



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

FELIPE JOSÉ LUCENA DE ARAÚJO

**Avaliação do desempenho do sistema de aterramento de uma
subestação (SE) em diferentes tipos de resistividade de solo**

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2013

FELIPE JOSÉ LUCENA DE ARAÚJO

Avaliação do desempenho do sistema de aterramento de uma subestação (SE) em diferentes tipos de resistividade de solo

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Genoilton João de Carvalho Almeida, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2013

FELIPE JOSÉ LUCENA DE ARAÚJO

Avaliação do desempenho do sistema de aterramento de uma subestação (SE) em diferentes tipos de resistividade de solo

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Genoilton João de Carvalho Almeida, M. Sc.

Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por sua imensa sabedoria em ter feito esse belo mundo e as coisas que o compõe.

Um agradecimento especial a minha família que amo tanto, especialmente aos meus pais Maria do Socorro e José Sales, aos irmãos Bruno e Rômulo, as cunhadas Samantha e Wanuza e aos sobrinhos Cauã e Ravi.

Outro agradecimento especial a todos os meus amigos, especialmente aos amigos do colégio Marista Pio X e os da Universidade Federal de Campina Grande.

Agradeço a todos os professores, do maternal até o último período da graduação, todos contribuíram nesse trabalho. Agradecimento especial ao Professor Genoilton e Edson pela orientação da confecção desse relatório.

RESUMO

Este trabalho apresenta avaliações de um sistema de aterramento em diferentes configurações de solo. As simulações foram feitas no ambiente TecAt Plus 5.2, verificando-se os potenciais de passo e toque na superfície na mesma em uma situação de curto-circuito. Também foram feitos estudos com vistas à obtenção de melhorias no sistema de aterramento, com o objetivo de obter-se reduções na sua resistência e, conseqüentemente, nos potenciais de superfície da mesma.

Com os resultados obtidos pela simulação concluiu-se que determinado projeto de malha de aterramento não atende às prescrições das normas quando aplicado em diferentes tipos de configuração de solo.

Palavras-chave: Aterramento, Potencial de toque, Potencial de Passo, Resistência de aterramento.

ABSTRACT

This report presents reviews of grounding systems in different configurations soil. The simulations were performed in the environment TecAtPlus 5.2, verifying the potential step and touch the surface of the same against a short-circuit situation. It was also shown improvements in grounding systems to reduce its strength and potential in it.

With the results obtained by the simulation concluded that the same grounding system in different types of soil configuration, is not suitable to Brazilian standards.

Keywords: Grounding, Touch Potential, Potential Step, Resistance grounding.

SUMÁRIO

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	v
Abstract	vi
Sumário	vii
1 Introdução.....	1
2. Objetivo.....	2
3 Fundamentação Teórica.....	2
3.1 Resistividade.....	2
3.1.1 Tipo de solo.....	4
3.1.2 Umidade do solo.....	5
3.1.3 Concentração e tipos de sais dissolvidos na água.....	5
3.1.4 Compacidade do solo.....	6
3.1.5 Granulometria do solo.....	6
3.1.6 Temperatura.....	6
3.2 Medição de resistividade do solo.....	8
3.2.1 Amostragem física do solo.....	8
3.2.2 Método da variação de profundidade.....	8
3.2.3 Método dos dois pontos.....	9
3.2.4 Método dos quatro pontos.....	9
3.3 Conceitos básicos de segurança em aterramento.....	12
3.3.1 Caracterização de condições de risco.....	13
3.3.2 Efeitos da corrente elétrica no corpo humano.....	16
3.4 Sistemas de aterramento.....	17
3.4.1 Técnicas comuns de melhoria da resistência de aterramento.....	19
3.4.2 Medição de resistência de aterramento.....	22
4 Simulações.....	24
4.1 Malha original.....	25
4.1.1 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 1.....	25
4.1.2 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 2.....	27
4.1.3 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 3.....	29
4.2 Malha com hastes profundas.....	31
4.2.1 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 1.....	31
4.2.2 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 2.....	33
4.2.3 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 3.....	35
4.3 Aumento da área da malha de aterramento.....	37
4.3.1 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 1.....	37
4.3.2 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 2.....	39
4.3.3 Análise de potenciais da malha de terra no solo fictício 3.....	41

5 Conclusão43

1 INTRODUÇÃO

As concessionárias de energia elétrica são responsáveis pela compra de grandes quantidades de energia elétrica das empresas geradoras e pela adequação dos níveis de tensão da energia recebida das empresas transmissoras com o objetivo de transportá-la a grandes e pequenas cidades. Ainda é de responsabilidade das concessionárias de energia elétrica manter de forma contínua o fornecimento da energia elétrica a seus consumidores. Dentro deste contexto, os sistemas de aterramento têm um papel de fundamental importância, especialmente quando se leva em conta a segurança das pessoas e equipamentos ligados às linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica.

Aterramento elétrico é, essencialmente, uma ligação proposital, através de condutor elétrico, entre um sistema físico e a terra. O principal objetivo desta ligação é fornecer um caminho de baixa impedância para correntes oriundas de descargas atmosféricas, de curtos-circuitos e de cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos, além das correntes elétricas decorrentes do desbalanceamento de cargas alimentadas pela fonte de tensão. Dentre os vários fatores que influenciam um sistema de aterramento, o solo, é o mais relevante. Como a preocupação do sistema de aterramento é a condução de corrente para o solo, sendo a sua resistividade a característica preponderante, que é uma medida da oposição ao fluxo de corrente elétrica. Os principais componentes químicos do solo são o óxido de silício (areia), silicatos de alumínio (argila), carbonatos de cálcio e de sódio e água. Em baixa frequência, considerando que o solo comporta-se como uma resistência pura, a condução de corrente através do mesmo se faz basicamente pelo processo eletrolítico, assim, sua condutividade é sensivelmente afetada pela quantidade de sais minerais e água nele contido [7].

Um sistema de aterramento é projetado de modo a produzir, durante o curto-circuito máximo com a terra, uma distribuição no perfil dos potenciais de passo e de toque abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração.

Os defeitos no sistema elétrico, que geram correntes de sequência zero, terão suas correntes passando pelo aterramento. A área de um aterramento é a região de concentração das correntes de defeitos, nesta os potenciais são elevados e cuidados especiais devem ser observados na segurança [4].

Em uma malha de terra adequadamente dimensionada os potenciais que surgem na superfície quando da ocorrência da máxima corrente de falta a terra, são inferiores aos

máximos potenciais de passo e toque que uma pessoa pode suportar sem ocorrência de fibrilação ventricular. Além disso, devem ser dimensionados os condutores da malha, de forma a suportarem os esforços mecânicos e térmicos a que estarão sujeitos ao longo de sua vida útil. É fundamental também, levar-se em consideração que o valor da resistência de terra da malha deve ser compatível com a sensibilização do relé de neutro, no nível de corrente no final do trecho protegido.

Deve-se ressaltar que o dimensionamento de uma malha de terra é um processo iterativo. Parte-se de uma malha inicial e verifica-se se os potenciais na superfície, considerando-se a ocorrência da máxima corrente de falta a terra, são inferiores aos valores máximos suportáveis por um ser humano. Caso a condição se verifique, parte-se para o detalhamento da malha. Caso contrário, modifica-se o projeto inicial da malha até obterem-se as condições exigidas [4,5].

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de uma configuração típica malha de terra, para uma subestação (SE) de 69 kV, em diversas condições de resistividade de solo, simulando os potenciais que surgem na superfície quando da ocorrência da máxima corrente de falta à terra.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir tem-se uma revisão bibliográfica contendo os conceitos gerais relacionados a aterramentos elétricos, com enfoque nos aspectos relevantes aos projetos de malhas de aterramento.

3.1 RESISTIVIDADE

A resistividade do solo (ρ) pode ser definida como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (aresta l de 1 m, área das faces A de 1m^2) preenchido com este solo. Sua unidade é $\Omega\cdot\text{m}$. Sabe-se que:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad . \quad (1)$$

O solo tem uma composição bastante heterogênea, sendo que o valor da sua resistividade pode variar de local para local em função do tipo (argila, calcário, areia, granito, etc.), do nível de umidade (seco, molhado), da profundidade das camadas, da idade de formação geológica, da temperatura, da salinidade e de outros fatores naturais. A resistividade do solo geralmente é afetada também por fatores externos, como contaminação e compactação do solo.

A condutividade elétrica dos materiais constituintes da superfície da terra é muito baixa comparada com a alta condutividade dos metais. Os principais constituintes da terra são o óxido de silício e óxido de alumínio, são excelentes isolantes e a condutividade da terra é em grande parte devido à presença de sais minerais e de água entre estes materiais isolante. Como o solo é heterogêneo, o mesmo será constituído de varias camadas que possui sua resistividade e espessura, como é mostrado na Figura 1.

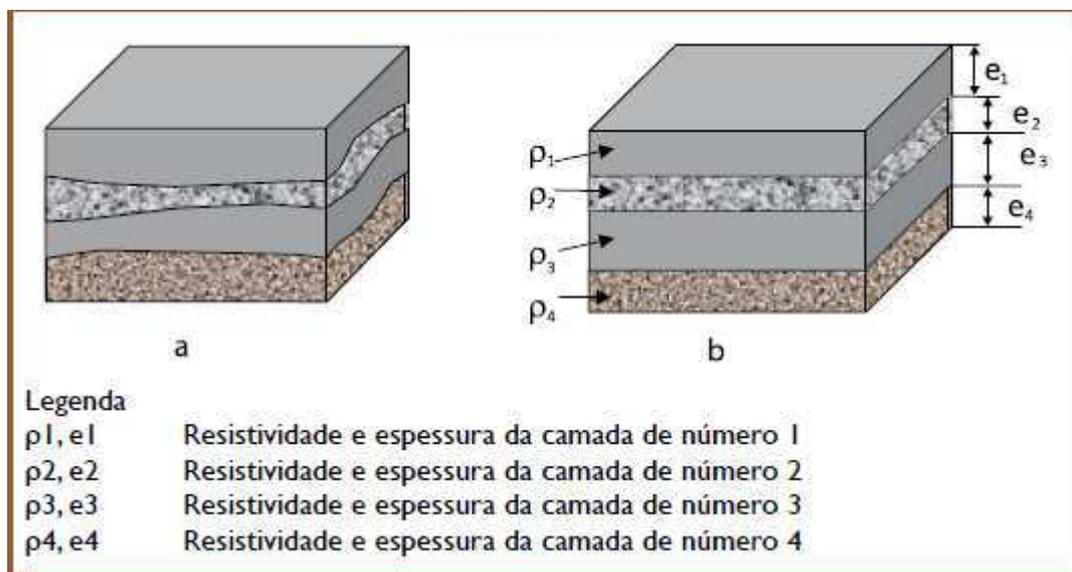


Figura 1 – Solo real (a) e solo estratificado (b) [9].

Na Figura 1.a está representada um solo real, com diferentes composições. Para fins de projeto, se faz necessário a estratificação do solo em camadas específica, onde cada camada possui sua resistividade (ρ) e espessura(Figura 1.b).

A dispersão da corrente elétrica no solo depende da configuração do solo onde a mesma esta sendo propagada. Esta propagação esta representada na Figura 2.

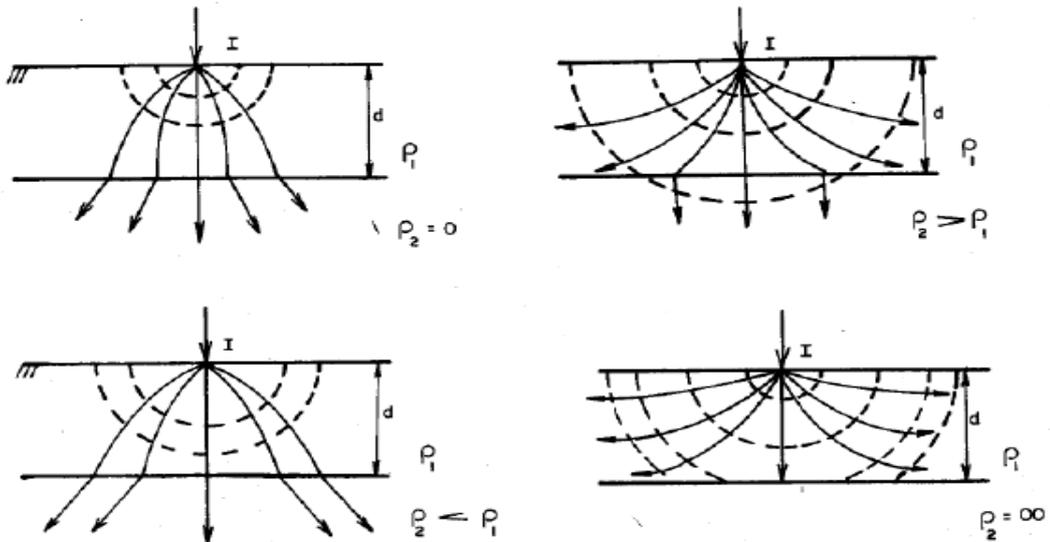


Figura 2 – Dispersão da corrente no solo [5].

Pela Figura 2 pode-se ver que a propagação da corrente no solo depende da resistividade e espessura de cada camada estratificada. Portanto, para o projeto de aterramento, o tipo de solo é de suma importância, já que a corrente será dispersada pelo mesmo.

Os principais fatores que influenciam na resistividade (ρ) do solo são:

- Tipo do solo;
- Umidade do solo;
- Concentração e tipos de sais dissolvidos na água;
- Compacidade do solo;
- Granulometria do solo;
- Temperatura do solo;

3.1.1 Tipo de solo

Os tipos de solo não são claramente definidos. Por isto, não é possível atribuir-se um valor específico de resistividade a um tipo de solo. Além disso, a experiência mostra que, usualmente, são encontrados valores diferentes de resistividade para a mesma variedade de solo de localidades distintas [5].

Na Tabela 1 estão compilados valores característicos para diferentes tipos de solo, nas suas condições usuais de umidade, adotada como sendo em 10%.

Tabela 1 – Faixa de valores usuais de resistividade de certos tipos de solo [5].

Tipo de Solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argilas	80 a 330
Terra de jardim	140 a 480
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia comum	3.000 a 8.000
Basalto	10.000 a 20.000

3.1.2 UMIDADE DO SOLO

Para entender o efeito da umidade na resistividade do solo, deve-se considerar que, em baixa frequência, a condução no solo se faz basicamente por mecanismo eletrolíticos. Para que a eletrolise aconteça é essencial a existência de água e sais minerais que vão prover os íons da mistura. Portanto, a condução de corrente elétrica pelo solo é sensivelmente afetada pela quantidade de água nele contida, sendo que o aumento da umidade do solo implica a diminuição de sua resistividade [5].

A quantidade de água contida no solo é variável com uma série de fatores, como clima, época do ano, temperatura, natureza do solo, existência de lençóis subterrâneos, dentre outros. O solo em seu estado natural, dificilmente se encontra totalmente seco e também com umidade superior a 40%.

3.1.3 CONCENTRAÇÃO E TIPOS DE SAIS DISSOLVIDOS NA ÁGUA

A resistividade do solo é influenciada pela quantidade e tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo. Por exemplo, a areia, que usualmente os níveis de sais minerais nela contida são relativamente baixos. Assim quando se umedece uma amostra de areia com água destilada, verifica-se que sua resistividade varia relativamente pouco, a despeito da variação da umidade, pela falta de condições para que se processe a eletrólise. A Tabela 2 [5] mostra a relação entre a quantidade de sal adicionado a um solo arenoso, de umidade 15% (percentual em peso) e temperatura de 17 °C, e sua resistividade.

Tabela 2 – Influencia da concentração de sais na resistividade do solo [4].

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade ($\Omega.m$)
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3

3.1.4 COMPACIDADE DO SOLO

A compactidade do solo esta relacionada com sua continuidade física, que aumenta com a pressão que o mesmo está submetido. Quanto maior essa continuidade física menor será o valor da resistividade. Como o solo demora certo tempo para se acomodar e tornar-se mais compacto, se recomenda que a medição da resistência de aterramento, de um aterramento elétrico, se faça depois que esse solo esteja totalmente compactado.

