

| MEMÓRIA DE CÁLCULO – MALHA DE ATERRAMENTO | | | |
|---|--|------------|-------------|
| PROJETO: | ELETROCAR – CENTRAIS ELÉTRICAS DE CARAZINHO S.A. | | |
| | Av. Pátria, 1351, Carazinho-RS. | | |
| | | | |
| | | | |
| DATA: | 02/08/2021 | DOCUMENTO: | MC-02-0-R00 |

| | | | |
|---------|----------------|--------|------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| 00 | Estudo Técnico | RKJ | 02/08/2021 |
| REVISÃO | DESCRIÇÃO | APROV. | DATA |

ÍNDICE

| | | |
|-----------|---|------------|
| 1. | ELÉTRICA – ESTUDOS ELÉTRICOS..... | 1-3 |
| 1.1. | INTRODUÇÃO..... | 1-3 |
| 1.2. | INFORMAÇÕES DO PROJETO | 1-3 |
| 1.3. | DOCUMENTOS CONSULTADOS..... | 1-3 |
| 1.4. | CONSIDERAÇÕES INICIAIS..... | 1-3 |
| 1.5. | DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE TERRA..... | 1-5 |
| 1.6. | TABELA RESUMO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL – MALHA DA SE CARAZINHO 1 | 1-11 |
| 1.7. | CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS A RESPEITO DA MALHA DE TERRA..... | 1-12 |
| 1.8. | CONCLUSÕES | 1-14 |
| 1.9. | RESPONSABILIDADE TÉCNICA..... | 1-14 |

1. ELÉTRICA – ESTUDOS ELÉTRICOS

1.1. INTRODUÇÃO

A presente Memória de Cálculo, tem por objetivo determinar o dimensionamento e o cálculo das tensões de toque a passo do sistema de aterramento (malhas de terra) da subestação Carazinho 1, localizada na cidade de Carazinho-RS.

1.2. INFORMAÇÕES DO PROJETO

| | |
|-----------------------|---|
| Disciplina: | Elétrica |
| Responsável técnico: | Eng. Rogerio Kruse Junior – CREA-RS 146.439 |
| Informação de contato | Telefone: (51) 99999-2455 – junior@rkjengenharia.com.br |

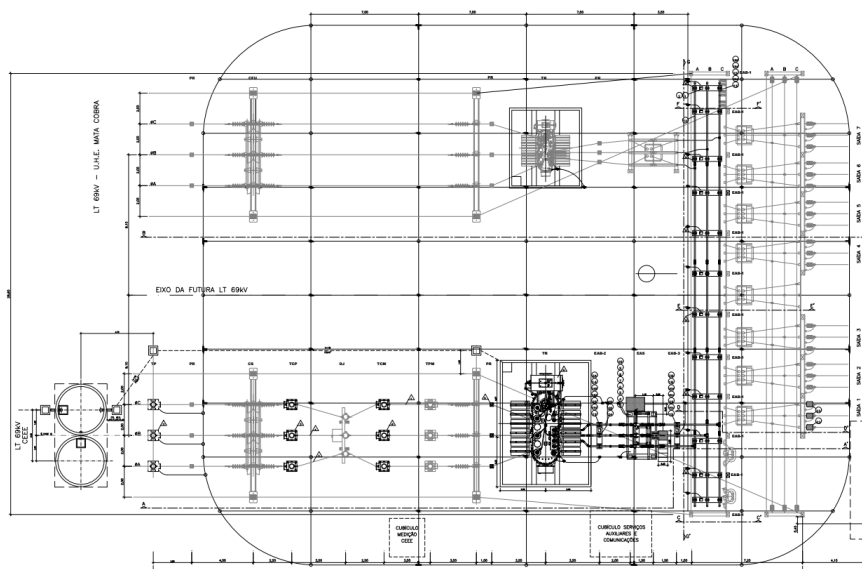
1.3. DOCUMENTOS CONSULTADOS

Os documentos consultados, para a realização deste trabalho são os seguintes:

