

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

MATHEUS PINTO COSTA

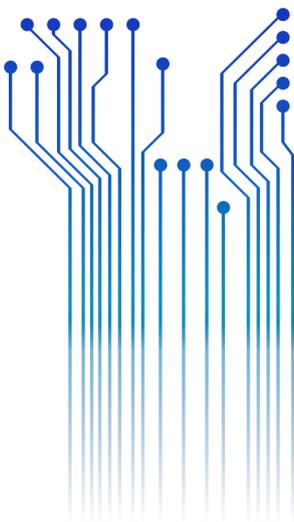


Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
MALHAS DE ATERRAMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE IMPLANTADA E
SIMULAÇÃO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande
2016

MATHEUS PINTO COSTA

MALHAS DE ATERRAMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE IMPLANTADA E SIMULAÇÃO

*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:

Professor Genoilton João de Carvalho Almeida, M. Sc.

Campina Grande
2016

MATHEUS PINTO COSTA

MALHAS DE ATERRAMENTO: COMPARAÇÃO ENTRE IMPLANTADA E SIMULAÇÃO

*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, pela força e coragem que foi dada ao longo de toda essa caminhada.

Aos meus pais, Ricardo e Norma, que me deram a vida e me ensinaram a vivê-la com dignidade.

A minha família, por sempre se fazerem presentes.

Aos meus amigos de longas datas, por sempre me darem apoio em todos os momentos em que precisei.

Aos amigos da graduação, por sonharem esse sonho comigo.

A todo pessoal do LAT, pelas infindáveis discussões sobre os temas tratados.

Ao meu orientador, Genoilton João de Carvalho Almeida, pela paciência na orientação, e toda instrução que foi dada para a elaboração deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos, que de alguma forma contribuíram para a minha formação.

*“Nas grandes batalhas da vida,
O primeiro passo para a vitória
É o desejo de vencer. ”*

Mahatma Gandhi

RESUMO

Os sistemas de aterramento têm um papel importante, principalmente quando se leva em conta a segurança de seres vivos e equipamento ligados as linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica. Com a finalidade de facilitar o trabalho dos projetistas de sistemas de aterramento, vários *softwares* apresentam ferramentas computacionais para auxiliar o engenheiro na elaboração do projeto de sistemas de aterramento, um deles é o TecAt Plus 5.2[®]. Esse trabalho tem o objetivo de constatar a precisão da simulação do *software* em questão, com a malha implantada. Para isso foi feita a simulação de uma malha de aterramento, utilizando o TecAt Plus 5.2[®], e posteriormente foi feita a construção dessa malha. Com os resultados obtidos pela simulação e medição da malha, conclui-se que o *software* é bastante eficaz no projeto de aterramento.

Palavras-chave: Sistemas de aterramento, *software* TecAt Plus 5.2[®], Segurança pessoal.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	8
1.1	Objetivos.....	9
1.2	Estrutura do trabalho.....	9
2	Fundamentação Teórica.....	10
2.1	Introdução ao Sistema de Aterramento.....	10
2.1.1	Introdução Geral.....	10
2.1.2	Resistividade do Solo.....	11
2.1.3	Influência da Estratificação.....	12
2.1.4	Sistemas de Aterramento.....	13
2.1.5	Eletrodos de Aterramento.....	14
2.2	Método de Wenner.....	14
2.3	Potenciais de Segurança.....	18
2.3.1	Potencial de Passo.....	20
2.4	Medição de Resistência de Aterramento.....	22
3	Materiais e Métodos.....	26
3.1	Medição da Resistividade do Solo.....	26
3.1.1	Material Utilizado.....	26
3.1.2	Método de Medição.....	27
3.2	Construção da Malha de Aterramento.....	28
3.2.1	Material Utilizado.....	28
3.2.2	Método de Construção.....	29
3.3	Medição do Potencial na Superfície da Malha.....	29
3.3.1	Materiais Utilizados.....	29
3.3.2	Método de Medição.....	30
3.4	Medição do Potencial de Passo.....	30
3.4.1	Material Utilizado.....	30
3.4.2	Método de Medição.....	31
3.5	Medição de Resistência de Aterramento.....	32
3.5.1	Material Utilizado.....	32
3.5.2	Método de Medição.....	32
4	Resultados e Análise.....	34
4.1	Medição de Resistividade do Solo.....	34
4.2	Medição de Resistência de Aterramento.....	36
4.3	Medição de Potencial de Passo.....	38
4.4	Medição de Potencial na Superfície.....	40
5	Conclusão.....	43
	APÊNDICE A.....	46

1 INTRODUÇÃO

Um sistema de aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Os principais objetivos desta ligação são assegurar a segurança pessoal, prevenir danos a equipamentos instalados, permitir a operação automática, rápida e segura do sistema de proteção, estabelecer um ponto de tensão de referência para todo o sistema elétrico interligado, como também fornecer um caminho de baixa impedância para correntes oriundas de descargas atmosféricas, de curtos-circuitos e de cargas estáticas acumuladas nas carcaças dos equipamentos, além das correntes elétricas decorrentes do desbalanço de cargas alimentadas pela fonte de tensão (MORENO e COSTA, 1999).

O sistema de aterramento é composto de: Eletrodos de aterramento, conexões entre esses eletrodos e o solo que os envolvem. O eletrodo se constitui de qualquer corpo metálico enterrado no solo. A disposição geométrica dos eletrodos no solo, assim como, a própria forma varia de acordo com a aplicação desejada. As hastes verticais são as mais utilizadas, pelo fato de atingir as camadas mais profundas do solo e também por serem de fácil cravação. Hastes horizontais são utilizadas quando a preocupação é o controle do gradiente de potencial na superfície do solo.

Para projetar adequadamente o sistema de aterramento deve-se seguir as seguintes etapas: definir o local do aterramento, providenciar várias medições no local, fazer a estratificação do solo nas suas respectivas camadas, definir o tipo de sistema de aterramento desejado, calcular a resistividade aparente do solo para o respectivo sistema de aterramento e dimensionar o sistema de aterramento levando em conta a sensibilidade dos relés e os limites de segurança pessoal, isto é, da fibrilação ventricular do coração (KINDERMANN, 1995).

Em uma malha adequadamente dimensionada, os potenciais que surgem na superfície, quando da ocorrência da máxima corrente de falta à terra, são inferiores aos máximos potenciais de passo e toque que um ser humano pode suportar sem ocorrência de fibrilação ventricular. Além disso, deve ser dimensionado os condutores da malha, de forma a suportarem os esforços mecânicos e térmicos a que estarão sujeitos ao longo de sua vida útil. Deve-se ressaltar que o dimensionamento de uma malha de terra é um

processo interativo. Parte-se de uma malha inicial e verifica-se se os potenciais na superfície 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 obter as condições exigidas. (PINTO, 2015)

O TecAt Plus 5.2 é um software que auxilia o projetista do sistema de aterramento, dentre outras funções o software realiza a estratificação da resistividade do solo, o cálculo da resistência da malha, cálculo dos potenciais de toque e passo e a listagem dos materiais.

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista a importância de um bom sistema de aterramento e também o grande número de profissionais da área que usam o TecAt Plus 5.2, este trabalho tem como finalidade comprovar a precisão dos resultados da simulação, com as medições da malha implantada.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 Capítulos. No Capítulo 1, é feita uma introdução ao tema, e os objetivos que o trabalho busca alcançar. Posteriormente, Capítulo 2, é feita uma revisão bibliografia que abrange os sistemas de aterramentos elétricos. Em seguida, no Capítulo 3, é apresentado a metodologia de construção da malha de aterramento e os métodos de medição de resistência e potenciais da malha. No Capítulo 4, é mostrada a simulação da malha implantada, utilizando o software TecAt Plus 5.2[®], e os resultados medidos na malha implantada. O trabalho é finalizado no Capítulo 5, apresentando as conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os aspectos teóricos que deram suporte ao estudo. O texto a seguir é resultado de uma revisão bibliográfica a respeito do tema, com enfoque no projeto de malhas de aterramentos.

2.1 INTRODUÇÃO AO SISTEMA DE ATERRAMENTO

2.1.1 INTRODUÇÃO GERAL

Para que um sistema elétrico opere corretamente, com uma rápida atuação do sistema de proteção, com uma adequada continuidade de serviço e garantido a segurança de pessoas e animais, é necessário um bom sistema de aterramento. Para obter um bom sistema de aterramento é preciso gastar tempo no planejamento (projeto) e tomar alguns cuidados com o mesmo. Estes cuidados vão desde a parte de medição de resistividade do solo, até a consideração das piores condições possíveis que o sistema poderá ser submetido.

Os principais objetivos do aterramento são:

- Manter os potenciais de passo e toque dentro dos limites de segurança;
- Dissipar as descargas atmosféricas na terra;
- Estabelecer uma tensão de referência ao sistema;
- Sensibilizar os equipamentos de proteção para o isolamento rápido das falhas a terra;
- Usar a terra como retorno de corrente no sistema monofásico (MRT).

Para garantir que todas essas funções sejam realizadas adequadamente, o sistema de aterramento deve apresentar algumas características:

- Baixo valor de resistência;
- Controle do gradiente de potencial;
- Capacidade de condução.

O valor ideal de uma resistência de aterramento dificilmente é estabelecido, ele depende de vários fatores: aplicação, fatores técnicos e econômicos. Porém, na maioria dos casos, é desejado que a resistência de aterramento tenha o menor valor possível. Em subestações, por exemplo, essa resistência não deve ser superior a 5Ω .

Alguns fatores que influenciam no valor da resistência do sistema de aterramento são:

- Comprimento das hastes;
- Diâmetro das hastes;
- Resistividade do solo;
- Disposição geométrica dos eletrodos.

Existem muitas maneiras de se aterrar um sistema, que varia de uma única haste fincada ao solo, até as mais complexas configurações geométricas das hastes e cabos. Para a elaboração do projeto da malha de aterramento é necessário o conhecimento do solo, assim como da sua resistividade elétrica.

2.1.2 RESISTIVIDADE DO SOLO

Para elaborar um bom projeto de malha de aterramento, é necessário ter o conhecimento das características do solo, principalmente da sua resistividade elétrica.

A resistividade do solo é dada pela resistência medida entre duas faces de um cubo, homogêneo, com aresta de um metro, a sua unidade é o ohm.metro. Vários fatores influenciam a resistividade do solo, segundo Kindermann (1995):

- Tipo de solo;
- Mistura de diversos tipos de solo;

- Solo constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Compactação e pressão;
- Composição química dos sais dissolvidos na água retida;
- Concentração de sais dissolvidos na água retida.