3.1.5 GRANULOMETRIA DO SOLO

Granulometria ou Análise Granulométrica dos solos é o processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem peso que cada fração possui em relação à massa total da amostra em análise. A dimensão do solo e a presença de grãos de diversos tamanhos são de grande importância na determinação da resistividade do solo. Essa influencia se da pela capacidade de retenção de água nas camadas do solo e continuidade física do solo.

A menor capacidade de retenção de água feita pelo solo, deixando-a fluir para camadas mais profundas ou evaporar-se, aumenta a resistividade do solo. Com a presença de grãos de tamanhos variáveis tente a diminuir a resistividade, pois os grãos menores preenchem os vazios existentes entre os grãos maiores, provocando uma maior continuidade de massa de solo e maior capacidade de retenção de sua umidade.

3.1.6 TEMPERATURA

A elevação da temperatura provoca maior evaporação da água, diminuindo a umidade do solo. Por tanto, um aumento da temperatura tende a aumentar a resistividade. Isso deve ser

considerado, principalmente em países tropicais com regiões de alta temperatura e altos índices de insolação. Como a resistividade do solo é sensivelmente influenciada pela água nele contida e sabendo-se que a água possui alto coeficiente negativo de temperatura, é razoável supor que a resistividade tende a crescer para uma diminuição de temperatura. Na Tabela 3 está compilado a influencia da temperatura na resistividade do solo. Observasse que a resistividade apresenta valores reduzidos a 20° C e passa a ter um valor bastante elevado quando a água do solo se congela, devido ao alto valor de resistividade do gelo.

Tabela 3 – Efeito da temperatura na resistividade do solo [4].

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω.m)
+ 20	72
+10	33
0(água)	138
0(gelo)	300
-5	790
-15	3.300

Segundo kinderman, com uma temperatura elevada, próxima a 100 °C, o estado de vaporização deixa o solo mais seco, com a formação de bolhas internas, dificultando a condução de corrente elétrica e, conseqüentemente, contribuindo para elevação de sua resistividade, conforme pode ser observado na Figura 3.

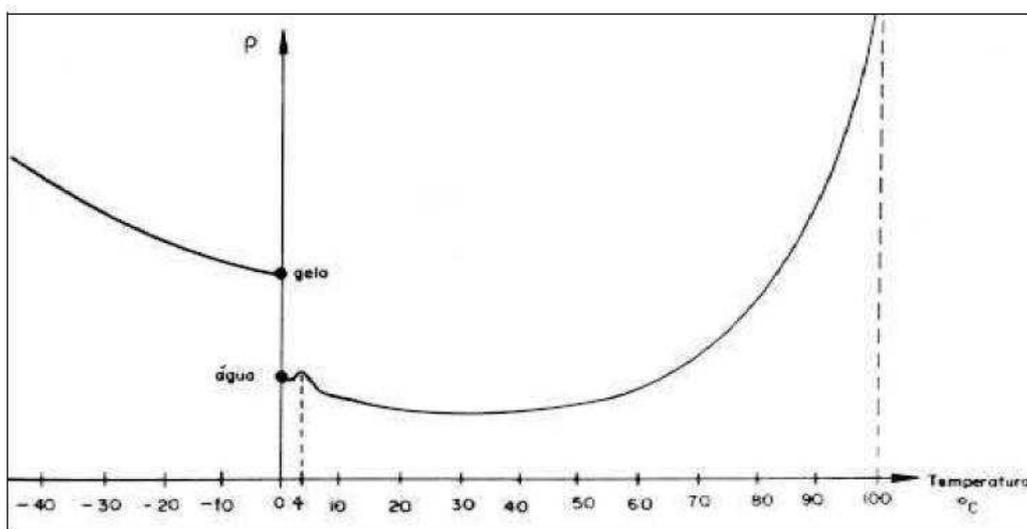


Figura 3 – Comportamento da resistividade da água em função da temperatura [5].

Para analisar os efeitos da temperatura na resistividade do solo devem ser consideradas temperaturas baixas e altas. Por exemplo, ao considerar uma maior evaporação de água devido ao

aumenta da temperatura, é necessário verificar se isto ocorre apenas na camada superficial do solo e se o mesmo é homogêneo, antes de chegar-se alguma conclusão.

3.2 Medição de resistividade do solo

Para a medição da resistividade do solo, alguns dos métodos listados abaixo podem ser usados:

- Amostragem física do solo;
- Método da variação de profundidade;
- Método dos dois pontos;
- Método dos quatro eletrodos, com os seguintes arranjos:
- Arranjo do eletrodo central;
- Arranjo de Wenner;
- Arranjo de Shulumberger – Palmer.

3.2.1 AMOSTRAGEM FÍSICA DO SOLO

Este método é utilizado como critério comparativo com os resultados obtidos em campo pelo método dos quatro pontos. Em laboratório, são levantadas as curvas de resistividade em função da quantidade de água contida no solo e a capacidade que o mesmo possui em reter água. Com isso, montasse o perfil do comportamento da variação da resistividade com o teor de água para um determinado solo, mostrando os valores mínimos de resistividade (solo saturado com água) e os valores máximos de resistividade (solo totalmente seco). Com a determinação da capacidade de retenção de água pela análise de penetração da água no solo pelo efeito de capilaridade, pode-se estimar a umidade que o solo terá na maior parte do tempo. Assim, o valor da resistividade nessa porcentagem de umidade apresenta um valor representativo da resistividade do solo.

3.2.2 MÉTODO DA VARIAÇÃO DE PROFUNDIDADE

Este método consiste no ensaio da resistência de aterramento de um eletrodo com diâmetro (d), com o mesmo enterrado em várias profundidades (L). A resistência de aterramento de uma haste enterrada em um solo uniforme, para fins práticos, é dada pela fórmula:

$$R = \frac{1}{2\pi.L} \left\{ \ln \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right\}. \quad (2)$$

Com os valores de resistência de aterramento do eletrodo, feita a partir da variação da profundidade (L) em que o eletrodo está enterrado, é possível estimar a resistividade aparente do solo em função do valor da resistência média e dos valores do comprimento (L) da haste. Isso fornece uma ajuda visual para se determinar a variação da resistividade com a profundidade.

3.2.3 MÉTODO DOS DOIS PONTOS

Este método também apresenta valores aproximados servindo para avaliar a ordem de grandeza da resistividade de pequenos volumes de solo. O método consiste em fincar dois eletrodos iguais numa mesma profundidade, afastados a uma distância adequada ($\geq 5 \times L$). Com um terrômetro tipo alicate, mede-se a resistência em série do conjunto formado pelos dois eletrodos.

A resistência medida para os dois eletrodos R_m é duas vezes a de cada eletrodo R_{1e} .

$$R_m = 2 \cdot R_{1e} = 2 \cdot \frac{\rho_{2e}}{2\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r}\right) = \frac{\rho_{2e}}{\pi L} \cdot \ln\left(\frac{2L}{r}\right). \quad (3)$$

A resistividade medida do solo entre os eletrodos será:

$$\rho_{2e} = \frac{R_m \pi L}{\ln\left(\frac{2L}{r}\right)}. \quad (4)$$

3.2.4 MÉTODO DOS QUATRO PONTOS

O método dos quatro pontos consiste em fincar eletrodos no solo a pequenas profundidades, alinhados e espaçados em intervalos não necessariamente iguais. A corrente de ensaio I é injetada entre os eletrodos externos e se mede a diferença de potencia dos eletrodos internos através de um voltímetro de alta impedância ou um potenciômetro. A resistividade é dada pela equação 5.

$$\rho_1 = \frac{2\pi}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3} - \frac{1}{d_1+d_2} - \frac{1}{(d_2+d_3)}} \cdot \left(\frac{V}{I}\right). \quad (5)$$

Na Figura 4 está representado um esquema de medição por esse método:

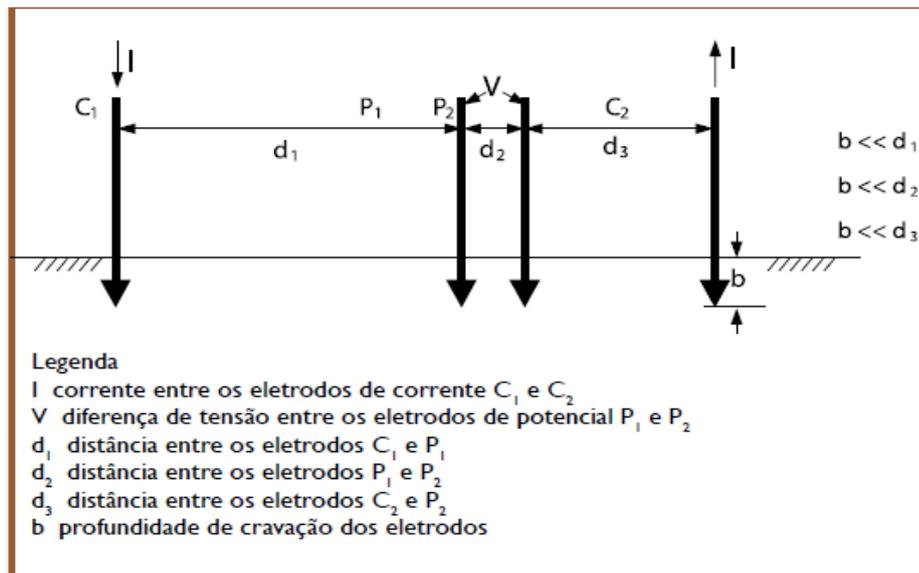


Figura 4 – Método dos quatro eletrodos (geral) [9].

Vários arranjos podem ser utilizados por esse método, explicados a seguir.

3.2.4.1 ARRANJO DO ELETRODO CENTRAL

O arranjo do eletrodo central é recomendado onde o solo é de grande profundidade ou em locais de solo com alta resistividade. Neste arranjo, o eletrodo C_2 é fincado no centro da área a ser medida, variando-se a posição de C_1 , P_1 e P_2 , e obedecendo-se a condição: d_3 muito maior que d_1 e d_2 , conforme a figura 4. A resistividade para uma profundidade H é obtida pelas fórmulas abaixo:

$$H = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3}. \quad (6)$$

$$\rho_H = \frac{2\pi \cdot d_1 \cdot (d_1 + d_2)}{d_2} \times \frac{V}{I} \quad (7)$$

Se d_1 for igual a d_2 a equação 7 pode ser reduzida pela equação 8.

$$\rho = 4 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{V}{I}. \quad (8)$$

3.2.4.2 ARRANJO DE WENNER

O arranjo dos quatro pontos igualmente espaçados, mais conhecido com arranjo de Wenner é o mais conhecido e utilizado. Para a implementação do método, devem ser fincadas no solo quatro eletrodos igualmente espaçados e dispostas em linha. O diâmetro dos eletrodos não deve exceder a

um décimo do espaçamento e a profundidade atingida pelos eletrodos deve ser a mesma. O arranjo de Wenner esta representado na Figura 5.

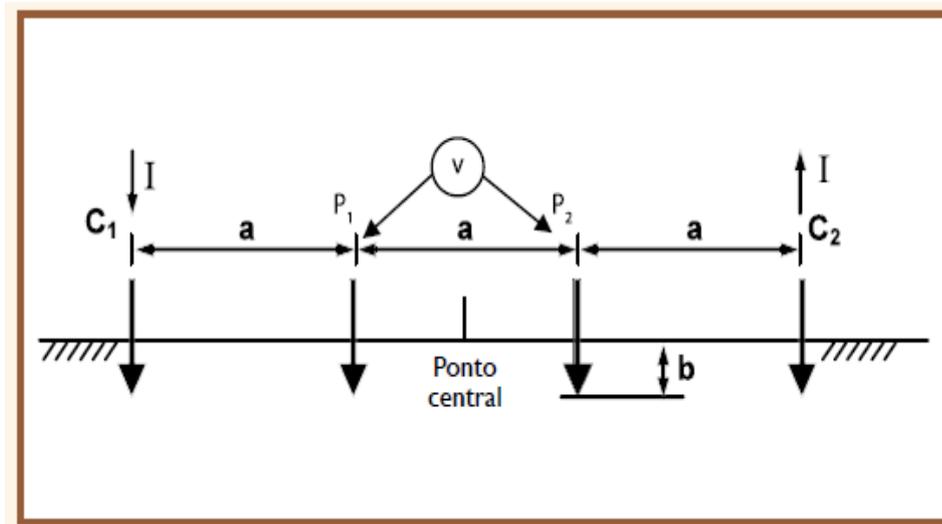


Figura 5 – Arranjos de Wenner [9].

Pelos eletrodos externos é injetada uma corrente no solo. A queda de tensão causada pela corrente é detectada entre os eletrodos internos através de um multímetro. Estabelecendo-se a relação entre a tensão e a corrente medida, obtendo-se um valor de resistência no solo entre os eletrodos P1 e P2.

Frank Wenner mostrou que existe uma relação linear entre o valor da resistividade do solo e a resistência medida:

$$\rho = K \cdot R. \quad (9)$$

O valor da constante K depende da geometria empregada nas medições. Sendo “a” o espaçamento entre as hastes e “b” a profundidade das mesmas e “R” a resistência medida entre os eletrodos internos, tem-se:

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot a}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}}. \quad (10)$$

Num solo homogêneo, quando se faz uma medição a um determinado valor “a” de afastamento entre as hastes, deve-se considerar que o valor da resistividade obtido corresponde aproximadamente à resistividade do solo em uma profundidade de mesmo valor “a”. Isso é facilmente compreendido, quando se pensa que as superfícies equipotenciais aproximam-se de hemisférios (para distâncias entre eletrodos da ordem dos espaçamentos usuais). Ao variar-se o valor do afastamento entre os eletrodos segundo uma direção, anotando-se as indicações sucessivas da resistividade medida, pode-se construir uma curva da resistividade do solo em função de sua

profundidade. Quanto maior o afastamento “a”, mais profundos são os caminhos predominantes da corrente.

3.2.4.3 ARRANJO DE SHULUMBERGER

O arranjo de Schlumberger é uma configuração do arranjo de quatro pontos em que o espaçamento central é mantido fixo (geralmente a uma distância de 1 metro), enquanto os outros espaçamentos variam de forma uniforme. A Figura 6 mostra o esquema do arranjo de Shulumberger.

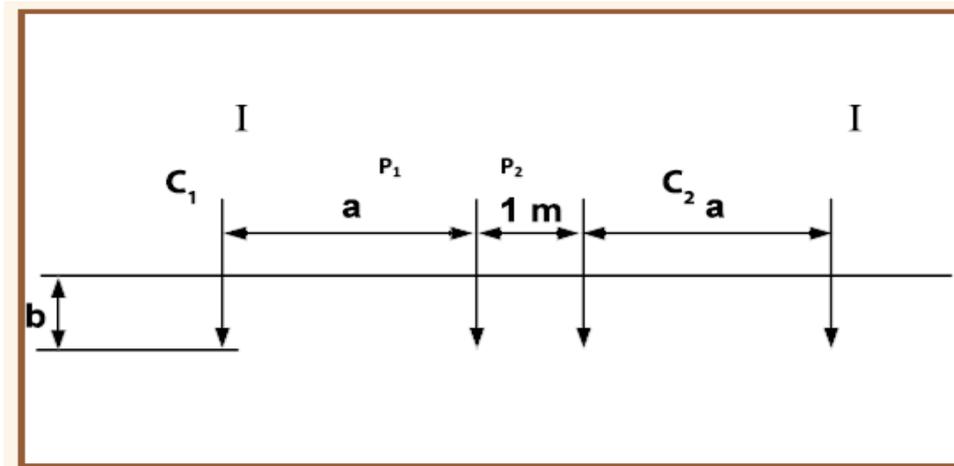


Figura 6 – Arranjo de Shulumberger [9].

As curvas padrão para o arranjo de Schlumberger em duas camadas são obtidas pela equação 11:

$$\rho_{as}(u, v) = \rho_1 \cdot \left(\frac{u^2 - v^2}{2 \cdot v^2} \right) \cdot \int_0^\infty K(x) \cdot (J_0(xu - xv) - J_0(xu + xv)) dx, \quad (11)$$

Onde:

ρ_{as} é a resistividade do arranjo de Schlumberger;

u é a metade do afastamento das hastes de potencial;

v é a metade do afastamento das hastes de corrente;

$K(x)$ é a função Kernel das camadas;

J_0 é a função de Bessel de primeira classe de ordem zero.