- Memorial descritivo, linha de Transmissão Carazinho 1 – Tapera 2, da empresa Engetran;
- Memória de cálculo de estratificação do solo e medições, empresa RKJ Engenharia;
- Níveis de curto circuito fornecidos pela Eletrosul;
- Níveis de curto-circuito fornecidos pela Eletrocar – Usina Mata Cobra;
- Norma IEEE 80/2013 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding;
- Projeto Básico elaborado pela empresa RKJ Engenharia, em 2021;
- Memorial descritivo de construção, de 1982, da subestação Carazinho 1, com memória de cálculo de malha de aterramento;

1.4. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema de aterramento é composto de uma malha de aterramento existente, que já está com sua capacidade esgotada, e é a mesma malha da época da construção da subestação Carazinho 1 (1982). A malha nunca sofreu intervenção ou ampliação.



Malha de aterramento atual da subestação.

A malha de terra projetada deverá ser conectada com a linha de transmissão Carazinho 1-Tapera 2, através do cabo para raios.

Neste trabalho, foi considerado que a linha de transmissão atua em conjunto com a malha de terra da Subestação Carazinho 1, formando um sistema único.

Na realização do cálculo, não foi considerada a impedância da malha de terra da Subestação Tapera 2, da Eletrosul, pois não havia o dado disponível. Como a subestação está conectada também pela linha de transmissão da SE Santa Marta da CEEE e pela linha que interliga a Usina Mata Cobra e a SE Carazinho 2, as correntes de falta são divididas entre estas linhas, através dos cabos para-raios.

Desta forma, o estudo aqui apresentado é bastante conservativo, pois considerou apenas a influência da LT Carazinho 1 – Tapera 2.

Não foram utilizados os dados das demais linhas e malhas de terra das subestações adjacentes, por falta de informações atualizadas e confiáveis.

Dados de curto circuito, na subestação Tapera 2, recebidos da Eletrosul, em 05/04/2021.

Níveis de Curto-Circuito

Configuração Dez/2020

| SUBESTAÇÃO | kV | TRIFÁSICO | | | MONOFÁSICO | | | BIFÁSICO-TERRA | | |
|------------|----|-----------|------|-------|------------|------|-------|----------------|------|-------|
| | | MVA | kA | X / R | MVA | kA | X / R | MVA | kA | X / R |
| Tapera 2 | 69 | 992.80 | 8.31 | 8.69 | 1120.10 | 9.37 | 8.71 | 1073.62 | 8.98 | 8.71 |

Configuração Dez/2025

| SUBESTAÇÃO | kV | TRIFÁSICO | | | MONOFÁSICO | | | BIFÁSICO-TERRA | | |
|------------|----|-----------|------|-------|------------|------|-------|----------------|------|-------|
| | | MVA | kA | X / R | MVA | kA | X / R | MVA | kA | X / R |
| Tapera 2 | 69 | 995.27 | 8.33 | 8.68 | 1113.32 | 9.32 | 8.76 | 1075.66 | 9.00 | 8.69 |

Níveis de curto circuito, considerando a geração da usina Mata Cobra:

MATA COBRA.