Todas essas combinações resultam em solos com características de resistividades distintas, logo solos aparentemente iguais podem apresentar resistividades diferentes.

Na tabela a seguir vemos a variação das resistividades para solo de naturezas diferentes.

Tabela 1 – Tipos de Solo e Respectiva Resistividade

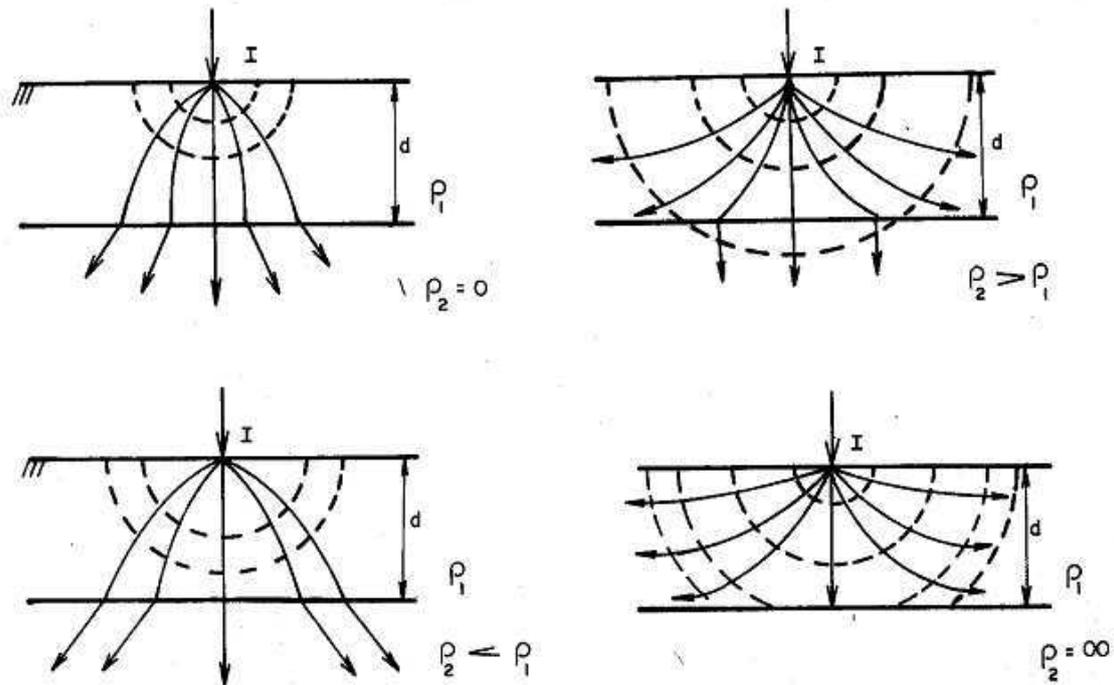
Tipo de solo	Resistividade ($\Omega.m$)
Lama	5 a 10
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1.500 a 5.000
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1.300
Areia seca	3.000 a 8.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000

Fonte: KINDERMANN,1995, p.3.

2.1.3 INFLUÊNCIA DA ESTRATIFICAÇÃO

Os solos, na maioria dos casos, não são homogêneos, sendo compostos de várias camadas de resistividades e profundidades diferentes. Essas camadas são horizontais e paralelas ao solo. Por causa dessa variação de resistividade das camadas do solo, há também uma variação na dispersão de corrente no solo. A Figura 1 mostra o comportamento da dispersão da corrente em solos heterogêneos, ao redor do aterramento.

Figura 1 - Estratificação do solo em duas camadas



Fonte: KINDERMANN,1995, p.6.

2.1.4 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O sistema de aterramento deve garantir a melhor ligação com a terra, sendo assim, os principais tipos são:

- Uma haste cravada no solo;
- Hastes em linha;
- Hastes em triângulo;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculos;
- Hastes em matriz (malha de terra).

A escolha do sistema de aterramento vai depender de alguns fatores, tais como: aplicação, custo, local. O sistema mais eficiente é a malha terra.

2.1.5 ELETRODOS DE ATERRAMENTO

Um eletrodo se constitui em qualquer corpo metálico enterrado no solo, podendo ser natural ou convencional. O natural é um elemento condutor ligado a terra, cuja a finalidade original não é a de aterramento, mas que se comporta como um eletrodo de aterramento. O convencional é instalado para este fim, como as hastes verticais, cabo de cobre Nu, etc.

O material do qual as hastes são feitas devem seguir algumas características, tais como: ser um bom condutor de eletricidade, ser um material inerte às ações de ácidos e sais presentes no solo, ter uma resistência mecânica compatível com a cravação e movimentação do solo e deve sofrer a menor ação possível da corrosão galvânica.

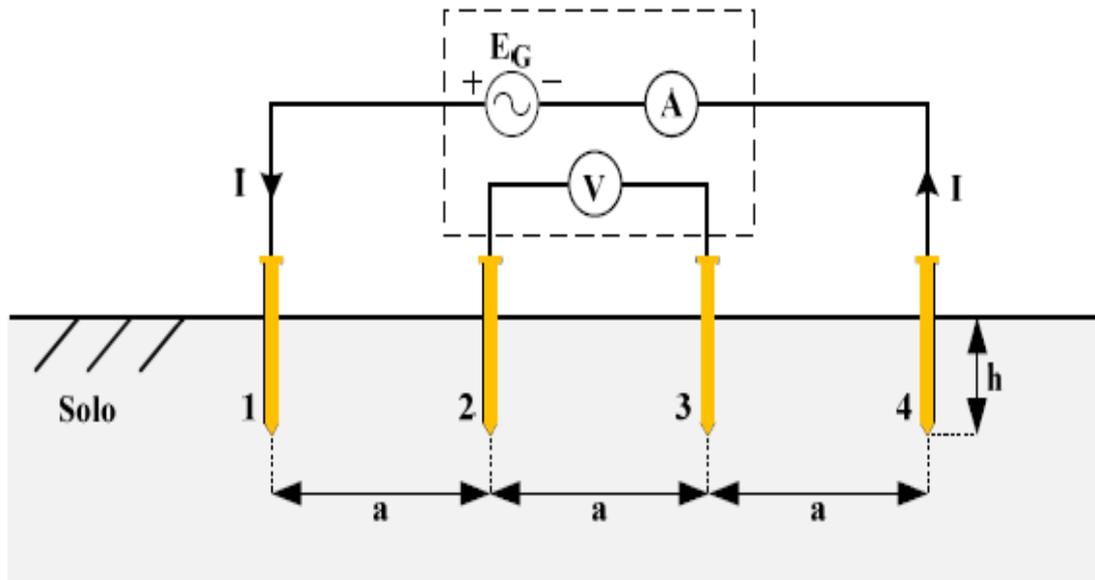
Os tipos mais comuns de eletrodos convencionais são:

- **Tipo *Copperweld***: é uma 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.

2.2 MÉTODO DE WENNER

O método de *Wenner* foi criado pelo físico Frank Wenner, esse método consiste em cravar quatro hastes no solo, espaçadas igualmente numa mesma linha por uma distância a , e uma profundidade h . Com o intuito de se obter a resistividade das diversas camadas que compõem o solo. Na figura 2 é mostrado o esquema de disposição das hastes no método de *Wenner*.

Figura 2 - Disposição das hastes no método de Wenner.



Fonte: DIAS, 2011, p.7.

Uma corrente I é injetada na haste 1, e essa percorre pelo solo até a haste 4. Essa corrente elétrica produz uma diferença de potencial entre as hastes 2 e 3. Com valor de corrente injetada e diferença de potencial nos pontos 2 e 3, calcula-se o valor da resistência elétrica do solo, R . Com o valor de R , calcula-se a resistividade elétrica do solo, a partir da equação 1.

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

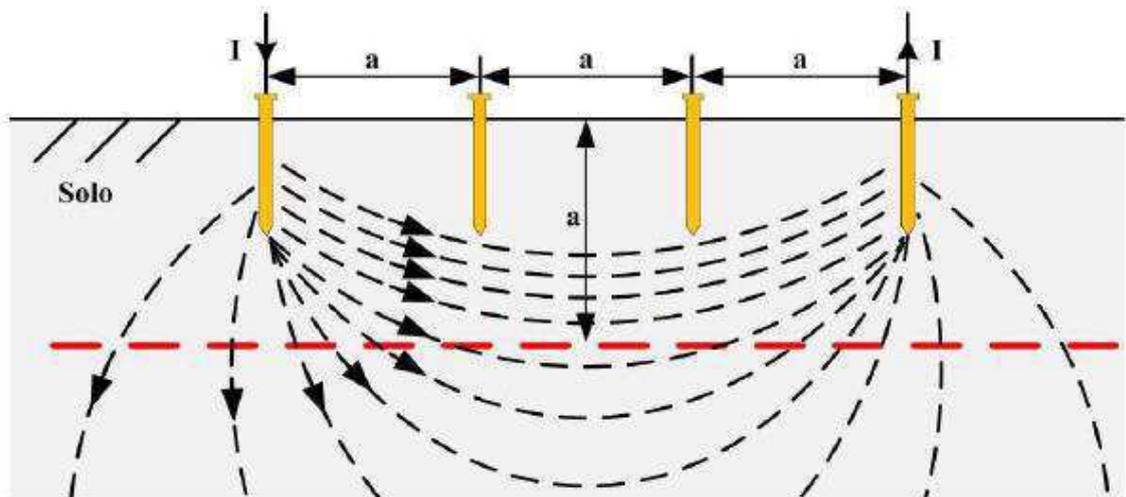
A equação 1 se reduz a equação 2, quando o afastamento das hastes é relativamente grande em relação a profundidade, ou seja $a > 20h$.

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R [\Omega \cdot m]. \quad (2)$$

Devido a heterogeneidade do solo, para se obter a resistividade do mesmo é necessário efetuar vários grupos de medições, alterando o espaçamento a e cobrindo toda a área de interesse. Assim serão obtidos valores de resistividades distintas para cada valor de a utilizado. Segundo a NBR 7117 - 2012 a linha de medição deve ser prospectada a partir de uma distância de 1m e prosseguir, se possível, em potência de 2, a saber: 1 ,2 ,4 ,8 ,16, 32, 64 m etc. Podem ser utilizadas distancias intermediarias entre os eletrodos.

O método considera que praticamente 58% da distribuição de corrente que passa entra as hastes externas ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento entre as hastes. Como mostrado na Figura 4. A corrente atinge profundidade maior, com uma correspondente área de dispersão grande, tendo, em consequência, um efeito que pode ser desconsiderado. Portanto, para efeito do Método de *Wenner*, considera-se que o valor da resistência elétrica lida no aparelho é relativo a uma profundidade a do solo. (KINDERMANN, 1995)

Figura 3 - Distribuição de corrente pela profundidade a .



