METRÔ - DF	ENGEVIX	CODIFICAÇÃO ENGEVIX P00160/01-5N-MC-0601-0

SETOR	GERAL
ENDEREÇO	PEE Hípica, SR 63 e ESTAÇÕES 28, 29, 35, 36 e 41
PROPRIETÁRIO	METRÔ - DF
AUTOR DO PROJETO	LORREINE IRIA LAUBE
RESPONSÁVEL TÉCNICO	

METRÔ - DF

LORREINE IRIA LAUBE CREA N° 071607-2

METRÔ - DF

SISTEMA ENERGIA		
SUB-SISTEMA SISTEMA DE ATERRAMENTO		
VISTO	DATA 19/09/13	LOCAL EXPANSÃO METRÔ - DF – PEE Hípica, SR 63, ESTAÇÕES 28, 29, 35, 36 e 41
APROVADO	DATA 08/01/15	COMPONENTES /TIPO DE DOCUMENTO MEMÓRIA DE CÁLCULO AREA DE CONST. -
ESCALA **S/ESC.**	ETAPA DO PROJ. Básico	
N MICROFILME	FOLHA 1/38	CODIFICAÇÃO **MC.4/EX.99/10.601** REVISÃO **1**

1	APROVADO CONFORME PARECER 0001/15-TPR	08/01/15	LIL	LBP	ITF			
0D	REVISÃO CONFORME PARECER 0533/14-TPSF-ENERGIA	18/12/14	LIL	LBP	ITF			
0C	REVISÃO CONFORME PARECER 022/14-TPSF-ENERGIA	21/08/14	LIL	LBP	ITF			
0B	REVISÃO CONFORME PARECER 066/13-TDME-ENERGIA	25/07/14	LIL	LBP	ITF			
0A	REVISÃO CONFORME PARECER 041/13-TDME	24/09/13	LIL	LBP	ITF			
0	EMISSÃO INICIAL	19/09/13	LIL	LBP	ITF			
N°	MODIFICAÇÃO	DATA	FEITO	VISTO	APROV	DATA	VERIF.	APROV
		CONTRATADA				**METRÔ - DF**		
R E V I S Õ E S								

METRÔ - DF
MC.4/EX.99/10.601

MEMÓRIA DE CÁLCULO

SISTEMA DE ENERGIA
PROJETO BÁSICO

SUMÁRIO

1 OBJETIVO 6

2 REFERÊNCIAS 6

3 NORMAS TÉCNICAS 6

4 DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA DE ATERRAMENTO DE MÉDIA TENSÃO - MT 7

4.1 Correntes de Defeito a Terra 7

4.2 Resistividade do Solo 7

4.3 Critérios de dimensionamento dos condutores principais das malhas de aterramento 7

4.4 Seção transversal dos condutores 8

5 DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DE MÉDIA TENSÃO - MT 10

5.1 Cálculo das tensões permissíveis 10

5.2 Estratificação do Solo 10

5.2.1 Dados de entrada para a estratificação 11

5.3 Tensão de Passo e Toque Permissível 16

5.3.1 Tensão de Passo Permissível 16

5.3.2 Tensão de Toque Permissível 18

5.4 Cálculo da resistividade aparente do solo 19

5.5 Cálculo da Resistência de Aterramento 22

5.6 Cálculo da Corrente de Malha 23

5.7 Cálculo das tensões de toque 26

5.8 Cálculo das tensões de passo 28

5.9 Projeto da malha 30

5.10 Potenciais de Passo e Toque Calculados 33

5.11 Verificação dos potencias 33

TENSÃO DE TOQUE 33

TENSÃO DE PASSO 34

6 CONCLUSÃO 34

7 TENSÃO DO CORPO E TENSÃO DE TOQUE EM SISTEMAS DE TRAÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA 34

8 PROTEÇÃO CONTRA OS PERIGOS DA ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DO TERRA DE VIA (TV) EM RELAÇÃO AO (TEE) - PREMISSAS A SEREM VERIFICADAS E OBRIGATORIAMENTE OBEDECIDAS 36

9 CONCLUSÕES DO SISTEMA DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA 37

1 OBJETIVO

O presente documento tem por objetivo apresentar o dimensionamento preliminar da malha de aterramento da média tensão da Expansão do Metrô - DF - Extensão Ceilândia (Subestações Auxiliares 28 e 29 nas Estações 28 e 29, respectivamente), Extensão Samambaia (Subestações Auxiliares 35 e 36 nas Estações 35 e 36, respectivamente e Subestação Retificadora 63), Extensão Asa Norte (Subestação Auxiliar 21 na Estação 41) e o Painel de Entrada de Energia (PEE) da Hípica. Determinam-se também a tensão acessível e de toque trilho-solo nas estruturas citadas.

A elaboração desta memória de cálculo contou com o suporte do Engenheiro e Consultor Galeno Lemos Gomes.

2 REFERÊNCIAS

[1]. RT.4/EX.99/00.015 - Estudo de Nível de Curto-circuito em Corrente Alternada – Trecho Expansão.
[2]. RT.4/EX.99/00.016 - Estudo de Nível de Curto-circuito em Corrente Alternada – Trecho Modernizado.
[3]. BRASMETRÔ – Projeto Conceitual do Sistema de Aterramento Geral do Metrô – DF.
[4]. RT.4/EX.99/10.603 – Sistema de Aterramento – Medição de Resistividade do Solo.
[5]. RT.4/EX.99/10.601 – Sistema de Aterramento – Estudo Técnico.
[6]. DG.4/EE.99/00.101 – Sistema de Energia – Rede Alimentação 13,8kV – Diagrama Unifilar.
[7]. NTD-1.05 – Norma Técnica da CEB Distribuição – Critérios de Projeto e Padrões de Construção de Estações Transformadoras.
[8]. NTD-1.04 – Norma Técnica da CEB Distribuição – Critérios de Projeto e Padrões de Construção de Rede de Distribuição Subterrânea.
[9]. DE.4/28.1N/E1.005 – Arquitetura – Estação 28 – Cortes Transversais AA e BB.
[10]. DE.4/29.1P/E1.010 - Arquitetura – Estação 29 – Cortes CC e DD.
[11]. DE.4/35.7G/E1.008 - Arquitetura – Estação 35 – Cortes Transversais AA e BB.
[12]. DE.4/36.7H/E1.005 - Arquitetura – Estação 35 – Cortes Transversais AA e BB.
[13]. DE.4/41.6M/E1.004 - Arquitetura – Estação 35 – Cortes Longitudinal CC.
[14]. DE.4/91.7G/E1.004 - Arquitetura – Subestação Retificadora 63 – Cortes.
[15]. DE.4/EE.10/00.102 – Rede de Alimentação 13,8 kV – PEE Hípica.

3 NORMAS TÉCNICAS

O dimensionamento do sistema de aterramento baseia-se nas recomendações das seguintes normas técnicas:

[1]. NBR 15751/2013 – Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos.

[2]. EN 50122-1:2011 - Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock.

[3]. EN 50122-2:2010 - Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems.

[4]. NBR 7117-2012 – Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.

4 DADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DO CONDUTOR DA MALHA DE ATERRAMENTO DE MÉDIA TENSÃO - MT

4.1 Correntes de Defeito a Terra

a) Barras de 13,8 kV das Subestações Retificadoras e PEE Hípica

As correntes de curto-circuito calculadas nas barras de 13,8 kV das Subestações Retificadoras e PEE Hípica são mostradas nos documentos das referências [1] e [2] respectivamente.

Considerou-se a maior corrente de curto-circuito fase-terra dos estudos supracitados, apresentada na Tabela 1/coluna If (kA) deste documento, para estabelecer a seção do condutor de cobre da malha de cada uma das subestações da expansão do Metrô - DF.

b) Barras de 750 Vcc das Subestações Retificadoras

Por se tratar de um sistema isolado, o Sistema de Corrente Contínua não contribui para um curto-circuito absorvido pelo sistema de aterramento das Subestações de Média Tensão, Retificadoras e Auxiliares.

4.2 Resistividade do Solo

As resistividades do solo (ρ) consideradas foram conforme medições realizadas e apresentadas na referência [4].

É obrigatória e imprescindível a realização de novas medições da resistividade na fase do Projeto Executivo, para que essas não sejam afetadas por elementos desconhecidos e reflitam o perfil real do solo, ou seja, sejam realizadas com o terreno terraplenado.

4.3 Critérios de dimensionamento dos condutores principais das malhas de aterramento

As malhas de aterramento englobam a Subestação Retificadora, Subestação Auxiliar, sala de controle, sala técnica e sala de baterias contidas nas estações de passageiros 28, 29, 35, 36, 41 e SR 63.

Foi prevista também, uma malha de aterramento para a PEE Hípica, onde estarão instalados os cubículos de medição CEB, cubículos dos alimentadores das SRs 03, 04, 05 e 06, os filtros de harmônicos e os cubículos de proteção destes filtros.

Para o cálculo da seção do condutor da malha de terra, foram adotados os parâmetros da norma técnica [1] e conceitos apresentados na referência [5].

Seguem abaixo os critérios adotados:

- O tempo de duração da corrente de curto-circuito adotado para o dimensionamento da seção transversal dos condutores e cálculo dos potenciais máximos permissíveis foi de 500 ms. Cabe ressaltar que este tempo de duração do curto-circuito estabelecido no Projeto Básico está baseado no tempo de atuação da proteção em 500ms, valor este considerado conservador. Valores menores podem ser verificados quando no Projeto Executivo for elaborado o Estudo de Coordenação e Seletividade;
- A temperatura ambiente adotada para o cálculo da seção transversal dos condutores foi de 40ºC. A temperatura ambiente de 40°C foi considerada de forma conservadora, pois quanto menor essa temperatura, menor seria a seção do condutor calculada. Dados históricos observados no INMET desde 1960 até 2014 nunca ultrapassaram os 40°C estabelecidos no Distrito Federal;
- A temperatura máxima adotada para o cálculo da seção transversal dos condutores foi de 850ºC (temperatura máxima suportável por conexões por solda exotérmica), conforme norma técnica [1];
- O valor da massa do corpo humano para cálculo dos máximos potenciais permissíveis foi para o peso de 50 Kg, condição mais conservativa, conforme norma técnica [1];
- A temperatura máxima adotada para o cálculo da seção transversal dos condutores de aterramento dos equipamentos foi igual a 250ºC (temperatura máxima suportável por conexões mecânicas), conforme norma técnica [1];
- Todos os condutores da malha de aterramento serão de cobre nu meio duro, conforme norma técnica [1].

4.4 Seção transversal dos condutores

Para o dimensionamento do condutor, será considerada a falha a terra em kA de maior contribuição, encontrada na referência [1] e [2], com o intuito de proteger o sistema para a situação mais grave.

