 0{,}183 \times \frac{\rho_a}{3} \times \log\left(\frac{4{,}24+3}{4{,}24-3}\right) = 0{,}047 \times \rho_a$$

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = 0{,}047 \times \rho_a$$

$$R_{13} = R_{31} = R_{24} = R_{42} = 0{,}183 \times \frac{\rho_a}{3} \times \log\left(\frac{b+3}{b-3}\right)$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$e_{13} = e_{24} = 6$ m

$$b = \sqrt{L^2 + e^2} = \sqrt{3^2 + 6^2} = 6,7$$

$R_{13} = R_{31} = R_{24} = R_{42} = 0,0253 \cdot \rho_a$

$$R_{14} = R_{41} = 0,183 \frac{\rho_a}{3} \log \frac{b+3}{b-3}$$

$e_{14} = 9$ m

$$b = \sqrt{L^2 + e^2} = \sqrt{3^2 + 9^2} = 9,49$$

$R_{14} = R_{41} = 0,0174 \cdot \rho_a$

$R_1 = 0,34\ \rho_a + 0,047\ \rho_a + 0,0253\ \rho_a + 0,0174\ \rho_a = 0,4297\ \rho_a$

$R_1 = 0,4297 \times 372 = 160\ \Omega$

$R_2 = 0,047\ \rho_a + 0,34\ \rho_a + 0,047\ \rho_a + 0,0253\ \rho_a = 0,4593\ \rho_a$

$R_2 = 0,4593 \times 372 = 171\ \Omega$

$R_3 = R_2 = 171\ \Omega$

$R_4 = R_1 = 160\ \Omega$

B.1.5 Cálculo da resistência de aterramento das quatro hastes em paralelo

Conforme a Equação A.17:

$$R_p(n) = \frac{1}{\sum_{h=1}^{n} \frac{1}{R_h}}$$

$$R_p(4) = \frac{1}{\left(\frac{1}{160} + \frac{1}{160} + \frac{1}{171} + \frac{1}{171}\right)} = 41,3\ \Omega$$

B.1.6 Cálculo do coeficiente de redução *K*

Conforme a Equação A.18:

$$K = \frac{R_p(n)}{R_{hh}} = \frac{R_p(4)}{R_{hh}} = \frac{41,3}{0,34 \times 372} = 0,326$$

B.1.7 Tabulação de parâmetros usuais

B.1.7.1 Para o cálculo da resistência de aterramentos com hastes alinhadas, ver as Tabelas B.1 a B.6 relativas aos arranjos mais comumente utilizados, contendo as diversas constantes para multiplicação pelas resistividades aparentes correspondentes e respectivos coeficientes de redução referentes à resistência de uma única haste.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

B.1.7.2 Para o projeto de aterramentos com valores de resistência prefixados, sugere-se que, para otimização do manuseio dessas Tabelas, seja a configuração inicial do aterramento definida com base na suposição de que $\rho_a = \rho_{eqn}$. Definida esta configuração inicial, recomenda-se que o valor da resistência seja iterativamente recalculado para o valor da resistividade aparente correspondente ao arranjo.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Tabela B.1 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (K) para hastes alinhadas de 2,4 m por 0,0128 m (para uma haste: $R = 0{,}44\ \rho_a$)

Distância entre hastes m		Número de haste											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3	***R*(Ω)**	0,24ρ_a	0,17 ρ_a	0,14 ρ_a	0,11 ρ_a	0,09 ρ_a	0,09 ρ_a	0,08 ρ_a	0,07 ρ_a	0,06 ρ_a	0,06 ρ_a	0,05 ρ_a	0,05 ρ_a
	K	0,55	0,40	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11
4	***R*(Ω)**	0,24 ρ_a	0,17 ρ_a	0,13 ρ_a	0,11 ρ_a	0,09 ρ_a	0,08 ρ_a	0,07 ρ_a	0,06 ρ_a	0,06 ρ_a	0,05 ρ_a	0,05 ρ_a	0,04 ρ_a
	K	0,54	0,38	0,30	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
5	***R*(Ω)**	0,23 ρ_a	0,16 ρ_a	0,12 ρ_a	0,10 ρ_a	0,08 ρ_a	0,07 ρ_a	0,06 ρ_a	0,06 ρ_a	0,05 ρ_a	0,05 ρ_a	0,04 ρ_a	0,04 ρ_a
	K	0,53	0,37	0,29	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela B.2 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 2,4 m por 0,0143 m (para uma haste: $R = 0{,}42\ \rho_a$)

Distância entre hastes m		Número de hastes													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	***R*(Ω)**	0,24ρa	0,17ρa	0,13ρa	0,11ρa	0,09ρa	0,08ρa	0,08ρa	0,07ρa	0,06ρa	0,06ρa	0,05ρa	0,05ρa	0,05ρa	0,04ρa
	K	0,56	0,40	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10
4	***R*(Ω)**	0,23ρa	0,16ρa	0,13ρa	0,11ρa	0,09ρa	0,08ρa	0,07ρa	0,06ρa	0,06ρa	0,05ρa	0,05ρa	0,04ρa	0,04ρa	0,04ρa
	K	0,54	0,38	0,30	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09
5	***R*(Ω)**	0,23ρa	0,16ρa	0,12ρa	0,10ρa	0,08ρa	0,07ρa	0,06ρa	0,06ρa	0,05ρa	0,05ρa	0,04ρa	0,04ρa	0,04ρa	0,03ρa
	K	0,53	0,37	0,29	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Tabela B.3 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 2,4 m por 0,0173 m (para uma haste: $R = 0{,}41\ \rho_a$)

Distância entre hastes m		Número de hastes													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	***R*(Ω)**	0,23	0,16ρ_a	0,13ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,56	0,40	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10
4	***R*(Ω)**	0,23ρ_a	0,16ρ_a	0,12ρ_a	0,10ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,54	0,38	0,30	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09
5	***R*(Ω)**	0,23ρ_a	0,15ρ_a	0,12ρ_a	0,10ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,53	0,37	0,29	0,23	0,20	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela B.4 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 3 m por 0,0128 m (para uma haste: $R = 0{,}36\ \rho_a$)

Distância entre hastes m		Número de hastes													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	***R*(Ω)**	0,20ρ_a	0,15ρ_a	0,12ρ_a	0,10ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,56	0,41	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11
4	***R*(Ω)**	0,20ρ_a	0,14ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,55	0,39	0,31	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10
5	***R*(Ω)**	0,20ρ_a	0,14ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,03ρ_a
	K	0,54	0,38	0,29	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Tabela B.5 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 3 m por 0,0143 m (para uma haste: $R = 0{,}35\ \rho_a$)

Distância entre hastes m		Número de hastes													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	***R*(Ω)**	0,20ρ_a	0,14ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,56	0,41	0,32	0,27	0,23	0,20	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11
4	***R*(Ω)**	0,19ρ_a	0,14ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,55	0,39	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10
5	***R*(Ω)**	0,19ρ_a	0,13ρ_a	0,10ρ_a	0,09ρ_a	0,07ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,03ρ_a	0,03ρ_a
	K	0,54	0,38	0,30	0,24	0,21	0,18	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela B.6 – Resistências de aterramento (*R*) e coeficientes de redução (*K*) para hastes alinhadas de 3 m por 0,0173 m (para uma haste: $R = 0{,}34\ \rho_a$)

Distância entre hastes m		Número de hastes													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
3	***R*(Ω)**	0,19ρ_a	0,14ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a
	K	0,57	0,41	0,33	0,27	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,12	0,11
4	***R*(Ω)**	0,19ρ_a	0,14ρ_a	0,11ρ_a	0,09ρ_a	0,08ρ_a	0,07ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,03ρ_a
	K	0,55	0,39	0,31	0,26	0,22	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10
5	***R*(Ω)**	0,19ρ_a	0,13ρ_a	0,10ρ_a	0,09ρ_a	0,07ρ_a	0,06ρ_a	0,06ρ_a	0,05ρ_a	0,05ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,04ρ_a	0,03ρ_a	0,03ρ_a
	K	0,54	0,38	0,30	0,25	0,21	0,18	0,16	0,15	0,14	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo C
(informativo)

Distribuição de corrente entre condutor e hastes em aterramentos com hastes alinhadas

Para definição das Equações A.24 e A.25, é necessário determinar a função $f_{(n)}$ dada por:

$$f_{(n)} = \frac{I_c}{I_h} \quad \text{(C.1)}$$

onde

I_c é a porcentagem da corrente total, dissipada pelo condutor de interligação;

I_h é a porcentagem da corrente total, dissipada pelas hastes;

$f(n)$ é a função da relação entre os comprimentos de condutor e de hastes envolvidas.

C.1 Cálculo de $f(n)$ a partir do comprimento de material condutor envolvido

Para hastes alinhadas espaçadas de comprimentos iguais aos das hastes, pode-se referenciar $f_{(n)}$ pela relação a Equação C.2:

$$f_{(n)} = 0,047 + 0,57 \times I \quad \text{(C.2)}$$

com coeficiente de correlação 0,999.

onde

$I = I_c / I_h$;

I_c é o comprimento do condutor;

I_h é o comprimento total das hastes.

C.2 Cálculo de $f(n)$ a partir do número de hastes

Caso se queira relacionar $f(n)$ com o número (N) de hastes envolvidas na associação e espaçadas de distâncias iguais aos seus comprimentos, obtém-se a lei de formação:

$$f_{(n)} = 0,606 - 0,525 \times N^{-1} \quad \text{(C.3)}$$

Com coeficiente de correlação 0,93.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

C.3 Cálculo de $f(n)$ para associação de uma única haste e condutor horizontal

De forma idêntica, para associação de uma haste (comprimento l_h) com condutor horizontal (comprimento l_c), obtém-se para $f(n)$ a lei de formação:

$$f_{(n)} = 0,23 + 0,73 \times l \quad \text{(C.4)}$$

Com coeficiente de correlação 1.

onde

$l = l_c / l_h$.

C.4 Cálculo de l_h e l_c

Conhecida $f(n)$, chega-se aos valores de l_h e l_c, a partir da corrente total (I) dissipada no aterramento, por:

$$I_h = I \frac{1}{1 + f_{(n)}} \quad \text{(C.5)}$$

$$I_c = I \frac{f_{(n)}}{1 + f_{(n)}} \quad \text{(C.6)}$$

C.5 Distribuição de corrente nas hastes

A Tabela C.1 mostra, para associações de até quinze hastes alinhadas, a frequência (aproximada) com que aparecem os coeficientes multiplicativos da parcela I_h/N, e que possibilitam o cálculo das correntes em cada haste (I_{hi}). Tais coeficientes devem ser aplicados aos pares (até o último restante), em ordem decrescente, da haste mais externa àquela mais interna, simetricamente à configuração.

NOTA Na formulação de C.1, adotou-se a modelagem de hastes alinhadas, de comprimentos iguais, espaçadas de distâncias iguais a seus comprimentos. A aplicação dos valores de $f_{(n)}$, para configurações em que se tenha hastes de comprimentos diferentes e espaçamentos também diferentes, é tão válida quanto mais próxima for sua relação l_c/l_h, obtida por meio de configurações com espaçamentos e comprimentos iguais.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Tabela C.1 – Distribuição de correntes nas hastes – Frequência de aparecimento de coeficientes multiplicativos de I_h/N

Coeficiente	Número de hastes													
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,9		1X	2X	1X	2X	3X	4X	5X	4X	5X	6X	7X	6X	7X
0,95				2X	2X	2X			2X	2X	2X		2X	2X
1,0	2X						2X	2X	2X	2X		2X	2X	2X
1,05		2X									2X	2X	2X	3X
1,1			2X	2X										
1,15					2X									
1,2						2X	2X							
1,25								2X	2X					
1,3										2X	2X	2X	2X	
1,35														2X

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

EXEMPLO 1

Para uma corrente de 100 A dissipada em um aterramento composto de cinco hastes alinhadas, tem-se:

Da Equação (C.1):

$$I = \frac{I_c}{I_h} = \frac{4}{5} = 0,8$$

ou da Equação (C.3), para $N = 5$, resulta $f_{(n)} = 0,501$.

Da Equação (C.5):

$$I_h = 100 \frac{1}{1 + 0,501} = 66,62 \text{ A}$$

Da Equação (C.6):

$$I_c = 100 \frac{0,501}{1 + 0,501} = 33,38 \text{ A}$$

Resta conhecer a divisão da corrente I_h, pelas hastes individuais. Pela Tabela C.1:

$$I_{h1} = 0,90 \ \frac{I_h}{N} = 0,90 \frac{66,62 \ \%}{5} = 12 \ \% \ I_{\text{total}}$$

$$I_{h1} = 12 \text{ A}$$

$$I_{h2} = I_{h3} = 0,95 \frac{I_h}{N} = 12,66 \ \% \ I_{\text{total}}$$

$$I_{h2} = I_{h3} = 12,66 \text{ A}$$

$$I_{h4} = I_{h5} = 1,10 \frac{I_h}{N} = 14,66 \ \% \ I_{\text{total}}$$

$$I_{h4} = I_{h5} = 14,66 \text{ A}$$

A Figura C.1 mostra a distribuição de correntes.

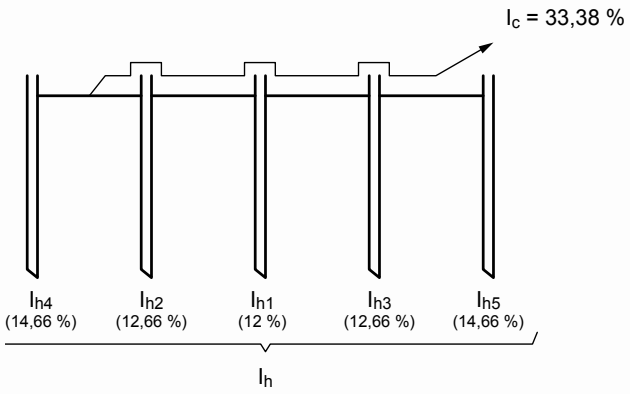


Figura C.1 – Distribuição de correntes em hastes alinhadas

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

EXEMPLO 2

Para uma corrente de 50 A dissipada em um aterramento composto de uma haste de 3 m e um condutor horizontal de 15 m, tem-se:

Da Equação (C.4):

$$I = \frac{l_c}{l_h} = \frac{15}{3} = 5$$

resulta $f(n) = 3,88$.

Da Equação (C.5):

$$I_h = 50\frac{1}{1+3,88} = 10\,\text{A}$$

Da Equação (C.6):

$$I_c = 50\frac{3,88}{1+3,88} = 40\,\text{A}$$

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo D
(informativo)

Metodologia para determinação do valor máximo da resistência de aterramento

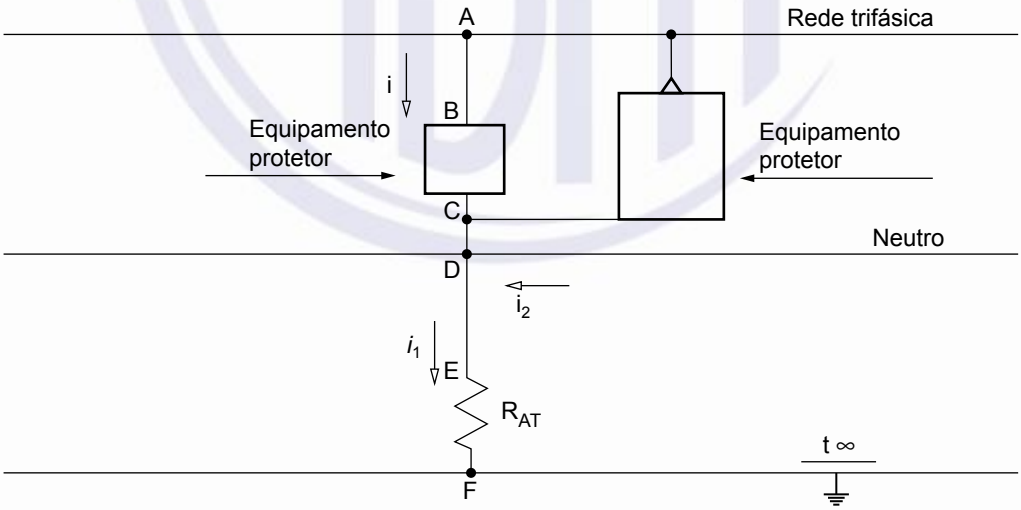
São apresentados, para cada tipo de sistema conforme classificação contida em 5.4, roteiros para cálculo das elevações de potencial resultantes das descargas de surtos que devem ser processados para diversos valores de resistência de aterramento (R_{AT}), de forma a permitir a definição do seu valor-limite.

O valor máximo de R_{AT} corresponde ao maior dos valores que vier a resultar em tensões no condutor neutro e nos condutores fase, inferiores a limites previamente estabelecidos, em função dos critérios adotados para proteção contra sobretensões.

Os parâmetros para definição destes limites são apresentados em D.1.