Fonte: DIAS, 2011, p.9.

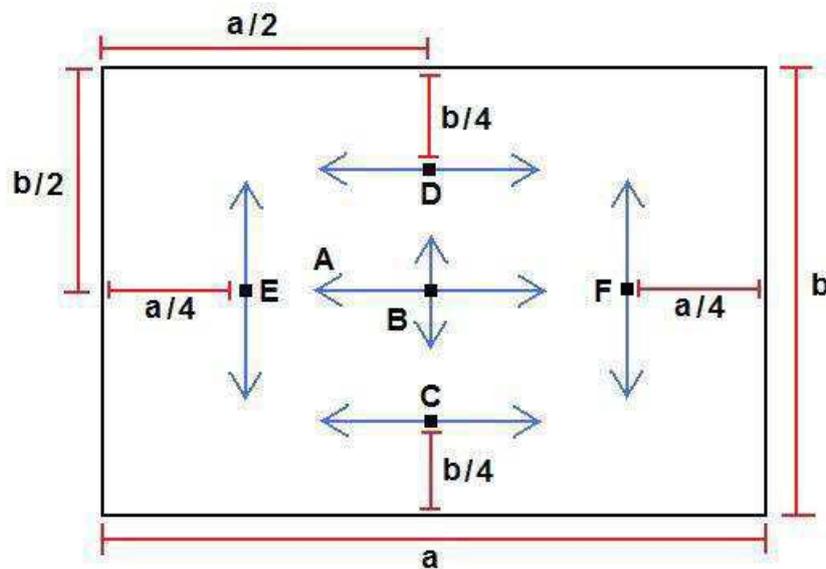
A localização dos pontos e das medições depende da geometria da área e das características locais. O número mínimo de linhas de medição, bem como os croquis recomendados para medições em áreas retangulares são apresentados na Tabela 2 (NBR 7117, 2012).

Tabela 2 - Área do terreno e número mínimo de linhas de medição.

Área do terreno (m ²)	Número mínimo de linhas de medição	Croquis para linhas de medição
$S \leq 1000$	2	Linhas A, B (Figura 4)
$1\ 000 < S \leq 2\ 000$	3	Linhas A, E, F (Figura 4)
$2\ 000 < S \leq 5\ 000$	4	Linhas C, D, E, F (Figura 4)
$5\ 000 < S \leq 10\ 000$	5	Linhas B, C, D, E, F (Figura 4)
$10\ 000 < S \leq 20\ 000$	6	Linhas A, B, C, D, E, F (Figura 4)

Fonte: ABNT NBR 7117:2012.

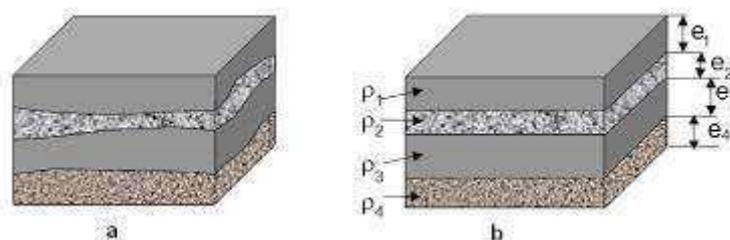
Figura 4 - Ilustração de medição de resistividade do solo



Fonte: DIAS, 2011, p.9

Com os dados das medições é possível traçar o gráfico da resistividade elétrica do solo em função do espaçamento entre as hastes. A curva apresentará comportamento diferente para solos distintos. Com essa curva traçada pode-se fazer a sua modelagem, estratificando o solo em camadas horizontais. Cada camada com uma altura e e uma resistividade ρ , como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Solo real (a) e Solo estratificado (b).



Fonte: ABNT/CB-03/1º PROJETO DE REVISAO ABNT 7117

Quando os valores de resistividade obtidos pela estratificação do solo são muito altos, é normal fazer um tratamento químico do solo visando diminuir a resistividade do mesmo e, conseqüentemente a diminuição da resistência de aterramento. O tratamento químico do solo só deve ser feito quando o local destinado a o sistema de aterramento apresentar alta resistividade e não houver possibilidade de mudança de local. O tratamento também pode ser empregado quando já existe o aterramento no solo, com uma resistência fora da desejada, e não se pretende alterá-lo por alguma razão.

Segundo (KINDERMANN, 1995), os materiais a serem utilizados para um bom tratamento químico do solo devem ter as seguintes características:

- Boa higroscopia - reter umidade;
- Não ser corrosivo;
- Ter pH alcalino - não ser corrosivo;
- Baixa resistividade elétrica;
- Quimicamente estável no solo;
- Não ser tóxico;
- Não causar dano à natureza.

Bentonita, *Earthron* e Gel são exemplos de alguns produtos usados nos diversos tratamentos químicos do solo. Após realizado o tratamento químico do solo, deve ser feito um acompanhamento com medições periódicas para analisar o efeito do tratamento.

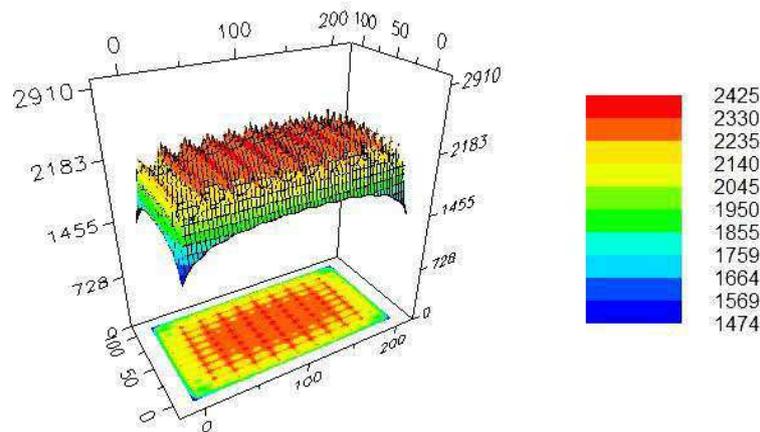
2.3 POTENCIAIS DE SEGURANÇA

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, em diversas situações, condições de risco (VISACRO, 2002).

Uma das funções da malha de aterramento é obter um baixo valor de resistência, provendo assim um caminho de baixa impedância para uma corrente de falta ou descarga atmosférica, porém, existem outras funções, umas delas é garantir que os máximos valores dos potenciais, gerados pela corrente de falta ou descargas

atmosféricas, sejam inferiores aos máximos potenciais que um ser humano pode suportar sem ocorrência de fibrilação ventricular do coração. A Figura 6 mostra a distribuição de potencial no interior e no entorno de uma malha de aterramento.

Figura 6 - Ilustração da distribuição de potencial no interior e no entorno de uma malha de aterramento retangular simples, em um solo heterogêneo.



Fonte: Próprio autor.

Segundo Dalziel (1941), 99,5% das pessoas com pelo menos 50kg, podem suportar a corrente elétrica determinada pela Equação 3, sem a ocorrência de fibrilação ventricular. Essa equação é utilizada para obter o limite aceitável de corrente, para que não ocorra a fibrilação, durante o tempo que a pessoa fica submetida a uma diferença de potencial.

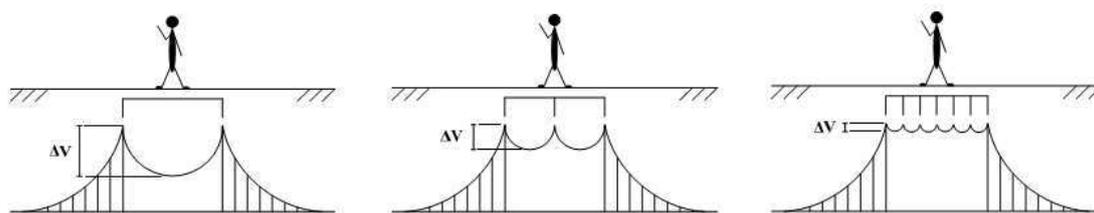
$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t}} [A] \quad (3)$$

Onde:

- I_{choque} - Corrente elétrica máxima, que passa pelo corpo, para não causar fibrilação.
- k - É uma constante relacionada a energia do choque tolerada por um percentual da população com uma determinada massa corpórea. IEEE-80 (2000) diz que para uma pessoa com 50 kg $k = 0116$, já para uma pessoa com 70 kg $k = 0,157$.
- t - Tempo da duração do choque.

Sendo assim, a malha de aterramento deve garantir que na região onde se encontram os equipamentos e pessoas, os valores dos potenciais gerados por uma corrente de falta ou descarga atmosférica estejam dentro dos limites aceitáveis. Um parâmetro importante no projeto das malhas de aterramento, para que os máximos valores de gradiente não sejam excedidos, é a dimensão das malhas básicas (i.e. reticulados), visto que, quanto maior for a malha básica, maior será a elevação de potencial no interior da malha (CUNHA, 2003). A Figura 7 ilustra a variação de potencial em relação a dimensão da malha básica.

Figura 7 – variação de potencial na malha básica.



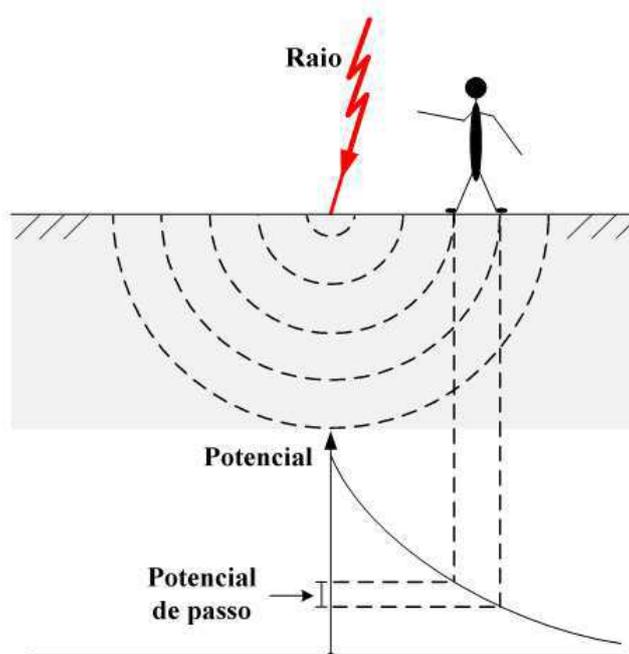
Fonte: DIAS, 2011, p.16.