Diante disto, o valor de corrente de curto-circuito será calculado com base na equação de Onderdonk da norma técnica [1]:

$$S = I_f * \sqrt{\frac{t * \alpha_r * \rho_t * 10^4}{TCAP * \ln(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a})}}$$

Onde:

- S é a seção, expressa em mm²;
- If é a corrente de falta fase-terra, expressa em kA, da referência [1], apresentada na Tabela 1;
- t é o tempo, expresso em s. t = 0,5s;
- α_r É o coeficiente térmico de resistividade do condutor a t °C (°C^{-1}), conforme norma técnica [1]. α_r =0,00381°C^{-1};

- ρ_t é a resistividade do condutor de aterramento a t °C, expressa em Ω.cm, conforme norma técnica [1]. ρ_t =1,777 Ω.cm;
- TCAP é o fator de capacidade térmica, expressa em J/cm³.°C, conforme norma técnica [1]. TCAP=3,422 J/cm³.°C;
- T_m é a temperatura máxima suportável, expressa em °C, conforme Tabela 2 da norma técnica [1]. T_m=250ºC (emenda mecânica) e T_m=850°C(emenda com solda exotérmica);
- T_a é a temperatura ambiente, expressa em °C T_a = 40°C;
- $_{k0}$ = 1/ α_0 = 242,13, conforme norma técnica [1] ;
- $_{k0}$ é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0°C, conforme norma técnica [1].

Na Tabela 1 são apresentadas as dimensões adotadas para os condutores de cada malha de aterramento.

Tabela 1 - Dimensionamento da seção transversal dos condutores da malha de aterramento

ESTAÇÃO	SR - Subestação Retificadora	Tensão V	If [kA]	S [mm²] Tmáx=250°C	S [mm²] Tmáx=850°C
E28	SR15	13.800	3,50	14,76	9,46
E29	SR16	13.800	4,94	20,83	13,36
E35	SR64	13.800	1,99	8,39	5,38
E36	SR65	13.800	2,64	11,13	7,14
E41	SR21	13.800	2,35	9,91	6,35
SR63	SR63	13.800	1,79	7,55	4,84
PEE Hípica		13.800	8,50	35,84	22,98

Como o valor da seção calculada através da equação de Onderdonk para as estações 28, 29, 35, 36, 41, SR63 e PEE Hípica resultou num valor inferior ao estabelecido na norma técnica NBR 15751/2013 – Sistemas de Aterramento de Subestações – Requisitos, deve ser utilizada a seção mínima estabelecida de 50 mm² para os cabos da malha de aterramento.

Condutores de acesso à malha

Subestações Auxiliares – Equipamentos Principais

Para o aterramento da carcaça, neutro e terra do secundário dos Transformadores de Serviços Auxiliares, conexão do PNCA ao QA, QA ao TEE utilizar cabo isolado de cobre de 120 mm² conforme Memória de Cálculo MC.4/EC.XX/00.401e indicado nos diagramas esquemáticos DG.4/EX.XX/10.601.

A conexão da malha de aterramento aos cabos terra longitudinais deverá ser feita através de cabo isolado de cobre 120 mm² pelo fato de estar submetida ao mesmo curto-circuito quando de uma contingência nos transformadores de serviços auxiliares.

Para o completo detalhamento da conexão e seção dos condutores terra ao QA ver o estudo da referência [5] e os diagramas esquemáticos DG.4/EX.XX/10.601.

Subestações Retificadoras – Equipamentos Principais

Para conexão das partes metálicas dos transformadores de média tensão dos grupos retificadores de tração, das estruturas metálicas dos cubículos de média tensão utilizar cabo isolado de cobre de 120 mm² conforme Memória de Cálculo MC.4/EB.XX/00.201e indicado nos diagramas esquemáticos DG.4/EX.XX/10.602.

Para o completo detalhamento da conexão e seção dos condutores terra ao QA ver o estudo da referência [5] e os diagramas esquemáticos DG.4/EX.XX/10.602.

Sala de Controle e Sala Técnica

As seções dos condutores de aterramento de carcaça de painéis e quadros ao TEE estão conforme MC.4/EX.99/10.601 e indicadas nos diagramas esquemáticos DG.4/EX.XX/10.603.

PEE Hípica

Como a malha de aterramento da PEE Hípica foi calculada para a total corrente de curto-circuito(8,5 kA falta no 13,8 kV) neste local conforme referência [2], para conexão das partes metálicas dos filtros de harmônicos, parte metálica dos cubículos de proteção dos filtros e cubículos dos alimentadores das SRs 03, 04, 05 e 06 na PEE Hípica, utilizar o mesmo cabo de cobre isolado da malha de aterramento de seção 50 mm².

5 DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE ATERRAMENTO DE MÉDIA TENSÃO - MT

5.1 Cálculo das tensões permissíveis

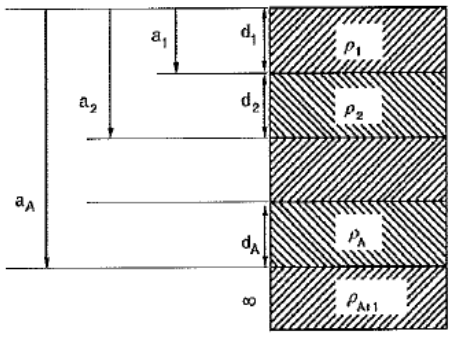
Conforme norma técnica [1], para um sistema de aterramento ser considerado seguro para qualquer condição de defeito, é necessário estabelecer os valores máximos permissíveis para a tensão de passo e toque.

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

Os resultados das tensões de passo e toque permissíveis são apresentados no item 5.3.

5.2 Estratificação do Solo

Conforme a norma técnica [4], em geral, o solo é constituído por diversas camadas, cada uma apresentando certo valor de resistividade e uma espessura própria. A estratificação do solo é, portanto, a determinação dos valores dessas resistividades e dos números e espessuras destas camadas, conforme Figura 1:



Legenda

ρ_1	Resistividade da primeira camada	d_1	Espessura da primeira camada
ρ_2	Resistividade da segunda camada	d_2	Espessura da segunda camada
ρ_A	Resistividade da camada A	d_A	Espessura da camada A
ρ_{A+1}	Resistividade da camada A+1	∞	Infinito
a_1	Profundidade até a segunda camada	a_2	Profundidade até a terceira camada
a_A	Profundidade até a camada A + 1		

Figura A.6 – Estratificação do solo em *n* camadas

Figura 1 - Estratificação do Solo em n camadas

Com a auxílio do software TecAt Plus para cálculo da resistividade e estratificação do solo, obtém-se os valores correspondentes a resistividade aparente de cada camada e a profundidade das mesmas, procedemos ao ajuste da curva padrão correspondente a estratificação do solo em camadas, utilizando o método de ajuste de funções não lineares aos valores e resistividades calculados em cada profundidade e definindo os pontos de inflexão na curva ajustada das resistividades que definem as camadas representativas do solo.

5.2.1 Dados de entrada para a estratificação

- Medição de Resistividade do solo conforme item subitem 4.2 deste documento
- Profundidade da malha:

Estação 28: 1,5 m de concreto (laje de fundo + enchimento), conforme referência [9].

Estação 29: 1,5 m de concreto (laje de fundo + enchimento), conforme referência [10].

Estação 35: 0,7 m de concreto (laje de fundo + enchimento), conforme referência [11].

Estação 36: 0,7 m de concreto (laje de fundo + enchimento), conforme referência [12].

Estação 41: 0,75 m de concreto (laje de fundo + enchimento), conforme referência [13].

SR 63: 0,65 m de concreto (laje de fundo + enchimento), conforme referência [14]

PEE Hípica: 1,0 m de concreto (laje de fundo), conforme referência [15].

- Resistividade da camada superficial do concreto: ρs = 3000Ω.m (ver tabela 5 da norma técnica [1]).

Consideramos o valor acima da resistividade da camada superficial do concreto de forma conservadora, priorizando a segurança dos usuários do Metrô - DF, uma vez que este valor impacta diretamente nos cálculos de passo e toque permissíveis. Quanto maior este valor, maiores os valores permissíveis de passo e toque.

Nas figuras abaixo referente à estratificação do solo tem-se que:

Rho1 = ρ_1 -> Resistividade da primeira camada do solo
Rho2 = ρ_2 -> Resistividade da segunda camada do solo
Rho3 = ρ_3 -> Resistividade da terceira camada do solo

Os dados de saída do sowtware são apresentados nas figuras que seguem abaixo:

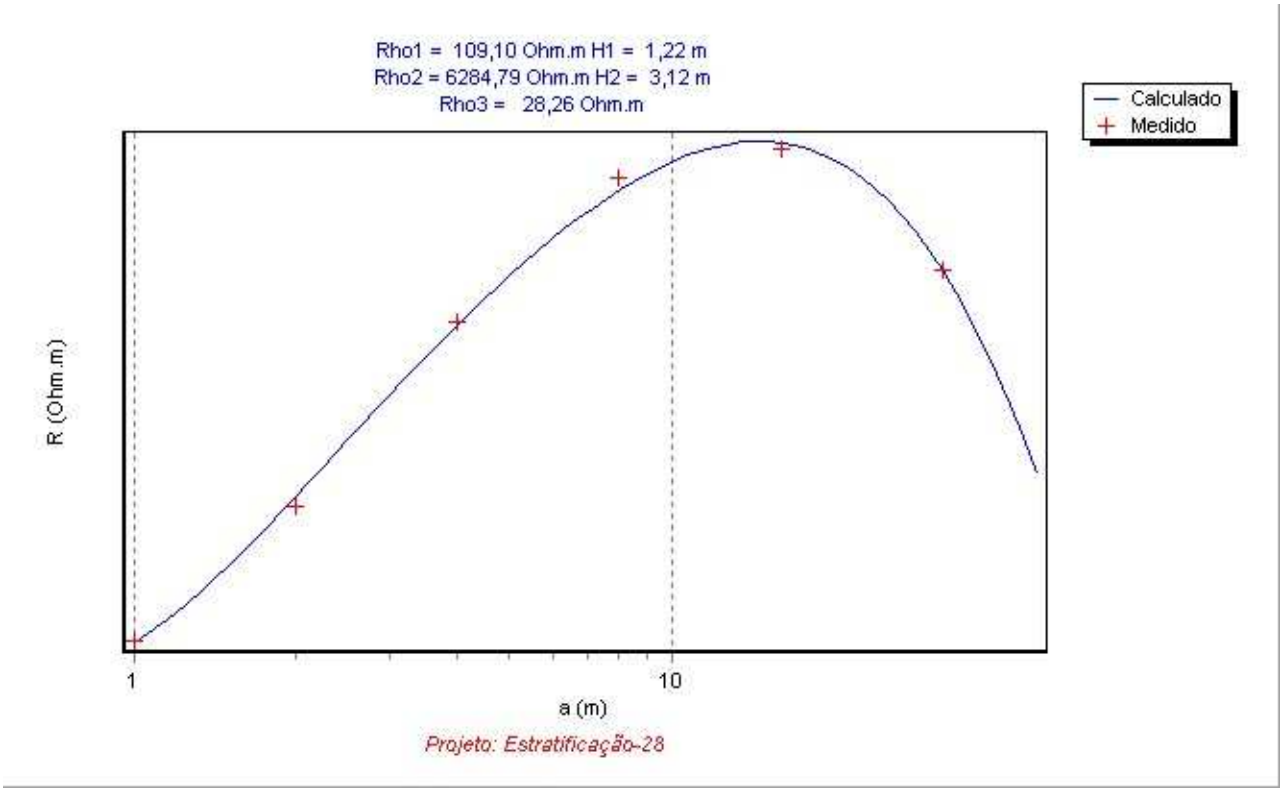


Figura 2 - Estratificação do solo Estação 28

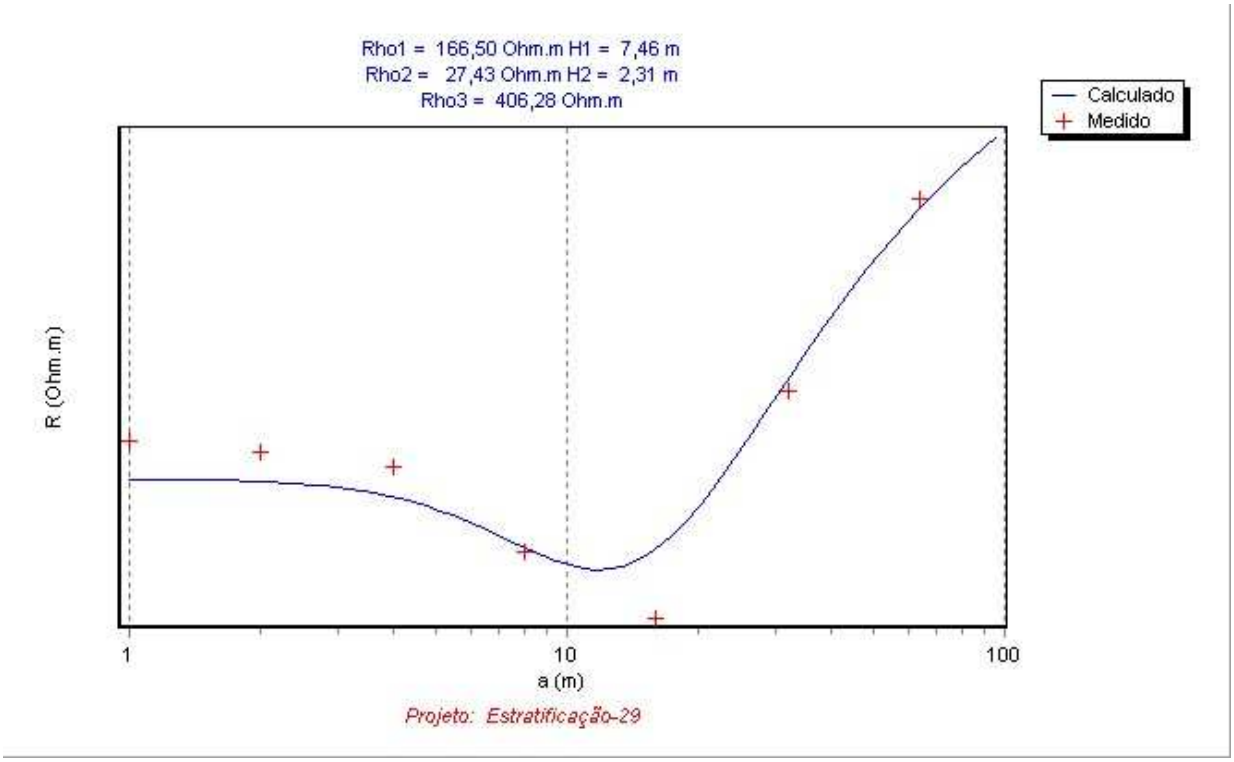


Figura 3 - Estratificação do solo Estação 29

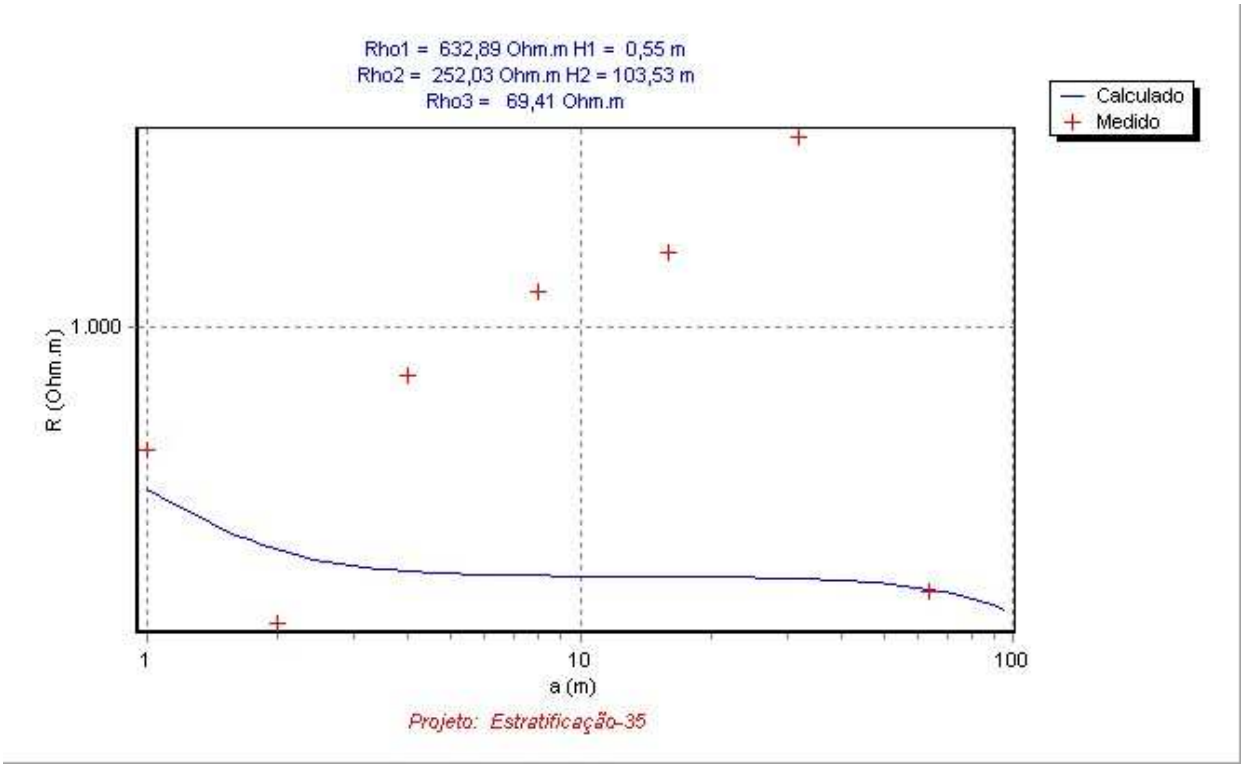


Figura 4 - Estratificação do solo Estação 35

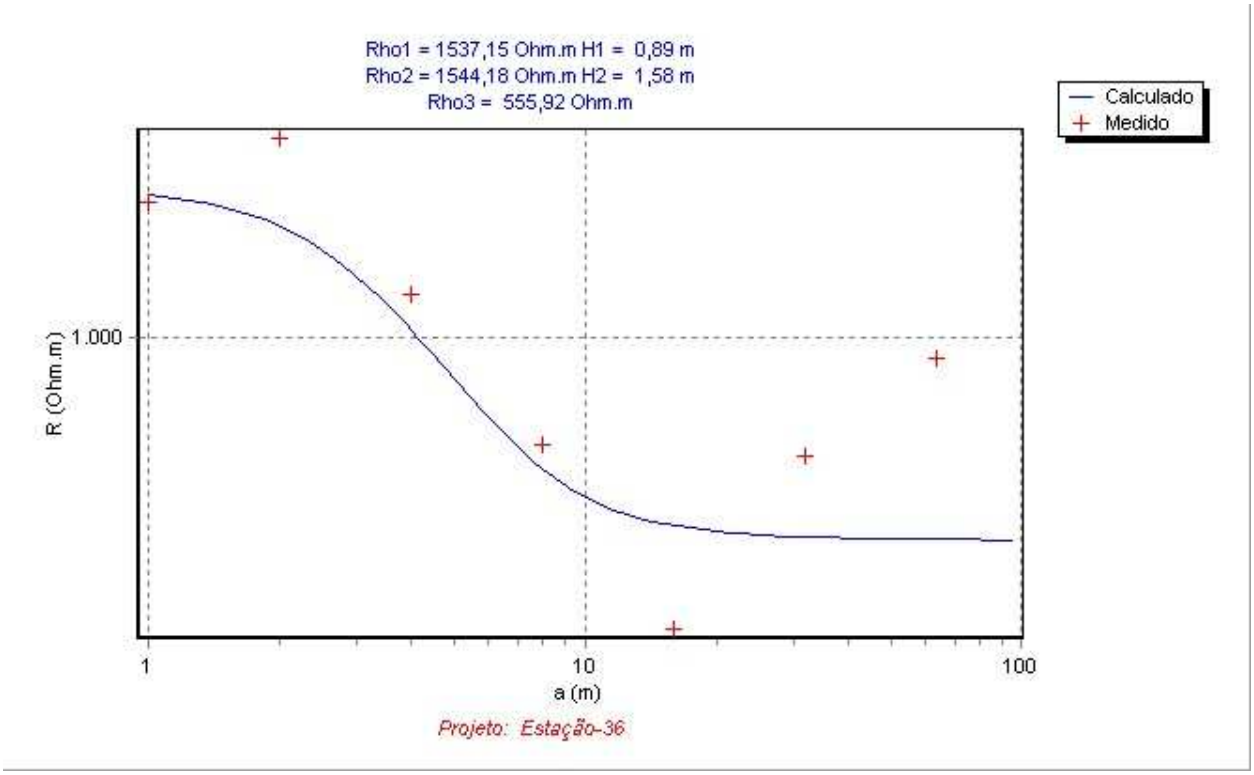


Figura 5 - Estratificação do solo Estação 36

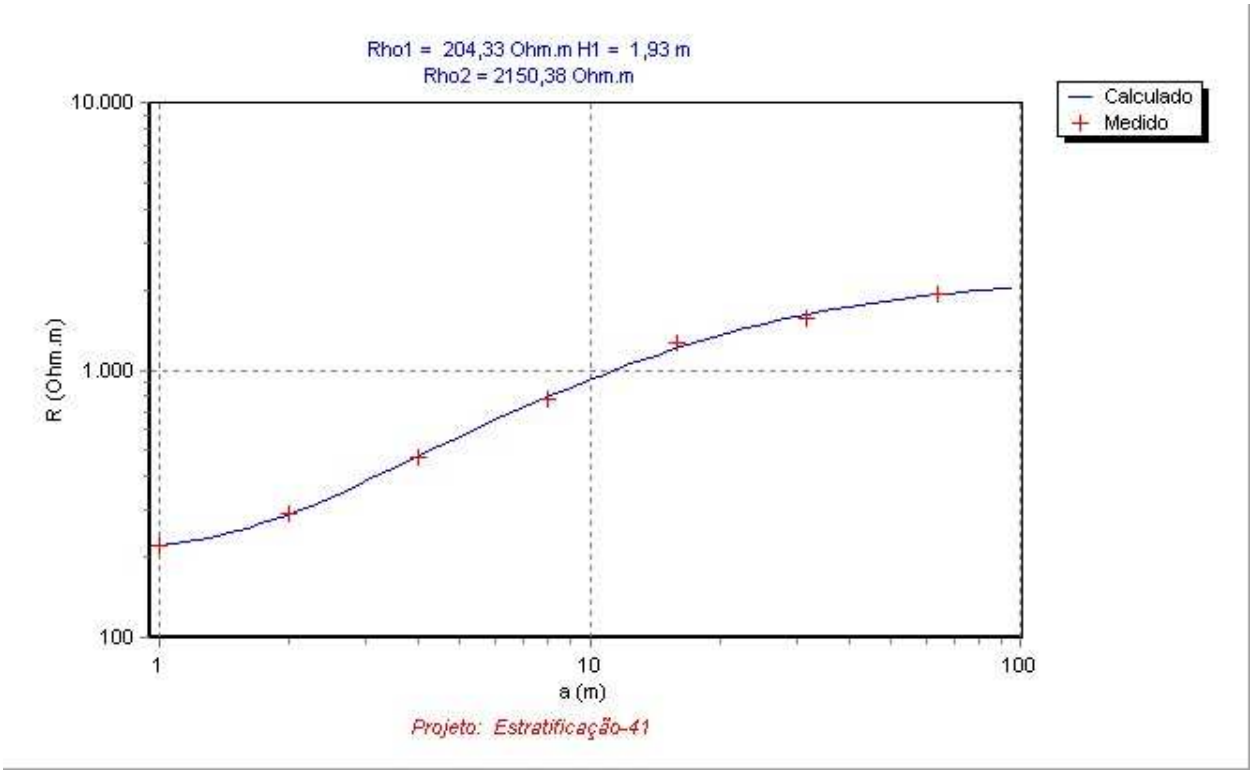


Figura 6 - Estratificação do solo Estação 41

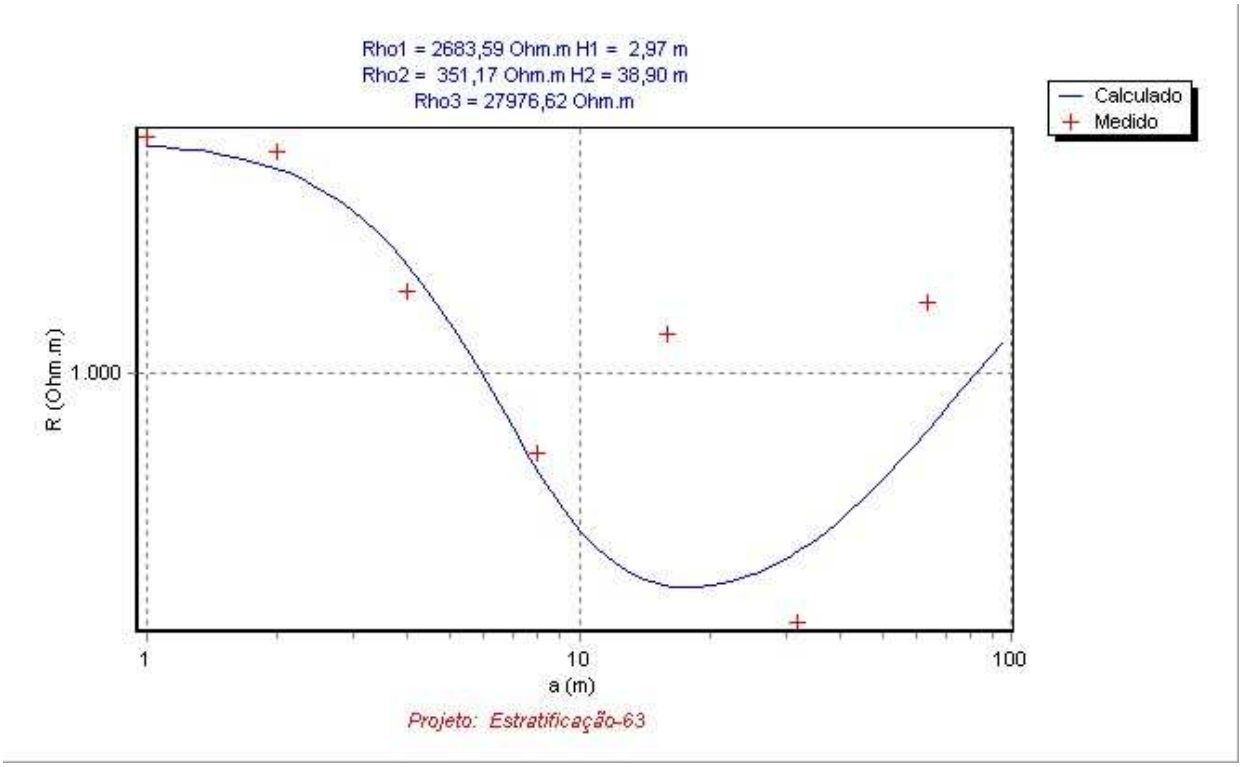


Figura 7 - Estratificação do solo SR 63

Para as estações 28, 29, 35, 36, 41 e SR 63, a partir da estratificação apresentada no item 5.2, foi realizada uma redução de camadas conforme metodologia descrita na referência [4]. Tem-se assim um solo estratificado (ρ_1 e ρ_2) em duas camadas conforme segue:

Tabela 2 - Estratificação do solo

Estação	ρ_s (resistividade do concreto superficial)	hs (profundidade do concreto)	ρ_1 (ohm.m)	d1 (m)	ρ_2 (ohm.m)	d2 (m)	ρ_3 (ohm.m)	d3 (m)
28	3000	1,50	109,10	1,22	6284,79	3,12	28,26	∞
29	3000	1,50	166,50	7,46	27,43	2,31	406,28	∞
35	3000	0,70	632,89	0,55	252,03	103,53	69,41	∞
36	3000	0,70	1537,15	0,89	1544,18	1,58	555,92	∞
41	3000	0,75	204,33	1,93	2150,38	∞		
SR 63	3000	0,65	2683,59	2,97	351,17	38,90	27796,62	∞

Conforme segue abaixo, de forma a efetuar a redução de camadas, calcula-se a resistividade média equivalente estimada vista pela terceira camada, utilizando a Fórmula de Hummel, que é a média harmônica ponderada da primeira e segunda camada:

$$\rho 1' = \frac{d1 + d2}{\frac{d1}{\rho 1} + \frac{d2}{\rho 2}}$$

e

$$d1' = d1 + d2$$

Tabela 3 - Redução de Camadas

Estação	ρ_1' (ohm.m)	d1' (m)	ρ_2' (ohm.m)	d2' (m)
28	371,61	4,34	28,26	∞
29	75,73	9,77	406,28	∞
35	252,83	104,08	69,41	∞
36	1541,64	2,47	555,92	∞
41	204,33	1,93	2150,38	∞
SR 63	374,24	41,87	27796,62	∞

5.3 Tensão de Passo e Toque Permissível

5.3.1 Tensão de Passo Permissível

A norma técnica [1], define a tensão de passo como a diferença entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1m.

Conforme norma técnica citada no parágrafo acima, para uma pessoa de 50 kg, a máxima tensão de passo permissível pelo corpo humano é dada pela equação abaixo:

$$E_P = (R_{ch} + 6 * \rho_s * C) * I_{chcd} \text{ [V]}$$

Onde:

I_{chcd} é a corrente de choque de curta duração, determinada pelo sistema de proteção.

$I_{chcd} = \frac{0{,}116}{\sqrt{t}}$ [A] = 0,116/√0,5 = 0,1640A;

R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000Ω, conforme norma técnica [1];

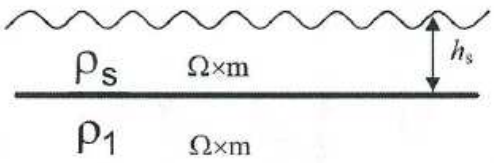
ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo, expressa em Ω.m, adotado como sendo 3000 Ω.m conforme Tabela 5 da norma técnica [1];

C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento e da primeira camada do solo estratificado em duas camadas, determinado através da equação abaixo:

$$C \cong 1 - a * \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 * h_s + a} \right]$$

Onde *a* é igual a 0,106m conforme norma técnica [1]

e



Legenda

ρ_1 é a resistividade da 1ª camada (Ω×m)

ρ_s é a resistividade do recobrimento da camada superficial (em Ω×m), conforme Tabela 5

h_s é a espessura da camada de revestimento superficial (m)

Figura 4 — Resistividade do recobrimento da camada superficial

Figura 8 - Resistividade de recobrimento da camada superficial da norma técnica [1]

Seguindo a metodologia acima apresentada calcula-se o fator de redução C:

Tabela 4 – Fator de Redução C

$$C \cong 1 - a * \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 * h_s + a} \right]$$

Estação	a (m)	ρs (Ω.m)	hs (m)	ρ1 (Ω.m)	C
28	0,106	3000	1,50	371,61	0,97
29	0,106	3000	1,50	75,73	0,97
35	0,106	3000	0,70	252,83	0,94
36	0,106	3000	0,70	1541,64	0,97
41	0,106	3000	0,75	204,33	0,94
SR 63	0,106	3000	0,65	374,24	0,93
Setor Hipica	0,106	3000	1,00	1541,64	0,98

E de acordo com a mesma metodologia, calculam-se as **tensões de passo permissíveis**:

Tabela 5 - Tensões de Passo Permissíveis

$$E_P = (R_{ch} + 6 * \rho_s * C) * I_{chcd}$$

Estação	Rch (Ω)	ρs (Ω.m)	C	Ichcd (A)	Epasso50 (V)
28	1000	3000	0,97	0,164	3028,64

29	1000	3000	0,97	0,164	3018,70
35	1000	3000	0,94	0,164	2926,60
36	1000	3000	0,97	0,164	3015,89
41	1000	3000	0,94	0,164	2935,30
SR 63	1000	3000	0,93	0,164	2922,08
Setor Hipica	1000	3000	0,98	0,164	3044,68

5.3.2 Tensão de Toque Permissível

Segundo a norma técnica [1], a tensão de toque é a diferença de potencial entre um objeto metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa; essa distância é convencionada igual a 1,0m.

