

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

MICHELLY ARAÚJO DA COSTA

**COMPARATIVO ENTRE ATERRAMENTO DE HASTE EM
TRIÂNGULO E CONDUTOR ENTERRADO NA HORIZONTAL EM
FORMA DE CÍRCULO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

MICHELLY ARAÚJO DA COSTA

**COMPARATIVO ENTRE ATERRAMENTO DE HASTE EM
TRIÂNGULO E CONDUTOR ENTERRADO NA HORIZONTAL EM
FORMA DE CÍRCULO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho De Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



FOLHA DE APROVAÇÃO

Michelly Araújo da Costa

Comparativo entre aterramento de haste em triângulo e condutor enterrado na horizontal em forma de círculo

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 09:00hs do dia 21/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Wagner Fontes Godoy - (Membro)

Prof(a). Esp. Carlos Alberto Paschoalino - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus e a Jesus Cristo por iluminarem meu caminho, por me dar forças, nunca me abandonarem e me concederem inúmeras vitórias e bênçãos em minha vida. Agradeço ao meu companheiro Kayo Joglas da Silva que esteve ao meu lado, em toda a trajetória desde o vestibular até hoje, na defesa do meu trabalho de conclusão de curso, por ter me apoiado incondicionalmente e nunca ter me permitido desistir, mesmo quando essa opção parecia a única. Agradeço aos meus pais Rosa Maria Araújo da Costa e Israel Bezerra da Costa pela compreensão, torcida e apoio. Gratulo também meus sogros Silene E. da Silva e Kleber Joglas E. da Silva e a todos familiares que de alguma forma torceram e me ajudaram a concretizar mais essa vitória.

Ao Prof. Me. Marco Antônio Ferreira Finocchio pela confiança, suporte, atenção, respeito e paciência que demonstrou a mim durante todo o curso e também, na orientação deste trabalho, aos professores que gentilmente aceitaram fazer parte da minha banca examinadora, Prof. Dr. Wagner Fontes Godoy e Prof. Esp. Carlos Alberto Paschoalino por todas as contribuições dadas. A todos os servidores da UTFPR que sempre se mostram solícitos e prontos a ajudar, em especial à Milena Barbosa que foi peça fundamental na minha chegada até aqui. A todos professores que doaram seu tempo, conhecimento e contribuíram para minha formação profissional e pessoal.

Aos meus amigos Leticia Sanches, Mateus Jandreice, Victor Baratela e Lissa Miyatake que me ajudaram, escutaram e apoiaram durante a graduação.

RESUMO

COSTA, Michelly A. **Comparativo entre aterramento de haste em triângulo e condutor enterrado na horizontal em forma de círculo.** 2020. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

A finalidade do sistema de aterramento é proteger as instalações, equipamentos elétricos e a vida das pessoas que interagem com estes. O estudo de configurações de aterramentos que ocupem pouco espaço e ofereçam baixa resistência de terra é essencial para fomentar a melhoria e aumento na segurança das instalações. Portanto, neste trabalho, buscou-se comparar o sistema de haste em triângulo e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo por meio da medição das resistências de terra e cálculo das resistividades para cada uma das topologias. Dessa forma, foi realizado o estudo comparativo entre as resistividades das duas configurações de aterramento, que levou também em consideração o comportamento demonstrado em 64 dias frente as alterações do solo de temperatura, umidade e pH, além das mudanças climáticas de precipitação e radiação solar. Após a análise de todos os dados e das influências climáticas, observou-se que o sistema de haste em triângulo apresentou melhor desempenho durante todo o período de avaliação e se manteve praticamente estável apesar das oscilações climáticas. Por sua vez, o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo mostrou-se suscetível às variações climáticas e apresentou maior resistividade durante todo o período.

Palavras Chave: Aterramento. Condutor horizontal em forma de círculo. Haste em triângulo. Comparativo. Resistência de aterramento. Medições.

