



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Cálculo de tensão de passo a partir da  
injeção de uma corrente elétrica:  
Uma abordagem considerando seções do solo**

Daniel Ribeiro Montalvão

Brasília, 2023

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Elétrica

**Daniel Ribeiro Montalvão**

# **Cálculo de tensão de passo a partir da injeção de uma corrente elétrica: Uma abordagem considerando seções do solo**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao  
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade  
de Brasília como requisito parcial para obtenção do  
título de Engenheiro Eletricista.

**Orientador: Professor Alcides Leandro da Silva, Dr.**

Brasília, Dezembro 2023

## FICHA CATALOGRÁFICA

Montalvão, Daniel Ribeiro.

Cálculo de tensão de passo a partir de uma injeção de corrente elétrica:  
Uma abordagem considerando seções do solo. [Distrito Federal] 2023.  
XVI 86 p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2020).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília.  
Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica.  
Orientador Dr. Prof. Alcides Leandro da Silva

1. tensão de passo	2. nova abordagem
3. choque elétrico	4. descargas atmosféricas
I. ENE/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Daniel Ribeiro Montalvão. Cálculo de tensão de passo a partir da injeção de uma corrente elétrica: Uma abordagem considerando seções do solo.  
Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, XVI 86 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daniel Ribeiro Montalvão

Cálculo de tensão de passo a partir da injeção de uma corrente elétrica: Uma abordagem considerando seções do solo.

GRAU/ANO: Graduação em Engenharia Elétrica/2023.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

Daniel Ribeiro Montalvão  
SCEN Casa do Est. Universitário Graduação, Brasília - DF  
Email: danielmontalvao77@gmail.com

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia Departamento  
de Engenharia Elétrica

**CÁLCULO DE TENSÃO DE PASSO A PARTIR DA  
INJEÇÃO DE UMA CORRENTE:  
Uma abordagem considerando seções do solo**

**Daniel Ribeiro Montalvão**

**Banca examinadora**

---

**Prof. Dr. Alcides Leandro da Silva, UnB/ENE**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Francisco Damasceno Freitas, UnB/ENE**  
Examinador interno

---

**Prof. Dr. Leonardo R.A.X. Menezes, UnB/ENE**  
Examinador interno

Brasília, dezembro 2023

# DEDICATÓRIA

A todos aqueles que se aplicam à ciência de corpo e alma.

# AGRADECIMENTOS

Sobretudo agradeço ao Senhor Jesus por ter me destinado a chegar no final da graduação na UnB e por ter me dado inteligência, sabedoria, força de vontade segundo a sua bondade para transpor esse processo, e por ter escolhido com precisão e usado as pessoas em proporção e forma de acordo com sua soberana vontade, de modo a criar condições que favoreceram essa conquista. Assim, agradeço a todos aqueles que foram escolhidos e colocados por Deus em meu caminho. Dentre eles, meu pai Sinomar Montalvão, minha mãe Paula Ribeiro, minha tia Seir Montalvão e meu irmão Josué Montalvão pelo apoio de ordem material e moral.

Agradeço meu tio Leife Montalvão que me deu orientações e apoios valiosos que contribuíram para eu ter aptidão e capacidades de um engenheiro pleno.

Agradeço ao professor Doutor Alcides Leandro pela excelente orientação, atenção e prestatividade.

Agradeço ao meu coordenador de cursinho pré-vestibular Anderson Almeida pelas orientações e colaboratividade que foi fundamental para adquirir uma excelente base e habilidade em física e matemática para que eu pudesse cursar com êxito a graduação, dentre outras conquistas.

Agradeço também a Universidade de Brasília por ter propiciado esse ambiente de realização.

# RESUMO

Quando se trata de tensão de passo, reporta-se a um fenômeno relacionado à injeção de corrente no solo provocada por diversos meios com diferentes intensidades e peculiaridades, como por descargas atmosféricas, causando danos variados. Em potencial vítima, tem-se o gado próximo de árvores usadas como abrigos durante tempestades. Se há correntes circulantes no solo, há diferenças de potenciais entre as patas desses animais e consequentes correntes no seu corpo, caracterizados como cargas, provocando prejuízos financeiros significativos para o setor do agronegócio. Nesse contexto, este trabalho buscou compreender melhor o que contribui para o surgimento da tensão de passo, levando principalmente em consideração a heterogeneidade do solo.

Este estudo levou em consideração uma nova abordagem que trata o solo discretizado em seções, em contra-análise à abordagem tradicional que considera o solo homogêneo em toda sua extensão. Simulações foram realizadas envolvendo essas duas abordagens para compreender o processo de propagação de corrente elétrica no solo e a constatação de tensão de passo. Testes de campo foram realizados com injeção de correntes monitoradas no solo a partir de fonte de tensão da rede comercial. Medições das diferenças de potenciais no solo, tanto nas direções radiais quanto em hastes equidistantes ao ponto de injeção de corrente, foram efetuadas.

Os testes comprovaram que em solos homogêneos as diferenças de potenciais são significativas somente nas direções radiais relativamente ao ponto de injeção de corrente, ao passo que em solos heterogêneos as diferenças de potenciais ocorrem em todas as direções.

# ABSTRACT

When it comes to step voltage, refers to a phenomenon related to the injection of current into the ground caused by various means with different intensities and peculiarities, such as lightning, causing various types of damage. Potential victims include cattle near trees used as shelters during storms. If there are currents circulating in the soil, there are potential differences between the paws of these animals and consequent currents in their bodies, characterized as loads, causing significant financial losses for the agribusiness sector. In this context, this work sought to better understand what contributes to the arising of step voltage, taking mainly into account soil heterogeneity.

This study took into account a new approach that treats the soil discretized into sections, as an alternative to the traditional approach that considers the soil to be homogeneous throughout its entire length. Simulations were carried out involving these two approaches to understand the process of electric current propagation in the ground and the finding of step voltage. Field tests were carried out by injecting monitored currents into the ground from a commercial grid voltage source. Potential difference measurements were taken in the soil, both in radial directions and on rods equidistant from the current injection point.

The tests proved that in homogeneous soils the potential differences are significant only in the radial directions relative to the current injection point, whereas in heterogeneous soils the Potential difference occur in all directions.



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVO .....	3
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO .....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA</b> .....	<b>4</b>
2.1	TENSÃO DE PASSO: PRELIMINARES.....	4
2.2	TENSÃO DE PASSO: DEFINIÇÕES E CONCEITOS NORMATIVOS.....	5
2.3	TENSÃO DE PASSO E O ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	8
2.4	TENSÃO DE PASSO: ASPECTOS HISTÓRICOS .....	10
2.5	TENSÃO DE TOQUE .....	12
2.6	EFEITOS DA CORRENTE NA SAÚDE .....	13
2.7	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	14
2.8	INTERAÇÃO ENTRE DESCARGAS ATMOSFERICAS E OS SERES VIVOS.....	14
2.8.1	<i>Descarga direta</i> .....	14
2.8.2	<i>Descarga indireta lateral</i> .....	15
2.8.3	<i>Líder Escalonado</i> .....	16
2.8.4	<i>Ondas de choque</i> .....	17
2.9	CARACTERÍSTICAS DO SOLO .....	17
2.9.1	<i>Composição do solo</i> .....	18
2.9.2	<i>Resistividade do solo</i> .....	20
2.9.3	<i>Umidade do solo</i> .....	20
2.9.4	<i>Temperatura do solo</i> .....	21
2.9.5	<i>Compacidade do solo</i> .....	23
2.9.6	<i>Granulidade do solo</i> .....	23
2.9.7	<i>Estrutura Geológica</i> .....	24
2.10	INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA NOS PARÂMETROS ELÉTRICOS DO SOLO .....	25
2.10.1	<i>Efeito da frequência sobre a resistividade elétrica do solo</i> .....	25
2.10.2	<i>Efeito da frequência sobre a permissividade elétrica do solo</i> .....	27
<b>3</b>	<b>ABORDAGEM TRADICIONAL PARA O CÁLCULO DE TENSÃO DE PASSO</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>NOVA ABORDAGEM PARA O CÁLCULO DE TENSÃO DE PASSO</b> .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÕES</b> .....	<b>39</b>
5.1	SIMULAÇÕES ENVOLVENDO A ABORDAGEM TRADICIONAL.....	39
5.1.1	<i>Considerações iniciais</i> .....	39
5.1.2	<i>Simulação em 2D</i> .....	40

5.1.3	<i>Simulação gráfica da corrente ao longo do tempo</i>	41
5.1.4	<i>Simulação gráfica do potencial ao longo do tempo</i>	42
5.1.5	<i>Simulação gráfica da tensão de passo em 2 pontos</i>	42
5.1.6	<i>Potencial na forma de dupla exponencial em uma distância radial ao longo do tempo</i>	43
5.1.7	<i>Simulação em 3D do potencial na forma de dupla exponencial em uma distância radial ao longo do tempo</i>	44
5.1.8	<i>Propagação da dupla exponencial em um espaço tridimensional</i>	46
5.2	<b>SIMULAÇÕES ENVOLVENDO A NOVA ABORDAGEM</b>	49
5.2.1	<i>Considerações iniciais</i>	49
5.2.2	<i>Simulação em 2D da nova abordagem</i>	50
5.2.3	<i>Simulação gráfica do potencial em um ponto ao longo do tempo em cada seção esférica</i>	52
5.2.4	<i>Simulação da seção de <math>\rho c1 = 1250 \Omega \cdot m</math></i>	52
5.2.5	<i>Simulação da seção de <math>\rho c2 = 1750 \Omega \cdot m</math></i>	53
5.2.6	<i>Simulação da seção de <math>\rho hc = 1500 \Omega \cdot m</math></i>	53
5.2.7	<i>Simulação da tensão de passo de 5 a 6 metros com <math>\rho c1 = 1250 \Omega \cdot m</math></i>	54
5.2.8	<i>Simulação da tensão de passo de 5 a 6 metros com <math>\rho c2 = 1750 \Omega \cdot m</math></i>	55
5.2.9	<i>Simulação da tensão de passo de 5 a 6 metros com <math>\rho hc = 1500 \Omega \cdot m</math></i>	56
<b>6</b>	<b>TESTES EM CAMPO</b>	<b>58</b>
6.1	<b>MATERIAIS UTILIZADOS</b>	58
6.1.1	<i>Kit medição de resistência de aterramento</i>	60
6.2	<b>TESTE DE CAMPO DA ABORDAGEM TRADICIONAL</b>	61
6.2.1	<i>Medição da resistividade do solo</i>	61
6.2.2	<i>Configuração das hastes de aterramento</i>	62
6.2.3	<i>Medições com corrente de injeção de 1 e 2 mA</i>	63
6.2.4	<i>Medição com corrente de injeção de 10 mA</i>	64
6.3	<b>TESTE DE CAMPO DA NOVA ABORDAGEM</b>	66
6.3.1	<i>Medição com corrente de injeção de 10 mA com 3 hastes e 1 prego</i>	66
6.3.2	<i>Medição com corrente de injeção de 10 mA com 6 hastes e 1 prego colocado posteriormente</i>	68
6.3.3	<i>Medição com corrente de injeção de 119 mA com 6 hastes e 2 prego</i>	71
<b>7</b>	<b>ANÁLISES E RESULTADO</b>	<b>73</b>
7.1	<b>ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES ENVOLVENDO A ABORDAGEM TRADICIONAL</b>	73
7.2	<b>ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES ENVOLVENDO A NOVA ABORDAGEM</b>	74
7.3	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE EM CAMPO ENVOLVENDO A ABORDAGEM TRADICIONAL</b>	74

7.3.1	<i>Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.2.3 de Medições com corrente de injeção de 1 e 2 mA.....</i>	74
7.3.2	<i>Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.2.4 de Medição com corrente de injeção de 10 mA. ....</i>	76
7.4	ANALISE DOS RESULTADOS DO TESTE EM CAMPO ENVOLVENDO A NOVA ABORDAGEM.....	78
7.4.1	<i>Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.3.1 de Medição com corrente de injeção de 10 mA com 3 hastes e 1 prego .....</i>	78
7.4.2	<i>Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.3.2 de Medição com corrente de injeção de 10 mA com 6 hastes e 1 prego colocado posteriormente. ....</i>	78
7.4.3	<i>Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.3.3 de Medição com corrente de injeção de 119 mA com 6 hastes e 2 prego inseridos na raiz. ....</i>	79
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>
8.1	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	82

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Gado morreu após queda de raio em Colméia (TO).....	2
Figura 2.1 - Representação de um resistor com diferença de potencial associada (autoria própria).....	4
Figura 2.2 – Figura ilustrativa com simplificação e discretização do solo para o entendimento introdutório da tensão de passo. Os círculos pretos representam equipotenciais.....	5
Figura 2.3 - Tensão de passo gerada por uma corrente de falta e o circuito equivalente.....	6
Figura 2.4 - Tensão de passo gerada por uma descarga atmosférica.....	7
Figura 2.5 - figura representando o processo de funcionamento de um sistema de aterramento .....	9
Figura 2.6 - Zonas convencionais de tempo/corrente de efeitos de correntes em uma pessoas (percurso mão esquerda ao pé) .....	11
Figura 2.7 - Efeitos fisiológicos para cada zona do gráfico anterior .....	11
Figura 2.8 – exemplo de tensão de toque .....	12
Figura 2.9 – tabela dos efeitos da corrente elétrica sobre o corpo humano.....	13
Figura 2.10 - Ilustração de um ser humano sendo atingido por uma descarga direta. ....	15
Figura 2.11 - Ilustração de uma pessoa sendo atingida por uma decarga indireta lateral de uma estrutura metálica que está recebendo uma descarga atmosférica.....	16
Figura 2.12 - Ilustração de uma pessoa sendo atingida por um descarga elétrica lateral oriunda de uma árvore que está sendo atingida por uma descarga atmosférica. ....	16
Figura 2.13 – ilustração de líderes conectantes e líder escalonado. ....	17
Figura 2.14 – foto vertical do solo evidenciado a sua composição em camadas horizontais...	19
Figura 2.15 – Efeito da umidade na resistividade do solo arenoso. ....	21
Figura 2.16 – Resistividade x Temperatura.....	22
Figura 2.17 – resistividade em função da frequência .....	26
Figura 2.21 – permissividade em função da frequência .....	27
Figura 3.1 - Ponto de descarga atmosférica e distribuição em camadas hemisféricas. ....	30
Figura 3.2 - Ilustração para o cálculo da tensão de passo.....	31
Figura 3.3 - Ilustração para o cálculo da tensão de passo.....	32
Figura 4.1 – Ilustração de propagação de correntes no solo com algumas não homogeneidades. ....	34
Figura 4.2 - Ponto de descarga atmosféricas em distribuição de camadas hemisféricas.....	34

Figura 4.3 - Crescente esférico para um novo cálculo da tensão de passo.....	36
Figura 5.1 – Representação das equipotenciais com injeção de uma corrente constante com a abordagem tradicional. ....	40
Figura 5.2 – Simulação da curva da corrente injetada no solo .....	41
Figura 5.3 – simulação da curva do potencial em um ponto .....	42
Figura 5.4 – simulação da tensão de passo.....	43
Figura 5.5 – propagação da onda ao longo do tempo em uma direção radial .....	44
Figura 5.6 – Simulação em 3D enfatizando a subida rápida da dupla exponencial 1.2 / 50 ...	45
Figura 5.7 – Simulação em 3D enfatizando a cauda da dupla exponencial 1.2 / 50 .....	45
Figura 5.8 - propagação da dupla exponencial, primeira captura de tela. ....	46
Figura 5.9 - propagação da dupla exponencial, segunda captura de tela.....	47
Figura 5.10 - propagação da dupla exponencial, terceira captura de tela.....	47
Figura 5.11 - propagação da dupla exponencial, quarta captura de tela.....	48
Figura 5.12 - propagação da dupla exponencial, quinta captura de tela.....	48
Figura 5.13 - Representação das equipotenciais com injeção de uma corrente constante com a nova abordagem.....	51
Figura 5.14 - Representação ampliada da figura anterior na área próxima ao centro .....	51
Figura 5.15 - simulação da curva do potencial em um ponto da seção com $\rho c1 = 1250 \ \Omega \cdot m$ .....	52
Figura 5.16 - simulação da curva do potencial em um ponto da seção com $\rho c1 = 1750 \ \Omega \cdot m$ .....	53
Figura 5.17 - simulação da curva do potencial em um ponto da seção com $\rho hc = 1500 \ \Omega \cdot m$ .....	54
Figura 5.18 – Curva da tensão de passo na seção com $\rho c1 = 1250 \ \Omega \cdot m$ .....	55
Figura 5.19 – Curva da tensão de passo na seção com $\rho c1 = 1750 \ \Omega \cdot m$ .....	56
Figura 5.20 – Curva da tensão de passo na seção com $\rho c1 = 1500 \ \Omega \cdot m$ .....	57
Figura 6.1 – local de realização do teste.....	58
Figura 6.2– kit limitador de corrente .....	59
Figura 6.3 – dimmer para controle da tensão da fase .....	60
Figura 6.4– kit de aterramento utilizado no teste .....	60
Figura 6.5 – Momento da implementação do método de Wenner.....	61
Figura 6.6 – configuração espacial do teste de campo da abordagem tradicional.....	62
Figura 6.7 - local de realização das medições envolvendo abordagem tradicional.....	63

Figura 6.8 - configuração espacial do primeiro teste de campo da nova abordagem.....	66
Figura 6.9 – configuração espacial do segundo teste de campo da nova abordagem.....	67
Figura 6.10 - configuração espacial do teste de campo da nova abordagem.....	68
Figura 6.11 - configuração espacial do segundo teste de campo da nova abordagem. ....	69
Figura 6.12 - configuração espacial do teste de campo da nova abordagem com injeção de 119 mA .....	71
Figura 6.13 – Em amarelo temos a localização dos pregos e em vermelho a localização das hastes. ....	72
Figura 6.21 – medições com corrente de medição de 119 mA.....	72
Figura 7.1 – Tensões envolvendo a haste .....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – valores típicos de resistividades de alguns tipos de solo.....	19
Tabela 2.2 -Variação da resistividade com a temperatura para o solo arenoso.....	22
Tabela 2.3 – valores típicos de resistividade para diferentes períodos de tempo.....	25
Tabela 6.1- medições feitas para corrente de 1 mA .....	63
Tabela 6.2 – medições para corrente de 2 mA .....	64
Tabela 6.3 - medições feitas para corrente de 10 mA .....	65
Tabela 6.4 - medições envolvendo a haste X .....	66
Tabela 6.5 - medições feitas para o caso dessa subseção .....	68
Tabela 6.6 – medição com corrente de injeção de 10 mA.....	70
Tabela 6.7 – medições com o prego na raiz .....	70

# **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT - Associação Brasileira de Normas técnicas

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

DDP - Diferença de potencial

NBR - Norma Brasileira

UnB - Universidade de Brasília

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

A propagação de corrente elétrica no solo dá origem a diferenças de potenciais, semelhante a que ocorre com a corrente em um arranjo de resistores. Considerando o solo discretizado e tomando-se dois pontos definidos, tem-se a tensão de passo como a DDP entre esses pontos.

A corrente elétrica no solo pode advir de atividades comerciais ou de fenômenos naturais. Acidentes com linhas de transmissão e de distribuição injetam correntes no solo, assim como as descargas atmosféricas. Os danos provocados por esses eventos suscitam preocupações principalmente quando envolvem seres vivos, notadamente os seres humanos nos centros urbanos e a mortandade de cabeças de gado no meio rural. Há evidências de maior quantidade de perda de gado nas proximidades de árvore e de cerca metálica por constituírem pontos de injeção e propagação de corrente para o solo. Essas condições propiciam danos causados pelas correntes que circulam através de suas patas, devido à tensão de passo. A situação é agravada pelo fato de que normalmente as patas dos animais estabelecem um bom contato com o solo, principalmente quando está úmido [1].

Segundo levantamento feito pelo Grupo de Eletricidade Atmosférica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (ELAT/INPE), utilizando a Internet, apontou que de 2010 a 2019 morreram 2.973 cabeças de gado atingidas por raios no Brasil. Um número 3,3 vezes maior que o número de pessoas vítimas do fenômeno, que somaram 898 mortes no mesmo período. Isso porque diferentemente dos casos de mortes de pessoas por descargas elétricas, onde geralmente morre uma em cada evento, no caso dos animais a média é de que 18 cabeças de gado morrem por evento.

No período estudado, a perda estimada pelas mortes dos animais é de cerca de 15 milhões de reais, ou seja, um prejuízo médio de cinco mil reais por morte de animal aos criadores. Porém, acredita-se que o número real de mortes e, conseqüentemente, dos prejuízos, devam ser maiores, pois alguns casos podem não ter sido divulgados na Internet. Uma estimativa baseada na variação anual das mortes no período do levantamento sugere que o

número real de mortes pode estar em torno de quatro mil cabeças de gado e os prejuízos em torno de 20 milhões de reais [2].

Notadamente na fazenda, isso desperta uma certa preocupação, visto que não é considerada a heterogeneidade do solo como fator que também contribui para a tensão de passo e, conseqüentemente, a morte desses gados. Levando isso em consideração, esse trabalho mostra que em solos heterogêneos compostos principalmente por raízes de árvore e terra, existe um potencial maior de ocorrer tensão de passo, uma vez que a propagação de corrente elétrica no solo acaba não sendo uniforme. Nesse sentido, será abordado e explorado aspectos qualitativos e quantitativos que contribuem para ocorrer tensão de passo com simulações e teste de campo e em especial será mostrada uma nova forma de cálculo de tensão de passo a partir de descargas atmosféricas considerando seções do solo. A Figura 1.1 ilustra um caso de morte dos gados por tensão de passo, segundo a reportagem veiculada em [3]. O fazendeiro dono das cabeças de gado disse: "O gado estava embaixo do pé de pequi. De 70, morreram 41. Meu amigo estava em uma chácara próxima quando caiu o raio e matou uma porca dele. Ele ficou contrariado e quando foi jogar fora viu as minhas novilhas caídas" [3]. Mais casos de morte por tensão de passo como esse pode ser visto em [4], [5] e [6].



Figura 1.1 - Gado morreu após queda de raio em Colméia (TO). [3]

## **1.2 Objetivo**

Esse trabalho tem como objetivo o estudo da tensão de passo e suas características com simulações e teste de experimentação em campo analisando a nova abordagem para o cálculo de tensão de passo que leva em consideração a heterogeneidade do solo em comparação com a formulação convencional que considera o solo apenas homogêneo.

## **1.3 Estruturação do trabalho**

Este trabalho é composto por 8 capítulos. O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica explorando como ocorre a tensão de passo e abordando os aspectos que a influenciam ou que estão associados de alguma forma a esse fenômeno. O terceiro capítulo apresenta a abordagem tradicional, enquanto o quarto destaca a nova abordagem. No quinto capítulo concentra-se nas simulações computacionais relacionadas a ambas as abordagens. No sexto capítulo é exposto o teste em campo também das duas abordagens em ordem cronológica de realização. As análises dos resultados das simulações e dos testes em campo são expostas no sétimo capítulo. O oitavo capítulo engloba as considerações finais e sugestões de trabalho futuro.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Tensão de passo: preliminares

Com base na Lei de ohm, uma corrente elétrica em uma resistência dá origem à diferença de potencial como ilustrado na figura 2.1.  $V_{ab}$  é a diferença de potencial no componente R devido a corrente I.

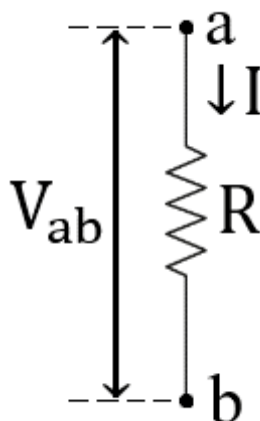


Figura 2.1 - Representação de um resistor com diferença de potencial associada (autoria própria)

$$V_{ab} = R \cdot I \quad (2.1)$$

Da mesma forma, pode-se afirmar que entre dois pontos do solo existe uma resistência elétrica associada e, quando ocorre a passagem de corrente elétrica entre esses 2 pontos, existe também uma diferença de potencial correspondente. Genericamente, essa diferença de potencial é denominada tensão de passo. Como ilustrado na Figura 2.2, uma corrente injetada no solo se propaga em todas as direções. Além disso, em cada direção existe também uma resistência associada que com a passagem de corrente dá origem a uma diferença de potencial.

Considerando uma descarga atmosférica no centro da Figura 2.2 na direção de  $R_3$  tem-se a tensão de passo. Porém, caso os pés estejam em pontos com uma mesma resistência associada até o centro  $R_1 = R_2$  e suponhamos que corrente injetada se espalhe uniformemente pelo solo de tal forma que a mesma intensidade de corrente que passa por  $R_1$  passe também por

$R_2$ , não haverá diferença de potencial entre os pontos e nesse caso a tensão de passo será nula. Essa afirmação é corroborada pela teoria de linhas equipotenciais.

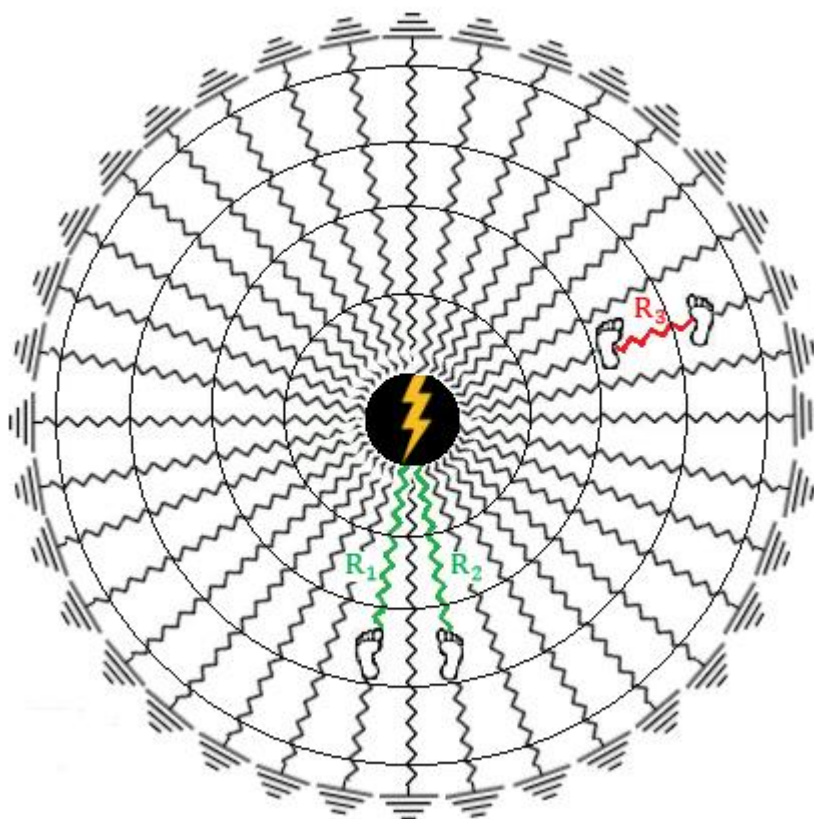


Figura 2.2 – Figura ilustrativa com simplificação e discretização do solo para o entendimento introdutório da tensão de passo. Os círculos pretos representam equipotenciais.