D.1 Sistemas trifásicos a quatro fios, multiaterrados

D.1.1 A Figura D.1 apresenta um esquema simplificado da ligação de um equipamento em um sistema trifásico a quatro fios, adotado como base para o desenvolvimento apresentado a seguir:



Legenda

i valor de crista da corrente de descarga, expresso em quiloampères (kA)

i_1 valor de crista da parcela de i que escoa pelo aterramento no ponto considerado, expresso em quiloampères (kA)

i_2 valor de crista da parcela de i que circula pelo condutor neutro do sistema, expresso em quiloampères (kA)

Figura D.1 – Ligação de um equipamento em um sistema trifásico a quatro fios

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

D.1.2 Considerando uma impedância ao surto para o condutor neutro, Z_{sn}:

$$I_1 = i \frac{Z_{sn} / 2}{R_{AT} + Z_{sn} / 2} \quad \text{(D.1)}$$

Para a condição-limite, tem-se:

a) tensão máxima no neutro (V_{DF}):

$$V_{DF} = V_{DE} + V_{EF} \quad \text{(D.2)}$$

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

$$V_{AF} = V_{AB} + V_{BC} + V_{CD} + V_{DE} + V_{EF} \quad \text{(D.3)}$$

onde

V_{BC} é a tensão residual do equipamento de proteção, expressa em quilovolts (kV);

$$V_{AB} + V_{CD} = L(AB + CD) \frac{di}{dt} \quad \text{(D.4)}$$

L é a indutância do condutor = 1,214 mH/km;

di/dt é a taxa de crescimento da onda de corrente no tempo zero;

$di/dt = 2{,}72 \cdot i/t$;

t é o tempo real de crista, expresso em microssegundos (μs), e igual a 125 % do tempo de crista da onda de surto considerada;

$$V_{DE} = L(DE) \frac{di}{dt} \quad \text{(D.5)}$$

$$V_{EF} = R_{AT} + i_1, \quad \text{(D.6)}$$

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 D.1.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela D.1 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados

Rede urbana – Sistema multiaterrado a quatro fios 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**			**Tensão residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**
pu	µs	pu	I kA	i_1 kA	Pu	kV	pu	(V_{AB}+V_{DC}) kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	(A)	0	(B)	(C)	0	(D)	1,00	(E)	(F)	(G)	(H)	(I)
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					
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					

Legenda

(A) Coluna a ser preenchida a partir do tempo real de crista da onda de corrente, em microssegundos (µs), que corresponde a 1,00 pu. Para a forma de onda padronizada (pulso de tensão de 1,2 × 50 µs), o tempo real de crista é: 125 % de 1,2 µs = 1,5 µs.

(B) Coluna a ser preenchida a partir do valor de pico da máxima corrente de descarga, em quiloampéres (kA), que corresponde a 1,00 pu.

(C) Coluna a ser preenchida a partir do valor máximo da tensão residual do equipamento de proteção contra sobretensão, equivalente à corrente de descarga de 5 kA, que corresponde a 1,00 pu.

(D) Valor máximo de V_{AB} + V_{CD}, em quilovolt (kV), que corresponde a 1,00 pu, obtido segundo a Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = i \times \frac{(L_{AB} + L_{CD})}{0,304\ 8 \times t} \qquad \text{(D.4)}$$

onde

L_{AB} é o comprimento de condutor no trecho AB, expresso em metro (m);

L_{CD} é o comprimento de condutor no trecho CD, expresso em metro (m).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela D.1 (contonuação)

(E) Valor máximo de V_{DE}, em quilovolts (kV), que corresponde a 1,00 pu, obtido pela Equação D.5: $$V_{DE} = i_1 \times \frac{L_{DE}}{0,304\ 8 \times t} \quad \text{(D.5)}$$ onde L_{DE} é o comprimento de condutor no trecho DE, expresso em metros (m). (F) Coluna a ser preenchida com o produto da multiplicação dos valores de corrente da coluna (B) pelo valor da resistência ôhmica do aterramento, R_{AT}. (G) Coluna a ser preenchida com o resultado da adição dos valores correspondentes às colunas (C) (D) (E) e (F). (H) Coluna a ser preenchida com o resultado da adição dos valores correspondentes às colunas (E) e (F), somente nos casos do emprego de *gap* entre as carcaças e neutro e secundários dos transformadores.
NOTA Os tempos correspondentes aos valores máximos das colunas (G) podem não coincidir nem com o tempo da máxima tensão residual do equipamento de proteção nem com o tempo da máxima queda de tensão no condutor de aterramento nem com o tempo da máxima queda de tensão na resistência de aterramento.

D.1.3 Após o preenchimento da Tabela D.1 para diversos valores de R_{AT}, o seu limite máximo corresponde ao maior dos valores que não implique a ultrapassagem do limite de tensão previamente definido, para V_{AF} (coluna G) e para V_{DF} (coluna H), quando for o caso. Um exemplo prático da aplicação deste método é apresentado no Anexo F.

D.1.4 A metodologia apresentada neste item é também aplicável a ramais monofásicos – Fase × Neutro –, que são sempre derivados de troncos trifásicos a quatro fios, e um exemplo prático de sua aplicação é apresentado no Anexo F.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo E
(informativo)

Parâmetros para cálculo do valor máximo da resistência de aterramento, tendo em vista o adequado escoamento de surtos

Com base na experiência disponível e tendo em vista subsidiar a elaboração dos exemplos apresentados no Anexo F, são definidos, os parâmetros de cálculo na Tabela E.1:

Tabela E.1 – Parâmetros para cálculo de R_{AT} máximo

Tipo de rede de distribuição	Corrente máxima registrada nos aterramentos dos para-raios (kA crista)	% de registros com valores de corrente inferiores ao limite citado	Limite de potencial a ser transferido	
			Pelas fases da rede primária	Pelo condutor
Redes urbanas (inclusive semiurbanas enquadradas como urbanas)	1 (A)	80	Tensão suportável de impulso dos transformadores (B)	80 kV (D)
Redes rurais (inclusive semiurbanas enquadradas como rurais)	2 (A)	70	Nível de isolamento das estruturas (C)	80 kV (D)

Legenda

(A) Ver Item E.1.

(B) Devido ao não provimento de proteção contra sobretensão em todos os transformadores de distribuição. Caso esta consideração implique na definição de limites para as resistências de aterramento que resulte em projetos de elevado custo, estudos econômicos indicarão a propriedade de se prover proteção contra sobretensão a todos os transformadores, situação em que este limite é elevado até o nível de isolamento das estruturas empregadas, à semelhança das redes rurais. As vantagens resultantes dessa opção são diretamente proporcionais à diferença existente entre o nível de isolamento das estruturas utilizadas e a tensão suportável de impulso padronizada para os transformadores.

(C) Considerando o usual provimento de proteção contra sobretensão em todos os transformadores de distribuição. A possibilidade de 30 % de ocorrência de potenciais transmitidos acima do limite de proteção fixado torna-se razoável por poder resultar, simplesmente, em disrupção nos isoladores.

(D) Ver Item E.2.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

E.1 Correntes máximas nos aterramentos dos para-raios

Os valores máximos de corrente constantes na Tabela E.1 são resultados tanto de levantamento estatístico como da aplicação da teoria de “Propagação de ondas”, dentro das condições de contorno e desenvolvimento apresentadas E.1.1 a E.1.3.

E.1.1 Para redes de distribuição urbanas (RDU), foi considerado o seguinte:

a) 30 kA de intensidade de corrente da descarga atmosférica (50 % de probabilidade de ocorrência de valores inferiores;

b) 65 m de distância entre o ponto de incidência da descarga (raio) e a rede (em RDU, considera-se nula a possibilidade de descargas indiretas mais próximas);

c) 140 kV de tensão induzida na rede;

d) 280 Ω de impedância de surto da rede (considerada trifásica);

e) 0 Ω de resistência de aterramento no ponto de instalação do dispositivo de proteção contra sobretensões (correspondente à pior hipótese em termos de reflexão de corrente, uma vez que esta dobraria seu valor).

Em conformidade com a Figura E.1, tem-se:

$$I_t = \frac{2 \times 280}{(280 + 0)} \frac{140}{280} = 1\,\text{kA}$$

onde

$I_t = I_1 + I_2$;

$I_1 = 0$;

$I_2 = I_t = 1$ kA.

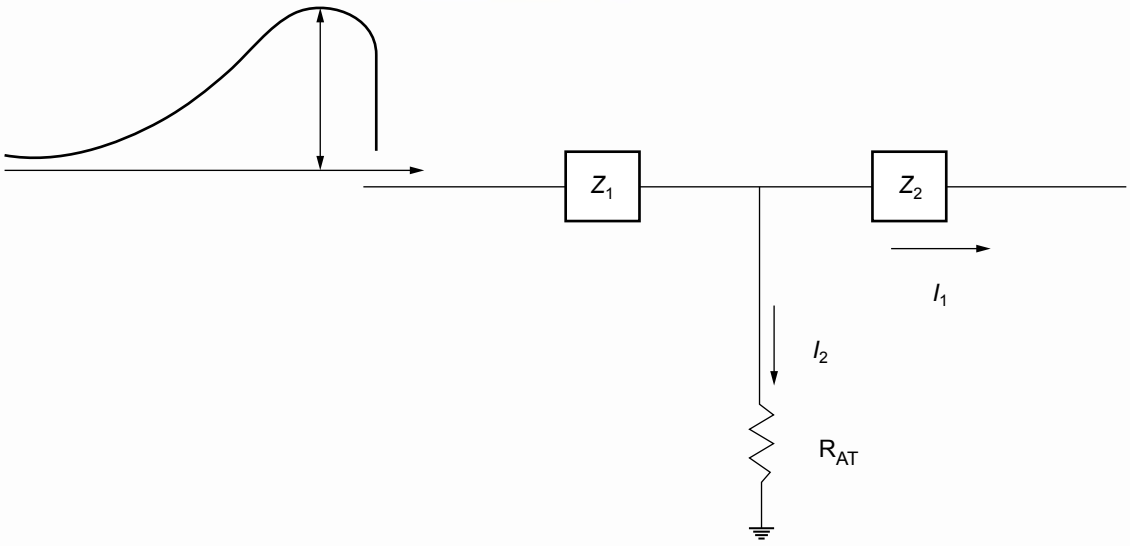


Figura E.1 – Propagação da corrente de descarga atmosférica no aterramento de um para-raios

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

E.1.2 Para redes de distribuição rurais monofásicas, foi considerado o seguinte:

a) 30 kA de intensidade de corrente da descarga atmosférica (50 % de probabilidade de ocorrência de valores inferiores);

b) 20 m de distância entre o ponto de incidência da descarga (raio) e a rede (para distâncias inferiores, as descargas são consideradas diretas);

c) 450 kV de tensão induzida na rede;

d) 500 Ω de impedância de surto da rede monofásica;

e) 0 Ω de resistência de aterramento no ponto de instalação do dispositivo de proteção contra sobretensões (correspondente à pior situação).

Tem-se ainda, de acordo com a Figura E.1:

$$I_t = \frac{2 \times 500}{(5\ 000 + 0)} \times \frac{450}{500} = 1{,}8\,\text{kA}$$

onde

$I_t = I_t + I_2 \qquad I_1 = 0;$

$I_2 = I_t = 1{,}8$ kA ≈ 2 kA.

E.1.3 Para redes de distribuição rurais trifásicas, foi considerado o seguinte:

a) 30 kA de intensidade de corrente da descarga atmosférica (50 % de probabilidade de ocorrência de valores inferiores);

b) 30 m de distância entre o ponto de incidência da descarga (raio) e a rede;

c) 300 kV de tensão induzida na rede;

d) 280 Ω de impedância de surto da rede trifásica;

e) 0 Ω de resistência de aterramento no ponto de instalação do dispositivo de proteção contra sobretensões.

Tem-se, conforme a Figura E.1:

$$I_t = \frac{2 \times 280}{(280 + 0)} \times \frac{300}{280} = 2{,}14\,\text{kA}$$

onde

$I_t = I_t + I_2 \qquad I_1 = 0;$

$I_2 = I_t = 2{,}14$ kA ≈ 2,0 kA.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

E.2 Limitação de potencial no neutro

E.2.1 Considerando que eventuais elevações de potencial no condutor neutro podem vir a ser transferidas aos usuários, na análise da máxima tensão transitória suportável por um ser humano, foi considerado o seguinte:

a) uma energia suportável pelo homem de 1 760 J;

b) que corrente de choque normalmente não passa pelo centro respiratório, já que o usual é o toque de mão;

c) uma resistência do corpo humano de 500 Ω;

d) uma onda de tensão com duração de 400 μs que reduz seu valor a 50 % do valor de pico em 50 μs (onda normalizada de 1,2 × 50 μs). Para simplicidade dos cálculos, considera-se a onda mostrada em traço pontilhado na Figura E.2, que equivale a uma condição bem mais crítica, se comparada com a onda normalizada.

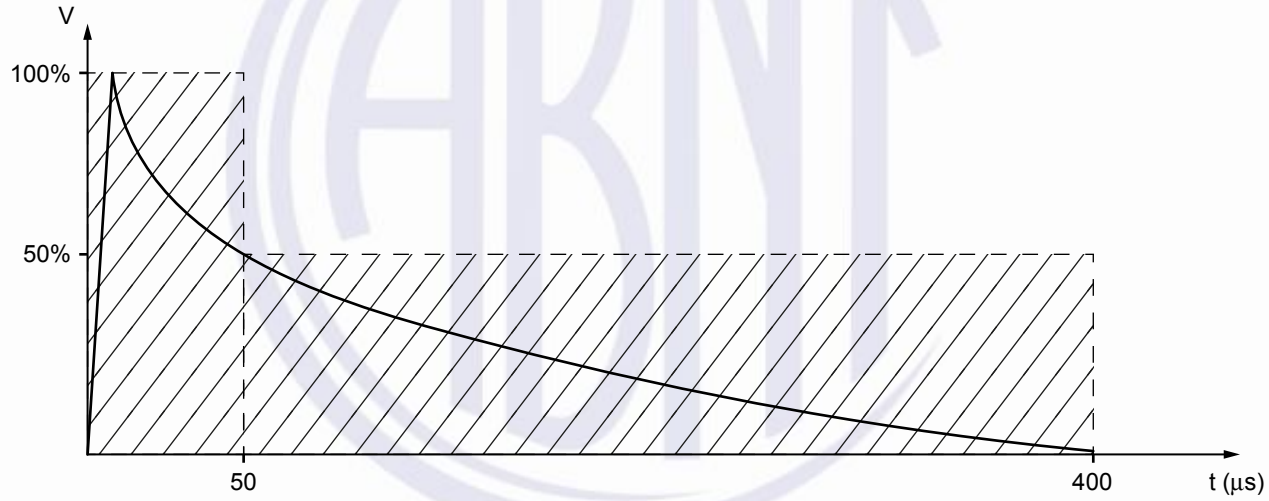


Figura E.2 – Forma de onda do pulso de tensão

E.2.2 A energia dissipada quando a onda representada anteriormente passa por uma resistência de 500 Ω é dada pela equação a seguir:

$$w = \frac{V^2}{R} \times t$$

onde

W é a energia dissipada, expressa em joules (J);

V é a tensão desenvolvida, expressa em volts (V);

R é a resistência de aterramento, expressa em ohms (Ω);

T é o tempo de duração, expresso em segundos (s).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Esta energia deve ser no máximo igual à suportável pelo homem, logo:

$$\frac{V^2}{R}t \leq 1\ 760\,J$$

$$\frac{V^2}{500}50\ \times 10^{-6} + \frac{\left(0,5V^2\right)}{500}300\ \times 10^{-6} \leq 1\ \ 760\,J$$

$$275 \times 10^{-9}V^2 \leq 1\ \ 760$$

$V \leq 80$ kV.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo F
(informativo)

Exemplos de aplicação do método para determinação do valor máximo de resistência de aterramento, para adequado escoamento de surtos

F.1 Sistema trifásico a quatro fios multiaterrado

F.1.1 Determinar o valor máximo de resistência de aterramento adequado ao escoamento de surtos para o correto desempenho de uma rede de distribuição urbana, 13,8 kV, trifásica, a quatro fios, multiaterrada, com as seguintes características:

a) proteção contra sobretensão provida por meio de para-raios de V_{nom} = 10,5 kV, série B, cuja tensão residual máxima 50 kV;

b) potenciais transmitidos pelas fases primárias limitados em 95 kV (valor da tensão suportável de impulso padronizado para transformadores), tendo em vista a possibilidade da existência de transformadores não providos de proteção contra sobretensão;

c) valor de crista da corrente de descarga igual a 1 kA (valor compatível com redes urbanas – conforme Tabela D.1), com tempo real de crista (t) de 1,5 μs;

d) comprimentos dos trechos AD e DE da Figura D.1, fixados com base em seus valores médios de 3 m e 6,2 m, respectivamente (considerados padrões usuais de construção);

F.1.1.1 Optou-se pelo preenchimento da Tabela D.1, inicialmente, para o valor de 40 Ω de resistência de aterramento, o que resultou nos valores máximos de V_{AF} = 83,90 kV e V_{DF} = 34,47 kV. Com a elevação do valor da resistência de aterramento para 50 Ω, tendo em vista a possibilidade de transmissão de até 95 kV, os valores máximos passaram a: V_{AF} = 90,85 kV e V_{DF} = 41,51 kV.