3.3 CONCEITOS BÁSICOS DE SEGURANÇA EM ATERRAMENTO

As aplicações dos aterramentos elétricos estão fundamentalmente associadas a dois fatores:

- O desempenho do sistema ao qual o aterramento está conectado;

- As questões de segurança de seres vivos e de proteção de equipamentos.

A motivação básica para implantação do aterramento é a questão da segurança. Tal é o caso das conexões à terra do sistema de proteção contra descargas atmosféricas e das carcaças de motores, que são projetados especificamente para constituir um fator de segurança. Em relação aos riscos associados à implantação de um aterramento destinado especificamente a assegurar um bom desempenho para determinado sistema elétrico ou eletrônico (aterramento de serviço).

3.3.1 CARACTERIZAÇÃO DE CONDIÇÕES DE RISCO

Quando as partes do corpo humano são submetidas a uma diferença de potencial, o mesmo é percorrido por uma corrente elétrica, que pode resultar em diversos efeitos para o indivíduo, configurando-se como uma condição de risco. No que se refere ao aterramento elétrico, é possível caracterizar algumas dessas situações típicas quando flui corrente pelo mesmo, sendo usual classificá-las e referenciá-las como parâmetros de restrição nos projetos elétricos. Estes parâmetros são denominados tensão de passo, tensão de toque e tensão transferida. [4]

3.3.1.1 TENSÃO DE PASSO

Tensão de passo é definida como a máxima diferença de potencial entre os dois pé de um indivíduo que eventualmente estivesse presente na região do aterramento no momento de um defeito do sistema em que a malha de terra esta inserida. A Figura 7 ilustra a tensão de passo.

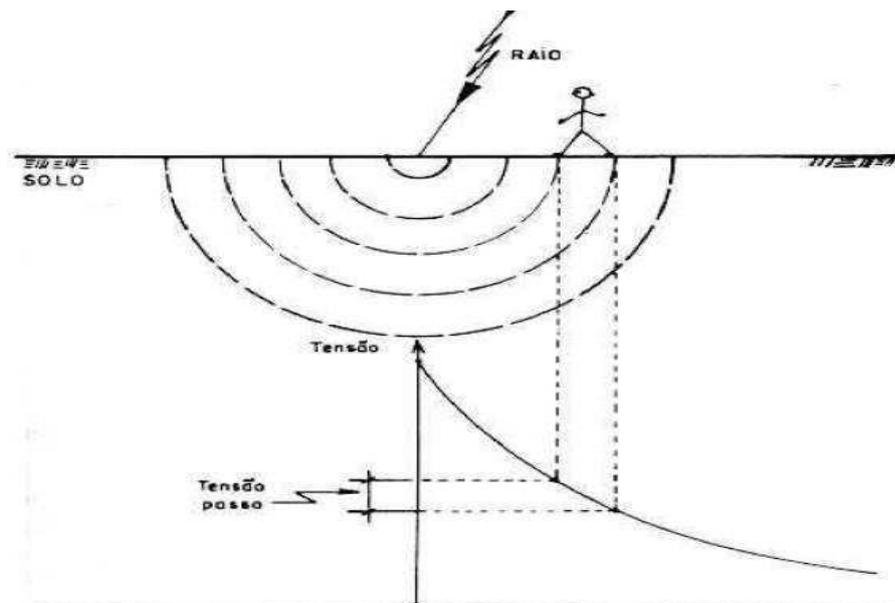


Figura 7 – Tensão de passo [4].

A tensão de passo pode ser calculada a partir da figura 8 abaixo:

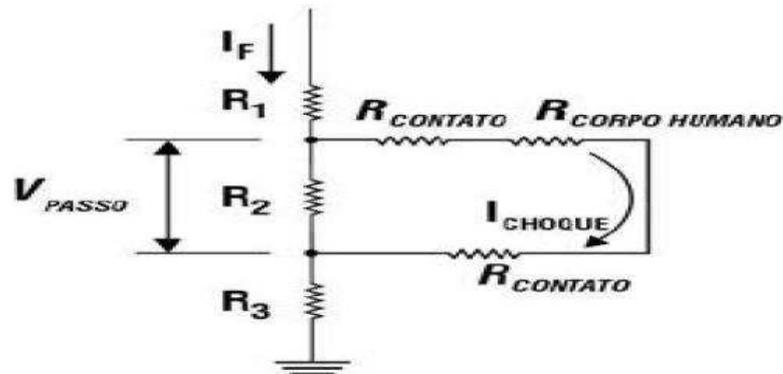


Figura 8 – Esquema elétrico para condição de tensão de passo [4].

A equação da tensão de passo é :

$$V_{passo} = (2R_c + R_{ch})I_{ch}, \quad (12)$$

onde :

R_{ch} = resistência do corpo humano, considerada com 1000Ω ;

R_c = resistência de contato, considerada com 3 vezes a resistividade superficial do solo.

I_{ch} = corrente de falta do sistema.

R_1, R_2, R_3 são as resistências dos trechos de terra considerados.

3.3.1.2 TENSÃO DE TOQUE

Tensão de toque é definida como a máxima diferença de potencial entre a mão e pés a que ficaria submetida uma pessoa, eventualmente presente na região do aterramento, que tivesse contato com uma parte metálica ligada aos seus eletrodos, durante o fluxo de corrente pelo aterramento. A Figura 9 ilustra a tensão de toque.

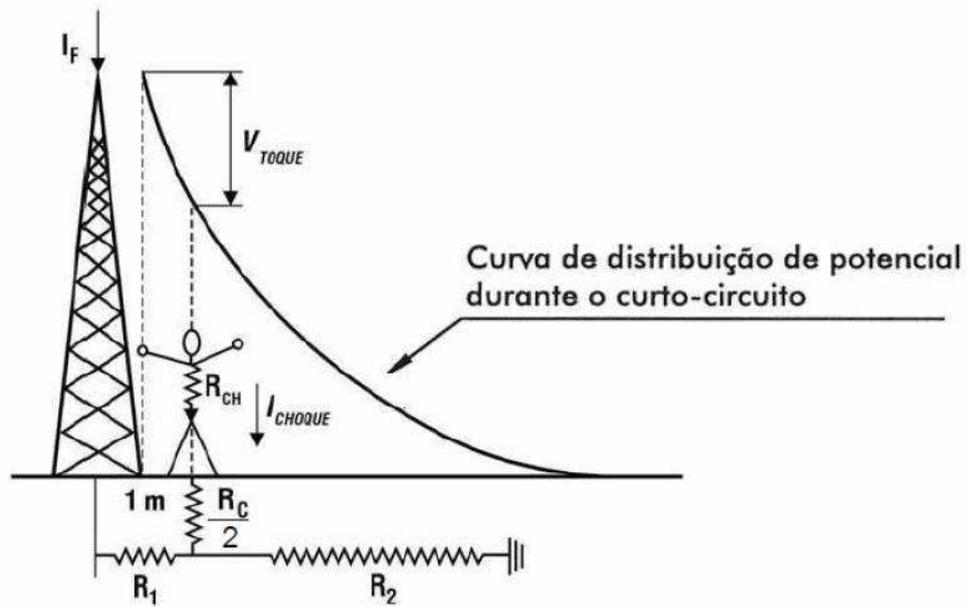


Figura 9 – Tensão de toque [4].

A tensão de toque pode ser calculada a partir da Figura 10 abaixo:

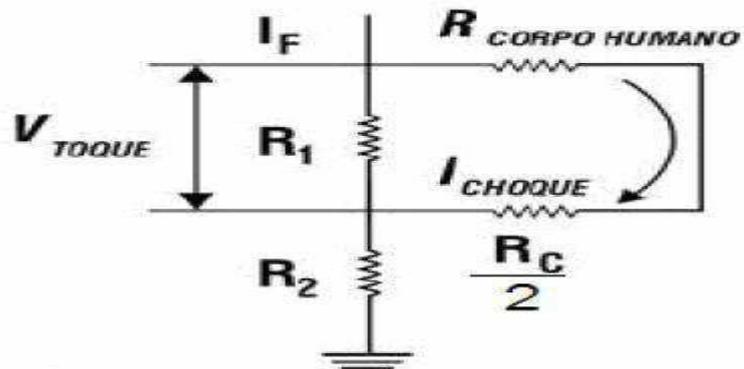


Figura 10 – Esquema elétrico para condição de tensão de toque [4].

A equação da tensão de toque é:

$$V_{toque} = \left(\frac{R_c}{2} + R_{ch}\right)I_{ch}, \quad (13)$$

onde:

= resistência do corpo humano, considerada com 1000 Ω ;

R_c =resistência de contato, considerada com 3 vezes a resistividade superficial do

solo.

I_{ch} = corrente de falta do sistema.

R_1, R_2, R_3 são as resistências dos trechos de terra considerados.

A Tabela 4 mostra os potenciais de toque toleráveis em função da resistividade do solo considerando $I_{ch}=10$ mA que é o valor de corrente para a qual não se percebe nenhum efeito patofisiológico perigoso.

3.3.1.3 TENSÃO DE TRANSFERÊNCIA

É a elevação de potencial total da malha referida ao infinito. É o potencial que uma pessoa ficaria submetido no terra remoto (grande distância da malha) que tivesse contato com uma parte metálica eventualmente conectada com os eletrodos do aterramento, quando o aterramento é submetido a uma falta.

3.3.2 EFEITOS DA CORRENTE ELÉTRICA NO CORPO HUMANO

De uma maneira geral a corrente permissível do corpo humano e as sensações causadas pela mesma podem ser resumidas na Tabela 5.

Tabela 4 – Potenciais de toque em função da resistividade do solo [5].

Resistividade ($\Omega.m$)	Potencial de toque tolerável (V)
0	10,00
50	10,74
100	11,50
200	13,00
300	14,50
400	16,00
500	17,50
1000	25,00
2000	40,00
3000	55,00

Tabela 5 – Efeitos de corrente elétrica no corpo humano [5].

Efeito fisiológico	Corrente (mA)	
	Homem	Mulher
Ausência da sensação das mãos.	1,2	0,6
Nível limiar de percepção	5,2	3,5
Choque desconfortável, mas não doloroso; controle muscular mantido.	9,0	6,0
Choque doloroso; controle muscular mantido	62,0	41,0

Valores acima de 62 ou 41 mA para homens e mulheres respectivamente, serão fatais, pois a pessoa não terá mais controle muscular e ficará “grudada” à estrutura, além de enrolar a língua, causando asfixia. Os valores de corrente citados na Tabela 6 referem-se à corrente alternada. Para uma corrente contínua provocar o mesmo efeito, sua intensidade deverá ser da ordem de 3 vezes os valores referidos.

O valor da corrente máxima admissível através do corpo humano não é rigorosamente definido. Usualmente define-se a corrente máxima admissível através do corpo humano como a maior corrente que percorrendo um caminho que inclua o coração não provoque o início de fibrilação ventricular ou uma parada cardíaca. Os efeitos principais que uma corrente elétrica produz no corpo humano são fundamentalmente quatro: tetanização ou contração muscular, parada respiratória, queimadura e fibrilação ventricular [6].

3.4 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Aterramento elétrico é a conexão proposital de um equipamento ou componente de um sistema elétrico a terra por meio de condutores de eletricidade adequados. Essa conexão apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para o solo. Por tanto, não deve se pensar em apenas em resistência de aterramento, mas numa impedância de aterramento.

A impedância de aterramento pode ser conceituada como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante. Para ilustrar a natureza dessa impedância, a Figura 11 apresenta uma representação simplificada de aterramento por meio de um circuito equivalente.

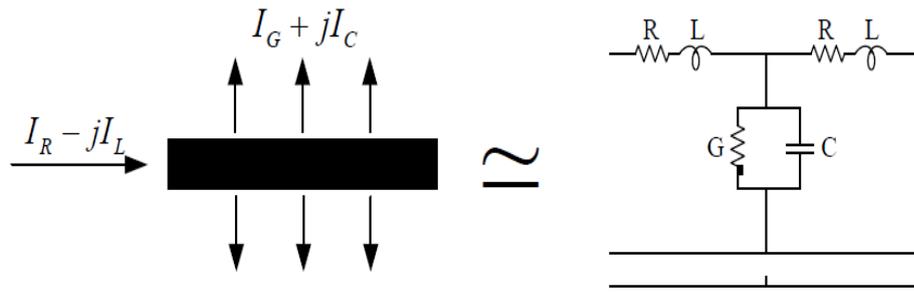


Figura 11 – Componentes de corrente no solo [5].

A resistência oferecida à passagem da corrente elétrica através de um eletrodo para o solo possui três componentes principais:

- Resistência própria do eletrodo e das ligações elétricas ao mesmo (usualmente de valor muito reduzido, dada a alta condutividade dos metais empregados);
- Resistência de contato entre o eletrodo e a terra próxima ao mesmo (de valor desprezível se o eletrodo estiver isento de qualquer cobertura isolante, como tintas, óleos e gorduras, e se a terra estiver bem comprimida de encontro à superfície do eletrodo);
- Resistência de terra circunvizinha, que efetivamente determina o valor da resistência de um aterramento instalado, e que depende basicamente da resistividade do solo e da distribuição da corrente provinda do eletrodo.

Um sistema de aterramento bem elaborado devem ter as seguintes características:

- O estabelecimento de uma tensão de referência para o sistema de energia;
- O funcionamento dos dispositivos de proteção de pessoas contra choques elétricos;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas partes metálicas dos equipamentos;
- Dissipar a corrente de descargas atmosféricas no solo;
- Sensibilização de equipamentos de proteção para isolamento rápido das falhas à terra;
- Assegurar que os potenciais produzidos pelas correntes de falta mantenham-se dentro de limites de segurança para não causar fibrilação do coração de seres vivos;
- Usar a terra como retorno da corrente no sistema MRT (monofilar com retorno por terra) [4] e [5].

Para realizar adequadamente essas funções, um sistema de aterramento deve apresentar basicamente três características:

- Capacidade de condução;
- Baixo valor de resistência;
- Configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial.

É difícil de estabelecer qual é um valor razoável de uma resistência de aterramento. Isso depende da aplicação do aterramento, de fatores técnicos e econômicos. Entretanto, em quase todos os casos, deseja-se que a resistência de aterramento tenha o menor valor possível. Para instalações elétricas de grande porte, como subestações, a resistência de aterramento não deve ser superior a 5 Ω e de 40 a 400 Ω nas redes de distribuição de energia elétrica [5].

Os eletrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada. Basicamente, o eletrodo constitui em qualquer corpo metálico enterrado no solo. Algumas configurações usuais, como cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas em reticulado são usadas em sistemas de aterramento.

O material utilizado na haste de aterramento não interfere na resistência de aterramento, devido à sua resistividade ser muito baixa em relação à resistividade do solo. Tampouco o aterramento com uma única haste fornecerá a resistência de aterramento desejada. Analisando a equação (2), mostrada abaixo, pode-se observar quais fatores influenciam na redução do valor da resistência de aterramento.

$$R = \frac{1}{2\pi.L} \left\{ \ln \left(\frac{4L}{r} \right) \right\}, \quad (14)$$

Alguns dos fatores que podem influenciar no valor da resistência de aterramento são:

- Resistividade do solo;
- Comprimento da haste;
- Diâmetro da haste;
- Tratamento químico do solo;
- Geometria da malha.

3.3.3 TÉCNICAS COMUNS DE MELHORIA DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Algumas vezes, após a instalação de um sistema de aterramento, observa-se através de medições que o valor da resistência de aterramento deste é superior ao valor desejado. Nesses casos, empregam-se algumas técnicas que são capazes de diminuir a resistência de aterramento de uma instalação elétrica. Essas técnicas atuam, basicamente, modificando a resistividade do solo nas proximidades do eletrodo, ou alterando as condições dos eletrodos de aterramento, ou, ainda, fazendo aplicações dessas duas possibilidades simultaneamente [5].

3.4.1.1 APROFUNDAMENTO DOS ELETRODOS

Esse processo é aplicado em hastes verticais. Quando o solo apresenta camadas mais profundas com menor resistividade, essa técnica se mostra bastante eficaz, pois com a emenda das

hastes verticais consegue-se atingir essas camadas que irão conduzir melhor a corrente dissipada pelo sistema de aterramento. Se o solo é homogêneo, a eficácia da técnica é reduzida para profundidades superiores a 3,5 m. Observa-se que, a partir de certo ponto, a resistência de aterramento diminui pouco para grandes aumentos de profundidade.