## 2.2 Tensão de passo: definições e conceitos normativos.

Com base na NBR 7117, a tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo, separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerado igual a 1,0 m. Porém, essa definição tem sentido restrito, uma vez que é limitada apenas ao espaçamento de 1 metro. Como um conceito, a tensão de passo é a diferença de potencial entre 2 pontos da superfície do solo separados por uma distância definida. Tal conceito, engloba uma variedade de situações em que caso ocorra uma diferença de potencial entre os pés de uma pessoa ou animal irá gerar uma corrente que em caso de intensidade significativa pode levar a óbito ou causar ferimentos a saúde que podem deixar sequelas.

Essa diferença de potencial no solo pode ocorrer devido a diversas situações: descargas atmosféricas, cabo de alta tensão partido em contato com o solo ou um projeto mal elaborado

de malha de aterramento de subestação, ou um condutor quebrado/exposto e energizado em contato com o solo. Na Figura 2.3, temos a ilustração do circuito equivalente envolvendo a tensão de passo gerada por uma corrente de falta com as definições dos parâmetros do circuito [7]:

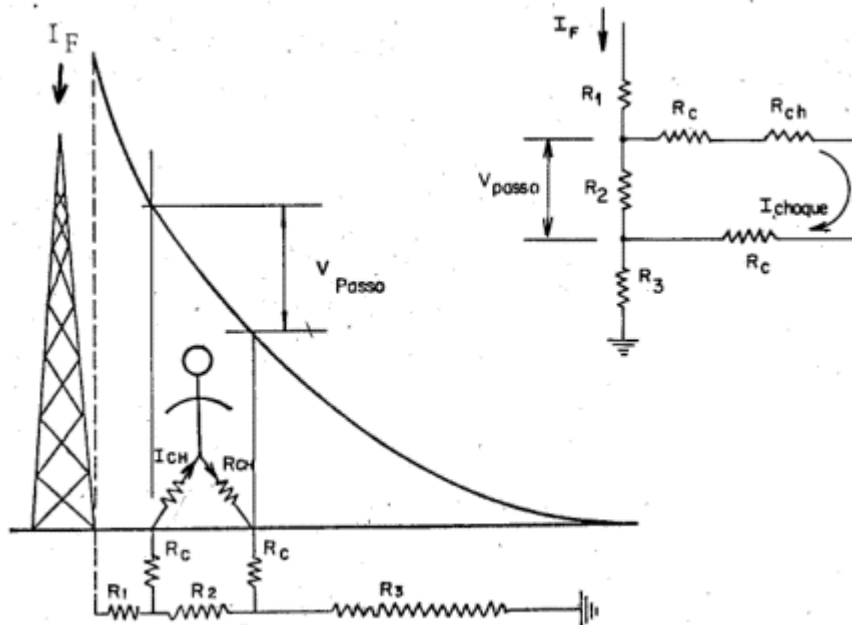


Figura 2.3 - Tensão de passo gerada por uma corrente de falta e o circuito equivalente [7]

Em que:

$R_{ch}$  é a resistência do corpo humano.

$R_c$  é a resistência de contato que pode ser considerada igual a  $3 \cdot \rho_s$  (resistividade superficial do solo), de acordo com recomendações da IEEE-80.

$I_{ch}$  ou  $I_{choque}$  é a corrente de choque pelo corpo humano.

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

Podemos observar que de acordo com a Figura 2.3, a tensão em cada ponto decresce de forma hiperbólica, o que será abordado e esclarecido mais a frente a razão da curva ter formato hiperbólico. Ainda, para uma descarga atmosférica o processo é similar conforme a Figura 2.4.

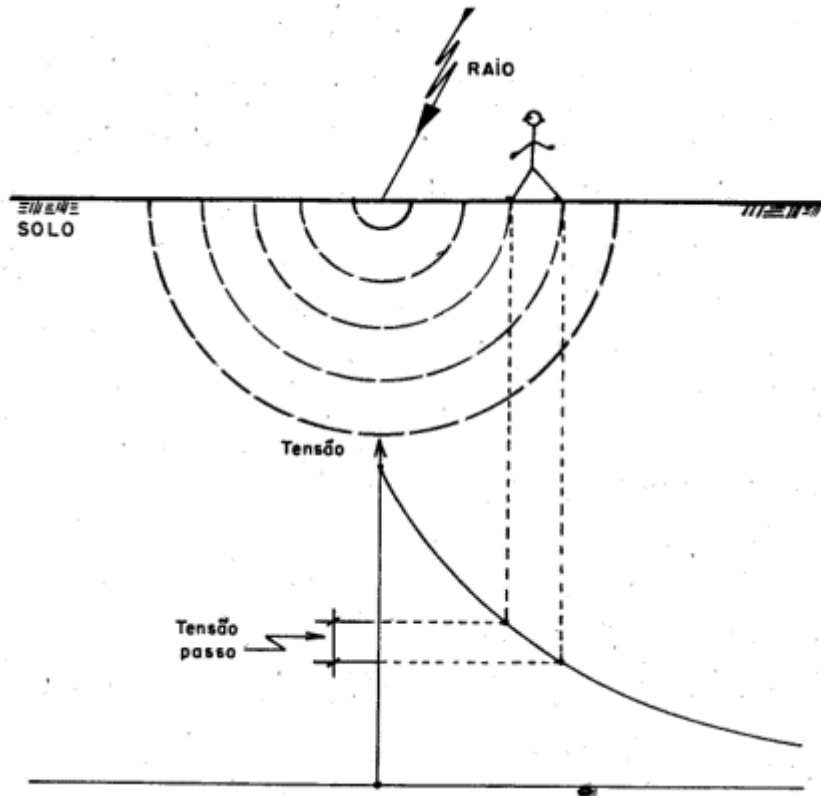


Figura 2.4 - Tensão de passo gerada por uma descarga atmosférica [7]

Podemos observar que a descarga atmosférica está gerando curvas equipotenciais em formato circular, para cada raio de circunferência em torno do ponto de injeção de corrente, isto é, o ponto onde a descarga atmosférica atinge temos uma equipotencial associada. Assim, a tensão de passo será a diferença de potencial entre 2 pontos, cada uma deles em equipotenciais diferente ou a mesma equipotencial resultando em uma tensão de passo de valor 0. Porém, essa situação ocorre apenas quando o solo é composto do mesmo material em todos os seus pontos, o que na maioria das vezes não é o que costuma ocorrer, uma vez que o solo é heterogêneo com raízes de árvore, terra, pedras, dentre outros.

Para um melhor entendimento, há o conceito de GPR (*Ground Potential Rise*) ou aumento do potencial no solo é um fenômeno que ocorre quando corrente elétrica é injetada no solo. Isso normalmente é causado quando subestações ou torres de alta tensão falham, ou quando ocorrem descargas atmosféricas (corrente de falha). Quando correntes de grande magnitude entram no solo a partir de um sistema de aterramento, não apenas o potencial elétrico do sistema de aterramento aumentará, mas também o solo circundante. As tensões produzidas por um evento de elevação do potencial no solo podem ser perigosas tanto para o pessoal quanto para o equipamento.

Conforme descrito, o solo possui um parâmetro conhecido como resistividade do solo, que permitirá que um gradiente de potencial elétrico ou queda de tensão ocorra ao longo do caminho da corrente de falta no solo. As tensões de passo resultantes farão com que correntes fluam para todo e qualquer corpo condutor aterrado próximo, incluindo concreto, canos, fios de cobre e pessoas [8].

## **2.3 Tensão de passo e o aterramento elétrico**

No que se refere a tensão de passo envolvendo sistemas de aterramentos, quando ocorre uma falta em uma torre ou subestação, a corrente entrará na terra. Com base na distribuição de resistividade variável no solo (normalmente, assume-se um solo com camadas horizontais), ocorrerá uma distribuição de tensão correspondente.

A queda de tensão no solo ao redor do sistema de aterramento pode representar perigo para o pessoal que estiver nas proximidades do sistema de aterramento. O pessoal que estiver sobre a direção do gradiente de tensão pode estar sujeito a tensões perigosas. No caso de potenciais de passo ou tensão de passo, a eletricidade fluirá se existir uma diferença de potencial entre as duas pernas de uma pessoa. Tensões de passo podem ocorrer a uma distância significativa de qualquer local. Quanto mais corrente for injetada no solo, maior será o perigo.

A resistividade e a estratificação do solo desempenham um papel importante no quão perigosa pode ser uma falha que ocorre em um local específico. Altas resistividades do solo tendem a aumentar a tensão de passo. Uma camada superior de alta resistividade e uma camada inferior de baixa resistividade tendem a resultar nas tensões de passo mais altas próximas ao eletrodo de aterramento: a camada inferior de baixa resistividade extrai mais corrente do eletrodo através da camada de alta resistividade, resultando em grandes quedas de tensão perto do eletrodo. Mais longe do eletrodo de aterramento, o pior cenário ocorre quando o solo tem camadas superiores condutoras e camadas inferiores resistivas: neste caso o tempo de eliminação da falha também é um fator importante a considerar. Quanto mais tempo a concessionária de energia elétrica levar para eliminar a falha, maior será a probabilidade de um determinado nível de corrente causar fibrilação no coração humano [9] devido a tensão de passo.

Avançando, para melhor entendimento e aprofundamento no entendimento de tensão de passo, temos o seguinte circuito equivalente da norma NBR 15751:



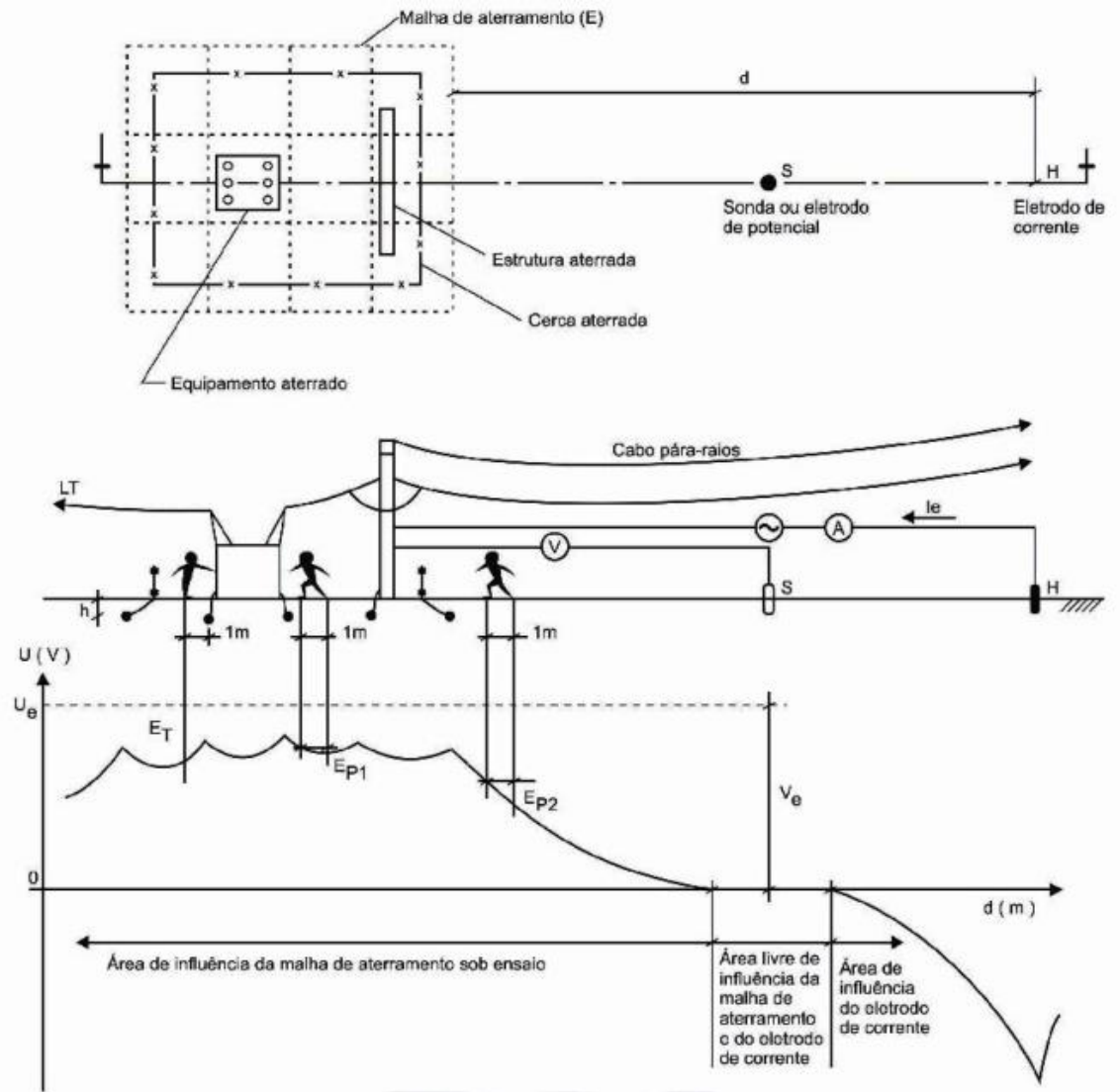


Figura 2.5 - figura representando o processo de funcionamento de um sistema de aterramento [10]

Podemos dizer que o aterramento é fundamental, pois ele é o meio de baixa resistência, quando comparado com o solo, para corrente fluir em caso de falhas, evitando choque elétricos, danos a equipamentos e incêndios. Além disso, há outros benefícios em que a malha de aterramento ajuda a distribuir uniformemente a corrente de falta pelo solo, impossibilitando potenciais perigosos de tensão em determinados locais na região em que a malha de aterramento se encontra, com isso, a tensão tende a ser mais uniforme para os pontos da região da malha o que diminui a tensão de passo, que é a diferença de tensão entre 2 pontos conforme a Figura 2.5.

Outrossim, na norma NBR 5419 que trata as orientações e procedimentos para proteção dos sistemas contra descargas atmosféricas, temos a tensão de passo sendo um dos parâmetros

tidos para o estabelecimento das medidas de proteção apropriadas para as estruturas com intuito de limitar a tensão de passo a um nível seguro prevenindo, portanto, dos riscos de acidentes, caso ocorra descargas atmosféricas.

## 2.4 Tensão de passo: aspectos históricos

O Doutor Charles F. Dalziel, referência nos estudos dos impactos da eletricidade em animais e humanos, publicou artigos que mostram os efeitos para saúde humana que correntes elétricas para determinados valores de tempos de exposição podem causar. Com base em seus estudos, concluiu que 99,5% de todas as pessoas podem suportar, com segurança, uma corrente com magnitude e duração determinadas pela seguinte fórmula:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (2.1)$$

Em que  $k$  é a constante empírica relativa à energia de choque elétrico tolerada por uma determinada porcentagem de uma determinada população. Para pessoas pesando aproximadamente 50 kg, Daziel descobriu um valor de  $k = 0,116$

$$I_B = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \text{ para } 50 \text{ kg de peso corporal} \quad (2.2)$$

Já para pessoas de 70 kg de peso corporal o valor é de  $k = 0,157$ :

$$I_B = \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \text{ para } 70 \text{ kg de peso corporal} \quad (2.3)$$

O parâmetro  $t_s$  é o tempo de exposição ao choque que deve estar no intervalo de 0,03 a 3 segundos (s) [11]. Nesse sentido, a norma internacional IEC 60479-1 que trata da segurança elétrica em relação aos efeitos da corrente elétrica no corpo humano mostrado na Figura 2.6 de corrente elétrica que um indivíduo é submetido em função do tempo de exposição desse processo.

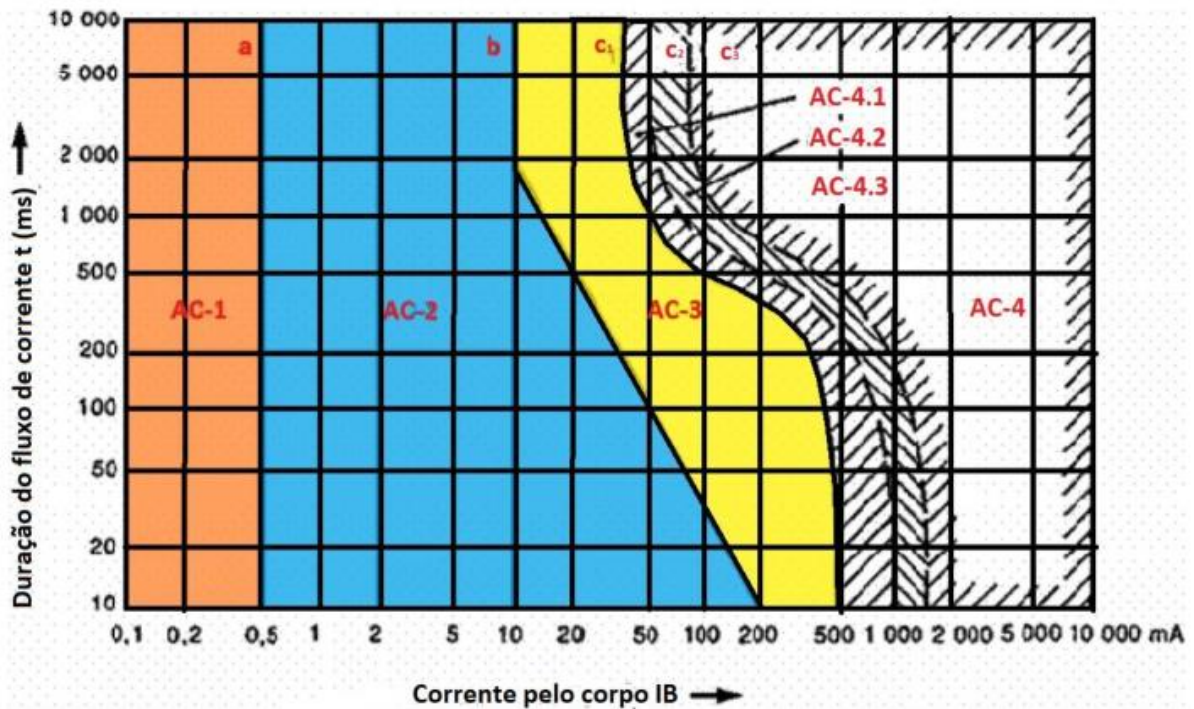


Figura 2.6 - Zonas convencionais de tempo/corrente de efeitos de correntes em uma pessoa (percurso mão esquerda ao pé) [12]

Cada região possui riscos associados a saúde humana. A Figura 2.7 detalha esses perigos.

**Time/current zones for AC 15 Hz to 100 Hz for hand to feet pathway – Summary of zones of Figure**

Zones	Boundaries	Physiological effects
AC-1	Up to 0,5 mA curve a	Perception possible but usually no 'startled' reaction.
AC-2	0,5 mA up to curve b	Perception and involuntary muscular contractions likely but usually no harmful electrical physiological effects.
AC-3	Curve b and above	Strong involuntary muscular contractions. Difficulty in breathing. Reversible disturbances of heart function. Immobilization may occur. Effects increasing with current magnitude. Usually no organic damage to be expected.
AC-4 <sup>a</sup>	Above curve $c_1$ $c_1-c_2$ $c_2-c_3$ Beyond curve $c_3$	Patho-physiological effects may occur such as cardiac arrest, breathing arrest, and burns or other cellular damage. Probability of ventricular fibrillation increasing with current magnitude and time. AC-4.1 Probability of ventricular fibrillation increasing up to about 5 %. AC-4.2 Probability of ventricular fibrillation up to about 50 %. AC-4.3 Probability of ventricular fibrillation above 50 %.

<sup>a</sup> For durations of current flow below 200 ms, ventricular fibrillation is only initiated within the vulnerable period if the relevant thresholds are surpassed. As regards ventricular fibrillation, Figure 20 relates to the effects of current which flows in the path left hand to feet. For other current paths, the heart current factor has to be considered.

Figura 2.7 - Efeitos fisiológicos para cada zona do gráfico anterior [12]

Sabe-se que na norma o cálculo da tensão de passo é feito primordialmente a partir das tensões envolvendo a rede de distribuição ou da corrente calculadas a partir das equações dessa subseção. No entanto, nesse trabalho o cálculo da tensão de passo é feito fundamentalmente a partir da corrente injetada no solo.

## 2.5 Tensão de toque

É a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 metro da base da estrutura [7]. A estrutura metálica pode ser, por exemplo, um poste energizado, ou uma torre metálica, ou ainda um equipamento tal como uma máquina de lavar energizada devido uma proteção elétrica mal projetada ou outras estruturas. Em uma definição mais generalista, pode-se desconsiderar a distância de 1 metro e as mãos devem estar em contato com um objeto energizado, independente de ser estrutura metálica ou não. Na Figura 2.8 temos a ilustração de uma situação envolvendo tensão de toque em conjunto com o circuito equivalente.

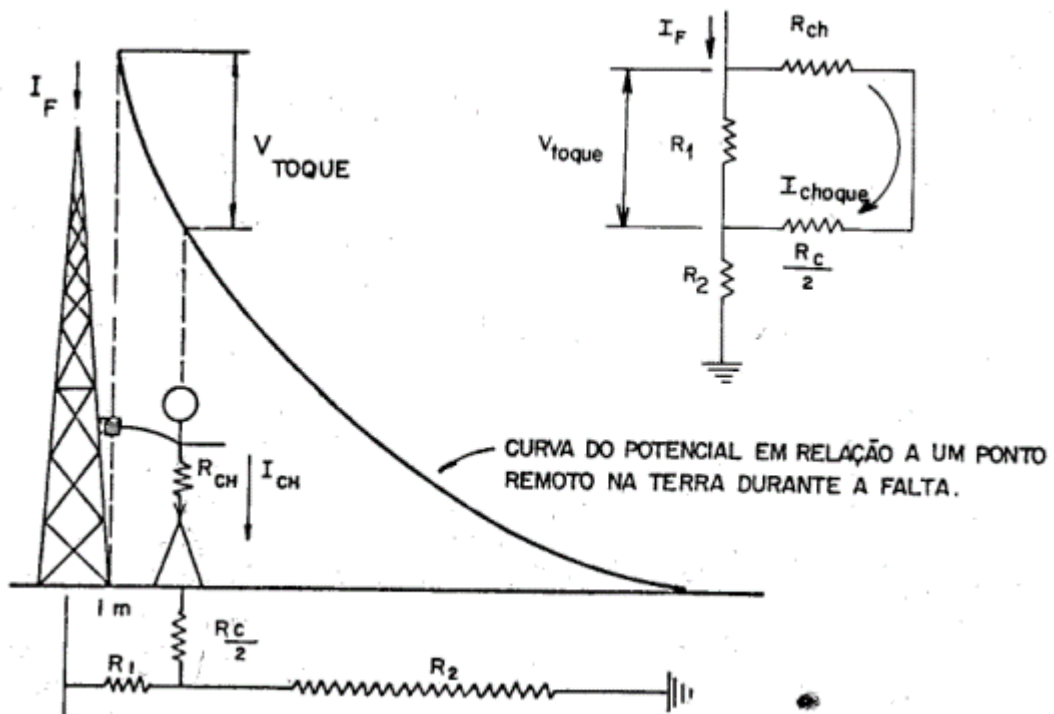


Figura 2.8 – exemplo de tensão de toque [7]

A partir da Figura 2.8 toma-se o seguinte circuito equivalente:

$$V_{toque} = \left( R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_{choque}$$

Em que:

$R_{ch}$  é a resistência do corpo humano considerada.

$R_c$  é a resistência de contato entre os pés da pessoa e o chão.

$I_{choque}$  corrente de choque pelo corpo humano.

$R_1$  e  $R_2$  são as resistências dos trechos de terra considerados.

Nota: A descrição no exemplo acima sofreu algumas modificações do tipo omissões do exemplo dado em [7] com objetivo de nessa seção dar ênfase apenas a descrição do conceito de tensão de toque para melhores entendimentos.

## 2.6 Efeitos da corrente na saúde

INFLUÊNCIA DA CORRENTE

I (m A)	REAÇÃO FISIOLÓGICA		CONSEQUÊNCIA	SALVAMENTO	RESULTADO FINAL MAIS PROVÁVEL
	C.A.	C.C.			
ATE 25	ATE 80	1 mA (C.A)-Limiar da sensação/sens. de formigamento 5-15 mA(C.A)-Contração muscular 15-25 mA(C.A)-Contr. Vio lenta impossib. de soltar o eletrodo. Prob. Respiratório	Se a corrente for próxima 25 mA --- pode haver Asfixia e conseq. Morte Aparente.	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
25-80	80-300	- Sensação Insuperável - Contrações Violentas - Asfixia	MORTE APARENTE	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
>80	>300	- Asfixia Imediata - Fibrilação Ventric. - Alteração Musculares (Químicas). - Queimaduras	MORTE APARENTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA	CASO LEVADO AO HOSP. E FEITO A DESFIBRILAÇÃO -- RESTABELECIMENTO
CORRENTE DA ORDEM DE AMPERES		- Queimaduras (Efeito Térmico). - Necrose dos tecidos - Fibrilação Ventric. - Asfixia Imediata - Danos Posteriores Resultado do Produto da Eletrolise	- MORTE APARENTE - DEPENDENDO DA EXTENSÃO DAS QUEIMADURAS, SE QUELAS OU MORTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA - TRATAMENTO HOSPITALAR	- HOSPITAL - DESFIBRILAÇÃO - RECUPERAÇÃO DIFÍCIL - ATROFIA MUSCULAR - OUTROS DANOS

Tabela 7.7.1: Efeito da Corrente no Corpo Humano

Figura 2.9 – tabela dos efeitos da corrente elétrica sobre o corpo humano [7]

A tabela apresenta apenas uma estimativa do efeito da corrente no corpo humano. O valor da corrente elétrica para causar determinado efeito no corpo humano é muito variado. Portanto, é difícil fazer uma correlação dos efeitos através de equações matemáticas.

## **2.7 Descargas atmosféricas**

Descargas atmosféricas, comumente chamadas como raio, é uma “faísca gigante” de eletricidade na atmosfera entre as nuvens, o ar ou o solo. Nos estágios iniciais de desenvolvimento, o ar atua como um isolante entre as cargas positivas e negativas na nuvem e entre a nuvem e o solo. Quando as cargas opostas se acumulam o suficiente, essa capacidade isolante do ar se rompe e há uma rápida descarga de eletricidade que conhecemos como raio. O raio equaliza temporariamente as regiões carregadas na atmosfera até que as cargas opostas se acumulem novamente.

O raio pode ocorrer entre cargas opostas dentro da nuvem de tempestade (relâmpago intra-nuvem) ou entre cargas opostas na nuvem e no solo (relâmpago nuvem-solo). O raio é um dos mais antigos fenômenos naturais observados na Terra. Pode ser visto em erupções vulcânicas, incêndios florestais extremamente intensos, detonações nucleares de superfície, fortes nevascas, grandes furacões e, obviamente, tempestades [13].

## **2.8 Interação entre descargas atmosféricas e os seres vivos**

Existem seis maneiras diferentes pelas quais os humanos podem ser afetados por um raio que são, além da tensão de passo e tensão de toque explanadas anteriormente, a descarga direta, a descarga indireta lateral, o líder escalonado e choque ondas. Entendê-las é de certa forma importante uma vez que algumas delas envolvem injeção de corrente no solo e também quando ocorre o fenômeno de tensão de passo através de descargas atmosféricas, comumente, essas situações vêm acompanhada com algumas dessas formas de interação elétrica com o ser vivo também.