F.1.1.2 O preenchimento sucessivo da Tabela D.1 (ver Tabelas F.1 a F.4) resultou na determinação de $R_{ATmáx}$ = 55 Ω (V_{AF} = 94,34 kV < 95 kV e V_{DF} = 45,10 kV < 80 kV).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela F.1 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 40 Ω

Rede urbana – Sistema multiaterrado a quatro fios 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**			**V residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**
pu	µs	pu	I kA	i_1 kA	pu	kV	Pu	$(V_{AB}+V_{DC})$ kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	0	1,00	6,56	11,66	0	11,66	18,22
0,05	0,075	0,125	0,125	0,11	0,730	36,50	0,87	5,71	10,14	4,4	14,54	56,75
0,10	0,15	0,230	0,23	0,20	0,890	44,50	0,75	4,92	8,74	8,0	16,74	66,16
0,20	0,30	0,430	0,43	0,37	0,975	48,75	0,60	3,94	6,99	14,8	21,79	74,48
0,30	0,45	0,590	0,59	0,51	0,990	49,50	0,48	3,15	5,59	20,4	25,99	78,64
0,40	0,60	0,720	0,72	0,62	1,000	50,00	0,38	2,49	4,43	24,8	29,23	81,72
0,50	0,75	0,810	0,81	0,70	1,000	50,00	0,29	1,90	3,38	28,0	31,38	83,28
0,60	0,90	0,880	0,88	0,76	0,990	49,50	0,22	1,44	2,56	30,4	32,96	83,90
0,70	1,05	0,930	0,93	0,80	0,980	49,00	0,15	0,98	1,75	32,0	33,75	83,73
0,80	1,2	0,970	0,97	0,83	0,975	48,75	0,09	0,59	1,05	32,2	33,25	83,59
0,90	1,35	0,990	0,99	0,85	0,965	48,25	0,04	0,26	0,47	34,0	34,47	82,98
1,00	1,50	1,000	1,00	0,86	0,950	47,50	0	0	0	34,4	34,40	81,90

$i = 1$ kA

$R_{AT} = 40\ \Omega$

$L_{AD} = 3{,}0$ m

$L_{DE} = 6{,}2$ m

PR 10,5 kV – série B $V_{BC} = 50$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250i}{250 + R_{AT}} = 0{,}86\ \text{kA} \qquad \text{(F.1)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0{,}457\ 2} = 6{,}56\ \text{kV} \qquad \text{(F.2)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0,457\ 2} = 11,66\ \text{kV} \quad \text{(F.3)}$$

Tabela F.2 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 50 Ω

Rede urbana – Sistema multiaterrado a quatro fios 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**			**V residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**
pu	µs	pu	*I* kA	i_1 kA	pu	kV	Pu	(V_{AB}+V_{DC}) kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	0	1,00	6,56	11,25	0	11,25	17,81
0,05	0,075	0,125	0,125	0,10	0,730	36,50	0,87	5,71	9,79	5	14,79	57,00
0,10	0,15	0,230	0,23	0,19	0,890	44,50	0,75	4,92	8,44	9,5	17,94	67,36
0,20	0,30	0,430	0,43	0,36	0,975	48,75	0,60	3,94	6,75	18,0	24,75	77,44
0,30	0,45	0,590	0,59	0,49	0,990	49,50	0,48	3,15	5,40	24,5	29,90	82,55
0,40	0,60	0,720	0,72	0,60	1,000	50,00	0,38	2,49	4,28	30	34,28	86,77
0,50	0,75	0,810	0,81	0,67	1,000	50,00	0,29	1,90	3,26	33,5	36,76	88,66
0,60	0,90	0,880	0,88	0,73	0,990	49,50	0,22	1,44	2,48	36,5	38,98	89,92
0,70	1,05	0,930	0,93	0,77	0,980	49,00	0,15	0,98	1,69	38,5	40,19	90,17
0,80	1,2	0,970	0,97	0,81	0,975	48,75	0,09	0,59	1,01	40,5	41,51	90,85
0,90	1,35	0,990	0,99	0,82	0,965	48,25	0,04	0,26	0,45	41,0	41,45	89,96
1,00	1,50	1,000	1,00	0,83	0,950	47,50	0	0	0	41,5	41,50	89,00

$R_{AT} = 50\ \Omega$

$L_{AD} = 3,0$ m

$L_{DE} = 6,2$ m

PR 10,5 kV - série B $V_{BC} = 50$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250i}{250 + R_{AT}} = 0,83\ \text{kA} \quad \text{(F.4)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0,457\ 2} = 6,56\ \text{kV} \quad \text{(F.5)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0,457\ \ 2} = 11,25\ \text{kV} \qquad \text{(F.6)}$$

Tabela F.3 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 60 Ω

Rede urbana – Sistema multiaterrado a quatro fios 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**			**V residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**
pu	μs	pu	I kA	i_1 kA	pu	kV	Pu	$(V_{AB}+V_{DC})$ kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	0	1,00	6,56	10,98	0	10,98	17,54
0,05	0,075	0,125	0,125	0,10	0,730	36,50	0,87	5,71	9,55	6	15,55	57,76
0,10	0,15	0,230	0,23	0,19	0,890	44,50	0,75	4,92	8,23	11,4	19,63	69,05
0,20	0,30	0,430	0,43	0,35	0,975	48,75	0,60	3,94	6,59	21	27,59	80,28
0,30	0,45	0,590	0,59	0,48	0,990	49,50	0,48	3,15	5,27	28,8	34,07	86,72
0,40	0,60	0,720	0,72	0,58	1,000	50,00	0,38	2,49	4,17	34,8	38,97	91,46
0,50	0,75	0,810	0,81	0,66	1,000	50,00	0,29	1,90	3,18	39,6	42,78	94,68
0,60	0,90	0,880	0,88	0,71	0,990	49,50	0,22	1,44	2,42	42,6	45,02	95,96
0,70	1,05	0,930	0,93	0,75	0,980	49,00	0,15	0,98	1,65	45	46,65	96,63
0,80	1,2	0,970	0,97	0,78	0,975	48,75	0,09	0,59	0,99	46,8	47,79	97,13
0,90	1,35	0,990	0,99	0,80	0,965	48,25	0,04	0,26	0,44	48,0	48,44	96,95
1,00	1,50	1,000	1,00	0,81	0,950	47,50	0	0	0	48,6	48,60	96,10

$i = 1$ kA

$R_{AT} = 60\ \Omega$

$L_{AD} = 3,0$ m

$L_{DE} = 6,2$ m

PR 10,5 kV - série B $V_{BC} = 50$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0,81\,\text{kA} \qquad \text{(F.7)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0,4572} = 6,56\ \text{kV} \qquad \text{(F.8)}$$

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0,4572} = 10,98\ \text{kV} \qquad \text{(F.9)}$$

Tabela F.4 – Elevações de potencial em sistemas a quatro fios, multiaterrados, para uma R_{AT} de 55 Ω

Rede urbana – Sistema multiaterrado a quatro fios 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**			**V residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**
pu	μs	pu	I kA	i_1 kA	pu	kV	Pu	$(V_{AB}+V_{DC})$ kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	0	1,00	6,56	11,12	0	11,12	17,68
0,05	0,075	0,125	0,125	0,10	0,730	36,50	0,87	5,71	9,67	5,50	15,17	57,37
0,10	0,15	0,230	0,23	0,19	0,890	44,50	0,75	4,92	8,34	10,45	18,79	68,21
0,20	0,30	0,430	0,43	0,35	0,975	48,75	0,60	3,94	6,67	19,25	25,92	78,61
0,30	0,45	0,590	0,59	0,48	0,990	49,50	0,48	3,15	5,34	26,40	31,74	84,39
0,40	0,60	0,720	0,72	0,58	1,000	50,00	0,38	2,49	4,23	32,45	36,68	89,17
0,50	0,75	0,810	0,81	0,66	1,000	50,00	0,29	1,90	3,22	36,30	39,52	91,42
0,60	0,90	0,880	0,88	0,71	0,990	49,50	0,22	1,44	2,44	49,60	52,04	92,98
0,70	1,05	0,930	0,93	0,75	0,980	49,00	0,15	0,98	1,67	41,80	43,47	93,45
0,80	1,2	0,970	0,97	0,78	0,975	48,75	0,09	0,59	1,00	44,00	45,00	94,34
0,90	1,35	0,990	0,99	0,80	0,965	48,25	0,04	0,26	0,44	44,55	44,99	93,50
1,00	1,50	1,000	1,00	0,82	0,950	47,50	0	0	0	45,10	45,10	92,60

i = 1 kA

R_{AT} = 55 Ω

L_{AD} = 3,0 m

L_{DE} = 6,2 m

PR 10,5 kV – série B V_{BC} = 50 kV

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0,82\ \text{kA} \qquad \text{(F10)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\left(L_{AB} + L_{CD}\right)}{0,4572} = 6,56\ \text{kV} \qquad \text{(F.11)}$$

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0,4572} = 11,12\ \text{kV} \qquad \text{(F.12)}$$

F.1.2 Alternativamente, outras hipóteses podem ser técnico-economicamente consideradas (individual ou combinadamente) com a limitação do valor da resistência de aterramento em 55 Ω, já que todas implicariam em elevação deste limite, como a seguir:

a) utilização de para-raios série A;

b) instalação de para-raios em todos os transformadores de distribuição, o que permitiria a elevação dos potenciais viáveis de serem transmitidos ao nível de isolamento das estruturas.

F.2 Sistema trifásico a três fios com neutro da baixa tensão contínuo

F.2.1 Determinar o valor máximo de resistência de aterramento adequado ao escoamento de surtos para o correto desempenho de uma rede de distribuição semiurbana, 13,8 kV, trifásica, a três fios, solidamente aterrada na subestação com neutro de baixa tensão contínuo, com as seguintes características:

a) proteção contra sobretensão provida por meio de para-raios de $V_{nom.}$= 12,0 kV, série B, cuja tensão residual máxima é 54 kV;

b) potenciais transmitidos pelas fases primárias limitados em 95 kV (valor da tensão suportável de impulso padronizado para os transformadores), devido a opção pelo enquadramento dessa rede como urbana, tendo em vista o seu reduzido grau de exposição, face ao razoável número de edificações verticais próximas dos circuitos e o substancial número de derivações existentes;

c) valor de crista da corrente de descarga igual a 1 kA, com tempo real de crista de 1,5 μs;

d) comprimentos dos trechos *AD* e *DE* da Figura D.1, fixados com base em seus valores médios de 3,0 m e 6,2 m, respectivamente.

Optou-se pelo preenchimento da Tabela D.1, inicialmente, para o valor de 40 Ω de resistência de aterramento, o que resultou nos valores máximos de V_{AF} = 87,86 kV e V_{DF} = 34,47 kV.

F.2.2 O preenchimento sucessivo da Tabela D.1 (ver Tabelas F.5 e F.6) resultou na determinação de $R_{AT\text{máx.}}$ = 50 Ω (V_{AF} = 94,75 kV < 95 kV e V_{DF} = 41,51 kV < 80 kV).

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela F.5 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, multiaterrados, neutro de BT contínuo (R_{AT} de 40 Ω)

Rede semiurbana – Sistema multiaterrado a três fios com neutro de BT contínuo 13,8 kV												
Tempo		Corrente de descarga			*V* residual do dispositivo de proteção (V_{BC})		Queda de tensão no condutor de aterramento			Queda de tensão no aterramento	Tensão no neutro	Tensão nas fases primárias
pu	µs	pu	*I* kA	i_1 kA	pu	kV	pu	(V_{AB}+V_{DC}) kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	0	1,00	6,56	11,66	0	11,66	18,22
0,05	0,075	0,125	0,125	0,11	0,730	39,42	0,87	5,71	10,14	4,4	14,54	59,67
0,10	0,15	0,230	0,23	0,20	0,890	48,06	0,75	4,92	8,74	8,0	16,74	69,72
0,20	0,30	0,430	0,43	0,37	0,975	52,65	0,60	3,94	6,99	14,8	21,79	78,38
0,30	0,45	0,590	0,59	0,51	0,990	53,46	0,48	3,15	5,59	20,4	25,99	82,60
0,40	0,60	0,720	0,72	0,62	1,000	54,00	0,38	2,49	4,43	24,8	29,23	85,72
0,50	0,75	0,810	0,81	0,70	1,000	54,00	0,29	1,90	3,38	28,0	31,38	87,28
0,60	0,90	0,880	0,88	0,76	0,990	53,46	0,22	1,44	2,56	30,4	32,96	87,86
0,70	1,05	0,930	0,93	0,80	0,980	52,92	0,15	0,98	1,75	32,0	33,75	87,65
0,80	1,2	0,970	0,97	0,83	0,975	52,65	0,09	0,59	1,05	33,2	34,25	87,49
0,90	1,35	0,990	0,99	0,85	0,965	52,11	0,04	0,26	0,47	34,0	34,47	86,84
1,00	1,50	1,000	1,00	0,86	0,950	51,30	0	0	0	34,4	34,40	85,70

$i = 1$ kA

$R_{AT} = 40\ \Omega$

$L_{AD} = 3{,}0$ m

$L_{DE} = 6{,}2$ m

PR 12,0 kV – série B $V_{BC} = 54$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0{,}86 \text{ kA} \quad \text{(F.13)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0{,}4572} = 6{,}56 \text{ kV} \quad \text{(F.14)}$$

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0{,}4572} = 11{,}66 \text{ kV} \quad \text{(F.15)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela F.6 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, multiaterrados, neutro de BT contínuo (R_{AT} de 50 Ω)

Rede semiurbana – Sistema multiaterrado a três fios com neutro de BT contínuo 13,8 kV												
Tempo		Corrente de descarga			*V* residual do dispositivo de proteção V_{BC}		Queda de tensão no condutor de aterramento			Queda de tensão no aterramento	Tensão no neutro	Tensão nas fases primárias
pu	μs	pu	*I* kA	i_1 kA	pu	kV	pu	$(V_{AB}+V_{DC})$ kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	0	1,00	6,56	11,25	0	11,25	17,81
0,05	0,075	0,125	0,125	0,10	0,730	39,42	0,87	5,71	9,79	5,0	14,79	59,92
0,10	0,15	0,230	0,23	0,19	0,890	48,06	0,75	4,92	8,44	9,5	17,94	70,92
0,20	0,30	0,430	0,43	0,36	0,975	52,65	0,60	3,94	6,75	18,0	24,75	81,34
0,30	0,45	0,590	0,59	0,49	0,990	53,46	0,48	3,15	5,40	24,5	29,90	86,51
0,40	0,60	0,720	0,72	0,60	1,000	54,00	0,38	2,49	4,28	30,0	34,28	90,77
0,50	0,75	0,810	0,81	0,67	1,000	54,00	0,29	1,90	3,26	33,5	36,76	92,66
0,60	0,90	0,880	0,88	0,73	0,990	53,46	0,22	1,44	2,48	36,5	38,98	93,88
0,70	1,05	0,930	0,93	0,77	0,980	52,92	0,15	0,98	1,69	38,5	40,19	94,09
0,80	1,2	0,970	0,97	0,81	0,975	52,65	0,09	0,59	1,01	40,5	41,51	94,75
0,90	1,35	0,990	0,99	0,82	0,965	52,11	0,04	0,26	0,45	41,0	41,45	93,82
1,00	1,50	1,000	1,00	0,83	0,950	51,30	0	0	0	41,50	41,50	92,80

$i = 1$ kA

$R_{AT} = 50\ \Omega$

$L_{AD} = 3{,}0$ m

$L_{DE} = 6{,}2$ m

PR 12,0 kV - série B $V_{BC} = 54$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0{,}83\ \text{kA} \qquad \text{(F.16)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0{,}4572} = 6{,}56\ \text{kV} \qquad \text{(F.17)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0,4572} = 11,25\ \text{kV} \quad \text{(F.18)}$$

F.2.2.1 Neste caso, são também válidas as alternativas apresentadas em F.1, ou seja:

a) utilização de para-raios série A;

b) instalação de para-raios em todos os transformadores de distribuição.

F.3 Sistema trifásico a três fios com neutro de baixa tensão descontínuo

F.3.1 Determinar o valor máximo de resistência de aterramento adequado ao escoamento de surtos para o correto desempenho de uma rede de distribuição rural, 13,8 kV, trifásica, a três fios, aterrada na subestação por meio de resistor, com neutro de baixa tensão descontínuo, com as seguintes características:

a) proteção contra sobretensão provida por meio de para-raios de $V_{\text{nom.}}$= 15,0 kV, série B, cuja tensão residual máxima é 60 kV;

b) potenciais transmitidos pelas fases primárias limitados em 130 kV (valor suposto para o isolamento das estruturas utilizadas), tendo em vista que todos os transformadores instalados em áreas rurais são protegidos por para-raios;

c) valor de crista da corrente de descarga igual a 2,0 kA, conforme Tabela E.1, com tempo real de crista de 1,5 μs;

d) comprimento dos trechos *AD* e *DE* da Figura D.2, fixados com base em seus valores médios de 3,0 m e 6,2 m, respectivamente (de acordo com padrões usuais de construção).