3.4.1.2 AUMENTO DA SEÇÃO RETA DO ELETRODO

O dimensionamento da seção do eletrodo se faz por questões de resistência mecânica ou em função da sua capacidade de condução de corrente, pois a variação no valor da resistência de aterramento, pelo aumento da área de seção do eletrodo, é pequena.

3.4.1.3 INTERLIGAÇÃO DE HASTES EM PARALELO

Essa técnica se mostra a mais eficaz para redução da resistência de aterramento de uma instalação elétrica. No entanto, os eletrodos em paralelo devem estar suficientemente afastados para minimizar os efeitos da resistência mútua. A Figura 12 mostra as superfícies equipotenciais que duas hastes, espaçadas a uma distância “a”, teria se a outra não existisse.

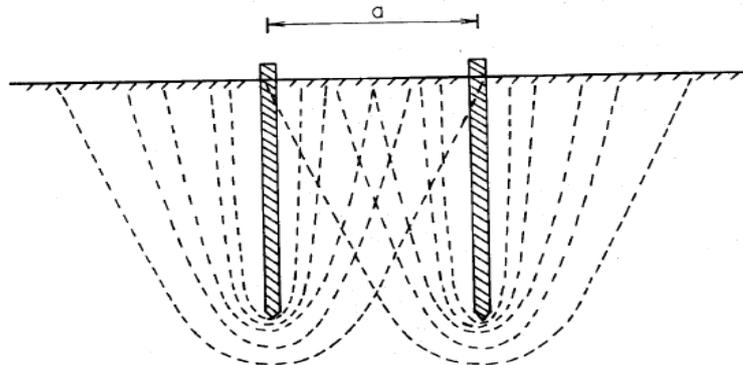


Figura 12 – Superfícies equipotenciais individuais de duas hastes [4].

A zona de interferência das linhas equipotenciais causa uma área de bloqueio do fluxo de corrente de cada haste, resultando uma maior resistência de terra individual. Como a área de dispersão efetiva da corrente de cada haste torna-se menor, a resistência de cada haste dentro do conjunto aumenta. No entanto, com o aumento do espaçamento das hastes em paralelo faz com que a interferência diminua. Teoricamente, para um espaçamento infinito, a interferência seria nula, porém, um aumento muito grande do espaçamento entre as hastes não seria economicamente viável. Na prática, o espaçamento aconselhável gira em torno do comprimento da haste. Na Figura 13 esta representada a superfície equipotencial resultante de duas hastes em paralelo.

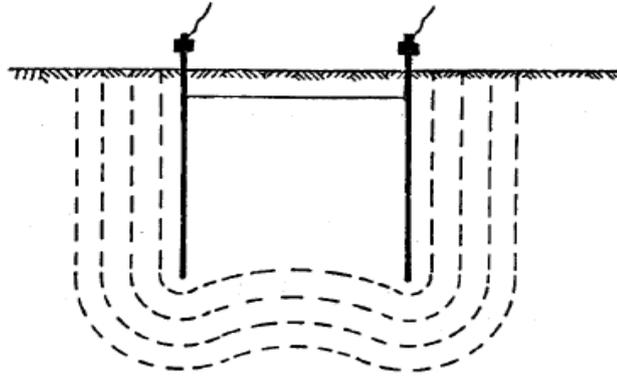


Figura 13 – Superfícies equipotenciais de duas hastes [4].

3.4.1.4 ELETRODOS DE ATERRAMENTO

Basicamente, o eletrodo se constitui em qualquer corpo metálico enterrado no solo. Os eletrodos de aterramento podem ser:

Naturais: não são instalados especificamente para este fim. São elementos metálicos, normalmente da estrutura de uma edificação, que pela sua característica tem uma topologia e um contato com o solo melhor que os eletrodos convencionais e ainda apresentam uma resistência de aterramento também inferior.

Convencionais: são instalados especificamente para este fim, como por exemplo, condutores em anel e as hastes verticais ou inclinadas.

De acordo com as normas do IEEE, quando no aterramento forem utilizados eletrodos convencionais, devem ser observados os seguintes aspectos:

- O tipo e a profundidade de instalação dos eletrodos de aterramento devem ser tais que as mudanças nas condições do solo não aumentem a resistência do aterramento acima dos valores exigidos;
- O projeto do aterramento deve considerar o possível aumento da resistência de aterramento dos eletrodos devido à corrosão;
- Resistam às solicitações térmicas, termomecânicas e eletromecânicas;
- Sejam adequadamente robustos ou possuam proteção mecânica apropriada para fazer face às condições de influência externas;
- Apresente baixo valor de resistência e impedância de aterramento;
- Tenha distribuição espacial conveniente.

Na literatura especializada, destacam-se três nomenclaturas para os eletrodos:

- **Tipo Copperweld:** barra de aço de secção circular onde o cobre é fundido sobre a mesma;
- **Tipo Encamisado por Extrusão:** a alma de aço é revestida por um tubo de cobre através do processo de extrusão;
- **Tipo Cadweld:** o cobre é depositado eletroliticamente sobre a alma de aço.

3.3.4 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A quantificação da resistência de aterramento pode ser realizada por meio da razão entre o potencial do sistema de aterramento em relação a um ponto infinitamente afastado e a corrente que flui por esse aterramento.

Na medição da resistência de aterramento de uma instalação elétrica deve ser empregada uma corrente alternada, para evitar-se a interferência dos efeitos galvânicos no solo na detecção da queda de tensão resistiva [4].

Algumas condições devem ser seguidas para a medição da resistência de aterramento. Por exemplo, estas não devem ser efetuadas num breve período após uma chuva, pois o solo umedecido irá apresentar menor valor de resistividade e conseqüentemente menor resistência de aterramento. Recomenda-se a realização da medição quando o solo encontra-se seco, pois nesse caso a resistência do aterramento terá seu valor mais elevado. É aconselhável registrar as condições de realização das medições (temperatura ambiente, umidade do ar, profundidade dos eletrodos de prova, dimensões e forma do sistema de aterramento, distâncias e direções das medições, dentre outras).

3.4.3.1 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO UTILIZANDO O MÉTODO DA QUEDA DE POTENCIAL

Este método é recomendado para medições por meio de equipamentos específicos, como o terrômetro. Para a implementação desse método, se faz circular uma corrente por meio de um circuito compreendido pela malha de aterramento em estudo, um trecho da terra e um eletrodo auxiliar de corrente. Simultaneamente deve-se medir a tensão entre a malha de terra e o terra remoto por meio de uma sonda ou eletrodo auxiliar de potencial. A Figura 14 mostra, de forma esquemática, como é feita a medição.

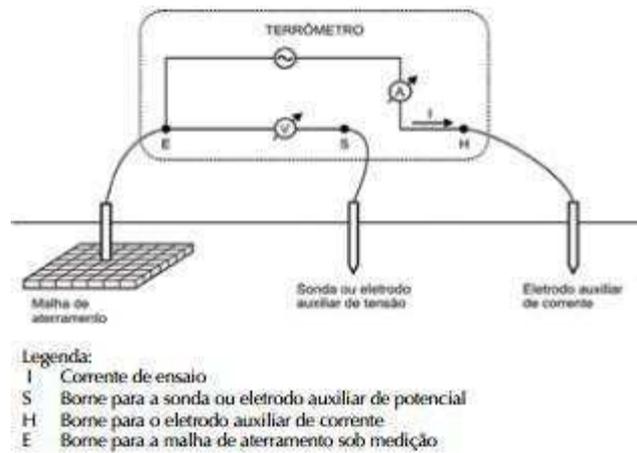


Figura 14 – Método da queda de potencial [5].

Os eletrodos auxiliares de corrente e tensão são constituídos cada um dele por uma ou mais hastes metálicas, interligadas e cravadas no solo, de forma a garantir a menor resistência de aterramento do conjunto. O eletrodo auxiliar de tensão, deve ser deslocada a partir das proximidades do sistema de aterramento sob ensaio em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância da malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente. Dessa forma, é possível obter uma curva (Resistência X distância), conforme mostrado na Figura 15.

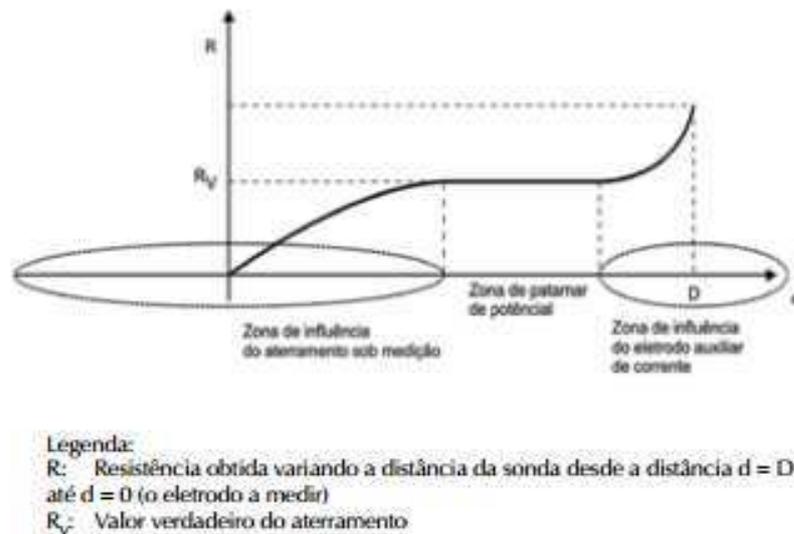


Figura 15 – Curva característica teórica da resistência de aterramento de um eletrodo pontual [5].

Esta curva característica teórica apresenta duas partes curvas que são zonas de influência mútua entre a malha, o eletrodo auxiliar de corrente e a terra, e uma zona chamada de “patamar de potencial”, onde se pode encontrar o valor verdadeiro da resistência de aterramento. Na aplicação deste método, o eletrodo auxiliar de corrente C deve ser colocado a uma distância do centro elétrico do aterramento (aproximadamente igual ao centro geométrico) superior a 3 ou 4 vezes a maior dimensão linear do aterramento. Aconselha-se que essa distância não seja inferior a 40 metros para pequenos aterramentos e a 100 metros no caso de malhas de terra. O eletrodo auxiliar de potencial,

quando colocado a 60% da distância entre o centro elétrico da malha e o eletrodo de corrente e em linha com esses, normalmente está na região do patamar. No caso da curva gerada não apresentar o patamar, isto é possível quando o eletrodo auxiliar de corrente está próximo a malha de aterramento, havendo superposição nas suas regiões de aterramento.

4 SIMULAÇÕES

Para o projeto da malha de terra nos solos fictícios, foi usado o software Tecat Plus 5.2. Esse software é uma solução completa para projetos de malhas de terra, cobrindo a estratificação da resistividade do solo, resistência da malha e análise dos potenciais, em solos de até 4 camadas.

Neste software pode-se definir cada eletrodo da malha individualmente, por suas dimensões e coordenadas, incluindo os condutores verticais, horizontais e inclinados. Os conectores (compressão ou solda) são adicionados automaticamente [10].

Para análise dos potenciais no solo, o usuário define visualmente uma área sobre a planta da malha e obtém uma visão em 3 dimensões dos potenciais de malha e superfície. Também visualmente, o usuário define linhas para gerar as vistas em 2 dimensões dos potenciais de toque e passo [10].

Para efetuar as simulações, foram consideradas as resistividades da Tabela 6 mostrada abaixo:

Tabela 6 – Valores de resistividade [4].

Região	Valores típicos de resistividade do solo
Minas Gerais	2.450
Paraná	200 – 1.000
Pernambuco	100 – 2.000

As seguintes premissas foram consideradas na realização das simulações de potencial na região da malha de terra de uma subestação:

- De acordo com [5], para avaliação das tensões de segurança foi considerado a massa média do corpo humano de 70 Kg para operadores dentro do pátio da subestação;
- A profundidade da malha foi considerada como sendo de 0,5m e a espessura da camada de brita utilizada foi de 0,15m com resistividade de 3000 $\Omega.m$;
- A corrente de curto-circuito considerada foi de 9 KA e o tempo de atuação do disjuntor de 0,4s

Com essas premissas foram simulados os potenciais elétricos de três configurações distintas de solo e em seguida foi introduzida algumas técnicas para melhoria do sistema de aterramento.

4.1 MALHA ORIGINAL

Inicialmente foi considerada uma malha de terra com dimensões de 60 m x 50 m, que representa uma área 3000 m². As hastes utilizadas foram de 2,4 m de comprimento e 16 mm de diâmetro e cabos de cobre com seção transversal de 50 mm², conectados via solda exotérmica. Na Figura 16 observe o projeto da malha de terra com o corte transversal para a simulação dos potenciais de passo, toque e superfície.

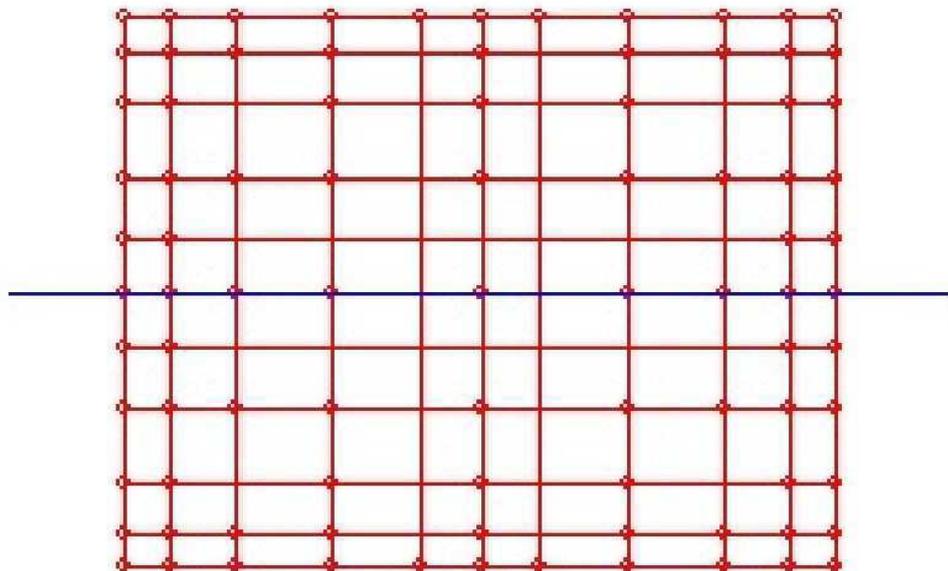


Figura 16 – Representação da configuração da malha de terra com o corte transversal.

4.1.1 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 1

Para o solo fictício 1, foi considerada um solo homogêneo com resistividade $\rho = 2450 \Omega.m$.

A partir da configuração da malha de terra proposta e a resistividade do solo considerada do solo fictício 1, simulou-se um valor de resistência de aterramento 19,60 Ω com máximo potencial da malha de terra, no momento de um curto-circuito, de 102.208 V mostrado na Figura 17.

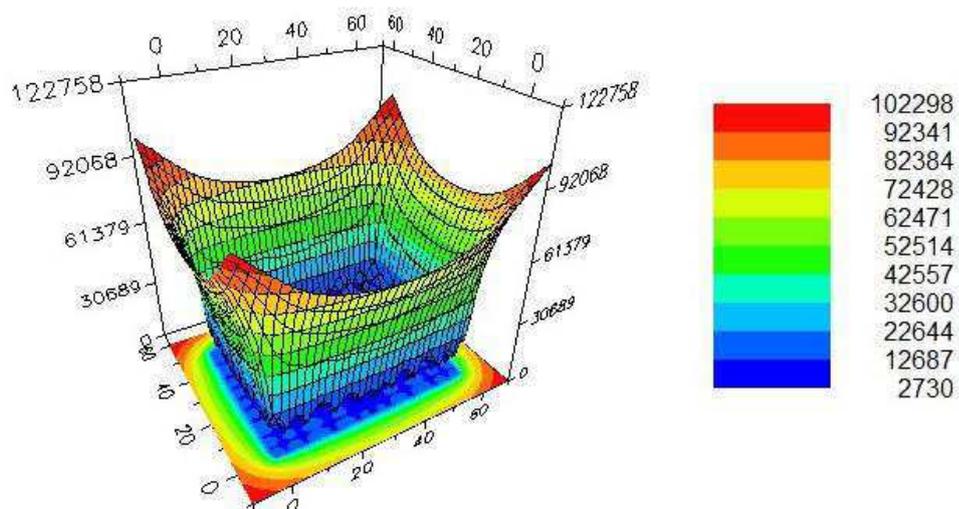


Figura 17 – Potencial da malha de terra(Solo fictício 1).