Trifásico – 670 A

Bifásico/terra – 890,20 A

Fase/terra máximo – 845,70 A

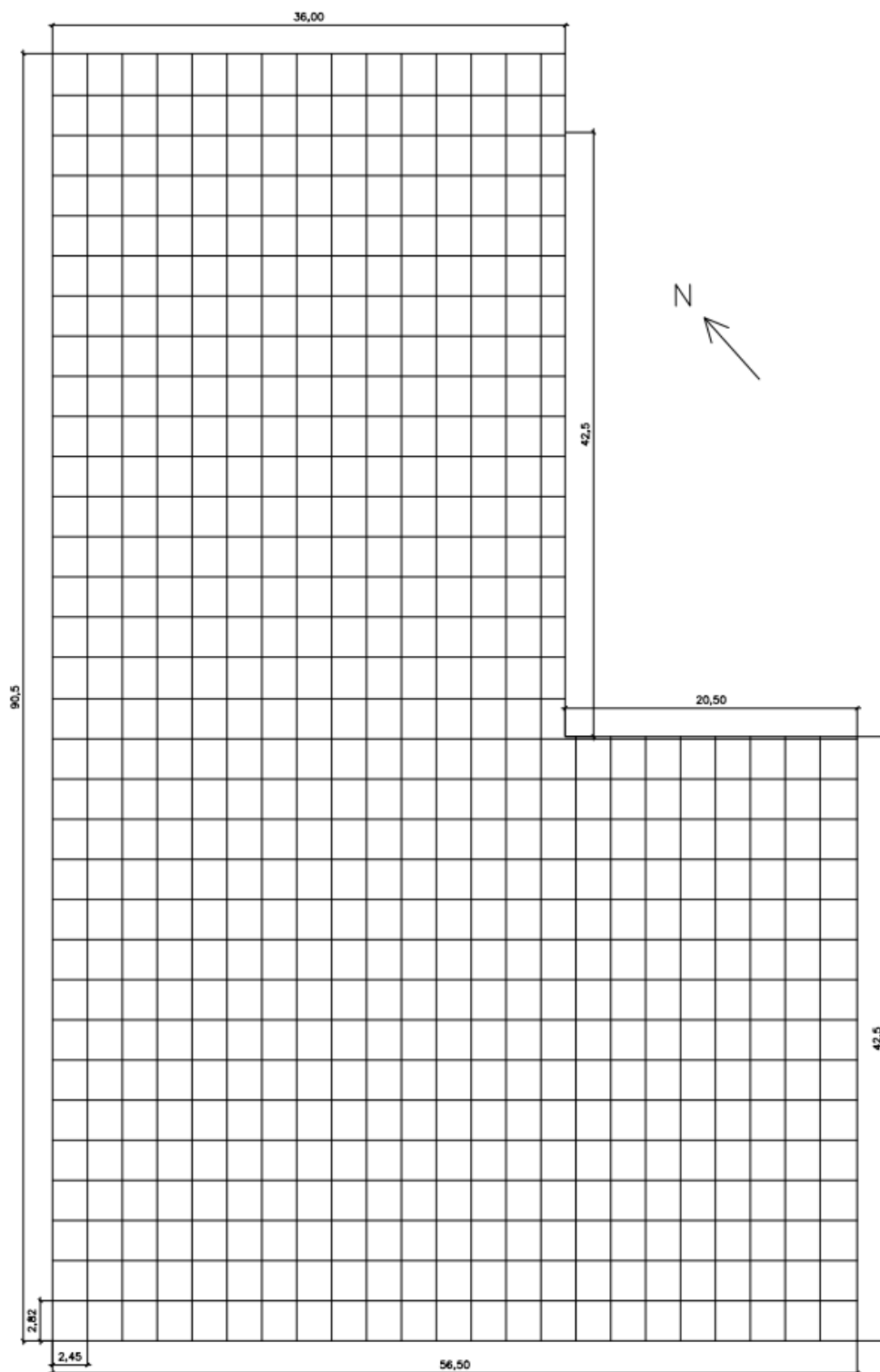
Através de cálculo computacional, chegamos ao nível de curto circuito, dentro da subestação Carazinho-1:

Valores de curto-circuito do sistema – SE Carazinho 1

| Barra | Tensão Barra (kV) | Trifásico (A) | Bifásico (A) | Bifásico Terra (A) | Monofásico (A) |
|-------------------------------------|-------------------|---------------|--------------|--------------------|----------------|
| Carazinho 1 | 69 | 4.553,48 | 3.943,43 | 4.415,52 | 4.106,89 |
| Setor 13,8kV Trafos em paralelo | 13,8 | 15.694,38 | 13.591,72 | 20.971,69 | 19.023,12 |
| Setor 13,8kV Trafos sem paralelo | 13,8 | 10.480,81 | 9.076,65 | 12.369,39 | 11.484,19 |

1.5. DIMENSIONAMENTO DA MALHA DE TERRA

A malha de terra sob análise é de formato L, de cabo de cobre nú, têmpera mole, de seção 95mm^2 enterrada a uma profundidade de 0,6m, com 114 hastes de diâmetro $20\text{mm} \times 3,0\text{m}$ colocadas ao longo do perímetro externo da malha conforme desenho a seguir:



Vista superior – Malha subestação de 69kV.