As mais importantes diferenças de potenciais que são aplicadas ao ser humano, no interior de uma subestação, são denominadas de Potencial de Toque, Potencial de Passo e Potencial de Transferência, conforme mencionadas em IEEE-81.2 (1991) e IEEE-80 (2000). Contudo, neste trabalho será evidenciado apenas os assuntos referentes ao Potencial de Passo (DIAS, 2011).

2.3.1 POTENCIAL DE PASSO

Potencial de passo é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos, situados no chão, a distância de 1m, para pessoas, devido a passagem de uma elevada corrente, proveniente de um curto-circuito ou descarga atmosférica, pelo sistema de aterramento. Isso acontece quando os pés se encontram em linhas equipotenciais diferentes. Logicamente, se os pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial ou a pessoa estiver apoiada em um só pé, não haverá tensão de passo. A Figura 8 ilustra o potencial de passo devido a ocorrência de uma descarga atmosférica diretamente no solo.

Figura 8 – potencial de passo devido a ocorrência de uma descarga atmosférica.

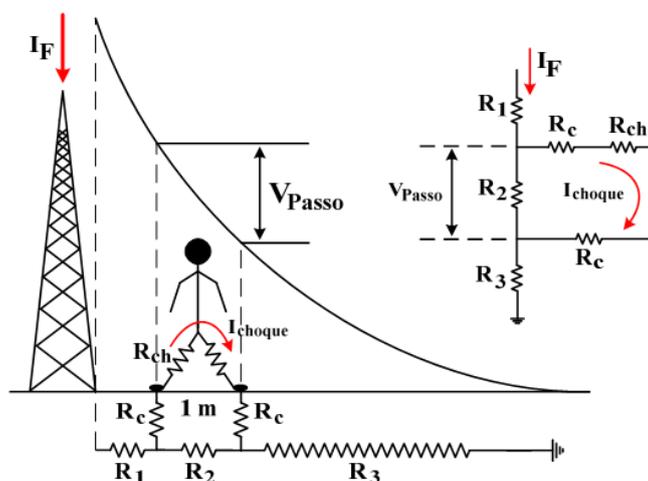


Fonte: DIAS, 2011, p.18.

O potencial de passo não é tão perigoso quanto o potencial de toque, posto que o caminho da corrente elétrica, através do corpo do indivíduo, não inclui, necessariamente, o coração (CAVALCANTI, 1991; SOUZA JÚNIOR, 2007).

Na Figura 9 é mostrado um esquema de como obter a expressão do potencial de passo, em relação a corrente de choque.

Figura 9 – esquema do potencial de passo.



Fonte: DIAS, 2011, p.19.

- R_{ch} – Resistência do corpo humano, que é considerada de 1,0 k Ω , conforme mencionado em IEEE-81.2 (1991) e IEEE-80 (2000).
- R_c – Resistência de contato que pode ser considerada igual a $3\rho_s$ (resistividade superficial do solo), conforme citado em IEEE-80 (2000).
- R_1, R_2 e R_3 – Resistências dos trechos de terra.
- I_{choque} – Corrente que percorre o corpo humano.

Analisando o esquema acima, a expressão do potencial de toque pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_{Passo} = (R_{ch} + 2R_c) I_{choque} [V] \quad (4)$$

Substituindo (3) em (4) obtém-se uma expressão para o potencial de passo máximo permissível para não causar fibrilação ventricular.

$$V_{Passo\ máximo} = (1000 + 6\rho_s) \frac{k}{\sqrt{t}} [V]. \quad (7)$$

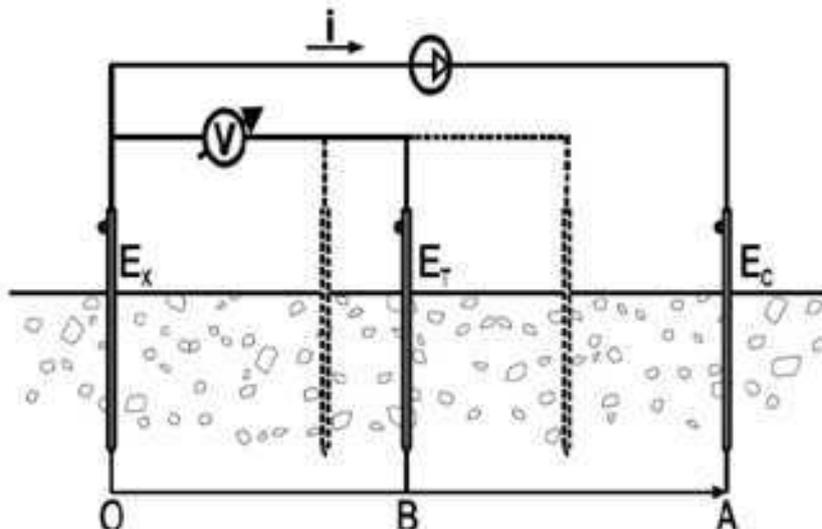
Na prática, os valores medidos devem ser menores do que os determinados pelos limites de segurança.

2.4 MEDIÇÃO DE RESISTENCIA DE ATERRAMENTO

O método, também conhecido por Método da Queda de Potencial (MQP), consiste em medir a resistência do aterramento em função da queda de potencial usado nu, eletrodo auxiliar. O método é constituído por um eletrodo auxiliar de corrente, um eletrodo auxiliar de potencial e o aterramento a ser medido (malha de aterramento). Conforme esquematizado na Figura 10. A medição da resistência de terra pode ser

realizada utilizando-se um amperímetro e um voltímetro ou, diretamente através do terrômetro (MAMEDE FILHO, 1997).

Figura 10 – Esquema do MQP



FONTE: <http://www.faw7.com.br/Arquivos/Aterramento//12.png>

Neste método, se faz circular uma corrente na malha de aterramento pelo eletrodo auxiliar de corrente, e mede-se o potencial entre a malha de aterramento e o eletrodo auxiliar de potencial. Com o valor de potencial medido e corrente injetada na malha tem-se o valor da resistência elétrica do aterramento, referente a distância entre a malha e o eletrodo auxiliar de potencial, através da Equação 8.

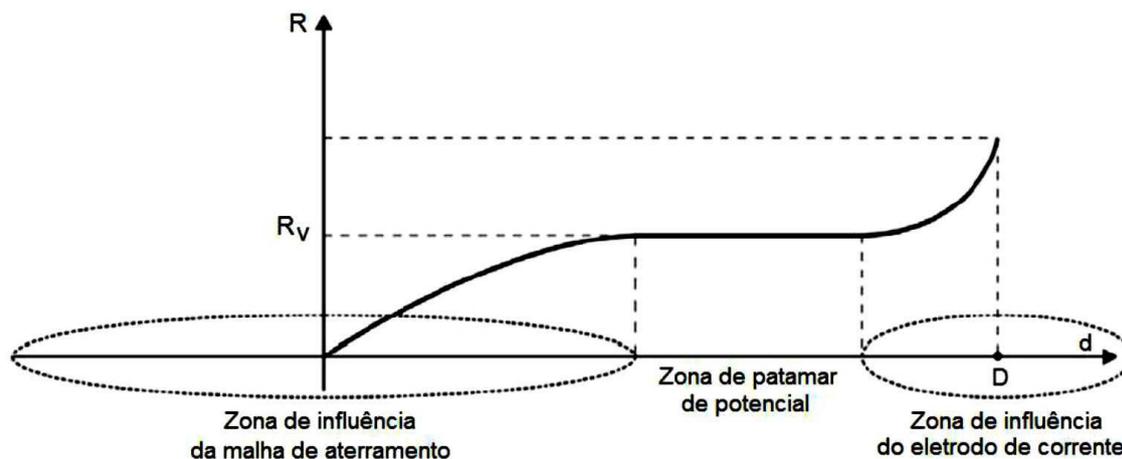
$$R = \frac{V}{I} \text{ } [\Omega]. \quad (5)$$

O eletrodo auxiliar de corrente é fixado a uma distância relativamente grande em relação ao posicionamento da malha de aterramento. TELLÓ et al. (2007) sugere que o eletrodo auxiliar de corrente esteja a uma distância de pelo menos 10 vezes a maior dimensão da malha, para evitar a influência dos potenciais provocados no solo pela malha e pelo eletrodo auxiliar de corrente. Já a norma NBR 15749 diz que essa distância é de 3 vezes.

O eletrodo auxiliar de potencial varia entre o eletrodo auxiliar de corrente e a malha de aterramento, geralmente em intervalos regulares de 10% da distância total. A NBR 15749 sugere que esse intervalo seja de 5%.

Com os valores obtidos no ensaio, pode-se traçar a curva de resistência de terra em função da distância, conforme a Figura 11.

Figura 11 – Curva característica da resistência de aterramento



FONTE: NBR 15749

Como o objetivo principal da medição é obter o valor da resistência de terra do sistema de aterramento submetido ao ensaio, existe a possibilidade de deslocar, diretamente, a haste auxiliar de potencial para uma posição correspondente a aproximadamente 62% da distância entre o aterramento ensaiado (malha de aterramento) e a haste auxiliar de corrente (GILL, 1942; IEEE-81, 1983). Assim, teoricamente, estar-se-ia posicionando a haste auxiliar de potencial diretamente na região de patamar e a resistência de terra R_v seria encontrada, sem que houvesse a necessidade de se obter a curva de resistência de terra em função da distância.

Para tanto, devem ser feitas verificações, variando a posição do eletrodo de potencial para esquerda e para a direita em 10% da distância total entre a malha e o eletrodo de corrente, para garantir que as medições estão sendo executadas sem sobreposição das áreas de influência do sistema de aterramento sob ensaio e o eletrodo de corrente. Segundo GILL (1942), não há sobreposição entre as áreas de influência se a porcentagem entre a diferença dos valores medidos com o eletrodo de potencial não ultrapassar 10% do valor medido a

62% da distância total. Resultados mais precisos são encontrados para solos homogêneos e sistemas de aterramento de pequenas dimensões.

Outra prática comum está relacionada ao fato de não se conseguir visualizar a região de patamar na curva de resistência de terra em função da distância, obtida a partir das medições em campo. Neste caso, embora com certa imprecisão, ao invés de se repetir o procedimento de medição em outra direção ou para uma distância maior entre a malha de terra e o eletrodo de corrente, costuma-se calcular a média dos valores medidos entre os pontos a 40%, 50%, 60% e 70% da distância total adotada na medição. (DIAS, 2011).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os métodos empregados nas medições em campo, apresentando os instrumentos e métodos utilizados para a estratificação do solo, onde foi construída a malha, medição da resistência e potenciais da malha, com o intuito de obter o valor da resistência de aterramento, potencial na superfície e potencial de passo da malha. No momento das medições de resistividade, o solo apresentava-se seco e com sete dias ininterruptos de chuva, já nas medições de resistência de aterramento, potencial na superfície e potencial de passo, o solo apresentava-se aparentemente seco, mas com apenas quatro dias ininterruptos de chuva. As imagens referentes a construção e medição de potenciais e resistência da malha estão no Apêndice A deste trabalho.