ABSTRACT

COSTA, Michelly A. **Comparison between triangle rod grounding and conductor buried horizontally in the shape of a circle.** 2020. 69f. Course Conclusion Paper (Graduation) - Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

The purpose of the grounding system is to protect the installations, electrical equipment and the lives of the people who interact with them. The study of grounding configurations that occupy little space and offer low earth resistance is essential to promote the improvement and increase in the installation's safety. Therefore, in this work, we sought to compare the triangle rod system and the conductor buried horizontally in the shape of a circle by measuring the earth resistances and calculating the resistivities for each of the topologies. Thus, a comparative study was conducted between the resistivities of the two topologies, which also took into account the behavior demonstrated in 64 days, in view of changes in soil temperature, humidity and pH, in addition to climatic changes in precipitation and solar radiation. After analyzing all the data and the climatic influences, it was observed that the triangle rod system performed better throughout the evaluation period and remained practically stable despite climatic fluctuations. On the other hand, the conductor buried horizontally in the shape of a circle was susceptible to climatic variations and showed greater resistivity throughout the period.

Keywords: Grounding. Horizontal conductor in the shape of a circle. Triangle rod. Comparative. Grounding resistance. Measurements.

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 – Curvas dos K x e. | 18 |
| Gráfico 2 – Redução do valor da resistência de uma haste vertical em função do diâmetro da haste. | 21 |
| Gráfico 3 – ρ x Temperatura. | 25 |
| Gráfico 4 – Curva característica teórica da resistência de aterramento de um eletrodo pontual. | 33 |
| Gráfico 5 - Resistividades calculadas no 1º período..... | 45 |
| Gráfico 6 - Resistividades calculadas no 2º período..... | 46 |
| Gráfico 7 - Resistências medidas no 1º período..... | 47 |
| Gráfico 8 - Resistências medidas no 2º período..... | 47 |
| Gráfico 9 - Temperatura média do solo e as resistividades no 1º período. | 50 |
| Gráfico 10 - Temperatura média do solo e as resistividades no 2º período. | 50 |
| Gráfico 11 - Umidade média do solo e as resistividades no 1º período..... | 52 |
| Gráfico 12 - Umidade média do solo e as resistividades no 2º período..... | 53 |
| Gráfico 13 – Precipitação e as resistividades no 1º período..... | 54 |
| Gráfico 14 - Precipitação e as resistividades no 2º período. | 55 |
| Gráfico 15 - Radiação solar e as resistividades no 1º período. | 56 |
| Gráfico 16 - Radiação solar e as resistividades no 2º período. | 57 |
| Gráfico 17 - pH do solo e as resistividades no 1º período. | 58 |
| Gráfico 18 - pH do solo e as resistividades no 2º período. | 59 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Solos e suas respectivas resistividades. | 22 |
| Tabela 2 - Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade. | 23 |
| Tabela 3 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo arenoso (17°C, umidade 15%). | 24 |
| Tabela 4- Desvio padrão para os dois sistemas de aterramento. | 48 |
| Tabela 5- Coeficiente de variação. | 49 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Triângulo Equilátero. | 17 |
| Figura 2 – Aterramento em forma de círculo. | 19 |
| Figura 3 – Espessura mínima de cobre na haste de aterramento. | 20 |
| Figura 4 – Resistividade de um cubo de terra de 1m de aresta..... | 21 |