Como a LT Carazinho 1 – Tapera 2 está conectada na malha de terra da subestação, ocorre que a linha está aterrada e que conecta as duas malhas de terra pelo cabo para raios, possuindo as seguintes características:

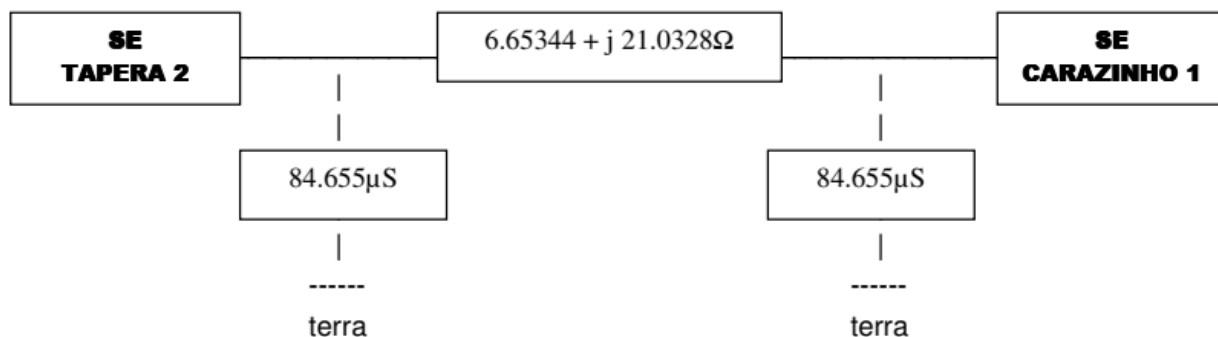
QUADRO RESUMO DE DADOS DA LT

| | |
|--------------------------------------|---|
| Denominação resumida | LT 2x69 kV Tapera 2 - Carazinho 1 |
| Origem | SE Tapera 2 |
| Destino | SE Carazinho 1 |
| Extensão da variante | 46,31 km |
| Tensão entre fases | 69 kV |
| Número de Fases | 3 |
| Quantidade de cabos por fase | 1 |
| Quantidade de cabos pára-raios | 1 |
| Cabo condutor | CAA HAWK / CA COSMOS |
| Cabo Pára-raios | OPGW / HS 3/8" |
| Temperatura de projeto | 75° C (temp. amb.= 30°C e vel. vento = 1 m/s) |
| Ampacidade | 739 A (HAWK) / 718 A (COSMOS) |
| Isoladores | Vidro |
| NBI | 410 kV |
| Tipo de Estrutura | Metálica / Concreto |
| Tipo de Fundação | Tubulão |
| Metodologia de projeto estrutural | Estados Limites (IEC 60.826) |
| Risco de falha estrutural (Metálico) | $\leq 0,02$ (T ≥ 50 anos) - (rug B) |
| Risco de falha estrutural (Concreto) | $\leq 0,001$ (T ≥ 100 anos) - (rug C) |

CONSTANTES ELÉTRICAS DA LINHA / POR CIRCUITO

- Impedância de sequência positiva: 0,14367 + j0,45417 Ω /km.
- Impedância de sequência zero: 0,41217 + j1,7356 Ω /km.
- Reatância capacitiva de sequência positiva: 0,276956 M Ω .km.
- Reatância capacitiva de sequência zero: 0,599019 M Ω .km.

16.3 CIRCUITO PI / POR CIRCUITO



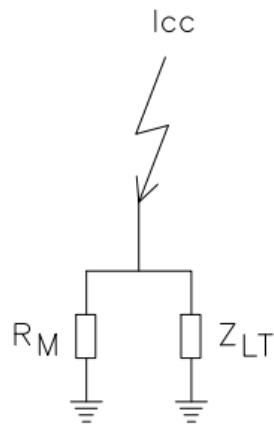
Considerando, que as resistências de pé de torre da linha de transmissão possuem um valor de 20 ohms.

