



PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE
Departamento Municipal de Água e Esgotos
Gerência de Projetos e Obras



CONCORRÊNCIA Nº 18.10.000004911-0

**ESTUDOS E PROJETOS
PARA AMPLIAÇÕES DO
SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE
ÁGUA PONTA DO ARADO**

**VOLUME 2: SUBESTAÇÃO TRANSFORMADORA DMAE 69 kV
PONTA DO ARADO**

Tomo 3.2 – PROJETO BÁSICO ELÉTRICO, ELETROMECAÂNICO E CIVIL

CADERNO 3.2.2 – ESTUDO E CÁLCULOS DA MALHA DE ATERRAMENTO



Revisão 00
(Março/2020)

CODIFICAÇÃO DO RELATÓRIO

Código do Relatório:	Se69 900 0E MD 003 R00.docx		
Título do Documento:	VOLUME 3: SUBESTAÇÃO TRANSFORMADORA 69 kV Tomo 3.2 – Projeto Básico Elétrico, Eletromecânico e Civil Caderno 3.2.2 - Estudo e Cálculos da Malha de Aterramento		
Resp. Aprovação Inicial:	Luiz Eduardo Piazza		
Data da Aprovação Inicial:	31/03/2020		
Quadro de Controle de Revisões			
Análise nº:	Justificativa/Discriminação da Revisão	Aprovação	
		Data	Nome do Responsável
00	Emissão Inicial	31/03/20	Luiz Eduardo Piazza
01	Revisão Geral	10/05/2020	Luiz Eduardo Piazza

EQUIPE TÉCNICA E DE GERENCIAMENTO DO CONTRATO:

Responsável Técnico:

Eng^o Luiz Eduardo Piazza

Coordenador do Projeto:

Eng^o Luiz Eduardo Piazza

Técnicos de Nível Superior:

Eng^o João Paulo Schedler
Eng^o Claudio Luis Creitchmann
Eng Henrique Bergamo Giacomel
Eng^o Gilberto Cracco
Arq^a Carolina Piazza
Arq^o Pedro Malmann

Técnicos:

Jônatas Rodrigues Blume
Raquel Moraes Prestes
Thielly Bervanger

**PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE
DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS**

APRESENTAÇÃO

Com o intuito de consubstanciar ações de melhoria da eficiência na exploração dos serviços de gestão de água de Porto Alegre, o Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) da Prefeitura de Porto Alegre contratou a Ecolux Engenharia Ltda., para o desenvolvimento do contrato Nº 18.10.000004911.0, **Contratação de elaboração dos projetos elétricos para o Sistema de Abastecimento de Água Ponta do Arado.**

Os objetivos e as metas a considerar no desenvolvimento das soluções elétricas para o Sistema de Abastecimento de Água Ponta do Arado visam garantir os níveis de confiabilidade, qualidade e desempenho operacional atualmente exigíveis no contexto das diretrizes, os critérios e princípios estabelecidos especificamente pelo DMAE.

Porto Alegre, março de 2020

Engº Luiz Eduardo Piazza
Coordenador e Responsável Técnico



SUMÁRIO

SUMÁRIO

VOLUME 1 – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA – ETA PONTA DO ARADO

TOMO 1.1 – Projeto Básico Elétrico e de Automação

Caderno 1.1.1 – Memorial Descritivo e Especificações Técnicas

Caderno 1.1.2 – Peças Gráficas

TOMO 1.2 – Relação de Materiais, Orçamento e Comprovantes de Preço

Caderno 1.2.1 – Projeto Elétrico e de Automação, Projeto Arquitetônico e Projeto Estrutural

VOLUME 2 – ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA TRATADA – EBAT PONTA DO ARADO

TOMO 2.1 – Projeto Básico Elétrico e de Automação

Caderno 2.1.1 – Memorial Descritivo e Especificações Técnicas e Peças Gráficas

TOMO 2.2 – Projeto Básico Arquitetônico

Caderno 2.2.1 – Memorial Descritivo, Especificações Técnicas e Peças Gráficas

TOMO 2.3 – Projeto Básico Estrutural

Caderno 2.3.1 – Memorial Descritivo, Especificações Técnicas e Peças Gráficas

TOMO 2.4 – Relação de Materiais, Orçamento e Comprovantes de Preço

Caderno 2.4.1 – Projeto Elétrico e de Automação, Projeto Arquitetônico e Projeto Estrutural

VOLUME 3 – SUBESTAÇÃO TRANSFORMADORA DMAE 69 KV PONTA DO ARADO

TOMO 3.1 – Projeto Básico da Casa de Comando

Caderno 3.1.1 – Memorial Descritivo, Especificações Técnicas e Peças Gráficas

TOMO 3.2 – Projeto Básico Elétrico, Eletromecânico e Civil

Caderno 3.2.1 – Memorial Descritivo e Especificações Técnicas

Caderno 3.2.2 – Estudo e Cálculos da Malha de Aterramento

Caderno 3.2.3 – Estudo de Curto Circuito, Coordenação e Seletividade

Caderno 3.2.4 – Pesquisa Geotécnica - Sondagem

Caderno 3.2.5 – Peças Gráficas

TOMO 3.3 – Relação de Materiais, Orçamento e Comprovantes de Preço

Caderno 3.3.1 – Casa de Comando e Subestação Transformadora 69kV

VOLUME 4 – ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA BRUTA – EBAB PONTA DO ARADO

TOMO 4.1 – Ampliação de Instalações Elétricas

Caderno 4.1.1 – Memorial Descritivo e Especificações Técnicas e Peças Gráficas

Caderno 4.1.2 – Relação de Materiais, Orçamento e Comprovantes de Preço

ÍNDICE

ELABORAÇÃO DOS PROJETOS ELÉTRICOS PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA PONTA DO ARADO

CONCORRÊNCIA DMAE Nº 18.10.000004911.0

TOMO 3.2 – PROJETO BÁSICO ELÉTRICO, ELETROMECAÂNICO E CIVIL CADERNO 3.2.1 – MEMORIAL DESCRITIVO E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

ÍNDICE

1	PROJETO DE ATERRAMENTO	1
1.1	Sistema de Aterramento	1
1.1.1	Considerações Gerais.....	1
1.1.2	Medição da Resistividade do Solo	2
1.2	Estratificação do Solo	2
1.2.1	Resistividade do Solo.....	3
1.3	Considerações Gerais	3
1.3.1	Cabos Condutores	4
1.3.2	Potenciais suportáveis pelo ser humano.....	4
1.3.3	Potenciais produzidos no solo.....	6
1.3.4	Fator de Divisão da Corrente da Malha de Terra	7
1.4	Cálculo da Malha de Terra Considerando o Sistema de Terra Completo	9
1.4.1	Dimensionamento do Condutores e da Malha de Terra.....	9
1.4.2	Corrente de Curto Circuito Malha-Solo	11
1.4.3	Tensão de Passo e de Toque – visto da malha geral	12
1.5	Layout da Malha	13
1.6	Resultados dos Cálculos do Software	14
1.7	Informações do Projeto	19
1.8	Cálculo da Malha de Terra Considerando o Sistema de Terra – Lado DMAE	20
1.8.1	Dimensionamento do Condutores e da Malha de Terra.....	20
1.8.2	Corrente de Curto Circuito Malha-Solo	21
1.8.3	Tensão de Passo e de Toque – visto da malha geral	22
1.9	Layout da Malha	24
1.10	Resultados dos Cálculos do Software	25
1.11	Informações do Projeto	30
1.12	Conclusão.....	30

1 PROJETO DE ATERRAMENTO

1.1 Sistema de Aterramento

1.1.1 Considerações Gerais

O sistema de aterramento foi dimensionado de modo que a resistência de aterramento seja operativa, permitindo o desarme da proteção geral de forma segura e de forma mais rápida possível, eliminando assim, as correntes de falta dentro de tempos aceitáveis sem impor riscos a operação e as equipes de manutenção. Sempre levando em consideração as características do solo e dos equipamentos a serem instalados.

As medições da resistividade do solo foram efetuadas através do método Wenner, com terrômetro Instrum do Brasil Indústria Eletrônica Ltda. Modelo TMD 20KW.

Por efeito de cláusula contratual, esta projetista realizou este trabalho a partir das medições de resistividade do solo efetuadas antes da terraplenagem da área da subestação. Portanto, a malha especificada e projetada é orientativa e deve ser verificado durante a etapa de execução das obras da subestação transformadora, após concluída a etapa de terraplenagem.

Como as áreas da CEEE-D e do DMAE são distintas com projetos independentes, este estudo foi separado em dois momentos: a) o primeiro momento foi realizado estudo da malha operando na sua totalidade, ou seja, ambas as malhas – lado CEEE-D e lado DMAE, interligadas e completas; b) o segundo momento calculado somente com a malha do DMAE instalada, com o objetivo de verificar as proteções de toque e passo dentro da área de sua influência, mesmo que não seja instalada a malha da CEEE, garantindo a segurança na Subestação Transformadora DMAE 69kV Ponta do Arado – lado DMAE.

A nova medição de resistividade do solo deverá ser realizada com tempo seco e após 5 dias sem chuva. Os novos dados de resistividade do solo deverão ser utilizados para recalcular e ajustar o presente projeto da malha de aterramento, de modo que as tensões de passo e toque fiquem dentro da suportabilidade humana.

1.1.2 Medição da Resistividade do Solo

Medições efetuadas através do método Wenner, com tempo seco, solo seco e temperatura variando entre 26°C e 30°C. As estacas para medição foram dispostas em uma linha, diversas orientações geográficas, a fim de obter o resultado da resistividade do solo tão fiel quanto possível.

Os valores medidos e calculados estão representados no item 1.8 – Dados da Medição da Resistividade do Solo.

Para os cálculos do sistema de aterramento da Subestação Transformadora foi utilizado o programa XGSLab multicamadas versão 9.0.1.1 LightML da empresa Stin Ingegneria.

1.2 Estratificação do Solo

A estratificação do solo feita através do método gráfico conforme critérios da resistividade aparente do solo estratificado em 2 camadas, dado pela norma NBR 15751/2013. Os valores alcançados foram estão representados na Tabela 1 e figura 1: Estratificação do Solo.

O solo ficou estratificado, após análise matemática e cálculos computacionais, da seguinte forma:

Tabela 1; Estratificação do Solo

Layer	$\rho_{lf} [\Omega m]$	$h [m]$
1	23,70	5,01
2	391,44	∞

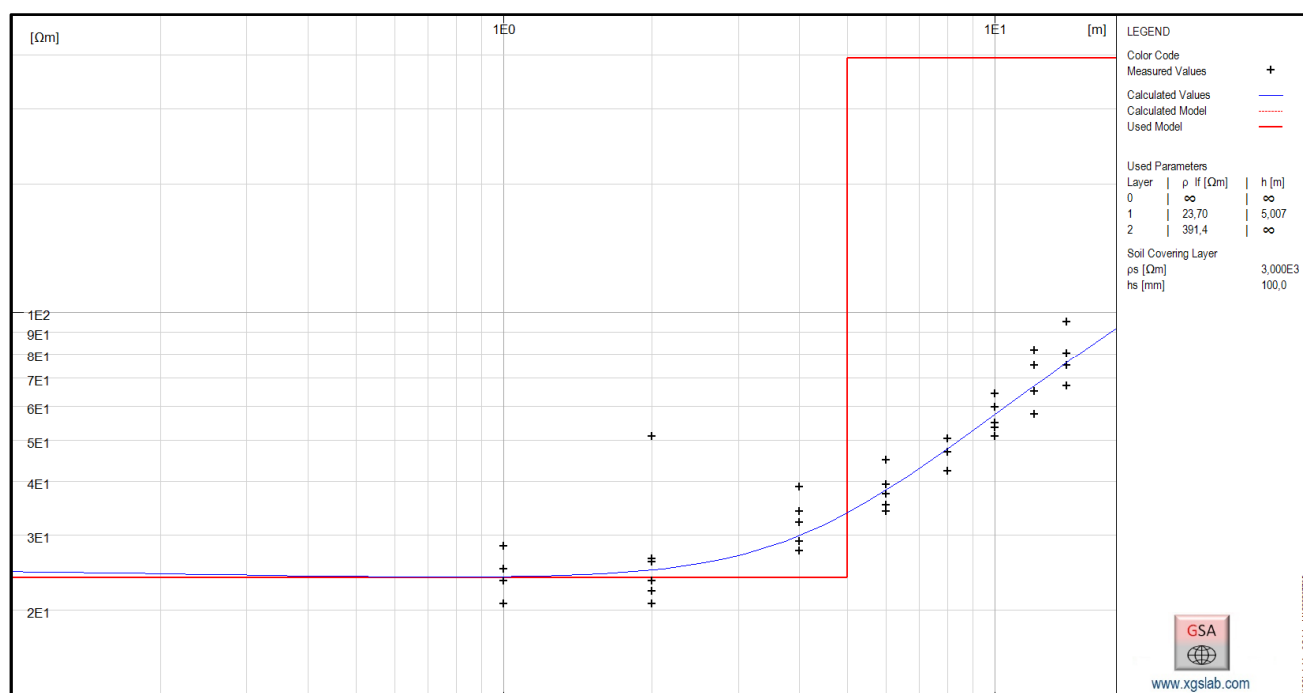


Fig 1: Gráfico da Estratificação do solo

1.2.1 Resistividade do Solo

A medição das resistividades do solo pelo método de Wenner foi objeto de Relatório específico, medido em campo, estando o resultado da estratificação do solo, apresentado a seguir.

- Resistividade da primeira camada $\rho_1 = 23,70 \Omega m$
- Resistividade da segunda camada $\rho_2 = 391,44 \Omega m$
- Profundidade da primeira camada $h_1 = 5,01 m$
- Profundidade da segunda camada $h_2 = \infty$

Conforme se verifica, o modelo do solo será definido como sendo de um solo estratificado em 2 camadas, sendo a primeira camada representada por uma resistividade de $23,70 \Omega m$ e espessura de $5,01 m$, e a última camada representada por solo de resistividade de $391,44 \Omega m$ e espessura de ∞m .

1.3 Considerações Gerais

Para o cálculo da seção mínima do condutor da malha de aterramento, a equação é válida para tempos da ordem de poucos segundos, por considerar a transformação adiabática (sem troca de calor com o meio ambiente). Considerou - se que o condutor de

cobre de bitola 50 mm² e a conexão soldada exotermicamente apresentam capacidade de transporte (100 %) da ordem de 30 kA em 15 ciclos considerando X/R=10, acima do nível de curto-circuito máximo fase - terra estimado em 10kA, com duração da falta de 0,5s, e S_f aproximado de 0,18. Esta capacidade de transporte indica que a utilização de um condutor 50 mm² é satisfatória para a malha principal, conforme mostra a figura 2.

1.3.1 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.

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_i \cdot \alpha_r \cdot \rho_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a} \right)}$$

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_0 - Coeficiente térmico da resistividade a 0 [°C];

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

ρ_t - Resistividade a t [°C] do condutor [$\mu\Omega\text{cm}$];

t_c - Duração da corrente de falta [s];

$TCAP$ - Constante do material [$\text{J}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$];

$K_0 = 1 / \alpha_0$.

