

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Roberta Stefanello

**INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE  
MALHAS DE ATERRAMENTO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO  
DO TIPO T2F**

Santa Maria, RS  
2024

**Roberta Stefanello**

**INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE MALHAS  
DE ATERRAMENTO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO TIPO T2F**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos

Santa Maria, RS  
2024

**Roberta Stefanello**

**INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE MALHAS  
DE ATERRAMENTO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO TIPO T2F**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheira Eletricista**.

**Aprovado em 06 de março de 2024:**

---

**Diego Berlezi Ramos, Dr. (UFSM)**  
(Orientador)

---

**Miguel Spagnolo Martins, Me. (UFSM)**

---

**Leonardo de Freitas Silveira, Eng. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2024

## RESUMO

### INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE MALHAS DE ATERRAMENTO EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO TIPO T2F

AUTOR: Roberta Stefanello

ORIENTADOR: Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos

Recentemente um novo modelo de rede trifásica de distribuição rural foi proposto, o T2F (trifásico à dois fios), ele utiliza dois cabos aéreos para duas fases e o solo como a terceira fase. A terceira fase faz uso de um aterramento para conduzir correntes no solo, no entanto quando há injeção de correntes no solo pode haver a indução de tensões superficiais perigosas. Para que este sistema opere adequadamente e não ofereça danos ou riscos materiais e morais, uma das principais etapas é o dimensionamento adequado do aterramento. Um dos aterramentos que pode vir a ser utilizado na construção desta rede é a malha. O projeto deste tipo de aterramento é apresentado em normas como a IEEE 80 (2013) e NBR 15751 (2013). Em tais documentos é indicado que a primeira etapa do projeto seja a determinação da resistividade do solo onde deve ser instalada a malha. A resistividade do solo influencia em diversos cálculos do projeto de aterramento, se seu valor não for avaliado corretamente, a malha de aterramento pode ter sua eficácia comprometida. Com isso, este trabalho busca avaliar a influência da resistividade do solo no desempenho de malhas de aterramentos, que podem vir a ser utilizadas em uma rede de distribuição T2F.

**Palavras-chave:** Resistividade do solo, malha de aterramento, projeto.

**ABSTRACT****INFLUENCE OF SOIL RESISTIVITY ON THE PERFORMANCE OF GROUNDING MESHES IN A T2F DISTRIBUTION NETWORK**

**AUTHOR:** Roberta Stefanello  
**ADVISOR:** Prof. Dr. Diego Berlezi Ramos

Recently a new three-phase rural distribution network model was proposed, the T2F (three-phase two-wire), which uses two overhead cables for two phases and the ground as the third phase. The third phase makes use of a ground to conduct currents in the ground, however when there is injection of currents into the ground there may be an induction of dangerous surfaces. For this system to operate better and not cause material or moral damage or risks, one of the main steps is the adequate dimensioning of the grounding. One of the grounds that may be used in the construction of this network is the mesh. The design of this type of grounding is presented in standards such as IEEE 80 (2013) and NBR 15751 (2013). These documents indicate that the first stage of the project is to determine the resistivity of the soil where the mesh must be installed. Resistivity only influences several calculations of the grounding project; if its value is not evaluated correctly, the grounding mesh may have its effectiveness compromised. Therefore, this work seeks to evaluate the influence of soil resistivity on the performance of grounding grids, which can be used in a T2F distribution network.

**Keywords:** Soil resistivity, grounding mesh, project.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Malhas de aterramento com e sem hastes verticais .....	9
Figura 2 - Rede T2F .....	13
Figura 3 - Resistividade versus umidade percentual de um solo arenoso .....	16
Figura 4 - Perfil com três camadas de solo de um terreno da UFSM (próximo ao jardim botânico).....	17
Figura 5 - Arranjo de Wenner .....	19
Figura 6 - Tensões de passo e toque .....	22
Figura 7 - Fluxograma de etapas do projeto de malhas de aterramento .....	24
Figura 8 - Casos de malhas a serem estudadas .....	28
Figura 9 – Interface criada para cálculo de projetos de malhas de aterramentos quadradas ou retangulares.....	29
Figura 10 - Desempenho da malha proposta no caso 1 .....	32
Figura 11 - Desempenho da malha proposta no caso 2 .....	33

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Permissividade relativa de alguns materiais geológicos .....	15
Tabela 2 - Efeito da temperatura na resistividade de um solo arenoso .....	17
Tabela 3 - Dados do terreno em que está instalada uma rede T2F .....	26
Tabela 4 - Variação da resistividade do solo a partir dos valores médios (destacados em negrito) .....	27
Tabela 5 - Informações do sistema conectado à malha .....	27
Tabela 6 - Resultados experimentais dos casos 1 e 2 .....	30

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	9
1.2	MOTIVAÇÃO .....	10
1.3	OBJETIVOS .....	11
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo principal</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos secundários</b> .....	<b>11</b>
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>13</b>
2.1	REDE T2F.....	13
2.2	PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DO SOLO .....	14
<b>2.2.1</b>	<b>Permeabilidade magnética</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Permissividade elétrica</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Resistividade elétrica</b> .....	<b>15</b>
2.3	SONDAGEM GEOELÉTRICA E ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO .....	18
<b>2.3.1</b>	<b>Sondagem geolétrica</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Estratificação do solo</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Resistividade aparente do solo</b> .....	<b>20</b>
2.4	NORMAS E PROJETO DE MALHAS DE ATERRAMENTO .....	20
2.5	INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO .....	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>26</b>
3.1	ESTUDO DE CASO .....	26
3.2	FERRAMENTAS .....	28
3.3	CONDIÇÕES LIMITE .....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	<b>29</b>
4.1	INTEFACE DE PROJETO DE MALHAS NO MATLAB .....	29
4.2	INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE MALHAS DE ATERRAMENTO EM UMA REDE T2F.....	30
<b>4.2.1</b>	<b>A influência da resistividade no equacionamento de malhas</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Caso 1 versus Caso 2</b> .....	<b>31</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Seguridade das malhas dos casos 1 e 2</b> .....	<b>31</b>
4.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	34
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>35</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>36</b>
	<b>ANEXO I</b> .....	<b>38</b>
	<b>ANEXO II</b> .....	<b>40</b>

# 1 INTRODUÇÃO

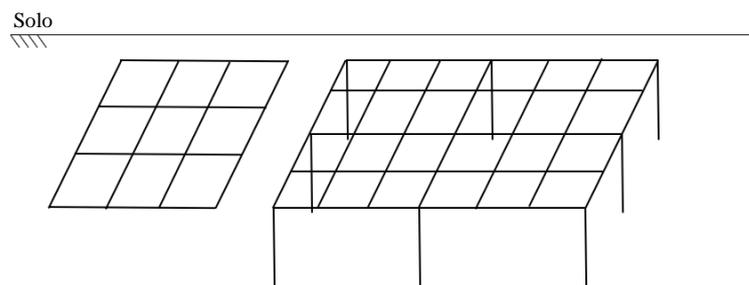
## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Desde a geração até a entrega aos consumidores finais, a energia elétrica passa por diversas subestações. Pode-se dizer que a operação confiável dessas subestações é responsável, na maior parte, pela integridade de todo o sistema elétrico. Para que as subestações operem de maneira íntegra, um dos principais elementos de sua construção é a elaboração de um bom projeto de sistema de aterramento, e neste caso são adotadas as malhas de aterramento (Vyas & Jamnani, 2011).

As malhas de aterramento, ou qualquer outro tipo de aterramento, são responsáveis por fornecer um caminho de corrente elétrica para a terra sem exceder os limites operacionais dos equipamentos, além disso devem ser capazes de proporcionar um ambiente seguro para proteger as pessoas que estão nas proximidades das instalações aterradas do perigo de choque elétrico (IEEE, 2013).

Na sua forma física, as malhas de aterramento são um conjunto de condutores nus interligados e enterrados no solo (ABNT, 2013). Suas principais configurações são malhas formadas apenas por condutores horizontais ou ainda a associação de condutores horizontais com verticais (hastes), as quais podem ser vistas na Figura 1. Os procedimentos para o seu projeto são apresentados em normas, como IEEE 80 (2013) e NBR 15751 (2013).

Figura 1 - Malhas de aterramento com e sem hastes verticais



Fonte: Autora.

O bom projeto e execução de uma malha de aterramento é essencial. Quando uma malha apresenta falhas, sejam elas decorrentes de imperícias no projeto ou na execução, há aumento do risco de o aterramento não conduzir suficientemente correntes elétricas para a terra. Nessas condições a corrente pode exceder limites operacionais do circuito elétrico, e como consequência pode danificar equipamentos, comprometer a continuidade de todo

serviço da rede, além de expor pessoas que estão nas proximidades do aterramento ao perigo de choques elétricos críticos (IEEE, 2013).

Para que uma malha de aterramento exerça sua função de forma adequada é necessário seguir as etapas de projeto descritas em normas. As abordagens de projeto geralmente são muito similares entre as normas e consistem em: (1) estipular os critérios de iniciais de projeto (resistividade de solo, capacidade de curto, níveis aceitáveis de potenciais perigosos, dentre outros), (2) calcular um sistema que respeita os limites de tensões de passo e de toque, (3) analisar o perfil de distribuição de potencial na superfície do solo e (4) executar a malha em campo (He et al., 2012).

A primeira etapa para o projeto da malha de aterramento é determinação da resistividade do solo. Esta variável pode ser entendida como a resistência equivalente entre as faces opostas de um volume de solo, com formato de um cubo de aresta unitária, que inclui o efeito dos minerais, rochas e fluídos contidos nesse espaço (ABNT, 2020). O solo possui estrutura desigual, sua resistividade varia de acordo com o tipo do solo, formação geológica, umidade, salinidade, temperatura, compactação e até contaminantes externos (Braga et al., 2008; Kindermann & Campagnolo, 1995). Estes fatores tornam a resistividade do solo suscetível a variações sazonais (Jácome et al., 2014). A resistividade do solo é influente em diversos cálculos do projeto do aterramento, por este motivo não deve ser negligenciada.