### **2.8.1 Descarga direta**

Durante uma descarga direta em um ser humano, conforme mostrado na figura abaixo, a corrente que surge na base do canal relâmpago é injetado no corpo a partir do ponto de descarga. O ponto de descarga é geralmente a cabeça ou a parte superior do corpo. Quando uma pessoa é atingida por um raio nessa situação, a corrente que passa pelo corpo também começa

com um valor pequeno e continua a aumentar muito rapidamente. O corpo age como um circuito resistivo, e, portanto, haverá uma diferença de tensão em todo o corpo (ou seja, entre a entrada ponto da corrente, provavelmente a cabeça, e o ponto de saída da corrente, provavelmente os pés). À medida que a corrente do raio aumenta, essa diferença de potencial no corpo também aumenta. Quando esta diferença de tensão atinge um certo valor crítico, leva a criação de um caminho de descarga ao longo da pele externa do corpo. A resistência desse caminho de descarga é muito menor do que o do corpo e, como consequência, uma grande fração da corrente do raio passará por esse caminho. Isso reduz a corrente passando pelo corpo para um valor muito pequeno [14].

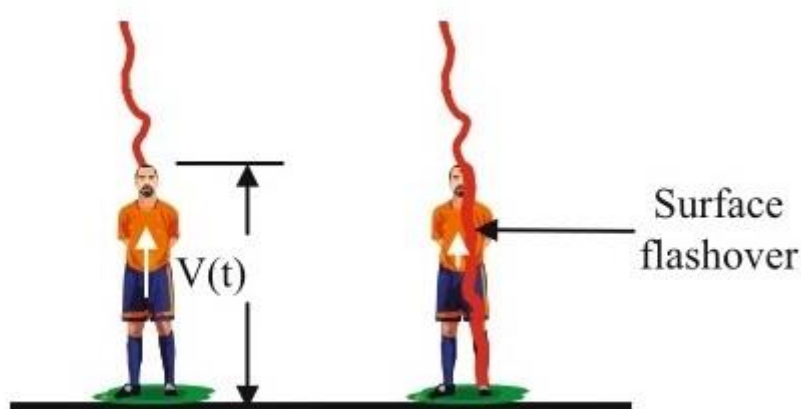


Figura 2.10 - Ilustração de um ser humano sendo atingido por uma descarga direta [14].

## 2.8.2 Descarga indireta lateral

Ocorre quando um raio atinge uma árvore, por exemplo, a corrente injetada pelo raio flui ao longo do tronco até o solo. Se uma pessoa está perto de uma árvore atingida por um raio, uma diferença de potencial é criada entre a árvore e a pessoa. Essa diferença de potencial é causada pela tensão ao longo da árvore e a indução magnética entre a árvore e o humano, ou ambos os efeitos. É importante notar aqui que uma grande fração das lesões causadas por raios acontecem ao ar livre são causadas por descargas indiretas laterais de árvores enquanto as árvores estão sendo usadas como abrigo da chuva. Pode-se experimentar descargas indiretas laterais não apenas do tronco de uma árvore, mas também de galhos de uma árvore atingida por um raio. Além disso, dentro de edifícios não equipados com sistemas de proteção contra descargas elétricas adequados pode ocorrer também descargas indiretas laterais. A corrente do raio, em sua busca pelo caminho de menor impedância para o chão, pode encontrar o caminho

através do corpo de uma vítima ser menos resistivo. Por exemplo, uma pessoa pode receber descargas indiretas laterais dentro de casas de canos de água, aparelhos elétricos ou telefones terrestres. A maioria das lesões relacionadas a raios que acontecem dentro de edifícios são realmente causadas por essas descargas indiretas laterais.

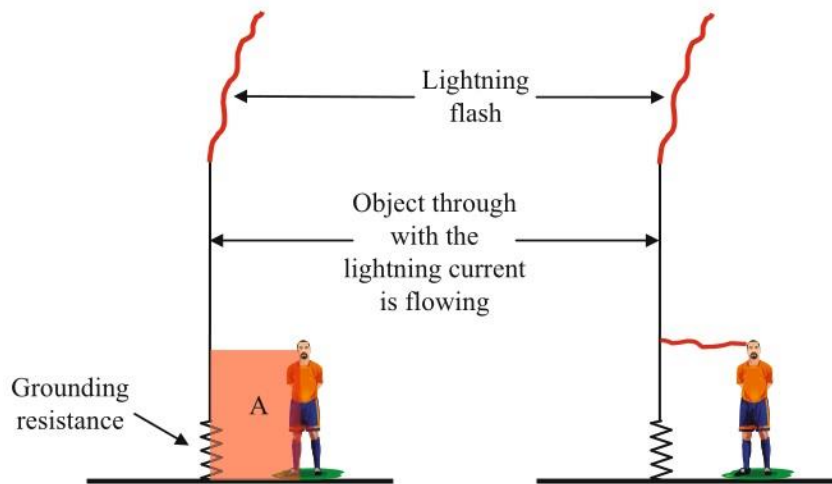


Figura 2.11 - Ilustração de uma pessoa sendo atingida por uma descarga indireta lateral de uma estrutura metálica que está recebendo uma descarga atmosférica [14].



Figura 2.12 - Ilustração de uma pessoa sendo atingida por um descarga elétrica lateral oriunda de uma árvore que está sendo atingida por uma descarga atmosférica. [14]

### 2.8.3 Líder Escalonado

Outra maneira pela qual uma pessoa pode receber ferimentos de um raio é através de uma corrente líder escalonado ou líderes conectantes. Quando um líder escalonado chega a



aproximadamente a algumas centenas de metros do solo, vários líderes conectantes podem subir de vários objetos aterrados em direção ao líder escalonado que se move para baixo. Apenas um desses líderes conectantes faz a conexão entre o líder escalonado e o chão [14]. A Figura 2.13 mostra esse fenômeno.

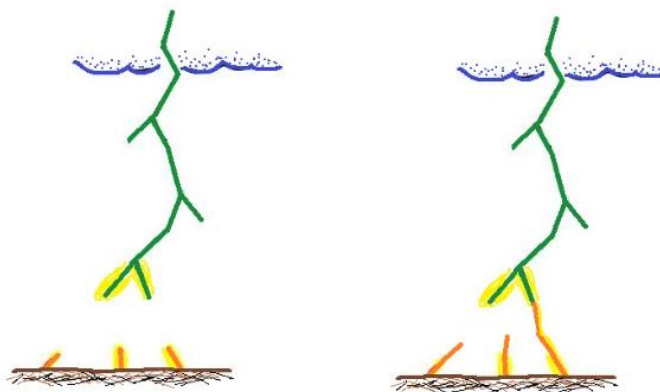


Figura 2.13 – ilustração de líderes conectantes e líder escalonado. [15]

## 2.8.4 Ondas de choque

As lesões também podem ser causadas por ondas de choque criadas por um canal de raios. Durante um raio, a temperatura do canal sobe para aproximadamente de 25273 a 30273 graus Celsius em alguns microssegundos e, como resultado, a pressão no canal pode aumentar para vários ambientes. A rápida expansão do ar resultante cria uma onda de choque. Esta onda de choque pode ferir um ser humano localizado nas proximidades de um relâmpago. A pressão associada à onda de choque diminui com a distância rapidamente, de modo que a onda de choque pode ferir um ser humano somente quando localizada muito perto da descarga direta [14].

## 2.9 Características do solo

As características do solo influenciam na sua condutividade, por exemplo, solos mais úmidos são mais condutores ao passo que solos mais secos são mais resistivos e, portanto, menos condutores. Nesse sentido, compreender como as características do solo afetam a sua condutividade, amplificando-a e atenuando-a, é importante, uma vez que afeta diretamente na intensidade da tensão de passo, que é o aspecto central do tema desse trabalho.

## 2.9.1 Composição do solo

A composição do solo varia de acordo com a localização específica de cada região no mundo. Nesse sentido, existem solos com as mais diversas composições, sejam com mais terra, areia, rochas, todos possuem uma capacidade de condução de eletricidade associada. Segundo a norma NBR 7117, o solo é um meio geralmente heterogêneo, de modo que o valor de sua resistividade varia de local para local em função do tipo, nível de umidade, profundidade das camadas, idade de formação geológica, temperatura, salinidade e outros fatores naturais, sendo também afetado por fatores externos, como contaminação e compactação [16]. Assim, sabendo que a condutividade é o inverso da resistividade, percebe-se a variabilidade na condutividade do solo em função dos diversos fatores que influenciam nesse processo.

A grande maioria dos solos não é homogêneo e, sim, formado por diversas camadas de resistividade e profundidade diferentes. Essas camadas, em virtude da formação geológica, são normalmente horizontais e paralelas a superfície do solo. Dessa forma são encontrados diferentes valores de resistividade nas diversas camadas do solo que provocam variação na dispersão da corrente [17]. Assim, para compreender a propagação de corrente elétrica em um meio, é fundamental compreender a estratificação do solo da região designada.

Comumente o solo é formado por camadas com resistividades variando de acordo com as características de cada nível. Essas camadas geralmente se encontram de forma horizontal no solo, conforme evidenciado na Tabela 2.1. O solo é constituído por diversas camadas, cada uma apresentando um certo valor de resistividade e uma espessura própria. O valor de resistividade do solo é determinado por meio de medições, cujos resultados recebem um tratamento matemático, de modo a se obter a estratificação do solo em camadas paralelas ou horizontais, de diferentes resistividades ( $r$ ) e de espessuras ( $e$ ) definidas. Essas camadas variam de composição, conforme o local. Existem camadas compostas de áreas, outras compostas de rochas, outras compostas de argila e assim sucessivamente.

<b>Tipos de solo</b>	<b>Faixa de resistividades <math>\Omega\text{m}</math></b>
Água do mar	menor que 10
Alagadiço, limo, húmus, lama	até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5 000
Calcário	500 – 5 000
Areia	1 000 – 8 000
Granito	1 500 – 10 000
Basalto	a partir de 10 000
Concreto	Molhado <sup>a</sup> : 20 – 100 Úmido: 300 – 1 000 Seco: 3 000 – 2 000 000
<sup>a</sup> A categoria “molhado” é típica de aplicação em ambientes externos. Valores inferiores a 50 $\Omega\text{m}$ são considerados altamente corrosivos.	

Tabela 2.1 – valores típicos de resistividades de alguns tipos de solo



Figura 2.14 – foto vertical do solo evidenciado a sua composição em camadas horizontais.

## 2.9.2 Resistividade do solo

A resistividade do solo é um parâmetro associado a aptidão do solo de resistir a passagem de corrente. Sua unidade de medida é ohms vezes metro ( $\Omega \cdot m$ ). Quanto a resistividade do solo, vários fatores a afetam. Dentre eles a umidade do solo, temperatura, compactação do solo e conteúdo dos sais e minerais. Denominada de resistividade do solo e tem o mesmo conceito de resistividade de um condutor elétrico que é dada em ( $\Omega \text{ mm}^2/m$ ) e que, por análise dimensional, representa o mesmo conceito físico [18]. Nas subseções seguintes os principais fatores que afetam a resistividade do solo serão explorados com mais detalhes. Porém, há dificuldade de se estabelecer a relação entre o conjunto de todos esses fatores e o comportamento da resistividade do solo em casos reais. Isso confere maior importância à medição de resistividade local para avaliação desse parâmetro [19].

## 2.9.3 Umidade do solo

Define-se a umidade ( $h$ ) de um solo como a razão entre a massa da água ( $Ma$ ) contida em um certo volume de solo e a massa da parte sólida ( $Ms$ ) existente nesse mesmo volume [20]:

$$h(\%) = \frac{Ma}{Ms} \cdot 100 \% \quad (2.2)$$

O solo úmido favorece a existência de íons devido à dissolução dos sais presentes no solo o que possibilita uma maior condução de corrente elétrica iônica. Já no solo mais seco há menos água, o que impede a formação de íons, fazendo com que a resistividade do solo seja maior, e conseqüentemente, a condutividade de corrente elétrica menor [7]. Segundo a referência em [19] para que a eletrólise se estabeleça é essencial a existência da água e dos sais que vão prover os íons da mistura. Assim, a condutividade do solo é sensivelmente afetada pela quantidade de água nele contida, sendo que o aumento da umidade do solo implica a diminuição da sua resistividade.

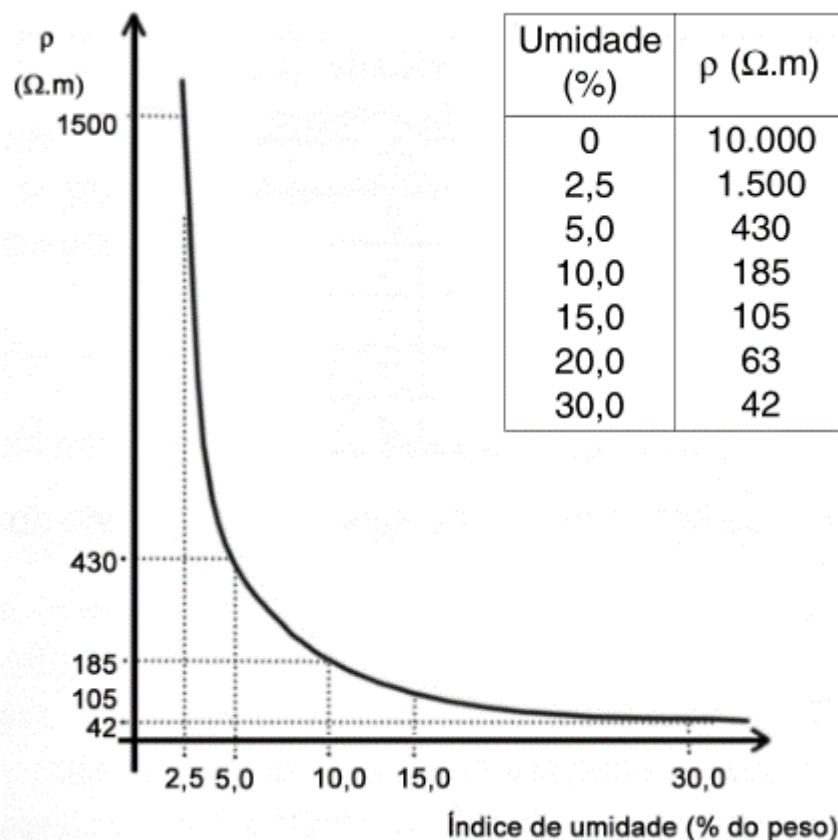


Figura 2.15 – Efeito da umidade na resistividade do solo arenoso.

Diante desses aspectos percebemos a relevância da umidade no comportamento da resistividade e derivadamente a influência na facilidade que o solo terá para conduzir corrente elétrica, fazendo também com que a diferença de potencial entre 2 pontos do solo, isto é, tenderá ser mais alta em solo menos úmidos e menor em solo mais úmidos, uma vez que a resistividade será maior e menor respectivamente. A Figura 2.15 mostra o efeito da umidade na resistividade do solo arenoso. Porém experiências, realizadas com diversos outros tipos de solo mostram que o comportamento para estes solos é similar ao descrito nessa curva [19].

## 2.9.4 Temperatura do solo

A temperatura influencia na resistividade do solo de forma não linear. A partir de um certo ponto, quando a temperatura aumenta, a resistividade também aumenta devido à evaporação da água no solo, o que diminui a umidade conforme explicado na subseção anterior. Assim sendo, o estado de vaporização deixa o solo mais seco com a formação de bolhas

internas, dificultando a condução de corrente, conseqüentemente, elevando o valor da sua resistividade [7].

Por outro lado, a partir de um certo ponto, quando a temperatura diminui, a resistividade também aumenta uma vez que a água tem coeficiente de temperatura negativo. Nesse sentido a resistividade do solo é sensivelmente influenciada pela água nele contida, sabendo-se que a água possui alto coeficiente negativo de temperatura, é razoável supor que a resistividade tende a crescer para uma diminuição da temperatura [19].

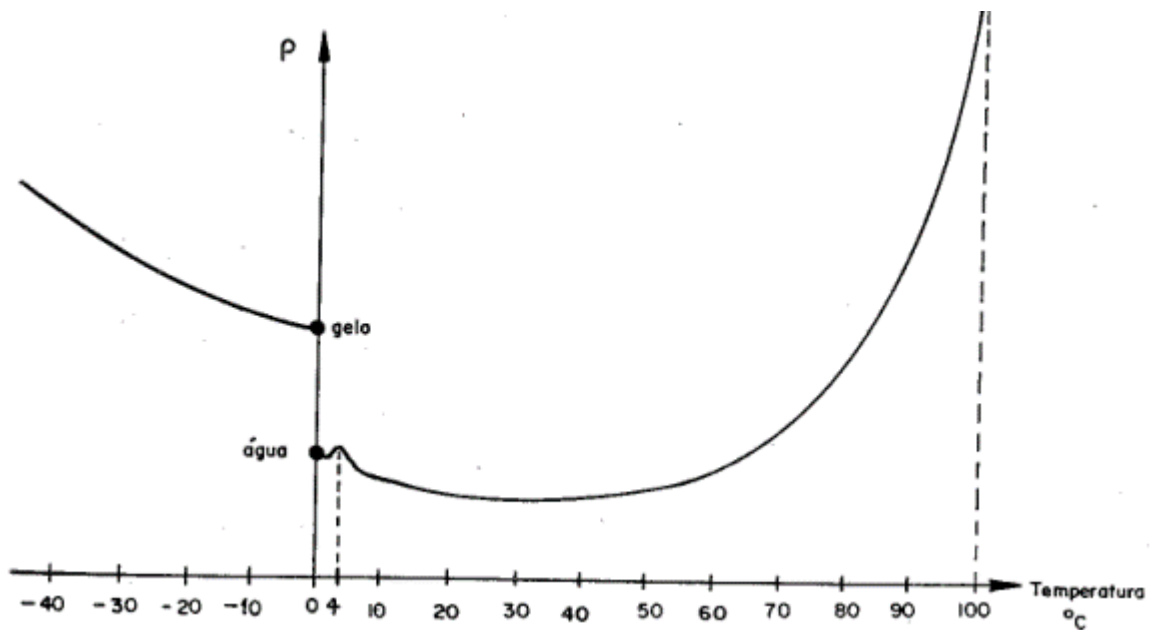


Figura 2.16 – Resistividade x Temperatura.

Temperatura (°C)	Resistividade (Ω.m) (solo arenoso)
20	72
10	99
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
-15	3.300

Tabela 2.2 -Variação da resistividade com a temperatura para o solo arenoso

## **2.9.5 Compacidade do solo**

Um solo, quando é compactado, tem seu volume reduzido, pois diminuem os vazios, e ele ganha resistência física, aumenta seu peso específico e resiste mais a eventuais esforços de recalque [21]. Nesse sentido, percebe-se no contexto de condução de corrente elétrica que ao diminuir os espaços em vazios ocorre um maior encadeamento entre a matéria e isso facilita a condução uma vez que não há espaços ociosos.

Pode-se dizer que a compactação do solo é caracterizada principalmente pelo aumento da densidade do solo e pela redução da macroporosidade. Portanto, solos compactados deverão apresentar menores valores de resistividade elétrica do solo [22]. Em outras palavras, quando um solo é mais compacto há mais continuidade entre a matéria e isso facilita a condução de corrente elétrica, correspondendo, portanto, a uma resistividade de menor valor [19].

## **2.9.6 Granulidade do solo**

A granularidade do solo está associada ao tamanho das partículas que o compõe. Essas partículas podem ser compostas por matéria orgânica, minério, dentre outros. Essa propriedade também influencia na condutividade do solo, sendo objeto de estudos científicos nesse sentido.

Para solos com diferentes tamanhos de partículas, o tamanho e a densidade das lacunas são diferentes. A condução elétrica do solo tem uma relação direta com essas lacunas internas, de modo que os tamanhos das partículas do solo podem também afetar os parâmetros elétricos do solo, dentre eles a resistividade e também a permissividade [23]. Da mesma maneira como ocorre na compacidade do solo, a granularidade também está associada a continuidade física do solo que contribui para uma maior condutividade elétrica. O solo fino tem a menor resistividade e permissividade e o solo misto tem as mais altas [23].

Em [19] são destacados dois aspectos associados a granulometria do solo que são a capacidade de retenção de água nas camadas do solo e continuidade física do solo. Nos dois aspectos, a presença de grãos de tamanhos variados tende a diminuir a resistividade, pois os grãos menores preenchem os vazios existentes entre os grãos maiores, provocando uma maior continuidade da massa do solo e maior capacidade de retenção da sua umidade.

## 2.9.7 Estrutura Geológica

A resistividade do solo depende da estrutura geológica do solo. Dependendo do tipo de solo pode ter qualquer valor numa faixa muito ampla de 10 a  $10^4 \Omega \cdot m$  [24]. A resistividade do solo varia principalmente devido à sua composição geológica, umidade, salinidade, temperatura, compactação e acidez [25]. Dificilmente a resistividade do solo é constante. Ela pode ser bastante variável em determinado local, uma vez que o solo é heterogêneo. Também pode variar a depender da direção considerada, pois o solo apresenta características anisotrópicas.

Assim, a resistividade pode variar dependendo da direção considerada e, para tratar do solo de um certo local, passa-se a atribuir-lhe o valor médio das resistividades das diversas partes que o compõem, denominado resistividade efetiva deste solo [19], [26] e [27]. Parece lógica a existência de uma correlação entre a resistividade do solo e sua estrutura geológica, quando são considerados os processos naturais de formação da crosta terrestre e a natureza dos materiais que a compõem.

A experiência mostra que o valor da resistividade em áreas de rochas muito antigas é elevada e que, geralmente, este valor decresce com a diminuição da idade das rochas. Entretanto, notam-se algumas exceções nesse comportamento. A Tabela 2.3 mostra faixas de valores de resistividade correspondentes a formações predominantes em determinados períodos geológicos [19] e [28]. O extrato da crosta terrestre, composto pelas camadas mais superficiais do solo, foi formado pela deposição de materiais provenientes da erosão de elevações, sobre as terras baixas, mares e lagos internos, e, também, pela acumulação de conchas e materiais orgânicos no fundo de poços profundos de água. Esses materiais, logo após sua deposição, foram firmemente compactados [19].



<b>Período</b>	<b>Resistividade características (<math>\Omega.m</math>)</b>
Pré-Cambriano e combinações de Pré-Cambriano e Cambriano	1.000 a 10.000
Combinações de Cambriano e Ordoviciano	100 a 1.000
Ordoviciano, Devoniano e combinações destes	50 a 600
Carbonífero, Triássico e combinações do Carbonífero com períodos mais recentes	10 a 300
Cretáceo, Terciário, Quaternário e combinações destes períodos	2 a 30

Tabela 2.3 – valores típicos de resistividade para diferentes períodos de tempo [19] e [28].

## **2.10 Influência da frequência nos parâmetros elétricos do solo**

### **2.10.1 Efeito da frequência sobre a resistividade elétrica do solo**

Para solos com alto teor de umidade o canal que transporta a maior parte da corrente é a solução eletrolítica. A variação da frequência de resistividade de solos com alto teor de umidade é bastante pequena. Em solos secos a resistividade decresce com o aumento da frequência pois no solo seco existem muitas lacunas de gás entre os grânulos do solo e cada lacuna de gás atua como um pequeno capacitor. Esses capacitores formam uma rede conectando-se em paralelo e em série. Com o aumento da frequência, a impedância desses capacitores torna-se menor. Como resultado, a corrente de deslocamento aumenta e a resistividade do solo diminui.

Em solo com baixo teor de umidade, os dois mecanismos condutores atuam. Em solos úmidos, quando a temperatura cai abaixo de zero, a solução congela e a resistividade pode aumentar muito. A condutividade de uma solução é melhor que a dos intervalos de gás, e a resistividade do solo seco é maior que a dos solos úmidos [23]. A Figura 2.17, mostra curvas

de variação dos valores de resistividade com a variação da frequência de um experimento feito por [23] em solo arenoso nas temperaturas de  $-15$  e  $20^{\circ}\text{C}$  com diferentes umidades com valores de 0, 1% e 10% [23].

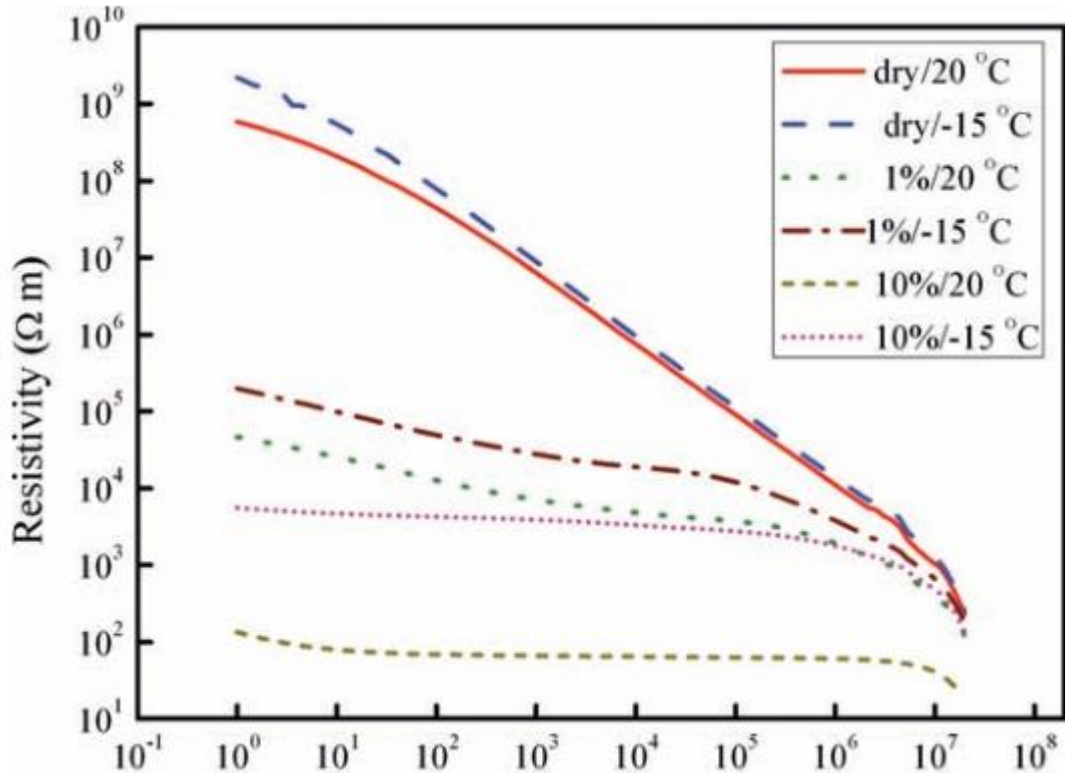


Figura 2.17 – resistividade em função da frequência

Do gráfico acima podemos concluir que:

- A resistividade do solo diminui com o aumento da frequência, especialmente para solo seco.
- Juntamente com a diminuição do teor de umidade do solo, a influência da frequência na resistividade do solo tem maior influência.
- A influência da temperatura na resistividade do solo aumenta com o crescimento da umidade.