1.3.2 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

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:

$$I_{\text{tolerável}} = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

onde k é uma constante empírica que depende da massa da pessoa considerada e t é o tempo em segundos. Na NBR 15751/2013 definem-se dois valores para a constante k, a saber:

$$k_{50} = 0,116 \text{ A} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{para pessoas com massa de 50 kg})$$

$$k_{70} = 0,157 \text{ A} \cdot \text{s}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{para pessoas com massa de 70 kg})$$

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 $R_k = 1000 \Omega$ e o efeito da camada de cobertura superficial do solo (assumida como brita) em contato com os pés é contemplado através das seguintes resistências:

$$R_{2ps} = 6,0 \cdot C_s(h_s, K) \rho_s$$

$$R_{2pp} = 1,5 \cdot C_s(h_s, K) \rho_s$$

onde:

ρ_s - Resistividade da camada de cobertura do solo [Ωm]

h_s - Espessura da camada de cobertura do solo [m]

ρ - Resistividade do solo [Ωm]

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \text{ - Fator de reflexão}$$

Uma aproximação para $C_s(h_s, K)$, na qual se evita o cálculo de somatórios infinitos, é a seguinte:

$$C_s(h_s, K) = 1 - a \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + a} \right]$$

onde:

$$a = 0,106 \text{ m}$$

1.3.3 Potenciais produzidos no solo

O método dos coeficientes de potencial, geralmente empregado no projeto de sistemas à frequência industrial, caracteriza-se por permitir, principalmente, a modelagem de geometrias arbitrárias, em solos homogêneos ou estratificados em duas camadas. Além disto, permite determinar a parcela de corrente que flui através de cada trecho do eletrodo de aterramento, o potencial produzido em qualquer ponto do solo, a elevação de potencial e a resistência de aterramento do eletrodo. As equações de formulação deste método, estão apresentadas detalhadamente na bibliografia [B81] da IEEE Std 80, e simplificadaamente apresentam a seguinte forma:

$$[R] [I] = [U]$$

onde:

[R] - matriz das resistências próprias e mútuas do eletrodo [Ω];

[I] - vetor das correntes injetadas no solo pelos diversos trechos do eletrodo [A];

[U] - vetor da elevação de potencial do eletrodo [V].

A Figura a seguir mostra um perfil do potencial no solo, indicando como são medidas as tensões de passo e toque produzidas em tais perfis.

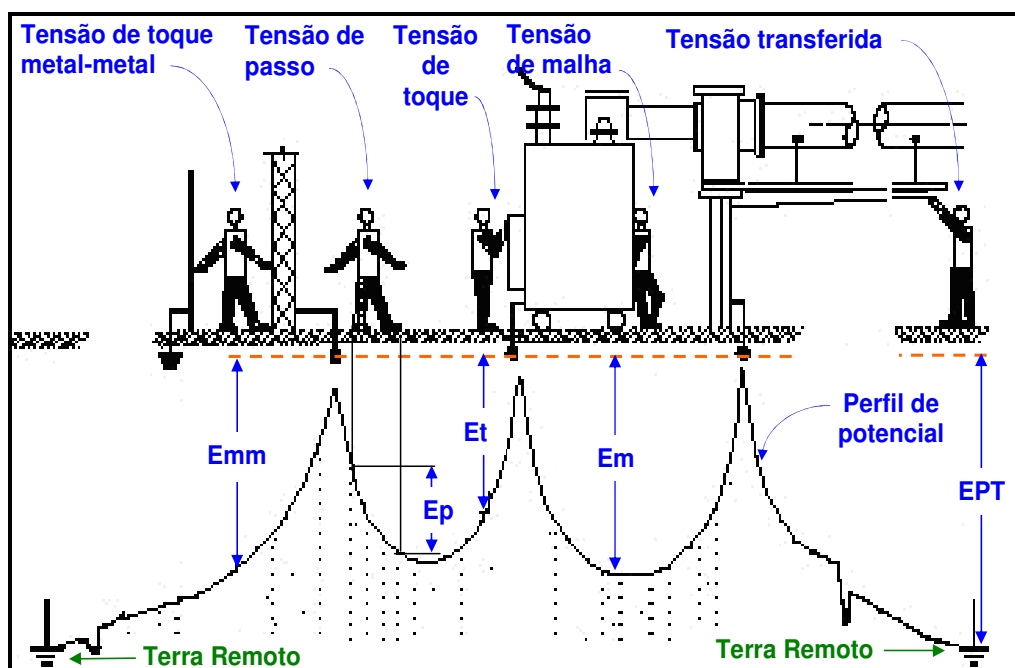


Fig. 2: Exemplo de um Perfil do Potencial no Solo, Adaptado da IEEE Std 80:2000.

Aplicando as equações anteriores, apresentadas na NBR 15751/2013, e considerando-se uma pessoa típica com 50 kg, uma duração da falta de 0,5 s e uma camada de revestimento do solo adequada ao local em projeto (pedra britada), temos os valores para as tensões toleradas para os seres humanos, no presente estudo, apresentados a seguir.

- Resistividade superficial do solo 23,70 Ωm
- Resistividade da pedra britada 3.000 Ωm
- Espessura da camada de brita 10 cm
- Massa do ser humano 50 kg
- Tempo de eliminação da falta 0,5
- Tensão de toque tolerável 696,3 V
- Tensão de passo tolerável 2.293 V

1.3.4 Fator de Divisão da Corrente da Malha de Terra

De fato, o fator de divisão de corrente S_f (aqui para efeito deste estudo da malha de terra e indo pelo lado da segurança) pode variar durante o período de duração da falta a terra. Contudo para o nosso propósito de cálculo da máxima corrente que circulará pela malha de terra, por definição da corrente simétrica da malha e da máxima corrente da malha, se assume que a taxa desta variação permanece constante durante

todo tempo de duração da falta. Além do mais estamos considerando que toda a corrente de curto circuito à terra irá efetivamente circular pela terra, desconsiderando a divisão desta corrente por outras partes do sistema (lado da segurança).

Foram considerados os seguintes parâmetros do sistema para realização dos cálculos da corrente na malha:

- I_e : Corrente assimétrica de retorno;
- S_f : Fator de divisão da corrente de falta;
- I_G : Corrente máxima de falta do sistema;
- I_g : Corrente simétrica do sistema;
- t_f : Tempo de duração da falta;
- ρ_s : Resistividade da camada de cobertura do solo;
- R_{eq} : Resistência equivalente (tabela C.1 IEEE80-2013);
- X_{eq} : Reatância equivalente (tabela C.1 IEEE80-2013).

Conforme IEEE std 80 2013 o fator de divisão da corrente é dado por:

onde:

$$S_f = I_g / 3 I_o$$

ou

$$S_f = \left| \frac{\overline{Z_{c1}}}{R_g + \overline{Z_{c1}}} \right|$$

$$I_G = D_f \times I_g$$

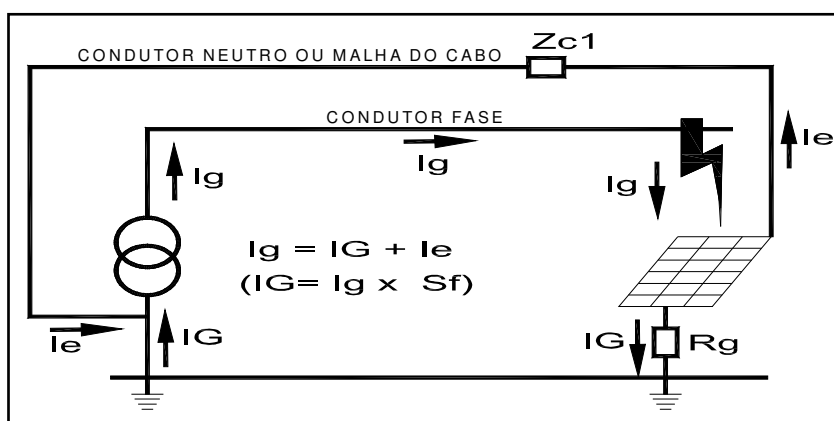


Fig 3: Corrente na malha de terra.

O resultado do cálculo computacional da corrente injetada na malha de terra está representado na fig. 4, onde utilizamos para efeito destes cálculos um S_f igual a 1, ou seja, estamos admitindo que toda a corrente de falta circulará pela malha de terra.

The screenshot shows the IEEE STD 80 - 2013 software interface. It has two main sections: input parameters and calculated results. The input section includes fields for Re [Ω] (2), If [A] (10000), f [Hz] (60), tf [s] (0,5), X/R (10), Req [Ω] (0), Xeq [Ω] (0), Sf (1,0000), and a Calculate button. The calculated results section shows Df (1,0262), Re [Ω] (2,0000), If [A] (10261,83), and an Electrode dropdown set to 1. There are also checkboxes for Start and End, and an Apply button. A line points from the calculated If [A] value to the text 'Máxima corrente de falta injetada na malha'.

IEEE STD 80 - 2013	
Re [Ω]	2
If [A]	10000
f [Hz]	60
tf [s]	0,5
X/R	10
Req [Ω]	0
Xeq [Ω]	0
Sf	1,0000
Calculate	
Df	1,0262
Re [Ω]	2,0000
If [A]	10261,83
Electrode	1
Start	<input type="checkbox"/>
End	<input type="checkbox"/>
Apply	

Máxima corrente de falta injetada na malha

Fig. 4: Dados de entrada da corrente “ I_g ” no programa e cálculo do fator “ S_f ”

1.4 Cálculo da Malha de Terra Considerando o Sistema de Terra Completo

1.4.1 Dimensionamento do Condutores e da Malha de Terra

A corrente de falta simétrica I_g injetada na malha de aterramento para este estudo foi de aproximadamente 9,1kA, considerando um tempo de eliminação da falta de 50ms.

Para efeito deste cálculo, levamos em consideração uma corrente mínima de 10kA, considerando a contribuição dos motores de média tensão instalados na Estação de Bombeamento de Água Tratada – EBAT. Também, para efeito de segurança, consideramos um fator de divisão desta corrente de falta S_f igual a 1, ou seja, estamos considerando que toda a corrente de curto circuito produzida pelo sistema é injetada diretamente na malha, desconsiderando-se assim, toda e qualquer subdivisão desta corrente pelos demais sistemas de aterramento da LT69kV. Consideração totalmente voltada para a garantia da segurança do sistema de aterramento e eliminação da falta.

Para as condições de curto circuito acima indicadas, o valor da seção mínima do condutor de aterramento calculada pelo programa está retratado na figura abaixo, no quadro indicado por “A [mm²]”.

IEEE Std 80-2013

le [A]	10000
tf [s]	0,5
I _{pk2} [A]	10000
tc [s]	0,5
k	0,6
Material	Coppe... ▼
TCAP [J/cm ³ °C]	3,42
α _r [1/°C]	0,00393
ρ _r [μΩ cm]	1,72
T _a [°C]	40
T _m [°C]	1083
K ₀ [°C]	234
<input type="button" value="Calculate"/>	
A [mm ²]	15,05

Seção Mínima

Fig 5: Determinação da Seção mínima do condutor

Os condutores da malha de terra são cabo de cobre nu 70mm² (padrão CEEE) com conexões tipo solda exotérmica, as hastes são tipo copperweld alta camada Ø 19mm com 3m de comprimento. Segundo nossa norma ABNT NBR 15751, seção mínima 50mm².

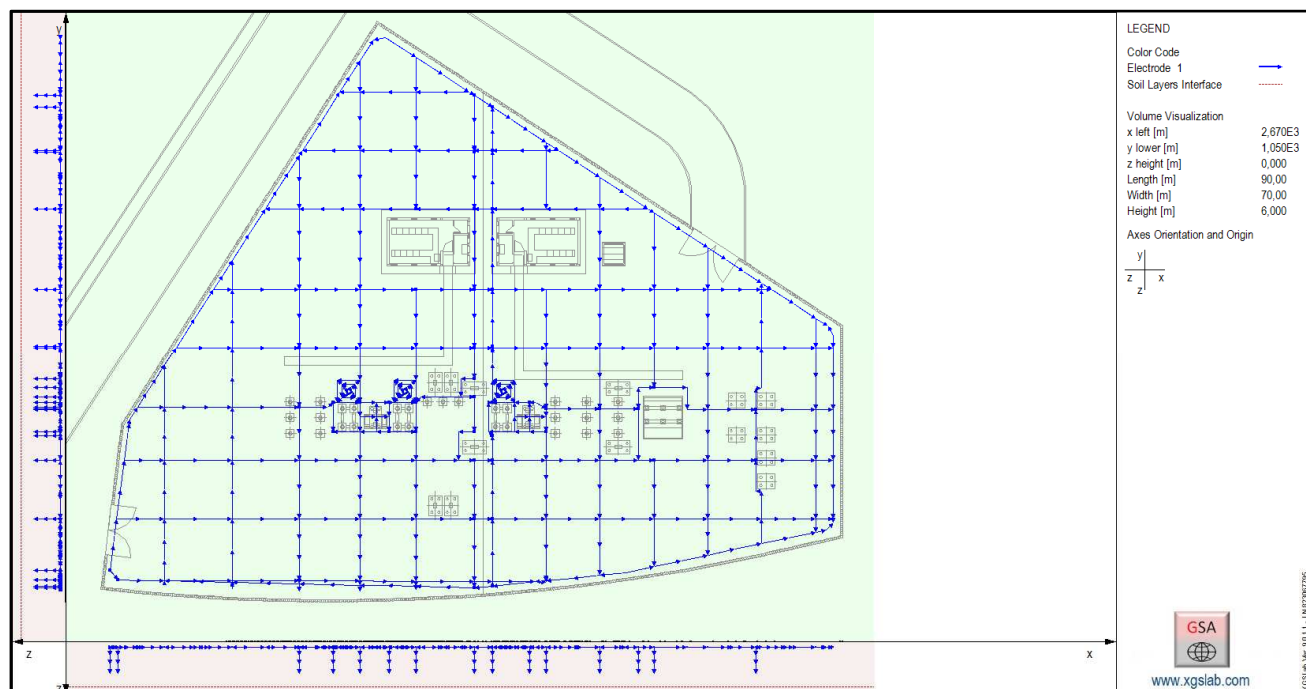


Fig 6: Malha de aterramento projetada e sentido da circulação da corrente

1.4.2 Corrente de Curto Circuito Malha-Solo

A corrente de curto-circuito de 10kA, adotada para a definição dos potenciais produzidos no solo, levou em consideração a resistência da malha projetada para a área da Subestação Transformadora 69kV Ponta do Arado, cujo resultado a partir da estratificação do solo em 2 camadas, apresentou valor de 1,09 Ω .

Electrode Name	Je [A]	$\angle Je$ [deg]	Ue [V]	$\angle Ue$ [deg]	Ue/ ΣJe [Ω]	$\angle (Ue/\Sigma Je)$ [deg]
Malha Geral	10261,830	0,000	11183,604	0,000	1,09E+00	0,000

Nota: O valor da resistência de aterramento é obtido a partir da relação entre a elevação de potencial de terra (EPT) e a corrente injetada pelo sistema de aterramento no solo, sendo obtida computacionalmente por uma solução matricial do sistema de equações, levando em consideração o fator de divisão da corrente que realmente será injetada na malha de terra - S_f .