Diante das questões discutidas, nota-se que para um bom projeto de malha de aterramento, o primeiro passo é determinar a resistência do solo adequadamente. Neste contexto, este trabalho busca avaliar a influência da resistividade do solo no desempenho de malhas de aterramento que podem vir a serem utilizadas em uma rede de distribuição T2F. A rede T2F é um novo sistema de distribuição elétrica que busca repotenciar os sistemas monofásicos com retorno por terra (MRT) ou neutro (MRN), a partir de uma proposta não convencional para a distribuição trifásica rural que utiliza somente dois condutores aéreos e o solo como terceiro condutor fase.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Recentemente pesquisas desenvolvidas, no Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES) da UFSM, propõem um novo modelo de rede trifásica de distribuição rural. Esta nova rede tem como objetivo repotenciar sistemas monofásicos com retorno por terra (MRT) ou neutro (MRN), para isso utiliza dois cabos aéreos para duas fases e o solo como a terceira fase. Construtivamente, a terceira fase desta rede faz uso de um aterramento para conduzir correntes no solo, onde a corrente de carga é injetada no solo por

meio do sistema de aterramento do transformador isolador e é coletada pelo sistema de aterramento do transformador consumidor (Borges et al., 2017). Ou seja, para que esta rede opere em perfeito estado, sem danos ou riscos materiais e morais, uma das principais etapas envolvidas no projeto deste sistema é o dimensionamento adequado do aterramento a ser usado (Martins et al., 2022).

Até o momento o sistema de aterramento empregado nesta nova rede se dá através de hastes de aterramento. No entanto, em casos de terrenos com a resistividade do solo muito elevada nas camadas mais profundas, o aterramento do tipo malha de aterramento pode se tornar uma opção mais adequada, em relação às hastes, para a dispersão de correntes no solo. Em vista disso, este trabalho visa estudar o sistema de aterramento do tipo malha, com foco na influência da resistividade do solo no desempenho deste aterramento em uma rede de distribuição T2F.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo principal

Avaliar a influência da resistividade do solo no desempenho de malhas de aterramento que podem vir a serem utilizadas em redes do tipo T2F.

#### 1.3.2 Objetivos secundários

- i. Apresentar brevemente a rede T2F.
- ii. Estudar as características geoeletricas dos solos.
- iii. Pesquisar técnicas sobre dimensionamento de malhas.
- iv. Avaliar a influência da resistividade do solo no projeto do aterramento.
- v. Discutir sobre como o projeto de uma malha pode sofrer com a variação da resistividade do solo.

### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O capítulo 1 apresenta a contextualização do tema, a motivação para a realização da pesquisa, objetivo principal e específicos.

O capítulo 2 expõe a revisão bibliográfica. É realizada uma apresentação sobre a rede T2F. São estudadas propriedades eletromagnéticas do solo, onde são discutidas a permeabilidade magnética, permissividade elétrica e resistividade elétrica do solo. Em seguida é apresentada uma metodologia empregada de sondagem geoeletrica, de estratificação

do solo e resistividade aparente. Adiante são expostas as normas técnicas que tratam sobre projeto de malhas de aterramento e o passo a passo do dimensionamento. Para concluir o capítulo, é estudado a influência da resistividade do solo no desempenho de malhas de aterramento.

O capítulo 3 descreve a metodologia envolvida no trabalho, são apresentados o estudo de caso, as ferramentas utilizadas e as condições limites envolvidas.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação dos resultados experimentais, oriundos da metodologia desenvolvida no capítulo anterior.

O capítulo 5 destaca as principais conclusões do trabalho após a apresentação dos resultados dos casos no capítulo anterior.

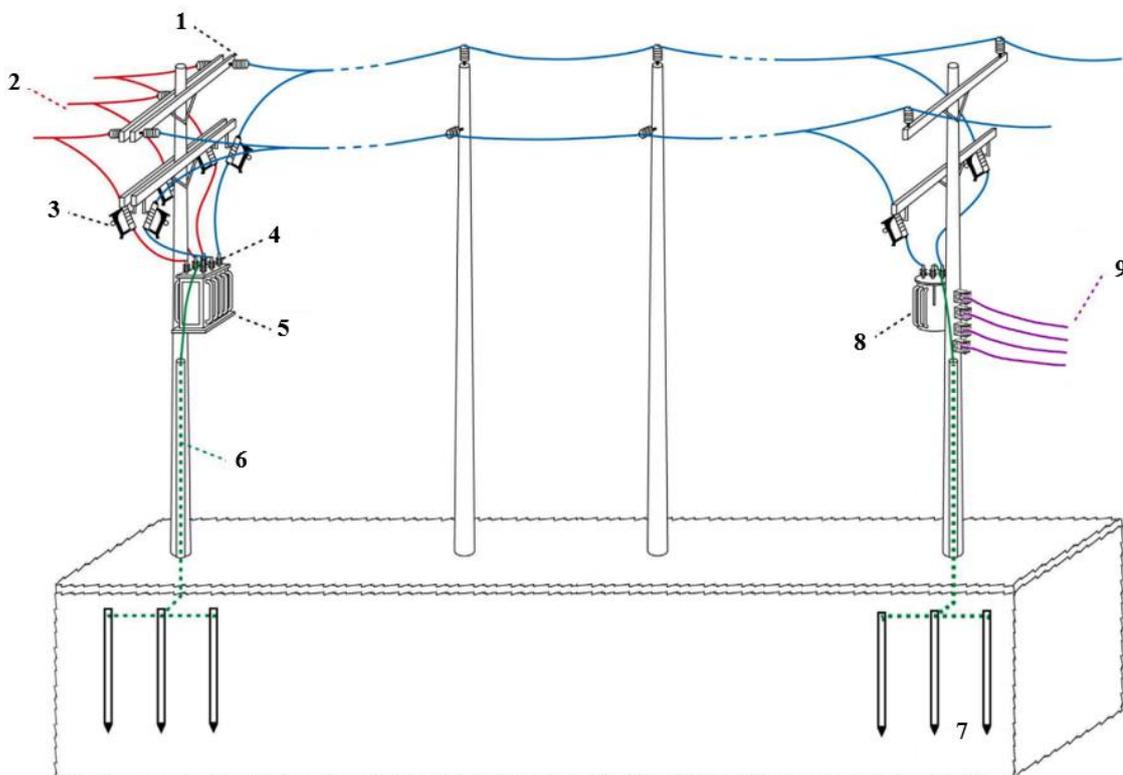
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda uma revisão bibliográfica relacionada ao tema de estudo. Inicialmente, realiza-se uma breve apresentação sobre a rede T2F. Em seguida, faz-se uma análise sobre as propriedades eletromagnéticas do solo. Também, apresenta-se uma metodologia utilizada para a obtenção da resistividade do solo. E, para finalizar, é exposto o processo de projeto de malhas de aterramento, suas normas e a influência da resistividade do solo no desempenho do aterramento.

### 2.1 REDE T2F

A rede T2F tem como proposta abastecer o meio rural com energia trifásica. Este novo sistema de distribuição elétrica busca repotenciar os sistemas monofásicos com retorno por terra (MRT) ou neutro (MRN), por meio de uma rede que utiliza somente dois condutores aéreos e o solo como terceiro condutor fase (Borges et al., 2017).

Figura 2 - Rede T2F



- |                                   |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 – Isoladores                    | 6 – Cabo de aterramento             |
| 2 – Rede primária de distribuição | 7 – Hastes de aterramento           |
| 3 – Chave fusível                 | 8 – Transformador consumidor        |
| 4 – Para-raios                    | 9 – Rede secundária de distribuição |
| 5 – Transformador isolador        |                                     |

Fonte: Adaptado de (Kräulich et al., 2023).

A topologia do sistema T2F, vista na Figura 2, conta com um transformador isolador, transformador consumidor, dois condutores fase aéreos e o solo (com aterramentos) como terceira fase. O transformador isolador é alimentado por tensão trifásica e possui ligação delta-estrela fase aterrada, com uma das fases do enrolamento do secundário solidamente aterrada. Já o transformador consumidor possui conexão delta fase aterrada-estrela aterrada, com uma das fases do primário aterrada. Assim, a conexão trifásica entre os dois transformadores se dá através de dois condutores aéreos e pelo aterramento de cada um dos transformadores (Marchesan et al., 2023).

Uma das particularidades desta rede é o aterramento, que neste caso é uma parte ativa do sistema. Por conta da circulação de corrente permanente no solo, o aterramento deve ser constantemente inspecionado, para garantir que as tensões superficiais no solo sejam sempre seguras para humanos e animais (Kräulich et al., 2023).

## 2.2 PROPRIEDADES ELETROMAGNÉTICAS DO SOLO

Neste estudo é necessário entender as principais propriedades eletromagnéticas do solo, uma vez que o solo é o responsável por dispersar as correntes elétricas conduzidas do sistema elétrico para o aterramento.

### 2.2.1 Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética relaciona a densidade de fluxo magnético que pode ser induzida em um material a partir de uma intensidade de fluxo magnético, sua grandeza é dada em Henry por metro (H/m). Os materiais magnéticos são normalmente associados à permeabilidade magnética relativa, um parâmetro adimensional, que é a razão entre a permeabilidade do material e a permeabilidade do vácuo. Por exemplo, materiais ferromagnéticos possuem permeabilidade relativa muito superior a 1, enquanto que materiais paramagnéticos possuem permeabilidade relativa ligeiramente superior a 1, sendo até considerados não-magnéticos.

A maioria dos solos são pobres em minerais ferromagnéticos, dessa forma é adotado que a sua permeabilidade relativa é igual a 1, ou seja, sua permeabilidade magnética se limita a ser igual à permeabilidade magnética do vácuo (Markovski et al., 2021; Sunde, 1968).

### 2.2.2 Permissividade elétrica

A permissividade elétrica pode ser entendida como a capacidade de um material se polarizar na presença de um campo elétrico, sua grandeza é dada em Farad por metro (F/m). Os materiais podem ser classificados de acordo com a sua permissividade relativa, também chamada de constante dielétrica, um valor adimensional que é determinado a partir da razão entre a capacidade de um meio armazenar campo elétrico e a permissividade relativa do vácuo. Na Tabela 1 são apresentados alguns valores de constantes dielétricas de alguns materiais geológicos.

Tabela 1 - Permissividade relativa de alguns materiais geológicos

<b>Material</b>	<b>Constante dielétrica</b>
Areia (seca)	3 - 6
Argila (molhada)	8 - 40
Pântano	12
Campo agrícola	15
Campo de pastagem	13
Solo comum	16
Concreto	4 - 30
Asfalto	3 - 5

Fonte: (Reynolds, 2011).