## 2.10.2 Efeito da frequência sobre a permissividade elétrica do solo

Os fatores mais importantes na determinação da permissividade dielétrica de uma rocha são a porosidade e a saturação de água. O ar tem uma permissividade relativa de 1, enquanto os minerais têm permissividades relativas mais altas. Isto significa que para amostras secas, a permissividade dielétrica da rocha diminui à medida que a porosidade aumenta. Quando amostras de rochas estão saturadas com água, suas permissividades dielétricas podem aumentar drasticamente. Isto ocorre porque a água tem uma permissividade relativa de 80, maior do que as permissividades relativas dos minerais formadores de rochas [29]. Por fim, a permissividade relativa do solo diminui com o aumento da frequência [30].

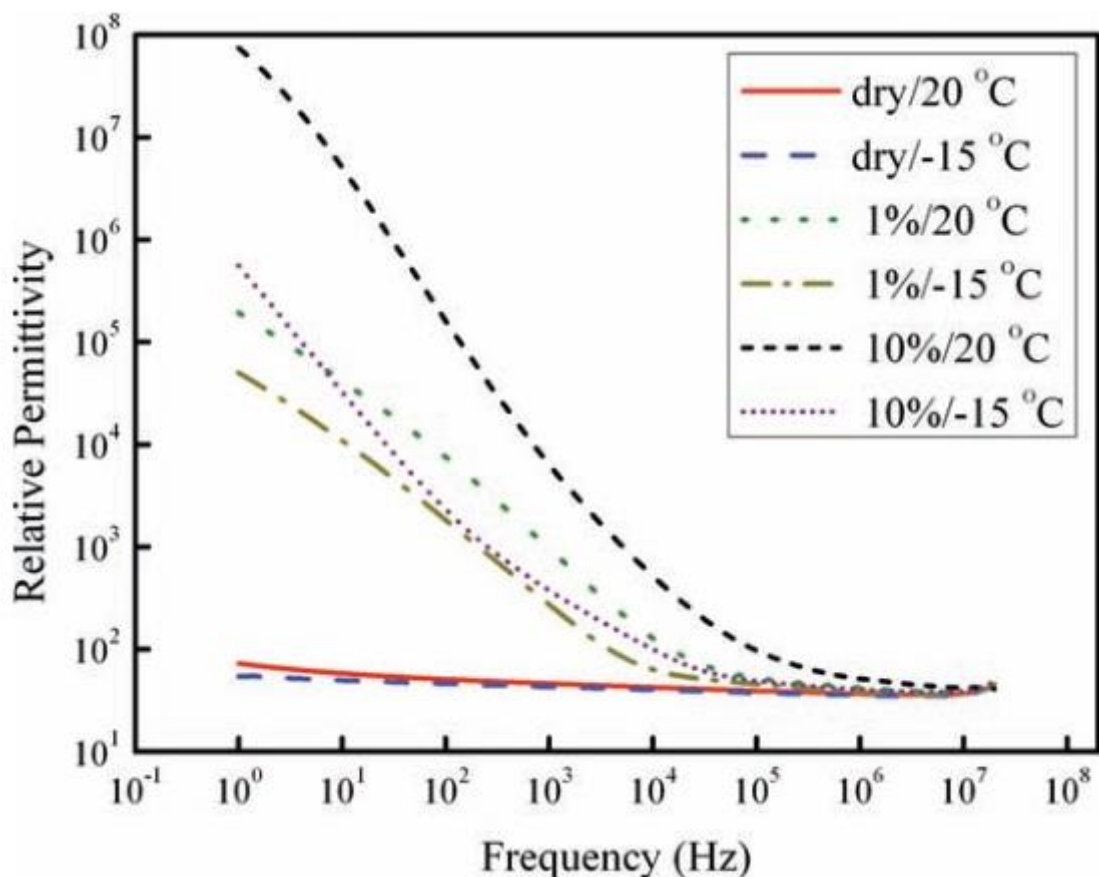


Figura 2.18 – permissividade em função da frequência

Do gráfico acima podemos concluir que:

- A permissividade do solo diminui com o aumento da frequência.

- a influência da frequência na permissividade do solo aumenta com o crescimento do teor de umidade do solo.
- A influência da temperatura na permissividade do solo cresce com a umidade.
- A permissividade do solo seco é menor que a do solo com alta umidade

### 3 ABORDAGEM TRADICIONAL PARA O CÁLCULO DE TENSÃO DE PASSO

Durante uma descarga atmosférica, correntes de grande intensidade, variando no tempo, são injetados no solo. A conexão entre as nuvens carregadas e o solo pode ser uma torre de linha de transmissão, um grande edifício, um poste, sistema para-raios ou uma árvore. Todos, sem exceção, fornecem uma injeção de correntes elétricas no solo. Genericamente, para uma dada corrente ( $I$ ) uniformemente distribuída em uma seção transversal ( $S$ ) de um meio, a densidade de corrente ( $J$ ) será uniforme e calculado pela corrente ( $I$ ) dividida pela área da seção transversal desse meio [31]:

$$J = \frac{I}{S} \text{ (A/m}^2\text{)} \quad (3.1)$$

Suponhamos que a corrente do raio se espalhe uniformemente em torno de um hemisfério, e o solo é uniforme e isotrópico. Neste caso, a corrente total que passa por qualquer hemisfério a qualquer distância radial  $r$  será igual a corrente injetada pelo raio. Suponha-se que não há nenhuma carga acumulada em qualquer lugar do solo [32]. Assim, a densidade de corrente passando através de qualquer hemisfério ( $J_h$ ), em qualquer momento  $t$  e qualquer a distância  $r$ , é dada por [31]:

$$J_h = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \hat{a}_r \text{ (A/m}^2\text{)} \quad (3.2)$$

No chão, as correntes levam a uma configuração de hemisfério, conforme ilustrado na figura abaixo:

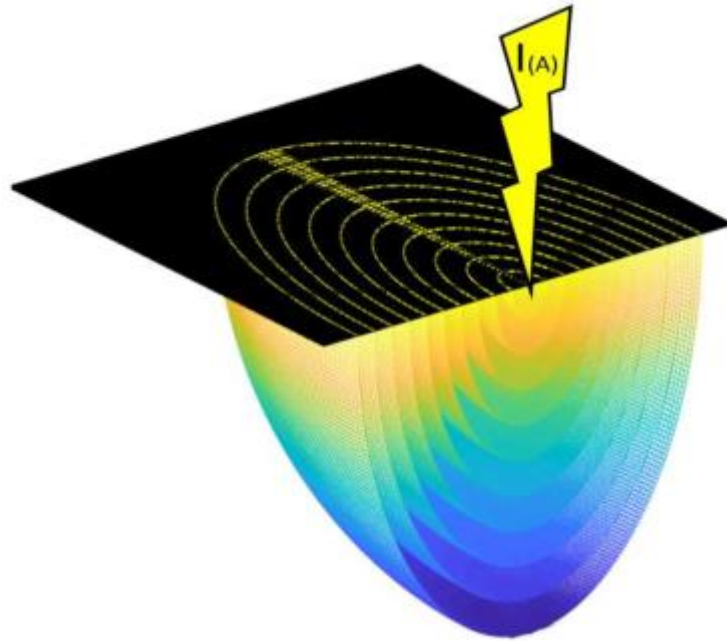


Figura 3.1 - Ponto de descarga atmosférica e distribuição em camadas hemisféricas. [31]

Temos a distância radial do centro da superfície plana circular do hemisfério. A superfície do hemisfério,  $S_h = 2 \cdot \pi \cdot r^2$ , representa a área de superfície subterrânea de um hipotético hemisfério concêntrico com o ponto de impacto do raio. Com a lei de Faraday e a relação  $E = \rho \cdot J$  segue que :

$$V_{step} = - \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = \int_a^b \rho \mathbf{J} \cdot d\mathbf{L} \quad (3.3)$$

Combinando a equação (3.2) com a equação acima e fazendo  $d\mathbf{L} = dr \hat{\mathbf{a}}_r$  obtém-se:

$$V_{step} = \int_a^b \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \hat{\mathbf{a}}_r \cdot dr \hat{\mathbf{a}}_r$$

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \int_a^b \frac{1}{r^2} \cdot dr \quad (3.4)$$

Considerando a figura 3.2:

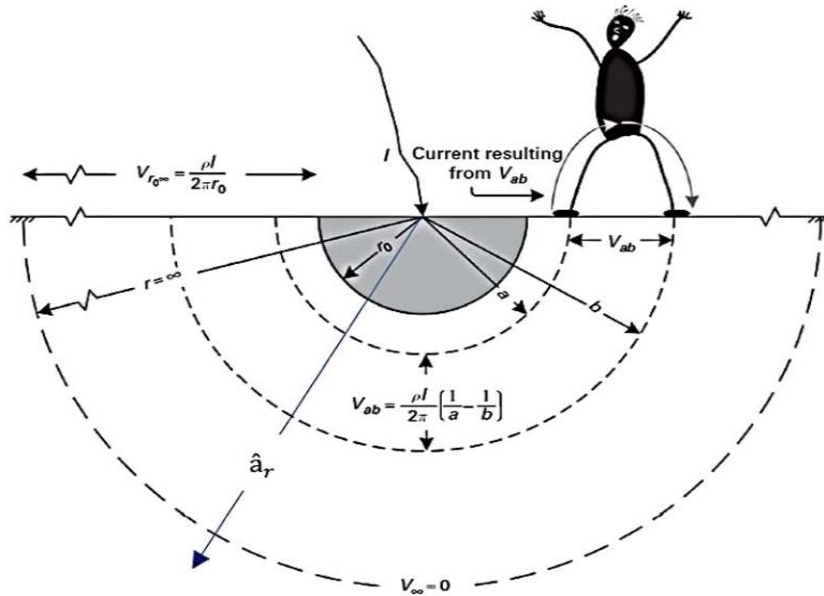


Figura 3.2 - Ilustração para o cálculo da tensão de passo. [33] e [31] .

Considerando a Figura 3.2 e integrando (3.5), obtém-se a equação:

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{r^{-2+1}}{-2+1} \right) \Big|_a^b$$

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{-1}{r} \right) \Big|_a^b$$

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \quad (3.6)$$

Onde  $a$  e  $b$  são raios de hemisférios separados pelo distância de um passo, para dimensionamento da tensão de passo.

Considerando a Figura 3.3, fazendo o primeiro contato da pessoa até o ponto de impacto do raio é igual à distância  $x$  do centro do hemisfério e a distância entre os pés é igual a  $s$ , ou seja:

$$s = b - a$$

$$a = d$$

Logo:

$$b = d + s$$

Temos:

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d + s} \right) \quad (3.7)$$

Portanto temos a tensão de passo convencional onde:

$V_{step}$  é a tensão de passo.

$\rho$  é a resistividade do solo ( $\Omega \cdot m$ ).

$I$  é a corrente injetada (A).

$d$  é a distância do ponto de injeção de corrente do ponto até o primeiro ponto do dispositivo em análise em metros (m)

$s$  distância entre os pontos do dispositivo sob análise em metros (m)

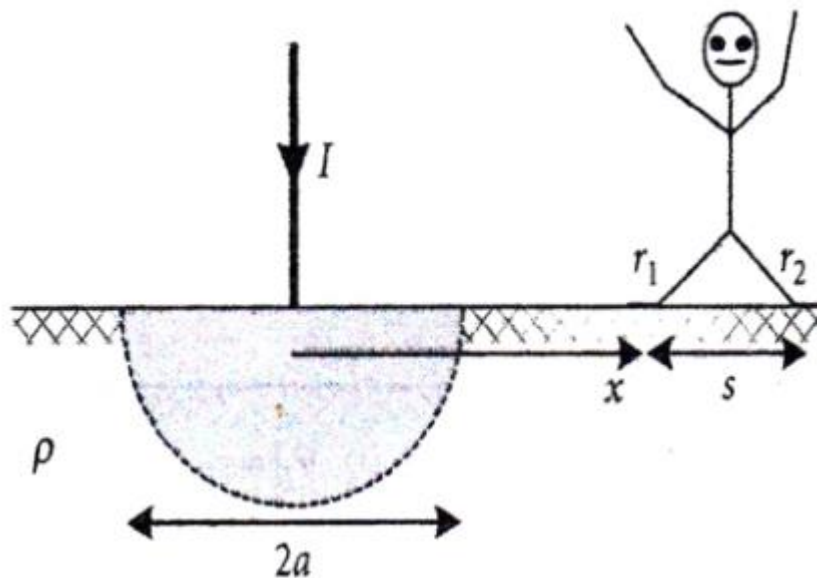


Figura 3.3 - Ilustração para o cálculo da tensão de passo. [34]

Nessa fórmula tradicional na equação (3.7) o autor apresenta algumas considerações alertando que ela deve ser usada com cautela, pois a fórmula se baseia em muitas suposições, embora possa fornecer uma análise rápida de aproximação para a tensão de passo. As suposições são:

- A corrente é considerada constante.
- A resistividade da terra é considerada constante.
- A impedância da fonte é desprezada.



- A resistência de contato entre os pés e a terra é negligenciado.
- Efeitos de carga do indivíduo na corrente distribuição é negligenciada.

## 4 NOVA ABORDAGEM PARA O CÁLCULO DE TENSÃO DE PASSO

O cenário para a dedução da expressão para a nova abordagem de cálculo de tensão de passo consiste em um ponto de injeção de corrente elétrica e uma irregularidade no solo. A vista superior da Figura 4.2, mostrada na Figura 4.1, ilustra o ambiente com uma série de hemisférios, destacando-se a não homogeneidade do terreno.



Figura 4.1 – Ilustração de propagação de correntes no solo com algumas não homogeneidades [31].

A não homogeneidade do solo considerada supostamente vem de raízes de árvores, metais enterrados no solo, cercas, canos de irrigação, córregos, etc.

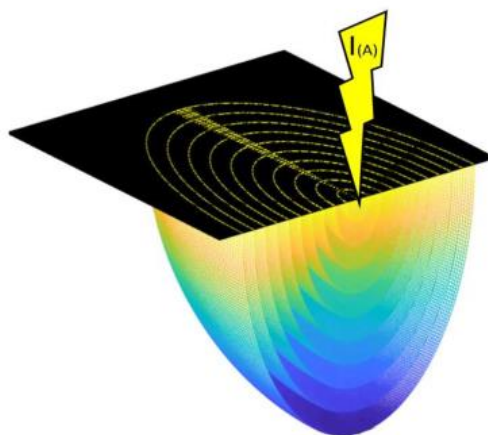


Figura 4.2 - Ponto de descarga atmosférica em distribuição de camadas hemisféricas [31].

Sob a injeção de corrente elétrica variando no tempo, o solo se comporta como um meio de impedância, e sofre influência da frequência para dispersar a corrente. Em condições de alta frequência, o solo apresenta dois componentes significativos para uma corrente: a condução de corrente, função da resistividade, e a corrente capacitiva, uma dependência de permissividade, como visto em [35], [36] e [37]. Mesmo nessas situações, quando comparadas com o efeito da variação da resistividade, o trabalho mostrado em [38] revelou uma influência insignificante do efeito capacitivo no cálculo da tensão de passo. Neste trabalho, mesmo com o sistema fornecido sendo um pulso de corrente variando no tempo, o solo foi considerado puramente resistivo e não homogêneo.

A não homogeneidade ocorre com a variação da resistência em algumas seções do solo, as crescentes esféricas, como mostrado na Figura 4.3. Para suporte teórico com as equações de Maxwell, considera-se a Lei de Faraday, mostrada abaixo, para um caminho fechado:

$$V_{step} = - \int_b^a \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = \int_a^b \rho \mathbf{J} \cdot d\mathbf{L} \quad (4.1)$$

Conforme encontrado em [39], a integral de linha fechada, mostrada na equação (4.1), pode ser quebrada em suas contribuições ao longo dos diversos elementos do circuito. Assim, podemos discretizar em partes o contorno do hemisfério onde um fluxo de corrente será processado. A superfície da integração  $S$ , na equação (4.2), será em seções. Vários crescentes esféricos mantêm a distribuição de uma corrente injetada no solo com o padrão de hemisfério. Com este procedimento, os circuitos elétricos com parâmetros do solo serão discretizados pela escala esférica crescente.

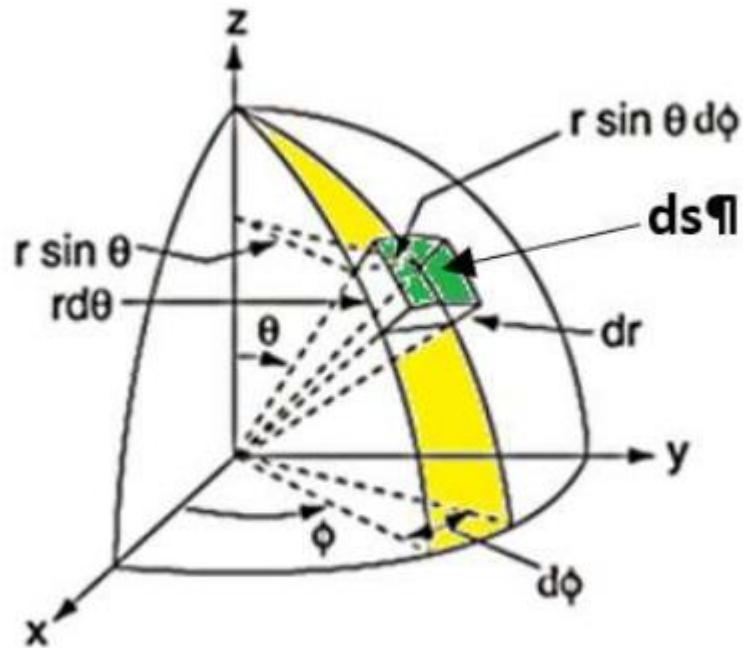


Figura 4.3 - Crescente esférico para um novo cálculo da tensão de passo [31].

Essa Figura 4.3 ilustra o crescente esférico (amarelo) como a parte da superfície de uma esfera entre dois planos, que corta o diâmetro da esfera. Destaca-se também nessa figura um elemento de área (verde) para integração. O crescente esférico será dimensionado na parte inferior do hemisfério. Nessa proposta, a área do hemisfério considerada  $S_h$ , será dividida em três correntes elétricas se propagando por 3 meios diferentes: crescente esférico 1, com área igual a  $S_{c1}$ ; crescente esférico 2, com área denominada por  $S_{c2}$ , e a superfície complementar do hemisfério, chamada  $S_{hc}$ , equivalente à área do hemisfério menos as áreas dos crescentes esféricos 1 e 2. A partir deste ponto, calcularemos as densidades de corrente com as proporções da corrente injetada. Como já relatado, na equação (4.3), a corrente  $J$  é a corrente total injetada no solo, por exemplo, por um raio.  $J_{hc}$  é a densidade de corrente fluindo através da superfície  $S_{hc}$ . Já  $J_{c1}$  e  $J_{c2}$  representam a densidade de corrente na superfície dos crescentes esféricos 1 e 2. Para discretizar o ambiente que recebe a corrente injeção, vamos dividir o hemisfério em  $N$  partes, onde cada parte equivalente a um grau

centígrado. Assim, será chamado de  $S_p$  a parte  $1/N$  da área do hemisfério ( $S_h = 2 \cdot \pi \cdot r^2$ ). As expressões matemáticas estão em (4.4).

$$\left\{ \begin{array}{l} S_p = \frac{S_h}{N} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r^2}{N} \\ J_h = \frac{I}{S_h} = \frac{I}{N \cdot S_p} \\ J_h = J_{c1} + J_{c2} + J_{hc} \\ J_p = \frac{J_h}{N} \\ J_{c1} = N_{c1} \cdot J_p \\ J_{c2} = N_{c2} \cdot J_p \\ J_{hc} = (N - (N_{c1} + N_{c2})) \cdot J_p \end{array} \right. \quad (4.5)$$

A partir de (3.3), com os parâmetros desenvolvidos anteriormente tem-se:

$$V_{newStep1} = \int_a^b \rho_{c1} \cdot J_{c1} \cdot dL = \rho_{c1} \cdot \int_a^b N_{c1} \cdot J_p \cdot dr$$

Com  $J_p = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{1}{N}$ , segue que:

$$V_{newStep1} = \rho_{c1} \cdot N_{c1} \cdot \int_a^b \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot dr$$

Fazendo a integração, encontra-se:

$$V_{newStep1} = I \cdot \frac{N_{c1}}{N} \cdot \frac{\rho_{c1}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \quad (4.6)$$

Similarmente para  $V_{newStep2}$ ;

$$V_{newStep2} = \int_c^d \rho_{c2} \cdot J_{c2} \cdot dL = \rho_{c2} \cdot \int_c^d N_{c2} \cdot J_p \cdot dr$$

$$V_{newStep2} = \rho_{c2} \cdot N_{c2} \cdot \int_c^d \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot dr$$

$$V_{newStep2} = I \cdot \frac{N_{c2}}{N} \cdot \frac{\rho_{c2}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{d} \right) \quad (4.7)$$

Como a superfície do hemisfério ( $S_h$ ) é composta por  $S_{c1} + S_{c2} + S_{hc}$ , com  $S_{hc} = S_h - (S_{c1} + S_{c2})$ , obtém-se:

$$\begin{aligned}
 V_{hc} &= \int_e^f \rho_{hc} \cdot J_{hc} \cdot dL = \rho_{hc} \cdot \int_e^f (N - (N_{c1} + N_{c2})) \cdot J_p \cdot dr \\
 V_{hc} &= \rho_{hc} \cdot (N - (N_{c1} + N_{c2})) \cdot \int_e^f \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \frac{1}{N} \cdot dr \\
 V_{hc} &= I \cdot \frac{(N - (N_{c1} + N_{c2}))}{N} \cdot \frac{\rho_{hc}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{e} - \frac{1}{f} \right) \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

Assim calculamos  $V_{newStep1}$ ,  $V_{newStep2}$  e  $V_{hc}$ . Isso mostra que não se trata de uma linha equipotencial mais em torno do ponto de injeção de corrente como era na abordagem tradicional.

## 5 SIMULAÇÕES

### 5.1 Simulações envolvendo a abordagem tradicional

Nessa subseção será feitas simulações envolvendo a abordagem tradicional com intuito de explorar o comportamento da diferença de potencial entre 2 ponto ao longo do tempo e espaço considerando a propagação de corrente elétrica em solo homogêneo.

#### 5.1.1 Considerações iniciais

Considerando a fórmula da abordagem tradicional mencionada no capítulo 3:

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d+s} \right) \quad (5.1)$$

Com:

$V_{step}$  é a tensão de passo.

$\rho$  é a resistividade do solo ( $\Omega \cdot m$ ).

$I$  é a corrente injetada (A).

$d$  é a distância do ponto de injeção de corrente até o primeiro ponto do dispositivo em análise em metros (m)

$s$  distância entre os pontos do dispositivo sob análise em metros (m)

Se considerarmos  $s$  tendendo ao infinito teremos  $\frac{1}{d+s}$  tendendo a zero, logo:

$$V_{step} = \rho \cdot \frac{I}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{d} \quad (5.2)$$

Foram feitas simulações com a finalidade de explorar o comportamento do potencial em cada ponto do solo para cada instante de tempo levando em conta as fórmula acima. Seguem então as simulações.

## 5.1.2 Simulação em 2D

Na figura abaixo temos o resultado da simulação utilizando a fórmula (5.2), simulando a injeção de uma corrente constante no centro de um terreno de 40 metros quadrados com as equipotenciais traçadas que tiveram formato circulares conforme era esperado pela abordagem tradicional. Além disso, foi calculada a tensão de passo (Step Voltage) entre os 2 pontos vermelhos. Um ponto localizado em  $x = 0$  e  $y = 15$ . O outro ponto em  $x = 0$  e  $z = 16$ . Essa diferença dá uma tensão de passo de 1 metros. O valor dos parâmetros aplicados foram:

- $I = 30 \text{ kA}$
- $\rho = 1000 \Omega \cdot \text{m}$

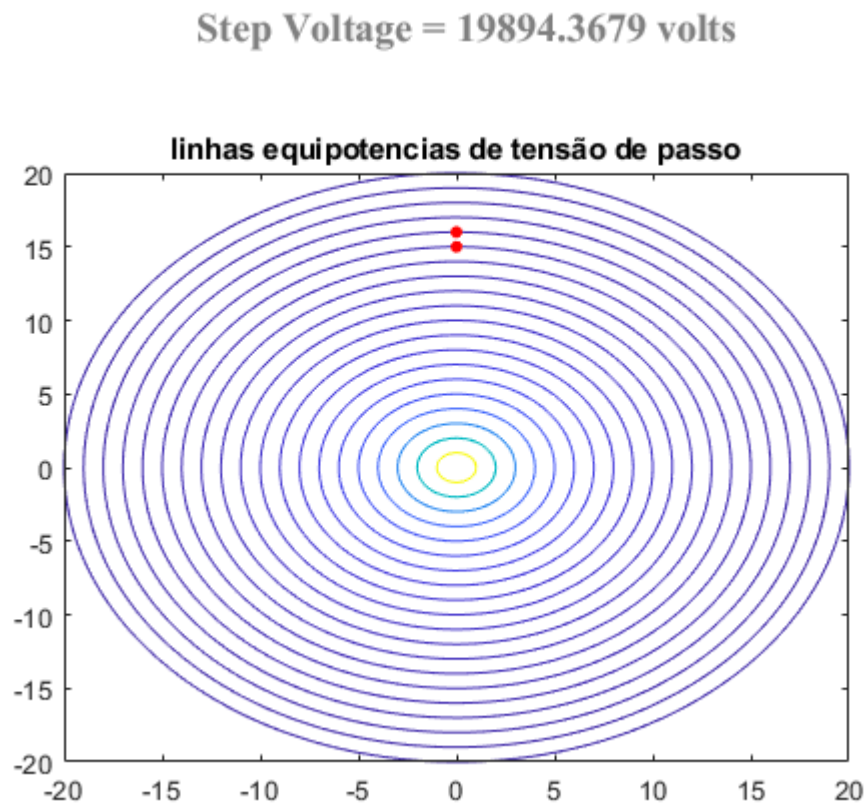


Figura 5.1 – Representação das equipotenciais com injeção de uma corrente constante com a abordagem tradicional.