Optou-se pelo preenchimento da Tabela D.2, inicialmente, para o valor de 40 Ω de resistência de aterramento (R_{AT}), o que resultou em valores máximos de V_{AF} = 139,72 kV e V_{DF} = 80,28 kV.

F.3.2 O preenchimento sucessivo da Tabela D.2 (ver Tabelas F.7 a F.9) resultou na determinação de $R_{ATmáx.}$= 35 Ω (V_{AF} = 130,02 kV ≈ 130 kV e V_{DF} = 70,38 kV).

F.3.3 Observa-se que, para a utilização destes valores de resistência de aterramento, é necessária a instalação de um *gap* entre a carcaça do transformador e o neutro quando a tensão V_{DF} for superior a 30/22,5 kV (transformadores novos/usados), que é o nível de isolamento de BT do transformador para surtos atmosféricos. Caso não seja utilizado o *gap*, a R_{AT} deve ser calculada de forma a limitar a tensão V_{DF} a este valor.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Tabela F.7 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, neutro de BT descontínuo (R_{AT} de 40 Ω)

Rede rural – Sistema a três fios com neutro de BT descontínuo 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**		***V* residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**	**Tensão no neutro**
pu	μs	pu	I kA	i_1 kA	pu	kV	pu	$(V_{AB}+V_{DC})$ kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV
0	0	0	0	0	0	1,00	13,12	27,12	0	27,12	40,24	27,12
0,05	0,075	0,125	0,25	0,730	43,80	0,87	11,41	23,59	10,0	33,59	88,81	33,59
0,10	0,15	0,230	0,46	0,890	53,40	0,75	9,84	20,34	18,4	38,74	101,98	38,74
0,20	0,30	0,430	0,86	0,975	58,50	0,60	8,66	16,27	34,4	50,67	117,04	50,67
0,30	0,45	0,590	1,18	0,990	59,40	0,48	6,30	13,02	47,2	60,22	125,92	60,22
0,40	0,60	0,720	1,44	1,000	60,00	0,38	4,99	10,31	57,6	67,91	132,89	67,91
0,50	0,75	0,810	1,62	1,000	60,00	0,29	3,80	7,86	64,8	72,66	136,47	72,66
0,60	0,90	0,880	1,76	0,990	59,40	0,22	2,89	5,97	70,4	76,37	138,65	76,37
0,70	1,05	0,930	1,86	0,980	58,80	0,15	1,97	4,07	74,4	78,47	139,24	78,47
0,80	1,2	0,970	1,94	0,975	58,50	0,09	1,18	2,44	77,6	80,06	139,72	80,04
0,90	1,35	0,990	1,98	0,965	57,90	0,04	0,52	1,08	79,2	80,28	138,71	80,28
1,00	1,50	1,000	2,00	0,950	57,00	0	0	0	80,0	80,00	137,00	80,00

$i = 2$ kA

$R_{AT} = 40\ \Omega$

$L_{AD} = 3{,}0$ m

$L_{DE} = 6{,}2$ m

PR 15,0 kV - série B $V_{BC} = 60$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0{,}86 \text{ kA} \qquad \text{(F.19)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0,4572} = 13,12\ \text{kV} \qquad \text{(F.20)}$$

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0,4572} = 27,12\ \text{kV} \qquad \text{(F.21)}$$

Tabela F.8 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, neutro de BT descontínuo (R_{AT} de 30 Ω)

Rede rural – Sistema a três fios com neutro de BT descontínuo 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**		***V* residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**	**Tensão no neutro**
pu	μs	pu	***I*** kA	pu	kV	pu	(V_{AB}+V_{DC}) kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV	V_{DF} kV
0	0	0	0	0	0	1,00	13,12	27,12	0	27,12	40,24	27,12
0,05	0,075	0,125	0,25	0,730	43,80	0,87	11,41	23,59	7,5	31,09	86,31	31,09
0,10	0,15	0,230	0,46	0,890	53,40	0,75	9,84	20,34	13,8	34,14	97,38	34,14
0,20	0,30	0,430	0,86	0,975	58,50	0,60	8,66	16,27	25,8	42,07	108,44	42,07
0,30	0,45	0,590	1,18	0,990	59,40	0,48	6,30	13,02	35,4	48,42	114,12	48,42
0,40	0,60	0,720	1,44	1,000	60,00	0,38	4,99	10,31	43,2	53,51	118,49	53,51
0,50	0,75	0,810	1,62	1,000	60,00	0,29	3,80	7,86	48,6	56,46	120,27	56,46
0,60	0,90	0,880	1,76	0,990	59,40	0,22	2,89	5,97	52,8	58,77	121,05	58,77
0,70	1,05	0,930	1,86	0,980	58,80	0,15	1,97	4,07	55,8	59,87	120,64	59,87
0,80	1,2	0,970	1,94	0,975	58,50	0,09	1,18	2,44	58,2	60,64	120,32	60,64
0,90	1,35	0,990	1,98	0,965	57,90	0,04	0,52	1,08	59,4	60,48	118,91	60,48
1,00	1,50	1,000	2,00	0,950	57,00	0	0	0	60,0	60,00	117,00	60,00

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$i = 2$ kA

$R_{AT} = 30\ \Omega$

$L_{AD} = 3{,}0$ m

$L_{DE} = 6{,}2$ m

PR 15,0 kV - série B $V_{BC} = 60$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0{,}86\ \text{kA} \qquad \text{(F.22)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i(L_{AB} + L_{CD})}{0{,}457\ 2} = 13{,}12\ \text{kV} \qquad \text{(F.23)}$$

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0{,}457\ 2} = 27{,}12\ \text{kV} \qquad \text{(F.24)}$$

Tabela F.9 – Elevações de potencial em sistemas a três fios, neutro de BT descontínuo (R_{AT} de 35 Ω)

Rede rural – Sistema a três fios com neutro de BT descontínuo 13,8 kV												
Tempo		**Corrente de descarga**		**V residual do dispositivo de proteção (V_{BC})**		**Queda de tensão no condutor de aterramento**			**Queda de tensão no aterramento**	**Tensão no neutro**	**Tensão nas fases primárias**	**Tensão no neutro**
pu	μs	pu	I kA	pu	kV	pu	(V_{AB}+V_{DC}) kV	V_{DE} kV	V_{EF} kV	V_{DF} kV	V_{AF} kV	V_{DF} kV
0	0	0	0	0	0	1,00	13,12	27,12	0	27,12	40,24	27,12
0,05	0,075	0,125	0,25	0,730	43,80	0,87	11,41	23,59	8,8	32,39	87,61	32,39
0,10	0,15	0,230	0,46	0,890	53,40	0,75	9,84	20,34	16,1	36,44	99,68	36,44
0,20	0,30	0,430	0,86	0,975	58,50	0,60	8,66	16,27	30,1	46,37	112,74	46,37
0,30	0,45	0,590	1,18	0,990	59,40	0,48	6,30	13,02	41,3	44,32	120,02	54,32
0,40	0,60	0,720	1,44	1,000	60,00	0,38	4,99	10,31	50,4	60,71	125,69	60,71
0,50	0,75	0,810	1,62	1,000	60,00	0,29	3,80	7,86	56,7	64,56	128,37	64,56
0,60	0,90	0,880	1,76	0,990	59,40	0,22	2,89	5,97	61,6	67,57	129,85	67,57
0,70	1,05	0,930	1,86	0,980	58,80	0,15	1,97	4,07	65,1	69,17	129,94	69,17
0,80	1,2	0,970	1,94	0,975	58,50	0,09	1,18	2,44	67,9	70,34	130,02	70,34
0,90	1,35	0,990	1,98	0,965	57,90	0,04	0,52	1,08	69,3	70,38	128,81	70,38
1,00	1,50	1,000	2,00	0,950	57,00	0	0	0	70,0	70,00	127,00	70,00

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$i = 2$ kA

$R_{AT} = 35\ \Omega$

$L_{AD} = 3{,}0$ m

$L_{DE} = 6{,}2$ m

PR 15,0 kV – série B $V_{BC} = 60$ kV

Da Equação D.1:

$$i_1 = \frac{250 \times i}{250 + R_{AT}} = 0{,}86 \text{ kA} \quad \text{(F.25)}$$

Da Equação D.4:

$$V_{AB} + V_{CD} = \frac{i\,(L_{AB} + L_{CD})}{0{,}4572} = 13{,}12 \text{ kV} \quad \text{(F.26)}$$

Da Equação D.5:

$$V_{DE} = \frac{i_1 \times L_{DE}}{0{,}4572} = 27{,}12 \text{ kV} \quad \text{(F.27)}$$

Alternativamente à fixação do valor de 35 Ω para o limite superior da resistência de aterramento, pode-se considerar o seguinte:

a) modificações no padrão da estrutura de forma a elevar seu nível de isolamento;

b) utilização de para-raios série A, cujas tensões residuais são inferiores às da série B.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo G
(informativo)

Exemplos de cálculo de aterramento de redes de distribuição

G.1 Sistema a quatro fios, multiaterrado

Dados de entrada:

$k = 66$ km

$z = 1{,}07$ Ω/km (cabo 2 ASC)

$n = 2$

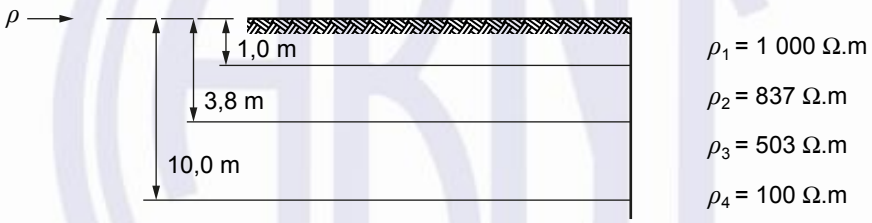


Figura G.1 – Estratificação do solo em quatro camadas

$\rho_s = \rho_1 = 1\,000$ Ω m

kV A $= 4\,000$ kVA

kV $= 13{,}8$ kV

j $= 40$ m

da haste do consumidor: $L = 2$ m; $d = 0{,}025\,4$ m (1”)

$\Sigma = 0{,}2$ pu

$\alpha = 0{,}3$

$\tau = 2$

$R_{SE} = 5$ Ω

Do cabo 336,4 MCM:

$X_{1T} = X_{0T} = 0{,}8$ Ω

$r_{1c} = 0{,}191$ Ω/km

$X_{1c} = 0{,}403$ Ω/km

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

R_{0c} = 0,369 Ω/km

X_{0c} = 1,862 Ω/km

Processamento:

Operação 1

ETAPA 1.1:

$$R_1 = \tau \times \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right)$$

Conforme B.3, para o solo da Figura G.1 reduzido a duas camadas, resulta o apresentado na Figura G.2.

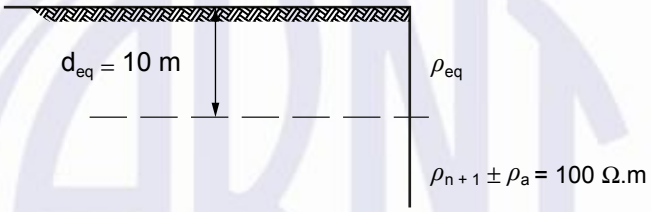


Figura G.2 – Solo estratificado em duas camadas

onde

$$\rho_{eq} = \frac{10}{\frac{1}{1\ 000} + \frac{2,8}{837} + \frac{6,2}{503}} = 600\ \Omega\ m$$

Fazendo $\rho_a = \rho_{eq}$ = 600 Ω m

$$R_1 = \tau \times \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right) = 2 \times \frac{600}{2 \times \pi \times 2} \times ln\left(\frac{4\ \times\ 2}{0,0254}\right) = 549\ \Omega$$

R_1 = 549 Ω

ETAPA 1.2:

$$R_2 = \frac{R_1 \times j}{1\ 000 \times k \times n} = \frac{549 \times 40}{1\ 000 \times 66 \times 2} = 0,166\ \Omega$$

ETAPA 1.3:

$$R_3 = \frac{\alpha \times R_2}{R_2 - \alpha} = \frac{0,3 \times 0,166}{0,166 - 0,3} = \frac{0,049\ 8}{-0,134} = -\ 0,37\ \Omega$$

$R_3 < 0$

Os aterramentos dos consumidores são suficientes para garantir a efetividade do aterramento do sistema.

Assim: R_3 = infinito.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 1.4:

$R_4 = k \times R_3 \rightarrow R_4 = \text{infinito}$

Operação 2

ETAPA 2.1:

$R_5 = k \times R_2 = 11\ \Omega$

ETAPA 2.2:

$$R_6 = \frac{10 \times \sqrt{3} \times kV \times k - \sum kV \times A \times z}{\sum kV \times A} = \frac{10 \times \sqrt{3} \times 13,8 \times 66 - 0,2 \times 4\ 000 \times 1,07}{0,2 \times 4\ 000}$$

$R_6 = 18,6\ \Omega$

ETAPA 2.3:

$$R_7 = \frac{R_5 \times R_6}{R_5 - R_6} = \frac{11 \times 18,6}{11 - 18,6} = \frac{204,6}{-7,6} = -27\ \Omega$$

$R_7 < 0$

Os aterramentos dos consumidores são suficientes para garantir a manutenção do neutro a um potencial de 10 V em condições normais de operação.

Logo: $R_7 = \text{infinito}$.

Operação 3

Considerando o valor de $R_{AT\text{máx}}$ determinado no exemplo dado em F.1, $R_{AT\text{máx}} = 55\ \Omega$.

Logo $R_8 = 55/2 = 27,5\ \Omega$ ($R_4 = R_7 = \text{infinito}$).

Operação 4

$R_9/x \leq 27,5\ \Omega$

$x \geq 2$

$R_9 \leq 55\ \Omega$

ETAPA 4.1:

Supondo, inicialmente:

$x = 2$

$R_9 = 55\ \Omega$

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 4.2:

Supondo que para o aterramento do neutro sejam utilizadas hastes de 3 m × 3/4":

$$\rho_a = \rho_{eq} = 600\,\Omega\text{m}$$

$$\frac{R_9}{\rho_a} = \frac{55}{600} = 0,091$$

Pela Tabela B.6, para cinco hastes de 3 m espaçadas em 4 m, tem-se:

$$R_9 = 0,088\ \rho_a$$

Cálculo da resistividade aparente para cinco hastes espaçadas em 4 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1)\times e}{2}}{d_{eq}} = \frac{8}{10} = 0,8$$

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} = \frac{100}{600} = 0,167$$

Pela Figura A.4:

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_{eq}} = 0,84$$

$$\rho_a = 0,84 \times 600 = 504\ \Omega\,\text{m}$$

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho_a} = \frac{55}{504} = 0,109$$

Da Tabela B.6 para a relação calculada (0,109), tem-se: quatro hastes espaçadas em 4 m.

Como inicialmente foram selecionadas cinco hastes espaçadas em 4 m, deve-se reprocessar toda a rotina.

Cálculo de ρ_a para quatro hastes espaçadas em 4 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1)\times e}{2}}{d_{eq}} = \frac{6}{10} = 0,6$$

$$\beta = \frac{\rho_{n+1}}{\rho_{eq}} = \frac{100}{600} = 0,167$$

Pela Figura A.4

$$N = \frac{\rho_a}{\rho_{eq}} = 0,86$$

$$\rho_a = 0,86 \times 600 = 516\ \Omega\ \text{m}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho_a} = \frac{55}{516} = 0,106\,6$$

Da Tabela B.6 para a nova relação calculada (0,106), tem-se: quatro hastes espaçadas em 4 m.

Como os valores são iguais:

$$R_9 = 0,106\,6 \times 516 = 55\ \Omega$$

Voltando à operação 4:

ETAPA 4.3:

$$x = \frac{R_9}{R_8} = \frac{55}{27,5} = 2$$

Em função da condição $x \geq 2$, tem-se dois aterramentos por quilômetro.

Operação 5

ETAPA 5.1:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times \text{kV} \times 10^3}{\sqrt{(A)^2 + (B)^2}} = \frac{1,7 \times 13,8 \times 10^3}{\sqrt{457,1 + 92,7}} = 1000,5\ \text{A}$$

Sendo

$$A = 3 \times R_{SE} + \frac{3}{2}\left[\frac{z \times R_5 \times R_9}{(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z\ (x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} \times (2\ r_{1c} + r_{0c})$$

$$A = 3\ \times 5 + \frac{3}{2}\left[\frac{1,07\ \times\ 11\ \times\ 55}{(2\ \times 11 + 55)}\right]^{0,5} + \left[\frac{11\ \times\ 55}{1,07\,(2\ \times\ 11 + 55)}\right]^{0,5} \times\ (2\ \times\ 0,191 + 0,369) = 21,38$$

$$B = 2\ \times X_{1t} + X_{0t} + \left[\frac{R_5 \times R_9}{z\,(x \times R_5 + R_9)}\right]^{0,5} \times (2 \times X_{1c} + X_{0c})$$

$$B = 2\ \times\ 0,8 + 0,8 + \left[\frac{11\ \times\ 55}{1,07\,(2\ \times 11 + 55)}\right]^{0,5} \times (2\ \times\ 0,403 + 1,862) = 9,63$$

$I_{cc} = 1\ 000,5$ A

ETAPA 5.2:

$t = 3$ s,

considerando um religador com uma operação instantânea e três operações temporizadas.