Os potenciais de passo e toque, aos quais uma pessoa de 70 kg estaria submetida se estivesse na subestação na ocasião de um curto-circuito, estão representados nas Figuras 18 e 19 respectivamente.

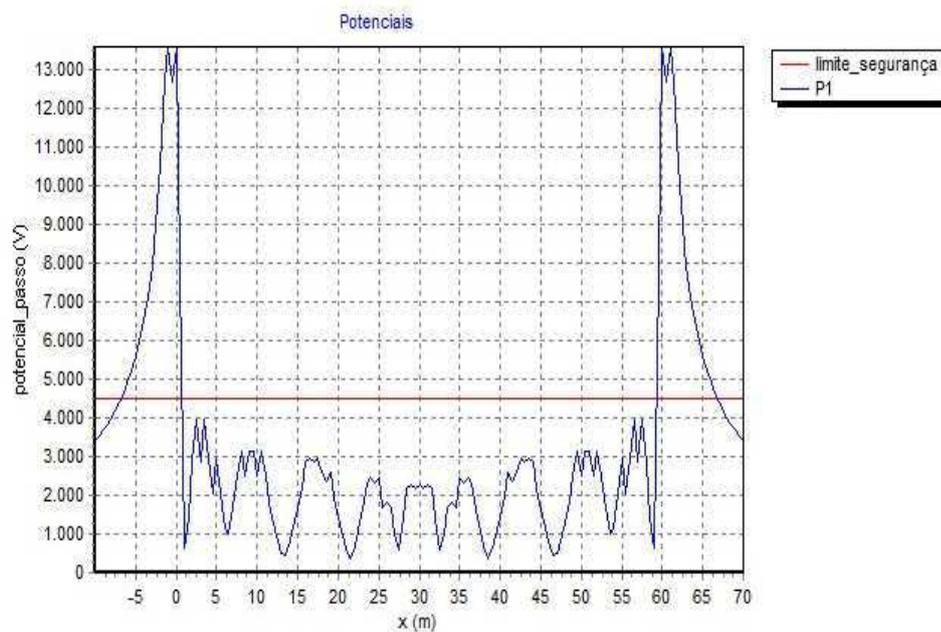


Figura 18 – Potencial de passo(Solo fictício 1).

Analisando os potenciais de passo da Figura 18, verifica-se que dentro da malha de terra os potenciais estão abaixo do limite de segurança. Entretanto há uma queda de potencia significa ao sair da malha de terra, chegando a aproximadamente 12 KV, isso se dá devido ao acumulo das cargas em lugares pontiagudos, fenômeno conhecido como poder das pontas.

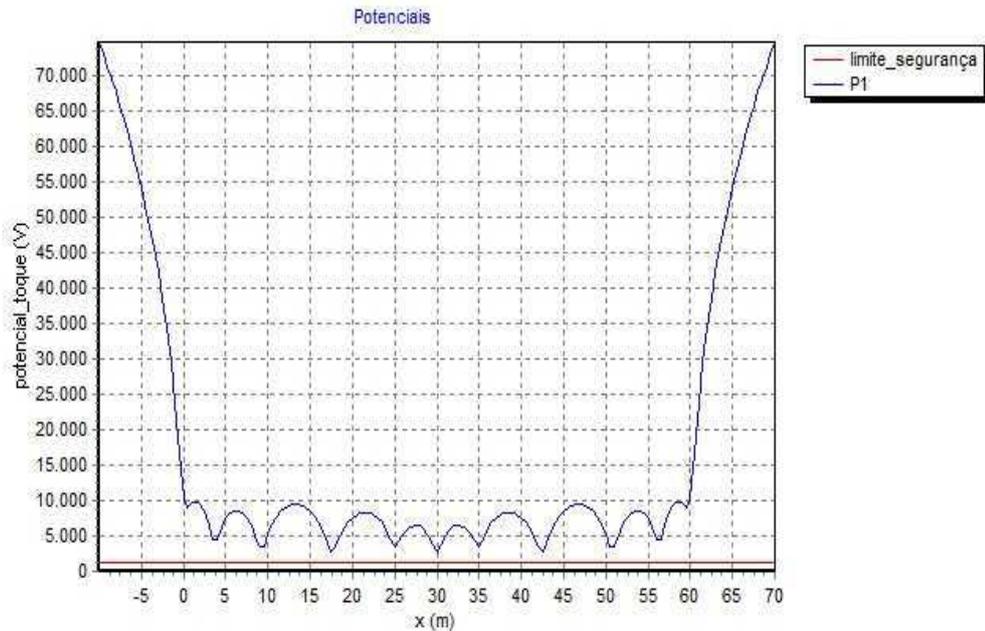


Figura 19 – Potencial de toque (Solo fictício 1).

Na região da malha de terra, os potenciais de toque estão acima do limite de segurança, comprometendo a integridade física de indivíduos que supostamente estejam dentro da malha de terra no momento de um curto-circuito. Verifica-se pela Figura 16 que na região (corte transversal) entre 10 a 15 metros o potencial de toque chega a 3 kV, sendo essa região a mais perigosa para instalar qualquer equipamento da subestação.

4.1.2 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 2

Para o solo fictício 2, foi considerada um solo heterogêneo com resistividade da primeira camada $\rho_1 = 700 \Omega.m$ e espessura $e_1 = 2,5$ m e resistividade da segunda camada $\rho_2 = 1000 \Omega.m$.

Nessa configuração de solo, simulou-se um valor de resistência de aterramento da malha de terra original foi de $7,45 \Omega$ com máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito, 36.895 V, mostrado na Figura 20.

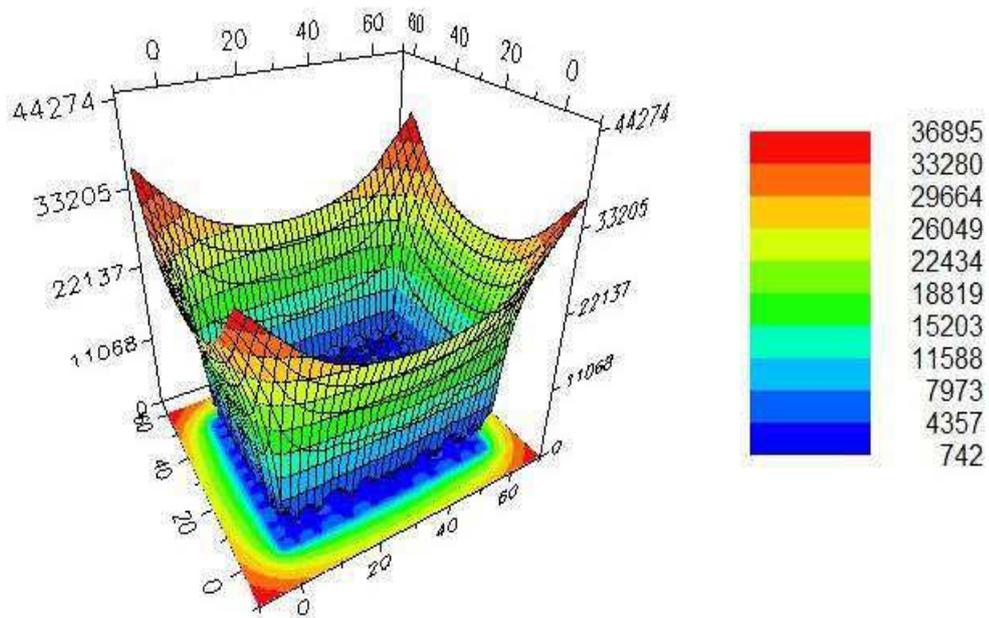


Figura 20 - Potencial da malha de terra (Solo fictício 2).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

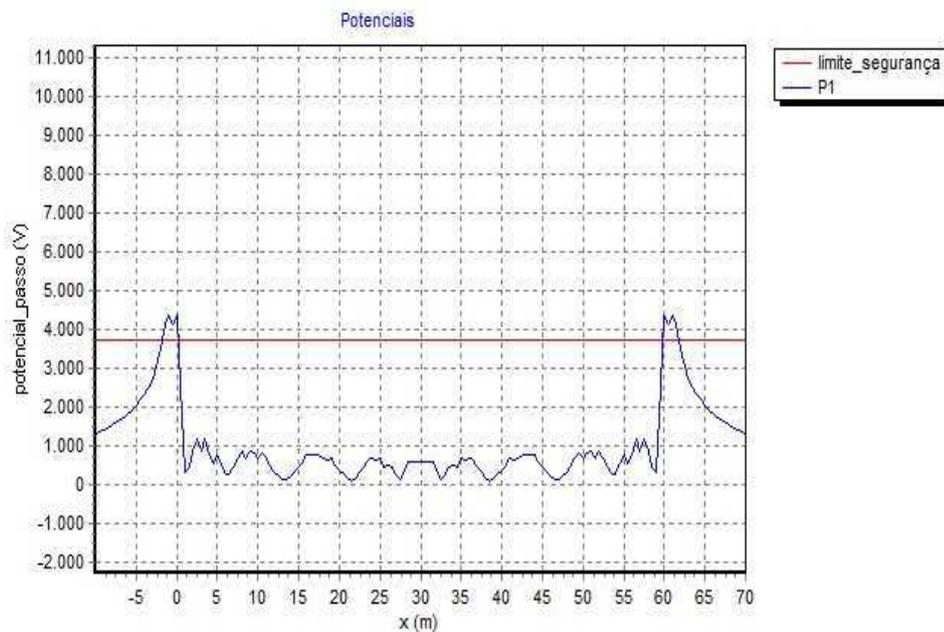


Figura 21 – Potencial de passo(Solo fictício 2).

Observando-se a Figura 21, verificasse que os potenciais de passo na região interna a malha de terra de terra estão abaixo do limite de segurança. Entretanto há uma queda de potencial brusca entre a região exterior e interior da malha de terra.

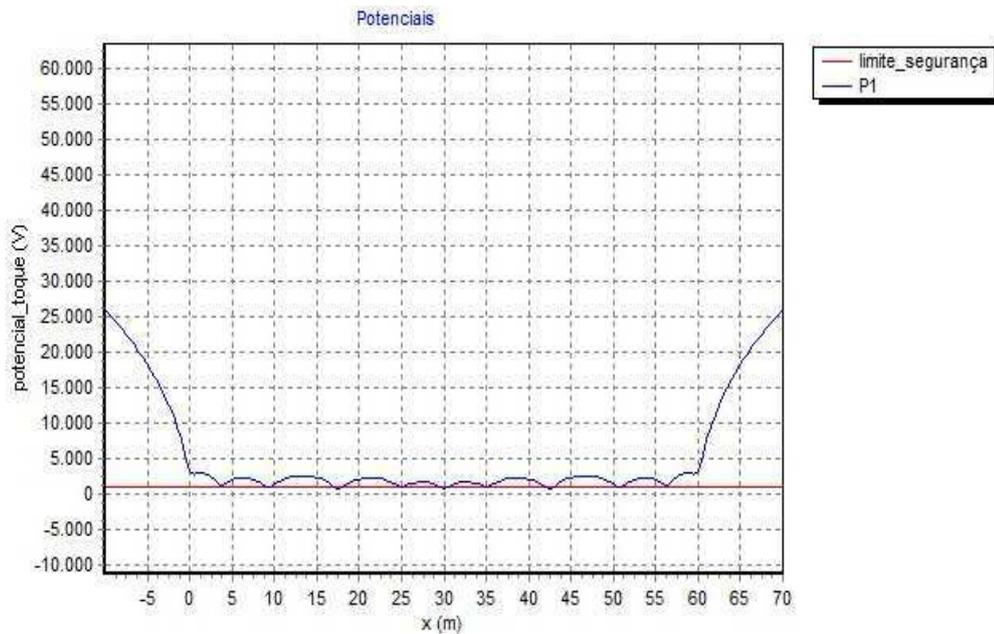


Figura 22 – Potencial de toque (Solo fictício 2).

Os potenciais de toque estão um pouco acima do limite de segurança, entretanto na região interna da malha os potenciais de toque não passam de 500 V, fazendo com que um indivíduo com equipamentos de segurança adequados, submetido a essa tensão, não sofra qualquer dano prejudicial a sua integridade física.

4.1.3 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 3

Para o solo fictício 3, foi considerada um solo heterogêneo com resistividade da primeira camada $\rho_1 = 800 \Omega.m$ e espessura $e_1 = 2,5$ m e resistividade da segunda camada $\rho_2 = 400 \Omega.m$.

Nessa configuração de solo, simulou-se um valor de resistência de aterramento da malha de terra original foi de $3,71 \Omega$ com máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito, de 21.305 V, mostrado na Figura 23.

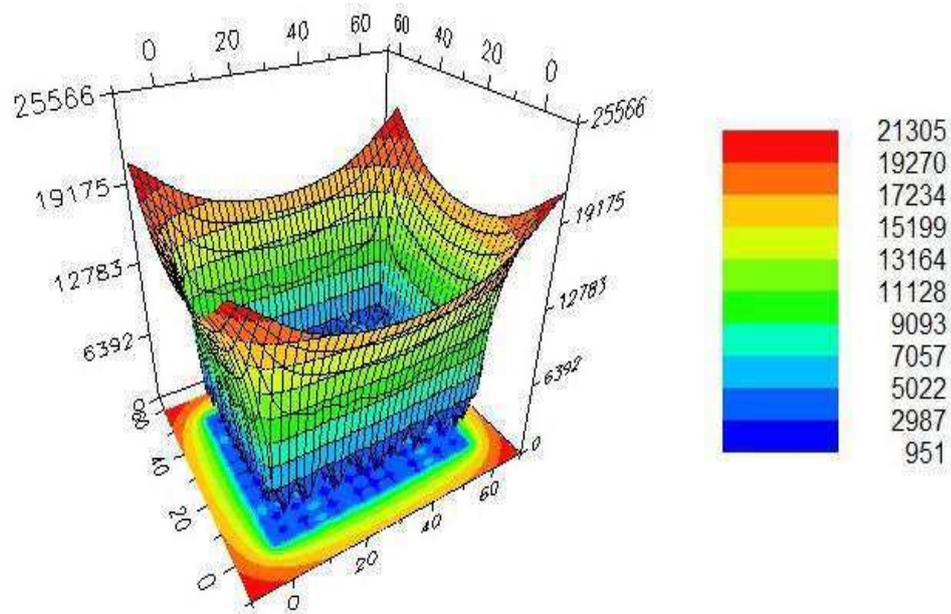


Figura 23-Potencial da malha de terra (Solo fictício 3).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 24 e 25, respectivamente.

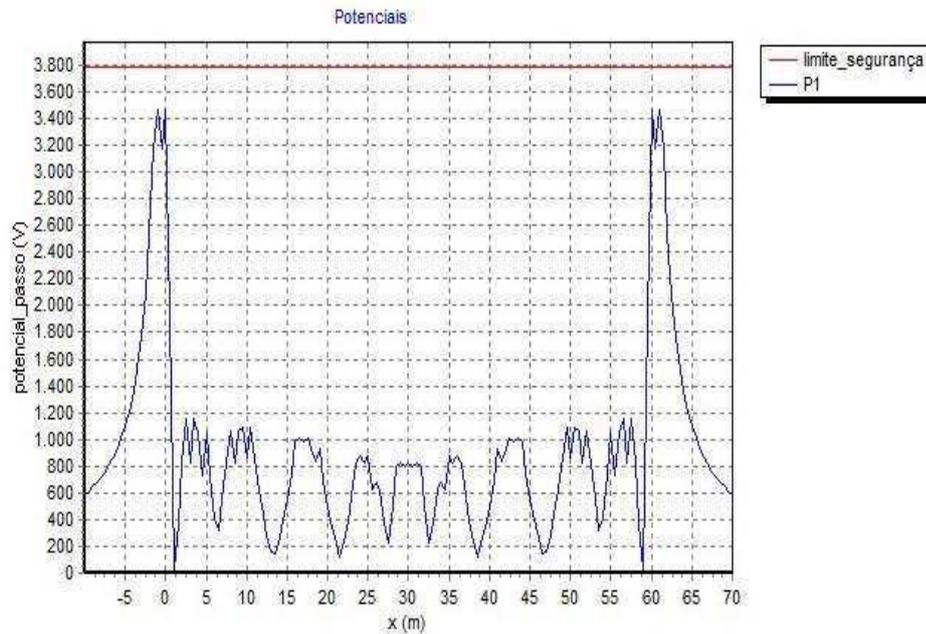


Figura 24 – Potencial de passo(Solo fictício 3)

Analisando a Figura 24 os potenciais de passo estão todos abaixo do limite de segurança mas há ainda uma grande diferença de potencial de passo entre a região interna e externa da malha de terra.