### 5.1.3 Simulação gráfica da corrente ao longo do tempo

Temos a simulação da curva da corrente injetada no solo com aplicação da expressão da exponencial dupla:

$$i_0(t) = \left(\frac{I_0}{\eta}\right) \cdot \left[e^{\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)} - e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)}\right] \quad (5.3)$$

Com os seguintes valores dos parâmetros:

- Constante de subida  $\tau_1 = 0,21 \mu s$
- Constante de descida  $\tau_2 = 70 \mu s$
- Corrente de pico  $I_0 = 30 kA$

Além disso o  $\eta$  é o fator de correção calculado de forma que o valor de máximo de  $i_0(t)$  fosse mantido:

$$\eta = \frac{\text{máximo de } i_0(t) \text{ da equação (5.3) sem estar dividido por } \eta}{I_0}$$

Com isso obtivemos o seguinte resultado no MATLAB na figura 5.2:



Figura 5.2 – Simulação da curva da corrente injetada no solo

### 5.1.4 Simulação gráfica do potencial ao longo do tempo

Nessa modelagem temos a simulação da curva do potencial em um ponto do solo a uma distância de 5 metros do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente com o mesmo parâmetros e seus valores descritos anteriormente em 5.1.3 aplicada na fórmula da equação (5.2) com  $\rho = 1000 \Omega \cdot m$  o resultado foi o seguinte na figura 5.3:



Figura 5.3 – simulação da curva do potencial em um ponto

### 5.1.5 Simulação gráfica da tensão de passo em 2 pontos

Temos a simulação da curva da tensão de passo entre os pontos de distâncias de 5 e 6 metros que se encontram na mesma direção radial do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente com os mesmos parâmetros e seus valores descritos anteriormente em 5.1.3 aplicada na fórmula da equação (5.1) com  $\rho = 1000 \Omega \cdot m$ , resultado está na figura 5.4:

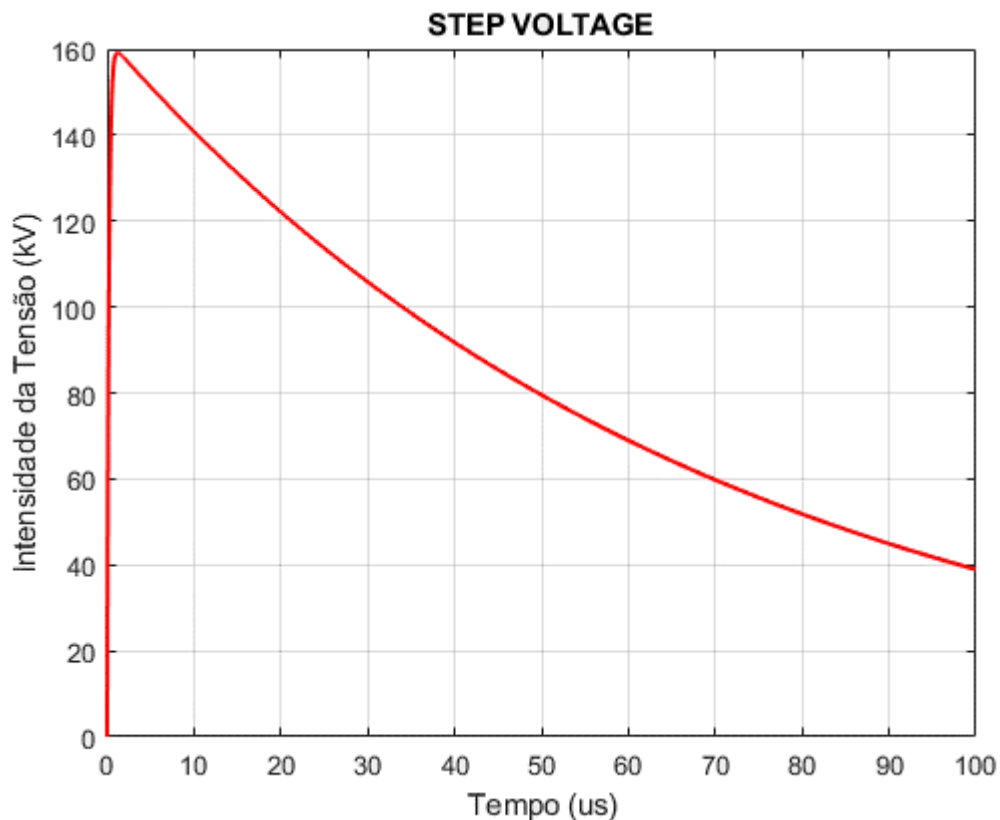


Figura 5.4 – simulação da tensão de passo

### 5.1.6 Potencial na forma de dupla exponencial em uma distância radial ao longo do tempo

Nessa modelagem computacional com a utilização dos mesmos parâmetros de 5.1.3 para injeção de corrente no solo e com o uso da fórmula (5.2) com  $\rho = 1000 \Omega \cdot m$ , foi simulada a propagação dessa dupla exponencial ao longo de uma distância radial variando de 2 a 20 metros e considerando o tempo, com isso obteve-se uma vídeo simulação do comportamento do pulso ao longo do tempo. A figura 5.5 mostra a simulação com:

$$t_4 > t_3 > t_2 > t_1$$

Os 4 instantes de propagação foram mesclados em uma só figura.

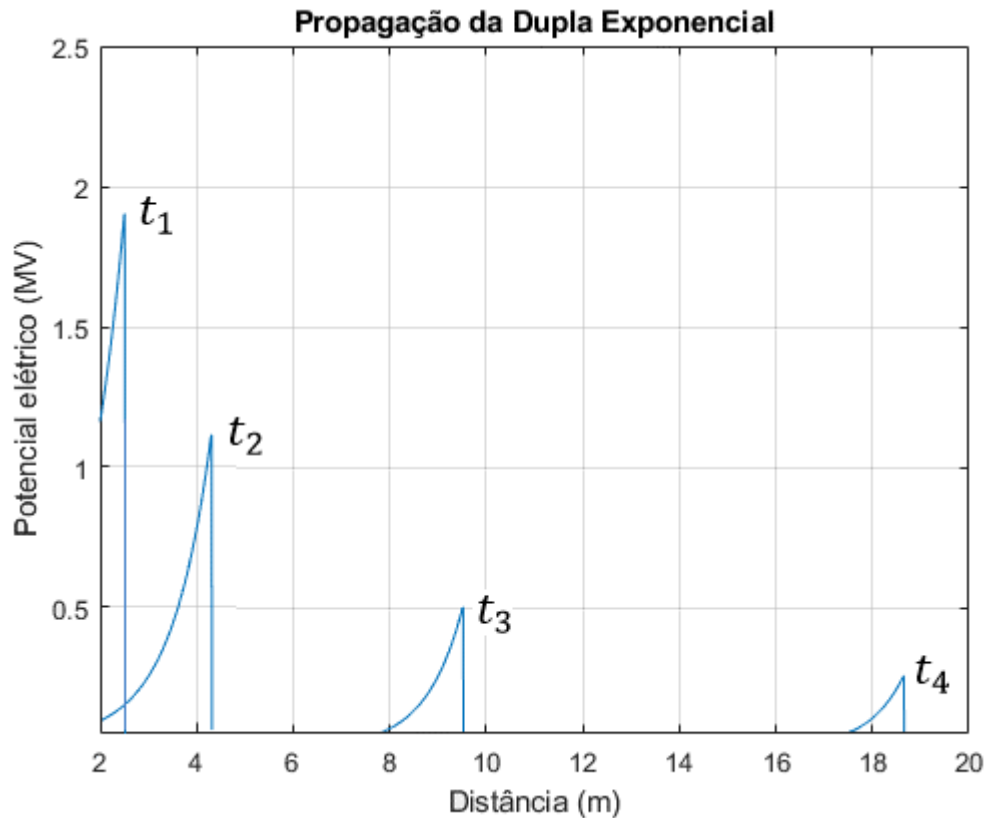


Figura 5.5 – propagação da onda ao longo do tempo em uma direção radial

Nos 4 instantes de tempo acima temos a simulação da propagação do impulso do raio mostrando o potencial em cada ponto do solo, em um intervalo de 2 m a 20 m, para cada instante de tempo.

### 5.1.7 Simulação em 3D do potencial na forma de dupla exponencial em uma distância radial ao longo do tempo.

Nessa modelagem temos a mesma simulação da seção anterior 5.1.6, porém, em uma perspectiva 3D, ou seja, com valores de entradas no eixo do tempo e no eixo de uma distância radial do centro que é o ponto de injeção de corrente variando de 2 metros a 20 metros. O resultado disso é uma superfície de potenciais, com o potencial correspondente para cada ponto desse intervalo de distância radial em cada instante de tempo. Os parâmetros e seus valores são exatamente os mesmo de 5.1.6. Na figura 5.6, temos a simulação em 3D da superfície de potenciais em função do tempo e da distâncias com visão realçando a subida repentina do potencial devido à aplicação da curva dupla exponencial  $1.2 / 50$  no teste. Na figura 5.7 temos a simulação em 3D da superfície de potenciais em função do tempo e da distâncias com visão

realçando a descida mais lenta do potencial devido a calda da curva dupla exponencial  $1.2 / 50$  que foi aplicada no teste.

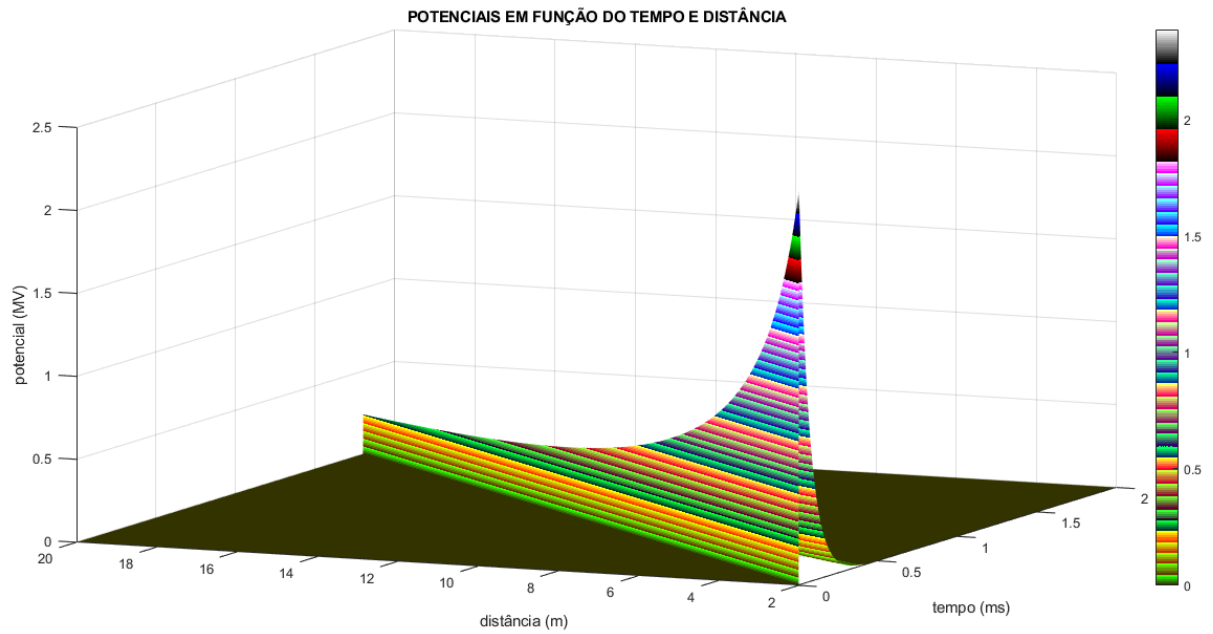


Figura 5.6 – Simulação em 3D enfatizando a subida rápida da dupla exponencial  $1.2 / 50$

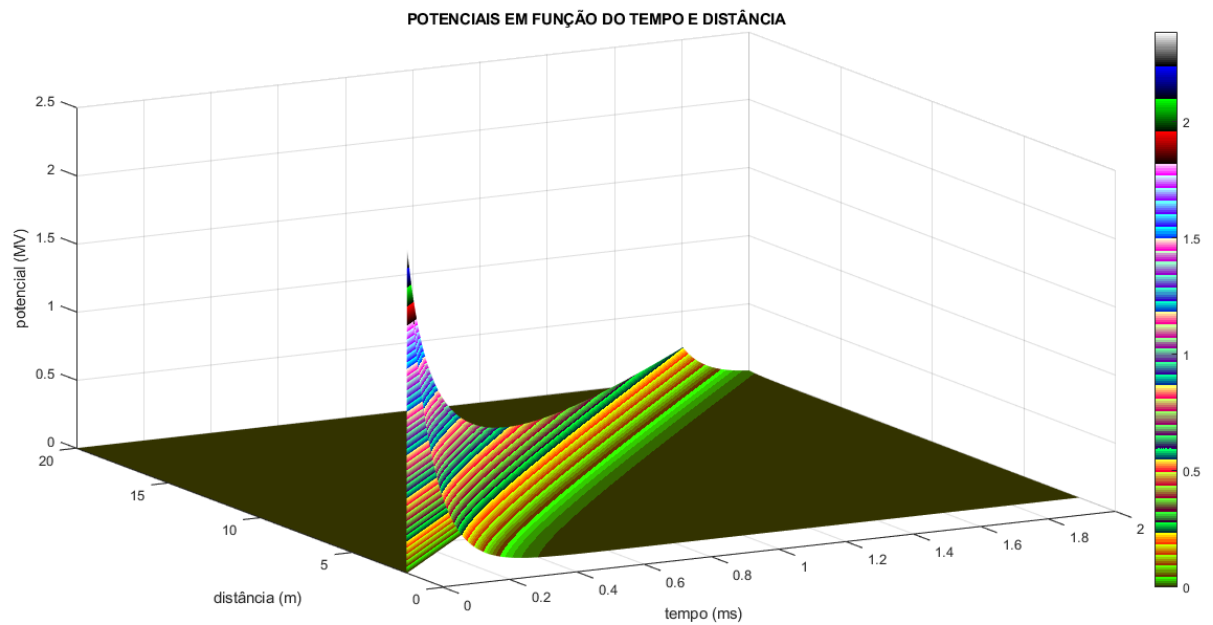


Figura 5.7 – Simulação em 3D enfatizando a cauda da dupla exponencial  $1.2 / 50$

### 5.1.8 Propagação da dupla exponencial em um espaço tridimensional

Nessa seção, a modelagem envolve um espaço tridimensional simulando a onda a partir de um círculo de 2 metros de raio do centro que é o ponto de injeção da corrente até um círculo 20 metros de raio desse foco. As características da injeção da corrente são as mesmas de 5.1.3 que usa a exponencial dupla na fórmula (5.2) com  $\rho = 1000 \Omega \cdot m$ . Obteve-se uma vídeo simulação. Nas cinco imagens a seguir temos a captura de tela em cinco instantes da propagação:

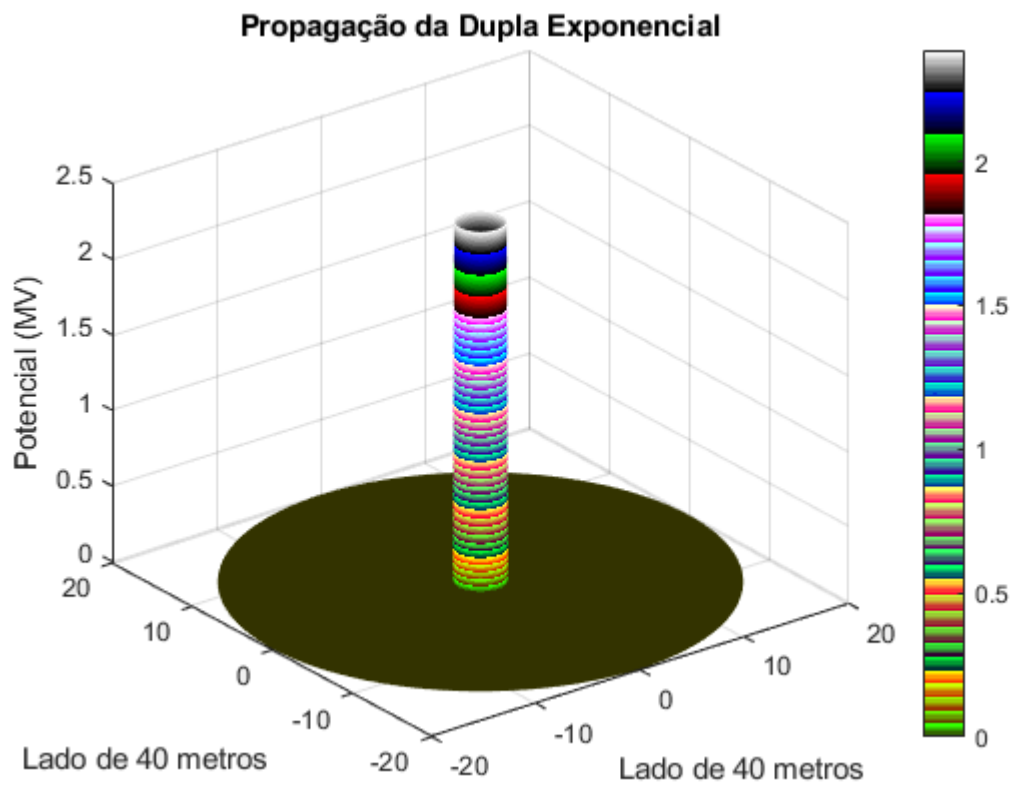


Figura 5.8 - propagação da dupla exponencial, primeira captura de tela.

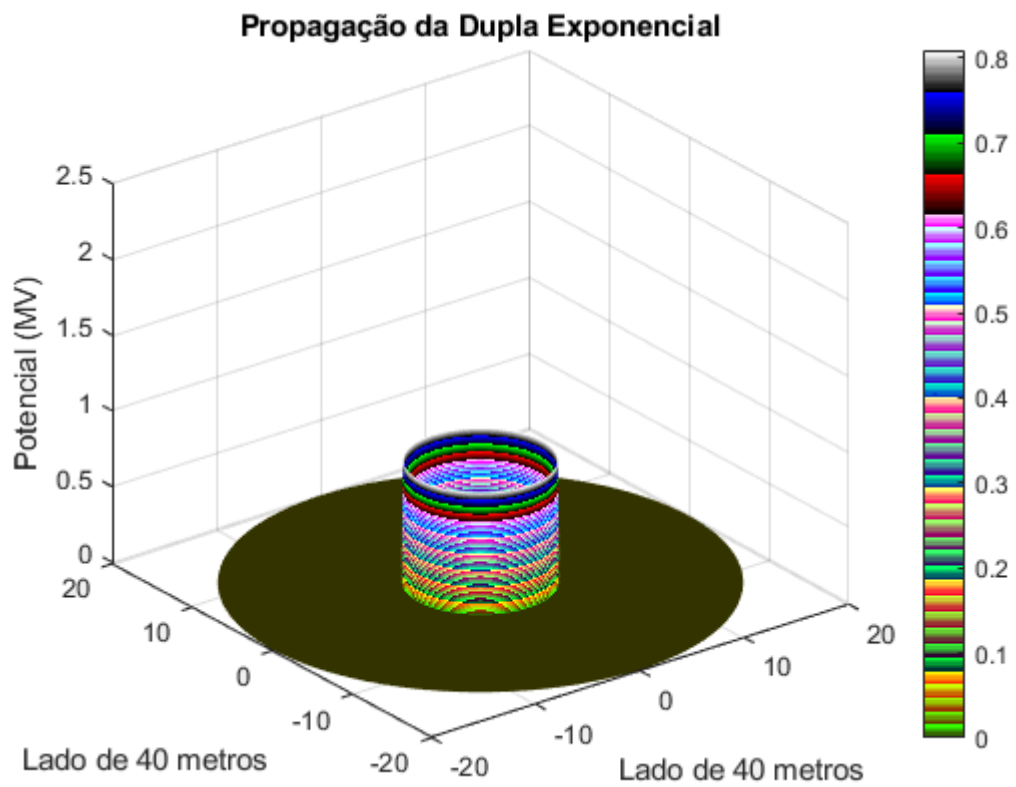


Figura 5.9 - propagação da dupla exponencial, segunda captura de tela.

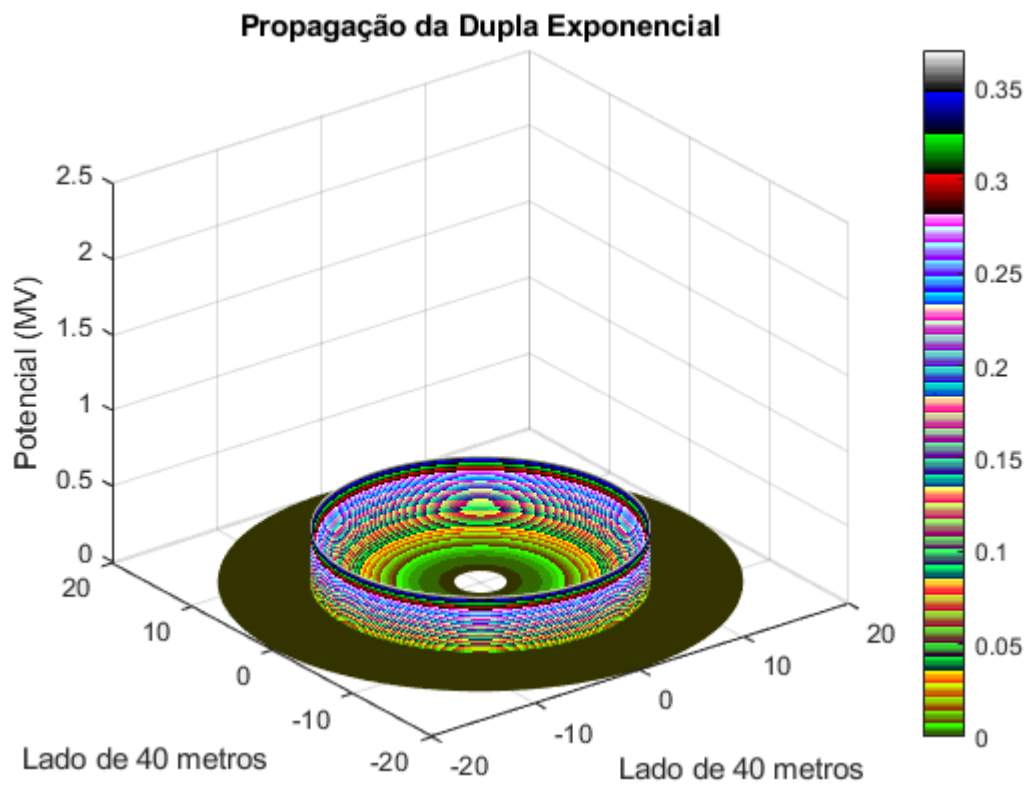


Figura 5.10 - propagação da dupla exponencial, terceira captura de tela.

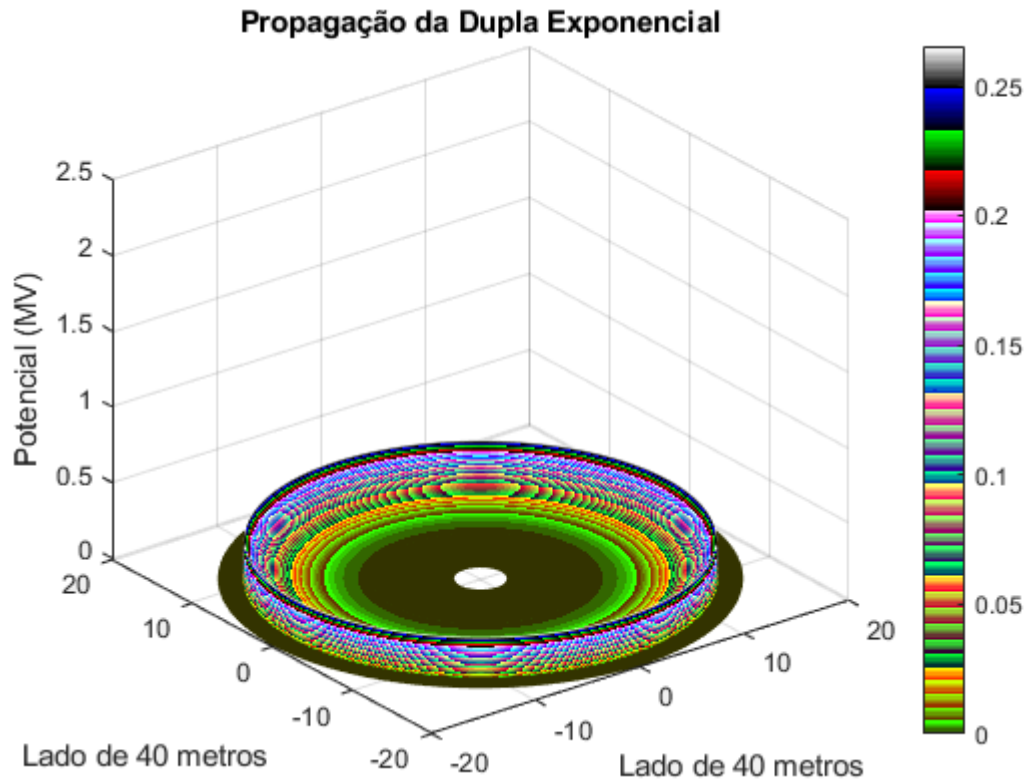


Figura 5.11 - propagação da dupla exponencial, quarta captura de tela.

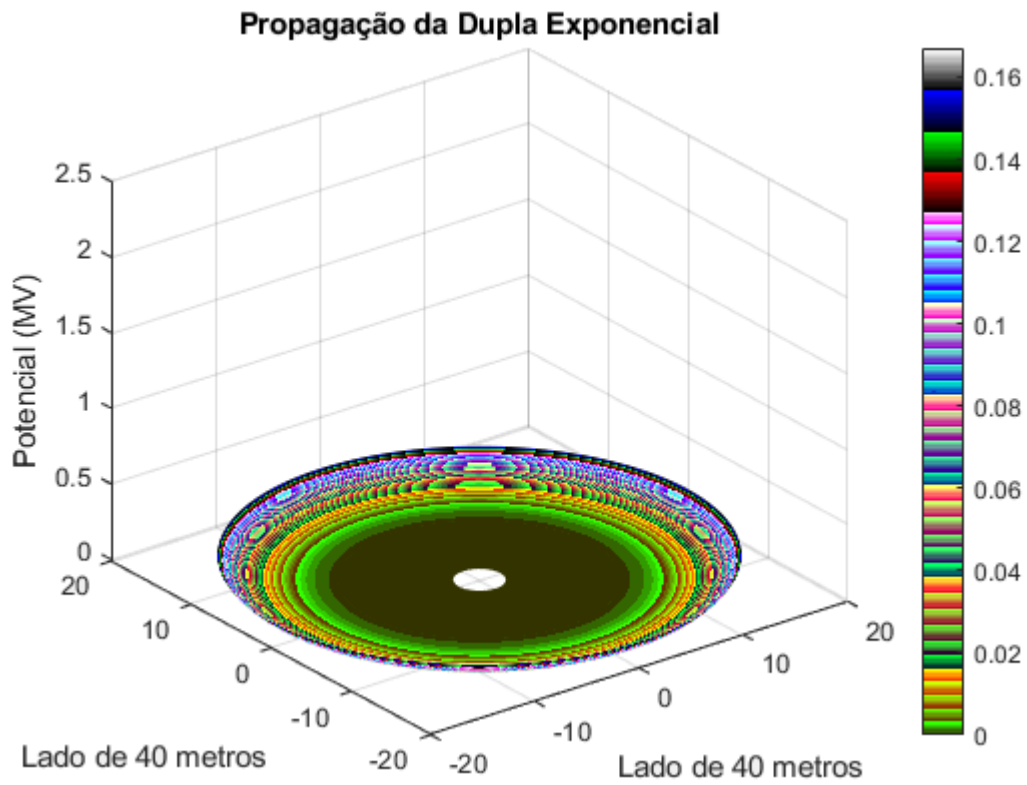


Figura 5.12 - propagação da dupla exponencial, quinta captura de tela.



Na figura 5.12, podemos observar que nessa situação, há somente a visualização da cauda da dupla exponencial que se propaga em todas as direções radiais, uma vez que a outra parte da onda já ultrapassou o limite circular estabelecido para essa simulação.

## 5.2 Simulações envolvendo a nova abordagem

Nessa subseção serão feitas simulações envolvendo a abordagem tradicional com intuito de explorar o comportamento da diferença de potencial entre 2 ponto ao longo do tempo e espaço considerando a propagação corrente elétrica em solo heterogêneo a partir de seções.