A linha possui 148 torres.

Calculando o equivalente da linha, de sequência zero, do circuito formado pelos cabos para raios e resistências de pé de torre, obtemos, por método computacional, o seguinte valor:

$$Z_{LT} = (2,6993 + j2,37166 \text{ ohms}).$$

Assim, teremos o seguinte circuito equivalente, onde parte da corrente de curto-circuito no setor de 69kV se dissipa na malha de terra, e a outra parte da corrente retorna pelo cabo para raios da linha de transmissão.



Onde:

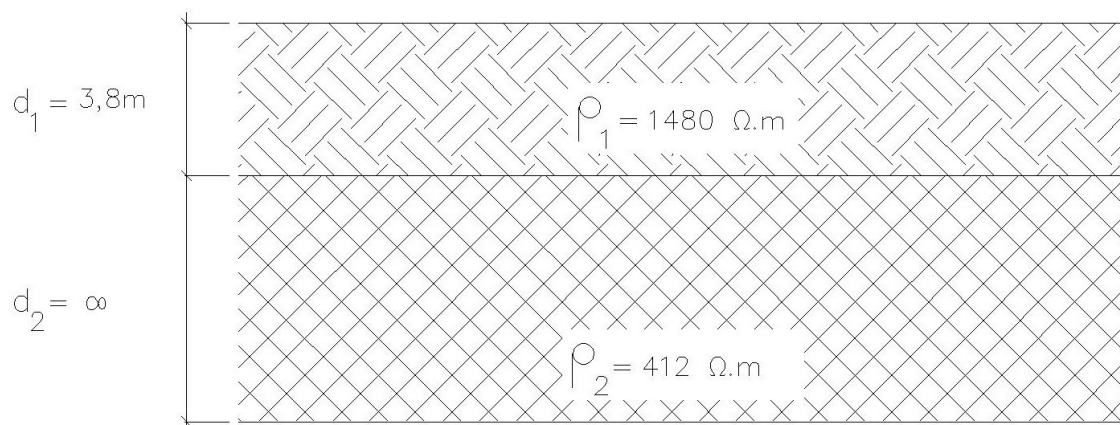
I_{cc} = Corrente de curto circuito (5.000A (considerando um acréscimo sobre a corrente calculada de curto circuito trifásica de 4553,6A).

I_{RM} = Corrente de curto circuito que flui para a malha (calculado em 1015,03A – a malha foi simulada com 1250A de corrente de curto-circuito).

R_M = Resistência da malha (calculada em 10,6 ohms).

Z_{LT} = Resistência equivalente do aterramento da linha de transmissão:(calculada em $2,6993+2,3716j$ ohms).

Logo, a corrente que flui para a malha 1 é de 1015,03A.



Estratificação do solo, para duas camadas.

Cabos condutores:

Adota-se como critério de segurança que os condutores empregados em sistemas de aterramento devem ter área suficiente para que o material empregado não funda sob condições de máxima corrente de falta e tempo máximo de interrupção a que o condutor será submetido.

A equação de fusão, indicada abaixo, pode ser empregada para qualquer material do qual se conheçam as constantes de interesse.

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_t \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)} \quad [\text{Ref. IEEE Std. 80-2000/2013}]$$

Onde:

I - Corrente de falta [kA]

A - Área do condutor [mm²]

T_m - Temperatura máxima permissível para o condutor [°C]

T_a - Temperatura ambiente [°C]

α_o - Coeficiente térmico da resistividade a 0 [°C]

α_t - Coeficiente térmico da resistividade a t [°C]

ρ_t - Resistividade a t [°C] do condutor [μΩcm]

t_t - Duração da corrente de falta [s]

TCAP - Constante do material [J / cm³ / °C]

K₀ = 1 / α_o

A equação é válida para tempos da ordem de poucos segundos, por considerar a transformação adiabática (sem troca de calor com o meio ambiente).