Considerando os cálculos efetuados pelo método computacional, teremos os seguintes potenciais produzidos no solo:

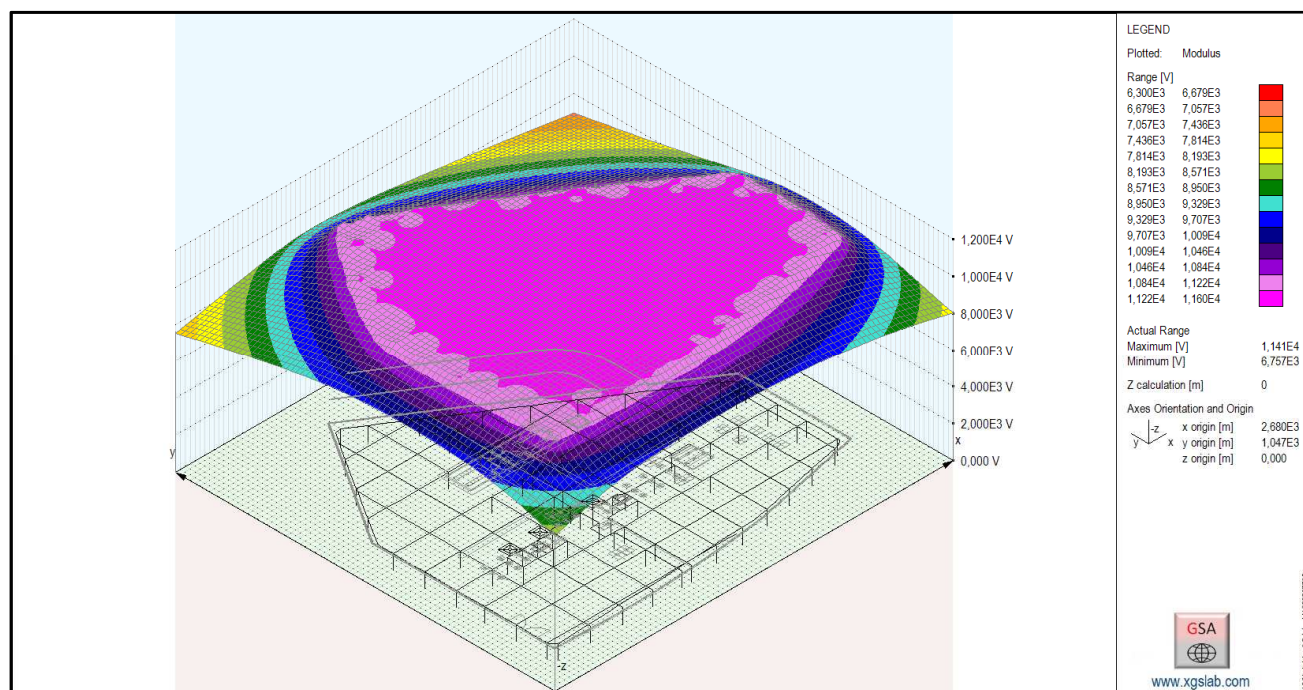


Figura 7: Gráfico das tensões produzidas no solo pela corrente de curto circuito

1.4.3 Tensão de Passo e de Toque – visto da malha geral

Os potenciais de toque e de passo admissíveis calculados através pelo programa, considerando a forma da malha, foi de 696,3 V e 2.293 V para toque e passo respectivamente, no solo com revestimento. No interior da Casa de Comando, a resistividade no piso acabado poderia ser acrescida entre 1.200 a 280.000 Ωm considerando o piso da como concreto com camada de 10cm da Tabela 5 - Resistividade do Material de Recobrimento (ρ_s) Porém o cálculo apresentado não está levando em consideração esta camada isolante considerando como uma camada de brita e, portanto, está pelo lado da segurança.

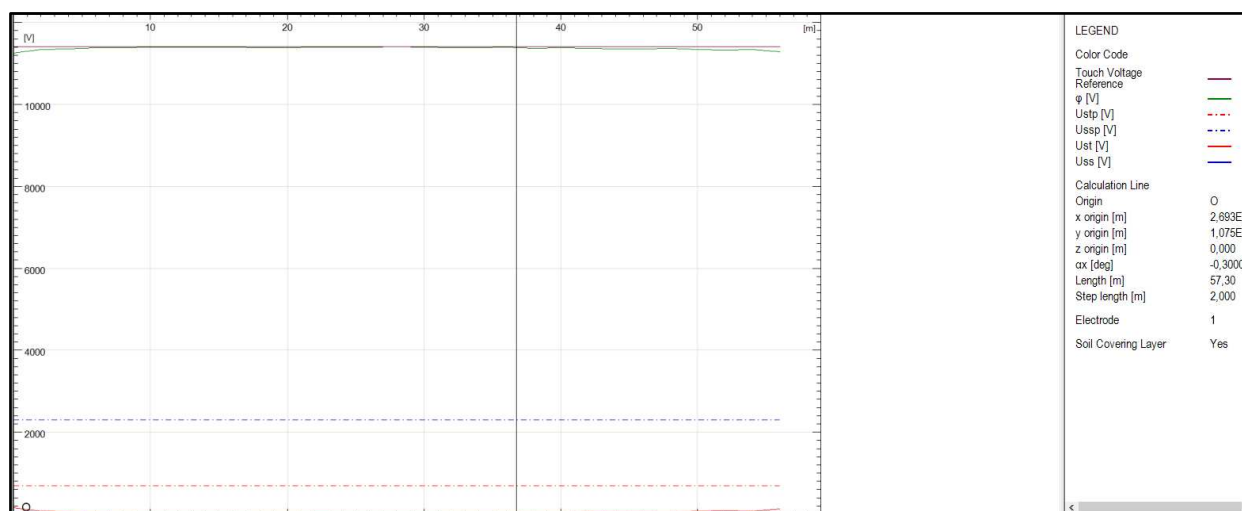


Fig 8: Curvas das tensões de toque e passo na superfície do solo sob o eixo da SE.

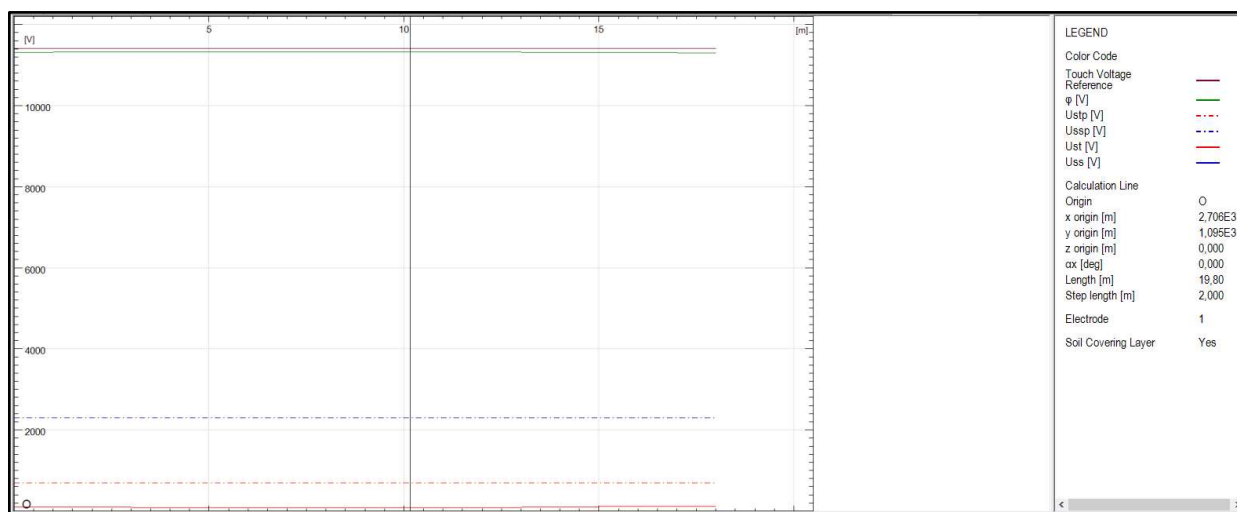


Fig 9: Curvas das tensões de toque e passo na superfície do solo sob o centro da Casa de Comando.

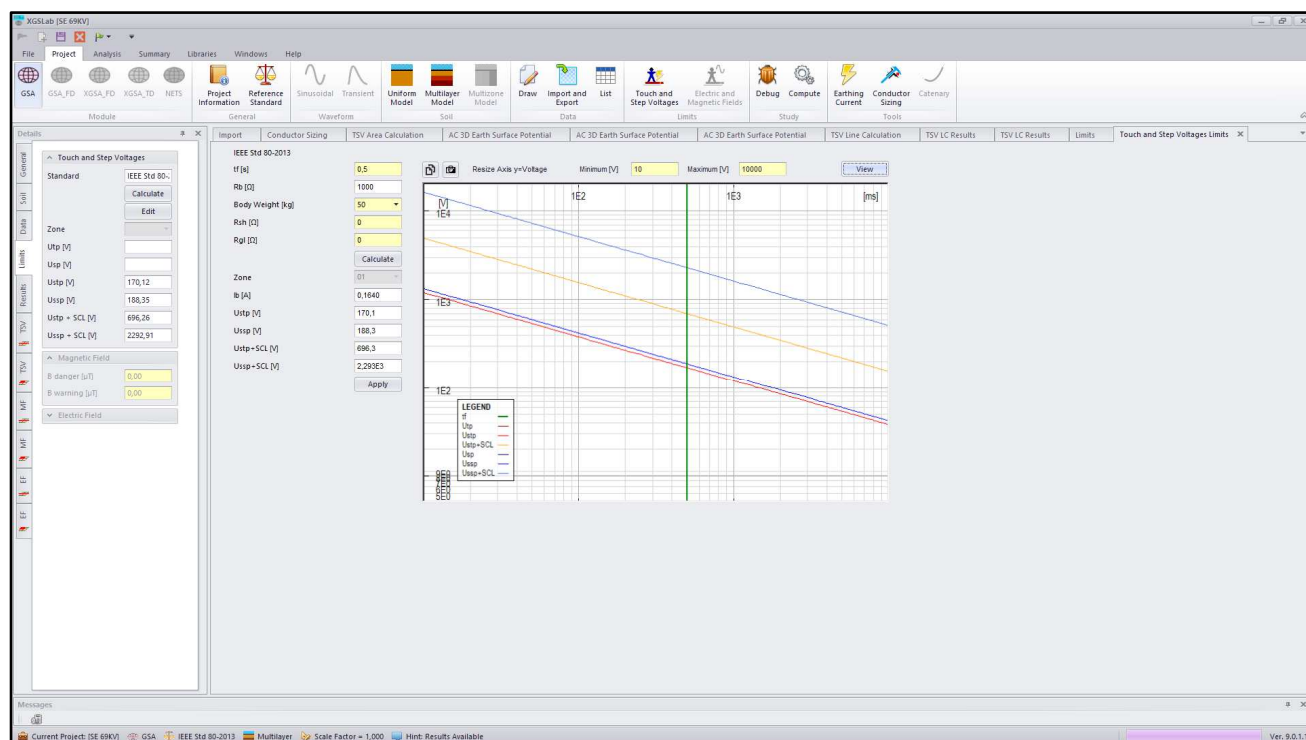


Fig. 10: Tensões de toque e passo no solo.

1.5 Layout da Malha

A malha de aterramento é composta por hastes cooperweld interligadas por condutores horizontais dispostos sob a Subestação Transformadora, Cabine de Medição e Abrigo de Painéis, enterradas à profundidade de 0,60m.

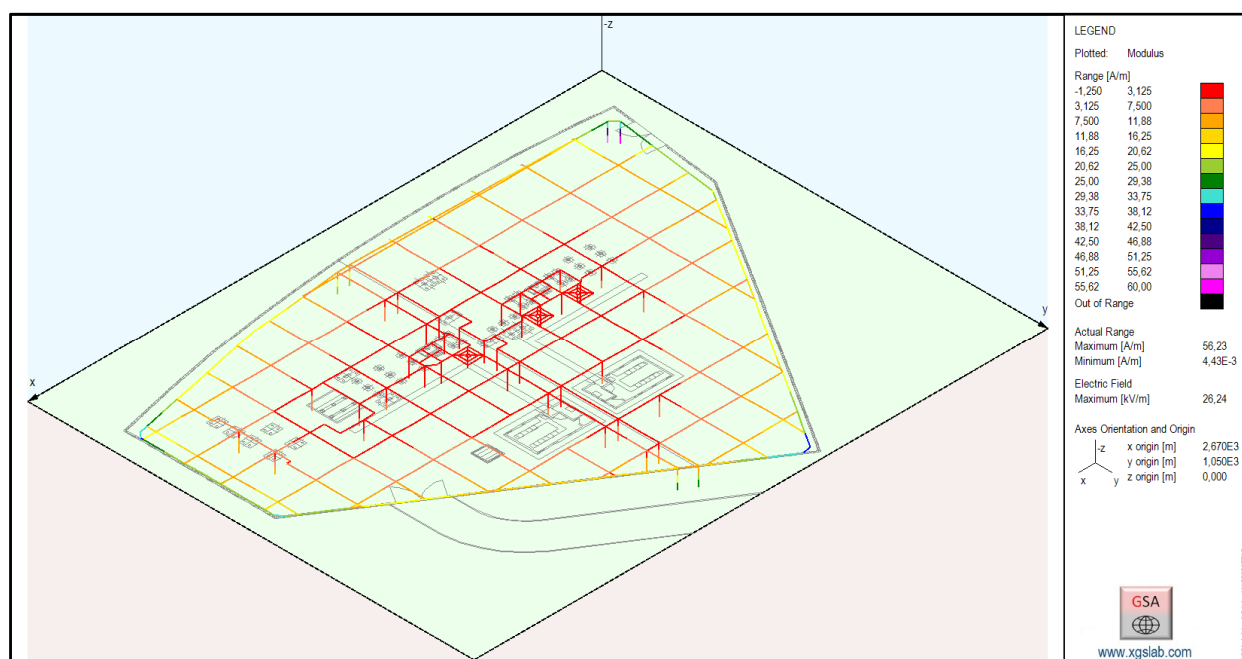


Fig. 11: Layout da malha de terra projetada, em 3D

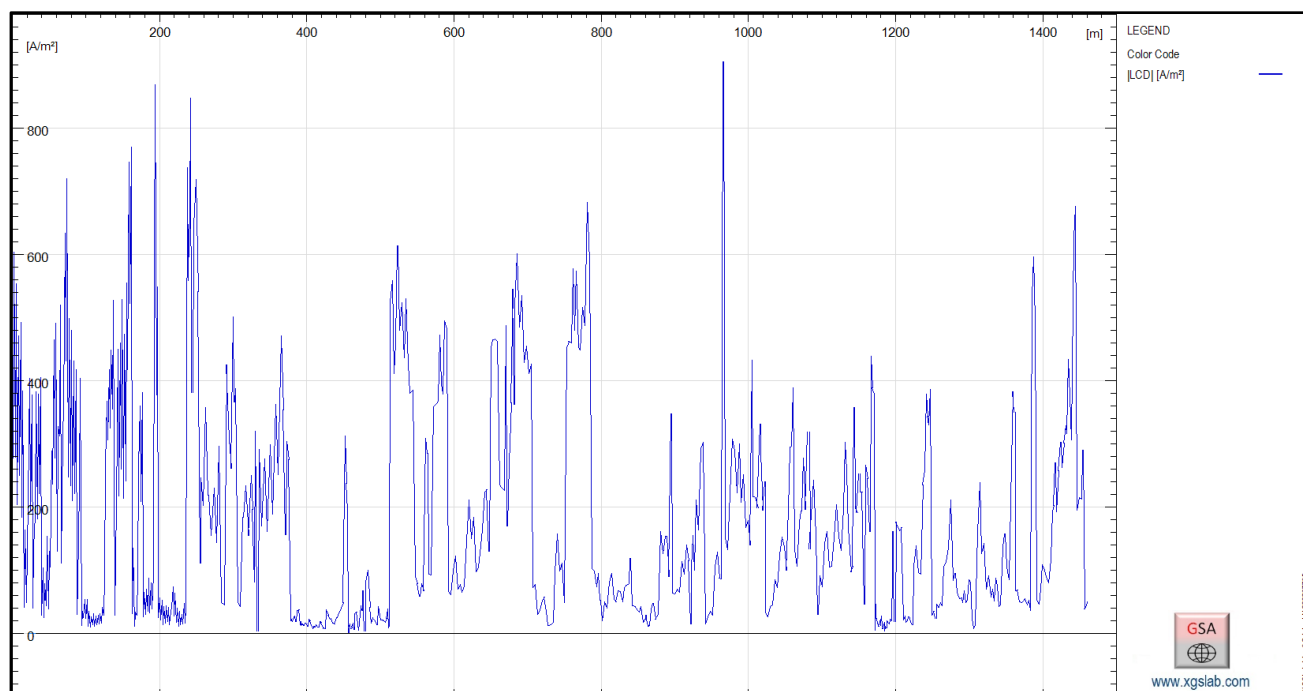


Fig. 12: Comportamento da corrente por ramo da malha de aterramento

1.6 Resultados dos Cálculos do Software

Os resultados alcançados após cálculos computacionais utilizando o software XGSLab da empresa SINT Engenharia foram obtidos a partir de uma injeção de corrente de 10.000A na malha de aterramento da Subestação, considerando o fator de divisão “Sf” igual a 1 – pior caso visando a segurança, ou seja toda a corrente será injetada na malha.