3.1 MEDIÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO

3.1.1 MATERIAL UTILIZADO

As medições de resistividade do solo foram realizadas utilizando-se um terrômetro digital modelo MTD-20KWe da Megabras.

O terrômetro utilizado mede a resistividade do terreno pelo método de Wenner, resistência de aterramento e tensões espúrias provocadas pelas correntes parasitas no solo. A principal aplicação do equipamento é a verificação de resistência de aterramento de prédios, instalações industriais, hospitalares e domiciliares, para-raios, subestações, etc.

O terrômetro também possui um sistema de filtros ativos e passivos, que lhe outorga uma alta imunidade às interferências elétricas, fazendo assim que as medições sejam mais confiáveis na presença de correntes parasitas. A corrente de medição, regulada eletronicamente, é alternada com uma frequência de 1.470 Hz, o que permite avaliar adequadamente o comportamento do aterramento tanto em relação a uma falha de frequência industrial como perante a uma descarga atmosférica.

Por seu amplo intervalo de medição ($0,01 \Omega$ até $20k \Omega$), este equipamento permite ensaios confiáveis em todo tipo de terreno, inclusive naqueles de resistividade

muito alta. A utilização é muito simples, com leitura direta em um visor de 3 dígitos de alta visibilidade. (MEGABRAS, 2016)

Na Figura 12 é apresentado o terrômetro digital, modelo MTD-20KWe da Megabras.

Figura 12 - terrômetro digital modelo MTD-20KWe da Megabras.



FONTE: MEGABRAS, 2016

Juntamente com o terrômetro foi utilizado um *kit* de medição, contendo todo o material necessário para a medição da resistividade do terreno. O *kit* contém quatro rolos de cabos isolados com comprimentos variados (dois de 20m e dois de 40 m) e com bitolas de 2,5 mm², além de 4 hastes de aço, revestidas com cobre, com 50 cm de comprimento e 11 mm de diâmetro.

Foram utilizadas também duas trenas de 100 m (cada) para posicionar corretamente as hastes que foram cravadas no solo com uma marreta.

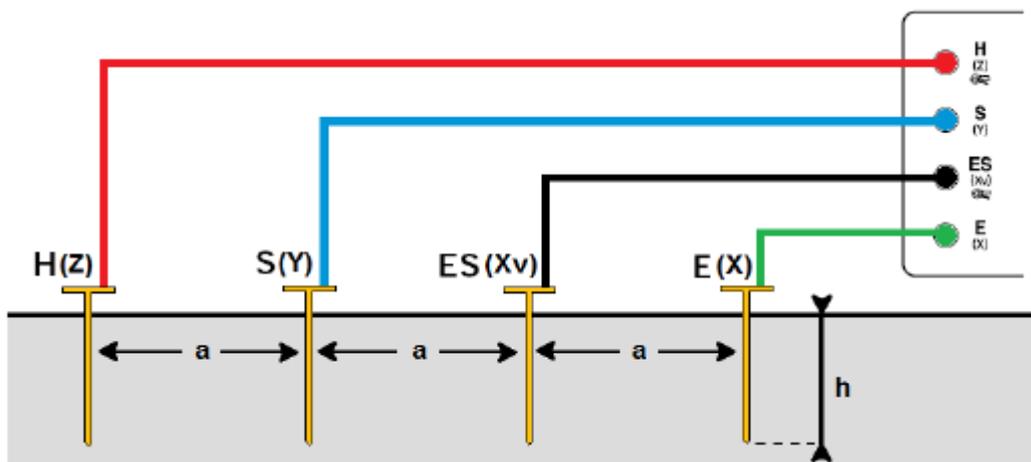
As medições de resistividade do solo foram feitas em um terreno com dimensões 15 m x 30 m.

3.1.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO

A medição da resistividade do terreno foi realizada utilizando o método de *Wenner*, pelo fato de apresentar alta confiabilidade nos resultados. O método de *Wenner* está descrito na seção 2.2 deste trabalho.

No lugar de um voltímetro e uma fonte de corrente, foi utilizado o terrômetro apresentado na Figura 12. Na Figura 13 é mostrado o esquema de ligação do terrômetro com as hastes de medição, utilizando o método de Wenner, onde $H(Z)$ e $E(X)$ são hastes de corrente e $S(Y)$ e $ES(Xv)$ são as hastes de potencial.

Figura 13 – Esquema de medição de resistividade do solo utilizando-se o terrômetro digital.



Fonte: DIAS, 2011, p.42.

A corrente é injetada pela haste $H(Z)$ e retorna ao terrômetro pela haste $E(X)$, o potencial é medido através das hastes $S(Y)$ e $ES(Xv)$. Com o valor da corrente injetada e o potencial medido o terrômetro calcula a resistência.

A estratificação do solo em camadas horizontais foi realizada utilizando o software TecAt Plus 5.2, com os dados de resistências medidas para os espaçamentos o software tem a capacidade de modelar o solo em camadas estratificadas.

3.2 CONSTRUÇÃO DA MALHA DE ATERRAMENTO

3.2.1 MATERIAL UTILIZADO

A malha de aterramento foi construída utilizando quatro hastes do tipo *copperweld*, com alta camada de cobre (254 microns), medindo 2,40 m de comprimento e 3/8" de diâmetro, 11 m de cabo cobre nu com seção de 35 mm², 4 conectores GDU e um conector KS.

Também foram utilizadas uma picareta e uma cavadeira articulada, para cavar o local dos condutores e das hastes, e uma marreta para cravar as hastes no solo.

3.2.2 MÉTODO DE CONSTRUÇÃO

Foi construída uma malha quadrada com espaçamento entre as hastes de 2,40 m. A construção da malha de aterramento foi feita seguindo os passos explicitados abaixo:

- 1º Passo: definir o local da malha e fazer as marcações dos locais das hastes e condutores;
- 2º Passo: Cavar as valas na terra por onde passam os condutores;
- 3º Passo: Cravar as quatro hastes no solo, utilizando uma marreta;
- 4º Passo: Passar o cabo de cobre nu pelas hastes e fazer a conexão com as mesmas utilizando os conectores GDU;
- 5º Passo: Fazer a conexão entre as pontas do cabo, utilizando o conector KS;
- 6º Passo: Fechar os buracos e compactar o solo para um melhor contato com a malha de aterramento.

Os condutores de cobre nu foram enterrados 0,30 m no solo, enquanto as cabeças das hastes foram enterradas 0,10 m no solo. Uma das hastes foi deixada aparente, para a conexão dos equipamentos de medição com a malha de aterramento.

Como as hastes tem comprimento de 2,40 m foi utilizado o espaçamento entre elas de 2,40 m, a fim de diminuir a zona de interferência entre hastes e assim não prejudicar o escoamento da corrente.

3.3 MEDIÇÃO DO POTENCIAL NA SUPERFÍCIE DA MALHA

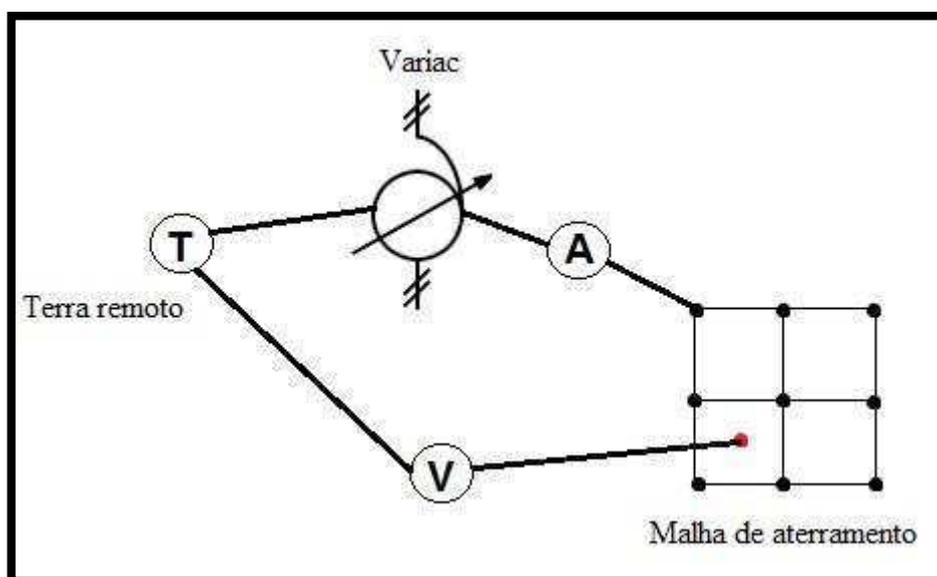
3.3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

A medição do potencial na superfície da malha foi feita utilizando um Variac trifásico de 9kVA, um voltímetro, um amperímetro e hastes para medição.

3.3.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO

O neutro do Variac foi conectado a um terra remoto (ponto localizado a 20 m da malha) e a fase foi conectada diretamente a uma das hastes da malha, fazendo com que uma corrente I percorresse a malha de aterramento. O amperímetro foi utilizado para medir a corrente que foi injetada na malha, com o intuito de garantir que o valor da corrente é realmente o desejado, e o voltímetro foi colocado entre o terra remoto e uma haste cravada 0,10 m no solo, essa haste se encontrava no ponto da malha em que se desejou medir o potencial na superfície. O esquema da montagem é apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Esquema de medicado do potencial na superfície.



FONTE: Próprio autor.

3.4 MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE PASSO

3.4.1 MATERIAL UTILIZADO

As medições de potencial de passo foram realizadas utilizando-se duas massas metálicas de 25 kg cada, com o intuito de simular uma pessoa de 50 kg. A massa tem o intuito de aumentar o contato com o solo. A Figura 15 ilustra essas massas metálicas.

Figura 15 – Massas metálicas utilizadas nas medições de potencial de passo.



FONTE: Próprio autor.

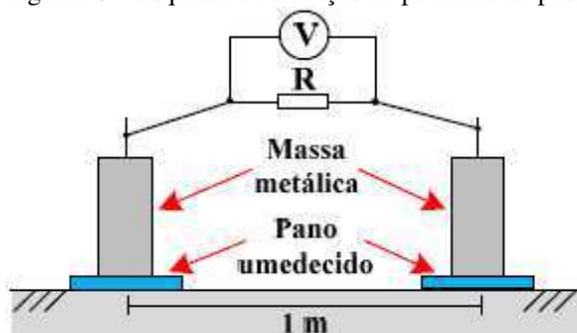
Também foi utilizado um resistor de $1\text{ k}\Omega$, que simula a resistência do corpo humano, um voltímetro digital, e cabos isolados com bitolas de $2,5\text{ mm}^2$ para realizar as conexões.