### 5.2.1 Considerações iniciais

Considerando as fórmulas da abordagem desenvolvida e mencionadas no capítulo 4:

$$V_{newStep1} = I \cdot \frac{N_{c1}}{N} \cdot \frac{\rho_{c1}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \quad (5.4)$$

$$V_{newStep2} = I \cdot \frac{N_{c2}}{N} \cdot \frac{\rho_{c2}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{c} - \frac{1}{d} \right) \quad (5.5)$$

$$V_{hc} = I \cdot \frac{(N - (N_{c1} + N_{c2}))}{N} \cdot \frac{\rho_{hc}}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{e} - \frac{1}{f} \right) \quad (5.6)$$

Com:

$V_{newStep1}$ ,  $V_{newStep2}$  e  $V_{hc}$  as tensões de passo em cada seção de esfera

$\rho_{c1}$ ,  $\rho_{c2}$  e  $\rho_{hc}$  as resistividades do solo ( $\Omega.m$ ).

$I$  a corrente injetada (A).

$a, b, c, d, e$  e  $f$  as distâncias do ponto de injeção de corrente do ponto até o primeiro ponto do dispositivo em análise.

Se considerarmos  $b, d$  e  $f$  tendendo ao infinito teremos  $\frac{1}{b}$ ,  $\frac{1}{d}$  e  $\frac{1}{f}$  tendendo a zero, logo:

$$V_{newStep1} = I \cdot \frac{N_{c1}}{N} \cdot \frac{\rho_{c1}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{a} \quad (5.7)$$

$$V_{newStep2} = I \cdot \frac{N_{c2}}{N} \cdot \frac{\rho_{c2}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{c} \quad (5.8)$$

$$V_{step} = I \cdot \frac{(N - (N_{c1} + N_{c2}))}{N} \cdot \frac{\rho_{hc}}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{e} \quad (5.9)$$

Foram feitas simulações com a finalidade de explorar o comportamento do potencial em cada ponto do solo para cada instante de tempo levando em conta as fórmulas acima. Segue então as simulações.

## 5.2.2 Simulação em 2D da nova abordagem

Na Figura 5.13 temos o resultado da simulação utilizando as fórmulas (5.7), (5.8) e (5.9) simulando a injeção de uma corrente constante no centro de um terreno de 40 metros quadrados com as equipotenciais traçadas. Porém, diferente do que ocorreu na abordagem tradicional que tiveram formato circulares conforme visto anteriormente, nesse caso, houve formatos de arcos circulares em cada região de seção conforme o esquema da Figura 5.13. Além disso, foi calculada a tensão de passo entre os 2 pontos equidistantes, porém cada um em uma seção com resistividade diferente, entre si, conforme mostrado no esquema. Um ponto localizado em  $x = 0$  e  $y = 5$ . O outro ponto em  $x = 5$  e  $y = 0$ . Essa diferença dá uma tensão de passo calculada para 1 metros. O valor dos parâmetros usados nas fórmulas (5.7), (5.10) e (5.11) da abordagem foram:

$$I = 20 \text{ kA}$$

$$\rho_{c1} = 1250 \text{ } \Omega \cdot m, \rho_{c2} = 1750 \text{ } \Omega \cdot m \text{ e } \rho_{hc} = 1500 \text{ } \Omega \cdot m$$

$$N_{c1} = 90, N_{c2} = 45 \text{ e } N = 360$$

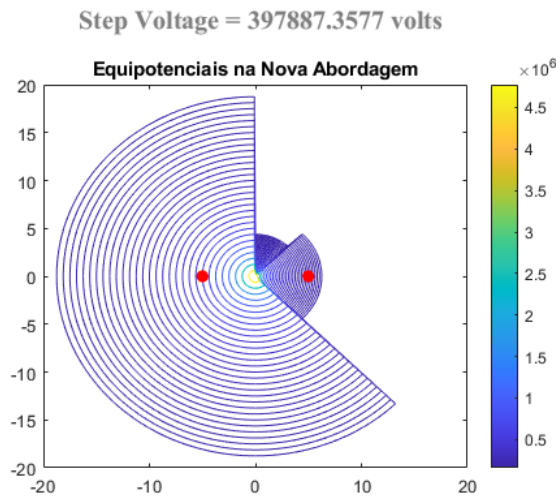


Figura 5.13 - Representação das equipotenciais com injeção de uma corrente constante com a nova abordagem.

Ampliando a figura acima com foco no centro:

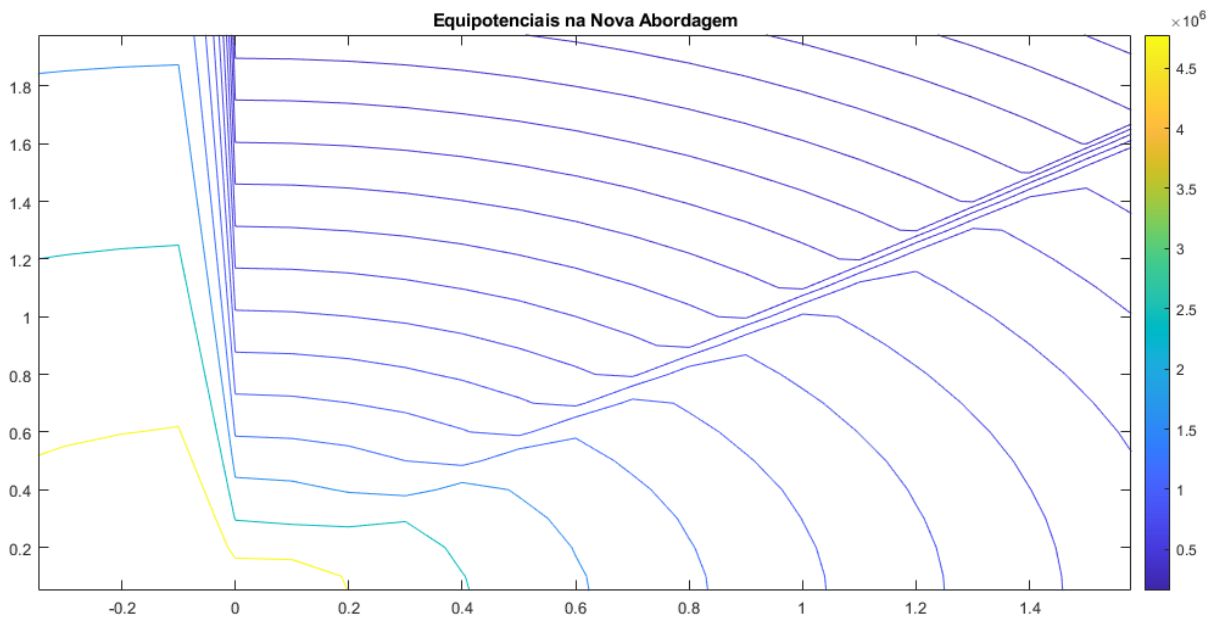


Figura 5.14 - Representação ampliada da figura anterior na área próxima ao centro

Podemos observar que há uma variação abrupta das equipotenciais quando ocorre de um seção para outra uma vez que em cada uma tem um valor associado de resistividade e de ângulo de abertura.

### 5.2.3 Simulação gráfica do potencial em um ponto ao longo do tempo em cada seção esférica

### 5.2.4 Simulação da seção de $\rho_{c1} = 1250 \ \Omega \cdot m$

Nessa modelagem, temos a simulação da curva do potencial em um ponto do solo a uma distância de 5 metros do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente com os mesmos parâmetros e seus valores descritos anteriormente em 5.2.2, porém com o ponto analisado nesse tópico, localizado na seção de  $\rho_{c1} = 1250 \ \Omega \cdot m$  e  $N_{c1} = 90$ . Usando a fórmula (5.7), o resultado está na Figura 5.15.

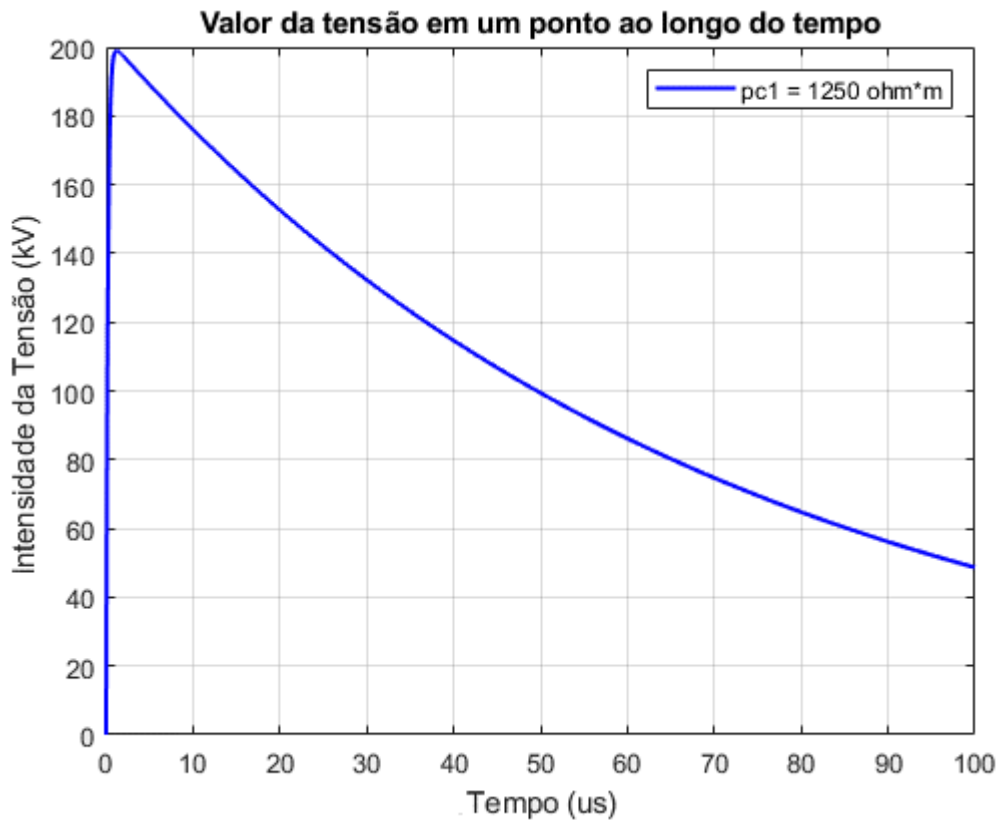


Figura 5.15 - simulação da curva do potencial em um ponto da seção com  $\rho_{c1} = 1250 \ \Omega \cdot m$

### 5.2.5 Simulação da seção de $\rho_{c2} = 1750 \ \Omega \cdot m$

Nessa modelagem temos a simulação da curva do potencial em um ponto do solo a uma distância de 5 metros do ponto de injeção da corrente variável no tempo, exatamente com o mesmo parâmetro e seus valores descritos anteriormente em 5.2.2, porém com o ponto, analisado nesse tópico, localizado na seção de  $\rho_{c2} = 1750 \ \Omega \cdot m$  e  $N_{c2} = 45$ . Usando a fórmula (5.8), o resultado se encontra na Figura 5.16.

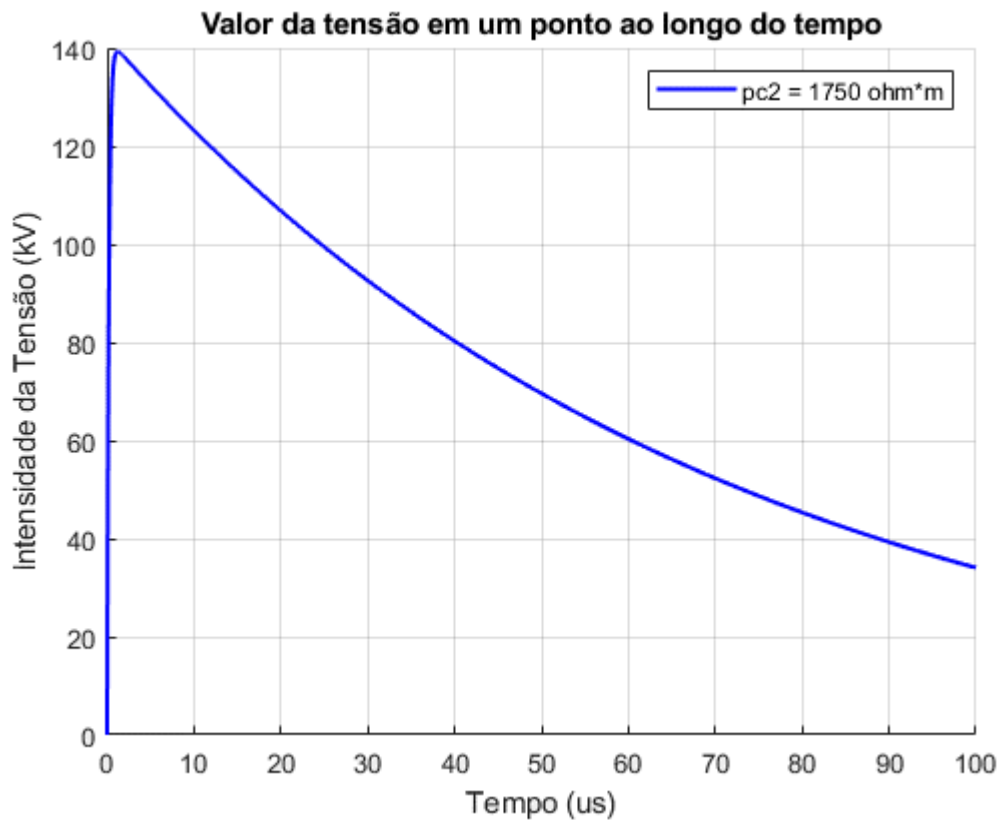


Figura 5.16 - simulação da curva do potencial em um ponto da seção com  $\rho_{c1} = 1750 \ \Omega \cdot m$

### 5.2.6 Simulação da seção de $\rho_{hc} = 1500 \ \Omega \cdot m$

Nessa modelagem temos a simulação da curva do potencial em um ponto do solo a uma distância de 5 metros do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente com o mesmo parâmetro e seus valores descritos anteriormente em 5.2.2, porém, com o ponto, analisado nesse tópico, localizado na seção de  $\rho_{hc} = 1500 \ \Omega \cdot m$  e  $(N - N_{c1} - N_{c2}) = 225$  com  $N_{c1} = 90$  e  $N_{c2} = 45$  usando a formula (5.9) o resultado se encontra na Figura 5.17.

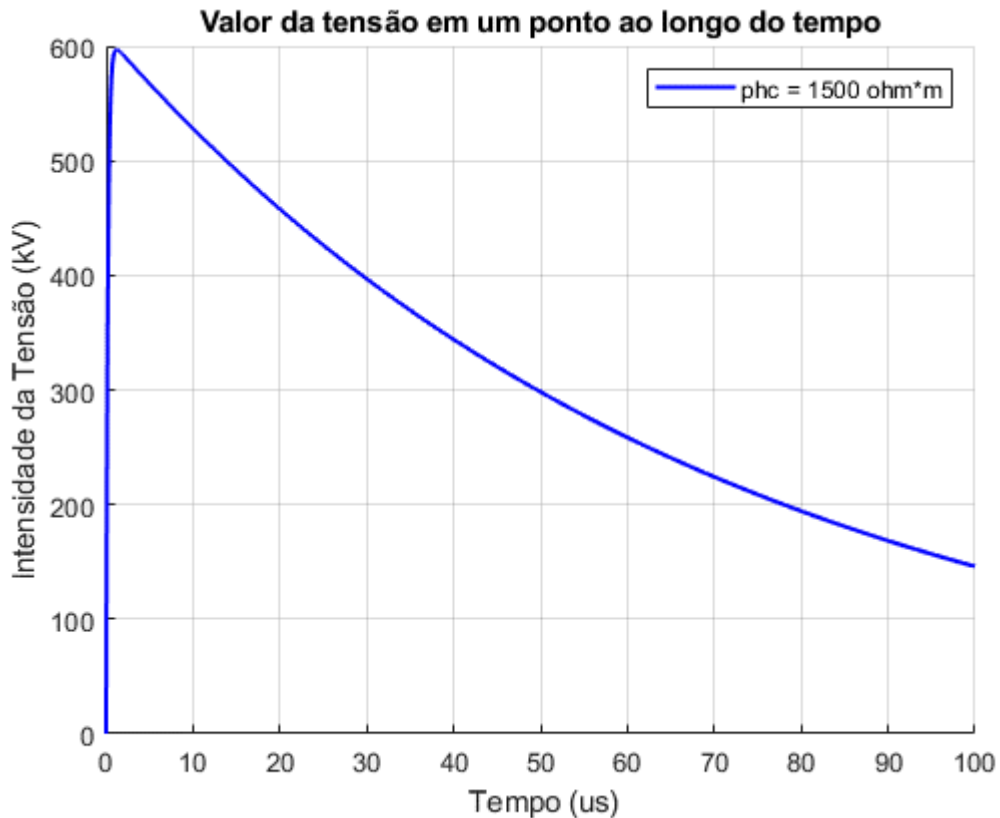


Figura 5.17 - simulação da curva do potencial em um ponto da seção com  $\rho_{hc} = 1500 \ \Omega \cdot m$

Observação: Com a finalidade de evitar redundâncias nas simulações não será mostrado nesse trabalho simulações da propagação da forma de onda em uma direção radial ao longo do tempo como foi feito na abordagem tradicional, uma vez que o processo é similar com a substituição apenas das fórmulas (5.9), (5.8) e (5.7) por (5.2) no código-fonte.

### 5.2.7 Simulação da tensão de passo de 5 a 6 metros com $\rho_{c1} = 1250 \ \Omega \cdot m$

Nessa modelagem temos a simulação da curva da tensão de passo no espaçamento de 5 metros a 6 metro do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente na mesma radial, com os mesmos parâmetros e seus valores descritos anteriormente em 5.2.2, porém, com o ponto, analisado nesse tópico, localizado na seção de  $\rho_{c1} = 1250 \ \Omega \cdot m$  e  $N_{c1} = 90$  usando a fórmula (5.4) o resultado se encontra na Figura 5.18.

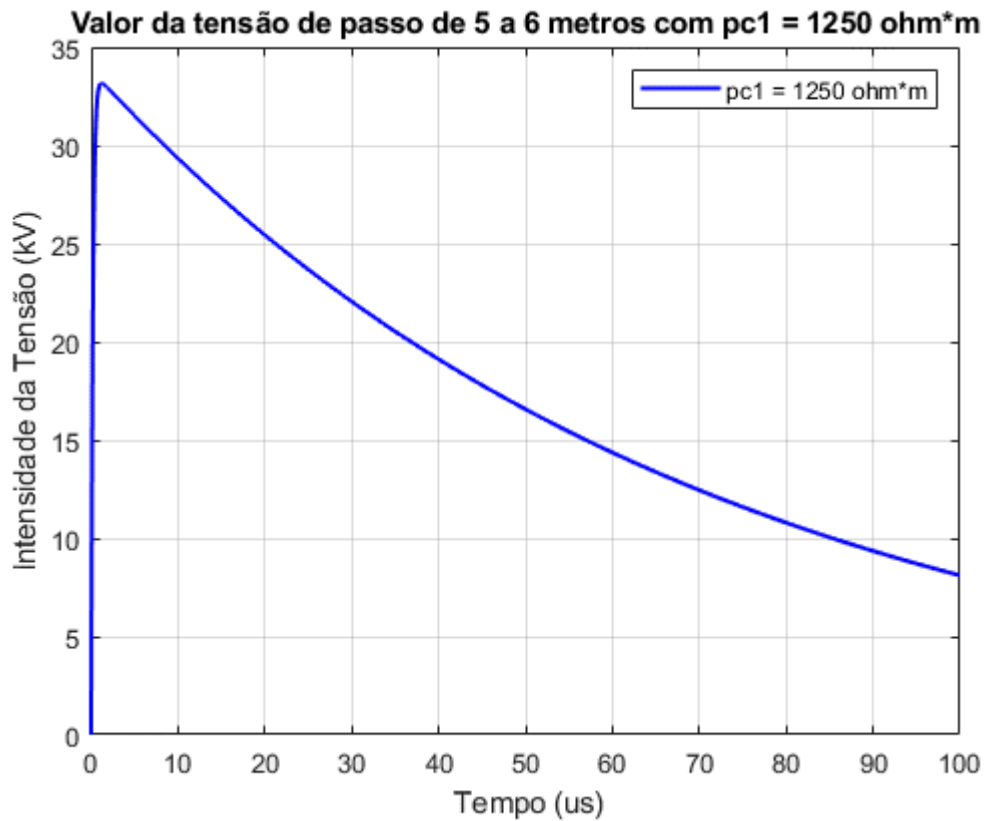


Figura 5.18 – Curva da tensão de passo na seção com  $\rho_{c1} = 1250 \text{ } \Omega \cdot m$

### 5.2.8 Simulação da tensão de passo de 5 a 6 metros com $\rho_{c2} = 1750 \text{ } \Omega \cdot m$

Nessa modelagem temos a simulação da curva da tensão de passo no espaçamento de 5 metros a 6 metro do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente na mesma radial, com os mesmos parâmetros e seus valores descritos anteriormente em 5.2.2, porém, com o ponto, analisado nesse tópico, localizado na seção de  $\rho_{c2} = 1750 \text{ } \Omega \cdot m$  e  $N_{c2} = 45$  usando a fórmula (5.5) o resultado se encontra na Figura 5.19.

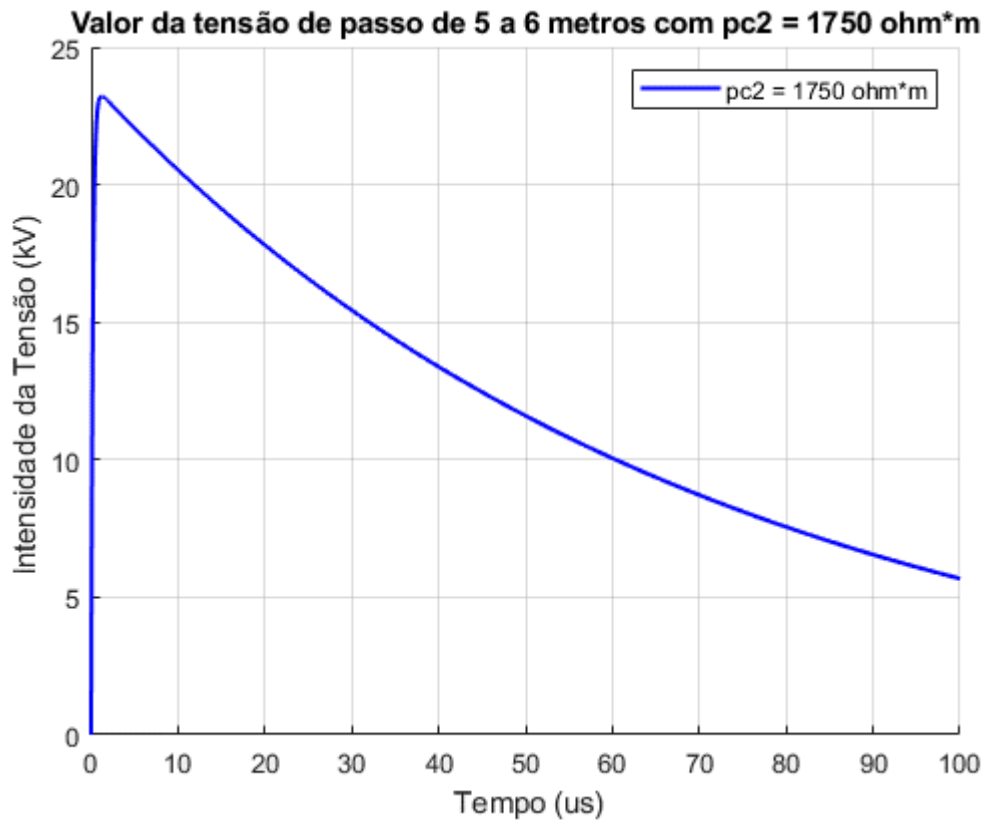


Figura 5.19 – Curva da tensão de passo na seção com  $\rho_{c1} = 1750 \ \Omega \cdot m$

### 5.2.9 Simulação da tensão de passo de 5 a 6 metros com $\rho_{hc} = 1500 \ \Omega \cdot m$

Nessa modelagem temos a simulação da curva da tensão de passo no espaçamento de 5 metros a 6 metro do ponto de injeção da corrente variável no tempo exatamente na mesma radial, com os mesmos parâmetros e seus valores descritos anteriormente em 5.2.2, porém, com o ponto, analisado nesse tópico, localizado na seção de  $\rho_{hc} = 1500 \ \Omega \cdot m$  e  $(N - N_{c1} - N_{c2}) = 225$  com  $N_{c1} = 90$  e  $N_{c2} = 45$  usando a fórmula (5.4) o resultado se encontra na Figura 5.20.



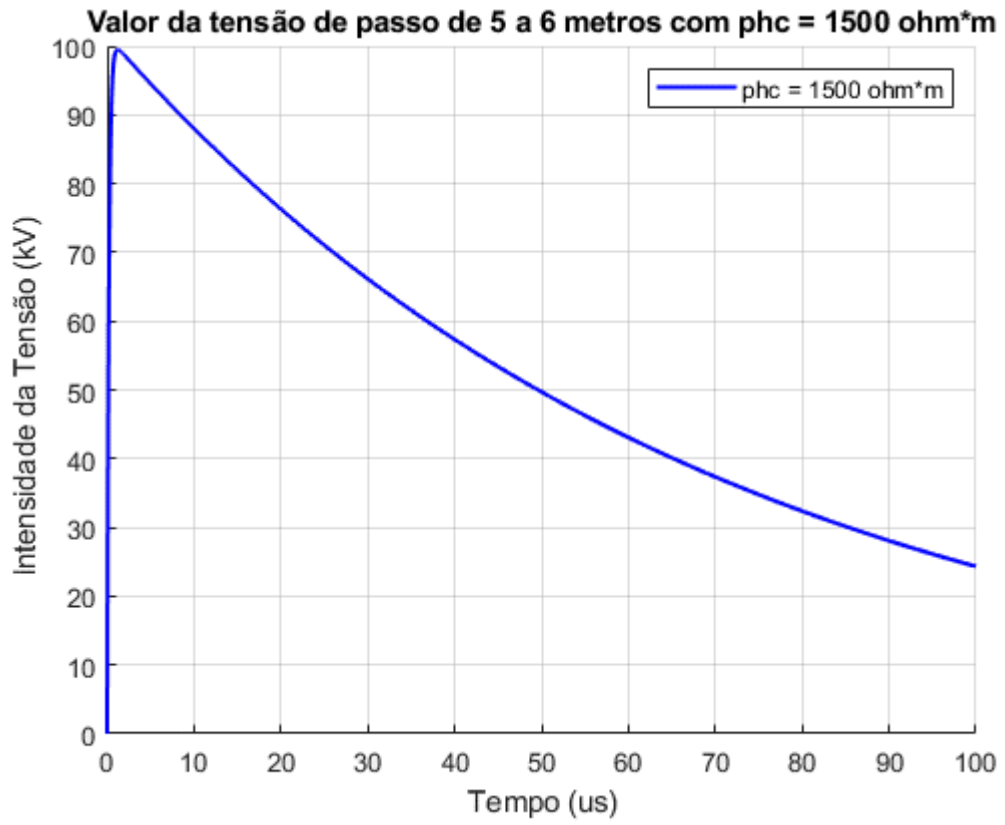


Figura 5.20 – Curva da tensão de passo na seção com  $\rho_{c1} = 1500 \ \Omega \cdot m$

## 6 TESTES EM CAMPO

O local escolhido para realização do experimento foi um terreno localizado ao lado da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília - FT/UnB, mostrado na figura 6.1, em que o local de realização do teste de campo envolvendo a abordagem tradicional está realçado em amarelo o local de realização do teste de campo envolvendo a nova abordagem está realçado em laranja. Podemos observar que no lado direito onde se encontra o pavimento com os painéis fotovoltaicos é o Departamento de Engenharia Elétrica.