Conforme norma técnica citada no parágrafo acima, para uma pessoa de 50 kg, a máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é dada por:

- Curta duração

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1{,}5\rho_s * C) * I_{chcd} \quad [V]$$

- Longa duração

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1{,}5\rho_s * C) * I_{chld}$$

Onde:

I_{chld} é a corrente de choque de longa duração apresentados na tabela 4 da norma técnica [1]:

Tabela 6 - Corrente de choque de longa duração da norma técnica [1]

Tabela 4 — Limites de corrente elétrica suportados pelos seres humanos

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

R_{ch} é a resistência do corpo humano, adotada como sendo 1000Ω;

ρ_s é a resistividade do recobrimento da superfície do solo, expressa em Ω.m, adotado como sendo 3000 Ω.m. conforme Tabela 5 da norma técnica [1];

C é o fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento, determinado através da equação:

$$C \cong 1 - a * \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 * h_s + a} \right]$$

Onde a é igual *a* 0,106m conforme norma técnica [1].

Seguindo a metodologia acima apresentada o fator de redução é o que segue na Tabela 4 e as **tensões de toque permissíveis**, são as que seguem na tabela abaixo:

Tabela 7 - Tensões de Toque Permissíveis

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1{,}5\rho_s * C) * I_{chcd}$$

Estação	Rch (Ω)	ρs (Ω.m)	C	Ichcd (A)	Etoque50 (V)
28	1000	3000	0,97	0,164	880,20
29	1000	3000	0,97	0,164	877,71
35	1000	3000	0,94	0,164	854,69
36	1000	3000	0,97	0,164	877,01
41	1000	3000	0,94	0,164	856,86
SR 63	1000	3000	0,93	0,164	853,56
Setor Hipica	1000	3000	0,98	0,164	884,21

Para o PEE Hípica, como não houve medições, utilizamos como premissa de forma conservativa e do ponto de vista de segurança, a resistividade do solo mais alta das medições realizadas, no caso, a da Estação 36.

5.4 Cálculo da resistividade aparente do solo

De acordo com Anexo A da norma técnica [1], para o cálculo da resistência da malha é necessária a avaliação da resistividade aparente do solo ρ_a.

Para a determinação desta resistividade, as seguintes etapas devem ser cumpridas:

a) Determinação do valor do raio *r* do círculo equivalente à área do sistema de aterramento constituído pelos eletrodos horizontais:

$$r(m) = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Onde A é a área da malha de aterramento em m²

Sendo assim:

Tabela 8 - Cálculo de r

Estação	Subestação Retificadora	Dimensões (lxc)	Áreas m²	r
28	SR 15	47,20 x 13,50	637,20	14,24
29	SR 16	47,21 x 13,50	637,34	14,24
35	SR 64	47,40 x 14,00	663,60	14,53
36	SR 65	47,4 x 13,85	656,49	14,46
41	SR 21	32,31 x 19,33	624,55	14,10
	SR 63	28,16 x 12,94	364,39	10,77
Setor Hípica		24x8,50	204,00	8,06

b) Definição da profundidade da malha de aterramento (*H* em m).
H = 0,8m

c) Determinação do fator α:
Se $\rho_2/\rho_1<1$ e $H/a_1\geq 0{,}90$ então:

$$\alpha = \frac{r}{2 * a_1 * H}$$

Para as demais condições:

$$\alpha = \frac{r}{a_1}$$

Tabela 9 - Cálculo de α

Estação	ρ_1' (ohm.m)	d1' (m)	ρ_2' (ohm.m)	d2' (m)	$\rho 2'/\rho 1'$	H(m)	a1	H/a1	r	α
28	371,61	4,34	28,26	∞	0,08	0,80	4,34	0,18	14,24	2,05
29	75,73	9,77	406,28	∞	5,37	0,80	9,77	0,08	14,24	1,46
35	252,83	104,08	69,41	∞	0,27	0,80	104,08	0,01	14,53	0,09
36	1541,64	2,47	555,92	∞	0,36	0,80	2,47	0,32	14,46	3,66
41	204,33	1,93	2150,38	∞	10,52	0,80	1,93	0,41	14,10	7,31
SR 63	374,24	41,87	27796,62	∞	74,27	0,80	41,87	0,02	10,77	0,26
Setor Hipica	1541,64	2,47	555,92	∞	0,36	0,80	2,47	0,32	8,06	3,26

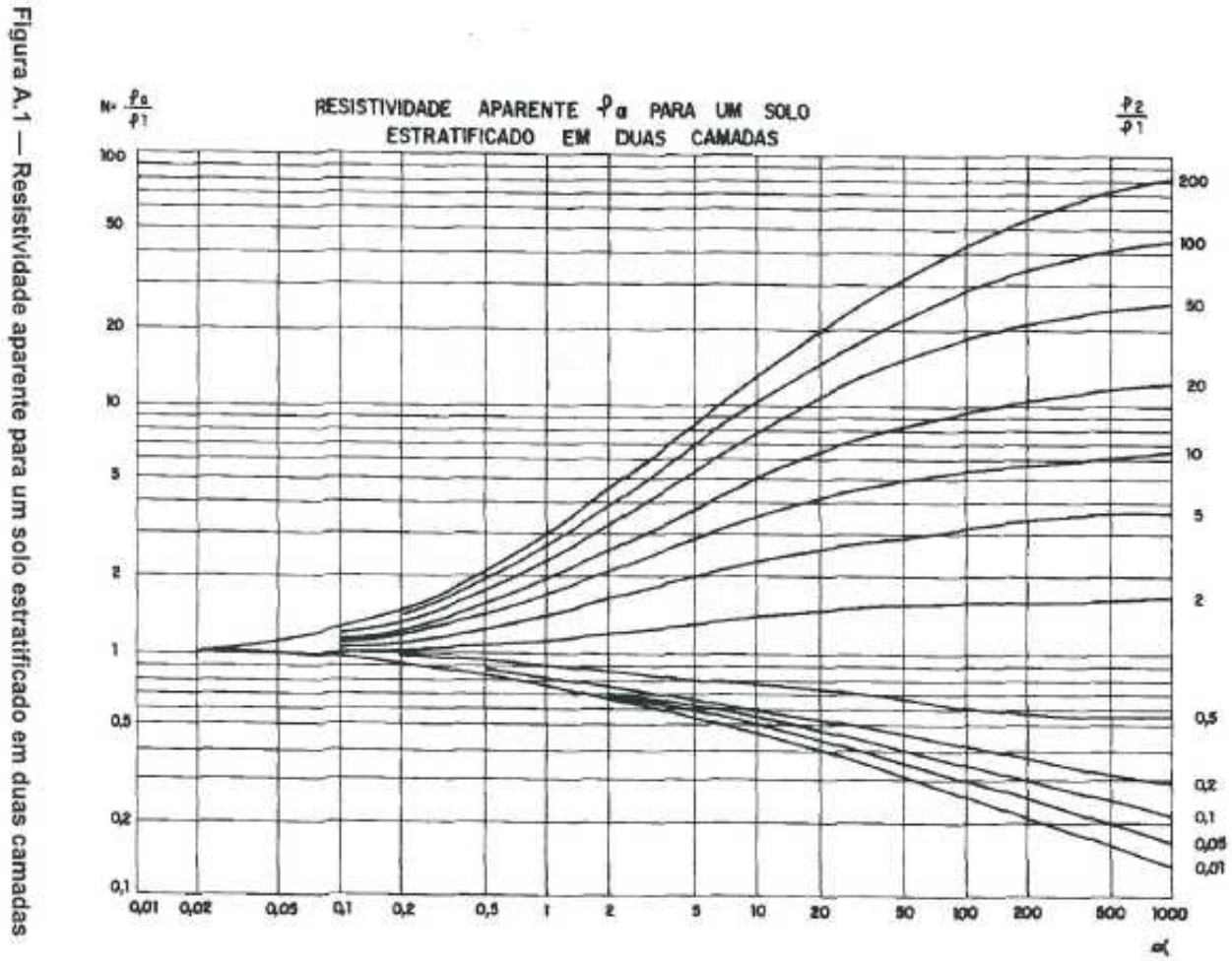


Figura 9 - Resistividade aparente para um solo estratificado em duas camadas

d) De posse do valor de α e da relação ρ_2/ρ_1 e com o auxílio da Figura 9, determina-se o valor de *N. O valor de* ρ_a é obtido pela equação:

$$\rho_a = N * \rho_1$$

Portanto, seguindo a metodologia apresentada acima, determina-se o valor N e o calcula-se a resistividade aparente conforme abaixo:

Tabela 10 - Determinação do valor de N

Estação	ρ2'/ρ1'	α	N
28	0,08	2,05	0,70
29	5,37	1,46	1,50
35	0,27	0,09	1,00
36	0,36	3,66	0,80
41	10,52	7,31	3,30
SR 63	74,27	0,26	1,80
Setor Hipica	0,36	3,26	0,80

Tabela 11 - Cálculo da Resistividade Aparente

$$\rho_a = N * \rho_1$$

Estação	Subestação Retificadora	ρ_1 ohm.m	N	ρ_a ohm.m
28	SR 15	371,61	0,70	260,13
29	SR 16	75,73	1,50	113,59
35	SR 64	252,83	1,00	252,83
36	SR 65	1541,64	0,80	1233,31
41	SR 21	204,33	3,30	674,29
	SR 63	374,24	1,80	673,64
PEE Hípica		1541,64	0,80	1233,31

Para o PEE Hípica, foi considerada como premissa a resistividade do solo de maior valor que no caso é igual a resistividade do solo da Estação 36.

5.5 Cálculo da Resistência de Aterramento

Conforme norma técnica [1] é recomendável calcular de forma aproximada a resistência de aterramento da malha, antes da geometria definitiva, o que é possível pela consideração inicial de que a resistência de aterramento é função da área ocupada pela malha de aterramento e da resistividade do solo.