| Figura 5 – Modelo de solo homogêneo. | 27 |
| Figura 6 – Estratificação do solo em duas camadas. | 29 |
| Figura 7 – Configuração de Wenner. | 31 |
| Figura 8 – Medição de resistência..... | 32 |
| Figura 9 – Diferentes topologias de aterramento..... | 34 |
| Figura 10 – Tipos de solo..... | 35 |
| Figura 11 – Aterramento de haste em triângulo. | 36 |
| Figura 12 – Aterramento de condutor na horizontal em forma de círculo. | 36 |
| Figura 13 – Medidor de umidade e temperatura digital. | 37 |
| Figura 14 – Medidor de pH digital. | 37 |
| Figura 15 – Terrômetro. | 38 |
| Figura 16 – Haste auxiliar. | 40 |
| Figura 17 – Circuito para medição. | 40 |
| Figura 18 – Medição. | 41 |
| Figura 19 – Estações Meteorológicas Automáticas do Brasil. | 42 |
| Figura 20 – Dados INMET..... | 43 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 Objetivos | 13 |
| 1.1.1 Objetivo geral | 13 |
| 1.1.2 Objetivo específico | 13 |
| 1.2 Justificativa | 14 |
| 1.3 Organização da monografia | 14 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 16 |
| 2.1 Sistemas de aterramento elétrico | 16 |
| 2.1.1 Dimensionamento de sistema de aterramento com hastes em triângulo..... | 17 |
| 2.1.2 Dimensionamento de sistema de aterramento com condutor enterrado na horizontal em forma de círculo | 18 |
| 2.2 Hastes de aterramento | 19 |
| 2.3 Resistividade do solo | 21 |
| 2.3.1 Tipo de solo | 22 |
| 2.3.2 Umidade | 23 |
| 2.3.3 Concentração de sais no solo..... | 23 |
| 2.3.4 Compacidade e granulometria do solo | 24 |
| 2.3.5 Temperatura | 25 |
| 2.4 Resistência de terra | 25 |
| 2.4.1 Estratificação do solo..... | 29 |
| 2.4.2 Medição da resistência de terra e resistividade do solo | 29 |
| 2.4.3 Definição e medições no local da instalação do sistema de aterramento | 30 |
| 2.4.4 Método de Wenner | 30 |
| 2.4.5 Resistência medida por terrômetro | 31 |
| 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL | 34 |
| 3.1 Local da instalação | 34 |
| 3.1.1 Características do local de instalação | 34 |
| 3.2 Instalação dos sistemas de aterramento | 35 |
| 3.3 Coleta e tratamento de dados | 37 |
| 3.3.1 Medição das resistências de aterramento..... | 38 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.3.2 | Dados climáticos | 41 |
| 4. | RESULTADOS..... | 44 |
| 4.1 | Valores de Resistências e resistividades..... | 44 |
| 4.2 | O impacto do clima na resistividade do solo | 49 |
| 4.2.1 | Temperatura e resistividade | 49 |
| 4.2.2 | Umidade e resistividade | 51 |
| 4.2.3 | Precipitações e resistividade | 53 |
| 4.2.4 | Radiação solar e a resistividade | 55 |
| 4.2.5 | pH e a resistividade | 57 |
| | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 60 |
| | REFERÊNCIAS | 62 |
| | APÊNDICE A – Resistência e resistividades do primeiro período | 65 |
| | APÊNDICE B – Resistência e resistividades do segundo período..... | 66 |
| | APÊNDICE C – Medições de temperatura, pH, umidade, radiação solar e precipitação do primeiro período | 67 |
| | APÊNDICE D – Medições de temperatura, pH, umidade, radiação solar e precipitação do segundo período..... | 68 |
| | ANEXO A – Especificação técnica dos equipamentos utilizados na medição | 69 |

1. INTRODUÇÃO

O aterramento é de suma importância para qualquer tipo de sistema elétrico, seja ele alimentado em baixa tensão, como é o caso das residências, ou em alta tensão como em subestações. Essa necessidade de ter um bom aterramento acontece, pois, além de garantir o correto funcionamento do equipamento, o aterramento elétrico quando feito de maneira certa, também protege os equipamentos e as pessoas dos efeitos indesejados da energia elétrica (FERREIRA, 2017, p. 153).