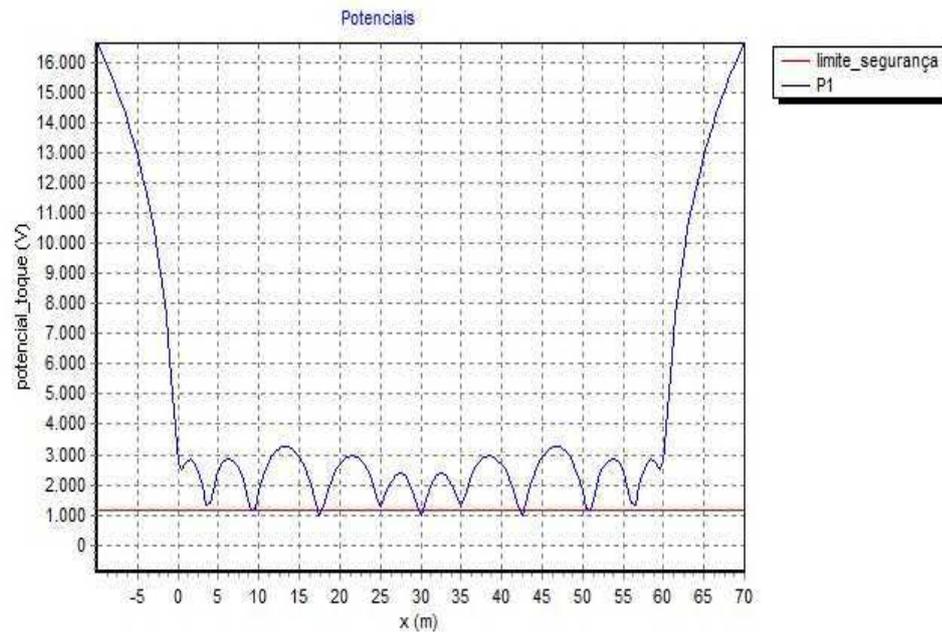


Figura 25 – Potencial de toque (Solo fictício 3).

Apesar da resistência de aterramento está abaixo dos 10Ω recomendado pela norma ABNT 5410, os potenciais de toque estão acima do limite de segurança, isso se deve a elevada corrente de curto-circuito do sistema que a malha esta inserida.

4.2 MALHA COM HASTES PROFUNDAS

Para melhoria do sistema de aterramento, as hastes localizadas nas bordas da malha de terra foram trocadas por hastes de 9 metros de comprimento para reduzir a queda de potencial entre a região externa e interna da malha de terra.

4.2.1 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 1

Para o solo fictício 1, foi considerada um solo homogêneo com resistividade $\rho = 2450 \Omega.m$.

Com essa configuração de malha, a resistência de aterramento simulada foi de $17,48 \Omega$, obtendo uma redução de aproximadamente 11% no valor de resistência de aterramento com essa técnica. O máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito foi de 82.230 V, mostrada na Figura 26, reduzindo em aproximadamente 20% em relação a malha original.

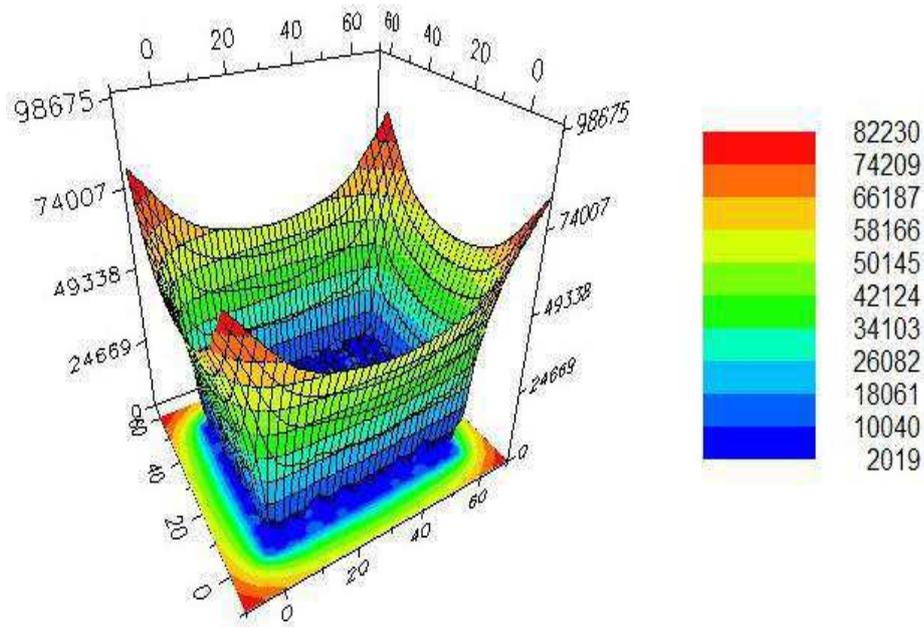


Figura 26 – Potencial 3d – Hastes profundas (Solo fictício 1).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

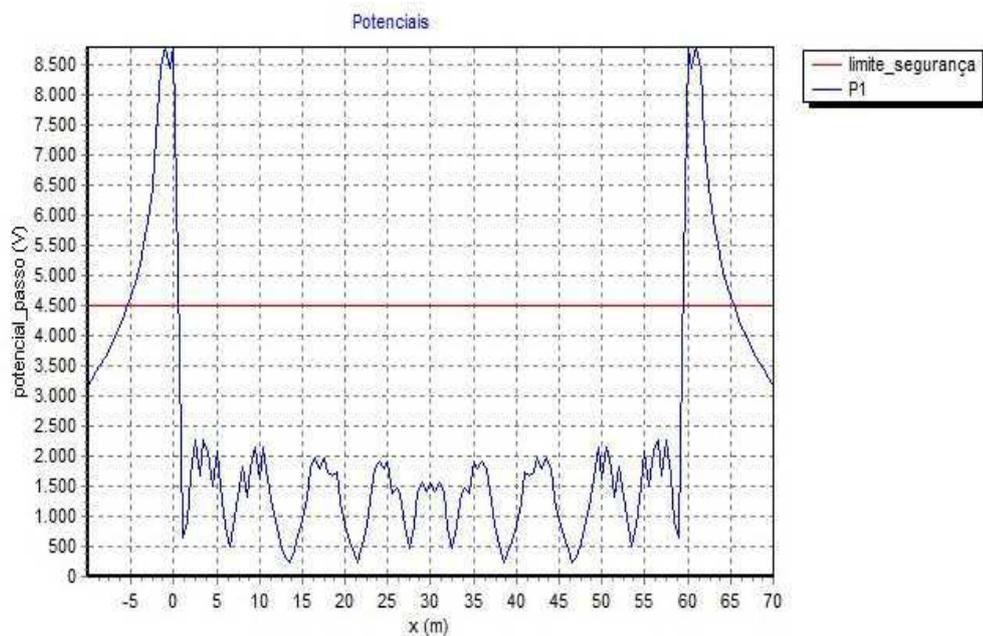


Figura 27– Potencial de passo – hastes profundas (Solo fictício 1).

Analisando a Figura 27, verifica-se uma redução acentuada nos potenciais nas extremidades da malha de aterramento. Comparando com o resultado da Figura 18, os potenciais nas extremidades sofreram uma redução de aproximadamente 4 kV.

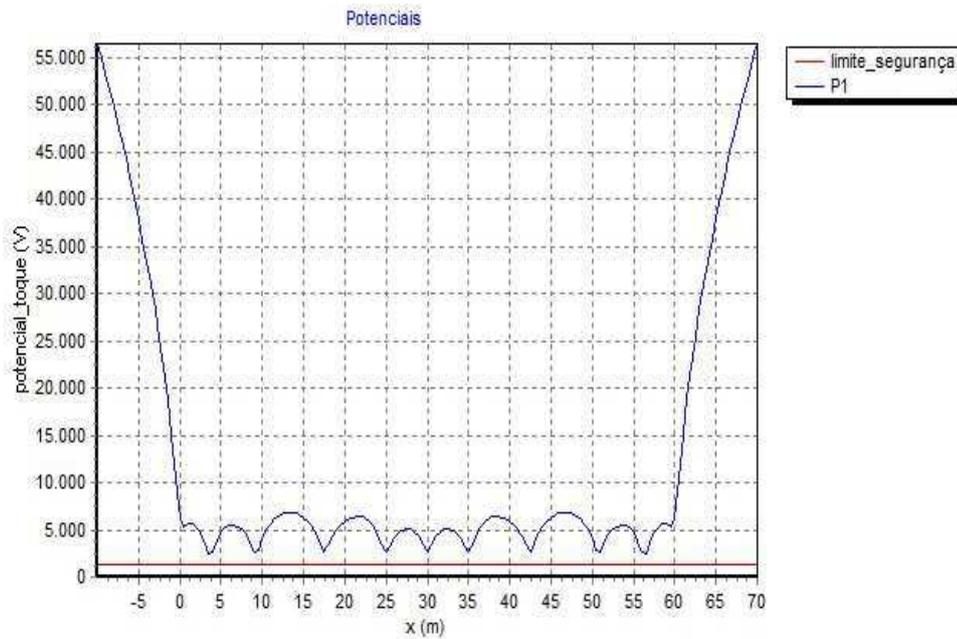


Figura 28 – Potencial de toque– hastes profundas (Solo fictício 1).

Os potenciais de toque nas extremidades da malha tiveram uma redução de aproximadamente 30%. A redução nos potenciais das extremidades é explicada pelo fato de haver um maior escoamento de corrente para essa configuração de solo.

Observasse uma redução nas ondulações nos potenciais de passo e toque na área interna da malha de terra.

4.2.2 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 2

Usando a mesma configuração de solo com resistividade da primeira camada $\rho_1 = 700 \Omega.m$ e espessura $e_1 = 2,5$ m e resistividade da segunda camada $\rho_2 = 1000 \Omega.m$. Nessa configuração o valor simulado de resistência de aterramento foi de $6,82 \Omega$, reduzindo seu valor em aproximadamente 9% em relação a malha original. O máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito foi de 30.942 V, mostrada na Figura 29, reduzindo em aproximadamente 7% em relação a malha original.

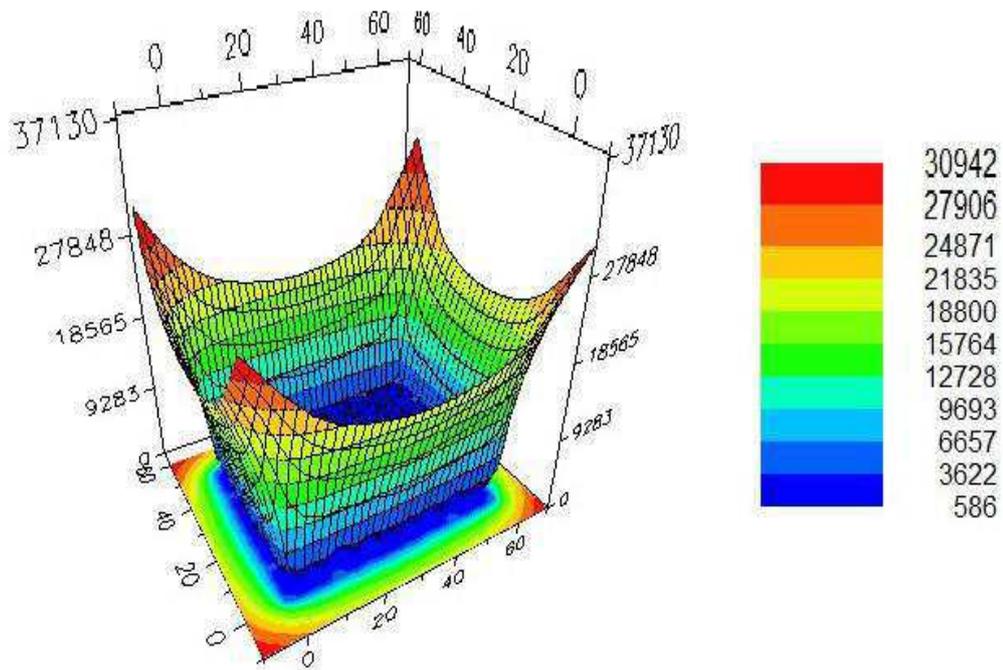


Figura 29 – Potencial 3d – Hastes profundas (Solo fictício 2).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 30 e 31, respectivamente.

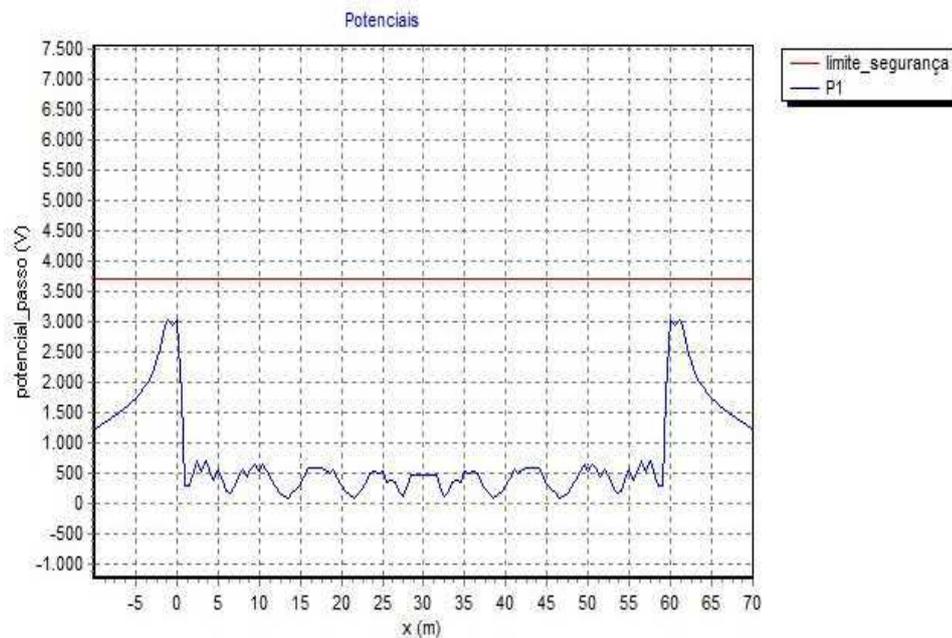


Figura 30 – Potencial de passo– hastes profundas (Solo fictício 2).

Analisando a Figura 30, verifica-se uma redução nos potenciais nas extremidades da malha de aterramento de aproximadamente 7% em comparação com o resultado da Figura 21.