3.4.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO

Na medição dos potenciais de passo, foi utilizado as duas massas metálicas interligadas, afastadas de 1m uma da outra, com o intuito de simular uma pessoa com pernas abertas. O resistor foi inserido entre as duas massas. O esquema de medição pode ser visto na Figura 16.

Os valores de potencias medidos corresponde ao potencial de passo gerado por uma corrente injetada na malha de 10 A, a fim de simular uma corrente proveniente de curto-circuito na rede.

Figura 16 – Esquema de medição de potencial de passo.



Fonte: DIAS, 2011, p.47.

3.5 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

3.5.1 MATERIAL UTILIZADO

A medição de resistência de terra foi realizada utilizando o termômetro digital descrito na seção 3.1.1 deste capítulo. Também foram utilizados três rolos de cabos isolados, que faz parte do kit do terrômetro, todos com bitolas de 2,5 mm² e duas hastes de aço, revestidas por cobre, com 0,50 m de comprimento e 16 mm de diâmetro cada.

Foi utilizada uma trena de 100 m para posicionar corretamente as hastes de potencial e de corrente, que foram cravadas no solo utilizando uma marreta.

3.5.2 MÉTODO DE MEDIÇÃO

As medições de resistência de terra foram realizadas através do método de queda de potencial, descrito na seção 2.4 deste trabalho.

O eletrodo auxiliar de corrente foi posicionado a 20 m da malha, enquanto o eletrodo auxiliar de potencial foi posicionado entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente, percorrendo esta distância em intervalos de 1 m.

Na Figura 17 é apresentado o esquema de medição de resistência de terra pelo método da queda de potencial utilizando o terrômetro digital, onde $H(Z)$ é o eletrodo auxiliar de corrente, $S(Y)$ o eletrodo auxiliar de potencial e $E(X)$ é o eletrodo auxiliar de corrente que foi conectado a malha de aterramento.

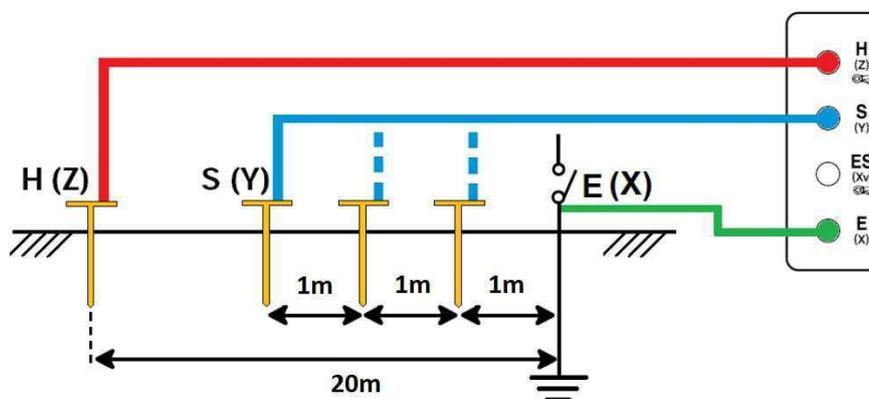


Figura 17 – Esquema de medição de resistência de terra.

A partir dos valores de resistência e as respectivas distancias, será desenhada a curva de resistência de aterramento em função da distância entre a malha e o eletrodo auxiliar de corrente. A partir dessa curva será obtido o valor da resistência de aterramento o qual correspondera a região de patamar da curva.

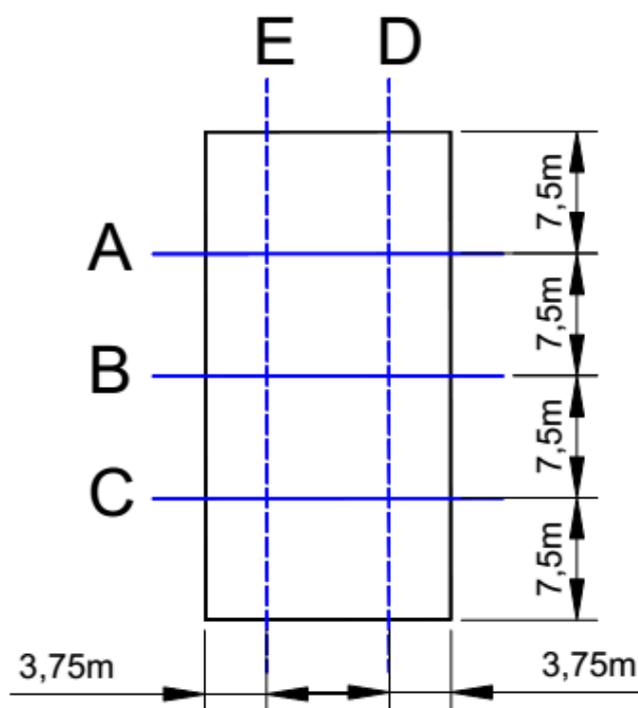
4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos na simulação da malha de aterramento, utilizando o TecAt Plus 5.2[®], como também os resultados obtidos nas medições realizadas na malha. Os resultados medidos foram obtidos utilizando os métodos descritos no Capítulo 3 deste trabalho.

4.1 MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE DO SOLO

A medição de resistividade do solo foi realizada utilizando o método descrito na seção 2.2 deste trabalho, os pontos de medição foram dispostos em 5 direções diferentes (*A, B, C, D, E*), ilustradas na Figura 18. O terreno apresenta dimensões de 15 m x 30 m, e no momento da medição o solo apresentava-se seco, com pelo menos sete dias sem a ocorrência de chuva no local.

Figura 18 – Croqui das linhas de medição de resistividade do solo.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados obtidos na medição de resistividade do solo estão apresentados na Tabela 2, esses dados foram utilizados para a realização da modelagem de estratificação do solo, utilizando o software TecAt Plus 5.2[®], ilustrado na Figura 19.

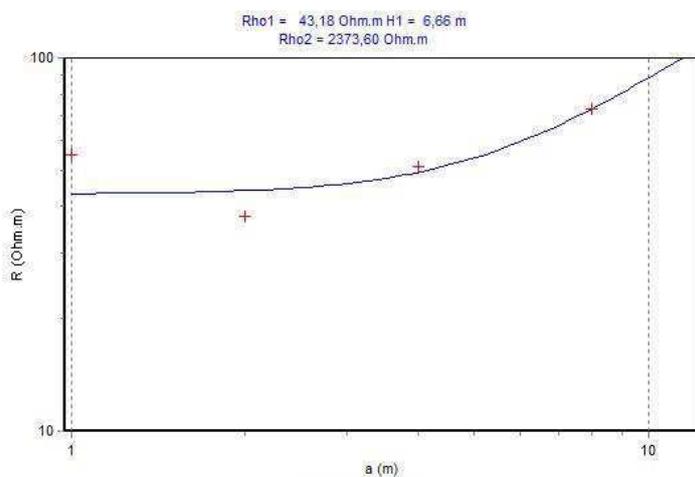
Tabela 2 – Valores de resistências obtidos.

a (m)	Valores medidos (Ω)				
	A	B	C	D	E
1	12,50	7,60	6,10	21,70	6,70
2	3,10	3,40	2,30	4,30	1,60
4	2,10	3,30	2,50	0,90	1,50
8	-----	-----	-----	1,50	1,40

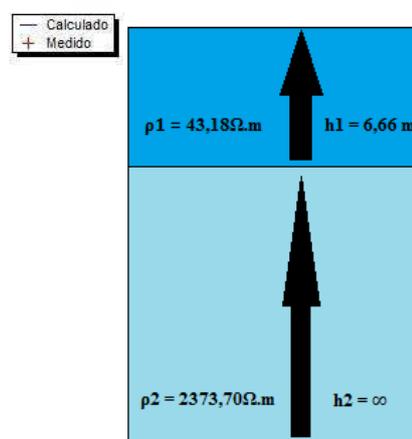
Fonte: Próprio autor.

Figura 19 – Resultado da estratificação do solo fornecida pelo TecAt Plus 5.2[®].

(a) Curva de resistividade do solo em função do espaçamento das hastes.



(b) Croqui do solo estratificado em quatro camadas.



Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 19(a) vemos que existem dois pontos medidos que estão fora da curva de estratificação, o motivo disso, provavelmente, é a falta de medidas com maior espaçamento entre as hastes, que nesse caso, não foi possível realizá-las pelas dimensões do terreno serem relativamente pequenas.

A estratificação demonstra que o solo é heterogêneo, formado por duas camadas com resistividades e espessuras distintas. Segundo os resultados fornecidos pelo TecAt

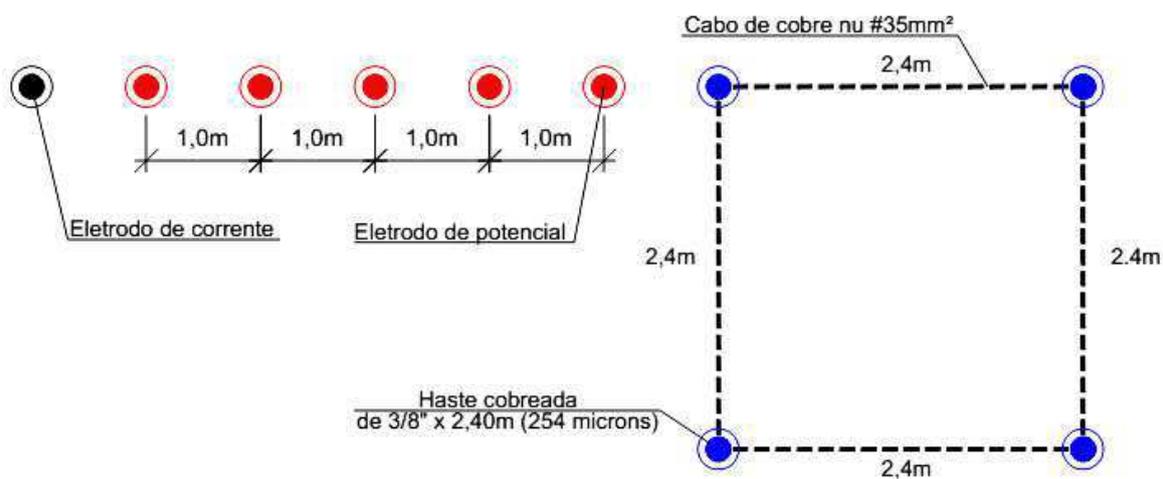
Plus 5.2[®] a primeira camada apresenta uma resistividade baixíssima, enquanto a segunda camada apresenta uma resistividade elevada, acusando um solo com pedras para essa camada. No entanto, a camada está localizada a 6,66 m de profundidade, sendo assim, a corrente de defeito irá propagar de maneira satisfatória devido à baixa resistividade e profundidade moderada da primeira camada.