### 2.2.3 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica pode ser definida como a habilidade do meio em se opor à movimentação de cargas elétricas sob ação de um campo elétrico, é medida em Ohms por metro ( $\Omega \cdot m$ ). Sua inversa é chamada de condutividade elétrica, dada em Siemens por metro (S/m), e retrata a capacidade do meio em permitir a movimentação de cargas elétricas.

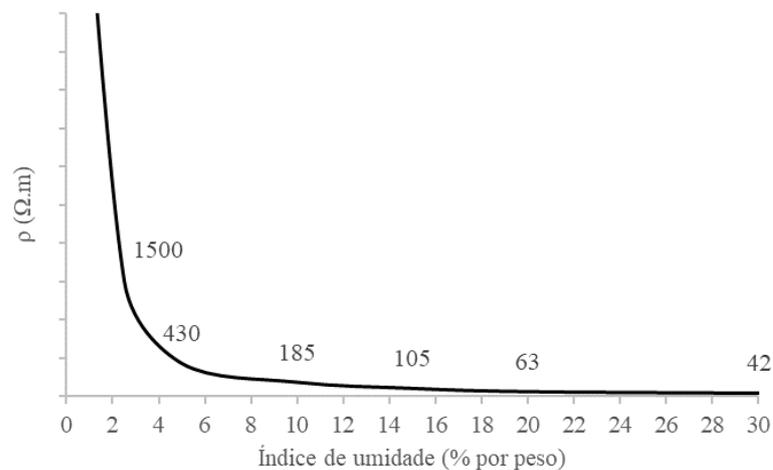
Esta é uma propriedade do solo sujeita a variações sazonais. Há estudos que mostram que a resistividade do solo sofre variações sazonais da ordem de 60% ( $\pm 30\%$  em torno de um valor médio) até uma profundidade de 1,5 m, enquanto que para profundidades maiores que essa a variação reduz para 20% (Cotrim, 2008; Hasse & Wiesinger, 1993).

A resistividade do solo é suscetível a fatores como a umidade, temperatura, estratificação, composição química, compactação e granulometria do solo (Visacro Filho, 2002), estes serão detalhados abaixo.

### 2.2.3.1 Umidade

A condutividade elétrica do solo é influenciada por mecanismos eletrolíticos. Isto significa que quando um determinado solo tem uma porcentagem maior de umidade os sais presentes se dissolvem, criando um meio favorável à passagem de corrente. Desse modo, quanto maior a concentração de umidade menor será a resistividade. Além disso, pode-se dizer que a resistividade do solo varia sazonalmente, com períodos de secas e chuvosos (Kindermann & Campagnolo, 1995). Na Figura 3 pode ser visto a variação da resistividade de um solo arenoso em relação à variação da concentração de umidade.

Figura 3 - Resistividade versus umidade percentual de um solo arenoso



Fonte: Adaptado de (Kindermann & Campagnolo, 1995).

### 2.2.3.2 Temperatura

O efeito da temperatura está diretamente relacionado com a umidade. Solos com elevadas temperaturas tendem a ter maior evaporação, baixando a concentração de umidade. À medida que a temperatura diminui a resistividade do solo tende a aumentar, pois a umidade retida tende a se congelar, inviabilizando a solubilização de sais minerais do solo (Visacro Filho, 2002). Na Tabela 2 pode ser visto o efeito da temperatura, mantendo o nível de umidade, na resistividade de um solo arenoso.

Tabela 2 - Efeito da temperatura na resistividade de um solo arenoso

Temperatura (°C)	Resistividade de um solo arenoso ( $\Omega.m$ )
+ 20	72
+ 10	33
0 (água)	138
0 (gelo)	300
- 5	790
- 15	3.300

Fonte: (Kindermann & Campagnolo, 1995).

### 2.2.3.3 Estratificação

O solo é geralmente composto por várias camadas, estratificações, onde cada uma delas possui uma resistividade, espessura e características próprias. Em geral, as diferentes camadas são horizontais, paralelas à superfície do solo e estão relacionadas à formação geológica do terreno. Na Figura 4 pode ser visto um exemplo de um solo com três níveis de estratificação. Estas diferentes camadas do solo influenciam na dispersão de corrente (Kindermann & Campagnolo, 1995).

Figura 4 - Perfil com três camadas de solo de um terreno da UFSM (próximo ao jardim botânico)



Fonte: Fotografia própria.

#### 2.2.3.4 Composição química

Como já discutido, o comportamento do solo é influenciado por mecanismos eletrolíticos, onde os sais do solo combinados com água influenciam na resistividade do mesmo. Pode-se dizer então que o tipo e a quantidade de sais presentes no solo influenciam na resistividade, como por exemplo, uma concentração de 0,1% de ácido sulfúrico contribui muito mais para a redução da resistividade do solo do que a mesma concentração de sulfato de cobre (Tagg, 1964).

A análise da composição química é também importante para avaliar a compatibilidade química entre materiais do aterramento e o solo. A depender do tipo do solo pode favorecer a corrosão dos eletrodos, comprometendo a eficiência e diminuindo a vida útil do aterramento (Vijayaraghavan et al., 2004).

#### 2.2.3.5 Compactação e granulometria do solo

O solo quando compactado apresenta melhor caminho para a corrente elétrica, pois possuem melhor continuidade física. Desse modo, quanto maior a compactação do solo menor é sua resistividade. Já a granulometria se refere ao tamanho dos grãos que formam o solo. Quanto maior o tamanho do grão maior é resistividade do solo, pois menor é sua absorção de água e menor sua área de contato com os grãos vizinhos (Visacro Filho, 2002).

### 2.3 SONDAGEM GEOELÉTRICA E ESTRATIFICAÇÃO DO SOLO

Conforme a NBR 7117 (2020), o termo “medição da resistividade do solo” é equivocado, pois esta variável não pode ser diretamente medida. Para conhecer a resistividade de um solo é preciso realizar uma sondagem geoeletrica. Esta mede a corrente elétrica e os campos elétricos e magnéticos do solo para, posteriormente, tais valores coletados serem submetidos a um tratamento matemático.

#### 2.3.1 Sondagem geoeletrica

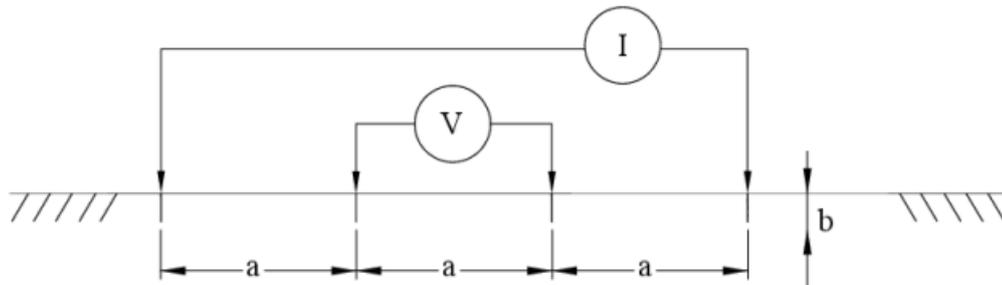
Há diferentes arranjos de sondagens geoeletricas, os quais estão associados à configuração de medição, como o arranjo dipolo-dipolo, arranjo de Schlumberger, Wenner e entre outros. Estes métodos resultam um perfil de resistividade do solo em profundidade, visto da superfície do solo (ABNT, 2020). Neste trabalho será apresentado o arranjo de Wenner, uma sondagem elétrica vertical.

### 2.3.1.1 Arranjo de Wenner

Este método realiza uma análise da distribuição vertical da resistividade, resulta em uma curva de resistividade aparente e é adequado para uma sondagem de camadas mais rasas do solo (ABNT, 2020).

Este arranjo utiliza quatro hastes igualmente espaçadas ( $a$ ) e enterradas em uma profundidade conhecida ( $b$ ). As duas hastes externas são destinadas para a injeção de correntes elétricas e as duas hastes centrais são destinadas para a medição da diferença de potencial gerada pela corrente. Este arranjo é ilustrado na Figura 5 e seu equacionamento em (1).

Figura 5 - Arranjo de Wenner



Fonte: (IEEE, 2012).

$$\rho_a = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (1)$$

Quando as hastes não estão enterradas a uma profundidade maior que  $0,1 \times a$  o termo  $b$  pode ser desprezado, resultando na equação (2). No entanto, para espaçamentos pequenos, como 1 metro esta fórmula não deve ser desprezada (IEEE, 2012).

$$\rho_a = 4\pi aR \quad (2)$$

De acordo com a NBR 7117 (2020), é recomendado que as hastes de medição deste método iniciem com um espaçamento de 1 m e sigam em potências de 2 (1 m, 2 m, 4 m, 8 m, 16 m, 32 m, 64 m), se possível. Outra observação que o documento traz é sobre as variações sazonais das camadas superficiais do solo, ele recomenda que as medições sejam realizadas no período mais seco do ano.

Com as medições em campo realizadas é preciso substituir os resultados em (1) ou (2). Posteriormente se deve analisar se há algum valor extremo que foge do padrão da maioria, é recomendado realizar uma análise gráfica *log-log*, em caso afirmativo este valor pode ser eliminado. Feito isso, a curva média da resistividade aparente pode ser obtida por meio da média geométrica dos valores de resistividade aparente calculados (ABNT, 2020).

### **2.3.2 Estratificação do solo**

Com a curva média da resistividade aparente é possível determinar quantas camadas o solo possui, assim é possível determinar o melhor método de estratificação do solo. Com essas metodologias de estratificação é possível determinar a resistividade e a profundidade de cada camada. Para solos identificados com duas camadas há diversos modos de estratificação, há o método usando curvas, existe a metodologia que usa técnicas de otimização e também há o método simplificado. Para solo com várias camadas há os métodos de Pirson e gráfico de Yokogawa (Kindermann & Campagnolo, 1995).

### **2.3.3 Resistividade aparente do solo**

Os equacionamentos de projetos de malhas de aterramento somente usam um único valor de resistividade do solo. Desse modo, em caso de solo não uniforme pode ser empregado a resistividade da primeira camada ou então a resistividade aparente, a depender da situação (ABNT, 2013). A resistividade aparente é uma técnica que determina a resistividade do solo que é vista por uma malha, seu valor pode ser determinado pela metodologia de Endrenyi e o seu equacionamento é apresentado no Anexo I (Endrenyi, 1963).