Para o cálculo das áreas de segurança, elaboramos um cálculo elétrico considerando uma cobertura de isolamento sobre o solo com cobertura de brita com uma espessura de 10cm.

A figura 13 apresenta o resultado da área de segurança para a malha da subestação. A área marcada em verde significa proteção total considerando a tensão de passo e de toque e na área amarela esta proteção está mantida desde que não haja nenhum contato externo com a malha. Como as partes energizáveis estão no interior

da área de segurança e afastada de no mínimo 1m da área com potencial de perigo, barreira física (gradil concreto) consideramos que o local está totalmente protegido.

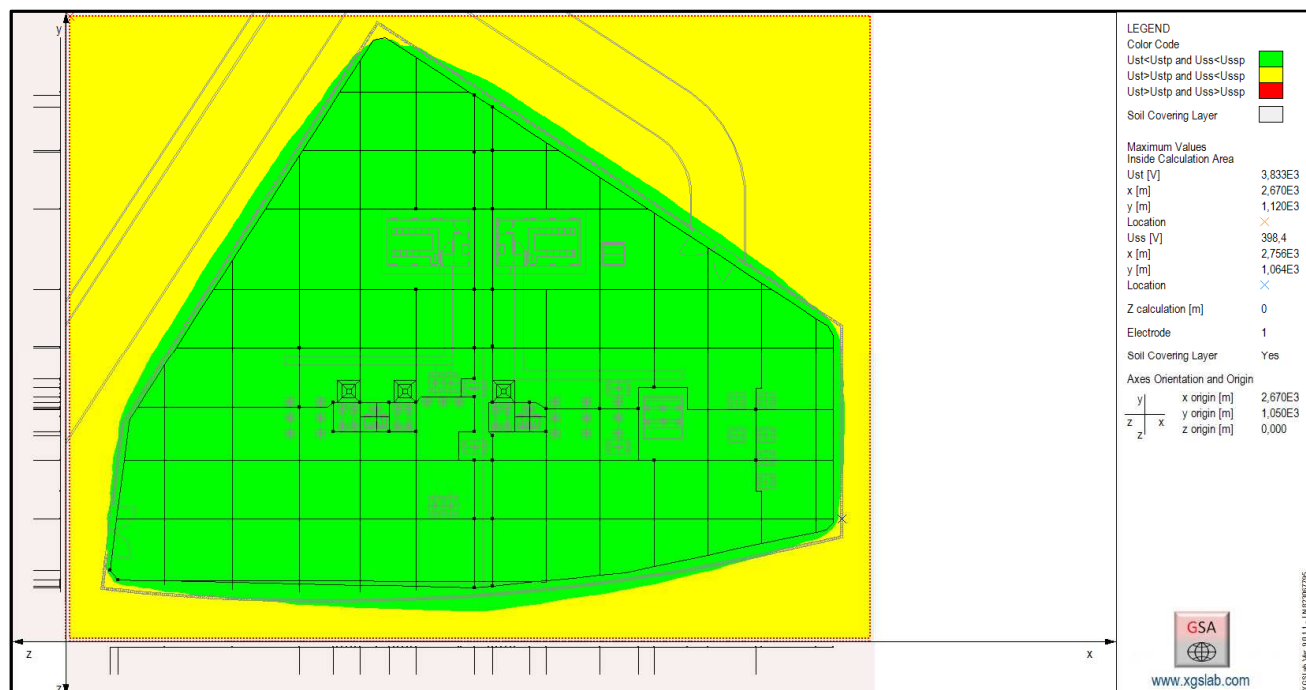


Fig. 13: Área de proteção externa para curto circuito na malha geral

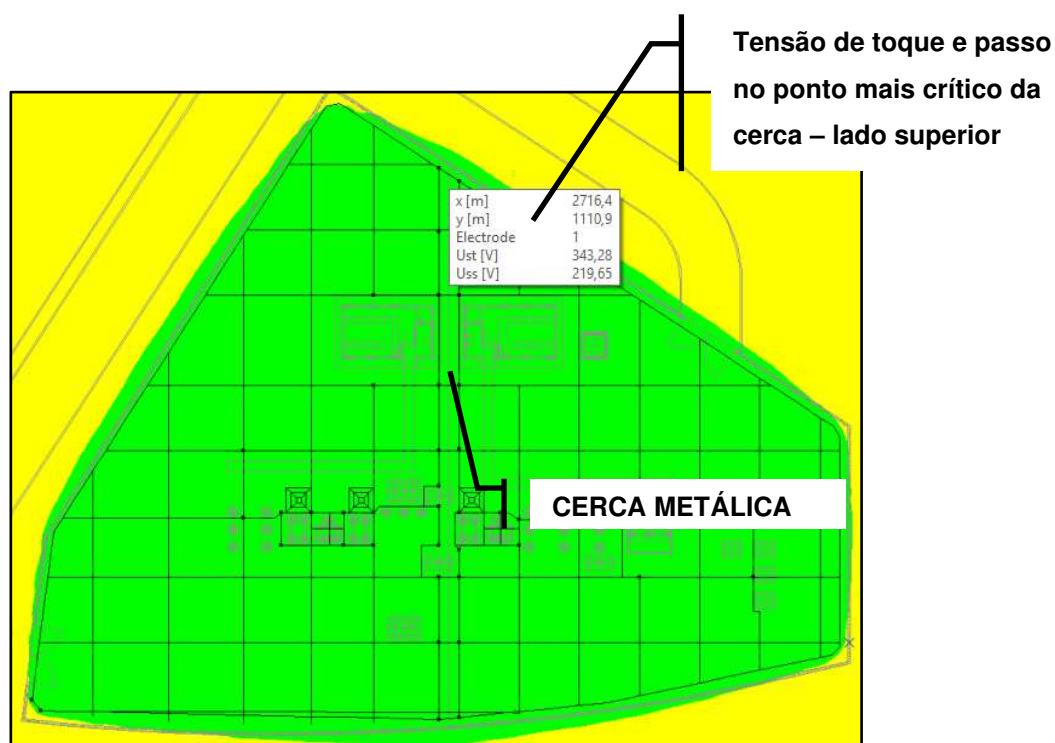


Fig. 14: Tensão de toque e passo na cerca interna lado superior

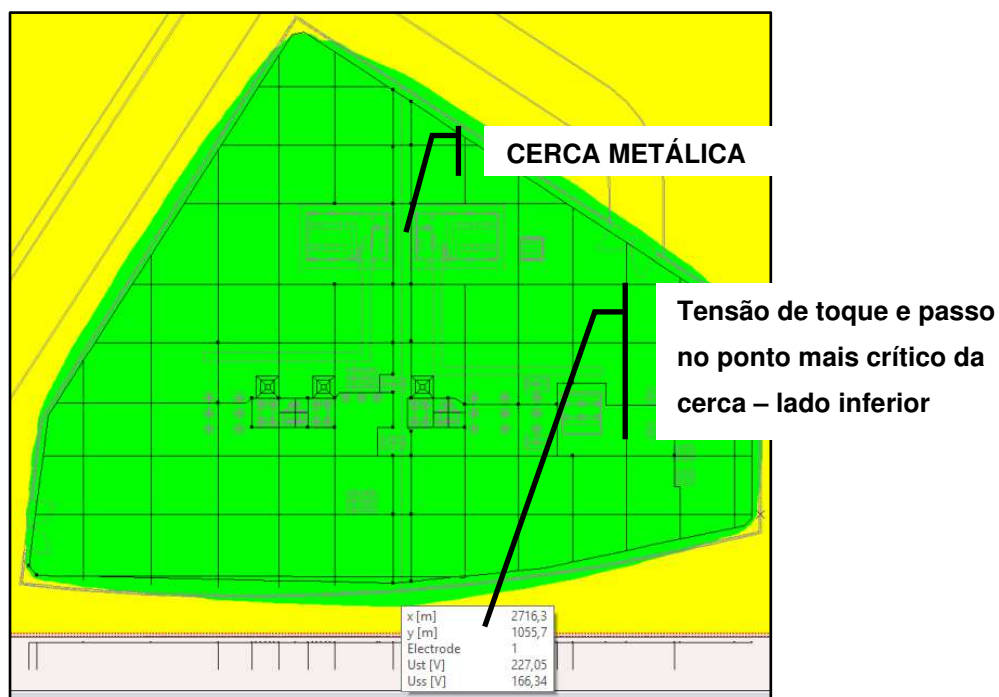


Fig. 15: Tensão de toque e passo na cerca interna - lado inferior

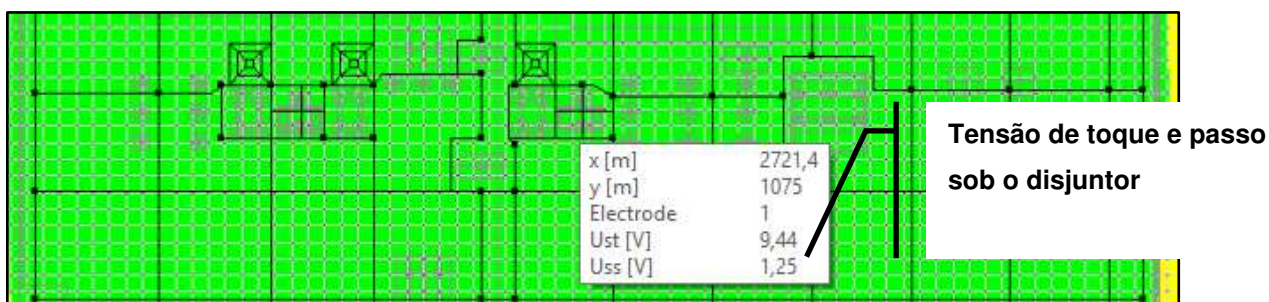


Fig. 16: Tensão de toque e passo sob o disjuntor



Fig. 17: Tensão de toque e passo no ponto mais crítico da Casa de Comando

Como podemos verificar nas figuras 14, 15, 16 e 17 as tensões de toque e passo junto dos equipamentos e no interior da Casa de Comando estão dentro dos limites aceitáveis para o ser humano nesta configuração de malha, vejamos:

Análise para as tensões de toque:

- Tensões de toque na cerca interna – lado superior:343,28 V
- Tensões de toque na cerca interna – lado inferior:227,05 V
- Tensões de toque sob o disjuncto DMAE – 69 kV:9,44 V
- Tensões de toque no interior da Casa de Comando:121,17 V
- Tensão de toque suportável para esta malha de terra:**696,30 V**

➔ *Verificamos que para a tensão de toque toda a área está protegida.*

Análise para as tensões de passo:

- Tensões de passo na cerca interna – lado superior:219,65 V
- Tensões de passo na cerca interna – lado inferior:166,34 V
- Tensões de passo sob o disjuncto DMAE – 69 kV:1,25 V
- Tensões de passo no interior da Casa de Comando:9,28 V
- Tensão de passo suportável para esta malha de terra:**2.293 V**

➔ *Verificamos que para a tensão de passo toda a área está protegida.*

Nas figuras a seguir são apresentados os gráficos de potenciais de passo e toque produzidos no solo para a área em estudo, calculados pelo software.