O erro RMS da estratificação do solo foi de 14%, esse dado é fornecido pelo próprio software, como esse erro é relativamente alto possa ser que o mesmo interfira na precisão dos cálculos de resistência de aterramento e potenciais da malha.

4.2 MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

A medição de resistência de aterramento foi realizada seguindo o método descrito na seção 3.5 deste trabalho, foram realizadas dezenove medições em pontos distintos, a fim de obter a curva de resistência de aterramento em função da distância, a Figura 20 apresenta uma ilustração de como foi realizada a medição.

Figura 20 – Esquema de medição de resistência da malha de aterramento.



Fonte: Próprio autor.

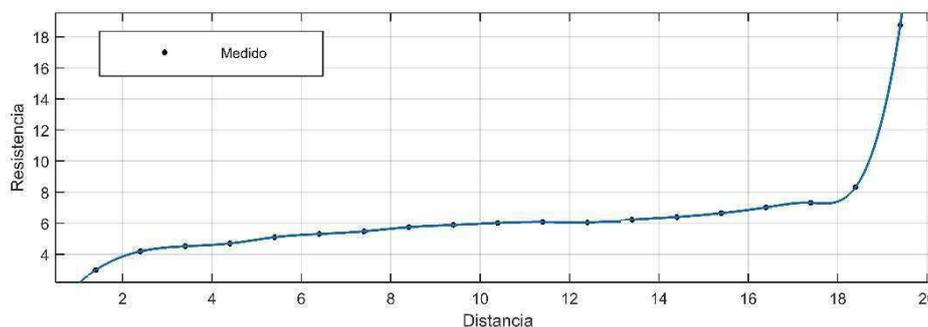
No momento da medição, o solo apresentava-se aparentemente seco, porem houve ocorrência de chuva quatro dias antes da medição, a norma recomenda sete dias sem chuva, mas não foi possível realizar as medições com sete dias ininterruptos sem chuva. Os valores obtidos na medição de resistência de aterramento são apresentados na Tabela 3, a partir desses valores, e com o auxílio do MATLAB®, foi possível traçar a curva de resistência em função da distância, conforme mostrado na Figura 21. O gráfico não apresentou uma região de patamar bem definida pelo fato da distância do eletrodo auxiliar de corrente, em relação a malha, não ter sido suficientemente grande, então foi feito uma média aritmética entre os valores de resistências obtidos no intervalo de 8 m a 14 m de distância. A partir da média aritmética constata-se que a resistência da malha é de aproximadamente 6,0 Ω .

Tabela 3 – Medição da resistência da malha de aterramento.

Distância (m)	Resistência (Ω)	Distância (m)	Resistência (Ω)
1,40	2,99	11,40	6,08
2,40	4,19	12,40	6,05
3,40	4,52	13,40	6,23
4,40	4,70	14,40	6,40
5,40	5,10	15,40	6,65
6,40	5,31	16,40	7,02
7,40	5,48	17,40	7,32
8,40	5,75	18,40	8,32
9,40	5,89	19,40	18,75
10,40	6,02		

Fonte: Próprio autor.

Figura 21 -Curva de resistência de terra versus distância.



Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos na medição e na simulação através do software TecAt Plus 5.2®, pode -se concluir que a simulação é bem próxima da malha

implantada, o valor de resistência de aterramento obtido na simulação foi de $6,47\Omega$, o erro relativo é de 7,83%, que pode ser considerado relativamente baixo.

Uma justificativa para o valor obtido na medição ter sido menor que o obtido na simulação pode estar relacionado a umidade do solo no dia da medição, já que a medição de resistividade do solo foi feita com o solo seco e sem registro de chuvas em pelo menos sete dias que antecederam a medição, e a medição de resistência de aterramento foi feita com o solo aparentemente seco e com ocorrência de chuva quatro dias antes da medição.

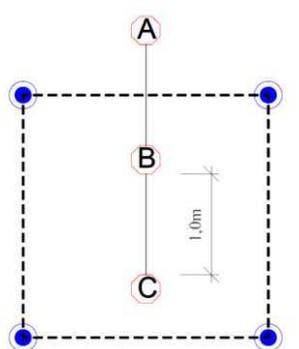
Outro fator que pode ter aumentado o erro da simulação foi a modelagem de estratificação do solo, que poderia ter sido mais precisa. Como a base dos cálculos é essa modelagem, o erro conseqüentemente interferiu no cálculo da resistência do sistema de aterramento, potencial de passo e potencial na superfície.

4.3 MEDIÇÃO DE POTENCIAL DE PASSO

A medição de potencial de passo foi realizada seguindo o método descrito na seção 3.4 deste trabalho, o objetivo da medição não era verificar se os potenciais estavam dentro do limite de segurança, e sim se os potenciais simulados no software TecAt Plus 5.2[®], estavam próximos dos potenciais que surgiram na malha implantada.

As medições de potencial de passo foram realizadas em dois pontos de medição, tanto no interior como no limite da malha de aterramento. A figura 22 ilustra esses pontos de medição, os pontos A B e C indicam o local onde foram colocadas as massas metálicas.

Figura 22 – Esquema de medição de potencial de passo.



Fonte: Próprio autor.

As medições do potencial de passo foram realizadas tendo como referência uma corrente de 10A, a forma como a corrente foi injetada na malha está detalhada na seção 3.3.2 deste trabalho. No dia da medição, O solo apresentava-se aparentemente seco, porem houve ocorrência de chuva quatro dias antes da medição. Os resultados obtidos na medição estão apresentados na Tabela 4.

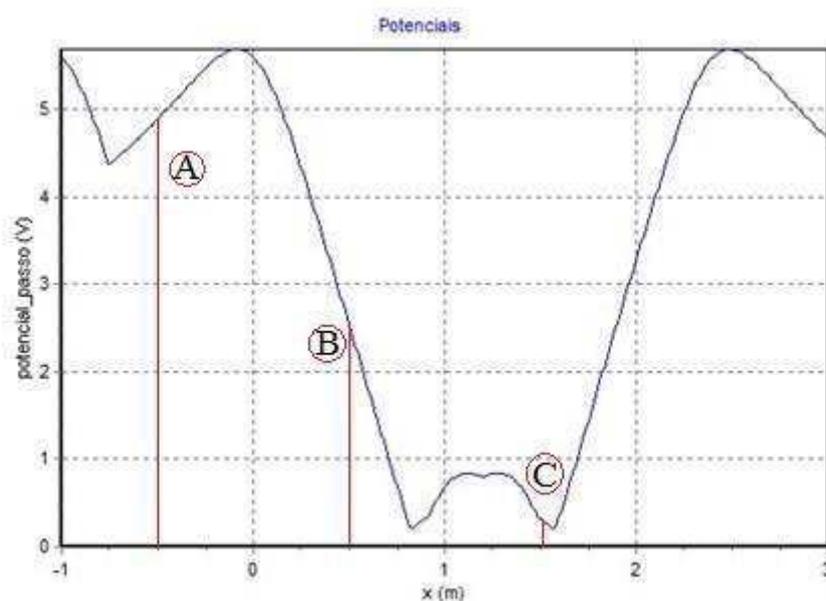
Tabela 4 – Potenciais de passo medidos.

Posições das massas	Potenciais de passo (V)
A e B	1,73
B e C	2,58

Fonte: Próprio autor.

A Figura 23 mostra o gráfico de potencial de passo gerado pelo TecAt Plus 5.2[®], a corrente de defeito utilizada na simulação foi de 10 A.

Figura 23 – Simulação dos potenciais de passo.



Fonte: Próprio autor.

O ponto A está localizado a 0,5 m fora do limite da malha de aterramento, o ponto B está localizado a 0,5 m dentro do limite da malha de aterramento e ponto C está localizado a 1 m do ponto B, logo, podemos extrair do gráfico o valor da diferença de potencial, entres os pontos A e B e os pontos B e C. A Tabela 5 apresenta a diferença de potencial nestes pontos.

Tabela 5 – Potenciais de passo simulados.

Posições das massas	Potenciais de passo (V)
A e B	1,85
B e C	2,76

Fonte: Próprio autor.

A partir dos resultados obtidos na medição e na simulação através do software TecAt Plus 5.2[®], pode -se concluir que a simulação de potencial e passo é bem próxima aos potenciais gerados na malha implantada. O erro relativo para os pontos A e B foi de 6,93%, e o erro relativo para os pontos B e C foi de 6,97%, isso mostra que a simulação se aproximou dos valores da malha implantada.

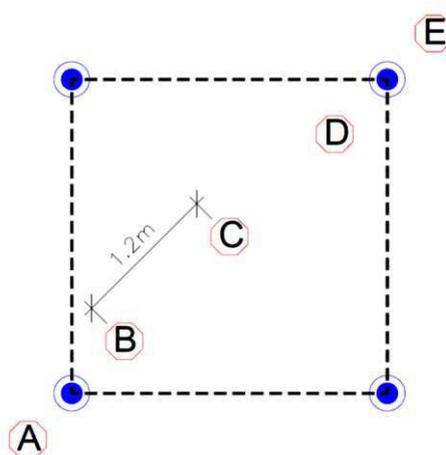
A justificativa para esse erro é igual ao da medição de resistência de aterramento, a humidade do solo pode ter alterado um pouco na medição do potencial de passo.

4.4 MEDIÇÃO DE POTENCIAL NA SUPERFÍCIE

A medição de potencial na superfície foi realizada seguindo o método de medição descrito na seção 3.3 deste trabalho. O objetivo da medição era verificar se os potenciais que surgiram na superfície da malha, se aproximavam dos potenciais simulados pelo TecAt Plus 5.2[®]. O solo apresentava-se aparentemente seco, porem houve ocorrência de chuva quatro dias antes da medição.

Foram escolhidos cinco pontos para a medição do potencial na superfície da malha, como mostra a Figura 24.

Figura 24 – Medição dos potenciais na superfície.



Fonte: Próprio autor.

As medições do potencial de superfície foram realizadas tendo como referência uma corrente de 10 A, a forma como a corrente foi injetada na malha está detalhada na seção 3.3.2 deste trabalho. A Tabela 6 mostra os potenciais de superfície medidos.