Visacro S. (2002, p.11) aponta que a ligação elétrica intencional entre um sistema físico, seja ele eletrônico, elétrico ou de corpos metálicos ao solo, é denominado aterramento elétrico. Sendo ele, composto basicamente por três componentes:

- As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- Eletrodos de aterramento, qualquer corpo metálico colocado no solo;
- A terra que envolve os eletrodos.

Kindermann e Campagnolo (1995, p.1) entendem que para o sistema elétrico funcionar corretamente, com uma boa continuidade de serviço, apresentando um desempenho seguro do sistema de proteção e para que os limites de segurança pessoal sejam garantidos, é necessário que o aterramento apresente os seguintes aspectos:

- Apresentar resistência de aterramento mais baixa possível, para correntes de falta à terra;
- Manter os potenciais gerados pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança, de modo a não causar fibrilação do coração humano;
- Tornar os equipamentos de proteção mais sensibilizados para que isolem rapidamente as falhas à terra;
- Ser um caminho de escoamento de descargas atmosféricas para terra;
- Usar a terra como retorno de corrente no sistema monofilar com retorno por terra;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

É válido lembrar que as especificações de sistemas de aterramento elétrico deve obedecer a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) que possui as Normas Brasileiras (NBR) 5410, que se refere as instalações elétricas em baixa tensão, a Norma Regulamentadora (NR) 10, que zela pela segurança em instalações

e serviços em eletricidade e a ABNT NBR 5419 que estabelece os procedimentos mínimos para proteção de estruturas contra descargas atmosféricas, dentre outras normas que devem ser respeitadas.

Sabe-se que existem diferentes maneiras de aterrar um sistema elétrico, que podem ser compostos por uma simples haste, ou placas de variadas formas e tamanhos, e que é necessário levar em consideração as características do solo e a sua resistividade elétrica no momento da realização do aterramento (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995, p.2).

Nesse sentido, o presente trabalho apresenta o estudo comparativo entre o aterramento de haste em triângulo e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, onde é verificado o valor da resistência e resistividade para cada um dos sistemas, que estavam sob as mesmas características de terra e climáticas.

1.1 Objetivos

Este tópico tem por finalidade explicitar os principais objetivos desse trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Realizar um estudo comparativo entre os sistemas de aterramento elétrico de haste em triângulo e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, e verificar qual destes sistemas apresentou melhores resultados.

1.1.2 Objetivo específico

- Fazer as medições da resistência de terra dos dois métodos propostos;
- Medir a temperatura, umidade e o pH do solo;
- Calcular as resistividades de solo para os dois sistemas de aterramento propostos;
- Comparar os métodos de aterramento por meio de gráficos, a partir das medidas e os cálculos da resistência de terra e resistividade de solo;
- Apontar os fatores que contribuíram para a obtenção do resultado de cada um dos dois tipos de aterramento.

1.2 Justificativa

Estudos na área de aterramento elétrico serão sempre pertinentes, uma vez que, apesar da existência da NBR e NR, ainda, ocorrem acidentes oriundos da inexistência ou ineficácia dos aterramentos instalados.

Âmbito Jurídico (2016) afirma que o Estado do Rio Grande do Sul (RS) teve que indenizar uma criança de dez anos e os seus pais, pois o garoto sofreu um choque ao tocar em um poste energizado na Expointer.

Capelli (2000, p.59) aponta que a falta de segurança não é o único dano de um sistema de aterramento deficiente, os estabelecimentos comerciais e industriais também podem apresentar os seguintes problemas operacionais:

- Quebra de comunicação entre máquina e computador, principalmente as que utilizam comunicação RS 232.
- Excesso de interferência eletromagnéticas.
- Aquecimento de inversores, conversores e motores.
- Travamentos em computadores.
- Falhas intermitentes.
- Queima de circuitos integrados (CI) em placas eletrônicas sem motivo aparente.
- Interferência em equipamentos com monitores de vídeo, interferência na imagem e ondulações.