Esta relação é expressa pela equação:

$$R = \frac{\rho_a}{4r}$$

Onde

R é a resistência de aterramento em Ω.

ρ_a é a resistividade aparente do solo em Ωm.

r é raio do círculo equivalente à área do sistema de aterramento constituído pelos eletrodos horizontais, expresso em metros (m).

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

a) Para as malhas enterradas a uma profundidade de até 0,25m:

$$R = \frac{\rho_a}{4r} + \frac{\rho_a}{Lt}$$

b) Para as malhas enterradas numa profundidade compreendida entre 0,25 e 2,5m:

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{Lt} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 * A}} \right) * \left[1 + \left(\frac{1}{1 + H\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \right\}$$

Onde

L_t é o comprimento total de condutores enterrados em m;

H é a profundidade da malha em m;

A é a área ocupada pela malha em m².

Tabela 12 - Cálculo da Resistência de Aterramento

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{Lt} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20 * A}} \right) * \left[1 + \left(\frac{1}{1 + H\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \right\}$$

Estação	ρa ohm.m	Lt (m)	A (m²)	H (m)	R (ohm)
28	260,13	249,60	637,20	0,80	5,36
29	113,59	249,63	637,34	0,80	2,34
35	252,83	254,20	663,60	0,80	5,12
36	1233,31	253,00	656,49	0,80	25,08
41	674,29	245,22	624,55	0,80	14,06
SR 63	673,64	149,18	364,39	0,80	19,05
Setor Hípica	1233,31	230,50	204,00	0,80	40,13

Para determinação de Lt, somar todos os comprimentos dos condutores das malhas estabelecidas no item 5.9.

A norma técnica [1] não estabelece valores mínimos de resistência de aterramento e salienta no item 10.1 que baixas resistências de aterramento não garantem um projeto seguro, e que altas resistências de aterramento não significam, necessariamente, um projeto inseguro. Ainda na mesma norma técnica no item 9, a mesma especifica que deve-se garantir a manutenção dos valores de passo e toque calculados para cada situação, em valores inferiores às respectivas tensões máximas permissíveis.

5.6 Cálculo da Corrente de Malha

Conforme norma técnica [1], o sistema de aterramento de uma subestação é tipicamente constituído por sua malha de aterramento e por todos os elementos metálicos a ela conectados. No caso da expansão do Metrô - DF temos conectados a malha de aterramento

das estações, SR63 e PEE Hípica, a blindagem dos cabos de energia subterrâneos da concessionária, os cabos de aterramento longitudinais lançados sob os bancos de dutos da sinalização e potência, neutro dos transformadores de serviços auxiliares e carcaça de equipamentos e quadros.

Quando da ocorrência de uma falta de curta duração para a terra na média tensão, a corrente de defeito I_f inicialmente injetada na malha de aterramento se divide por todo este sistema interligado, cabendo então a cada um de seus componentes a função de escoar uma fração da corrente de falta. Define-se na norma técnica [1] como corrente de malha I_m a parcela da corrente de falta que escoa para o solo através da malha de aterramento.

Os valores das correntes de falta 13,8 kV à terra para cada Subestação Retificadora e PEE Hípica são apresentados nas referências [1] e [2] respectivamente.

Como dados de entrada para esta simulação utilizamos os dados apresentados abaixo:

- As Subestações Retificadoras e Subestações Auxiliares possuem uma malha de aterramento com condutores de 50 mm², conforme item 4.4;
- A PEE Hípica possui uma malha de aterramento com condutores de 50 mm², conforme item 4.4;
- As malhas das Subestações Retificadoras são interligadas através de dois cabos de cobre nu seção 50 mm² conforme item 4.4, que por sua vez são interligados de 200 em 200m (premissa que não superou as tensões máximas de passo e toque);
- A interligação da SR 03, SR 04, SR 05 e SR 06 a PEE Hípica, foi feita através de dois cabos de cobre nu seção 50 mm² conforme item 4.4, que por sua vez são interligados de 200 em 200m(premissa que não superou as tensões máximas de passo e toque);
- A interligação das concessionárias que alimentam as Subestações Retificadoras é feita através de um cabo de cobre nu seção 120 mm² conforme [8];
- A resistência das malhas de aterramento das estações 28, 29, 35, 36, SR 63 e PEE Hípica foram calculadas e são apresentadas na Tabela 12;
- A resistência da malha de aterramento das subestações da concessionária foi considerada igual a 10 Ω, conforme referência [7];
- As malhas serão lançadas no solo a uma profundidade de 0,80m, conforme norma técnica [1].

Conforme referência [6], seguem abaixo as distâncias consideradas entre Subestações Retificadoras e entre a subestação da concessionária e Subestação Retificadora alimentada pela CEB:

Tabela 13 – Distâncias

De/Para	Distância (m)	Condutor de Aterramento (mm²)
CEB SE CN - PEE/CEI	900	1 x 120
CEB SE SO - PEE/SAM	2100	1 x 120
CEB SE EM - PEE/ANR	2500	1 x 120
SR 15 - SR 16	1250	2 x 50
SR 63 - SR 64	1400	2 x 50
SR 64 - SR 65	1200	2 x 50
SR 21 - SR 01	1210	2 x 50
SR 21 - SR 01	110	2 x 50
SR 21 - SR 01	250	2 x 50
PEE – SR 03	5650	1 x 95
PEE – SR 04	3250	1 x 95
PEE – SR 05	50	1 x 95
PEE – SR 06	2545	1 x 95

Conforme dados apresentados acima, para o cálculo das correntes de malha Im [A] apresentadas na Tabela 14, **o sistema foi modelado utilizando o software Alternative Transient Program – ATP** para um curto-circuito de uma fase 13,8 kV para cada nó do sistema de aterramento.

As correntes de malha calculadas a partir da modelagem descrita e curto-circuitos da referência [1] e [2], são as que seguem:

Tabela 14 - Im quando de uma falta fase-terra na SR e PEE Hípica

Estação	SR Subestação	Tensão kV	Im [A] calculada
E28	SR15	13,80	109,90
E29	SR16	13,80	437,70
E35	SR64	13,80	45,79
E36	SR65	13,80	17,59
E41	SR21	13,80	43,02
SR63	SR63	13,80	18,08
PEE Hípica		13,80	13,28

5.7 Cálculo das tensões de toque

A maior tensão de toque quando de correntes de curta duração entre a malha e o solo (Vt) pode ser calculada pela seguinte equação (ver anexo B da norma técnica [1]):

$$V_t = \frac{\rho * I_{mcd} * K_m * K_i}{L_t} \quad \text{(V)}$$

Onde:

ρ é a resistividade do solo homogêneo, ou seja, resistividade aparente do solo; expressa em Ω.m;

I_{mcd} é a máxima corrente de malha de curta duração, expressa em A;

K_m é o fator geométrico utilizado nos cálculos de tensão de toque que leva em consideração o espaçamento entre os condutores paralelos da malha, sua profundidade e o diâmetro dos condutores.

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

Onde:

$k_{ii} = 1$ Para malhas com hastes de aterramento locadas na periferia. Para o sistema em questão, estão sendo previstas hastes nas periferias.

$k_{ii} = (2*n)^{-2/n}$ Para malhas que não possuam hastes de aterramento:

n é o número de condutores paralelos em uma determinada direção;

$$k_i = 0{,}656 + 0{,}172 * n$$

Lt é o comprimento total dos condutores enterrados, expresso em m.

Segue abaixo os valores de km, ki e a tensão de toque Vt (V) calculados conforme metodologia do item 5.7:

Cálculo de Km e Ki

Tabela 15 - Dados para cálculo de Km, Ks e Ki

	SR 15	SR 16	SR 64	SR 65	SR 21	SR 63	PEE Hipica
d [m] - diametro condutor da malha	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,009	0,0106
D[m] - espaçamento entre condutores paralelos ao longo da malha	6,74	6,75	6,77	6,77	6,46	7,04	2
H [m] - profundidade da malha	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	2,2
n - números de condutores paralelos na direção x	8	8	8	8	6	5	13
Kii - referente as hastes	1	1	1	1	1	1	1

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

e

$k_i = 0{,}656 + 0{,}172 * n$

Tabela 16 - Km e Ki calculados

Estação	Km	Ki
ESTAÇÃO 28	0,78	2,03
ESTAÇÃO 29	0,78	2,03
ESTAÇÃO 35	0,78	2,03
ESTAÇÃO 36	0,78	2,03
ESTAÇÃO 41	0,81	1,69
SR 63	0,86	1,52
PEE Hípica	0,64	2,89

Cálculo da Tensão de Toque

Tabela 17 - Tensões de toque calculadas Vt

$$V_t = \frac{\rho * I_{mcd} * K_m * K_i}{L_t}$$

Estação	Subestação Retificadora	Dimensões (lxc)	Lt (m)	ρa (ohm.m)	Imcd (A)	Km	Ki	Vt (V)
ESTAÇÃO 28	SR 15	47,20 x 13,50	249,60	260,13	109,90	0,91	4,17	436,89
ESTAÇÃO 29	SR 16	47,21 x 13,50	249,63	113,59	437,70	0,91	4,17	759,69
ESTAÇÃO 35	SR 64	47,40 x 14,00	254,20	252,83	45,68	0,92	4,17	175,18
ESTAÇÃO 36	SR 65	47,4 x 13,85	253,00	1233,31	17,58	0,92	4,17	329,30
ESTAÇÃO 41	SR 21	32,31 x 19,33	245,22	674,29	43,02	0,86	5,34	544,73
	SR 63	28,16 x 12,94	149,18	673,64	18,08	0,90	4,17	307,52
PEE Hípica		24,00 x 8,50	230,50	1233,31	13,28	0,73	1,83	94,59

5.8 Cálculo das tensões de passo

Os maiores valores de tensão de passo são encontrados fora da área da malha, próximo aos condutores periféricos.

A metodologia do anexo B da norma técnica [1], considera que a máxima tensão de passo é aquela encontrada a uma distância do condutor periférico igual à profundidade da malha.

A maior tensão de passo quando da circulação de correntes de malha de curta duração pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_p = \frac{\rho * I_{mcd} * K_s * K_i}{L_t} \quad \text{(V)}$$

Onde

I_{mcd} é a máxima corrente de malha de curta duração, expressa em A;

Ks é o fator geométrico utilizado nos cálculos de tensão de passo que leva em consideração o espaçamento entre os condutores paralelos da malha e sua profundidade;

Para 0,25m < H < 2,25m:

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

Onde:

n é o número de condutores paralelos em uma determinada direção;

Os valores de Km, Ki e Ks serão calculados em ambas as direções (x e y), e adotadas as tensões de passo e toque de maior valor.