## **2.4 NORMAS E PROJETO DE MALHAS DE ATERRAMENTO**

O conceito, projeto, aspectos práticos, procedimentos e técnicas para verificação do aterramento, são tópicos discutidos pela norma internacional IEEE 80 (2013). Esta norma é um guia para segurança no aterramento de subestações CA, com frequências entre 50 e 60 Hz. Nesta normativa não são abordados assuntos relacionados a efeitos de faltas oriundas de raios e nem subestações CC.

Ao se tratar de âmbito nacional, tem-se a NBR 15751 (2013). Nela são estabelecidos os requisitos para dimensionamento e as condições de segurança de pessoas e instalações dentro e fora dos limites do sistema de aterramento de uma subestação. Esta norma brasileira é

limitada a aterramentos de subestações acima de 1 kV e em frequência industrial. Sua metodologia para projetos de malhas é baseada na norma internacional, citada anteriormente.

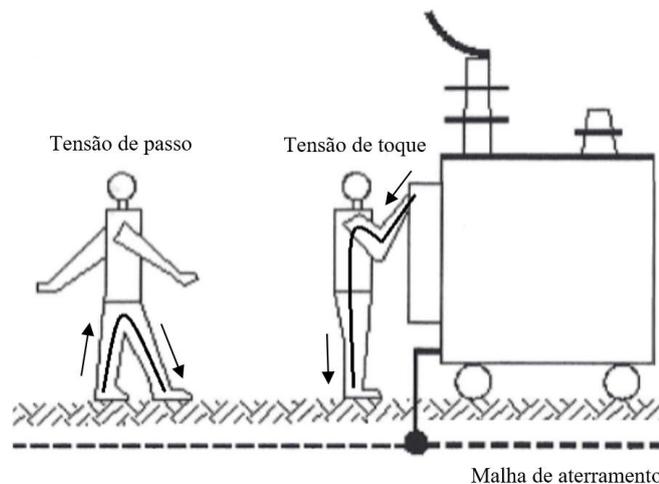
Conforme a IEEE 80 (2013), o aterramento seguro deve ser capaz de conduzir correntes elétricas para a terra, seja em condições normais ou de falha, sem exceder limites operacionais e de equipamentos da rede. Além disso, o aterramento seguro, reduz o risco do surgimento de discontinuidades na rede e de choque elétrico crítico em pessoas nas proximidades da instalação aterrada. Para estar em conformidade com estes requisitos, sugere-se pela norma que o projeto de malha de aterramento, com e sem hastes verticais, siga um fluxograma de 12 etapas. Detalhadamente os passos são descritos abaixo, enquanto que o seu resumo é apresentado na Figura 7. Além disso, todo o equacionamento envolvido nas 12 etapas é exposto no Anexo II.

1. Análise do terreno onde será instalado e obtenção da **resistividade do solo**.
2. Determinação do **condutor da malha**, para tal pode ser utilizado (15) em casos de correntes simétricas. Nesta etapa também deve ser calculada a **máxima corrente de falta** que pode vir a atingir qualquer ponto condutor do aterramento, e o **tempo** necessário para **eliminação desta falta**.

A seleção do condutor é uma etapa crucial para a integridade de um sistema de aterramento, ele deve ser escolhido com base na sua condutividade, resistência a fusão e deterioração mecânica sob condições extremas de falta, robustez mecânica e funcionalidade. Já a máxima corrente de falta e o tempo de extinção dessa falta dependem do circuito elétrico conectado à malha. É difícil determinar qual tipo e localização de falta resultará no maior fluxo de corrente entre a malha de aterramento e a terra circundante, então, por razões práticas a norma IEEE 80 recomenda investigar faltas fase-terra e fase-fase-terra, visto sua maior probabilidade de ocorrência.

3. Análise das **tensões toleráveis de toque e passo em humanos**, estas podem ser avaliadas tanto para pessoas de 50 kg como para 70 kg, como mostram as equações de (16) à (20). A tensão de passo pode ser definida como a diferença no potencial de superfície experimentada por uma pessoa com os pés afastados em um metro, sem contato com nenhum outro objeto aterrado. Já a tensão de toque é a diferença entre o potencial do solo e o potencial da superfície aterrada onde a pessoa está tocando. Na Figura 6 pode ser vista a representação dessas tensões.

Figura 6 - Tensões de passo e toque



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2013).

4. Projeto inicial da **geometria da malha**.

Nesta etapa são analisados o terreno, os equipamentos e estruturas que estão na região de instalação da malha, para então determinar uma geometria inicial do aterramento.

5. Estimativa da **resistência da malha**, a qual pode ser determinada por meio de (21), equação de Sverak.

6. Cálculo da **máxima corrente na malha** ( $I_G$ ), mediante (22).

É a porção da corrente de falta simétrica que flui entre a malha e a terra. Esta corrente leva em consideração a resistência da malha, a divisão de corrente que existe entre caminhos alternativos de retorno e um fator de decremento.

7. Cálculo do **GPR** (*ground potential rise*), em (23). Se este valor estiver abaixo de  $T_{toque}$  a malha se encontra pronta.

O GPR indica o máximo potencial elétrico que um eletrodo de aterramento pode atingir em relação a um ponto de aterramento distante.

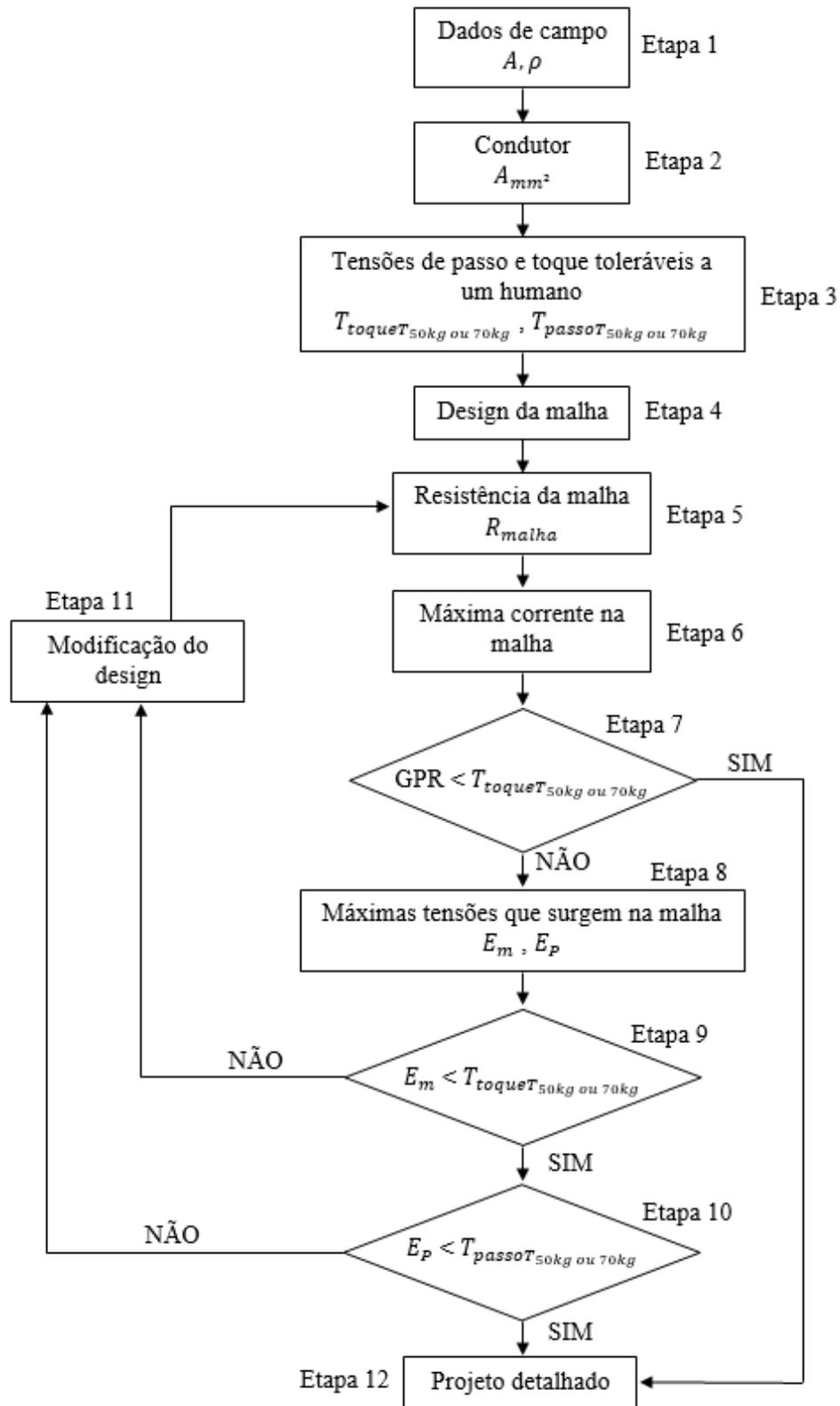
8. Se o passo 7 não é satisfeito, calcula-se as **tensões de toque e passo** ( $E_m$  e  $E_p$ ), equacionadas de (24) à (39).

A tensão de toque é a máxima tensão de toque dentro de uma submalha da malha de aterramento. Enquanto que a tensão de passo é a diferença de potencial de um pé no canto

mais extremo da malha e o outro pé 1 m afastado em direção fora da malha. Estas equações são aproximadas e introduzem alguns erros nos resultados.

9. Se  $E_m$  é maior que  $T_{toqueT}$  a geometria deve ser refeita (retorna ao passo 4), caso contrário é dado seguimento ao passo 10.
10. Se  $E_p$  é maior que  $T_{passoT}$  a geometria deve ser refeita (volta ao passo 4), caso contrário é dado prosseguimento às etapas.
11. Conferência dos limites toleráveis, se excedidos o projeto geométrico da malha deve ser refeito.
12. Ao atender todos os critérios anteriores detalhes de projeto podem ser adicionados, como por exemplo, acréscimo de uma haste de aterramento na base de um para-raios.

Figura 7 - Fluxograma de etapas do projeto de malhas de aterramento



Fonte: Adaptado de (IEEE, 2013).