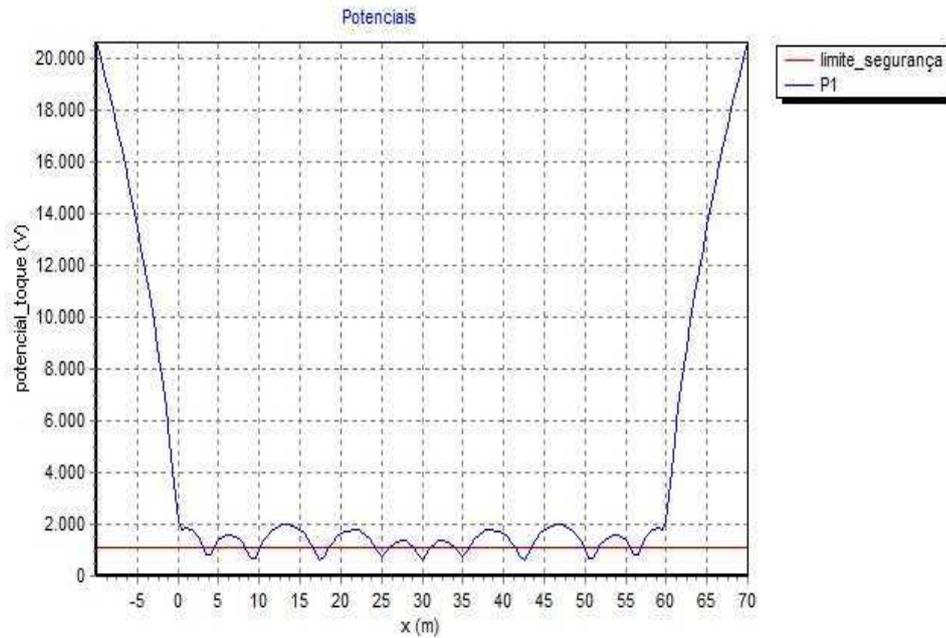


Figura 31 – Potencial de toque– hastes profundas (Solo fictício 2).

Os potenciais de toque nas extremidades da malha tiveram uma redução de aproximadamente 20%.

Essa técnica de hastes profundas não se mostrou tão eficaz devido ao fato de que a resistividade da segunda camada ser maior que a resistividade da primeira camada, fazendo que a corrente não escoe para camadas de solos mais profundas.

4.2.3 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 3

Usando a mesma configuração de solo com resistividade da primeira camada $\rho_1 = 800 \Omega.m$ e espessura $e_1 = 2,5 \text{ m}$ e resistividade da segunda camada $\rho_2 = 400 \Omega.m$. Nessa configuração o valor simulado de resistência de aterramento foi de $2,59 \Omega$, reduzindo seu valor em aproximadamente 30% em relação a malha original. O máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito foi de 18.191 V , mostrada na Figura 32, reduzindo em aproximadamente 15% em relação a malha original.

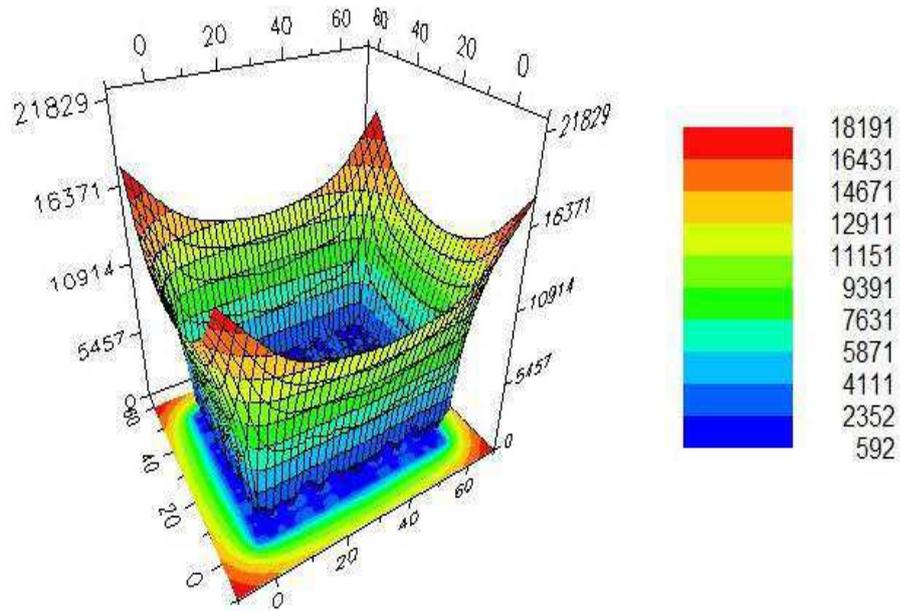


Figura 32 – Potencial 3d – Hastes profundas (Solo fictício 3).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

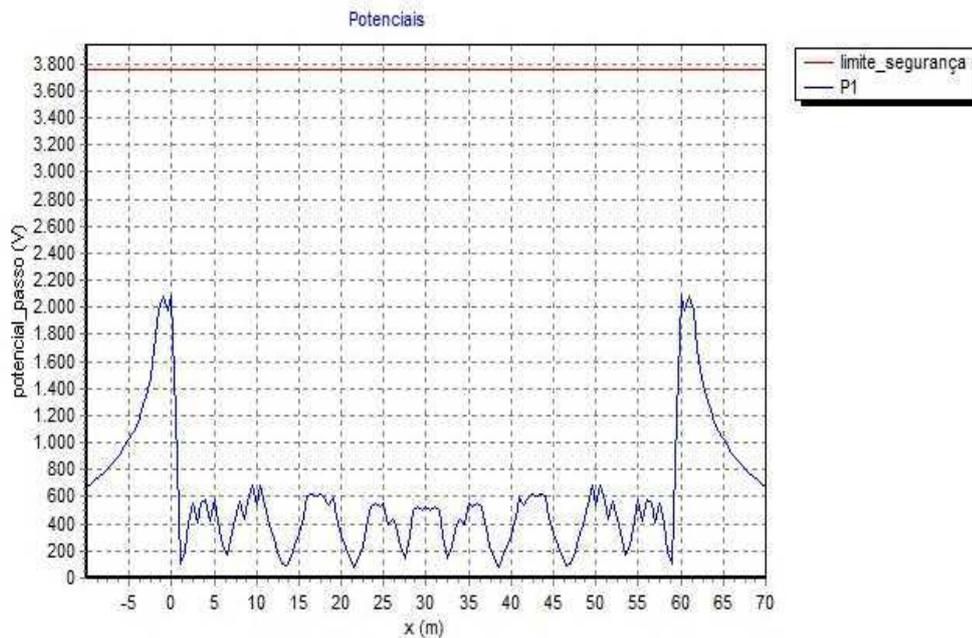


Figura 33 – Potencial de passo– hastes profundas (Solo fictício 3).

Analisando a Figura 33, verifica-se uma redução nos potenciais nas extremidades da malha de aterramento de aproximadamente 40% em comparação com o resultado da Figura 24.

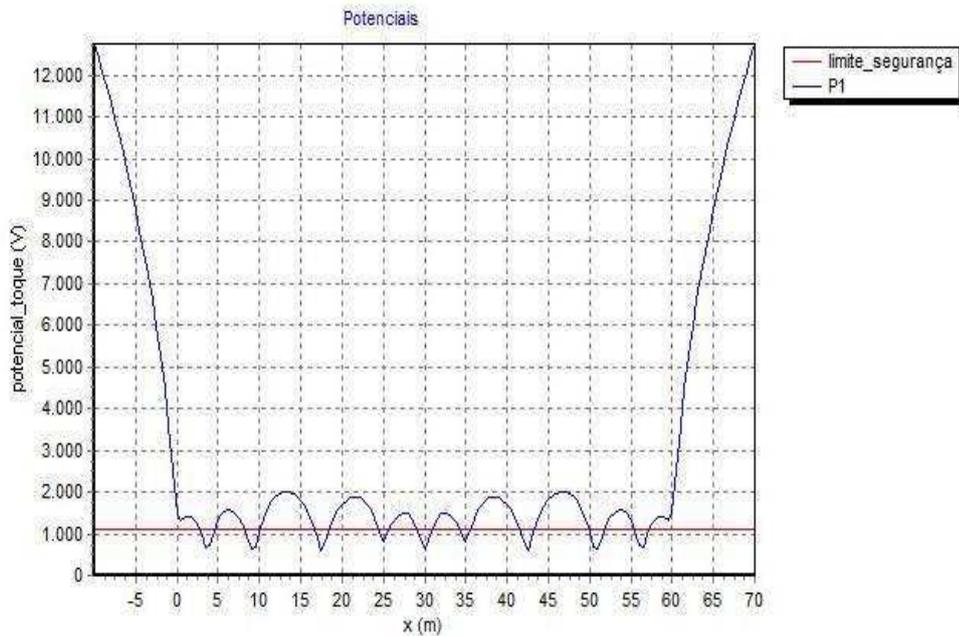


Figura 34 – Potencial de toque – hastes profundas (Solo fictício 3).

Os potenciais de toque nas extremidades da malha tiveram uma redução de aproximadamente 27% em comparação com o resultado da Figura 25.

4.3 AUMENTO DA ÁREA DA MALHA DE ATERRAMENTO

Outra técnica utilizada para melhoria do sistema de aterramento é de aumentar a área da malha de terra adicionando hastes e cabos em paralelo. Foram adicionadas 57 hastes de 2,4 m de comprimento a malha original, com isso a área da malha de terra ampliada ficou com dimensões de 90 m x 60 m, totalizando uma área de 5400 m².

4.3.1 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 1

Com essa configuração de malha, a resistência de aterramento simulada foi de 14,57 Ω , obtendo uma redução de aproximadamente 35% no valor de resistência de aterramento com essa técnica. O máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito foi de 71.029 V, mostrada na Figura 35, reduzindo em aproximadamente 30% em relação a malha original.

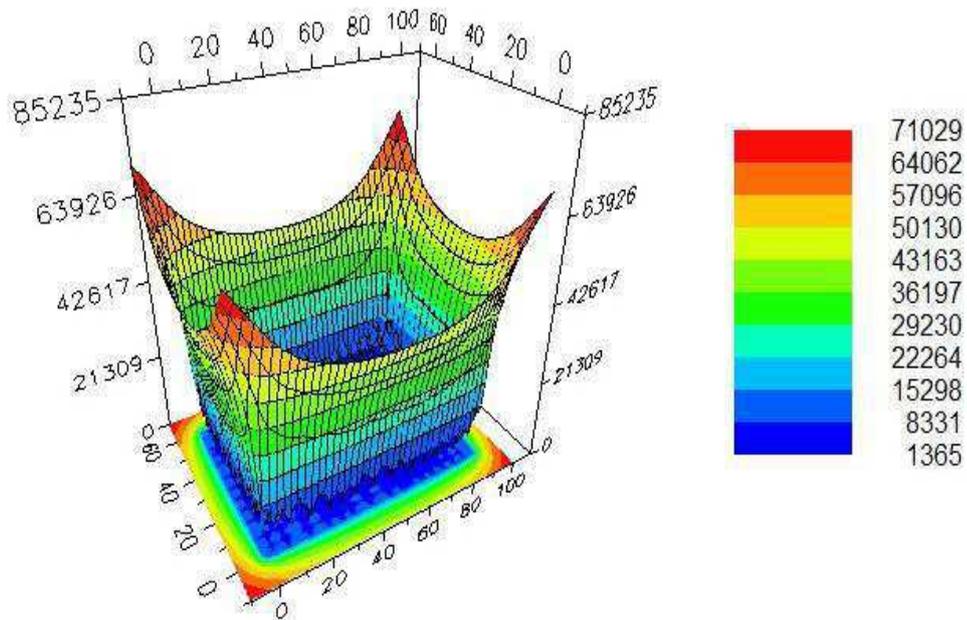


Figura 35 – Potencial 3d – Hastes profundas (Solo fictício 1).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 36 e 37, respectivamente.

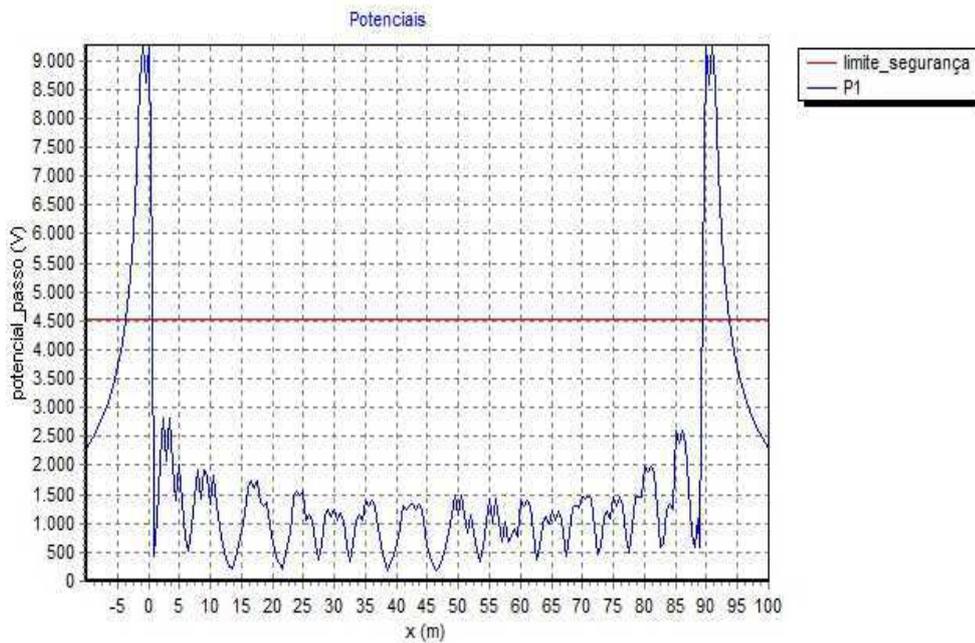


Figura 36 – Potencial de passo – hastes profundas (Solo fictício 1).

Analisando a Figura 36, verifica-se uma redução nos potenciais de nas extremidades da malha de aterramento de aproximadamente 42% em comparação com o resultado da Figura 18.

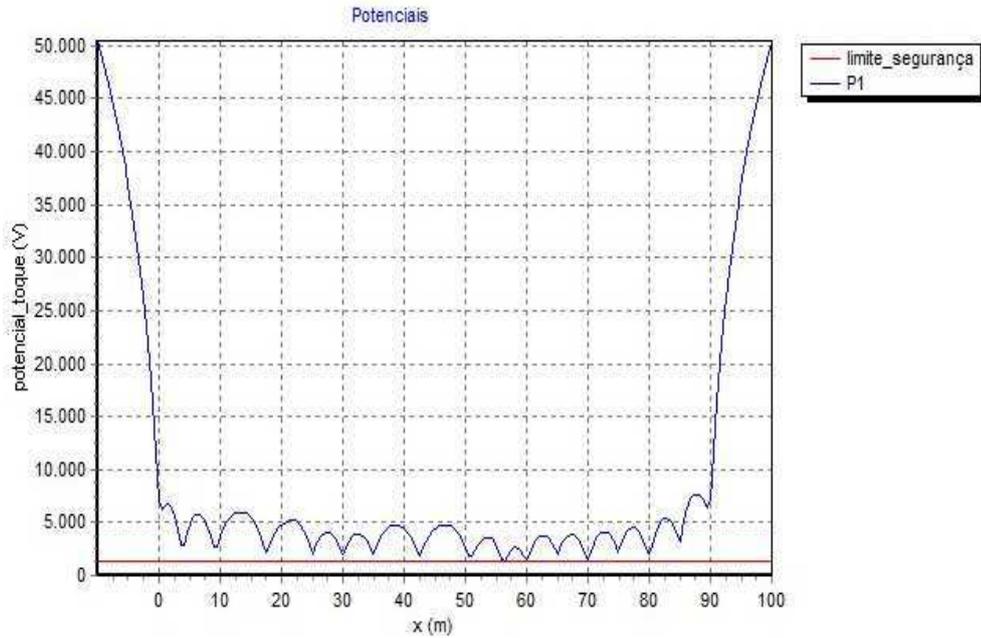


Figura 37 – Potencial de toque – Malha ampliada (Solo fictício 1).

Os potenciais de toque nas extremidades da malha tiveram uma redução de aproximadamente 33% em comparação com o resultado da Figura 19.

4.3.2 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 2

Usando a mesma configuração de solo com resistividade da primeira camada $\rho_1 = 700 \Omega.m$ e espessura $e_1 = 2,5 m$ e resistividade da segunda camada $\rho_2 = 1000 \Omega.m$. Nessa configuração o valor simulado de resistência de aterramento foi de $5,60 \Omega$ reduzindo seu valor em aproximadamente 25% em relação a malha original. O máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito foi de 25.860, mostrada na Figura 38, reduzindo em aproximadamente 30% em relação à malha original.