Segue abaixo os valores de Ks, Ki e tensão de passo calculados conforme metodologia do item 5.8:

Cálculo de Ks e Ki

Dados para cálculo de Ks e Ki conforme Tabela 15.

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

e $k_i = 0{,}656 + 0{,}172 * n$

Estação	Ks	Ki
ESTAÇÃO 28	0,29	2,03
ESTAÇÃO 29	0,29	2,03
ESTAÇÃO 35	0,29	2,03
ESTAÇÃO 36	0,29	2,03
ESTAÇÃO 41	0,29	1,69
SR 63	0,28	1,52
PEE Hípica	0,31	2,89

Cálculo da Tensão de Passo

Tabela 18 - Tensões de passo calculadas

Estação	Subestação Retificadora	Dimensões (lxc)	Lt (m)	ρa (ohm.m)	Imcd (A)	Ks	Ki	Vp (V)
ESTAÇÃO 28	SR 15	47,20 x 13,50	249,60	260,13	109,90	0,29	2,03	66,95
ESTAÇÃO 29	SR 16	47,21 x 13,50	249,63	113,59	437,70	0,29	2,03	116,36
ESTAÇÃO 35	SR 64	47,40 x 14,00	254,20	252,83	45,68	0,29	2,03	26,52
ESTAÇÃO 36	SR 65	47,4 x 13,85	253,00	1233,31	17,58	0,29	2,03	50,03
ESTAÇÃO 41	SR 21	32,31 x 19,33	245,22	674,29	43,02	0,29	1,69	57,70
	SR 63	28,16 x 12,94	149,18	673,64	18,08	0,28	1,52	34,54
PEE Hípica		24,00 x 8,50	230,50	1233,31	13,28	0,31	2,89	63,13

5.9 Projeto da malha

Conforme mencionado anteriormente os maiores valores de toque e passo encontrados nas malhas encontram-se nas periferias.

A metodologia da norma técnica [1] determina o valor da tensão encontrada no centro dos reticulados situados nas quinas das malhas. Valores superiores são encontrados em pontos ligeiramente fora do centro do reticulado, mais próximos à periferia da malha, sendo pequena a diferença para os valores encontrados no centro do reticulado.

Sendo assim, foram projetadas as malhas de aterramento cuja geometria e dimensões seguem nas figuras abaixo:



Figura 10 – Malha de Aterramento SR 15

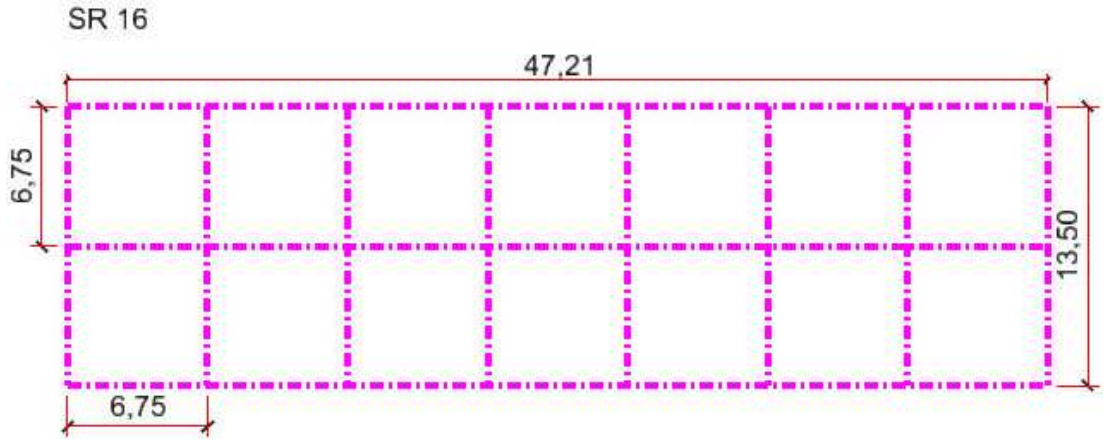


Figura 11 – Malha de Aterramento SR 16

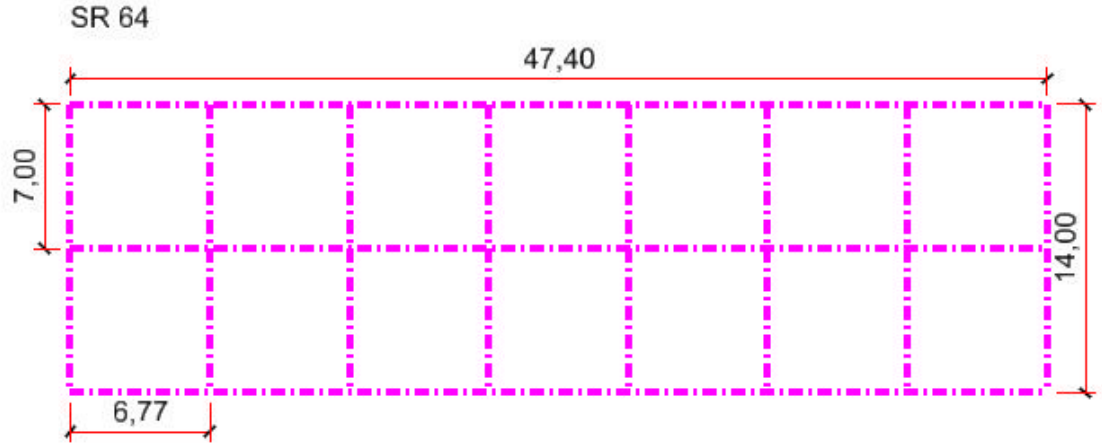


Figura 12 – Malha de Aterramento SR 64

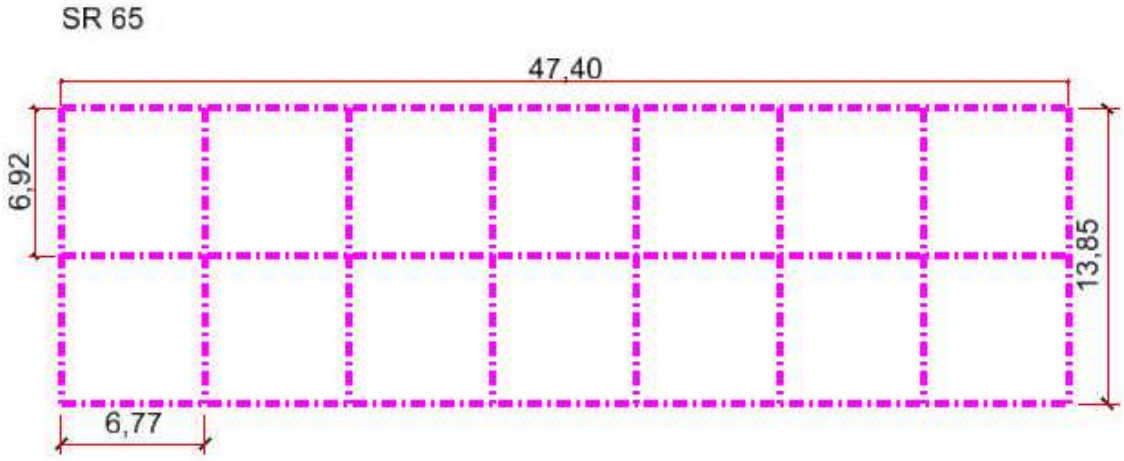


Figura 13 – Malha de Aterramento SR 65

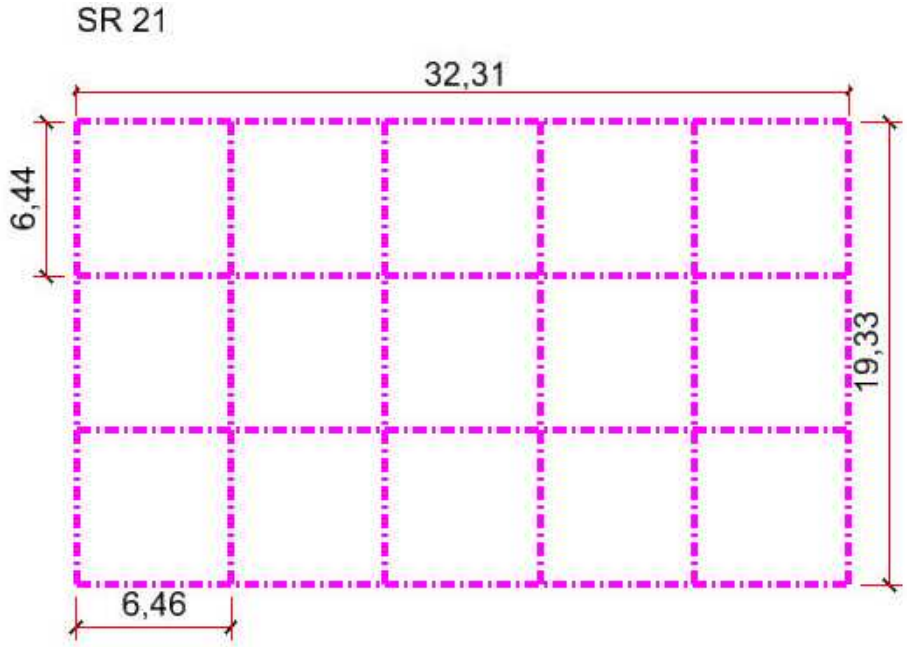


Figura 14 – Malha de Aterramento SR 21

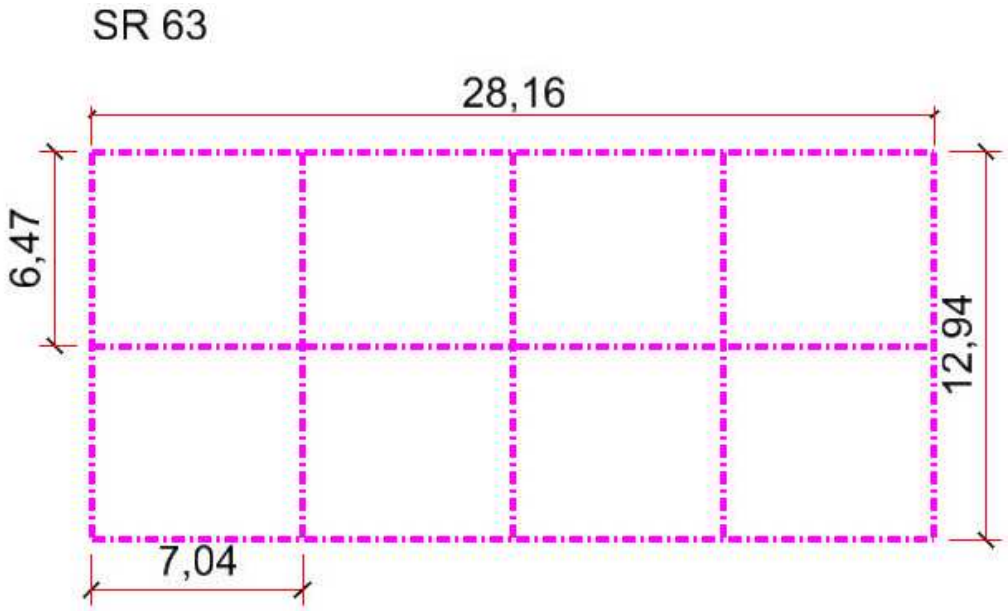


Figura 15 – Malha de Aterramento SR 63



Figura 16 - Malha de Aterramento PEE Hípica

5.10 Potenciais de Passo e Toque Calculados

5.11 Verificação dos potencias

TENSÃO DE TOQUE

Comparando o máximo valor da tensão de malha com o valor máximo admissível para tensão de toque, verifica-se que a malha projetada garante a segurança de pessoas nas áreas das estações, Subestações Auxiliares e Subestações Retificadoras contra tensões de toque decorrentes de dissipação de correntes de falta. Ver Tabela 19 - Verificação dos potenciais de toque.