Figura 6.1 – local de realização do teste.

O experimento ocorreu dia 20 de outubro de 2023 entre 13:30 e 18:00 no horário de Brasília com umidade média de 25,9% e temperatura média de 32°C [40].

### 6.1 Materiais utilizados.

Com o objetivo da operação ocorrer com segurança no teste de campo, foi utilizado um kit limitador de corrente.

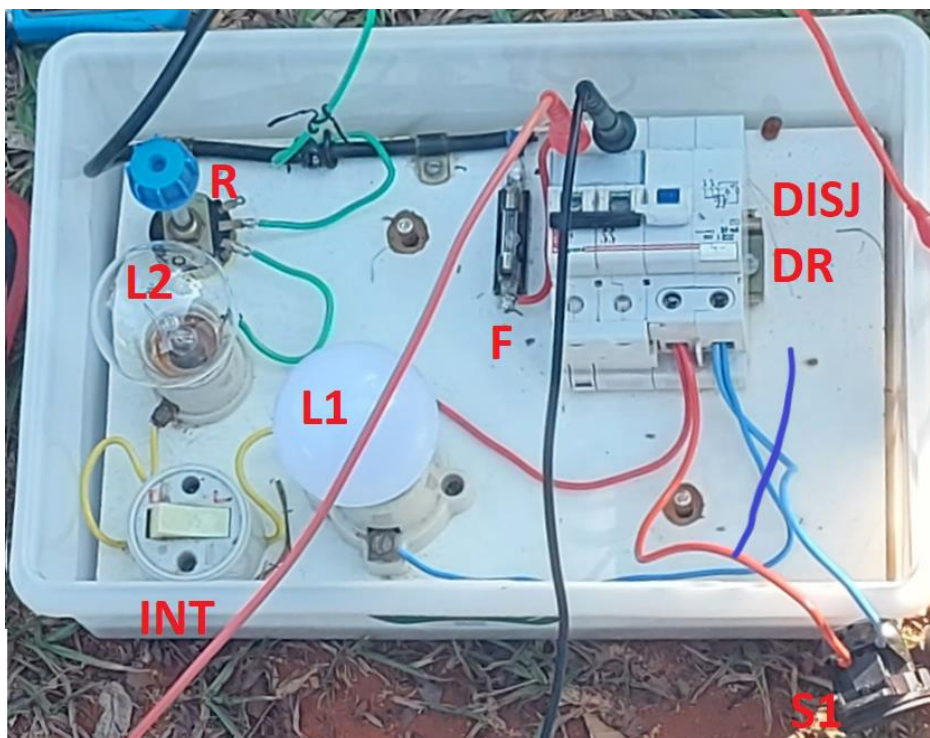


Figura 6.2– kit limitador de corrente

O Kit é composto por:

- Disj DR: 1 Conjunto Disjuntor DR 10A, 30mA;
- F: 1 Fusível;
- R: 1 Potenciômetro 50k $\Omega$ ;
- L1: 1 Lâmpada de LED 8W 220V;
- L2: 1 Lâmpada incandescente 40W 220V;
- INT: 1 Interruptor;
- 2 Soquetes tipo E27;
- Cabos;
- Controlador de tensão da fase
- Voltímetro
- Extensões elétricas
- amperímetro



Figura 6.3 – dimmer para controle da tensão da fase

### 6.1.1 Kit medição de resistência de aterramento

Para o cálculo da resistividade no local de teste, foi utilizado o kit de aterramento mostrado na figura 6.2. As hastes e a trena também foram utilizadas posteriormente em outros momentos, após a medição da resistividade.



Figura 6.4– kit de aterramento utilizado no teste

O Kit é composto por:

- Terrômetro modelo MTD 20kWe da empresa Megabras.
- Hastes de aterramentos
- Trena de medição
- Marreta

## 6.2 Teste de campo da abordagem tradicional

### 6.2.1 Medição da resistividade do solo

Primeiramente mediu-se a resistência de aterramento do exato local da realização do teste. A Figura 6.5 mostra o momento da implementação do método de Wenner no primeiro teste de campo para o cálculo da resistividade do solo do local. As distâncias entre as estacas são de  $D = 1$  metro.



Figura 6.5 – Momento da implementação do método de Wenner

O valor da resistência registrado pelo terrômetro foi de  $R = 101,6 \Omega$  usando a fórmula de Wenner conforme o manual do aparelho terrômetro:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot D$$

Substituindo os valores de  $R = 101,6 \Omega$  e  $D = 1 m$  temos o valor da resistividade.

$$\rho = 638,37163 \Omega \cdot m$$

Observa-se que nesse teste a utilização desse método foi simplificado medindo a resistência apenas uma vez.

## 6.2.2 Configuração das hastes de aterramento

Posteriormente foi acrescentado mais 2 eletrodos junto a esses e obteve-se a configuração espacial do teste de campo da abordagem tradicional mostrada na Figura 6.6 em que cada ponto preto representa a localização de uma haste aterrada. A injeção de corrente foi feita no ponto 1.

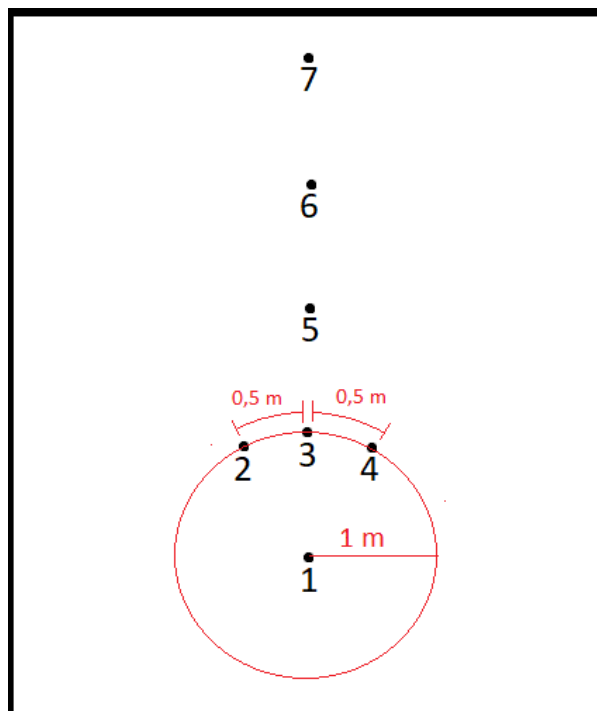


Figura 6.6 – configuração espacial do teste de campo da abordagem tradicional.

Na Figura 6.7 temos o local correspondente à Figura 6.6 com a localização das hastes evidenciadas dentro dos contornos vermelhos e um amarelo. O contorno amarelo refere-se a haste colocada posteriormente conforme será descrito mais adiante.

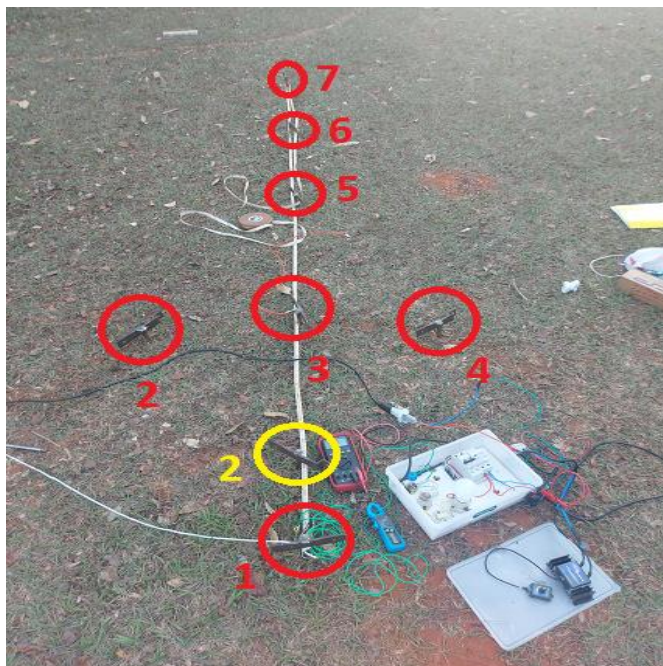


Figura 6.7 - local de realização das medições envolvendo abordagem tradicional

Considerando que:

$$D_{xy} = \text{distância do ponto } x \text{ ao } y$$

Foi considerado no teste em campo as seguintes distâncias entre as hastes  $D_{12} = 1 \text{ m}$ ,  $D_{13} = 1 \text{ m}$ ,  $D_{14} = 1 \text{ m}$ ,  $D_{35} = 1 \text{ m}$ ,  $D_{56} = 1 \text{ m}$  e  $D_{67} = 1 \text{ m}$ . Além disso os pontos 1, 3, 5, 6 e 7 são colineares.

### 6.2.3 Medições com corrente de injeção de 1 e 2 mA

Inicialmente e ainda considerando a Figura 6.6, usando o kit limitador de corrente injetou-se uma corrente de 1 mA no solo através da haste 1, registrada no amperímetro, e mediu-se a tensão dessa haste 1 e das hastes 2, 3 e 4 em relação ao neutro que são respectivamente  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$ ,  $V_{3N}$  e  $V_{4N}$ . O registro dos valores está na Tabela 6.1.

Tensão entre as hastes e o neutro
$V_{1N} = 14,13 \text{ V}$
$V_{2N} = 4,43 \text{ V}$
$V_{3N} = 4,44 \text{ V}$
$V_{4N} = 4,43 \text{ V}$

Tabela 6.1- medições feitas para corrente de 1 mA

Depois, da mesma maneira, injetou-se uma corrente de 2 mA e também mediu-se a tensão das hastes 1, 2, 3 e 4 em relação ao neutro N que são respectivamente  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$ ,  $V_{3N}$  e  $V_{4N}$  com valores evidenciados na coluna A da Tabela 6.2.

Pouco tempo depois mediu-se a tensão entre as hastes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, ainda nessa circunstancia de 2 mA de corrente injetada no solo através da haste 1 com os resultados evidenciados na coluna B da Tabela 6.2. As medições  $V_{23}$  e  $V_{34}$  entre os pontos do raio de 1 metro do ponto de injeção de corrente estão na coluna C dessa mesma tabela.

A	B	C
Tensão entre as hastes e o neutro	Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção	Tensões entre hastes equidistantes do ponto de injeção de corrente
$V_{1N} = 21,4 \text{ V}$	$V_{12} = 16,44 \text{ V}$	$V_{23} = 0,04 \text{ V}$
$V_{2N} = 5,29 \text{ V}$	$V_{13} = 16,44 \text{ V}$	$V_{34} = 0,04 \text{ V}$
$V_{3N} = 5,29 \text{ V}$	$V_{14} = 16,44 \text{ V}$	
$V_{4N} = 5,29 \text{ V}$	$V_{35} = 0,1 \text{ V}$	
	$V_{56} = 0,06 \text{ V}$	
	$V_{36} = 0,3 \text{ V}$	
	$V_{57} = 0,16 \text{ V}$	
	$V_{37} = 0,4 \text{ V}$	

Tabela 6.2 – medições para corrente de 2 mA

#### 6.2.4 Medição com corrente de injeção de 10 mA

Posteriormente e nas mesmas condições, através do kit limitador de corrente foi injetada no solo uma corrente de 10 mA através da haste 1. Após isso, mediu-se a tensão de saída no valor 214 Volts e mediu-se a tensão das hastes 1, 2, 3 e 4 em relação ao neutro que são respectivamente  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$ ,  $V_{3N}$  e  $V_{4N}$  com valores mostrados na coluna A da Tabela 6.3. Pouco tempo depois mediu-se a tensão entre as hastes 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7, ainda nessa circunstancia de 10 mA de corrente injetada no solo através da haste 1 com valores registrados



na coluna B da Tabela 6.3. As medições entre os pontos do raio de 1 metro estão na coluna C da Tabela 6.3.

A	B	C
Tensão entre as hastes e o neutro	Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção	Tensões entre hastes equidistantes do ponto de injeção de corrente
$V_{1N} = 50 \text{ V}$	$V_{12} = 46 \text{ V}$	$V_{23} = 0,1 \text{ V}$
$V_{2N} = 5,9 \text{ V}$	$V_{13} = 46 \text{ V}$	$V_{34} = 0,6 \text{ V}$
$V_{3N} = 5,9 \text{ V}$	$V_{14} = 46 \text{ V}$	$V_{24} = 0,6 \text{ V}$
$V_{4N} = 5,9 \text{ V}$	$V_{35} = 0,67 \text{ V}$	
	$V_{56} = 0,29 \text{ V}$	
	$V_{67} = 0,16 \text{ V}$	

Tabela 6.3 - medições feitas para corrente de 10 mA

Após essas medições inseriu-se mais uma haste X no solo de forma colinar entre os pontos 1 e 3 a uma distância de 0,3 m do ponto 1 e 0,7 m do ponto 3. Com isso, aumentou-se a corrente de injeção no solo através da haste 1 para 13 mA e obtiveram-se as seguintes medições das hastes 1 e X em relação ao neutro N que são respectivamente  $V_{1N}$  e  $V_{XN}$  com valores registrados na Tabela 6.4. Também obteve-se a seguinte tensão entre as hastes 1, X e 3 também com valores registrados na Tabela 6.4.

A	B
Tensão entre as hastes e o neutro	Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção
$V_{1N} = 62 \text{ V}$	$V_{13} = 58 \text{ V}$
$V_{XN} = 7 \text{ V}$	$V_{1X} = 55 \text{ V}$
	$V_{X3} = 3 \text{ V}$

Tabela 6.4 - medições envolvendo a haste X

## 6.3 Teste de campo da nova abordagem

As condições medidas de tensão de rede e tensão de saída máxima durante o momento da obtenção dos dados da tabela abaixo foram de 219 Volts e 212 Volts. Essa tensão de saída é a tensão após passar pelo controlador de tensão e dispositivos de proteção.

### 6.3.1 Medição com corrente de injeção de 10 mA com 3 hastes e 1 prego

Primeiramente, foi montada a configuração com as hastes mostrada na Figura 6.8 em que o ponto 1 representa um prego que foi inserido na raiz de uma árvore e os pontos 2,3 e 4 representam as hastes inseridas no solo nas proximidades das raízes. A injeção de corrente foi feita no ponto 1 através de um conexão ao prego.

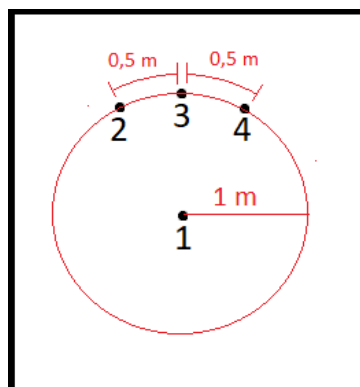


Figura 6.8 - configuração espacial do primeiro teste de campo da nova abordagem

Na Figura 6.9 temos o local correspondente à Figura 6.8 - configuração espacial do primeiro teste de campo da nova abordagem com a localização do prego e das hastes evidenciadas dentro desses contornos vermelhos.



Figura 6.9 – configuração espacial do segundo teste de campo da nova abordagem.

Com os mesmo equipamentos e da mesma forma da seção anterior envolvendo abordagem tradicional, uma corrente de 10 mA foi injetada na raiz da árvore através do prego. Após isso, mediu-se a tensão de saída no valor 214 volts e mediu-se a tensão do prego em 1 e das hastes em 2, 3 e 4 em relação ao neutro cada um respectivamente que são  $V_{1N}$ ,  $V_{2N}$ ,  $V_{3N}$  e  $V_{4N}$ . Pouco tempo depois, mediu-se a tensão entre o prego em 1 e as hastes em 2, 3, 4. Os valores estão registrados na Tabela 6.5. As tensões entre as hastes que estão a 1 metro de distância estão registradas na coluna C dessa figura.

A	B	C
Tensão entre as hastes e o neutro	Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção	Tensões entre hastes equidistantes do ponto de injeção de corrente
$V_{1N} = 14,8 \text{ V}$	$V_{12} = 10,95 \text{ V}$	$V_{23} = 0,06 \text{ V}$
$V_{2N} = 5,05 \text{ V}$	$V_{13} = 10,95 \text{ V}$	$V_{34} = 0,60 \text{ V}$
$V_{3N} = 5,04 \text{ V}$	$V_{14} = 10,35 \text{ V}$	
$V_{4N} = 5,47 \text{ V}$	$V_{23} = 0,06 \text{ V}$	
	$V_{34} = 0,60 \text{ V}$	

Tabela 6.5 - medições feitas para o caso dessa subseção

### 6.3.2 Medição com corrente de injeção de 10 mA com 6 hastes e 1 prego colocado posteriormente

Da mesma forma da seção anterior uma corrente de 10 mA foi injetada na raiz da árvore através do prego. A configuração espacial desse teste de campo da nova abordagem está mostrada na Figura 6.10 em que 1 representa o prego inserido na raiz de uma árvore no ponto 1 e os pontos 2,3, 4, 5, 6 e 7 representam as hastes inseridas no solo nas proximidades das raízes. A injeção de corrente foi feita no ponto 1 através de uma conexão ao prego.

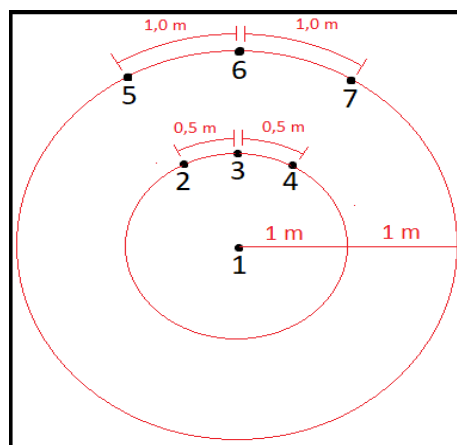


Figura 6.10 - configuração espacial do teste de campo da nova abordagem.

Na Figura 6.11 temos o local correspondente à Figura 6.10 com a localização das hastes evidenciadas dentro dos contornos vermelhos e o prego dentro do contorno amarelo.

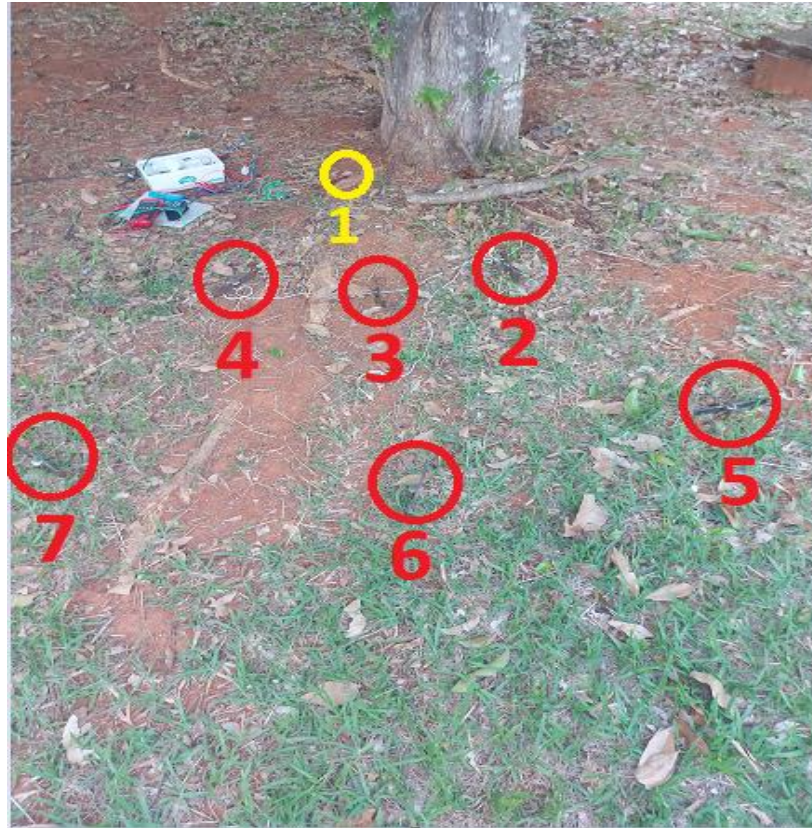


Figura 6.11 - configuração espacial do segundo teste de campo da nova abordagem.

Continuando, mediu-se a tensão entre o prego em 1 e as hastes em 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e entre as hastes, as medições entre os pontos do raio de 1 metro e entre os pontos do raio de 2 metro. Os valores registrados estão na Tabela 6.6.

A	B
Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção	Tensões entre hastes equidistantes do ponto de injeção de corrente
$V_{12} = 10,43 \text{ V}$	$V_{23} = 0,04 \text{ V}$
$V_{13} = 10,45 \text{ V}$	$V_{34} = 0,58 \text{ V}$
$V_{14} = 9,8 \text{ V}$	$V_{56} = 0,033 \text{ V}$
$V_{25} = 0,48 \text{ V}$	$V_{76} = 0,046 \text{ V}$
$V_{36} = 0,5 \text{ V}$	
$V_{47} = 1,04 \text{ V}$	

Tabela 6.6 – medição com corrente de injeção de 10 mA

Após essas medições um prego foi inserido em uma das raízes da árvore a uma distância de 2 metros do ponto de injeção entre a haste em 6 e a haste em 7 conforme a Figura 6.13. A intenção era fazer medições de tensão entre esse prego e outras hastes. Os valores estão na Tabela 6.7.

A	B
Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção	Tensões entre hastes equidistantes do ponto de injeção de corrente
$V_{16} = 10,88 \text{ V}$	$V_{56} = 0,04 \text{ V}$
$V_{17} = 10,88 \text{ V}$	$V_{67} = 0,04 \text{ V}$
$V_{1P} = 10,67 \text{ V}$	$V_{6P} = 0,24 \text{ V}$
	$V_{7P} = 0,20 \text{ V}$

Tabela 6.7 – medições com o prego na raiz

### 6.3.3 Medição com corrente de injeção de 119 mA com 6 hastes e 2 prego

Da mesma forma da seção anterior uma corrente de 119 mA foi injetada na raiz da árvore com 1 prego no ponto 1 e 6 hastes e 1 prego nos outros pontos com a disposição espacial mostrada na Figura 6.12 em que 1 e P representa a localização dos pregos inserido nas raízes de uma árvore (um prego em cada ponto) e os pontos 2,3, 4, 5, 6 e 7 representam as localizações das hastes inseridas no solo nas proximidades das raízes. A injeção de corrente foi feita no ponto 1 através de uma conexão ao prego.

O experimento foi feito sem o kit limitador de corrente, apenas conectando a tensão da rede a 1 fusível e a uma resistência elétrica de uma lâmpada. Foi registrada uma tensão de saída de 217 volts.

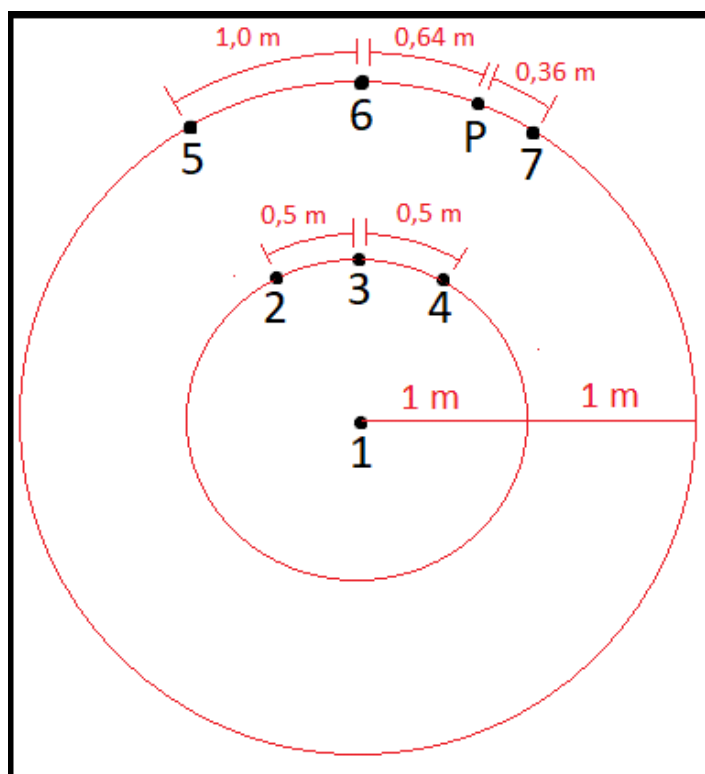


Figura 6.12 - configuração espacial do teste de campo da nova abordagem com injeção de 119 mA

Na Figura 6.13 temos o local correspondente à Figura 6.12 com a localização das hastes evidenciadas dentro dos contornos vermelhos.

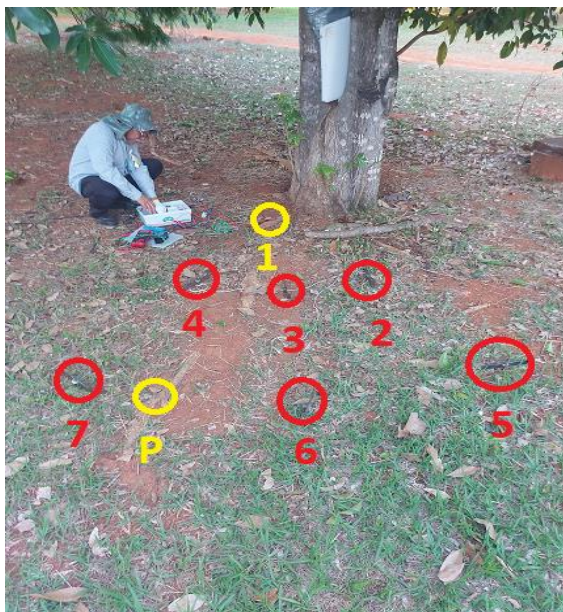


Figura 6.13 – Em amarelo temos a localização dos pregos e em vermelho a localização das hastes.

Prosseguindo, mediu-se a tensão entre o prego em 1 e as hastes em 2, 3 e 4 em relação ao neutro. Após isso mediu-se as seguintes tensões entre os pontos quer sejam hastes quer sejam pregos incluindo as medições entre os pontos do raio de 1 metro e de 2 metros, os valores registrados estão na Figura 6.14.