ETAPA 5.3:

$$L_c = \frac{0,1 \times\ \rho_1 \times \sqrt{t} \times I_{cc} \times \sqrt{z \times R_5 \times R_9}}{(116 + 0,7 \times \rho_s) \times \left[\sqrt{z \times R_5 \times R_9} + 2 \times R_9 \times \sqrt{(x \times R_5 + R_9)}\right]}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$$L_c = \frac{0,1 \times 1\,000 \times \sqrt{3} \times 1000,5 \times \sqrt{1,07 \times 11 \times 55}}{(116 + 0,7 \times 1000) \times \left[\sqrt{1,07 \times 11 \times 55} + 2 \times 55 \times \sqrt{(2 \times 11 + 55)}\right]} = 5,45 \text{ m}$$

$L_c = 5,45$ m

ETAPA 5.4:

$L_e = f \times L_r + (f - 1) \times e$

$L_r = 3$ m

$f = 4$

$e = 4$ m

Logo:

$L_e = 24$ m

ETAPA 5:

$L_e > L_c$

Portanto:

$R_9 = 55\ \Omega$ e $x = 2$

Esta resistência é obtida com quatro hastes de 3 m × 3/4”, espaçadas em 4 m.

G.2 Sistema a três fios com neutro secundário contínuo

Dados de entrada:

$k = 15$ km

$z = 1,07\ \Omega$/km (2 ASC)

$n = 3$

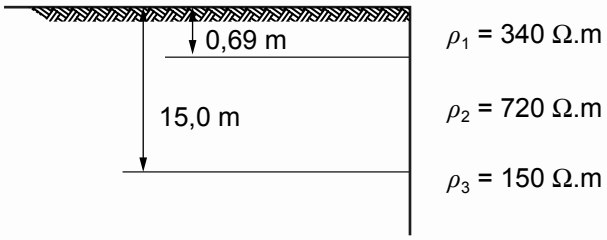


Figura G.3 – Estratificação do solo em três camadas

$\rho_s = \rho_1 = 340\ \Omega$m

kV = 13,8 kV

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

da haste do consumidor: $L = 2{,}4$ m; $d = 0{,}012\ 7$ m (1/2")

$j = 40$ m

$\alpha = 0{,}3$

$\tau = 2$

$R_{SE} = 2\ \Omega$

$X_{1T} = X_{OT} = 0{,}8\ \Omega$

Processamento:

Operação 1

ETAPA 1.1:

$$R_1 = \tau \times \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right)$$

Conforme B.3, para o solo da Figura G.3 reduzido a duas camadas, resulta o apresentado na Figura G.4.

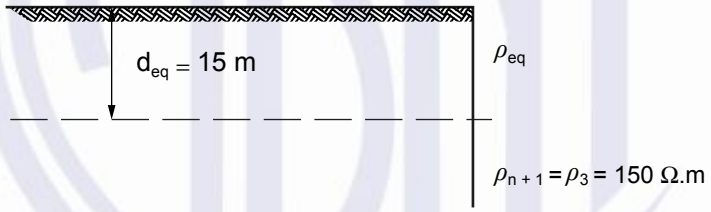


Figura G.4 – Solo estratificado em duas camadas

$$\rho_{eq} = \frac{15}{\frac{0{,}69}{340} + \frac{14{,}31}{720}} = 685\ \Omega\,m$$

onde

Fazendo $\rho_a = \rho_{eq} = 685\ \Omega$ m

$$R_1 = \tau \times \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right) = 2 \times \frac{685}{2 \times \pi \times 2{,}4} \times ln\left(\frac{4 \times 2{,}4}{0{,}012\ 7}\right) = 602\ \Omega$$

ETAPA 1.2:

$$R_2 = \frac{R_1 \times j}{1\ 000 \div k \times n} = 0{,}535\ \Omega$$

$$R_5 = k \times R_2 = 15 \times 0{,}535 = 8\ \Omega$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 1.3:

$$R_3 = \frac{\alpha \times R_2}{R_2 - \alpha} = \frac{0,3 \times 0,535}{0,535 - 0,3} = 0,68\ \Omega$$

ETAPA 1.4:

$$R_4 = k \times R_3 = 15 \times 0,68 = 10,2\ \Omega$$

Operação 2

Considerando o valor de $R_{AT\text{máx}}$ determinado no exemplo F.2, $R_{AT\text{máx}} = 50\ \Omega$,

R_8 = menor valor resultante da comparação de R_4 com 50/2 = 25.

Logo: $R_8 = 10,2\ \Omega$.

Operação 3

$$\frac{R_9}{x} \leq R_8$$

$$x \geq 2$$

$$R_9 \leq 50\ \Omega$$

ETAPA 3.1:

Admitindo-se, inicialmente, quatro aterramentos de $4 \times 10,2\ \Omega$ / kh, tem-se:

$x = 4 \qquad R_9 = 40,8\ \Omega$

ETAPA 3.2:

Supondo que para o aterramento do neutro sejam utilizadas hastes de 3 m × 3/4".

Fazendo $\rho_a = \rho_{eq} = 685\ \Omega$ m

$$\frac{R_9}{\rho_a} = \frac{40,8}{685} = 0,059\ 6$$

Pela Tabela B.6, para nove hastes de 3 m × 3/4", espaçadas em 3 m, tem-se:

$$R_9 = 0,058\ \rho_a$$

Cálculo da resistividade aparente para nove hastes espaçadas em 3 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1) \times e}{2}}{d_{eq}} = \frac{8}{10} = 0,8$$

$$\beta = \frac{\rho_{(n+1)}}{\rho_{eq}} = 0,22$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Pela Figura A.4:

$N = 0{,}82$ e $\rho_a = 562\ \Omega.m$

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho_a} = 0{,}073$$

Da Tabela B.6 para a relação calculada (0,073), tem-se seis hastes espaçadas em 5 m.

Como inicialmente foram selecionadas nove hastes espaçadas em 3 m, deve-se reprocessar toda a rotina.

Logo:

Cálculo da resistividade aparente para seis hastes espaçadas em 5 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1)\times e}{2}}{15} = \frac{8}{15} = 0{,}83$$

$$\beta = \frac{\rho_{(n+1)}}{\rho_{eq}} = 0{,}22$$

Pela Figura A.4

N = 0,81 e $\rho_a = 555\ \Omega m$

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho_a} = 0{,}074$$

Da Tabela B.6, para a nova relação calculada (0,074), tem-se seis hastes espaçadas em 5 m.

Como os valores são iguais:

$R_9 = 0{,}072 \times 555 = 40\ \Omega$

Voltando à operação 3:

ETAPA 3.3:

$x = R_9/R_8 = 3{,}9$

ou seja, quatro aterramentos de 40 Ω em cada quilômetro.

Apesar do número de hastes (seis) estar dentro do limite máximo recomendado em 5.1 em função do espaçamento entre hastes que se faz necessário (5 m), mesmo antes de se processar a operação 4 (verificação dos potenciais de passo em condições de defeito), retornar à ETAPA 3.1 da operação 3, de forma a avaliar os benefícios de um outro binômio de valores para R_9 e x, qual seja:

$x = 5$ $\quad R_9 = 50\ \Omega$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 3.2:

Utilizando ainda hastes de 3 m × 3/4”, tem-se:

Inicialmente: $\rho_a = \rho_{eq} = 685\ \Omega m$

$$\frac{R_9}{\rho_a} = \frac{50}{685} = 0,073$$

Pela Tabela B.6, para seis hastes de 3 m × 3/4”, espaçadas em 5 m, tem-se:

$$R_9 = 0,072\ \rho_a$$

Cálculo da resistividade aparente para seis hastes espaçadas em 5 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1)\ \times e}{2}}{15} = \frac{8}{15} = 0,83$$

$$\beta = \frac{\rho_{(n+1)}}{\rho_{eq}} = 0,22$$

Pela Figura A.4:

$$N = 0,81\ \rho_a = 555\ \Omega m$$

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho_a} = 0,09$$

Da Tabela B.6, para a relação calculada (0,09), tem-se cinco hastes espaçadas em 4 m.

Como inicialmente foram selecionadas seis hastes espaçadas em 5 m, deve-se reprocessar toda a rotina.

Cálculo da resistividade aparente para cinco hastes espaçadas em 4 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1)\times e}{2}}{15} = 0,53$$

$$\beta = \frac{\rho_{(n+1)}}{\rho_{eq}} = 0,22$$

Pela Figura A.4.:

$$N = 0,9\ \rho_a = 616\ \Omega\ m$$

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho_a} = 0,081$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Da Tabela B.6, para a nova relação calculada (0,081), tem-se seis hastes espaçadas em 3 m.

Cálculo da resistividade aparente para seis hastes espaçadas em 3 m:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(n-1) \times e}{2}}{15} = 0,5$$

$$\beta = \frac{\rho(n+1)}{\rho eq} = 0,22$$

$$\beta = 0,22$$

Pela Figura A.4:

$N = 0,9$ $\rho_a = 616$ Ωm

Logo:

$$\frac{R_9}{\rho a} = 0,081$$

Da Tabela B.6, para a relação 0,81, tem-se seis hastes espaçadas em 3 m.

Como os valores são iguais:

$R_9 = 0,080 \times 616 = 49,3$ Ω

Voltando à operação 3:

ETAPA 3.3:

$X = R_9/R_8 = 4,8$

ou seja: cinco aterramentos de 49,3 Ω em cada quilômetro.

Antes de se passar para a operação 4, deve-se proceder a uma análise comparativa das duas opções cogitadas:

a) quatro aterramentos de 40 Ω por quilômetro, com seis hastes espaçadas em 5 m em cada aterramento:

   — número total de hastes: $4 \times 6 = 24$;

   — comprimento de eletrodo horizontal: $(6\text{-}1) \times 5 \times 4 = 100$ m;

b) cinco aterramentos de 49,3 Ω, a cada quilômetro, com seis hastes espaçadas em 3 m em cada aterramento:

   — número total de hastes: $5 \times 6 = 30$;

   — comprimento de eletrodo horizontal: $(6\text{-}1) \times 3 \times 5 = 75$ m.

Deve-se, a esta altura, comparar o custo das hastes adicionais (30-24) com a redução de custo inerente aos 25 m de condutor que se utilizaria a menos, valor este acrescido do custo da mão de obra necessária à abertura das valas.

Para fins de continuação do exemplo, supõe-se ter sido mais econômica a opção de cinco aterramentos com seis hastes espaçadas em 3 m, a cada quilômetro de rede.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Desta forma:

Operação 4

ETAPA 4.1:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3}{\left\{\left[3 \times R_{SE} + 3\left(\frac{z \times R_5 \times R_9}{(x \times R_5 + R_9)}\right)^{0,5}\right]^2 + (2 \times X_{1T} + X_{0T})^2\right\}^{0,5}}$$

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3}{\left\{\left[3 \times 2 + 3\left(\frac{1,07 \times 8 \times 49,3}{(5 \times 8 + 49,3)}\right)^{0,5}\right]^2 + (2 \times 0,8 + 0,8)^2\right\}^{0,5}} = 1\,875 \text{ A}$$

$I_{cc} = 1\,875$ A

ETAPA 4.2:

supondo $t = 3$ s

ETAPA 4.3:

$$L_c = \frac{0,1 \times \rho_1 \times \sqrt{t} \times I_{cc} \times \sqrt{z \times R_5 \times R_9}}{(116 + 0,7 \times \rho_s) \times \left[\sqrt{z \times R_5 \times R_9} + R_9 \times \sqrt{(x \times R_5 + R_9)}\right]}$$

$$L_c = \frac{0,1 \times 340 \times \sqrt{3} \times 1\,875 \times \sqrt{1,07 \times 8 \times 49,3}}{(116 + 0,7 \times 340) \times \left[\sqrt{1,07 \times 8 \times 49,3} + 49,3\sqrt{(5 \times 8 + 49,3)}\right]} = 13,2 \text{ m}$$

$L_c = 13,2$ m

ETAPA 4.4:

$$L_e = f \times L_r + (f - 1) \times e$$

$L_r = 3$m

f = seis hastes

$e = 3$ m

$L_e = 33$ m

ETAPA 4.5:

$L_e \geq L_c$ $\qquad$ $L_e > L_c$

Logo, devem ser efetuados cinco aterramentos constituídos de seis hastes de 3 m × 3/4” espaçadas em 3 m, em cada quilômetro de rede.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo H
(informativo)

Exemplo de cálculo de aterramento de equipamentos

H.1 Sistema a três fios com neutro secundário descontínuo

Dados de entrada:

kV = 13,8 kV

I'_{cc} = 2,0 kA

R_{SE} = 3 Ω

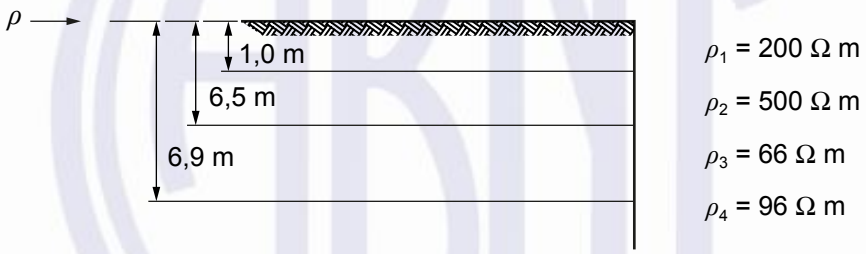


Figura H.1 – Estratificação do solo em quatro camadas

Processamento:

ETAPA 1:

Conforme B.3, tem-se (ver Figura H.2):

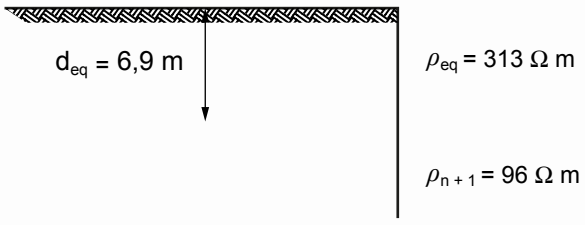


Figura H.2 – Solo estratificado em duas camadas

ETAPA 2:

$$L_c = \frac{\frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3 \times 0,1 \times \rho_1}{116 + 0,7 \times \rho_s} - 6 \times \rho_{eq}}{\frac{\sqrt{3} \times kV}{I_{cc}} + 3 \times R_{SE}}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

$$L_c = \frac{\frac{\sqrt{3} \times 13{,}8 \times 10^3 \times 0{,}1 \times 200}{116 + 0{,}7 \times 200} - 6 \times 313}{\frac{\sqrt{3} \times 13{,}8}{2} + 3 \times 3} = -0{,}51 \text{ m}$$

Como L_c < 0, considera-se, para prosseguir os cálculos, uma haste de 3 m × 3/4" (0,019 1 m).

L_c = 3 m

ETAPA 3:

n = 1 (já definido na ETAPA 2)

ETAPA 4:

Para o caso de uma haste, conforme 5.2.1.2, tem-se:

$\rho_a = \rho_{eq} =$ 313 Ω m

ETAPA 5:

$$R_{AT\,real} = \frac{313}{2 \times \pi \times 3} \times ln\left(\frac{4 \times 3}{0{,}0191}\right) = 107\ \Omega$$

Como 107 Ω > 35 Ω (valor de $R_{ATmáx}$ calculado para o exemplo do Anexo F), considera-se R_{ATreal} = 35 Ω.

ETAPA 6:

L_e = 3 m

ETAPA 7:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times kV \times 10^3 \times I`_{cc}}{\sqrt{3} \times kV + 3 \times I`_{cc}(R_{AT\,real} + R_{SE})}$$

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times 13{,}8 \times 10^3 \times 2}{\sqrt{3} \times 13{,}8 + 3 \times 2\ (35 + 3)} = 189{,}77\ A$$

ETAPA 8:

$$L_cR = \frac{\sqrt{t} \times 0{,}1 \times \rho_1 \times I_{cc}}{116 + 0{,}7 \times \rho_s}$$

Considerando-se t = 3 s:

$$LcR = \frac{\sqrt{3} \times 0{,}1 \times 200 \times 189{,}77}{116 + 0{,}7 \times 200} = 25{,}68 \text{ m}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

ETAPA 9:

Como L_cR (25,68 m) > L_e (3 m), passa-se para a ETAPA 10.