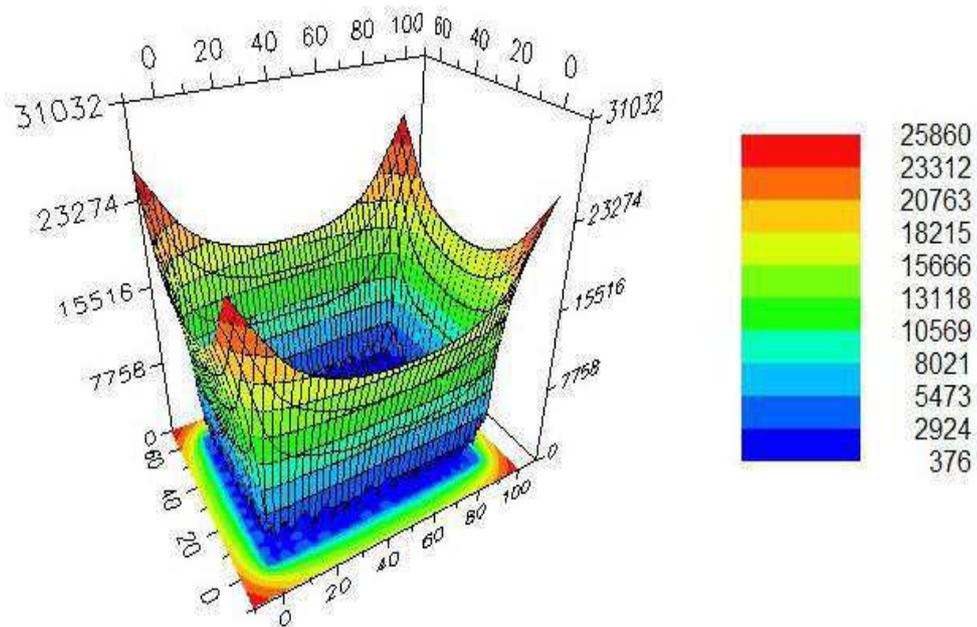


Figura 38 – Potencial 3d – Malha ampliada (Solo fictício 2).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 39 e 40, respectivamente.

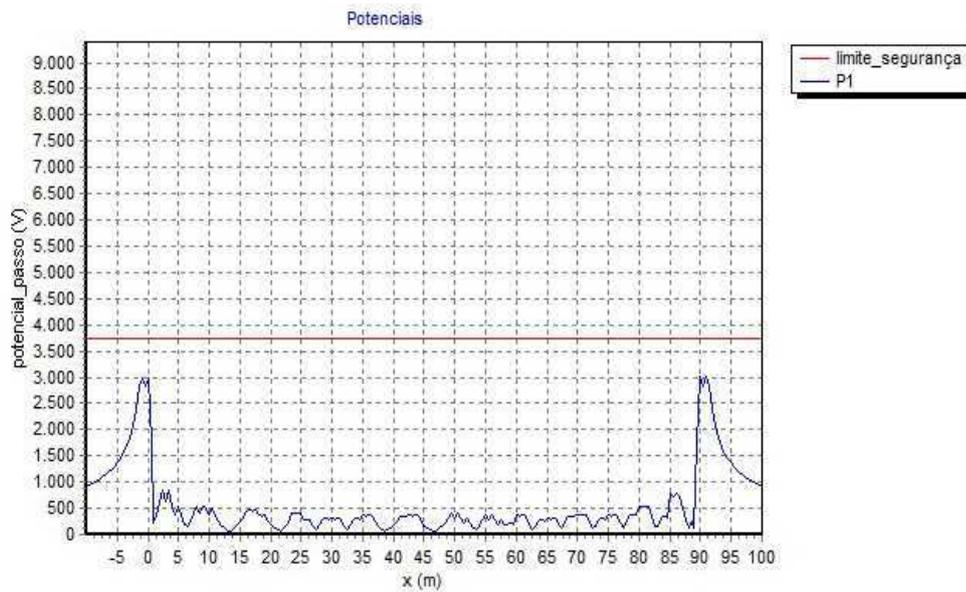


Figura 39 – Potencial de passo – Malha ampliada Solo fictício 2).

Analisando a Figura 34, verifica-se uma redução nos potenciais nas extremidades da malha de aterramento de aproximadamente 10% em comparação com o resultado da Figura 21.

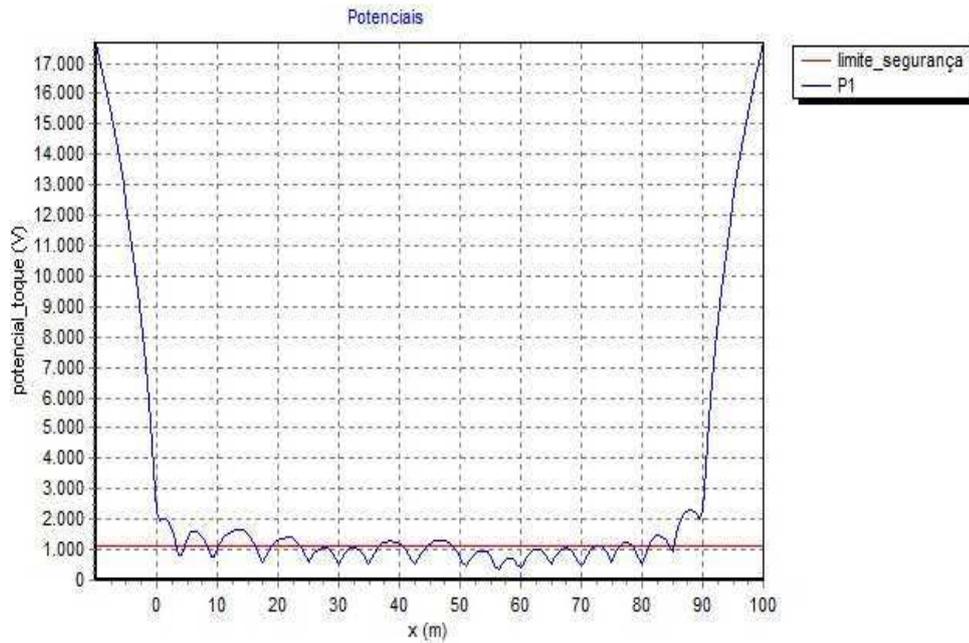


Figura 40 – Potencial de toque – Malha ampliada (Solo fictício 2).

Os potenciais de toque nas extremidades da malha tiveram uma redução de aproximadamente 32% em comparação com o resultado da Figura 22.

4.3.3 ANÁLISE DE POTENCIAIS DA MALHA DE TERRA NO SOLO FICTÍCIO 3

Usando a mesma configuração de solo com resistividade da primeira camada $\rho_1 = 800 \Omega.m$ e espessura $e_1 = 2,5$ m e resistividade da segunda camada $\rho_2 = 400 \Omega.m$. Nessa configuração o valor simulado de resistência de aterramento foi de $1,83 \Omega$, reduzindo seu valor em aproximadamente 50% em relação a malha original. O máximo potencial da malha, no momento de um curto-circuito foi de 14.543 V, mostrada na Figura 41, reduzindo em aproximadamente 32% em relação a malha original.

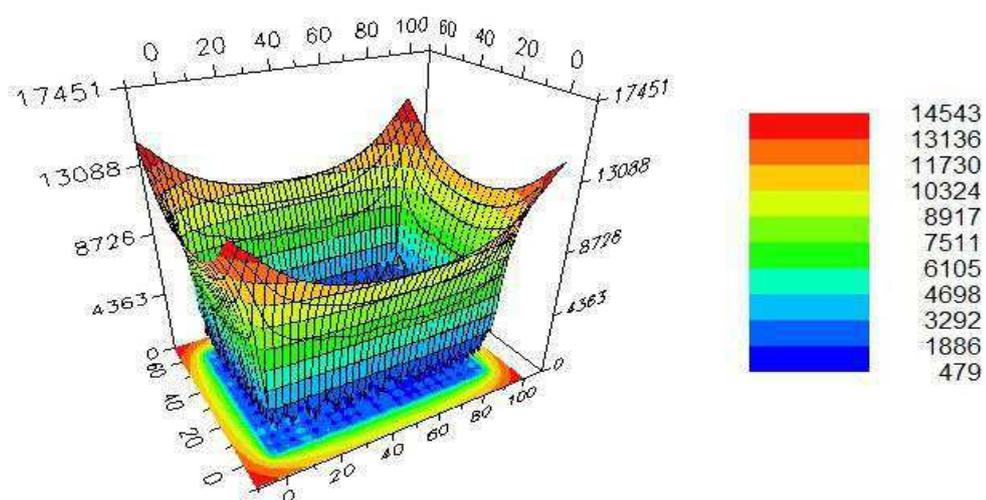


Figura 41 – Potencial 3d – Malha ampliada (Solo fictício 3).

Os potenciais de passo e toque estão representados nas Figuras 42 e 43, respectivamente.

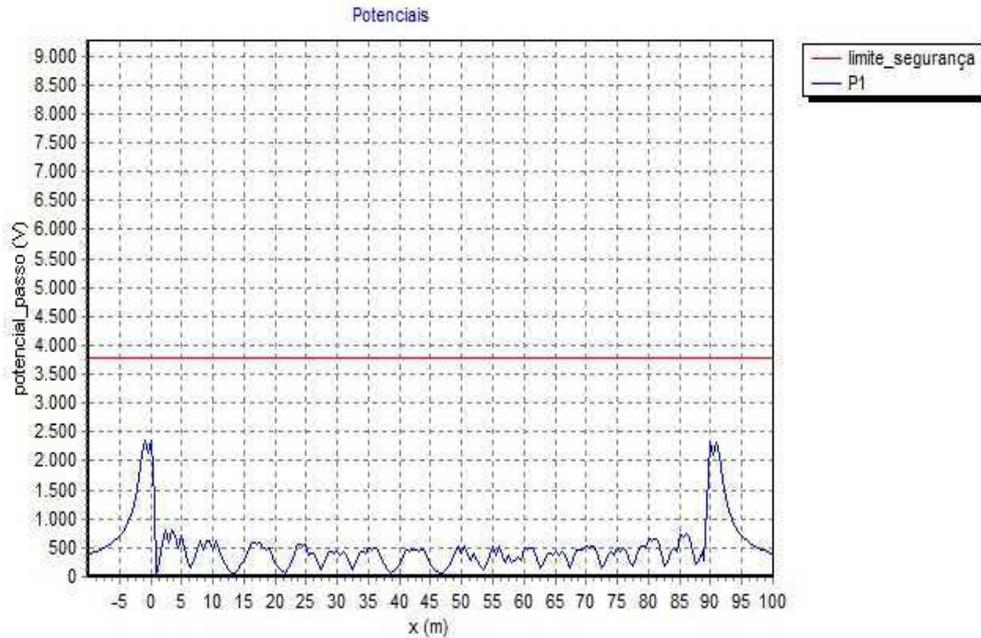


Figura 42 – Potencial de passo – Malha ampliada (Solo fictício 3).

Analisando a Figura 37, verifica-se uma redução nos potenciais nas extremidades da malha de aterramento de aproximadamente 29% em comparação com o resultado da Figura 24.

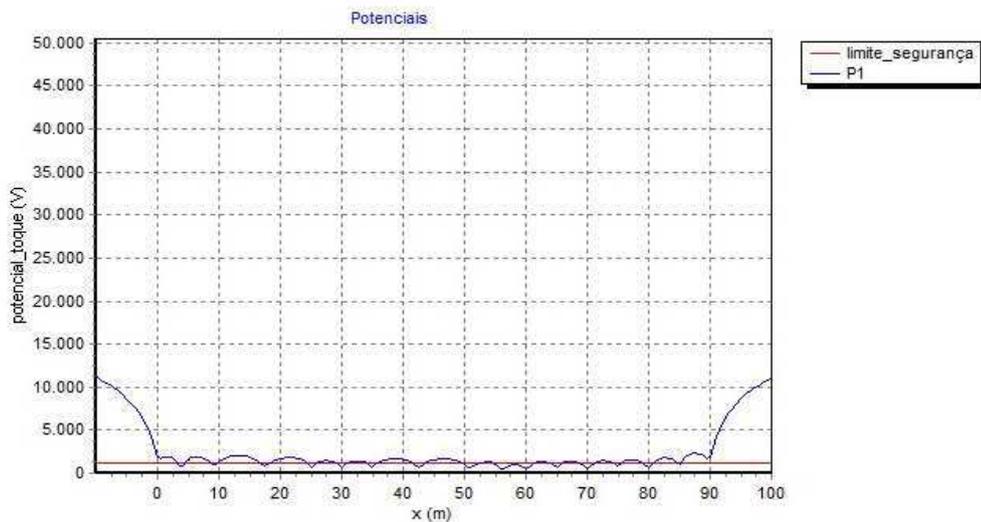


Figura 43 – Potencial de toque – Malha ampliada (Solo fictício 3).

Os potenciais de toque nas extremidades da malha tiveram uma redução de aproximadamente 31% em comparação com o resultado da Figura 25.

5 CONCLUSÃO

O dimensionamento adequado de um sistema de aterramento é necessário para um bom desempenho e segurança nos projetos de subestações. Para tanto, a avaliação minuciosa do sistema de aterramento é de extrema importância para os equipamentos contidos na subestação e pessoas que trabalham na mesma.

A avaliação do desempenho de um sistema de aterramento de uma subestação é feito através da análise dos potenciais da malha, considerando-se a ocorrência de uma falta para a terra, e de sua resistência de aterramento.

Os resultados das simulações dos potenciais de toque e passo na malha de aterramento da subestação em diferentes tipos de configuração de solo comprovam que o mesmo tipo de malha de terra não é adequado para qualquer configuração de solo.

A malha de terra proposta para no solo fictício 1 não se mostrou eficaz devido a alta resistividade do solo dessa região, resultando numa resistência de aterramento acima do valor recomendado por norma. No entanto, nas outras configurações de solo a malha de terra apresenta resistência de aterramento abaixo do valor recomendado por norma.

O aumento da profundidade das hastes nas extremidades da malha de terra apresentou resultados satisfatórios em configurações de solo em que a resistividade da primeira camada é menor que a resistividade da segunda camada e também para solos homogêneos. Essa mesma técnica de melhoria não é tão eficaz para configurações de solo onde a resistividade da primeira camada é maior que a da segunda camada, comprovando o que está escrito na literatura sobre aterramento.

Com o aumento da área da malha de terra, a resistência de aterramento teve uma redução significativa em todas as configurações de solos proposta neste trabalho. No entanto, essa técnica não pode ser amplamente utilizada em subestações localizadas em regiões urbanizadas, devido ao fato de não haver espaço para essa ampliação.

Os potenciais elétricos na região da malha de aterramento tiveram uma redução com a aplicação das técnicas mostradas no trabalho devido a redução da resistência de aterramento.

Para a elevada corrente de curto circuito considerada, em algumas configurações de solo os potenciais de toque não ficaram abaixo do limite de segurança, mesmo estando o valor de resistência de aterramento abaixo do valor recomendado por norma.

Ficou demonstrado que no projeto da malha de aterramento de uma subestação, a configuração do solo é de extrema importância, não podendo o mesmo projeto de malha de aterramento ser aplicado em qualquer configuração de solo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ABNT:NBR 5419 (2001): Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.
- [2] ABNT:NBR 7117 (2012): Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.
- [3] ABNT:NBR 13571 (1996): Haste de aterramento aço-cobreada e acessórios.
COSTA, E. G.; NERI, M. G. G. Relatório Técnico – Medição e Análise de Resistência do Sistema de Aterramento. 2006. LAT- UFCG/ATECEL.
- [4] VISACRO, S. F. Aterramentos Elétricos. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2002.
- [5] KINDERMANN, G. Aterramento Elétrico. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 2002.
- [6] MAMEDE, J. F. Instalações Elétricas Industriais. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- [7] Avaliação de Potenciais no Solo Devido a Impulsos de Corrente em Malhas de Aterramento.F. J. L. Araújo, J. M. C. L. da Silva, G. V. de Andrade Jr., G. R. S. Lira, E. G. da Costa e S. A. G. Nóbrega Neto
- [8].ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6533**
Estabelecimento de Segurança aos Efeitos da Corrente Elétrica Percorrendo
Corpo Humano - especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 1981.
- [9] Revista o Setor elétrico.
- [10] Manual do TecAt Plus 5.2.