## 2.5 INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO

Entre os aspectos mais críticos de um projeto de malha de aterramento estão a máxima corrente de malha em situação de falta ( $I_g$ ), duração da falta ( $t_f$ ), duração do choque ( $t_s$ ), resistividade do solo ( $\rho$ ), resistividade do material adicionado na camada superior do solo ( $\rho_s$ ) e a geometria da malha (IEEE, 2013).

De acordo com o projeto de malhas apresentado na seção anterior, a resistividade do solo impacta diretamente nas tensões de passo e toque toleráveis, na resistência da malha e nas tensões de toque e passo máximo que surgem na malha. De maneira indireta impacta no GPR, pois esta é dependente da resistência da malha. Ou seja, a resistividade do solo não deve ser negligenciada.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia desenvolvida ao longo deste trabalho. São apresentados o estudo de caso a ser explorado, as ferramentas para desenvolver a análise e as condições limite envolvidas neste estudo.

#### 3.1 ESTUDO DE CASO

Para o desenvolvimento desse trabalho é utilizada a resistividade de um terreno, localizado dentro do domínio da UFSM, que atualmente acomoda uma rede T2F. O solo deste terreno teve seu levantamento geoeletrico previamente realizado, sendo estratificado e modelado como um solo de duas camadas. Foi utilizado o método de Wenner com cinco linhas de medições para a sondagem geoeletrica e, para a estratificação, foi empregado o método de curvas. Os resultados da estratificação são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados do terreno em que está instalada uma rede T2F

<b>Resistividade da primeira camada <math>\rho_1</math></b>	302,32 $\Omega.m$
<b>Profundidade da primeira camada</b>	0,81 m
<b>Resistividade da segunda camada <math>\rho_2</math></b>	211,42 $\Omega.m$
Fonte: Dados internos laboratório LAPES - UFSM.	

Para possibilitar a avaliação da influência da resistividade do solo no desempenho de malhas, as resistividades das camadas da Tabela 3 são tratadas como valores médios, a partir desses é criado um intervalo de variação  $\pm 30\%$  na resistividade da primeira camada e  $\pm 20\%$  na segunda camada. Tal intervalo, apresentado na Tabela 4, reproduz o efeito da sazonalidade da pesquisa mencionada na sessão 2.2.3 deste trabalho. A profundidade da primeira camada, neste estudo, se mantém inalterada.

Tabela 4 - Variação da resistividade do solo a partir dos valores médios (destacados em negrito)

Amostras	Primeira camada $\rho_1$		Segunda camada $\rho_2$	
	Varição	Resistividade ( $\Omega.m$ )	Varição	Resistividade ( $\Omega.m$ )
1	-30%	211,62	-20%	169,14
2	-25%	226,74	-17%	176,18
3	-20%	241,86	-13%	183,23
4	-15%	256,97	-10%	190,28
5	-10%	272,09	-7%	197,33
6	-5%	287,20	-3%	204,37
7	<b>0%</b>	<b>302,32</b>	<b>0%</b>	<b>211,42</b>
8	5%	317,44	3%	218,47
9	10%	332,55	7%	225,51
10	15%	347,67	10%	232,56
11	20%	362,78	13%	239,61
12	25%	377,90	17%	246,66
13	30%	393,02	20%	253,70

Fonte: Autoria própria.

Outros dados importantes para este estudo são a corrente de curto máxima do sistema conectado à malha e o tempo de eliminação desta, valores reais da rede T2F instalada no terreno mencionado anteriormente, definidos na Tabela 5. A corrente de curto máxima do sistema deve ser considerada igual a máxima corrente na malha.

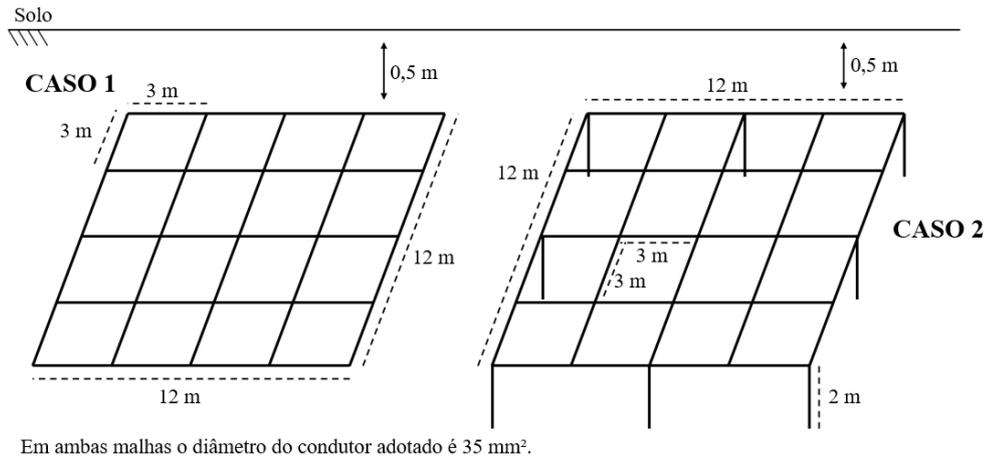
Tabela 5 - Informações do sistema conectado à malha

<b>Corrente de curto máxima do sistema</b>	80 A
<b>Tempo de eliminação do curto</b>	0,44 s

Fonte: Dados internos laboratório LAPES - UFSM.

Quanto à geometria da malha, este trabalho examinará dois casos distintos. O primeiro consiste de uma malha composta apenas por eletrodos horizontais, enquanto que o segundo caso utiliza uma malha com eletrodos horizontais e verticais (hastes). O detalhamento das geometrias e profundidades de instalação são expostos na Figura 8. Destaca-se que os dois casos compartilham das mesmas características de solo, mesma corrente de curto máximo do sistema e o mesmo tempo de extinção do curto.

Figura 8 - Casos de malhas a serem estudadas



Fonte: Autoria própria.

### 3.2 FERRAMENTAS

Para avaliar a influência da resistividade do solo em projetos de malha é utilizada a metodologia de projetos analítica, presente na norma IEEE 80, exposta na sessão 2.3 e Anexo II deste trabalho. Também é usada a metodologia de Endrenyi para cálculo da resistividade aparente, apresentada na sessão 2.3.3 e no Anexo I. Para facilitar a obtenção dos resultados, as equações de projeto de malhas serão implementadas na interface App Designer do *software* Matlab.

### 3.3 CONDIÇÕES LIMITE

Em projetos de malhas de aterramento há dois principais parâmetros que podem fugir do controle do projetista, sejam por condições ambientais ou combinação de eventos desastrosos, que são: a variação da resistividade do solo e a corrente de falta. Este trabalho limita-se somente às variações de resistividade do solo.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A partir da metodologia apresentada no capítulo anterior busca-se entender como a resistividade do solo pode influenciar no projeto e no desempenho de malhas de aterramento que podem vir a ser utilizadas em redes T2F. Para isso, o primeiro passo é apresentar a interface criada no Matlab, onde as equações de malhas de aterramento foram implementadas e os resultados do trabalho obtidos. Posteriormente, é apresentado os dois casos de malhas estudados e como o a resistividade do solo impacta em cada projeto.

### 4.1 INTEFACE DE PROJETO DE MALHAS NO MATLAB

Para obtenção dos resultados foi desenvolvido um programa com interface gráfica, na ferramenta App Designer do *software* Matlab, destinado à realização de projetos de malhas de aterramento com geometrias quadrada e retangular. A metodologia de cálculo adotada segue o apresentado nos Anexos I e II deste trabalho. Sua interface, exposta na Figura 9, é interativa e de fácil manuseio. Os campos em cinza são dados que o usuário deve preencher, enquanto que os em branco são as variáveis de retorno.

Figura 9 – Interface criada para cálculo de projetos de malhas de atermentos quadradas ou retangulares

PROJETOS DE MALHAS DE ATERRAMENTO  
programa destinado a projetos de malhas com geometria quadrada e retangular

Resist. 1° Camada 302.32 ohm.m  
Resist. 2° Camada 211.41 ohm.m  
Profund. 1° cam. 0.81 m

Camada de brita  
 Com brita  
 Sem brita  
Tam. Camada 0.00 m

$I_{malha}$  80 A  
 $t_{defeito}$  0.4 s

Entre com os dados da malha conforme a figura acima

a 9.00 m  
b 9.00 m  
ea 3 m  
eb 3 m  
Profundidade da malha 0.5 m  
Seção transv. condutor 35 mm<sup>2</sup>  
N° hastes 8  
Comp. hastes 1.5 m

CALCULE O RESULTADO FINAL

Ttoque máximo 50kg 254.18 V  
Tpasso máximo 50kg 492.09 V  
Resistividade aparente 251.01 ohm.m  
Resistência da malha 14.22 ohm

GPR 1137.61 V  
Ttoque máximo malha 246.15 V  
Tpasso máximo malha 227.61 V

Como GPR está acima do limite da tensão de toque, é necessário calcular  $E_m$  (potencial de toque máximo encontrado dentro de uma submalha da malha de terra, quando se tem defeito máximo). Neste caso, vemos que  $E_m$  é menor que a tensão de toque máximo. Diante disso é calculado o  $E_p$  (maior potencial de passo que surge na superfície da malha, quando há máximo defeito), o qual é menor que a tensão de passo máximo. Desse modo, a malha é segura e pode ser implementada.

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 INFLUÊNCIA DA RESISTIVIDADE DO SOLO NO DESEMPENHO DE MALHAS DE ATERRAMENTO EM UMA REDE T2F

Os resultados experimentais obtidos são expostos na Tabela 6, a partir deles é possível entender o comportamento dos dois casos estudados.