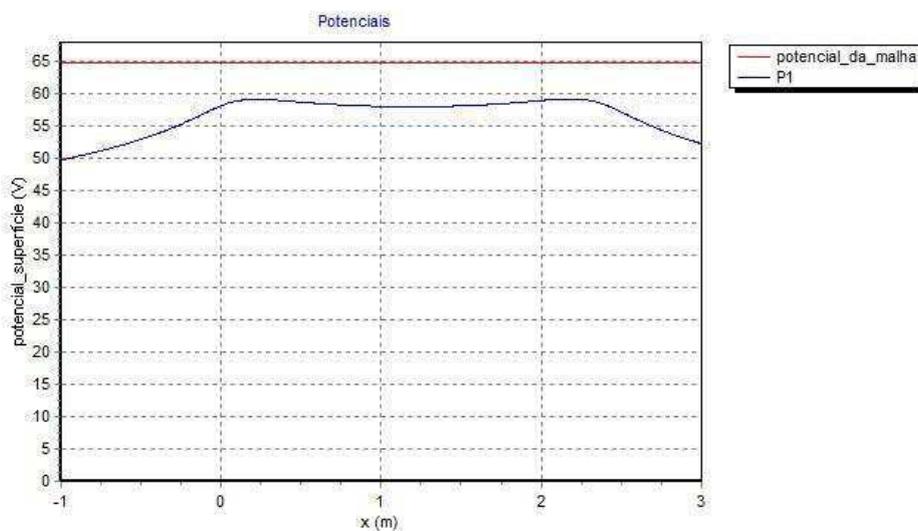
Tabela 6 – Potenciais de superfície medidos.

Pontos de medição	Potenciais de superfície (V)
A	47,25
B	55,85
C	54,72
D	55,23
E	49,68

Fonte: Próprio autor

A Figura 26 mostra o gráfico de potencial de superfície gerado pelo TecAt Plus 5.2[®], a corrente de defeito utilizada na simulação foi de 10A. As coordenadas dos pontos A, B, C, D e E são apresentadas na Tabela 7.

Figura 25 – Potenciais de superfície simulados.



Fonte: Próprio autor

Tabela 7 – Coordenadas dos pontos de medição.

Pontos de medição	Coordenadas (X, Y)
A	(-1, -1)
B	(0,35 ; 0,35)
C	(1, 2 ; 1,2)
D	(2,05 ; 2,05)
E	(3, 3)

Fonte: Próprio autor

Com as coordenadas dos pontos de medição e o gráfico gerado pelo TecAt Plus 5.2[®], podemos extrair do mesmo os valores de potencial de superfície simulados. Os resultados são apresentados na Tabela 8, e a Tabela 9 mostra os erros relativos de cada ponto de medição.

Tabela 8 – Potenciais de superfície simulados e erro relativo.

Pontos de medição	Potenciais de superfície (V)	Erro relativo (%)
A	49,75	5,29
B	58,95	5,57
C	57,94	5,88
D	59,00	6,82
E	52,22	5,11

Fonte: Próprio autor

A partir dos resultados obtidos na medição e na simulação através do software TecAt Plus 5.2[®], pode -se concluir que a simulação de potencial de superfície se aproxima dos valores da malha implantada, os erros relativos podem ser considerados baixos, porém, eles poderiam diminuir caso a modelagem da estratificação do solo fosse mais precisa, e talvez, se a medição tivesse sido feita com sete dias ininterruptos sem chuva.

5 CONCLUSÃO

No trabalho foi apresentado uma comparação entre uma malha simulada, utilizando o software TecAt Plus 5.2[®], e a malha implantada. O usuário precisa tomar alguns cuidados nas medições utilizadas para o cálculo de resistividade do solo, pois, uma modelagem de estratificação mais precisa, provavelmente, resultaria em dados mais próximos da realidade. O fato das medições de resistência e potenciais na malha terem sido feitas em uma condição diferente das medições de resistividade do solo, também influencia nos resultados medidos.

Apesar disso tudo o TecAt Plus 5.2[®] se mostrou preciso nos seus cálculos, os erros relativos calculados são considerados bons, podendo diminuir ainda mais, se os erros da modelagem da estratificação do solo forem menores, e tomando alguns cuidados nas medições, porém os erros absolutos são considerados desprezíveis. Sendo assim constatou-se que o TecAt Plus 5.2[®] é uma ferramenta computacional de grande valia para o projetista de sistemas de aterramento, pois, facilita muito o seu trabalho.

A revisão bibliográfica realizada, ajudou bastante no amadurecimento de alguns conhecimentos adquiridos nas disciplinas de Instalações Elétricas e Equipamentos Elétricos, além de melhor situar no que refere-se ao projeto de malhas de aterramento, permitindo assim, a aplicação do que fora aprendido no mercado de trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAPELLI, A. **Aterramento Elétrico**. Revista Saber Eletrônica n. 329, junho de 2000. Disponível em: <<http://py2mok.tripod.com/arquivos-pdf-py2mokleo/aterramento1.pdf>>.

CUNHA, J. G. **Requisitos de Aterramento de Cabine Primária, Segundo a Nova NBR 14039**. ENERSHOW. São Paulo, 2003.

DIAS, A. D. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: Medições e Análises**. Dissertação, 2011.

IEEE Std 80-2000. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. New York, NY: IEEE Power Engineering Society, Substations Committee, 2000.

IEEE Std 81-1983. **IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System**. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power System Instrumentation and Measurements Committee, 1983.

IEEE Std 81.2-1991. **IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems**. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers, Power System Instrumentation and Measurements Committee, 1991.

KINDERMANN, G. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 2002.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações Elétricas Industriais**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MORENO, H.; COSTA, P. **Aterramento Elétrico**. São Paulo: Procobre, 1999.

NBR 15749. **Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento**. ABNT, 2009.

NBR 7117. **Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner)**. ABNT, 1981.

NR 10. **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Ministério do Trabalho e Emprego. Portaria nº 3214/78, 2004.

MEGABRAS. **Megabras**, 27 Abril 2016. Disponível em: <<http://www.megabras.com/pt-br/produtos/terrometro/terrometro-digital-MTD20KWe.php>>.

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. D.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, V. L. **Aterramento Elétrico Impulsivo em Baixa e Alta Frequência**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

VISACRO, S. F. **Aterramentos Elétricos**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2002.

PINTO, N. R. **Elaboração de Tutorial do Software TeCat 5.2: Ferramenta Utilizada na Caracterização de Solos e Projetos de Malhas de Aterramento**. UFCG. Campina Grande. 2015

APÊNDICE A

Abaixo se encontram as imagens referentes a construção e medição da malha de aterramento.

Figura 27 – Medição de resistividade do solo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 28 – Hastes e condutor usados na malha.



Fonte: Próprio autor.

Figura 29 – Conectores utilizados na malha.



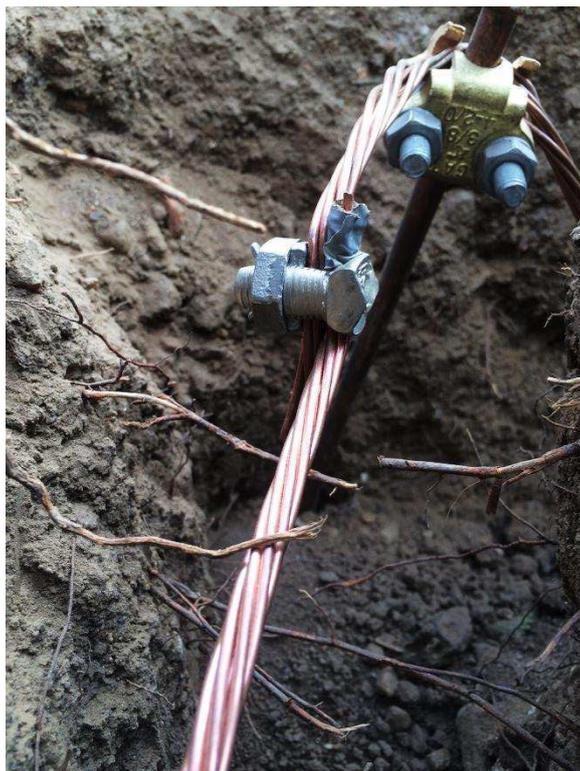
Fonte: Próprio autor.

Figura 30 – Detalhe do conector GDU com o cabo de cobre Nu.



Fonte: Próprio autor.

Figura 31- Detalhe do conector KS.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Malha de aterramento.



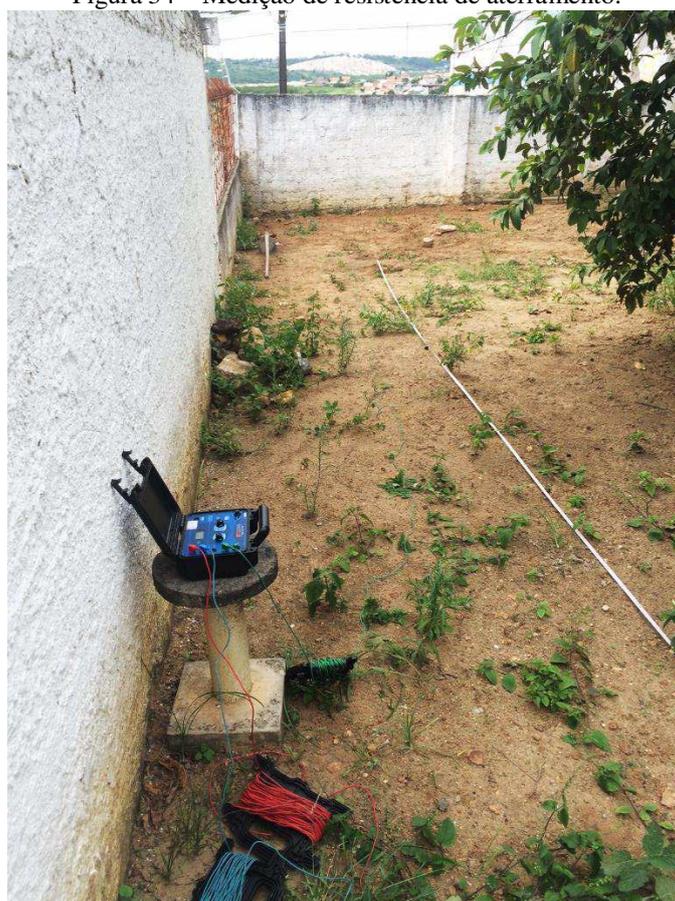
Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Malha de aterramento finalizada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Medição de resistência de aterramento.



Fonte: Próprio autor.

Figura 35 – Variac utilizado para injetar corrente na malha



Fonte: Próprio autor.

Figura 36 – Medição do potencial de passo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 37 – Medição de potencial na superfície.



Fonte: Próprio autor.