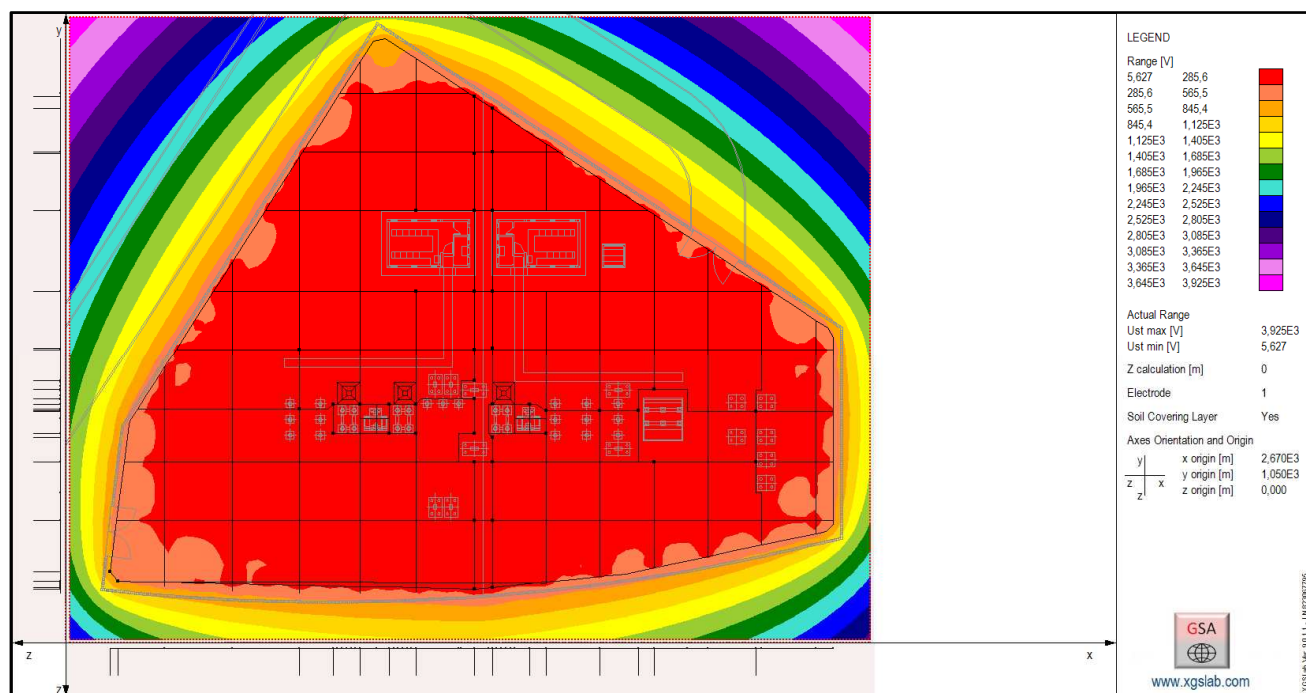


Fig. 18: Potenciais de toque produzidos no solo – 2D

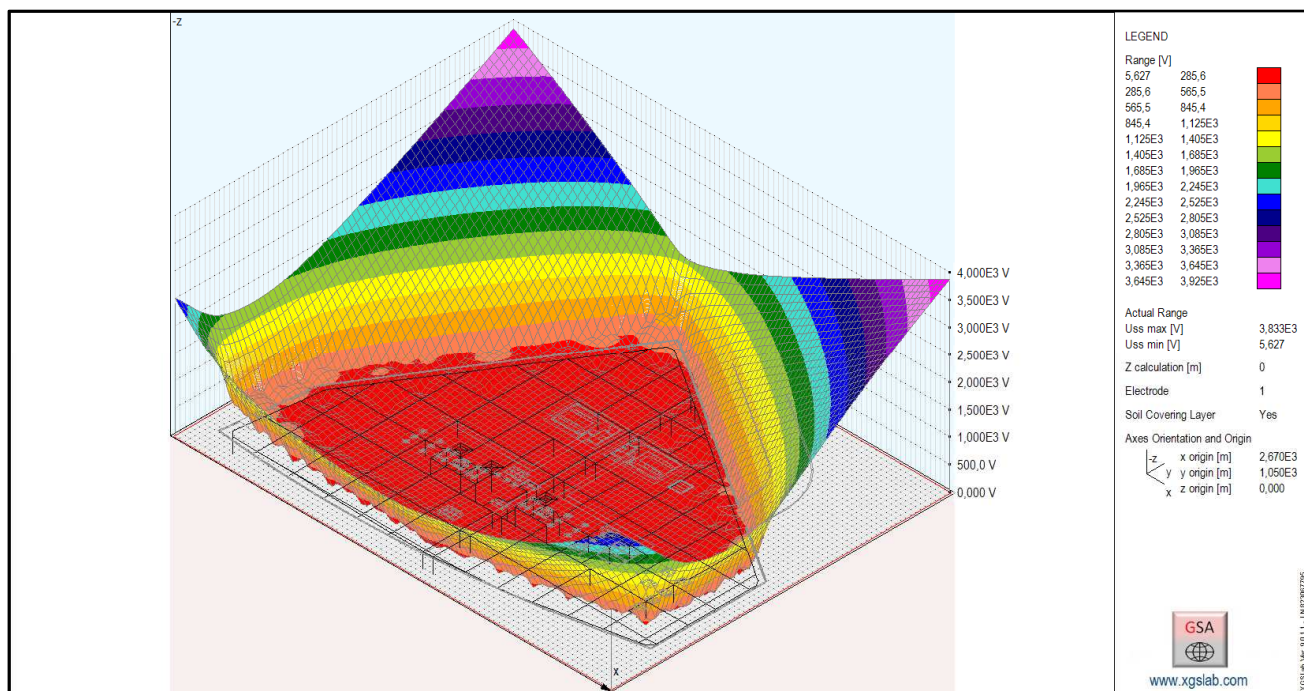


Fig. 19: Potenciais de toque produzidos no solo – 3D

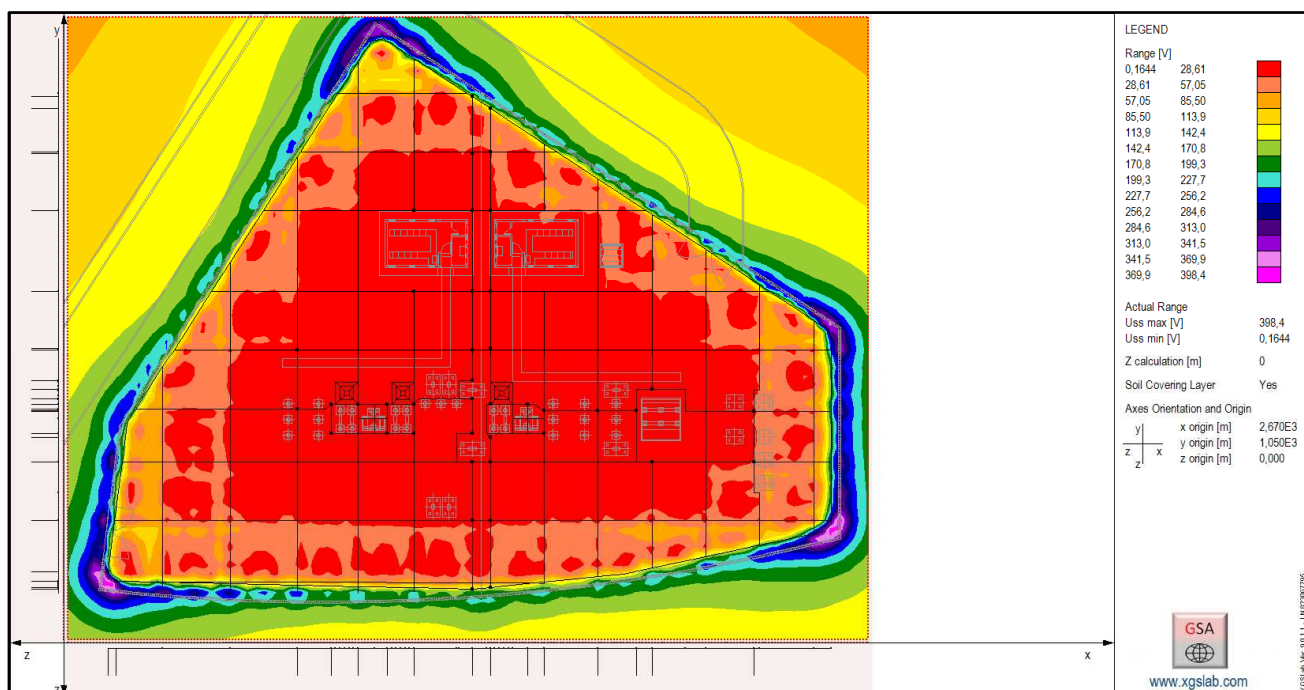


Fig. 20: Potenciais de passo produzidos no solo – 2D

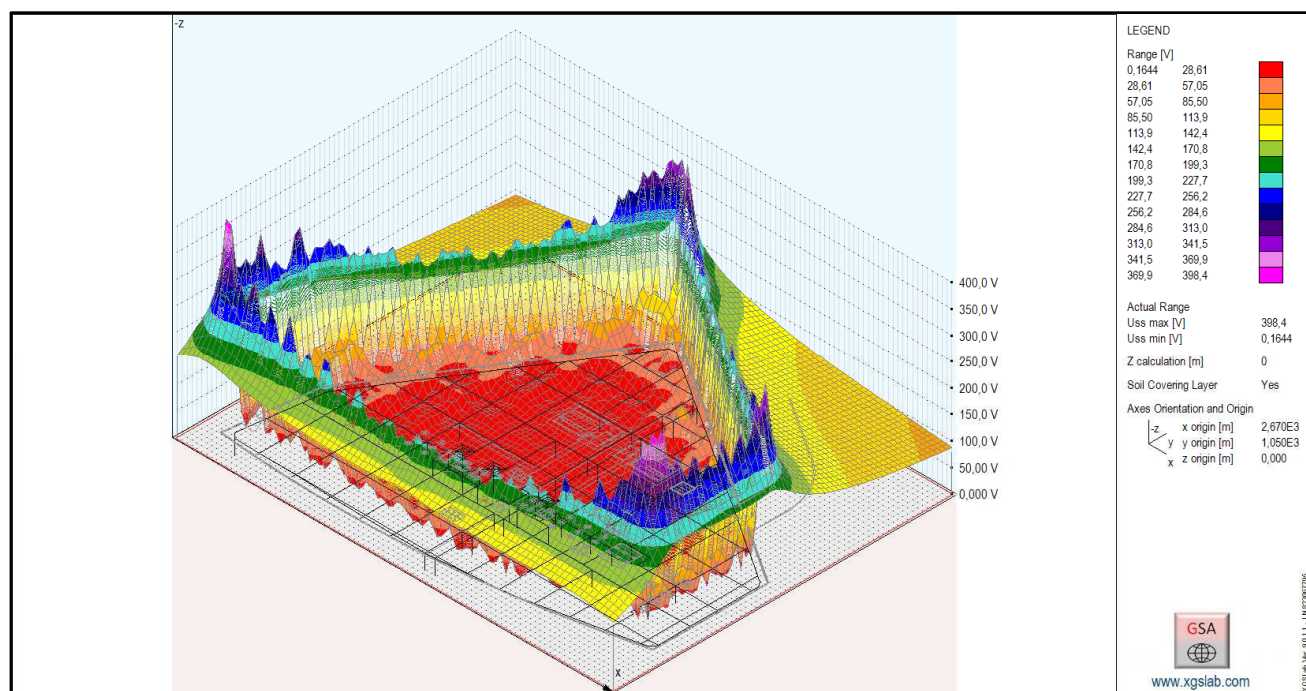


Fig. 21: Potenciais de passo produzidos no solo – 3D

1.7 Informações do Projeto

As informações sumariadas a seguir estão baseadas nas análises da malha de aterramento no local da obra.

- Resistividade do solo

Resistividade da primeira camada.....	$\rho_1 = 23,70 \Omega m$
Resistividade da segunda camada.....	$\rho_2 = 391,44 \Omega m$
Profundidade da primeira camada.....	$h_1 = 5,01 m$
Profundidade da segunda camada.....	$h_2 = \infty$

- Características do Sistema

Corrente de curto-circuito franco fase-terra.....	$\sim 10 kA$
Corrente de curto-circuito malha-solo (potenciais)	10,02 kA
Profundidade de enterramento da malha	0,6 m
Geometria do aterramento	irregular
Condutor de cobre nu para malha	70 mm ²
Conexões	solda exotérmica
Tensão de toque admissível (50 kg, 0,5 s).....	696,30 V
Tensão de passo admissível (50 kg, 0,5 s)	2.293 V
Resistência de aterramento (arredondada)	1,5 Ω
Número de hastes	40 unidades

Hastes de aço cobreado com 254 μm de espessura..... $\phi \frac{3}{4}" \times 3,0 \text{ m}$

1.8 Cálculo da Malha de Terra Considerando o Sistema de Terra – Lado DMAE

1.8.1 Dimensionamento do Condutores e da Malha de Terra

A corrente de falta simétrica I_g injetada na malha de aterramento para este estudo foi de aproximadamente 9,1kA, considerando um tempo de eliminação da falta de 50ms.

Para efeito deste cálculo, levamos em consideração uma corrente mínima de 10kA, considerando a contribuição dos motores de média tensão instalados na Estação de Bombeamento de Água Tratada – EBAT. Também, para efeito de segurança, consideramos um fator de divisão desta corrente de falta S_f igual a 1, ou seja, estamos considerando que toda a corrente de curto circuito produzida pelo sistema é injetada diretamente na malha, desconsiderando-se assim, toda e qualquer subdivisão desta corrente pelos demais sistemas de aterramento da LT69kV. Consideração totalmente voltada para a garantia da segurança do sistema de aterramento e eliminação da falta.

Para as condições de curto circuito acima indicadas, o valor da seção mínima do condutor de aterramento calculada pelo programa está retratado na figura abaixo, no quadro indicado por “A [mm²]”.

IEEE Std 80-2013	
I_e [A]	10000
t_f [s]	0,5
I''_{k2} [A]	10000
t_c [s]	0,5
k	0,6
Material	Coppe...
TCAP [J/cm ³ °C]	3,42
α_r [1/°C]	0,00393
ρ_r [$\mu\Omega$ cm]	1,72
T_a [°C]	40
T_m [°C]	1083
K_0 [°C]	234
<input type="button" value="Calculate"/>	
A [mm ²]	15,05

Seção Mínima

Fig 22: Determinação da Seção mínima do condutor

Os condutores da malha de terra são cabo de cobre nu 70mm² (padrão CEEE) com conexões tipo solda exotérmica, as hastes são tipo copperweld alta camada Ø 19mm com 3m de comprimento. Segundo nossa norma ABNT NBR 15751, seção mínima 50mm².

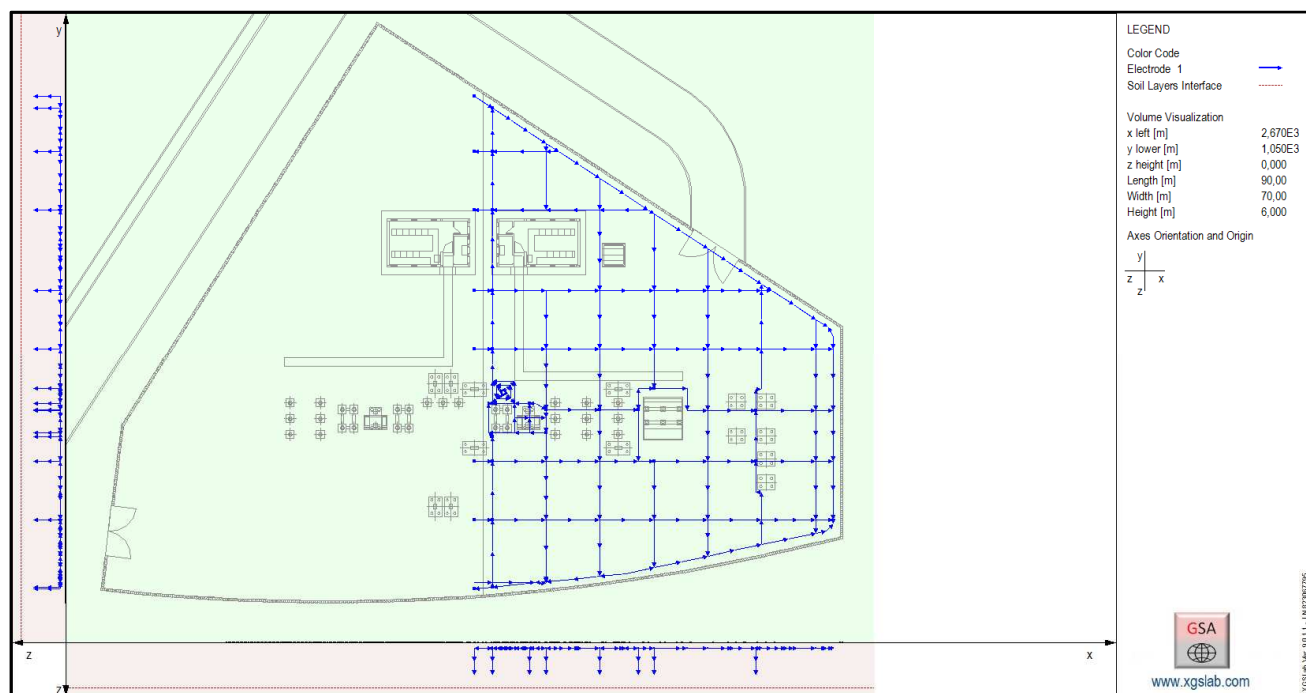


Fig 23: Malha de aterramento projetada e sentido da circulação da corrente

1.8.2 Corrente de Curto Circuito Malha-Solo

A corrente de curto-circuito de 10kA, adotada para a definição dos potenciais produzidos no solo, levou em consideração a resistência da malha projetada para a área da Subestação Transformadora 69kV Ponta do Arado, cujo resultado a partir da estratificação do solo em 2 camadas, apresentou valor de 1,31 Ω , quando consideramos somente a malha de terra do lado do DMAE.

Electrode Name	Je [A]	$\angle Je$ [deg]	Ue [V]	$\angle Ue$ [deg]	Ue/ ΣJe [Ω]	$\angle (Ue/\Sigma Je)$ [deg]
Malha DMAE	10261,830	0,000	13501,671	0,000	1,316E+00	0,000

Nota: O valor da resistência de aterramento é obtido a partir da relação entre a elevação de potencial de terra (EPT) e a corrente injetada pelo sistema de aterramento no solo, sendo obtida computacionalmente por uma solução matricial do sistema de equações, levando em consideração o fator de divisão da corrente que realmente será injetada na malha de terra - S_f .