Tabela 6 - Resultados experimentais dos casos 1 e 2

1° CASO							
Amostra	$T_{toqueT50kg}$	$T_{passoT50kg}$	$\rho_a$	$R_{malha}$	$GPR$	$E_m$	$E_p$
1	230,39	396,92	187,12	7,99	638,83	158,79	130,72
2	234,35	412,79	197,51	8,43	674,30	170,13	140,05
3	238,32	428,65	207,89	8,87	709,73	181,48	149,39
4	242,28	444,50	218,26	9,31	745,12	192,82	158,73
5	246,25	460,37	228,62	9,76	780,49	204,16	168,07
6	250,21	476,22	238,96	10,20	815,79	215,50	177,40
7	254,18	492,09	249,09	10,64	851,11	226,85	186,74
8	258,15	507,95	259,64	11,08	886,40	238,19	196,08
9	262,11	523,81	269,97	11,52	921,65	249,53	205,41
10	266,08	539,67	280,29	11,96	956,91	260,87	214,75
11	270,04	555,53	290,62	12,40	992,15	272,21	0,00
12	274,01	571,39	300,94	12,84	1027,38	283,56	0,00
13	277,97	587,26	311,25	13,28	1062,59	294,90	0,00
2° CASO							
1	230,39	396,92	187,12	7,80	624,15	115,51	113,56
2	234,35	412,79	197,51	8,24	658,80	123,76	121,67
3	238,32	428,65	207,89	8,67	693,43	132,01	129,78
4	242,28	444,50	218,26	9,10	728,00	140,26	137,89
5	246,25	460,37	228,62	9,53	762,56	148,51	146,00
6	250,21	476,22	238,96	9,96	797,05	156,76	154,11
7	254,18	492,09	249,09	10,39	831,56	165,01	162,23
8	258,15	507,95	259,64	10,83	866,04	173,26	170,34
9	262,11	523,81	269,97	11,26	900,47	181,51	178,45
10	266,08	539,67	280,29	11,69	934,93	189,76	186,56
11	270,04	555,53	290,62	12,12	969,35	198,01	194,67
12	274,01	571,39	300,94	12,55	1003,78	206,27	202,78
13	277,97	587,26	311,25	12,98	1038,17	214,52	210,90

Fonte: Autoria própria.

### 4.2.1 A influência da resistividade no equacionamento de malhas

Para o cálculo de  $T_{toqueT50kg}$  e  $T_{passoT50kg}$ , seguiu-se a recomendação da NBR 15751 (2013), foi utilizada a resistividade da camada superficial do solo, neste caso a resistividade da primeira camada ( $\rho_1$ ). Com isso, ao variar  $\rho_1$  em -30% a 30% a partir do valor médio, a  $T_{toqueT50kg}$  variou de -9,36% a 9,36%, enquanto que a  $T_{passoT50kg}$  variou -19,34% a 19,34%.

Ao calcular a resistência da malha ( $R_{malha}$ ) foi utilizada a resistividade aparente ( $\rho_a$ ), recomendada pela NBR 15751 (2013), e a mesma equação para ambos casos de malhas. À medida que a  $\rho_a$  do solo aumenta, a  $R_{malha}$  aumenta na mesma proporção.

O *ground potential rise* ( $GPR$ ) é diretamente proporcional à  $R_{malha}$ . Logo, na medida que aumenta a  $\rho_a$ , a  $R_{malha}$  aumenta na mesma proporção, por consequência o  $GPR$  também.

Já para o cálculo das máximas tensões de toque e passo que surgem na malha ( $E_m$  e  $E_p$ ) foi utilizado  $\rho_1$ , orientação da NBR 15751 (2013). Tais tensões são diretamente proporcionais à  $\rho_1$  e aumentam na mesma intensidade, afirmação válida para os dois casos de malhas estudados.

#### 4.2.2 Caso 1 versus Caso 2

As equações de tensões de toque e passo toleráveis ( $T_{toqueT50kg}$  e  $T_{passoT50kg}$ ), não estão relacionadas com a geometria ou quantidade de eletrodos da malha, são apenas influenciadas pela resistividade do solo e pelo tempo de eliminação do curto. Desse modo, como os dois casos foram testados no mesmo terreno e mesmo tempo de eliminação do curto, os seus resultados são iguais.

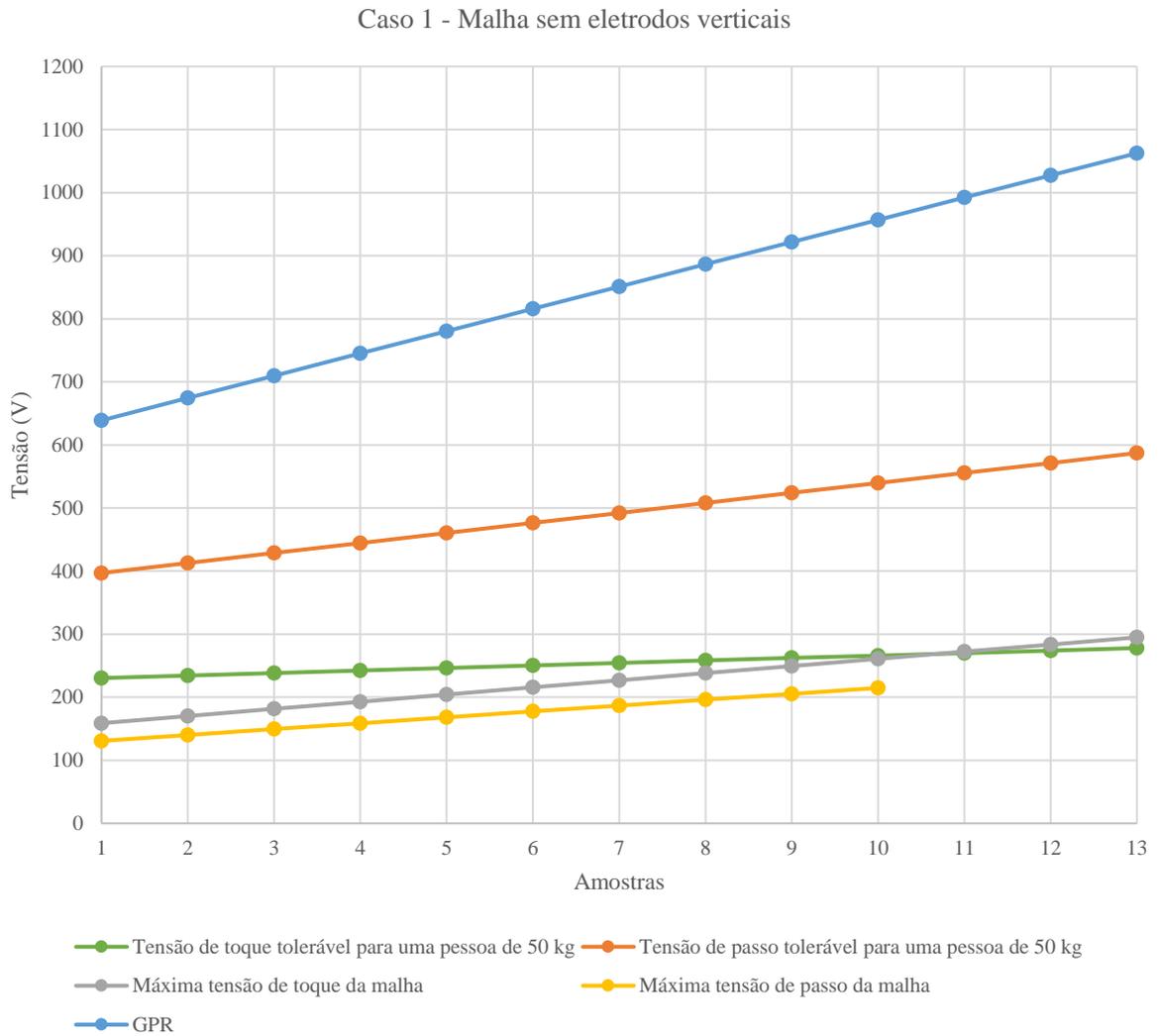
Em relação ao resultado da resistência dos dois casos, há uma breve diferença, a resistência do caso 1 é ligeiramente maior que a do caso 2, pelo motivo do caso 1 possuir menos comprimento de eletrodos. Quanto mais eletrodos menor a sua resistência. O caso 2 possui a  $R_{malha}$  2,29% menor que o caso 1. O  $GPR$  do caso 2 também é 2,29% menor que o do caso 1, pois ele depende de  $R_{malha}$ .

As equações utilizadas para  $E_m$  e  $E_p$  são diferentes em casos de malhas com ou sem hastes, o que faz com que o resultado do caso 2 seja 27,26% menor na  $E_m$  e 13,28% menor na  $E_p$ , em relação ao caso 1.

#### 4.2.3 Seguridade das malhas dos casos 1 e 2

A malha proposta no caso 1 é formada apenas por eletrodos horizontais, enquanto que a malha do caso 2 contempla hastes. Ao seguir a metodologia de estudo proposta, obteve-se os resultados apresentados nas Figuras 10 e 11. Em cada uma destas figuras é visto um gráfico que relaciona a amostra (eixo x) por tensão (eixo y), onde cada amostra é uma resistividade do solo (previamente definida na Tabela 4) e no eixo da tensão estão as variáveis responsáveis pela determinação da seguridade da malha.