ETAPA 10:

Supondo a utilização de hastes de 3 m × 3/4” (0,0191 m) espaçadas em 3 m, ou seja:

$L_1 = 3$ m

$e_1 = 3$ m, tem-se:

$$N_1 = \frac{L_cR + e_1}{L_1 + e_1} = \frac{25,68 + 3}{3 + 3} = 5 \text{ hastes}$$

Voltando à ETAPA 4, para o caso de cinco hastes:

ETAPA 4:

$$r = \frac{(n-1) \times e}{2} = \frac{(5-1) \times 3}{2} = 6,0 \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{6,0}{6,9} = 0,87$$

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

Pela Figura A.4:

$$N = 0,85 \rightarrow \rho_a = N \ \rho_{eq} = 0,85 \times 313 = 266 \ \Omega \text{ m}$$

ETAPA 5:

Da Tabela B.6:

$$R_{ATreal} = 0,093 \times 266 = 24,74 \ \Omega$$

ETAPA 6:

$$L_e = 5 \times 3 + (5\text{-}1) \times 3 = 27 \text{ m}$$

ETAPA 7:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3 \times 2}{\sqrt{3} \times 13,8 + 3 \times 2 \ (24,74 + 3)} = 251,15 \text{ A}$$

ETAPA 8:

$$L_cR = \frac{\sqrt{2,5} \times 0,1 \times 200 \times 251,15}{116 + 0,7 \times 200} = 31 \text{ m}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

NOTA Considerar $t = 2,5$ s.

ETAPA 9:

Como L_cR (31 m) > L_e (27 m), passa-se para a ETAPA 10.

ETAPA 10:

$N_1 = (31 + 3)/(3 + 3) = 6$ hastes

Voltando à ETAPA 4 para o caso de seis hastes.

ETAPA 4:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(6-1)\times 3}{2}}{6,9} = 1,087$$

$$\beta = 0,31$$

Pela Figura A.4:

$N = 0,84$

$\rho_a = 0,84 \times 313 = 263\ \Omega$ m

ETAPA 5:

Da Tabela B.6:

$R_{ATreal} = 0,080 \times 263 = 21\ \Omega$

ETAPA 6:

$L_e = 6 \times 3 + (6\text{-}1) \times 3 = 33$ m

ETAPA 7:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3 \times 2}{\sqrt{3} \times 13,8 + 3 \times 2(21+3)} = 284,7\text{A}$$

ETAPA 8:

$$L_cR = \frac{\sqrt{2,5} \times 0,1 \times 200 \times 284,7}{116 + 0,7 \times 200} = 35,17\text{m}$$

ETAPA 9:

Como L_cR (35,17) > L_e (33 m), volta-se novamente para a ETAPA 10.

ETAPA 10:

$N_1 = (35,17 + 3)/(3 + 3) =$ sete hastes

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Voltando à ETAPA 4 para o caso de sete hastes:

ETAPA 4:

$$\alpha = \frac{r}{d_{eq}} = \frac{\frac{(6-1)\times 3}{2}}{6,9} = 1,087$$

$$\beta = 0,31$$

Pela Figura A.4:

$$N = 0,82$$

$$\rho_a = 0,82 \times 313 = 257\ \Omega.\text{m}$$

ETAPA 5:

Da Tabela B.6:

$$R_{AT\text{real}} = 0,070 \times 257 = 18,22\ \Omega$$

ETAPA 6:

$$L_e = 7 \times 3 + (7\text{-}1) \times 3 = 39\ \text{m}$$

ETAPA 7:

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3} \times 13,8 \times 10^3 \times 2}{\sqrt{3} \times 13,8 + 3 \times 2\ \ (18,22 + 3)} = 316,1\ \text{A}$$

ETAPA 8:

$$L_cR = \frac{\sqrt{2,5} \times 0,1 \times 200 \times 316,1}{116 + 0,7 \times 200} = 39,05\ \text{m}$$

ETAPA 9:

Como $L_cR \cong L_e$, passa-se para a ETAPA 11.

ETAPA 11:

O projeto do aterramento está definido com sete hastes de 3 m × 3/4” (0,0191 m) espaçadas em 3 m, equivalendo a uma resistência de 18,22 Ω.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo I
(informativo)

Cálculo da impedância de surto de eletrodos de aterramento

A não linearidade da impedância de aterramento por ocasião da descarga de uma corrente de surto para o solo é função dos seguintes parâmetros:

a) dimensões e geometria do eletrodo, que determinam sua indutância e a densidade de corrente de escoamento, calculada pela Equação I.1 :

$$J = \frac{I}{S} \quad \text{(I.1)}$$

onde

J é a densidade de corrente de escoamento, expressa em quiloampères por metro quadrado (kA/m^2);

I é a corrente de surto, expressa em quiloampères (kA);

S é a área da superfície do eletrodo, expressa em metros quadrados (m^2);

b) parâmetros da corrente de surto, como: valor de crista, taxa de crescimento máxima, tempo de escoamento etc.;

c) distribuição da corrente de surto no sistema de aterramento, que depende do ponto onde a corrente entra no sistema e da indutância do eletrodo.

Quanto ao gradiente de potencial desenvolvido no solo, este é calculado pela Equação I.2:

$$E = \rho_a \times J \quad \text{(I.2)}$$

Sendo

E é o gradiente de potencial no solo, expresso em quilovolts por metro (kV/m);

ρ_a é a resistividade aparente do solo, expressa em ohms-metro (Ω.m);

J é a densidade de corrente de escoamento, expressa em quiloampères por metro quadrado (kA/m^2) (ver Equação I.1).

O gradiente crítico do solo (E_0) varia de 200 kV/m a 2 000 kV/m.

No âmbito do IEEE, o valor adotado na década de 1980 era de 1 000 kV/m.

A partir da década de 1990, passou-se a adotar o valor de 300 kV/m como gradiente crítico, sendo válido para surtos de altas correntes e para os tempos de frente usuais.

No âmbito da CIGRÉ, é usado o valor de 400 kV/m.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

I.1 Determinação do diâmetro efetivo

A injeção em um condutor, de correntes suficientemente grandes para desenvolver na sua superfície e gradientes de potencial que ionizem o solo, pode ser traduzida como um aumento efetivo do seu diâmetro.

Se este condutor for uma haste vertical de comprimento curto, 3 m, considera-se que o efeito da ionização representa um aumento no diâmetro efetivo do condutor, d_0, dado por:

$$d_0 = \frac{318 \times \rho \times I_M}{1\ 000 \times L \times E_0} \quad m \tag{I.3}$$

onde

E_0 é o gradiente crítico de potencial para disrupção no solo, expresso em quilovolts por metro (kV/m);

ρ é a resistividade do solo, expressa em ohms-metro (Ω.m);

L é o comprimento da haste, expresso em metros (m).

I_M é a corrente máxima (ou de pico), expressa em quiloamperes (kA).

d_0 é o diâmetro efetivo, expresso em metros (m).

Assim, por exemplo, o diâmetro efetivo de um condutor de comprimento $L = 3$ m, em solo de resistividade 200 Ω m, ao qual seja aplicada uma corrente de 5 kA, é de:

$$d_0 = \frac{318 \times 200 \times 5}{1\ 000 \times 3 \times 300} = 0{,}353 \text{ m}$$

I.2 Impedância de surto de uma haste

I.2.1 Sem ionização do solo ($E \leq E_0$)

Para hastes de comprimentos usuais (3 m), não sendo excedido o gradiente crítico do solo, ou seja, $E \leq E_0$, a impedância de surto da haste é igual ao valor de sua resistência a frequência industrial, calculada conforme a Equação I.4:

$$R = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d}\right) \Omega \tag{I.4}$$

Mantendo os valores de ρ e L do exemplo anterior, para uma haste de 0,014 3 m de diâmetro (5/8”) e sem considerar o efeito da ionização do solo, é $R = 71{,}4\ \Omega$.

I.2.2 Com ionização do solo ($E > E_0$)

Calcular a impedância de surto de uma haste com ionização do solo (R_{hso}) pela Equação I.5 :

$$R_{hso} = \frac{\rho_a}{2 \times \pi \times L} \times ln\left(\frac{4 \times L}{d_o}\right) \tag{I.5}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

R_{hso} é a impedância de surto de uma haste com ionização do solo, expressa em ohms (Ω);

ρ_a é a resistividade aparente do solo calculada conforme B.4, expressa em ohms (Ω);

L é o comprimento da haste, expresso em metros (m);

d_0 é o diâmetro efetivo da haste, calculado conforme a Equação I.3, expresso em metros (m);

I é a corrente do surto, expressa em quiloampères (kA);

E_0 é o gradiente crítico do solo, expresso em quilovolts por metro (kV/m).

Como exemplo, substituindo-se o diâmetro real pelo valor obtido para d_0 (0,353 m) na Equação I.5, a resistência dinâmica, ou impedância de surto Z_0, passa a ser de:

$$Z_0 = \frac{200}{2 \times \pi \times 3} \times ln\left(\frac{4 \times 3}{0,353}\right) = 37,4\ \Omega$$

ou seja, seu valor cai para 53 % do valor obtido quando se desconsidera a ionização do solo.

I.3 Impedância de surto de condutor horizontal

I.3.1 Cálculo do comprimento efetivo de condutor de aterramento

I.3.1.1 Cálculo do comprimento efetivo, L_e, em eletrodos horizontais – Modelo sem ionização do solo

Em eletrodos horizontais longos, a dissipação do surto não se dá igualmente em todo seu comprimento, uma vez que nem sempre todo o eletrodo participa da dissipação da corrente durante a variação rápida do surto. Interessa então considerar o comprimento efetivo, L_e, e examinar seu efeito no cálculo da impedância de surto. Pode-se considerar que, após um tempo de vários microssegundos, todo o eletrodo de aterramento participa da dissipação da corrente. O comportamento do sistema de aterramento até os primeiros microssegundos do surto é extremamente importante para avaliar a possibilidade de *backflashover* em torres de transmissão. A equação aproximada tradicionalmente empregada em linhas de distribuição é:

$$L_e = A \times \sqrt{\rho t} \quad \text{(I.6)}$$

Sendo

L_e é o comprimento efetivo de eletrodo para descarga de correntes com tempo de crista t, expresso em metros (m);

ρ_a é a resistividade aparente do solo, calculada conforme B.4;

t é o tempo de frente do surto, expresso em microssegundos (μs);

A é uma constante que vale 1,4 para injeção em uma extremidade do condutor, 1,55 para injeção no centro do condutor e 1,85 para o centro de uma configuração tipo estrela de quatro braços.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

NOTA Para o caso de injeção da corrente no centro do eletrodo ou no centro de uma estrela de quatro braços, o comprimento efetivo calculado com a constante *A* refere-se a cada um dos braços ou caminhos radiais do aterramento.

I.3.1.2 Cálculo do comprimento efetivo, L_e, em eletrodos horizontais – Modelo com ionização do solo

A Equação I.7, leva em conta o efeito da ionização do solo e o fato de que o fenômeno também tem um comportamento não linear com o pico da corrente. Nesta Equação, o cálculo de L_e também leva em conta o ponto de injeção da corrente no eletrodo e se aplica a eletrodos ou contrapesos enterrados a pelo menos 0,80 m.

$$L_e = \frac{A_{He} \times (\rho T)^{0,379}}{I^{0,097}} \text{m} \quad \text{(I.7)}$$

Sendo

I é o valor de pico da corrente, expresso em quiloampères (kA);

A_{He} uma constante que vale 6,528 para injeção em uma extremidade do condutor, 7,683 para injeção no centro do condutor e 8,963 para o centro de uma configuração tipo estrela de quatro braços.

NOTA Para o caso de injeção da corrente no centro do eletrodo ou no centro de uma estrela de quatro braços, o comprimento efetivo calculado com a constante A_{He} refere-se a cada um dos braços ou caminhos radiais do aterramento.

I.3.2 Impedância de surto de condutor horizontal com comprimento inferior ao comprimento efetivo

Deve-se obedecer ao prescrito a seguir:

a) sem ionização do solo ($E \leq E_0$):

$$R_s = R_{\text{cond}} \times e^{0,333\left(\frac{L}{L_e}\right)^{2,3}} \quad \text{(I.8)}$$

onde

R_s é a impedância ao surto de condutor de aterramento horizontal, com $L < L_e$, expressa em ohms (Ω);

R_{cond} é a resistência de aterramento do condutor horizontal, calculada pela Equação A.9, expressa em ohms (Ω);

L é o comprimento do condutor, expresso em metros (m);

L_e é o comprimento efetivo do condutor, calculado pela Equação I.6, expresso em metros (m);

b) com ionização do solo ($E > E_0$):

$$R_{s0} = R0_{\text{cond}} \times e^{0,333\left(\frac{L}{L_e}\right)^{2,3}} \quad \text{(I.9)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

onde

R_{s0} é a impedância ao surto de condutor de aterramento horizontal, com $L < L_e$, em solo ionizado, expressa em ohms (Ω);

R_{0cond} é a resistência de aterramento do condutor horizontal, em solo ionizado, expressa em ohms (Ω).

$$R_{0cond} = 0,366 \times \frac{\rho_a}{L} \times \left[\log\left(\frac{3 \times L}{2 \times d_o}\right) + \log\left(\frac{3 \times L}{8 \times p}\right) \right] \quad \text{(I.10)}$$

onde d_0 é o diâmetro efetivo do condutor, calculado conforme a Equação I.3, expresso em metros (m).

I.3.3 Impedância ao surto de condutor horizontal com comprimento superior ou igual ao comprimento efetivo

Deve-se atender ao prescrito a seguir:

a) sem ionização do solo ($E \leq E_0$):

$$R_s = 0,366 \times \frac{\rho_a}{L_e} \times \left[\log\left(\frac{3 \times L_e}{2 \times d}\right) + \log\left(\frac{3 \times L_e}{8 \times p}\right) \right] \quad \text{(I.11)}$$

onde R_s é a impedância ao surto de condutor de aterramento horizontal, com $L \geq L_e$, expressa em ohm (Ω).

NOTA Demais variáveis anteriormente definidas.

b) com ionização do *solo* ($E > E_0$):

$$R_{so} = 0,366 \times \frac{\rho_a}{L_e} \times \left[\log\left(\frac{3 \times L_e}{2 \times d_o}\right) + \log\left(\frac{3 \times L_e}{8 \times p}\right) \right] \quad \text{(I.12)}$$

onde R_{so} é a impedância ao surto de condutor de aterramento horizontal, com $L \geq L_e$, em solo ionizado, expressa em ohms (Ω).

NOTA Demais variáveis anteriormente definidas.

I.3.4 Avaliação do efeito redutor no modelo sem ionização do solo

Como exemplo, para uma injeção na extremidade de um condutor de $L = 25$ m, com 14,3 mm de diametro, em solo de resistividade $\rho = 200$ Ω.m e tempo de frente de surto $T = 1,2$ μs, o valor do comprimento efetivo, conforme a Equação I.13:

$$L_e = 1,4 \times \sqrt{240} = 21,7 \text{ m} \quad \text{(I.13)}$$

O efeito desta redução de comprimento pode ser avaliado da seguinte forma:

a) calcula-se a resistência do eletrodo horizontal, R_{elet}, enterrado a 0,80 m, de acordo com a Equação I.14:

$$R_{elet} = 0,366 \times \frac{\rho_a}{L} \times \left[\log\left(\frac{3 \times L}{2 \times d}\right) + \log\left(\frac{3 \times L}{8 \times p}\right) \right] \quad \text{(I.14)}$$

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Substituindo os valores, obtém-se $R_{elet} = 13,1\ \Omega$.

Sendo

R_{elet} é a resistência de aterramento do eletrodo horizontal expressa em ohms (Ω);

p é a profundidade do eletrodo, expressa em metros (m);

r é o raio do eletrodo, expresso em metros (m);

L e L_e são o comprimento e o comprimento efetivo do eletrodo;

b) a impedância de surto, obtida com o modelo sem ionização do solo, e calculada com a Equação I.11, resulta em 14,3 Ω.

Neste caso, o fato do comprimento efetivo ser menor que o comprimento L do eletrodo, leva a um aumento da impedância de surto, como resultado de nem todo o eletrodo participar da dissipação da corrente durante a parte inicial do surto.

I.3.5 Avaliação do efeito redutor no modelo com ionização do solo

Para os mesmos parâmetros usados no exemplo do modelo sem ionização do solo, e admitindo-se uma corrente de pico de 5 kA, 10 kA, 30 kA, tem-se:

$$L_e = \frac{6,528 \times (240)^{0,379}}{I^{0,097}} = 44,6 / 41,7 / 37,5\ \text{m} \quad \text{(I.15)}$$

Para impedância de surto, tem-se agora:

$$Z_0 = 13,1 \times e^{0,333\ (25/L_e)^{2,3}} = 14,3 / 14,5 / 15,0\ \Omega \quad \text{(I.16)}$$

mostrando que, em solos de baixa resistividade, a corrente se concentra mais no ponto de injeção, reduzindo o comprimento efetivo e, consequentemente, aumentando a impedância de surto do eletrodo.

Em solos de mais alta resistividade (por exemplo, de 2 000 Ω.m) o comprimento efetivo atingiria valor da ordem de 100 m, ficando a impedância de surto do eletrodo em 12,9 Ω, mostrando que a impedância de surto praticamente não varia com o aumento da corrente, estabilizando em um valor muito próximo do valor da resistência de aterramento.