Verifica-se que o condutor de cobre com 95mm² e a conexão soldada exotermicamente apresentam capacidade de transporte (100 %) da ordem de 26,69kA, para uma corrente de falta de duração de 1s.

Esta capacidade de transporte indica que a utilização deste condutor é satisfatória e usual dentro dos critérios de projeto.

Potenciais suportáveis pelo ser humano:

Os limites de curta duração (de 0,03 até 3 segundos) dos potenciais suportáveis pelo ser humano, são, via de regra, definidos através do equacionamento descrito na IEEE Std. 80-2000/2013 que, baseando-se no trabalho de C. F. Dalziel, apresenta duas equações de potenciais toleráveis (passo e toque).

A duração para a qual uma corrente de 60 Hz pode ser tolerada pela maioria das pessoas (99,5%), sem fibrilação ventricular, é definida pela seguinte equação:

$$I_B = \frac{\sqrt{0,116}}{t_s} \quad (\text{Para uma pessoa de massa 50kg - Ref. IEEE Std. 80-2000/2013})$$

Onde:

I_b = Corrente tolerada pelo corpo humano;

t_s = Tempo de duração da corrente.

Para as equações anteriores, define-se que: as resistências de contato dos pés e das mãos são consideradas iguais a zero; um valor de 1000 Ω foi selecionado para representar a resistência do corpo humano de uma mão para ambos os pés, de uma mão para a outra mão e de um pé para o outro pé, portanto $R_B = 1000 \Omega$.

O efeito da camada de cobertura superficial do solo (camada de brita) em contato com os pés é contemplado através da seguinte equação:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09} \quad [\text{Ref. IEEE Std. 80-2000/2013}]$$

Onde:

ρ_s - resistividade da camada de cobertura do solo [$\Omega.m$];

h_s - espessura da camada de cobertura do solo [m];

ρ - resistividade do solo [$\Omega.m$].

Considerando - se as seguintes condições, para o cálculo das tensões de passo e toque toleradas para seres humanos:

- Uma pessoa de massa 50 kg;
- Tempo de duração da falta de 0,5s;
- Corrente que flui para a malha de terra: 1.015,03A (para efeito de cálculo 1.250A);
- Camada de revestimento do solo adequada ao local em projeto (camada de brita de 3000 $\Omega.m$);
- Espessura da camada superficial de brita: 0,40m.

Com o emprego das equações a seguir, é possível determinar as tensões de toque e passo toleráveis para a malha de terra:

$$E_{TOQUE} = (1000 + 1,5 \cdot C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad [\text{Ref. IEEE Std. 80-2000/2013}]$$

$$E_{PASSO} = (1000 + 6 \cdot C_S \cdot \rho_S) \cdot \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad [\text{Ref. IEEE Std. 80-2000/2013}]$$

Logo:

Tensão de toque tolerável: 864,4,8 V.

Tensão de passo tolerável: 2965,6 V.

Cálculo da corrente de curto-circuito que flui para a malha de terra:

A corrente dissipada na malha de aterramento é: 1250A, calculado através do divisor de corrente.

Logo as tensões de toque e de passo geradas na malha de terra são:

Tensão de toque: 862,8V.

Tensão de passo: 1531,0V.

Portanto, dentro do limite tolerável pelo ser humano.

**1.6. TABELA RESUMO DOS RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL –
MALHA DA SE CARAZINHO 1**

| MALHA DE TERRA | |
|---|--|
| Método utilizado para a simulação | IEEE 80:2000/2013 |
| Número de hastes de aterramento | 114 |
| Comprimento e seção das hastes | Ø20x3000mm De aço cobreado de alta camada 254um. |
| Frequência | 60Hz |
| Material da malha | Cobre nu seção 95mm ² |
| Temperatura | 40°C |
| Tempo de duração da corrente de falta | 0,5s |
| Corrente de curto fase-terra | 1.250A |
| Relação X/R | 8,60 |
| Massa do corpo humano | 50kg |
| Fator de reflexão K | -0,339 |
| Fator da camada de superfície (C _s) | 0,949 |
| Fator de decremento (D _f) | 1,023 |
| Tensão de toque tolerável – 50kg | 864,4V |
| Tensão de passo tolerável – 50kg | 2965,6V |
| Tensão de toque calculada | 862,8V |
| Tensão de passo calculada | 1531,0V |
| Resistência de aterramento da subestação | 10,603Ω |
| Comprimento total dos condutores | 44m |
| GPR – Ground Potential Rise | 13553,1V |