Considerando os cálculos efetuados pelo método computacional, teremos os seguintes potenciais produzidos no solo:

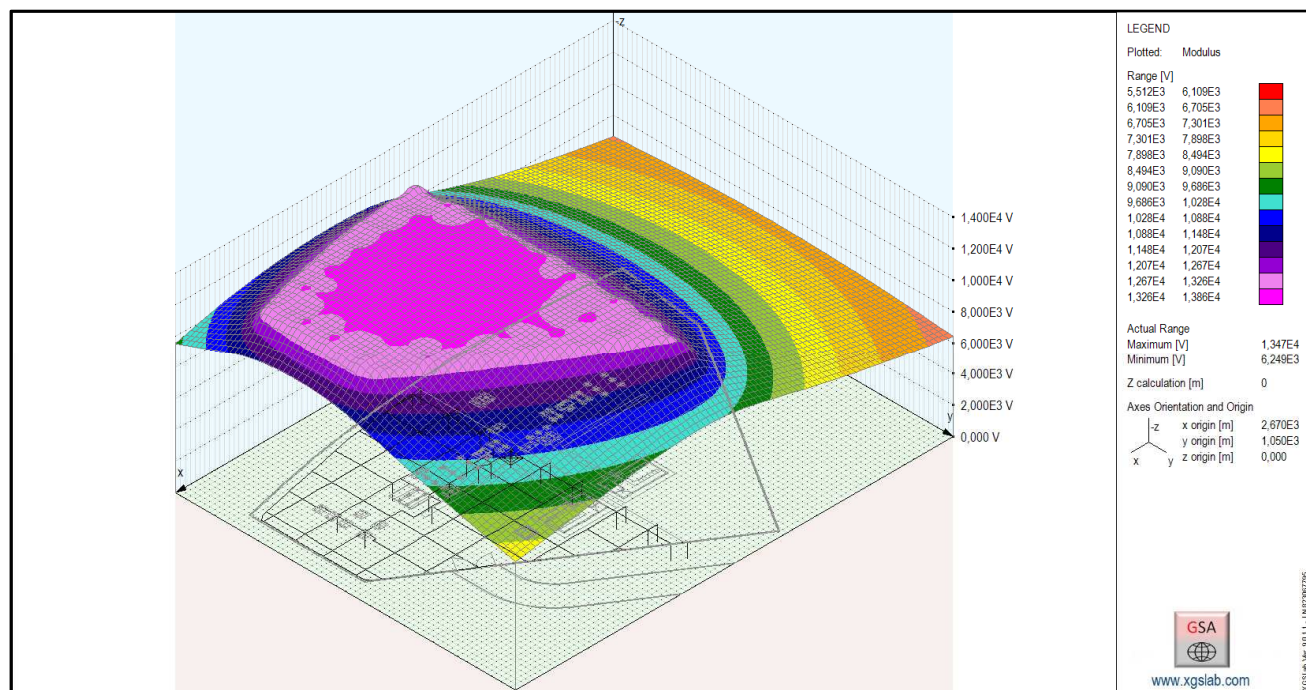


Figura 24: Gráfico das tensões produzidas no solo pela corrente de curto circuito – Lado DMAE

1.8.3 Tensão de Passo e de Toque – visto da malha geral

Os potenciais de toque e de passo admissíveis calculados através pelo programa, considerando a forma da malha, foi de 696,3 V e 2.293 V para toque e passo respectivamente, no solo com revestimento. No interior da Casa de Comando, a resistividade no piso acabado poderia ser acrescida entre 1.200 a 280.000 Ωm considerando o piso da como concreto com camada de 10cm da Tabela 5 - Resistividade do Material de Recobrimento (ρ_s) Porém o cálculo apresentado não está levando em consideração esta camada isolante considerando como uma camada de brita e, portanto, está pelo lado da segurança.

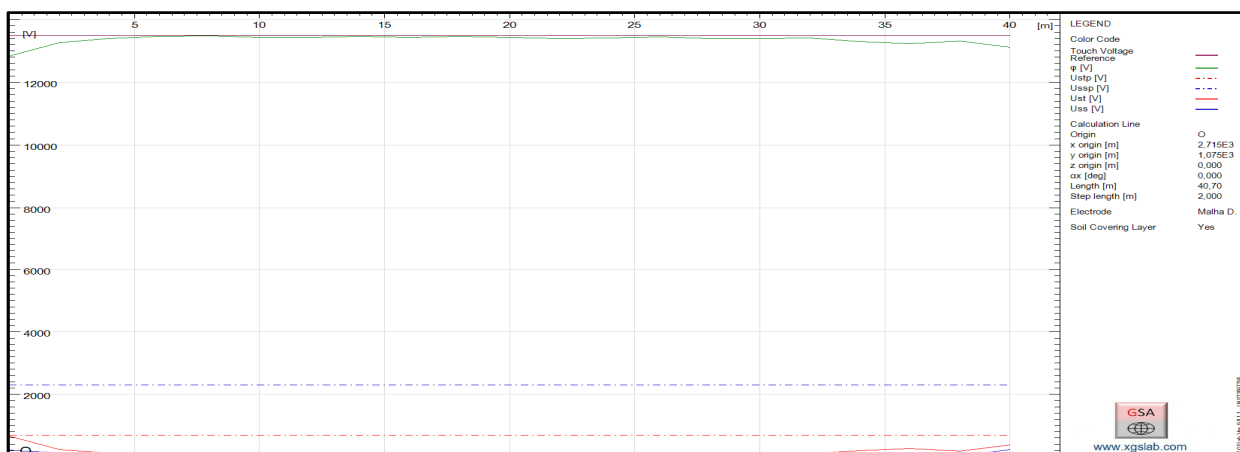


Fig 25: Curvas das tensões de toque e passo na superfície do solo sob o eixo da SE.

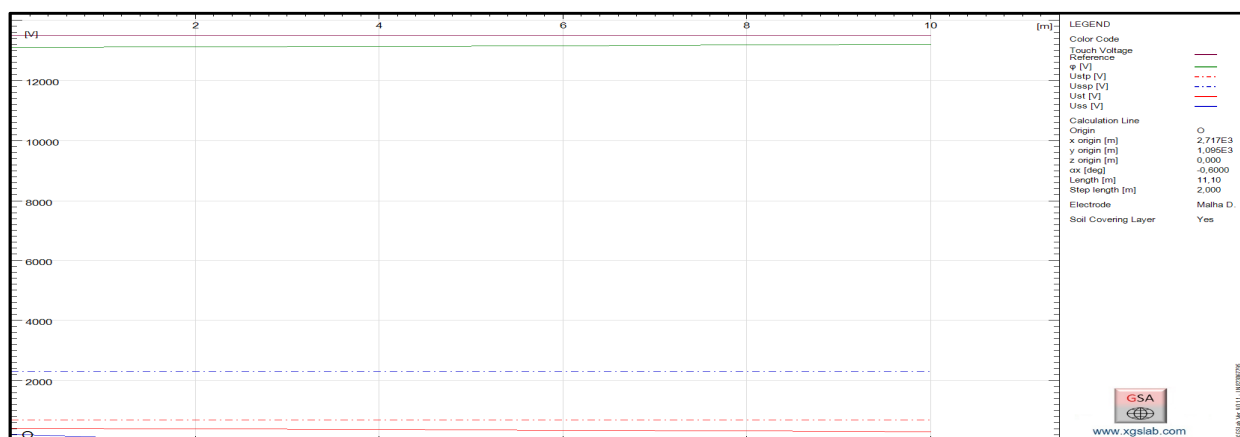


Fig 26: Curvas das tensões de toque e passo na superfície do solo sob o centro da Casa de Comando.

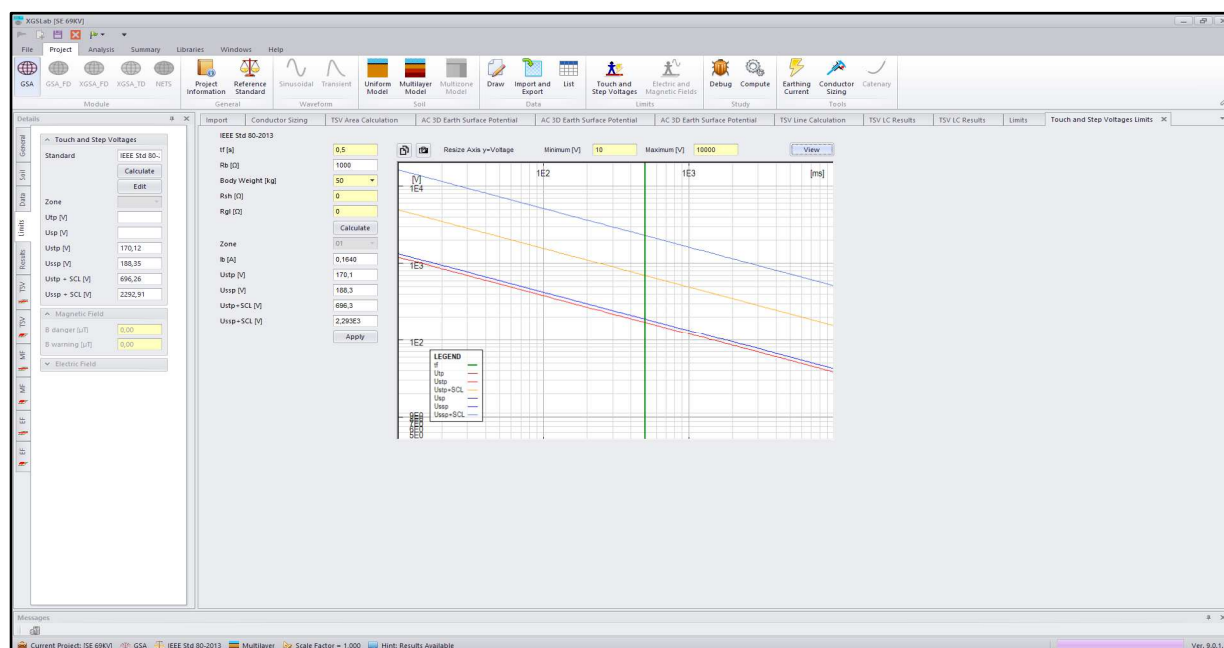


Fig. 27: Tensões de toque e passo no solo.

1.9 Layout da Malha

A malha de aterramento é composta por hastes cooperweld interligadas por condutores horizontais dispostos sob a Subestação Transformadora, Cabine de Medição e Abrigo de Painéis, enterradas à profundidade de 0,60m.

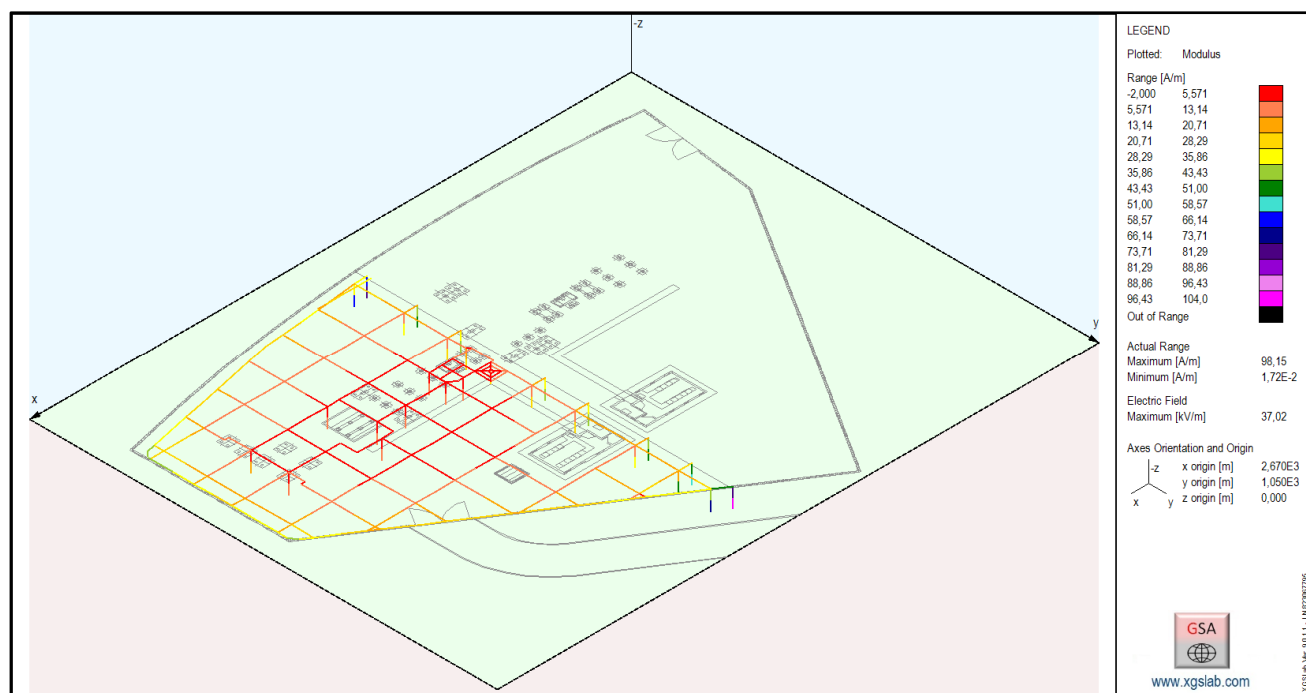


Fig. 28: Layout da malha de terra projetada, em 3D – Lado DMAE

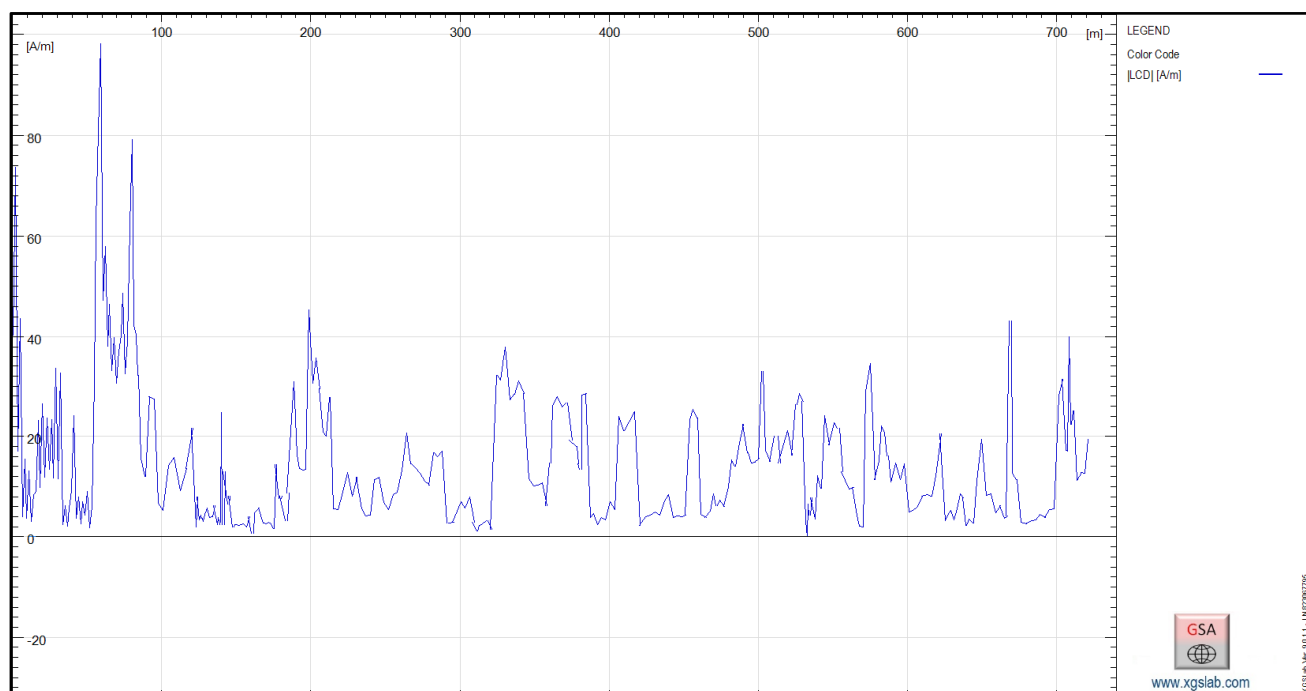


Fig. 29: Comportamento da corrente por ramo da malha de aterramento – Lado DMAE

1.10 Resultados dos Cálculos do Software

Os resultados alcançados após cálculos computacionais utilizando o software XGSLab da empresa SINT Engenharia foram obtidos a partir de uma injeção de corrente de 10.000A na malha de aterramento da Subestação, considerando o fator de divisão “Sf” igual a 1 – pior caso visando a segurança, ou seja toda a corrente será injetada na malha.