Figura 10 - Desempenho da malha proposta no caso 1



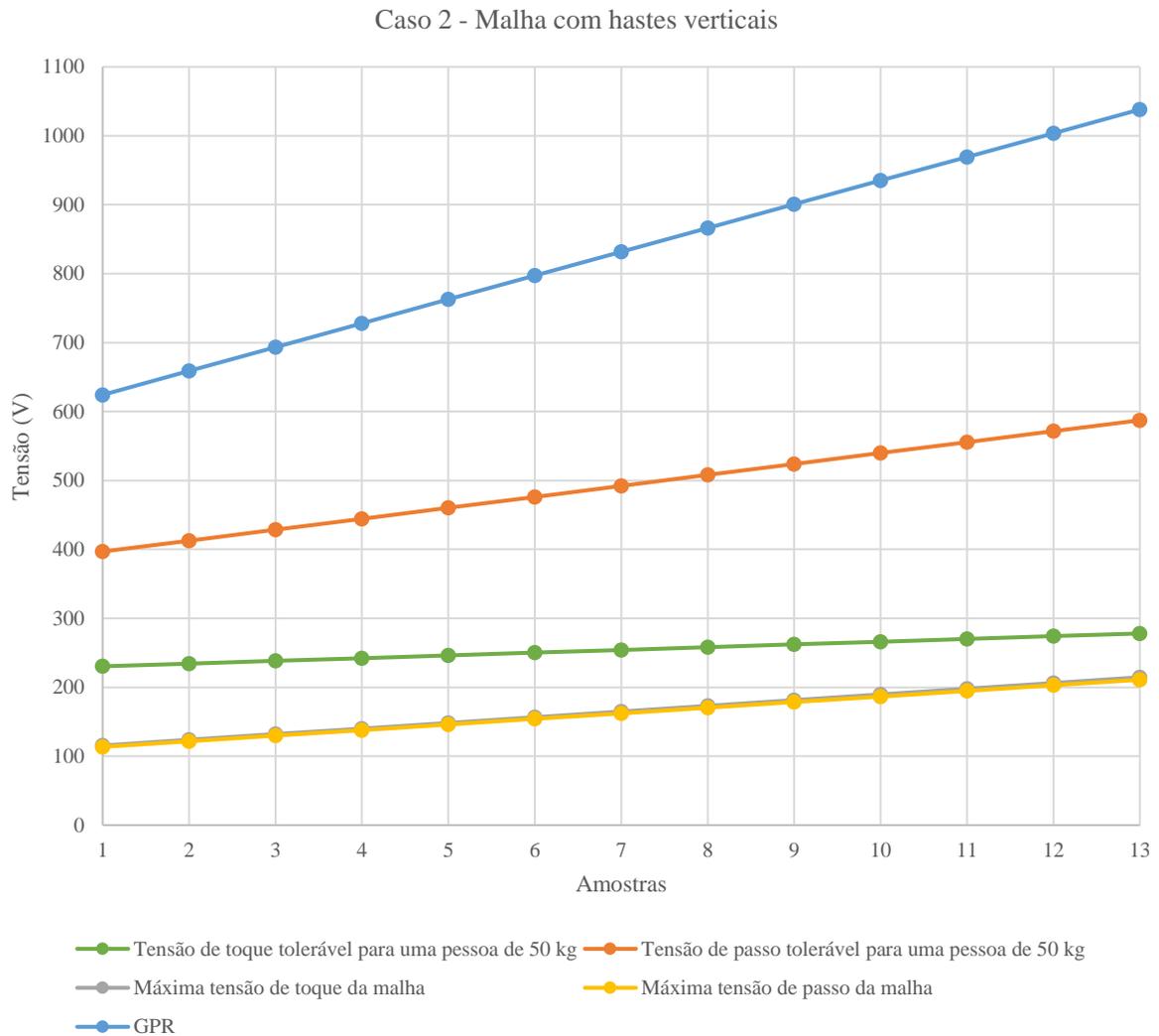
Fonte: Autoria própria.

De acordo com a IEEE 80 (2013), para que uma malha seja segura é preciso que o GPR seja menor que a tensão de toque tolerável, ou então que as tensões de toque e passo na malha sejam menores que as tensões de toque e passo toleráveis. Então, a partir disso é possível determinar se as malhas são seguras.

A malha do caso 1 é segura até a amostra 10, quando  $\rho_1$  varia 15% e  $\rho_2$  10% em relação aos valores médios. Até este ponto, apesar do GPR ser maior que a tensão de toque tolerável, as máximas tensões de toque e passo calculadas da malha são menores que as tensões de toque e passo toleráveis. Quando a resistividade passa deste ponto, a máxima tensão de toque da malha é superior à tensão de toque tolerável, há comprometimento do desempenho e segurança do sistema de aterramento. Ou seja, se o solo em que está enterrada

esta malha for submetido há condições de temperaturas positivas ou negativas extremas tem sua resistividade aumentada, desse modo a malha pode não ser mais eficiente.

Figura 11 - Desempenho da malha proposta no caso 2



Fonte: Autoria própria.

Já a malha do caso 2 é segura em toda a faixa de resistividade do solo estudada. Novamente o GPR é sempre superior à tensão de toque tolerável, no entanto as máximas tensões de toque e passo calculadas da malha são menores que as tensões de toque e passo toleráveis em todo o intervalo de variação de resistividade.

Para a geração destes resultados, foi aplicada a variação sazonal de resistividade do solo constatada pelo estudo visto na sessão 2.2.3. Ou seja, a malha do caso 2 é segura mesmo com as interferências climáticas.

### 4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A criação da interface gráfica, na ferramenta App Designer do *software* Matlab, para o desenvolvimento de cálculos de projetos de malhas de aterramento permitiu agilidade e praticidade na obtenção dos resultados.

Quanto aos resultados experimentais é possível observar que as tensões de passo e toque toleráveis não variam na mesma proporção que a resistividade, enquanto que as outras variáveis (resistência da malha, o *ground potential rise* e as tensões de passo e toque da malha) sim. Em relação ao uso de hastes em um projeto de malhas, pode-se dizer que seu emprego é significativo para a redução das tensões de toque e passo que surgem na malha.

Ao pensar em seguridade, a malha com hastes verticais (caso 2) se mostrou segura em toda a faixa de variação da resistividade do solo adotada, enquanto que a malha do caso 1 não. Ou seja, o projeto do caso 2 mesmo se submetido a variações sazonais de temperaturas se mantêm em segurança, diferente do caso 1.

## 5 CONCLUSÃO

No primeiro momento do estudo foi realizada uma contextualização, onde são explicados o que são malhas de aterramento, o motivo pelo qual é importante realizar um bom projeto e execução de uma malha, quais requisitos são necessários para tal e por qual razão a resistividade do solo é um parâmetro importante para análise. Além disso foi explicada a motivação do trabalho, o qual possui foco na avaliação da influência da resistividade do solo no desempenho de malhas de aterramento que podem vir a serem utilizadas em uma rede T2F.

Em seguida foi elaborada uma revisão bibliográfica, onde se dissertou sobre as propriedades eletromagnéticas do solo, sobre a sondagem geométrica, o uso da estratificação para determinação da resistividade de um solo e a resistividade aparente. Além disso foram retratadas as normas e procedimentos para projetos de malhas de aterramento e influência da resistividade do solo no desempenho de uma malha.

Foi elaborada uma metodologia para a realização do trabalho, e por meio dela foram obtidos os resultados da análise. Os dois casos estudados são de duas malhas, uma sem eletrodos verticais e a outra com. Estas malhas foram submetidas à cálculos usando-se a tensão de curto máxima, tempo de extinção de faltas e características de um solo de um sistema T2F já existente.

Este trabalho buscou entender como a resistividade do solo pode influenciar no desempenho de malhas de aterramento que podem vir a ser utilizadas em redes T2F, para isso a resistividade do solo do terreno em análise foi variada. Ao simular as condições impostas na metodologia, na ferramenta App Designer do *software* Matlab, observou-se que as tensões de passo e toque toleráveis não variam na mesma proporção que a resistividade do solo, enquanto que as outras variáveis sim. Também foi possível notar que o uso de hastes verticais no projeto de malhas é oportuno para reduzir as tensões de passo e toque das malhas, e pouco significativo para a redução da resistência da malha. Para concluir, pode-se dizer que a malha do caso 2 pode vir a ser instalada no terreno T2F, pois ela cumpre com o requisito seguridade e garante essa condição mesmo com o solo afetado por variações sazonais.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. (2013). *NBR 15751: sistemas de aterramento de subestações: requisitos*.
- ABNT. (2020). *NBR 7117-1: parâmetros do solo para projetos de aterramentos elétricos - parte 1: medição da resistividade e modelagem geométrica*.
- Borges, P. R. O., Ramos, J. E., Carvalho, C. A. T., Pires, V. A., Cardoso, G., Ramos, D. B., & de Moraes, A. P. (2017). **Repowering rural single-phase distribution network: A non-conventional proposal using two overhead wires and the ground as the third phase.** *Electric Power Systems Research*, 150, 105–117. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2017.05.001>
- Braga, A. C. de O., Moreira, C. A., & Cardinali, M. T. (2008). **Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina.** *Geociências*, 27, 517–525.
- Cotrim, A. A. M. B. (2008). *Instalações elétricas* (5th ed.). Pearson.
- Endrenyi, J. (1963). **Evaluation of Resistivity Tests for Design of Station Grounds in Nonuniform Soil.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 82(69), 966–970. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1963.291480>
- Hasse, P., & Wiesinger, J. (1993). *Handbuch für Blitzschutz und Erdung* (4th ed.).
- He, J., Zeng, R., & Zhang, B. (2012). *Methodology and Technology for Power System Grounding*. Wiley-IEEE Press.
- IEEE. (2012). *Std 81: Guide for measuring earth resistivity, ground impedance, and earth surface potentials of a grounding system*.
- IEEE. (2013). *Std 80: IEEE guide for safety in AC substation grounding*.
- Jácome, B. P., Batista, L. S. C., Schroeder, M. A. O., Baccharini, L. M. R., & Amaral, G. F. V. (2014). *Avaliação experimental da variação sazonal da resistividade do solo*.
- Kindermann, G., & Campagnolo, J. M. (1995). *Aterramento Elétrico* (3rd ed.). Sagra-DC Luzzatto.
- Kräulich, L., Marchesan, G., Cardoso, G., Oliveira, A. L., Martins, M. S., & Silveira, L. F. (2023). **Cost analysis for transforming rural electrical distribution networks into three-phase: Three-phase two-wire versus conventional three-phase.** *Electric Power Systems Research*, 225, 109854. <https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2023.109854>
- Marchesan, G., Oliveira, A. de L., Cardoso, G., Berlezi Ramos, D., Kraulich, L., Mazzorani, L., & Silveira, L. de F. (2023). **Three-Phase-Two-Wire Rural Distribution Network: Influence of Design Characteristics on Voltage Unbalance.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38(1), 620–630. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2022.3196602>

- Markovski, B., Grcev, L., & Arnautovski-Toseva, V. (2021). **Fast and accurate transient analysis of large grounding systems in multilayer soil.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(2), 598–606. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2020.2985926>
- Martins, M. S., Sebastiany, P. H. B., Stefanello, R., Ramos, D. B., & Cardoso, G. (2022). **Methodology to evaluate the safety of people in grounded networks.** *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2022-June*, 335–340. <https://doi.org/10.1109/ISIE51582.2022.9831689>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2nd ed.). Wiley-Blackwell.
- Sunde, E. D. (1968). *Earth conduction effects in transmission systems*. Dover Publications Inc.
- Tagg, G. F. (1964). *Earth Resistances* (Pitman Publishing Corporation, Ed.).
- Vijayaraghavan, G., Brown, M., & Barnes, M. (2004). **Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection.** *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, 1–237. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6399-1.X5000-X>
- Visacro Filho, S. (2002). *Aterramentos elétricos* (Artliber Editora Ltda., Ed.).
- Vyas, K. A., & Jamnani, J. G. (2011). **Optimal design and development of software for design of substation grounding system.** *2011 Nirma University International Conference on Engineering: Current Trends in Technology, NUiCONE 2011 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/NUICONE.2011.6153288>