1.7. CONSIDERAÇÕES CONSTRUTIVAS A RESPEITO DA MALHA DE TERRA

A seguir, são apresentadas algumas recomendações construtivas a respeito da malha de terra da Subestação Carazinho 1.

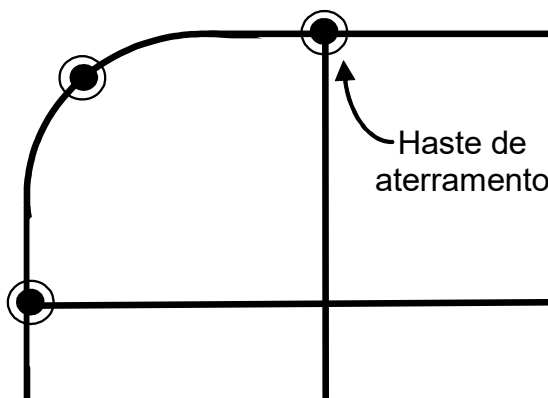
É importante comentar, que os potenciais de toque e passo admissíveis são determinísticos considerando pessoas descalças. Assim, se for considerado que as pessoas que transitam, no interior da Subestação, estão usando equipamento de segurança (por exemplo: botas, luvas, capacete, etc.) pode - se abstrair que os potenciais toleráveis são muito superiores aos calculados.

A cobertura do solo na região da SE será a usual, a saber, pedra britada com espessura de camada de 40 cm, conforme detalha exemplificado anteriormente.

Visando uniformizar o sistema de aterramento e dar margem e segurança adicional à expansão do sistema, recomenda - se adotar para o condutor da malha de aterramento e cerca a bitola de 95 mm².

Em função das margens de segurança existentes, poderão ser realizadas adaptações na geometria do sistema de aterramento, sem que isto produza riscos para a instalação.

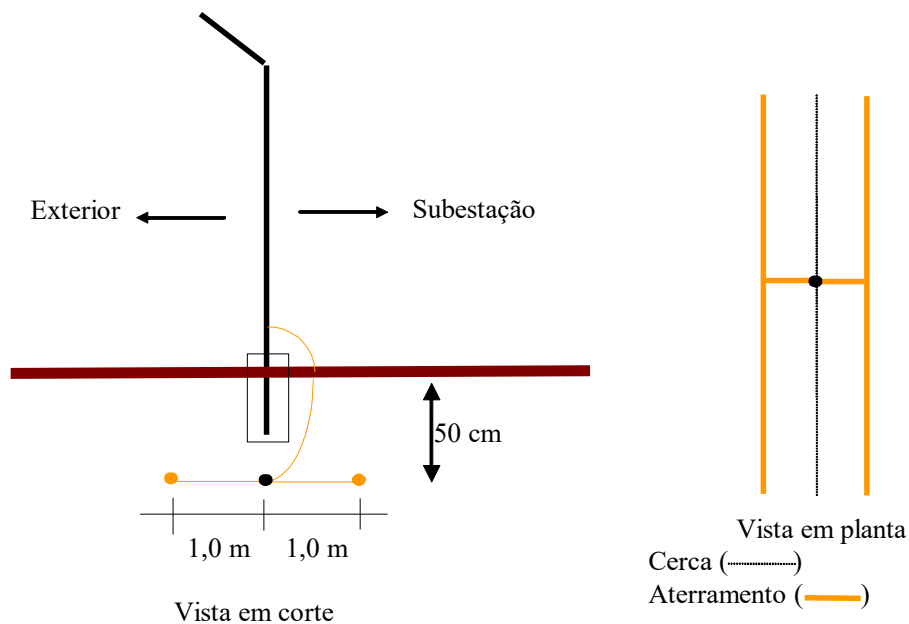
É conveniente que os vértices das malhas devam ser arredondados, conforme detalhe apresentado na figura abaixo, a seguir.