Para o cálculo das áreas de segurança, elaboramos um cálculo elétrico considerando uma cobertura de isolamento sobre o solo com cobertura de brita com uma espessura de 10cm.

A figura 30 apresenta o resultado da área de segurança para a malha da subestação. A área marcada em verde significa proteção total considerando a tensão de passo e de toque e na área amarela esta proteção está mantida desde que não haja nenhum contato externo com a malha. Como as partes energizáveis estão no interior da área de segurança e afastada de no mínimo 1m da área com potencial de perigo, barreira física (gradil concreto) consideramos que o local está totalmente protegido.



Fig. 30: Área de proteção externa para curto circuito na malha geral

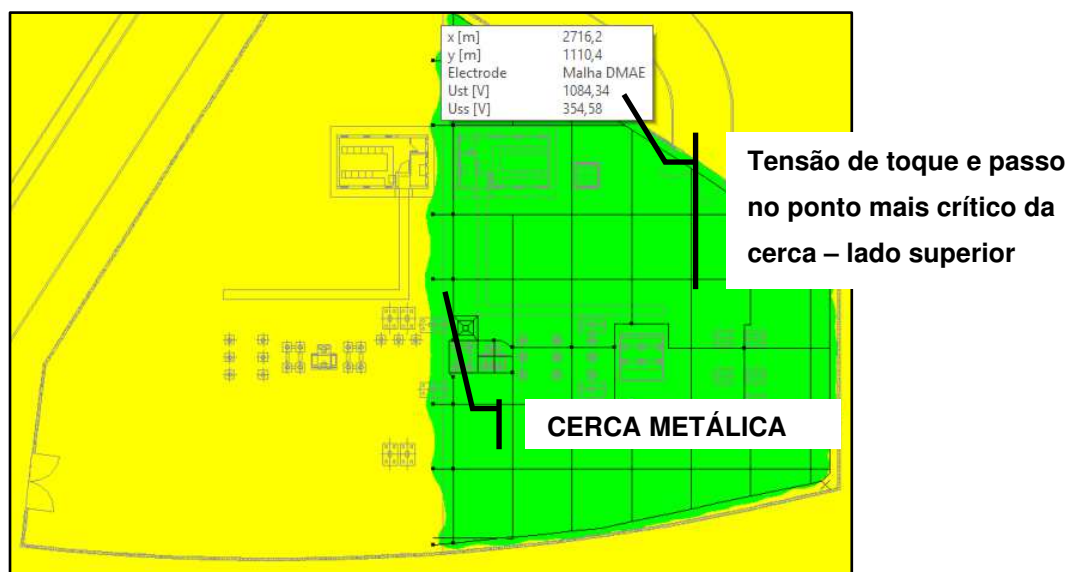


Fig. 31: Tensão de toque e passo na cerca interna lado superior

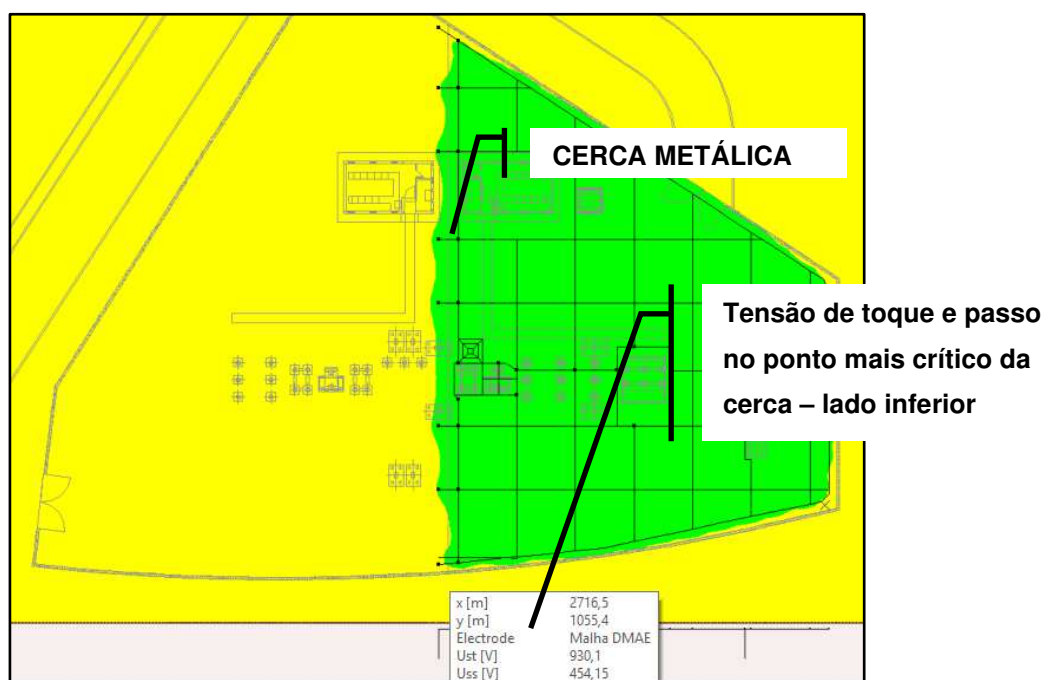


Fig. 32: Tensão de toque e passo na cerca interna - lado inferior

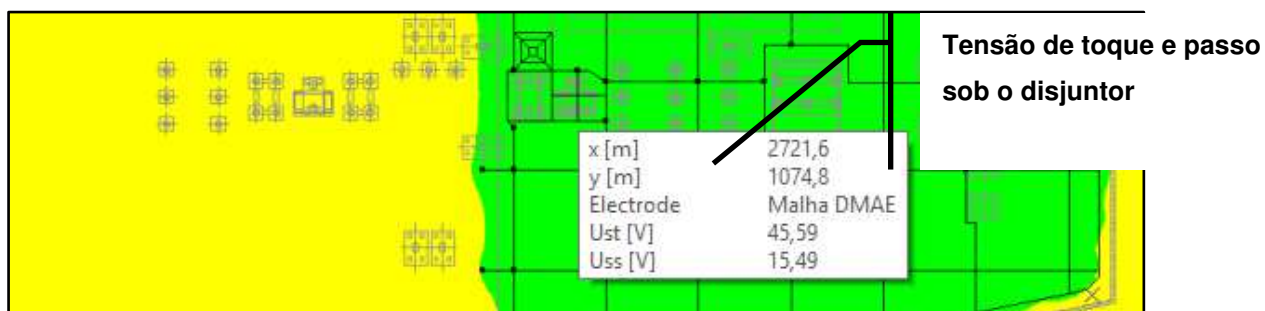


Fig. 33: Tensão de toque e passo sob o disjuntor

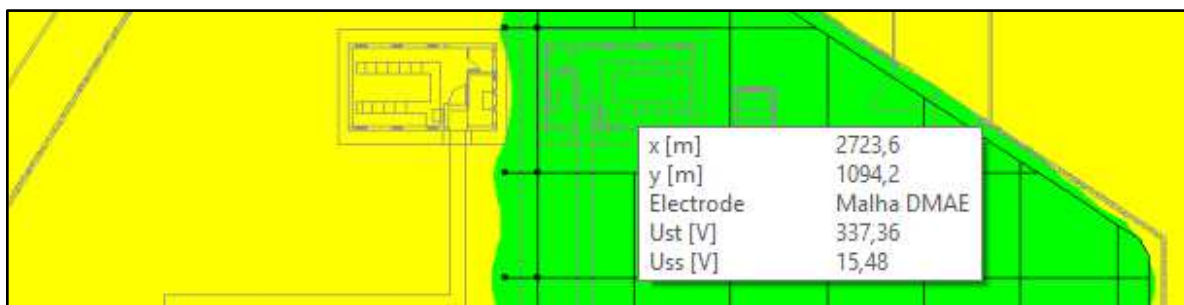


Fig. 34: Tensão de toque e passo no ponto mais crítico da Casa de Comando

Como podemos verificar nas figuras 14, 15, 16 e 17 as tensões de toque e passo junto dos equipamentos e no interior da Casa de Comando estão dentro dos limites aceitáveis para o ser humano nesta configuração de malha, vejamos:

Análise para as tensões de toque:

- Tensões de toque na cerca interna – lado superior: 1.084,34 V
- Tensões de toque na cerca interna – lado inferior: 930,01 V
- Tensões de toque sob o disjunto DMAE – 69 kV: 45,59 V
- Tensões de toque no interior da Casa de Comando: 337,36 V
- Tensão de toque suportável para esta malha de terra: **696,30 V**

➔ *Verificamos que para a tensão de toque toda a área está parcialmente protegida. Nos cantos superior e inferior da cerca existe a necessidade de conexão com a malha da CEEE ou ampliação da malha do DMAE. No interior da malha a proteção será total.*

Análise para as tensões de passo:

- Tensões de passo na cerca interna – lado superior: 354,58 V
- Tensões de passo na cerca interna – lado inferior: 454,15 V
- Tensões de passo sob o disjunto DMAE – 69 kV: 15,49 V
- Tensões de passo no interior da Casa de Comando: 15,48 V
- Tensão de passo suportável para esta malha de terra: **2.293 V**

➔ *Verificamos que para a tensão de passo toda a área está protegida.*

Nas figuras a seguir são apresentados os gráficos de potenciais de passo e toque produzidos no solo para a área em estudo, calculados pelo software.