I.4 Impedância ao surto de aterramentos com hastes alinhadas

O eventual efeito de ionização do solo é muito intenso no caso de eletrodos pontuais e hastes. Nos eletrodos horizontais dessa configuração de aterramento, a corrente dissipada no solo por unidade de comprimento não é expressiva, tornando-se desprezível para fins de ionização. Desta forma, em função dos comprimentos de hastes normalmente utilizadas, para fins de determinação dos gradientes de potencial no solo, deve ser utilizada a Equação I.2, considerando-se, para o cálculo da densidade de corrente, que a dissipação se processe somente pelas hastes.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

I.4.1 Sem ionização do solo ($E \leq E_0$)

A impedância ao surto de aterramentos com hastes alinhadas, sem ionização do solo, é igual ao valor de sua resistência de aterramento à frequência industrial, calculada conforme C.2.

I.4.2 Com ionização do solo ($E > E_0$)

Havendo a ionização do solo, a impedância ao surto de aterramentos com hastes alinhadas passa a ser determinada por:

$$R_{Nhso} = \frac{R_{hso}}{Ne_h}\left[1 + \frac{2 \times L\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + ... \frac{1}{N}\right)}{In\left(\frac{8 \times L}{d_o}\right) - 1}\right] \quad \text{(I.17)}$$

Sendo

R_{Nhso} é a impedância ao surto de N hastes alinhadas com ionização do solo, expressa em ohms (Ω);

R_{hso} é a impedância ao surto de uma haste com ionização do solo, calculada conforme a Equação I.5, expressa em ohms (Ω);

e_h é o espaçamento entre as hastes, expresso em metros (m);

L é o comprimento da haste, expresso em metros (m);

d_0 é o diâmetro efetivo da haste, calculado conforme I.3, expresso em metros (m).

A utilização da Equação I.17, conforme práticas nacionais e internacionais, mostra que a relação entre a impedância ao surto (R_{Nhso}) e a resistência de N hastes em frequência industrial (R_{NhP}), está na faixa de 0,85 a 0,60 (coeficiente de impulso).

Dependendo do nível da corrente de surto, quanto maior a corrente, menor a relação R_{Nhso}/R_{NhP} e, consequentemente, maior a redução experimentada.

Dependendo do número de hastes alinhadas (N) e para uma mesma corrente, quanto maior N, maior a relação R_{Nhso}/R_{NhP} e, consequentemente, menor a redução, notadamente para correntes mais elevadas.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Anexo J
(informativo)

Sistemas primários monofilares com retorno por terra (MRT)

J.1 Características do sistema MRT

As redes primárias no sistema monofilar com retorno por terra (MRT) são providas de um único condutor-fase que alimenta um ou mais transformadores de distribuição e o retorno da corrente é feita pelo solo. O circuito secundário é composto de três condutores (duas fases e neutro) nas tensões de 230/115 V.

J.2 Tipos de rede MRT

J.2.1 Rede “não isolada” da linha trifásica

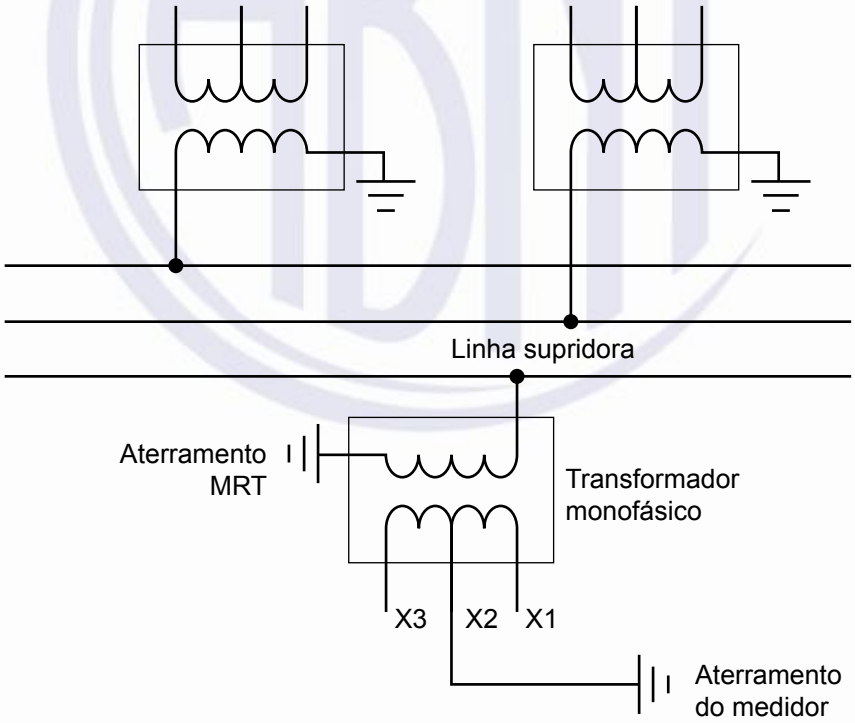


Figura J.1 – Rede monofilar não isolada da linha trifásica

A alimentação da rede do sistema MRT é feita diretamente de uma linha trifásica.

É imperativo que se proceda ao balanceamento das correntes no alimentador trifásico.

J.2.2 Rede “isolada” da linha trifásica

A rede do sistema MRT é alimentada por meio de um transformador de isolamento instalado na rede trifásica, proporcionando um seccionamento elétrico entre os dois sistemas.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Esta alternativa é apropriada a ramais com cargas mais significativas e onde a corrente de desequilíbrio à terra possa influenciar a proteção.

O dimensionamento do aterramento do transformador de isolamento deve ser feito de forma a atender às características de operação em regime de carga, sobrecarga e curto-circuito.

A Figura J.2 mostra este tipo de rede.

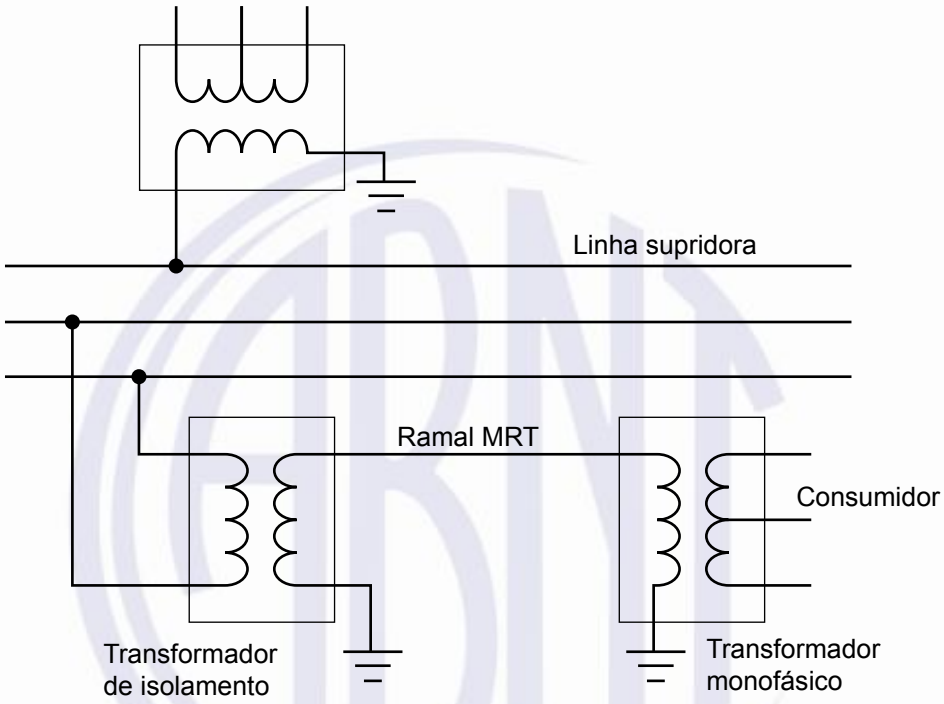


Figura J.2 – Rede monofilar isolada da linha trifásica

J.3 Valores admissíveis em aterramentos MRT

Na Tabela J.1, são encontrados os valores de resistência que satisfazem o nível máximo de elevação do potencial entre eletrodo de aterramento e solo, para transformadores MRT até 25 kVA (consideradas suas correntes de carga nominais). Utilizou-se, para cálculo da Tabela J.1, a relação 26,67 Ω/corrente de carga do transformador.

Tabela J.1 – Valores recomendados de resistência de aterramento

Transformador MRT (kVA)	**Resistência** (Ω)	
	13,8/√ 3 kV	**34,5/√ 3 kV**
5	42,5	100 Ω
10	21,2	53,1
15	14,2	35,4
25	8,5	21,2

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

É importante destacar que, nos casos de solos com alta resistividade, projetos específicos que resultem em valores de resistência de aterramento superiores aos recomendados podem ser desenvolvidos, desde que respeitados os limites adequados para os gradientes de potencial de superfície.

J.4 Construção de aterramentos MRT

J.4.1 A construção do aterramento no sistema MRT deve obedecer rigorosamente ao projeto, sendo necessário o acompanhamento criterioso tanto no que diz respeito à qualidade dos materiais quanto no que diz respeito à mão de obra, a fim de não comprometer a segurança do local onde se encontra o poste do transformador.

J.4.2 Após a construção, devem ser feitas as medições da resistência de aterramento e dos potenciais de superfície; na condição de não serem obtidos os valores projetados, o processo deve ser encaminhado para reavaliação.

J.4.3 Na ocorrência de elevados potenciais de superfície na região do aterramento primário, podem ser avaliadas (seja na etapa de construção seja em uma futura manutenção):

— a necessidade de colocação de camada de brita, em uma espessura e extensão a serem definidas em função da configuração do aterramento e do tipo de potencial excedido (se toque ou passo);

— a necessidade de equalização de potenciais pela colocação de um anel equalizador de 1 m de raio concêntrico ao poste e ligado ao aterramento primário, em uma profundidade de 0,50 m, caso o potencial excedido seja o de toque.

J.4.4 O condutor de aterramento não pode possuir emenda, desde o para-raios até a conexão com o eletrodo de aterramento.

J.4.5 Para ligação da carcaça do transformador, deve-se confeccionar somente uma derivação do condutor de aterramento, com o menor comprimento possível.

J.4.6 O condutor de aterramento deve ser protegido adequadamente até a altura de 3 m do solo, por moldura protetora ou eletroduto de pvc rígido de ¾” de diâmetro.

J.4.7 De modo a garantir maior confiabilidade na manutenção da ligação à terra do sistema, deve-se confeccionar uma segunda prumada, ligada ao condutor de aterramento proveniente do transformador e também protegida adequadamente até a altura de 3 m do solo. As duas prumadas devem ser interligadas acima das molduras protetoras ou eletrodutos de PVC.

Nas Figuras J.3 a J.8, são apresentados os detalhes das ligações das duas prumadas ao eletrodo de aterramento, de acordo com a configuração deste.

A Figura J.3 mostra um aterramento com várias hastes alinhadas em uma única direção. As duas primeiras hastes, denominadas “A” e “B”, devem estar equidistantes do centro da configuração. Na impossibilidade de se efetuar aterramento simétrico com relação ao poste, deve ser cravada pelo menos uma haste em um dos lados.

Se houver hastes emendadas no centro do anel, estas devem ser unidas ao anel “A^1”, conforme mostrado na Figura J.8.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

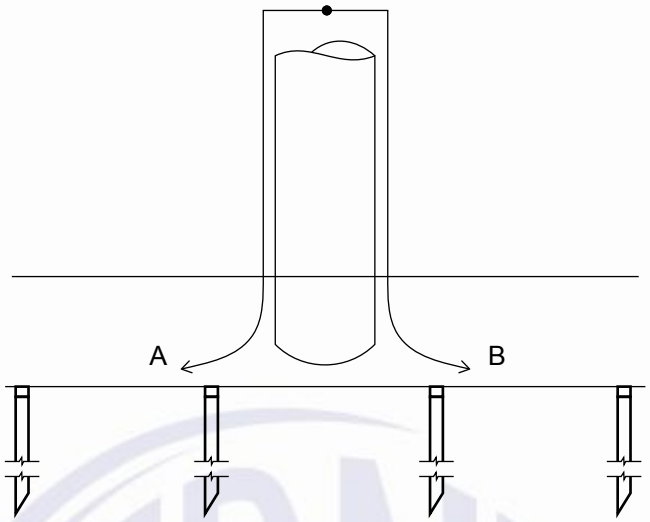


Figura J.3 – Aterramento com hastes alinhadas em uma única direção

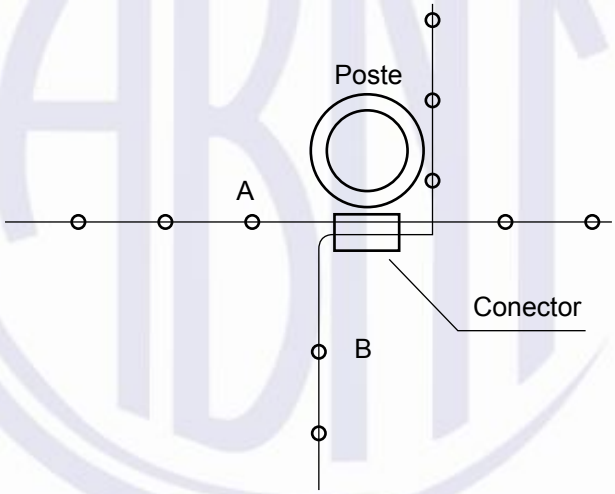


Figura J.4 – Aterramento com hastes alinhadas em mais de uma direção

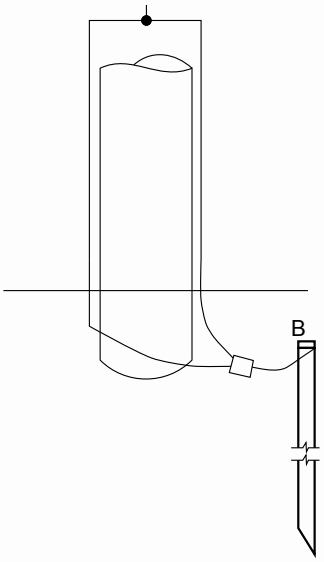
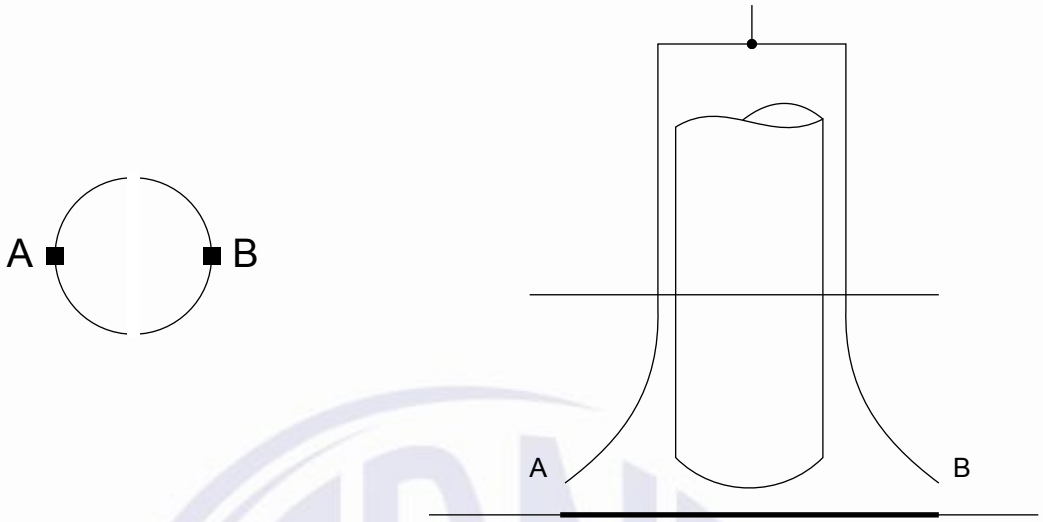


Figura J.5 – Aterramento com uma ou mais hastes emendadas

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

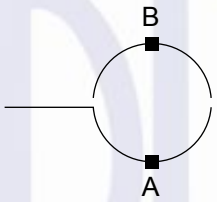
Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

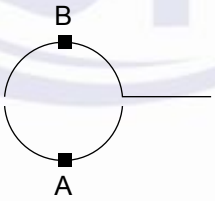


a) Vista frontal b) Vista lateral

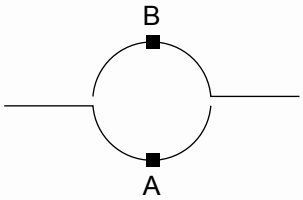
Figura J.6 – Associação de condutor (ou hastes alinhadas) com anel



a) Rabicho extra na esquerda



b) Rabicho extra na direita



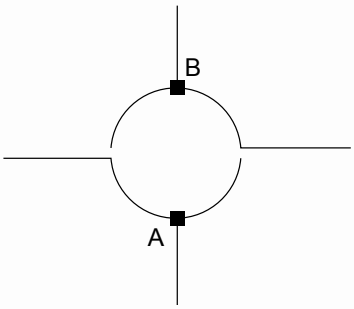
c) Rabichos extras na esquerda e na direita

Figura J.7 (continua)

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

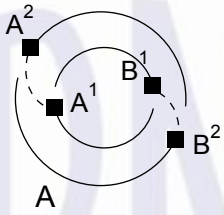
© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

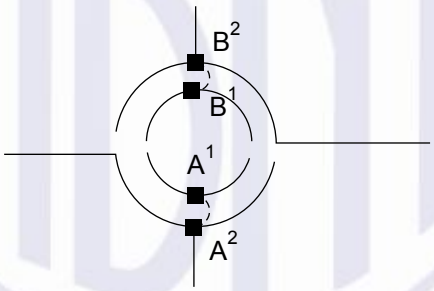


d) Rabichos extras em todas direções

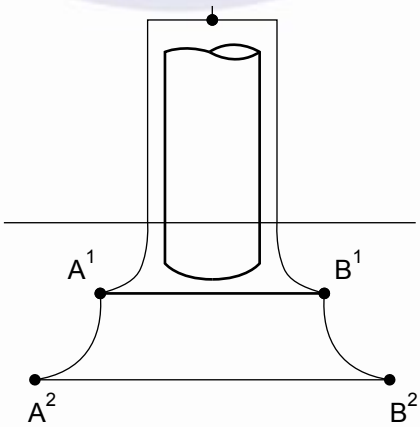
Figura J.7 – Associação de condutor (ou hastes alinhadas) com anel



a) Aterramento com mais de um anel



b) Aterramento com mais de um anel e rabichos extras em todas direções



c) Vista lateral

Figura J.8 – Associação de condutor (ou hastes alinhadas) com anel

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

J.5 Acompanhamento das instalações

J.5.1 Precauções devem ser tomadas quando de um eventual rompimento simultâneo das duas prumadas de aterramento; a principal delas, e imediata, é evitar o contato de pessoas ou animais com a estrutura do transformador, pelo fato da parte superior das prumadas rompidas permanecer energizada com tensão de fase.