A	B	C
Tensão entre as hastes e o neutro	Tensão entre hastes em direções radiais do ponto de injeção	Tensões entre hastes equidistantes do ponto de injeção de corrente
$V_{1N} = 110,7 \text{ V}$	$V_{12} = 96,5 \text{ V}$	$V_{23} = 0,04 \text{ V}$
$V_{2N} = 14,43 \text{ V}$	$V_{13} = 96,6 \text{ V}$	$V_{34} = 5,61 \text{ V}$
$V_{3N} = 14,44 \text{ V}$	$V_{14} = 91,3 \text{ V}$	$V_{56} = 0,18 \text{ V}$
$V_{4N} = 19,99 \text{ V}$	$V_{25} = 4,43 \text{ V}$	$V_{6P} = 2,30 \text{ V}$
	$V_{36} = 4,46 \text{ V}$	$V_{7P} = 1,94 \text{ V}$
	$V_{47} = 9,78 \text{ V}$	$V_{67} = 0,38 \text{ V}$

Figura 6.14 – medições com corrente de medição de 119 mA



## 7 ANÁLISES E RESULTADO

### 7.1 Análise das simulações envolvendo a abordagem tradicional.

Nas simulações computacionais pode-se constatar o comportamento da dupla exponencial envolvendo a abordagem tradicional e, com isso, perceber a uniformidade do potencial existente tanto ao longo do tempo como também no espaço para uma mesma distância do ponto de injeção de corrente. Nesse sentido na simulação da subseção 5.1.2 de Simulação em 2D da nova abordagem pode-se verificar as linhas equipotenciais circunscritas em torno do ponto de injeção de corrente com o valor com cada uma definida usando a fórmula (5.2) com a distância variando de 1 em 1 metro.

Na simulação da subseção 5.1.3 de Simulação gráfica da corrente ao longo do tempo o resultado da simulação apresenta consistência com a formulação teórica proposta para a curva dupla exponencial com um fator de crescimento de 1.2 e um tempo de constante de tempo de 50  $\mu$ s. Podemos perceber o rápido crescimento do valor de injeção de corrente o que é próximo do que ocorre na prática quando uma descarga atmosférica atinge o solo. Nas subseção 5.1.4 de Simulação gráfica do potencial ao longo do tempo e na subseção 5.1.5 de Simulação gráfica da tensão de passo em 2 pontos percebemos, respectivamente, o comportamento do potencial no ponto a 5 metros como também a diferença de potencial que é a tensão de passo indo de 5 a 6 metros do ponto de injeção de corrente coincidente com a curva da dupla exponencial de corrente injetada

Além disso, na simulação da subseção 5.1.6 de Potencial na forma de dupla exponencial em uma distância radial ao longo do tempo, percebe-se um nível maior de detalhamento e complexidade em relação às simulações anteriores uma vez que envolve o decaimento hiperbólico de cada ponto, ao longo do tempo e espaço, compondo a dupla exponencial e, com isso, no início da simulação, nota-se uma variação brusca da amplitude ao contrário do que ocorre mais para o final na simulação quando a dupla exponencial está a uma distância maior que do ponto de injeção de corrente. É notório que principalmente na subida repentina do potencial ocorre a variação alta da tensão de passo entre 2 pontos o que explica a morte dos gados.

Por fim, há a simulação em 3D da propagação da dupla exponencial que pela própria natureza da fórmula (5.2), percebe-se uma uniformidade ao longo do espaço e tempo mencionada anteriormente.

## **7.2 Análise das simulações envolvendo a nova abordagem**

Nessas simulações pode-se perceber o aumento de complexidade e detalhamento no que tange ao potencial em cada ponto ao longo do tempo. Na subseção 5.2.2 de Simulação em 2D da nova abordagem, percebe-se com clareza que em círculo em torno do ponto de injeção de corrente, há diferenças de tensão entre pontos localizados em diferentes seções e a mesmas distâncias do ponto de injeção.

Quando são pontos localizados na mesma seção a uma mesma distância do ponto de injeção de corrente não há diferença de tensão o que evidenciado tanto na simulação quanto nas fórmulas envolvendo a nova abordagem em (5.7), (5.8) e (5.9). Nota-se que o potencial em cada seção depende da resistividade dessa seção bem como do ângulo de abertura de cada seção. Percebe-se que quanto maior for ambos, maior é a tensão de passo em uma direção radial em cada seção.

## **7.3 Análise dos resultados do teste em campo envolvendo a abordagem tradicional**

### **7.3.1 Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.2.3 de Medições com corrente de injeção de 1 e 2 mA**

Analisando os resultados de  $V_{13} = 16,44$ ,  $V_{35} = 0,1$ ,  $V_{56} = 0,06$  percebemos que a tensão decresce de forma drástica com a distância o que condiz com a teoria, pois o decaimento ocorre conforme a fórmula (5.2) de forma hiperbólica. Além disso, podemos perceber que a tensão entre pontos diferentes a uma mesma distância resultou em valores extremamente baixos  $V_{23} = 0,04$  V e  $V_{34} = 0,04$  V, ou seja, valores muito próximos de zero e isso condiz com a fórmula (5.1) que mostra que a tensão de passo em um meio homogêneo é zero para pontos que possuem a mesma distância em relação ao ponto de

injeção de corrente, ou seja, pontos que estão inseridos na mesma circunferência com o centro sendo a localização onde se injeta corrente. Por mais, calculando os valores de tensão de passo entre os pontos 3, 5, 6 e 7 usando fórmula (5.1) com o parâmetro  $I = 2 \text{ mA}$ , a resistividade medida  $\rho = 638,37163 \Omega \cdot \text{m}$ , obtêm-se os seguintes resultados calculados:

- $V_{35 \text{ calculado}} = 0.1016 \text{ V}$
- $V_{56 \text{ calculado}} = 0.033867 \text{ V}$

Comparando com os valores medidos tirados da Tabela 6.2:

- $V_{35 \text{ medido}} = 0,1 \text{ V}$
- $V_{56 \text{ medido}} = 0,06 \text{ V}$

Percebemos uma proximidade entre os valores principalmente entre  $V_{35 \text{ calculado}}$  e  $V_{35 \text{ medido}}$ . No entanto, vale a pena ressaltar que a injeção de corrente é muito baixa, o que implica que efeitos indesejados como instabilidade na rede elétrica e fatores ambientais vão ser mais preponderantes quanto menor a tensão. Por fim, podemos perceber que com as medições tiradas da Tabela 6.2:

- $V_{37 \text{ medido}} = 0,4 \text{ V}$  (indo de 1 a 4 metros do ponto de injeção de corrente)
- $V_{36 \text{ medido}} = 0,3 \text{ V}$  (indo de 1 a 3 metros do ponto de injeção de corrente)
- $V_{57 \text{ medido}} = 0,16 \text{ V}$  (indo de 2 a 4 metros do ponto de injeção de corrente)

Podemos perceber que existe uma coerência entre as medições pois a primeira medida engloba no espaçamento as outras 2 e logo é maior como se espera. Nas outras 2 que estão inclusas na primeira, há também coerência com o esperado pois são menores que a primeira que ocupa a maior distância e segundo que possui 2 metros e também está uma distância mais próxima do ponto de injeção do que a última e logo possui uma tensão de passo maior que a última. Calculando os valores como foi feito anteriormente usando fórmula (5.1) com o parâmetro  $I = 2 \text{ mA}$ , a resistividade medida  $\rho = 638,37163 \Omega \cdot \text{m}$ , obtêm-se os seguintes valores calculados correspondentes a esse 3 casos:

- $V_{37 \text{ calculado}} = 0,1524 \text{ V}$  (indo de 1 a 4 metros do ponto de injeção de corrente)
- $V_{36 \text{ calculado}} = 0,1355 \text{ V}$  (indo de 1 a 3 metros do ponto de injeção de corrente)
- $V_{57 \text{ calculado}} = 0,0508 \text{ V}$  (indo de 2 a 4 metros do ponto de injeção de corrente)

Comparando com os valores medidos anteriormente, percebe-se uma certa discrepância que é devido a efeitos indesejados, como instabilidade na rede e fatores ambientais como já mencionado.

### 7.3.2 Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.2.4 de Medição com corrente de injeção de 10 mA.

Podemos perceber com as primeiras medições que mesmo  $V_{2N}$ ,  $V_{3N}$  e  $V_{4N}$  estando a uma distância de 1 metro do ponto de injeção de corrente a tensão descrece rapidamente uma vez que para essa o valor medido das tensões nesses pontos em relação ao neutro resultou em 5,9 V ao passo que o valor da tensão no ponto de injeção em relação ao neutro foi de 50 V. Por mais nas medidas de uma mesma direção radial tem-se os seguintes valores tirados da Tabela 6.3:

- $V_{35 \text{ medido}} = 0,67 \text{ V}$
- $V_{56 \text{ medido}} = 0,29 \text{ V}$
- $V_{67 \text{ medido}} = 0,16 \text{ V}$

De forma análoga as análise podemos calcular o valor de cada tensão acima usando fórmula (5.1) com o parâmetro  $I = 10 \text{ mA}$ , a resistividade medida  $\rho = 638,37163 \Omega \cdot \text{m}$  obtem-se:

- $V_{35 \text{ calculado}} = 0,762 \text{ V}$
- $V_{56 \text{ calculado}} = 0,6773 \text{ V}$
- $V_{67 \text{ calculado}} = 0,254 \text{ V}$

Comparando com os valores medidos anteriormente percebe-se uma certa discrepância que é devido que efeitos indesejados como instabilidade na rede e fatores ambientais como já mencionado. Em uma mesma distância de 1 metro para esse injeção de 10 mA percebemos os mesmo valores medidos evidenciados abaixo e tirados da Tabela 6.3 dos 3 ponto em relação ao ponto de injeção:

- $V_{12} = 46 \text{ V}$
- $V_{13} = 46 \text{ V}$
- $V_{14} = 46 \text{ V}$

Isso mostra coerência total com a abordagem tradicional em que a uma mesma distância deve haver o mesmo potencial conforme pode-se perceber pela fórmula (5.3). Ademais, as medidas entre esse pontos dessa distância comum de 1 metro mostra essa questão do potencial igual uma vez resulta em valores próximos de zero conforme a tensões abaixo tiradas da Tabela 6.3:

- $V_{23} = 0,1 \text{ V}$
- $V_{34} = 0,6 \text{ V}$

- $V_{24} = 0,6 \text{ V}$

Também resulta em um porcentual muito baixo em relação aos 46 volts que é o valor da tensão de  $V_{12}$ ,  $V_{13}$  e  $V_{14}$  como mencionado anteriormente nessa subseção.

- $\frac{V_{23}}{46} = \frac{0,1}{46} = 0,217 \%$

- $\frac{V_{34}}{46} = \frac{0,6}{46} = 1,304 \%$

- $\frac{V_{24}}{46} = \frac{0,6}{46} = 1,304 \%$

Por fim, nessa subseção resta a análise da haste X percebe-se o evidenciamento da queda drástica do potencial de forma hiperbolica conforme a fórmula (5.2) quando a uma distância mais próxima do ponto de injeção de corrente pois analisando os valores tirados da Tabela 6.4:

- $V_{13} = 58 \text{ V}$

- $V_{1X} = 55 \text{ V}$

- $V_{X3} = 3 \text{ V}$

percebe-se que para uma distância de 0,3 metros entre a haste 1 de injeção de corrente e da haste inserida X há uma queda de tensão de 55 volts e entre essa haste X e a haste 3 que estão com distância 0,7 metros entre si nessa mesma direção radial ocorre uma queda de tensão de apenas 3 volts conforme a Figura 7.1.

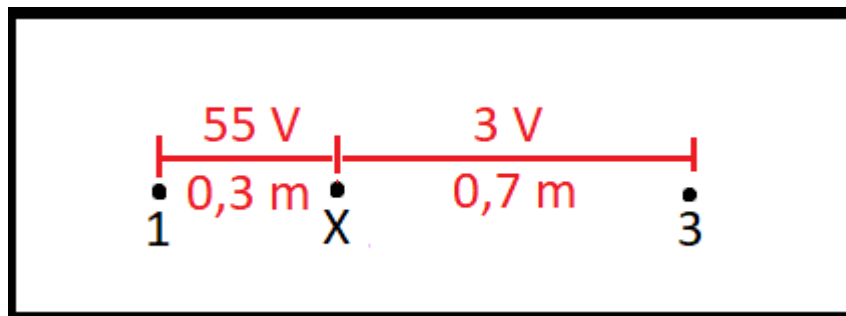


Figura 7.1 – Tensões envolvendo a haste

## **7.4 Análise dos resultados do teste em campo envolvendo a nova abordagem**

### **7.4.1 Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.3.1 de Medição com corrente de injeção de 10 mA com 3 hastes e 1 prego**

Analisando os resultados dessa simulação com a Tabela 6.5 pode-se perceber de imediato que diferente dos experimentos envolvendo a abordagem tradicional em que para ponto com as mesmas distância do ponto de injeção de corrente a tensões tinham valores, tanto em relação ao neutro como em relação ao ponto de injeção de corrente, aproximadamente iguais entre si ou valores aproximadamente iguais a zero quando se mede a tensão entre esses pontos, nesse experimento isso não ocorre. Nesse sentido podemos observar que a tensão no ponto 4 e igua a  $V_{4N} = 5,47 \text{ V}$  difere significativamente das tensões nos pontos 2 e 3 que deram os seguintes valores medidos respectivamente  $V_{2N} = 5,05 \text{ V}$  e  $V_{3N} = 5,04 \text{ V}$  conforme a Tabela 6.5. Coerentemente a tensão medida entre os pontos 2 e 3 deu aproximadamente igual a zero, ou seja,  $V_{23} = 0,06 \text{ V}$  e a tensão entre os pontos 3 e 4 deu diferente de zero  $V_{34} = 0,6 \text{ V}$ . Além disso, no experimento havia uma raiz partindo do próprio ponto 1 que é a localização do prego usado para injetar corrente elétrica através dele inseridos nessa raiz que tinha continuidade até passar entre os pontos 3 e 4 da Figura 6.8 que como mencionado são os ponto em que as hastes forma inseridas ao passo que entre os ponto 2 e 3 solo visualmente tinha o caráter homogêneo sem presença de nenhuma raiz. Podemos verificar esse fato observando a Figura 6.9.

### **7.4.2 Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.3.2 de Medição com corrente de injeção de 10 mA com 6 hastes e 1 prego colocado posteriormente.**

Segundo a Tabela 6.6 podemos observar um assimetria no valor das tensões  $V_{14} = 9,8 \text{ V}$  que difere das tensões  $V_{12} = 10,43 \text{ V}$  e  $V_{13} = 10,45$  e a tensão  $V_{47} = 1,04 \text{ V}$  que diferente das tensões  $V_{35} = 0,48 \text{ V}$  e  $V_{56} = 0,5 \text{ V}$ . Isso contraria a abordagem tradicional que embasa o seguinte resultado na teoria  $V_{14} = V_{12} = V_{13}$  e  $V_{35} = V_{56} = V_{47}$ , porém na

prática isso não está ocorrendo conforme mencionado. Nesse sentido, nota-se na Tabela 6.6 que para os pontos 2, 3 e 4 que estão a 1 metro de distância do ponto de injeção e equidistantes há diferença de potencial entre eles conforme a coluna B da Tabela 6.6 é diferente, ou seja, a tensão entre o ponto 2 e 3 deu  $V_{23} = 0,04$  e a diferença entre o ponto 3 e 4 deu  $V_{34} = 0,58$ .

Analogamente, porém para o caso dos pontos mais distantes 5, 6 e 7 que estão a 2 metros do ponto de injeção de corrente equidistantes entre si conforme a Tabela 6.6 há uma diferença pequena porém a tensão entre os pontos são aproximadamente igual a zero, isto é,  $V_{56} = 0,033$  V e  $V_{67} = 0,046$  V o que leva a conclusão de que por esse valor ser muito próximo a zero pode haver nessa diferença de valor motivos relacionados tanto a heterogeneidade do solo dada principalmente pelo conjunto solo com raízes como também perturbações de outra natureza.

Por mais, prego foi inserido em das raízes da árvore a uma distância de 2 metros do ponto de injeção entre a haste em 6 e a haste em 7 conforme a Figura 6.13 o objetivo é analisar a tensão entre a raiz e o solo nesse sentido pela Tabela 6.7 podemos verificar que há diferença entre a tensão entre as duas tensões que tiveram valores iguais,  $V_{16} = 10,88$  V e  $V_{17} = 10,88$  em comparação com a tensão entre esse ponto de injeção de corrente é o ponto na raiz em P em que tensão deu  $V_{1P} = 10,67$  V já evidenciando que diferentes materiais no solo provocam diferenças de tensões entre pontos desse solo quando há a passagem de corrente elétrica nesse meio.

Ademais na coluna B da Tabela 6.7 isso fica mais evidente ainda. Nessa situação a medição foi realizada envolvendo os 4 pontos equidistantes dos pontos de injeção de corrente. A tensão entre o ponto 6 localizado no solo e entre o ponto P localizado na raiz e entre o ponto 7 localizado no solo e entre o ponto P são, respectivamente,  $V_{6P} = 0,24$  V e  $V_{7P} = 0,20$  V que é significativamente diferente da tensão entre os pontos do solo  $V_{67} = 0,04$  V e  $V_{56} = 0,04$  V. Isso valida que para o solo heterogêneo especial no caso desse trabalho que envolve o solo e as raízes a abordagem tradicional não se aplica.

### **7.4.3 Análise dos resultados dos testes em campo da subseção 6.3.3 de Medição com corrente de injeção de 119 mA com 6 hastes e 2 prego inseridos na raiz.**

Com a finalidade de não estender esse trabalho e conceder ao leitor uma visão clara, objetiva e direta a de se considerar que nesse último caso aplica-se exatamente as mesmas

análises da subseção anterior com a disparidade que nesse caso injetou-se no solo uma corrente mais elevada de 119 mA e logo as tensões são mais elevadas também conforme pode-se observar nas tabelas da seção correspondente.



## 8 CONCLUSÕES

A ocorrência de descarga atmosférica pode criar um sistema de difusão de corrente elétrica de maneira não uniforme devido à heterogeneidade do solo nas proximidades de uma árvore que é composto, principalmente, por argila e raízes. Isso contribui para ocorrer diferença de potencial significativa entre dois pontos.

Considerando isso, nesse trabalho foi apresentado uma nova abordagem que leva em consideração essa heterogeneidade por meio de seções do solo. Em cima dessa abordagem foram feitas simulações que evidenciaram a significativa distinção de potencial entre pontos equidistantes do ponto de injeção de corrente, porém que estão em meios diferentes entre si em contrapartida com a abordagem tradicional que por considerar o solo homogêneo em toda sua extensão, essa diferença de potencial não ocorre. Também em cima dessa abordagem tradicional foram feitas simulações explorando aspectos de como ocorre a propagação de um pulso elétrico no solo, considerando detalhadamente dimensões espaciais e a perspectiva temporal.

Além disso, com a realização dos testes em campo da abordagem tradicional foi possível comprovar a eficácia dessa formulação em solos homogêneos, uma vez que houve concordância com o que a teoria prevê conforme as análises que foram feitas. Notou-se principalmente que para pontos equidistantes do ponto de injeção de corrente as diferenças de tensão resultaram em valores aproximadamente iguais conforme o previsto em solo homogêneos. Além disso, observou-se o decaimento brusco dos valores de tensão na direção radial conforme é esperado pela natureza do declínio ser uma curva hiperbólica conforme evidenciado matematicamente no terceiro capítulo.

Com os teste em campo da nova abordagem demonstrou-se a ineficácia da abordagem tradicional para solos heterogêneos uma vez existe diferença de potencial entre pontos há uma mesma distância do ponto de injeção de corrente e comprovou-se o que a nova abordagem apresentada no quarto capítulo prevê que é há diferença significativa entre esses pontos. Isso foi constatado tanto em situações em que os pontos estavam no solo e havia uma raiz entre eles interferindo no processo de propagação de corrente elétrica, como também em circunstâncias em que um ponto estava na raiz e o outro no solo. Portanto, pode-se inferir que esse é um dos fatores que contribui para o aumento de mortes de gados causadas por tensão de passo, motivação que deu origem a esse trabalho.

## **8.1 Sugestões de trabalhos futuros**

Como trabalhos futuros, propõem-se também pesquisas de campos com equipamentos de maior precisão que abranjam situações de várias espécies de árvore e várias configurações espaciais de raízes em contato com o solo. Propõe-se, também, explorar formas tecnológicas que propiciem a equipotencialização do solo heterogêneo nas proximidades das árvores para diminuir o número de óbitos de gados decorrentes das descargas atmosféricas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MATERIAL.**INPE**. Disponível em < <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/animais.php>> Acesso em: dezembro de 2023
- [2] MATERIAL.**REVISTARURAL**- Disponível em: <https://www.revistarural.com.br/2021/02/24/raios-mataram-ao-menos-2-973-animais-no-campo/> Acesso em novembro de 2023.
- [3] QUEIROZ, Letícia. **FOTOS: Mais de 40 cabeças de gado são atingidas por raio e morrem em fazenda de Colméia, no TO**. 2022. G1 Tocantins. Disponível em: <https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2022/10/24/fotos-mais-de-40-cabecas-de-gado-sao-atingidas-por-raio-e-morrem-em-fazenda-de-colmeia-no-to.ghtml>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- [4] REDAÇÃO, Por (ed.). **Homem de 52 anos morre após queda de raio no Santo Antonio do Sapezeiro**. 2023. SB notícias. Disponível em: <https://sbnoticias.com.br/noticia/Homem-de-52-anos-morre-apos-queda-de-raio-no-Santo-Antonio-do-Sapezeiro/202290>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- [5] DASILVA, A. Leandro. **The horse, the cowboy and the lightning modeling: A case study on a farm in the State of Minas Gerais, Brazil**. In: 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA). IEEE, 2017. p. 226-233
- [6] GOMES, Michel. **Menino atingido por raio enquanto cavalgava com égua: físicos explicam como adolescente sobreviveu**. 2023. G1 Goiás. Disponível em: <https://g1.globo.com/go/goias/noticia/2023/01/26/menino-atingido-por-raio-quando-cavalgava-com-egua-fisicos-explicam-como-adolescente-sobreviveu.ghtml>. Acesso em: 16 jul. 2023.
- [7] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. Porto Alegre: SAGRA-DC LUZZATTO, 1995.
- [8] MATERIAL. **E&S Grounding Solutions**. Disponível em < <https://esgrounding.com/ground-potential-rise>> Acesso em agosto de 2023.
- [9] MATERIAL. **E&S Grounding Solutions**. Disponível em < <https://esgrounding.com/step-and-touch>> Acesso em agosto de 2023.

- [10] “ABNT NBR 15751 - **Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos** “ Associação Brasileira de normas Técnicas ,2009;
- [11] IEEE. **IEEE Std 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding**. 2013.
- [12] IEC - International Electrotechnical Commission, IEC 60479-1 2018: “**Effects of current on human beings and livestock – Part 1: General aspects**”;
- [13] Disponível em < <https://www.nssl.noaa.gov/education/svrwx101/lightning/> > Acesso em setembro de 2023
- [14] Vernon Cooray.”**An Introduction to Lightning**”.Springer Dordrecht Heidelberg NewYork London, 2015
- [15] Disponível em < [http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring08/atmo336s1/courses/spring19/atmo170a1s1/lecture\\_notes/apr17.html](http://www.atmo.arizona.edu/students/courselinks/spring08/atmo336s1/courses/spring19/atmo170a1s1/lecture_notes/apr17.html) > Acesso em setembro de 2023
- [16] ABNT. NBR 7117:2012 -**Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**, 2ª. ed., 2012.
- [17] DE SOUZA, ANDRÉ NUNES et al. **SPDA Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas-Teoria, Prática e Legislação**. Saraiva Educação SA, 2012.
- [18] NEGRISOLI, Manoel. **Instalações elétricas: projetos prediais em baixa tensão**. Editora Blucher, 2022.
- [19] VISACRO FILHO, Silvério. **Aterramentos elétricos**. São Paulo: Artliber, 2002.
- [20] CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros; **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2017.
- [21] BOTELHO, Manoel Henrique Campos. **Princípios da mecânica dos solos e fundações para a Construção Civil**. Editora Blucher, 2014.
- [22] JIAO-JUN, Z. H. U.; HONG-ZHANG, K. A. N. G.; GONDA, Y. **Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land**. *Pedosphere*, v. 17, n. 6, p. 801-812, 2007.
- [23] HE, Jinliang; ZENG, Rong; ZHANG, Bo. **Methodology and technology for power system grounding**. John Wiley & Sons, 2012.
- [24]. POPOVIĆ, Lj M. **The effect of partial compensation of the unfavorable influence of increased soil resistivity in long earthing conductors**. In: Proceedings of the CIGRÉ Symposium. 1985.
- [25] RANDO, Ricardo. **Aterramento em atmosferas explosivas: Práticas recomendadas**. Editora Blucher, 2021.

- [26] PIRSON, Sylvain J. **Effect of anisotropy on apparent resistivity curves**. AAPG Bulletin, v. 19, n. 1, p. 37-57, 1935.
- [27] ENDRENYI, John. **Evaluation or resistivity tests for design of station grounds in nonuniform soil**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. 82, n. 69, p. 966-970, 1963.
- [28] CARD, R. H. **Earth resistivity and geological structure**. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, v. 54, n. 11, p. 1153-1161, 1935.
- [29] em.geosci - Disponível em:  
[https://em.geosci.xyz/content/physical\\_properties/dielectric\\_permittivity/dielectric\\_permittivity\\_factors.html](https://em.geosci.xyz/content/physical_properties/dielectric_permittivity/dielectric_permittivity_factors.html) Acesso em novembro de 2023
- [30] DATSIOS, Z. G.; MIKROPOULOS, P. N. **Characterization of the frequency dependence of the electrical properties of sandy soil with variable grain size and water content**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 26, n. 3, p. 904-912, 2019.
- [31] SILVA, Alcides L. **A NEW APPROACH TO STEP VOLTAGE CALCULATION CONSIDERING SOIL SECTIONS (A PRELIMINARY STUDY)**. Professional paper .2021.
- [32] COORAY, Vernon. **“An Introduction to Lightning”**, New York:Springer, 2015.
- [33] UMAN, Martin A. **“Art and Science of Lightning Protection”**, New York: Cambridge University Press, 2008.
- [34] KAISER, Kenneth L. **Electromagnetic compatibility handbook**. CRC press, 2004.
- [35] JOAQUIM, Luiz Eduardo. **“Contribuição para o estudo da impedância sob impulso, área efetiva, coeficiente de impulso e resistência de malhas de aterramento de subestações”**, (Master's Dissertation). São Paulo: USP. 1997
- [36] VISACRO, Silverio; ALIPIO, Rafael. **Frequency dependence of soil parameters: Experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes**. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 27, n. 2, p. 927-935, 2012.
- [37] ALIPIO, Rafael; VISACRO, Silverio. **Frequency dependence of soil parameters: Effect on the lightning response of grounding electrodes**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 55, n. 1, p. 132-139, 2012.
- [38] NAYEL, Mohamed et al. **Study of step and touch voltages in resistive/capacitive ground due to lightning stroke**. In: The 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics. IEEE, 2006. p. 56-60.

[39] RAMO, Simon; WHINNERY, John R.; VAN DUZER, Theodore. **Fields and waves in communication electronics**. John Wiley & Sons, 1994.

[40] TEMPO.COM. **Previsão Atual para Brasília**. Disponível em:

<https://www.tempo.com/brasil-sactual.htm>. Acesso em: 20 de outubro de 2023.