Detalhe dos vértices da malha principal (arredondados).

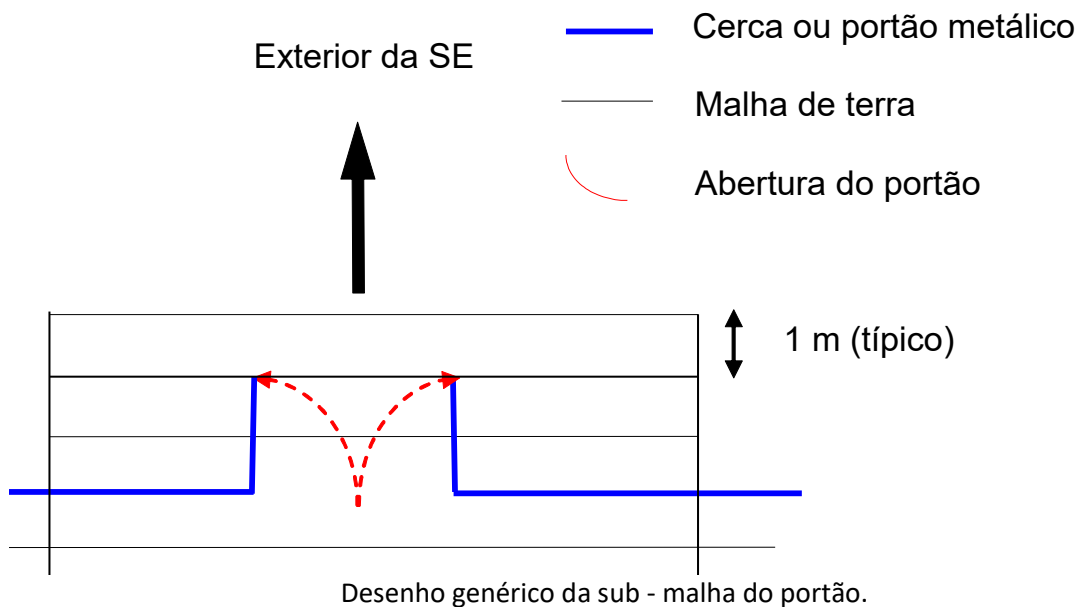
Além das hastes de aterramento definidas para os vértices, deverão ser instaladas hastes de aterramento nos para-raios, TC's, TP's, neutros dos transformadores de força e baixadas do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

Para garantir os potenciais de toque na cerca metálica, esta deverá ser aterrada com dois condutores periféricos da malha, de 95mm², localizados 1,00 m para o exterior e 1,00 m para o interior da mesma. A Figura abaixo, apresenta um detalhe da situação citada.



Detalhe do aterramento da cerca.

Considerando que a malha de terra da SE Carazinho 1 envolve todas as instalações e que os portões metálicos de acesso a subestação abrem para o exterior da mesma, conforme apresentado na Figura a seguir, esperando-se que às tensões produzidas no solo quando da ocorrência de curto – circuito malha-solo estejam controladas.



1.8. CONCLUSÕES

A malhas de terra da Subestação Carazinho 1 atende satisfatoriamente os requisitos de tensão de toque e de passo, estabelecidos na IEEE Std. 80-2000/2013, desde que atendidas as recomendações deste estudo.

1.9. RESPONSABILIDADE TÉCNICA

Assina a presente Memória de Cálculo o profissional abaixo identificado, legalmente habilitado como responsável técnico pelas informações descritas neste documento.

Porto Alegre, 02 de agosto de 2021.

Rogério Kruse Junior

Engenheiro Eletricista

CREA-RS nº 146.439