## ANEXO I

Neste anexo é apresentada a metodologia a ser utilizada para a obtenção da resistividade aparente, de acordo com a metodologia do Endrenyi.

$$\rho_a = N \cdot \rho_1 \quad (3)$$

Onde:

$\rho_a$  resistividade aparente,  $\Omega.m$

$\rho_1$  resistividade da primeira camada,  $\Omega.m$

$$N = 1 + \frac{\sum_{m=1}^{\infty} \mu^m \left( \frac{K_{m+} + 2K_m + K_{m-}}{c_{m+} + c_m + c_{m-}} \right)}{\ln \frac{16a + K_{0+}}{d_0 + c_{0+}}} \quad (4)$$

Onde:

$K_{m+}$  integral elíptica de primeira ordem de  $k_{m+}$

$K_m$  integral elíptica de primeira ordem de  $k_m$

$K_{m-}$  integral elíptica de primeira ordem de  $k_{m-}$

$a$  raio equivalente da malha, m

$d_0$  diâmetro do condutor da malha, m

$$\mu = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (5)$$

$$c_{m+} = \sqrt{1 + \left( \frac{m+\emptyset}{a} \right)^2} \quad (6)$$

$$c_m = \sqrt{1 + \left( \frac{m}{a} \right)^2} \quad (7)$$

$$c_{m-} = \sqrt{1 + \left( \frac{m-\emptyset}{a} \right)^2} \quad (8)$$

$$k_{m+} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + (m+\emptyset)^2}} \quad (9)$$

$$k_m = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + m^2}} \quad (10)$$

$$k_{m-} = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + (m-\phi)^2}} \quad (11)$$

$$\phi = h/d \quad (12)$$

Onde:

$h$  profundidade da malha, m

$d$  profundidade da primeira camada do solo, m

Quando existe a relação de fatores  $\rho_2/\rho_1 < 1$  e  $0,9 < \phi < 1$  o equacionamento para  $\alpha$  é o visto em (2.10), caso contrário é usada equação (2.11).

$$\alpha = \frac{a}{2(d-h)} \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{a}{d} \quad (14)$$

## ANEXO II

Aqui são apresentadas as equações utilizadas para dimensionamento de malhas de aterramento, conforme a normativa IEEE 80.

$$A_{mm^2} = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (15)$$

Onde:

$I$  é a corrente rms, kA

$A_{mm^2}$  é a seção transversal do condutor, mm<sup>2</sup>

$T_m$  temperatura máxima permitida, °C

$T_a$  temperatura ambiente, °C

$t_s$  tempo máximo de eliminação da falta, s

$\alpha_r$  coeficiente térmico de resistividade na temperatura de referência, 1/°C

$\rho_r$  resistividade do condutor terra na temperatura de referência, μΩ-cm

$K_0$   $1/\alpha_r$ , °C

$TCAP$  capacidade térmica por unidade volume, J/(cm<sup>3</sup>°C)

$$T_{toqueT_{50kg}} = (1000 + 1,5C_S \cdot \rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (16)$$

$$T_{toqueT_{70kg}} = (1000 + 1,5C_S \cdot \rho_S) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (17)$$

$$T_{passoT_{50kg}} = (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} \quad (18)$$

$$T_{passoT_{70kg}} = (1000 + 6C_S \cdot \rho_S) \frac{0,157}{\sqrt{t_s}} \quad (19)$$

$$C_S = 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_S}\right)}{2h_S + 0,09} \quad (20)$$

Onde:

$T_{toqueT}$  é a tensão de toque tolerável, V

- $T_{passoT}$  é a tensão de passo tolerável, V  
 $C_S$  fator de redução da camada superficial  
 $\rho_S$  resistividade do material posto na superfície,  $\Omega$ -m  
 $\rho$  resistividade do solo,  $\Omega$ -m  
 $h_s$  espessura do material posto na superfície, m

Se não há camada superior protetora,  $C_S$  é igual a 1 e  $\rho_S$  é igual a  $\rho$ . A norma NBR 15751 (2013) recomenda que  $\rho$  seja igual à resistividade da primeira camada  $\rho_1$  nos cálculos de  $T_{toqueT}$ ,  $T_{passoT}$  e  $C_S$ .

$$R_{malha} = \rho \left[ \frac{1}{L_T} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{h\sqrt{20/A}} \right) \right] \quad (21)$$

Onde:

- $R_{malha}$  é a resistência da malha,  $\Omega$   
 $L_T$  comprimento total de condutores enterrados, m  
 $A$  área da malha,  $m^2$   
 $h$  profundidade da malha, m

Para o cálculo de  $R_{malha}$ , a NBR 15751 (2013) recomenda que  $\rho$  seja igual à resistividade aparente  $\rho_a$ .

$$I_G = S_f \cdot I_f \cdot D_f \quad (22)$$

Onde:

- $I_G$  máxima corrente na malha, A  
 $I_f$  corrente rms de falta à terra simétrica, A, onde  $I_f = 3I_0$   
 $S_f$  fator de divisão da corrente de falta  
 $D_f$  fator de decremento para a duração total da falta, s

$$GPR = I_G \cdot R_{malha} \quad (23)$$

$$E_m = \frac{\rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot I_G}{L_M} \quad (24)$$

Onde:

$E_m$  potencial de toque máximo encontrado dentro de uma submalha da malha de terra, V

$K_m$  fator de espaçamento para tensão de malha

$K_i$  fator de correção da geometria da malha

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left[ \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d_0} + \frac{(D+2 \cdot h)^2}{8 \cdot D \cdot d_0} - \frac{h}{4 \cdot d_0} \right] + \frac{K_{ii}}{K_h} \cdot \ln \left[ \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \right] \quad (25)$$

Onde:

$d_0$  é o diâmetro do condutor da malha, m

$D$  espaçamento entre os condutores paralelos, m

$K_{ii}$  fator de ponderação corretivo que ajusta os efeitos dos condutores internos na malha de canto

$K_h$  fator de ponderação corretivo que enfatiza os efeitos da profundidade da malha

$n$  fator geométrico

Para malhas sem hastes de aterramento, ou com apenas algumas hastes localizadas fora dos cantos e da periferia da malha, se usa a equação (2.24). Caso contrário se usa (2.25).

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}} \quad (26)$$

$$K_{ii} = 1 \quad (27)$$

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad (28)$$

Onde:

$h_0$  é igual 1 m (profundidade de referência da malha)

$$n = n_a \cdot n_b \cdot n_c \cdot n_d \quad (29)$$

$$n_a = \frac{2 \cdot L_C}{L_p} \quad (30)$$

Onde:

$n_b$  é 1 para malhas quadradas

$n_c$  é 1 para malhas quadradas e retangulares

$n_d$  é 1 para malhas quadradas, retangulares e em formato de L

$L_p$  comprimento periférico da malha, m

$L_C$  comprimento total dos condutores horizontais da malha, m

$$n_b = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad (31)$$

$$n_c = \left[ \frac{L_x \cdot L_y}{A} \right]^{0,7 \cdot A} \quad (32)$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 \cdot L_y^2}} \quad (33)$$

Onde:

$L_x$  comprimento máximo da grade na direção x, m

$L_y$  comprimento máximo da grade na direção y, m

$D_m$  distância máxima entre dois pontos na malha, m

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n \quad (34)$$

Para malhas sem hastes de aterramento, ou com apenas algumas hastes localizadas fora dos cantos ou do perímetro do aterramento, se usa a equação (2.33) para cálculo do  $L_M$ . Caso contrário se usa (2.34) para  $L_M$ .

$$L_M = L_C + L_R \quad (35)$$

$$L_M = L_C + \left[ 1,55 + 1,22 \left( \frac{L_r}{L_x^2 + L_y^2} \right) \right] L_R \quad (36)$$

Onde:

$L_R$  comprimento total de todas as hastes de aterramento, m

$L_r$  comprimento de cada haste, m

$$E_p = \frac{\rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot I_G}{L_s} \quad (37)$$

$E_p$  tensão de passo entre um canto externo e outro ponto 1 m diagonalmente fora da malha, V

$K_s$  fator de espaçamento para tensão de passo

$L_s$  comprimento efetivo do condutor enterrado, m

$$L_s = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \quad (38)$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right] \quad (39)$$

Para o cálculo de  $E_m$  e  $E_p$  são impostas algumas limitações: (i) é preciso que os condutores horizontais da malha estejam na mesma seção e profundidade; (ii) o número de condutores paralelos em uma determinada direção seja igual ou inferior à 25; (iii) a profundidade da malha esteja entre 0,25 à 2,5 m; (iv) diâmetro do condutor seja inferior à 0,25 m; (v) a distância entre os condutores paralelos ao longo da malha seja maior que 2,5 m; (vi) e a relação máxima entre o comprimento e a largura da malha seja 2,5:1 (malhas retangulares).

É indicado pela NBR 15751 (2013), que nos equacionamentos de  $E_m$  e  $E_p$  seja utilizada  $\rho_1$  quando se tratar de solos com  $\rho_2 < \rho_1$  e  $\rho_a$  quando o solo tiver  $\rho_2 > \rho_1$ . Além disso, esta mesma norma orienta calcular sempre o maior valor de  $E_m$  e  $E_p$ .

NUP: 23081.025185/2024-93

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação  
125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

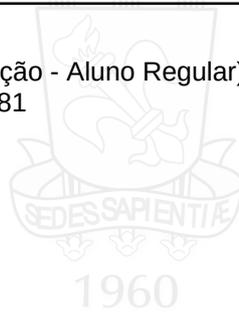
### COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
11	Autorização para disponibilização on-line de TCC (125.32)	TCC-RobertaStefanello.pdf

### Assinaturas

19/03/2024 22:34:59

ROBERTA STEFANELLO (Aluno de Graduação - Aluno Regular)  
07.09.02.01.0.0 - Engenharia Elétrica - 120381



Código Verificador: 4004071

Código CRC: 600b5f0f

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