J.5.2 No primeiro ano de confecção do aterramento, devem ser efetuadas as medições de resistência e potenciais de superfície.

J.5.3 Rápidas inspeções visuais devem ser realizadas sempre que o corpo técnico dirigir-se ao local.

J.5.4 A frequência de verificação é inversamente proporcional à resistividade elétrica do solo e diretamente proporcional à solicitação do aterramento por correntes de falta e surtos, nunca podendo ultrapassar o período de vida útil projetada dos elementos que compõem o sistema de aterramento. Assim, devem ser realizadas medições sempre que surgirem indícios de que o sistema de aterramento distancia-se dos objetivos para os quais foi projetado.

J.5.5 Como a resistividade do solo varia diretamente com a quantidade de água contida no solo e com a resistividade desta água, as medições devem ser executadas preferencialmente em período seco, ou após pelo menos três dias consecutivos sem chuva, para a realização das medições.

J.5.6 Deve ser feita, a cada três anos, uma inspeção na qual se comprovem as características elétricas principais do aterramento, no que se refere notadamente à estabilidade do valor de resistência de aterramento ao longo do tempo, à sua capacidade de condução de corrente de regime e de falta e ao seu desempenho frente às sobretensões originárias de surtos atmosféricos que o atingiram.

J.5.7 Do ponto de vista mecânico, essa inspeção deve avaliar o comportamento do material do aterramento face à corrosão imposta pelas características do solo no qual se encontra instalado, possíveis rompimentos do condutor de aterramento, dobramento ou flambagem das hastes e danificação das conexões durante sua vida útil projetada.

J.6 Avaliação técnica dos níveis aceitáveis de segurança para aterramentos

Os procedimentos a) a f), tem como objetivos e critérios, verificar os níveis de potenciais na superfície do solo, gerados pela passagem de corrente pelo aterramento MRT.

a) medir a tensão de passo ou toque, injetando-se no aterramento uma corrente entre 0,3 A e 0,6 A (medir a corrente para se ter o valor exato) ligando uma carga de 2,5 kW a 5,0 kW no secundário do transformador MRT;

b) medir a resistência de aterramento;

c) calcular a corrente de curto-circuito fase-terra mínima;

d) referir-se à tensão de passo ou toque medida para a corrente de curto-circuito calculada;

EXEMPLO

0,4 A a corrente injetada no aterramento MRT;

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

1,25 V a tensão de passo obtida entre dois pontos do solo distanciados em 1 m (V_{passo} medida);

80 A a corrente de curto-circuito fase-terra mínima calculada no ponto (I_{ccftm});

A tensão de passo ($V_{passo)}$ extrapolada para a corrente de curto-circuito é:

$$V_{passo} = V_{passo}\ \text{medida} \cdot I_{ccftm} / 0{,}4\ \text{A} = 1{,}25 \cdot 80 / 0{,}4 = 250\ \text{V}.$$

e) Tensões de passo e de toque devem ser calculadas respectivamente, por meio das Equações J.1 e J.2:

$$V_{passo} = (116 + 0{,}696\ \rho_s) / \sqrt{t} \quad \text{(volt)} \qquad \text{(J.1)}$$

$$V_{toque} = (116 + 0{,}174\ \rho_s) / \sqrt{t} \quad \text{(volt)} \qquad \text{(J.2)}$$

A partir destas equações podem ser estabelecidas correlações entre tensões máximas admissíveis (passo e toque), resistividade superficial (ρ_s) e tempo total de atuação da proteção (t), na forma de planilha de cálculo ou ainda na forma gráfica (gráficos de “tensões de passo admissíveis” e “tensões de toque admissíveis”, conforme mostrado nas Figuras J.9 e J.10.

f) a análise dos resultados pode ser feita tanto na forma de planilha como na forma gráfica.

Na forma de planilha, com a resistividade superficial (Ω.m) e o tempo de atuação da proteção (segundos), obtém-se as tensões admissíveis para toque e passo.

As tensões de toque e passo extrapoladas para os valores reais devem ser inferiores aos valores admissíveis.

Na forma gráfica, com o valor da tensão (V) e a resistividade superficial (Ω.m), determina-se um ponto no gráfico das tensões permissíveis. Caso este ponto se situe acima da curva de tempo total de atuação da proteção, os potenciais de passo ou toque estão fora dos níveis de segurança.

Nessa situação, algumas alternativas podem ser analisadas, para que os valores das tensões fiquem dentro dos níveis aceitáveis de segurança, conforme a seguir:

— diminuir os ajustes de tempo de atuação das proteções: consequentemente, diminui-se o tempo de exposição a essas tensões, sendo necessário também reavaliar o coordenograma do alimentador como um todo;

— trabalhar o aterramento em sua configuração para homogeneizar as tensões nos pontos críticos; consequentemente, ocorre a diminuição principalmente da tensão de passo;

— isolar o condutor de descida até a altura de 3 m do solo quando houver problema de potencial de toque;

— trabalhar o solo de forma a aumentar o valor da resistividade da camada superficial.

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

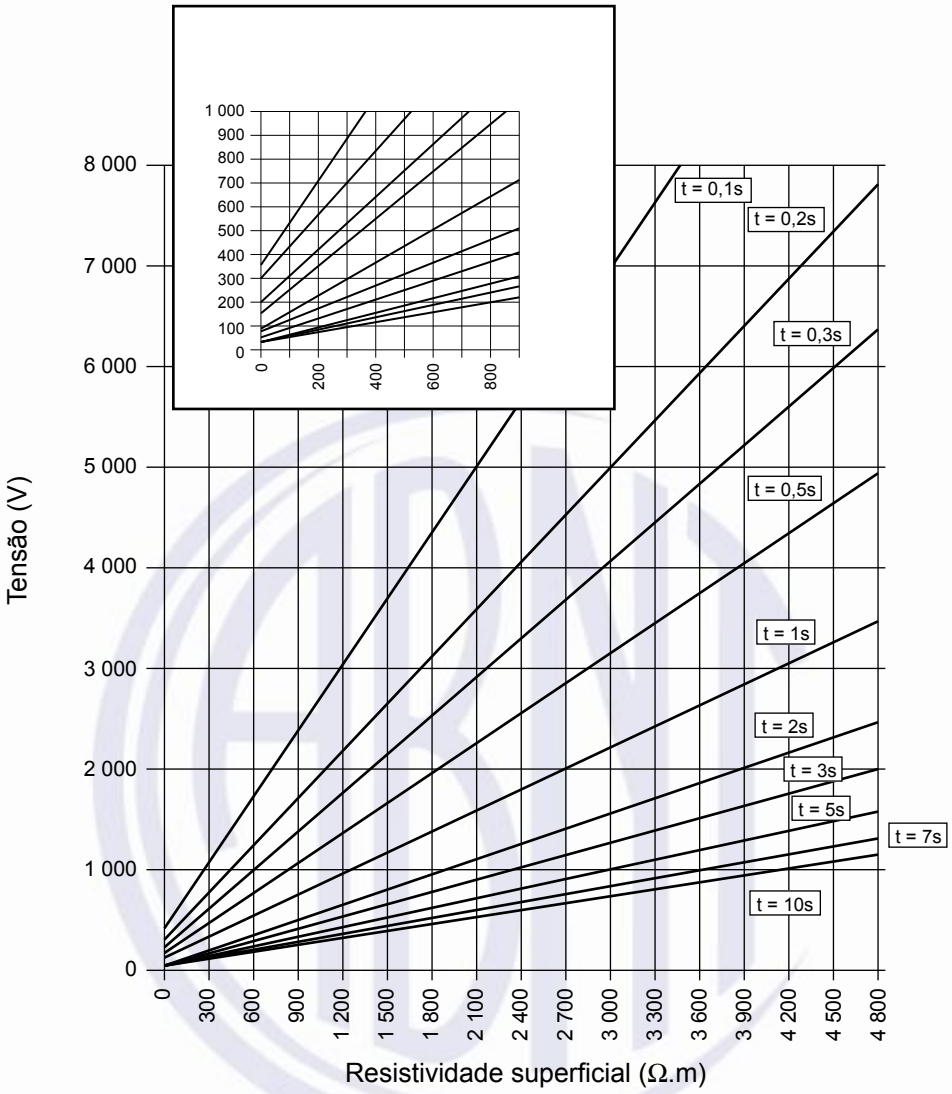


Figura J.9 – Tensões de passo admissíveis

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

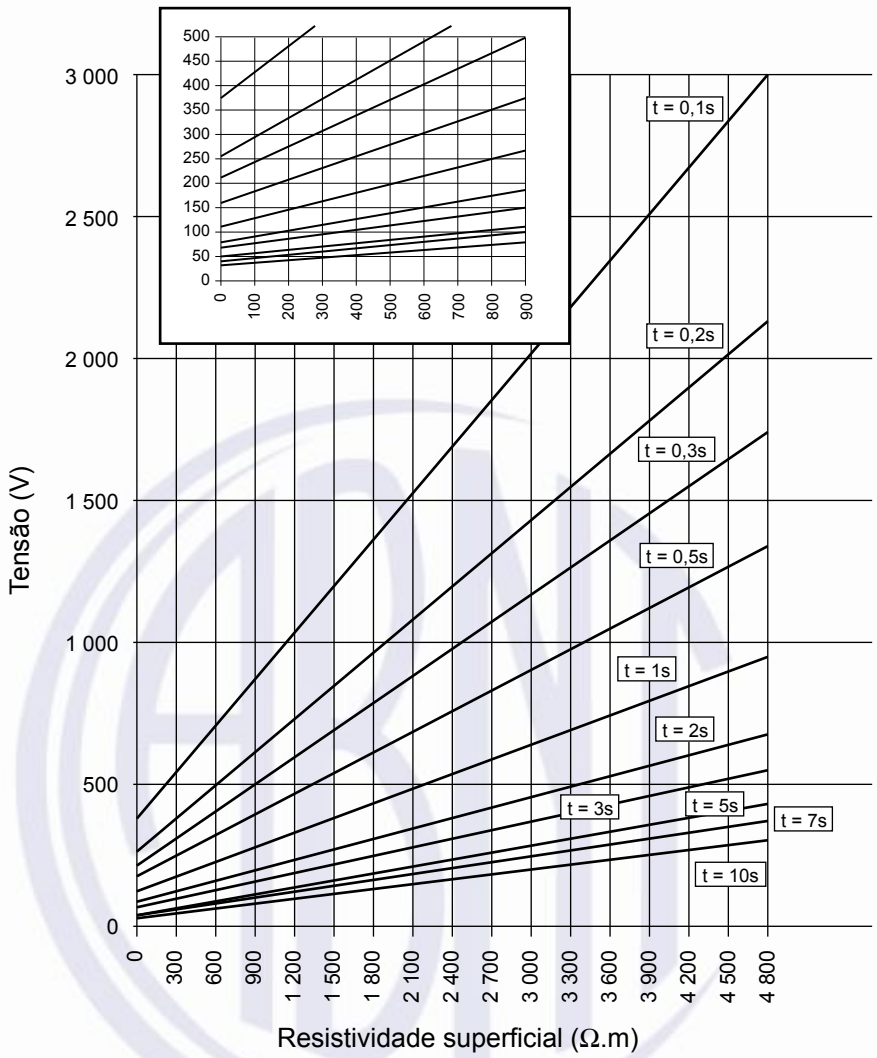


Figura J.10 – Tensões de toque admissíveis

J.7 Exemplo de aplicação

Na situação de regime, as tensões de passo ou toque devem ser inferiores a 12 V/m, para segurança de animais quadrúpedes.

O aterramento apresenta condições de segurança na situação de falta.

Os dados de entrada são os seguintes:

a) carga a ser atendida por um transformador MRT de potência 15 kVA;

b) corrente de curto-circuito fase-terra mínima no ponto (I_{ccftm}) = 100 A;

c) tempo de atuação da proteção = 7 s;

d) resistividade superficial do solo local = 3 600 Ω m;

e) corrente injetada no sistema de aterramento = 0,6 A;

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

f) tensão de passo medida = 1,8 V;

g) tensão de toque medida = 1,2 V.

J.7.1 Segurança para animais na situação de regime

Calculando a corrente nominal com carregamento de 180 % (ou 156 % ou 140 %) do transformador monofásico de 15 kVA, 13 800 /√3 V, tem-se no primário:

$$I_{\text{primário}(180\ \%)} = \frac{1\,500}{13\,800 / \sqrt{3}} 1{,}8 = 2{,}64$$

Verificar se os potenciais de passo e toque medidos neste aterramento estão dentro dos níveis de segurança para a condição de sobrecarga de 180 %:

$V_{\text{passo}} = 1{,}8(\text{V}) \times 2{,}64(\text{A})/0{,}6\ (\text{A}) = 7{,}92$ V, abaixo, portanto, dos 18 V recomendados.

$V_{\text{toque}} = 1{,}2(\text{V}) \times 2{,}64(\text{A})/0{,}6\ (\text{A}) = 5{,}28$ V, também abaixo dos 18 V recomendados.

J.7.2 Segurança do aterramento na situação de falta

Para atingir a condição de segurança, o ponto determinado pela resistividade superficial e tensão de passo máxima admissível/ tensão de toque máxima admissível deve estar abaixo da curva identificada pelo tempo total de atuação da proteção nos gráficos “Tensões de passo admissíveis”/“Tensões de toque admissíveis”, respectivamente.

Referindo-se às tensões de passo e de toque medidas de 1,8 V e 1,2 V, respectivamente, para a corrente de curto-circuito fase-terra mínima (I_{ccftm} = 100 A), tem-se:

$V_{\text{passo}} = 1{,}8\ (\text{V}) \times 100\ (\text{A})/0{,}6\ (\text{A}) = 300$ V.

$V_{\text{toque}} = 1{,}2\ (\text{V}) \times 100\ (\text{A})/0{,}6\ (\text{A}) = 200$ V.

Com as tensões de passo e toque referidas e sabendo que a resistividade superficial é 3 600 Ω m, devem-se localizar os pontos nos respectivos gráficos.

a) gráfico de tensões de passo admissíveis (300 V, 3 600 Ω m);

b) gráfico de tensões de toque admissíveis (200 V, 3 600 Ω m).

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

Para o tempo solicitado de atuação da proteção de 7 s, verifica-se que os pontos localizados nos gráficos estão abaixo das curvas correspondentes a 7 s, implicando o aterramento seguro para a condição de falta.

J.7.3 Conclusão

Conclui-se, assim, que o aterramento é viável sob os aspectos de segurança, tanto para a condição de regime como para a condição de falta.

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

Bibliografia

[1] ABNT NBR 6939, *Coordenação do isolamento – Procedimento*

[2] ABNT NBR 10676, *Fornecimento de energia a edificações individuais em tensão secundária – Rede de distribuição aérea*

[3] ABNT NBR 13571, *Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios – Especificação*

[4] ABNT NBR 14039, *Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV*

[5] IEC-479, *Effects of current passing through the human body, 1974*

[6] IEEE-STD-80, *IEEE guide for sagety in alternating-current substation grounding, 1976*

[7] Abdul M. Mousa, The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No3, July 1994

[8] Jinliang He, Effective Length of counterpoise wire under lightning current, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.20, No2, April 2005

[9] Gupta-Thapar, Sem ionização do solo, IEEE 1978

Arquivo de impressão gerado em 31/10/2024 16:09:22 de uso exclusivo de FACULDADES INTEGRADAS CARAJAS S/C LTDA [11.306.033/0001-80]

© ABNT 2016 - Todos os direitos reservados