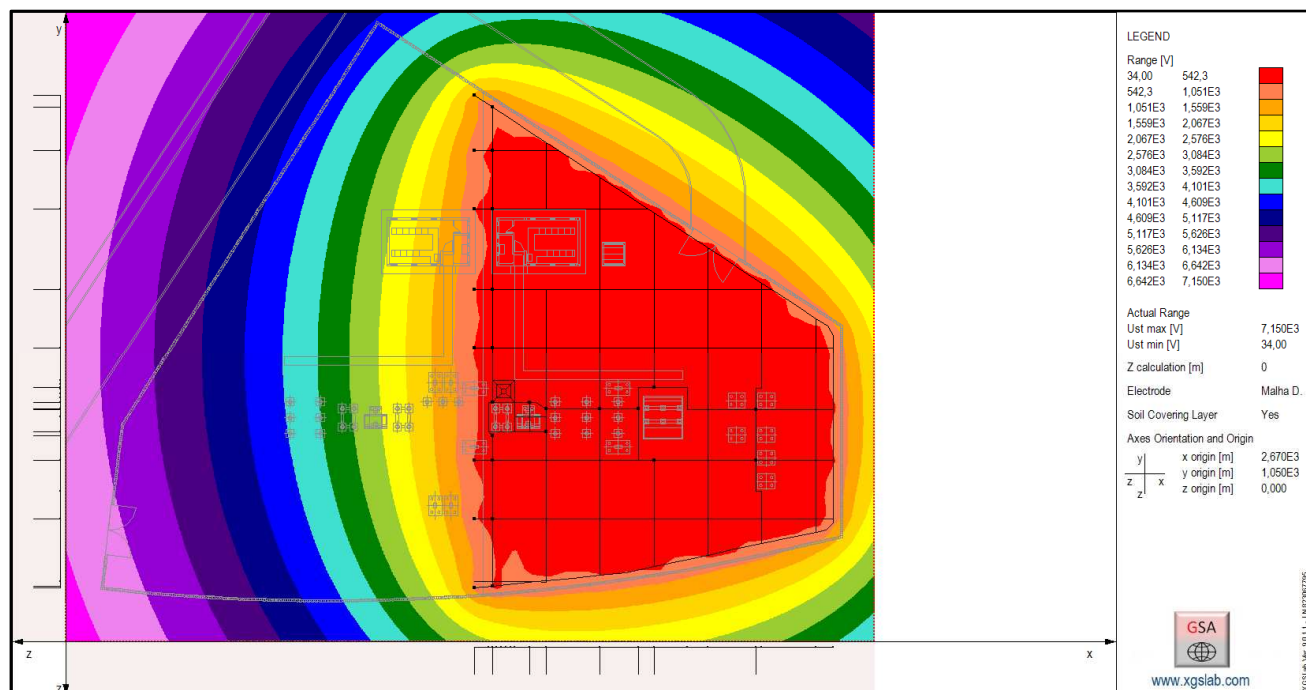


Fig. 35: Potenciais de toque produzidos no solo – 2D

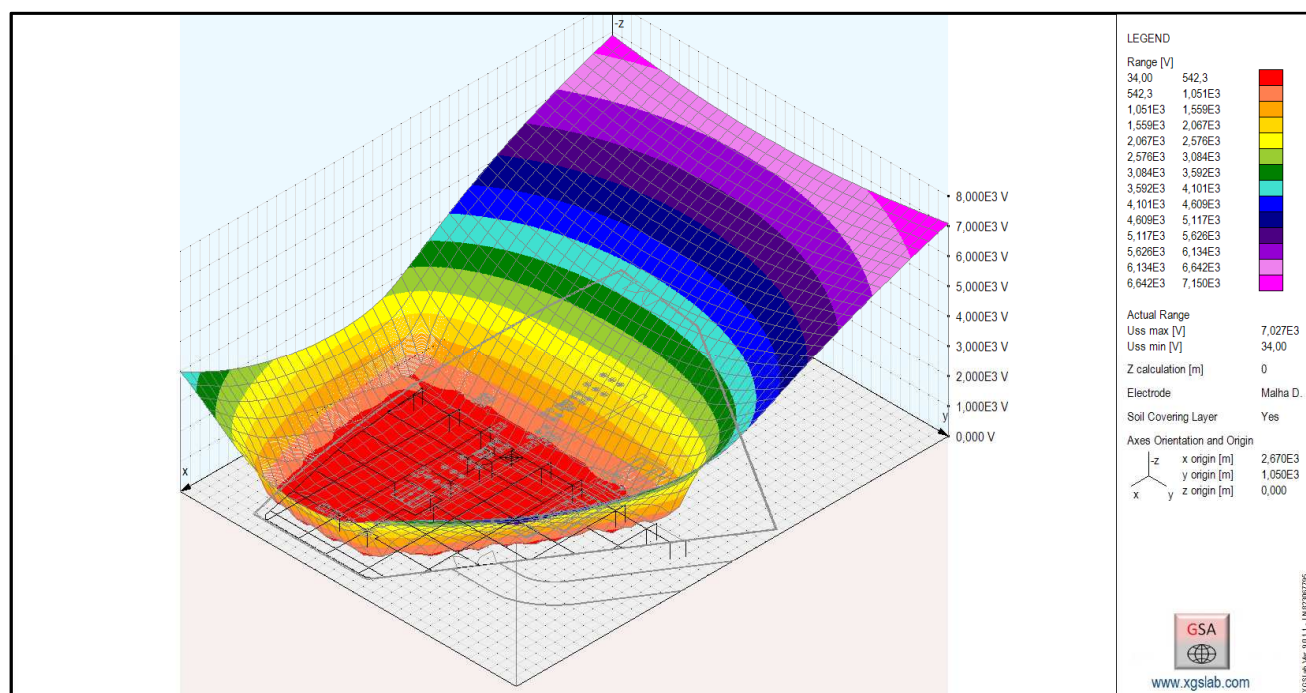


Fig. 36: Potenciais de toque produzidos no solo – 3D

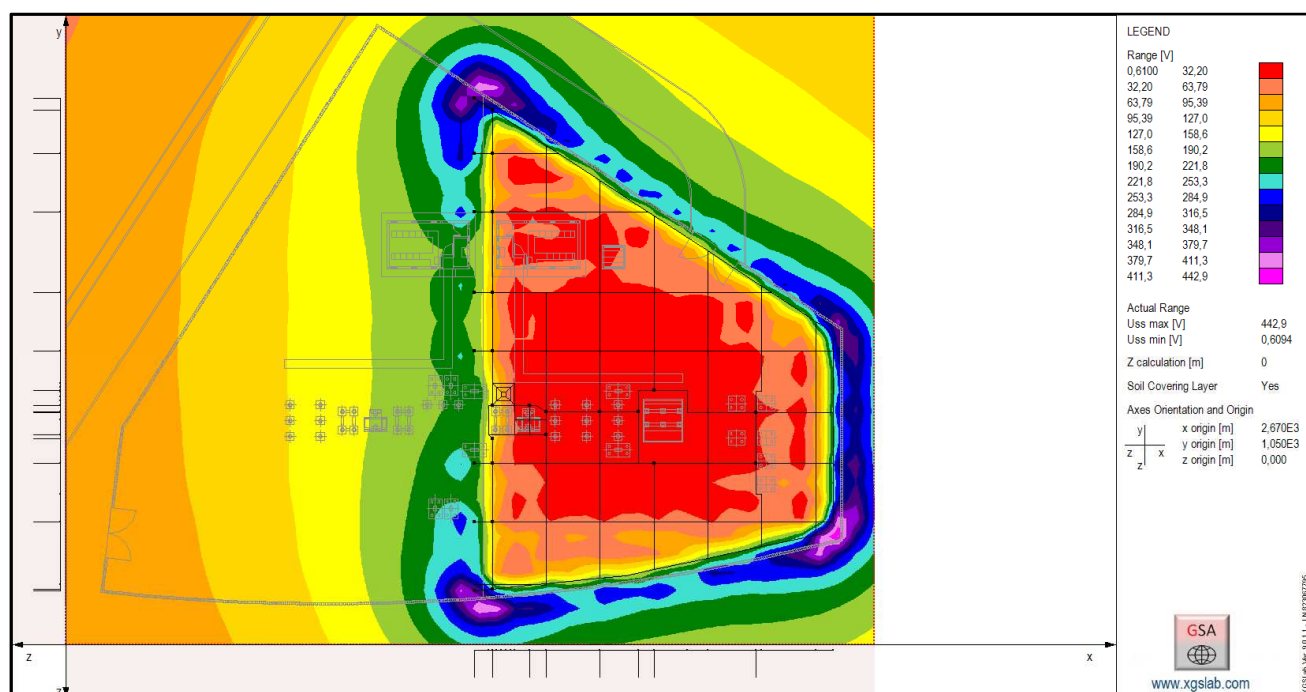


Fig. 37: Potenciais de passo produzidos no solo – 2D

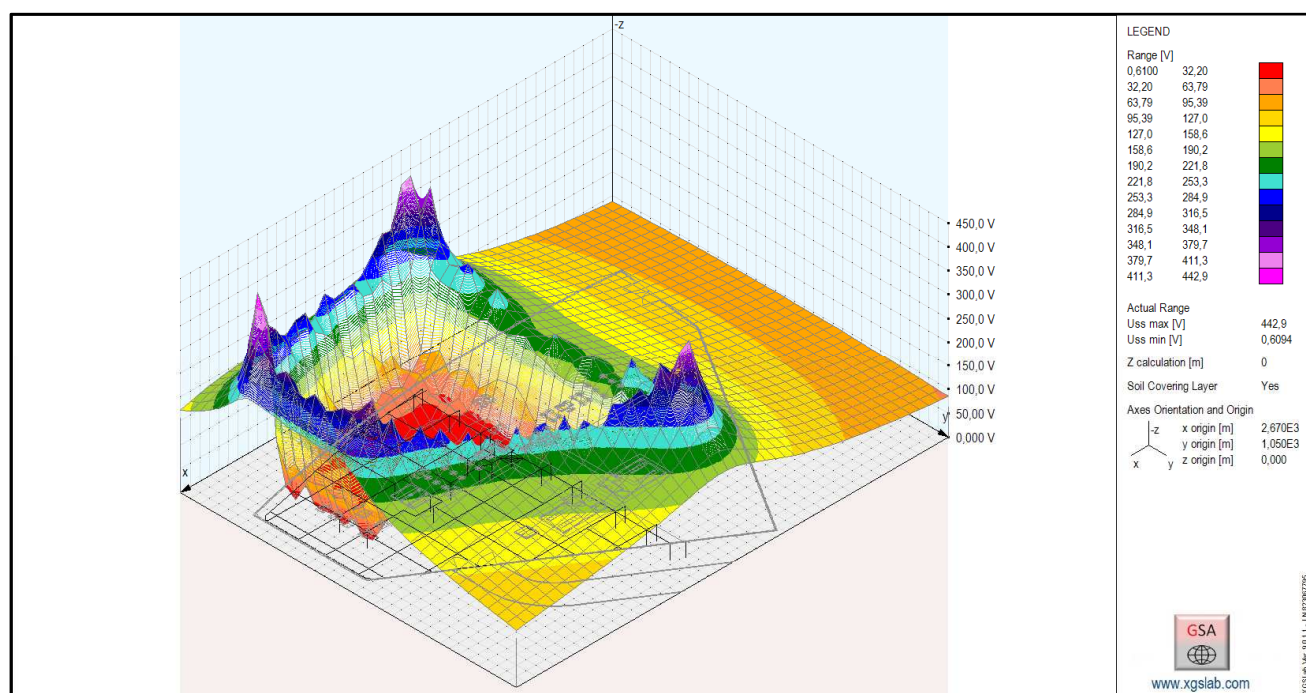


Fig. 38: Potenciais de passo produzidos no solo – 3D

1.11 Informações do Projeto

As informações sumariadas a seguir estão baseadas nas análises da malha de aterramento no local da obra.

- Resistividade do solo

Resistividade da primeira camada.....	$\rho_1 = 23,70 \, \Omega\text{m}$
Resistividade da segunda camada.....	$\rho_2 = 391,44 \, \Omega\text{m}$
Profundidade da primeira camada.....	$h_1 = 5,01 \, \text{m}$
Profundidade da segunda camada.....	$h_2 = \infty$

- Características do Sistema

Corrente de curto-circuito franco fase-terra.....	$\sim 10 \, \text{kA}$
Corrente de curto-circuito malha-solo (potenciais)	$10,02 \, \text{kA}$
Profundidade de enterramento da malha	$0,6 \, \text{m}$
Geometria do aterramento	irregular
Condutor de cobre nu para malha	$70 \, \text{mm}^2$
Conexões	solda exotérmica
Tensão de toque admissível (50 kg, 0,5 s).....	$696,30 \, \text{V}$
Tensão de passo admissível (50 kg, 0,5 s)	$2.293 \, \text{V}$
Resistência de aterramento (arredondada)	$1,0 \, \Omega$
Número de hastes	27 unidades
Hastes de aço cobreado com 254 μm de espessura.....	$\phi \, 3/4" \times 3,0 \, \text{m}$

1.12 Conclusão

Apesar do cálculo do condutor da malha de aterramento apresentar uma seção de aproximadamente $15,05 \text{mm}^2$ - figura 2, foi adotada a seção mínima de 70mm^2 para atender os padrões da CEEE e os requisitos da seção 6.1- dimensionamento mecânico, da NBR 15.751/2013.

Levando-se em consideração os cálculos realizados, estima-se que não haverá danos aos operadores em situações de falta a terra, quando analisamos a malha completa, ou seja, lado CEEE-D e DMAE executadas. Porém, como medida de segurança, sugerimos que as malhas das ferragens do piso da Casa de Comando e ferragens das bases dos equipamentos sejam conectadas ao sistema de aterramento a fim de equipotencializar os potenciais.

Quando analisamos somente a malha de aterramento do DMAE, verificamos que os pontos críticos da cerca, na parte superior e na parte inferior da mesma, haverá proteção parcial para a tensão de toque, porém somente haverá risco de acidentes de houver contato simultâneo com alguma parte energizada ou com a malha de terra, o que dificilmente irá ocorrer. Também somente poderá ocorrer falta a terra somente após a conexão da LT da CEEE-D com a Subestação Transformadora DMAE 69kV Ponta do Arado, situação em que a CEEE-D deverá calcular e implementar o aterramento em seu módulo de conexão.

Por segurança, sugerimos a instalação de hastes de aterramento nos rabichos da malha de aterramento que ficarão a espera da conexão com a malha de terra da CEEE-D.

Foi adotado aterramento simples, com a instalação de hastes de 3m de comprimento, e cabos dispostos horizontalmente constituindo uma malha de terra reticulada instalada a uma profundidade de 60cm abaixo do nível do solo recoberto com uma camada de 10cm de brita.

Todas as partes metálicas deverão ser conectadas na malha de terra com cabos de cobre na seção mínima 50mm². O aterramento das Chave seccionadora, disjuntores, Transformadores de Corrente e de Potencial deverão ser aterrados em 2 pontos distintos da malha, conforme norma da ABNT NBT 15.751/2013. O transformador de força deverá ser aterrado em 4 pontos da malha de terra.

Este cálculo, bem como todas as medidas de resistividade do solo deverão ser refeitas e conferidas após a terraplenagem do terreno, que elevará o platô da Subestação Transformadora DMAE 69kV Ponta do Arado da cota original do terreno para a cota 4,20m.

FOLHA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

Local: ETAPONTA ARADO - SE 69KV

Data da Medição: 06/09/2019

Número da Medição: A

Direção da Medição: NORDESTE

Instrumento: 20KW

Posição aprox. do Instrumento: Centro da Medição

a (m)	P (m)	R (Ω)	V (mV)	I (A)	ρ (Ωm)
1	0,2	2,70	27	0,010	18,08
2	0,2	1,64	16,4	0,010	20,96
4	0,2	1,09	10,9	0,010	27,51
6	0,2	0,90	9	0,010	34,00
8	0,2	0,84	8,4	0,010	42,27
10	0,2	0,87	8,7	0,010	54,70
12	0,2	0,76	7,6	0,010	57,33
14	0,2	0,72	7,2	0,010	63,36

Fórmula de Palmer para cálculo da resistividade do solo:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m]$$

CARACTERÍSTICAS DO SOLO:

Terraplenado: ☐ SIM

☒ NÃO

Compactado: ☐ SIM

☒ NÃO

ρ: Resistividade aparente do terreno (Ω – m)

R: Resistência medida (Ω)

a: Distância entre eletrodos (m)

P: Profundidade de penetração dos eletrodos (m)

Tipo de Camada Superficial: **Arbustiva**

Estado aparente da unidade:

☐ umido

☒ seco

Estação do Ano:

☒ seca

☐ chuvosa

CROQUI



FOLHA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

Local: ETAPONTA ARADO - SE 69KV

Data da Medição: 06/09/2019

Número da Medição: B

Direção da Medição: NOROESTE

Instrumento: 20KW

Posição aprox. do Instrumento: Centro da Medição

a (m)	P (m)	R (Ω)	V (mV)	I (A)	ρ (Ωm)
1	0,2	3,96	39,6	0,010	26,52
2	0,2	2,09	20,9	0,010	26,72
4	0,2	1,35	13,5	0,010	34,08
6	0,2	1,04	10,4	0,010	39,28
8	0,2	1,00	10	0,010	50,32
10	0,2	1,02	10,2	0,010	64,13
12	0,2	1,08	10,8	0,010	81,47
14	0,2	1,03	10,3	0,010	90,64

Fórmula de Palmer para cálculo da resistividade do solo:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m]$$

CARACTERÍSTICAS DO SOLO:

Terraplenado: ☐ SIM

☒ NÃO

Compactado: ☐ SIM

☒ NÃO

Tipo de Camada Superficial: **Arbustiva**

Estado aparente da unidade:

☐ umido

☒ seco

Estação do Ano:

☒ seca

☐ chuvosa

ρ: Resistividade aparente do terreno (Ω – m)

R: Resistência medida (Ω)

a: Distância entre eletrodos (m)

P: Profundidade de penetração dos eletrodos (m)

CROQUI



FOLHA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

Local: **ETAPONTA ARADO - SE 69KV**

Data da Medição: **06/09/2019**

Número da Medição: **C**

Direção da Medição: **NORDESTE**

Instrumento: **20KW**

Posição aprox. do Instrumento: **Centro da Medição**

a (m)	P (m)	R (Ω)	V (mV)	I (A)	ρ (Ωm)
1	0,2	4,47	44,7	0,010	29,94
2	0,2	2,06	20,6	0,010	26,33
4	0,2	1,54	15,4	0,010	38,87
6	0,2	1,19	11,9	0,010	44,95
8	0,2	1,00	10	0,010	50,32
10	0,2	0,95	9,5	0,010	59,73
12	0,2	0,99	9,9	0,010	74,68
14	0,2	0,91	9,1	0,010	80,08

Fórmula de Palmer para cálculo da resistividade do solo:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m]$$

CARACTERÍSTICAS DO SOLO:

Terraplenado: ☐ SIM ☒ NÃO

Compactado: ☐ SIM ☒ NÃO

Tipo de Camada Superficial: **Arbustiva**

Estado aparente da unidade: ☐ umido ☒ seco

Estação do Ano: ☒ seca ☐ chuvosa

ρ: Resistividade aparente do terreno (Ω – m)

R: Resistência medida (Ω)

a: Distância entre eletrodos (m)

P: Profundidade de penetração dos eletrodos (m)

CROQUI



FOLHA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

Local: ETAPONTA ARADO - SE 69KV

Data da Medição: 06/09/2019

Número da Medição: D

Direção da Medição: NOROESTE

Instrumento: 20KW

Posição aprox. do Instrumento: Centro da Medição

a (m)	P (m)	R (Ω)	V (mV)	I (A)	ρ (Ωm)
1	0,2	3,71	37,1	0,010	24,85
2	0,2	1,76	17,6	0,010	22,50
4	0,2	1,15	11,5	0,010	29,03
6	0,2	0,93	9,3	0,010	35,13
8	0,2	0,84	8,4	0,010	42,27
10	0,2	0,85	8,5	0,010	53,44
12	0,2	0,90	9	0,010	67,89
14	0,2	0,85	8,5	0,010	74,80

Fórmula de Palmer para cálculo da resistividade do solo:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m]$$

CARACTERÍSTICAS DO SOLO:

Terraplenado: ☐ SIM

☒ NÃO

Compactado: ☐ SIM

☒ NÃO

ρ: Resistividade aparente do terreno (Ω – m)

R: Resistência medida (Ω)

a: Distância entre eletrodos (m)

P: Profundidade de penetração dos eletrodos (m)

Tipo de Camada Superficial: **Arbustiva**

Estado aparente da unidade:

☐ umido

☒ seco

Estação do Ano:

☒ seca

☐ chuvosa

CROQUI



FOLHA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE

Local: ETAPONTA ARADO - SE 69KV

Data da Medição: 06/09/2019

Número da Medição: E

Direção da Medição: NORTE

Instrumento: 20KW

Posição aprox. do Instrumento: Centro da Medição

a (m)	P (m)	R (Ω)	V (mV)	I (A)	ρ (Ωm)
1	0,2	3,28	32,8	0,010	21,97
2	0,2	1,86	18,6	0,010	23,78
4	0,2	1,27	12,7	0,010	32,06
6	0,2	0,99	9,9	0,010	37,39
8	0,2	0,93	9,3	0,010	46,80
10	0,2	0,81	8,1	0,010	50,93
12	0,2	0,86	8,6	0,010	64,87
14	0,2	0,85	8,5	0,010	74,80

Fórmula de Palmer para cálculo da resistividade do solo:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} [\Omega.m]$$

CARACTERÍSTICAS DO SOLO:

Terraplenado:

☐ SIM☒ NÃO

Compactado:

☐ SIM☒ NÃO

ρ: Resistividade aparente do terreno (Ω – m)

R: Resistência medida (Ω)

a: Distância entre eletrodos (m)

P: Profundidade de penetração dos eletrodos (m)

Tipo de Camada Superficial: Arbustiva

Estado aparente da unidade:

☐ umido☒ seco

Estação do Ano:

☒ seca☐ chuvosa

CROQUI