Tabela 19 - Verificação dos potenciais de toque

Subestação Retificadora	Etoque50 permissível (V)	Vt calculado (V)
SR 15	880,20	436,89
SR 16	877,71	759,69
SR 64	854,69	175,18
SR 65	877,01	329,30
SR 21	856,86	544,73
SR 63	853,56	307,52
Setor Hipica	884,21	94,59

TENSÃO DE PASSO

Comparando o máximo valor da tensão de passo com o valor máximo admissível para esta tensão, verifica-se que a malha projetada garante a segurança de pessoas nas áreas das estações e Subestações Retificadoras contra tensões de passo decorrentes de dissipação de correntes de falta. Ver Tabela 20 - Verificação potenciais de passo.

Tabela 20 - Verificação potenciais de passo

Subestação Retificadora	Epasso50 permissível (V)	Vp calculado (V)
SR 15	3028,64	66,95
SR 16	3018,70	116,36
SR 64	2926,60	26,52
SR 65	3015,89	50,03
SR 21	2935,30	57,70
SR 63	2922,08	34,54
Setor Hipica	3044,68	63,13

6 CONCLUSÃO

As estações, Subestações Auxiliares e Subestações Retificadoras da expansão do Metrô - DF deverão possuir uma malha de aterramento com cabo de cobre nu de 50 mm², lançada no solo a uma profundidade de 0,80m. Esta malha por sua vez será recoberta por uma camada de concreto conforme especificado na Tabela 2 - Estratificação do solo.

A geometria deverá ser de acordo o item 5.9 PROJETO DA MALHA.

A PEE Hípica deverá possuir uma malha de aterramento com cabo de cobre nu 50 mm², lançada no solo a uma profundidade de 2,20m logo abaixo dos cubículos e 0,80m no restante da área, conforme geometria apresentada no item 5.9 PROJETO DA MALHA.

Para a elaboração do Projeto Executivo é imprescindível e obrigatória à realização de novas medições da resistividade do solo com o terreno terraplenado e projeto da rede da concessionária para alimentação das Subestações Retificadoras.

7 TENSÃO DO CORPO E TENSÃO DE TOQUE EM SISTEMAS DE TRAÇÃO DE CORRENTE CONTÍNUA

A norma técnica 50122-1:2011 defini como tensão do corpo (body voltage) como o produto da corrente através do corpo e a impedância do mesmo.

Os valores máximos permissíveis da tensão do corpo são apresentados na Tabela 21, abaixo:

Tabela 21 - Tensões do corpo máximas permissíveis da norma técnica 50122-1

Table 5 — Maximum permissible body voltages $U_{b,\,max}$ in d.c. traction systems as a function of time duration

t s	$U_{b,\,max}$ V
> 300	120
300	150
1	160
0,9	165
0,8	170
0,7	175
0,6	180
0,5	190
0,4	205
0,3	220
0,2	245
0,1	285
0,05	325
0,02	370

Key

t time duration

$U_{b,\,max}$ permissible body voltage

Já a tensão de toque é definida como a tensão entre partes condutoras quando tocadas simultaneamente por uma pessoa ou animal.

O caminho condutor através do corpo é convencionalmente da mão para os dois pés (distância horizontal de 1m).

Os valores efetivos das tensões de toque são influenciados pela impedância da pessoa ou animal em contato elétrico com as partes condutoras dos circuitos ou equipamentos.

A potencial tensão de toque é definida como a tensão simultaneamente acessível entre as partes condutoras, quando as mesmas não estão sendo tocadas por uma pessoa ou animal.

A norma técnica 50122-1:2011 defini também como potencial do Terra da Via, a diferença de potencial que ocorre entre os trilhos de rolamento e a terra.

Segundo a norma técnica supracitada, a fim de determinar quando uma tensão de toque inadmissível pode ocorrer, nas estações de passageiros e em outros pontos relevantes, o potencial do terra da via (TV) deve ser avaliado para ambas as situações, de operação normal e na ocorrência de faltas, com base na queda de tensão do circuito de retorno.

As tensões de toque admissíveis são distinguidas com relação ao tempo de duração: longa exposição para condições de operação normal de funcionamento do sistema metroviário e curta exposição para condições de falta.

Condições de longa exposição: t≥ 0,7s a tensão de toque efetiva não deve exceder os valores para a tensão do corpo mostradas na Tabela 22.

Condições de curta exposição: t< 0,7s as tensão do corpo são consideradas satisfeitas, se os valores para as tensões de toque da Tabela 22 não forem excedidos.

Tabela 22 - Máxima tensão de toque permissível da norma técnica 50122-1

EN 50122-1:2011 – 60 –

Table 6 — Maximum permissible effective touch voltages $U_{te,\,max}$ in d.c. traction systems as a function of time duration

t s	$U_{te,\,max}$ long-term V	$U_{te,\,max}$ short-term V
> 300	120	-
300	150	-
1	160	-
0,9	165	-
0,8	170	-
0,7	175	-
< 0,7	-	350
0,6	-	360
0,5	-	385
0,4	-	420
0,3	-	460
0,2	-	520
0,1	-	625
0,05	-	735
0,02	-	870

Key
t time duration
$U_{te,\,max}$ permissible effective touch voltage

Em oficinas e locais similares a efetiva tensão de toque não deve exceder o limite de 60V.

8 PROTEÇÃO CONTRA OS PERIGOS DA ELEVAÇÃO DO POTENCIAL DO TERRA DE VIA (TV) EM RELAÇÃO AO (TEE) - PREMISSAS A SEREM VERIFICADAS E OBRIGATORIAMENTE OBEDECIDAS

As premissas abaixo descritas devem ser verificadas em todas as estações, pois os aspectos que envolvem a segurança do usuário e do pessoal operativo são de vital importância em todas as instalações metroviárias. Devemos ter não só dispositivos de monitoração como também dispositivos de proteção que venham numa primeira fase operar alertando (emissão de alarme) e numa fase seguinte promovendo operação adequada da proteção para desta forma garantir a segurança dos usuários no caso de uma falha de isolação dos elementos envolvidos.

Métodos de medição da efetiva tensão de toque podem ser verificados no anexo E da norma técnica [2] EN 50122-1:2011 - Railway applications – Fixed installations – Electrical safety, earthing and the return circuit - Part 1: Protective provisions against electric shock.

Segundo a norma técnica supracitada a efetiva tensão de toque é sempre menor do que a potencial tensão de toque. Portanto, uma avaliação simples é possível realizando uma medição da potencial tensão de toque, utilizando um voltímetro com uma resistência interna elevada e um apropriado eletrodo de terra.

As instalações de proteção do Metro-DF devem garantir que em locais acessíveis ao público, em todas as plataformas de estações onde possam surgir tensões de toque inadmissíveis para os usuários, devem ser previstos dispositivos que proporcionem a proteção dos mesmos, limitando os valores destas tensões sem, no entanto, agir sobre o desligamento do sistema elétrico.

Estes dispositivos são os chamados de “Curto - Circuitadores de Terra”. Este equipamento, nos casos que serão citados a seguir, onde as tensões de toque ultrapassem os valores máximos admissíveis, deverá colocar em curto-circuito o terra da via (TV) com o Terra Estrutural da Estação (TEE), nos tempos especificados pela Tabela 22 - Máxima tensão de toque permissível da norma técnica 50122-1.

Para as Especificações Técnicas do Curto-Circuitador de Terra ver ET.4/EX.99/00.502 e Diagrama Unifilar DG.3-EX.99-00.502.

As elevações de tensão em situação normal de operação ou em condições de defeito, que ultrapassam os valores máximos permitidos deverão ser eliminadas pelos “Curto-Circuitadores de Terra” que irão atuar basicamente nas seguintes situações:

a) Aumento da corrente e consequente elevação além dos limites permitidos da tensão de toque devido à partida de certo número de trens superior aquele previsto para a operação normal. Trata-se de uma situação excepcional e temporária, pois logo em seguida o trafego de trens é rapidamente normalizado, e em consequência as tensões de toque também.
b) Falha na proteção de corrente contínua para tração ou corrente alternada em baixa tensão, como por exemplo, o não desligamento de um disjuntor por defeito não franco fase-terra, em um equipamento qualquer, provocando tensões de toque além dos limites permissíveis.

9 CONCLUSÕES DO SISTEMA DE TRAÇÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

Deve haver obrigatoriamente em todas as estações não só monitoramento das tensões entre o terra da via –TV e o terra externo estrutural -TEE através de voltímetro registrador, como também dispositivos de proteção que venham a operar dando primeiramente alarme e depois operando a proteção para evitar que os valores de elevação do (TV) em relação ao (TEE) superem os valores máximos admissíveis.

Durante a fase executiva do projeto, deve o projetista avaliar os itens contemplados, os dados e os resultados obtidos no Projeto Básico, de forma a possibilitar propor inclusões, alterações ou correções para o desenvolvimento do Projeto Executivo e possíveis ações complementares a serem adotadas na fase de implantação, bem como o de subsidiar as obras civis de forma a sintonizar e sincronizar as implantações tanto de obras civis com a infraestrutura elétrica, malhas elétricas, cordoalhas, pontos de acesso, pontos de passagens, valas, suportes, fixações, acessos a estruturas confinadas, facilidades ao

Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas, correntes de fuga, equalização de potenciais elétricos entre via e estruturas e demais que se fizerem necessárias. Todas as alterações propostas devem ser justificadas e apresentadas previamente ao Metrô-DF.