Uma vez notado os prejuízos que a falta, ou a má instalação de um sistema de aterramento pode gerar, o estudo comparativo entre o aterramento de haste em triângulo e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, fez-se necessário, pois, de posse do comportamento das resistências e resistividades desses dois tipos de aterramento sob mesmas condições, fomenta-se embasamento para futuras pesquisas na área de segurança das instalações elétricas.

1.3 Organização da monografia

Com o objetivo de fazer a comparação entre as topologias de aterramento da haste em triângulo e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, toda esta monografia foi estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1: introdução, objetivos, justificativa e a organização da monografia.

Capítulo 2: estudo bibliográfico utilizado como premissa na realização do trabalho.

Capítulo 3: metodologia experimental utilizada, local da instalação dos sistemas de aterramentos aqui estudados e o procedimento de coleta e tratamento dos dados.

Capítulo 4: resultados do experimento, análises gráficas e estatísticas.

Considerações finais: apresenta os desempenhos de cada uma das topologias de aterramento estudadas, a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção é dedicada a mostrar os conceitos teóricos e os aspectos gerais, no que se referem aos materiais e equipamentos necessários para que haja toda a compreensão deste trabalho.

2.1 Sistemas de aterramento elétrico

Os sistemas de aterramento possuem muitas finalidades, tais como: proteção contra choques, contra sobretensões, descargas atmosféricas, descargas eletrostáticas e proteções contra surtos em linha de sinais. Apesar dessas aplicações serem variadas, o aterramento deve ser único (BELLAN, CECCATTO, MACARIO e SGARBOSA, 2016, p. 76).

Tendo em vista as funções do aterramento, pode-se então classificá-lo de acordo com a sua função (CUNHA, 2016):

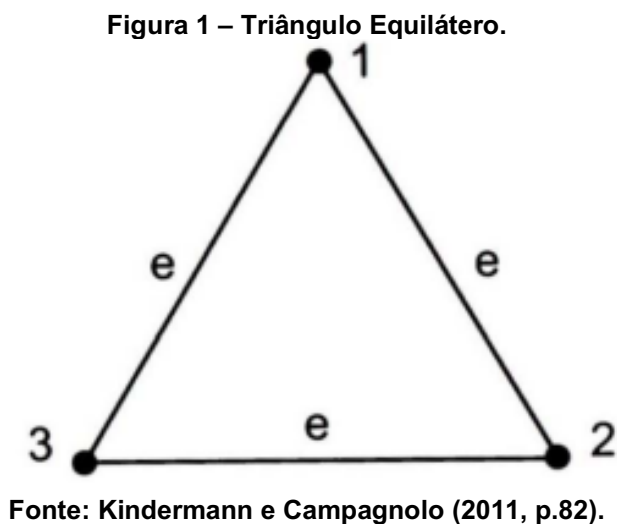
- Aterramento funcional: mantém o funcionamento correto da instalação. Consiste no aterramento de um condutor energizado, normalmente o neutro;
- Aterramento de proteção: deve oferecer proteção contra choques por contato indireto. Trata-se do aterramento de massas, carcaças metálicas e elementos condutores estranhos à instalação;
- Aterramento para trabalho: deve assegurar a segurança na realização de algumas atividades. Aqui, uma parte do circuito que é normalmente submetida a uma diferença de potencial é aterrada. Trata-se de um aterramento temporário.

No geral os sistemas de aterramento devem ser pensados de maneira que a conexão com a terra, o local de instalação, o custo e a adequação ao sistema de energia em questão, estejam corretos. Existem diversas topologias de sistemas de aterramentos, porém os principais são: uma haste cravada no solo, hastes alinhadas, hastes em triângulo, hastes em quadrado, hastes em círculos, placas condutoras enterradas ao solo, fios ou cabos de diversas configurações geométricas enterrados ao solo e, a mais eficiente, malha de terra. (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

O foco deste trabalho se dá nos sistemas de aterramento com hastes em triângulo e condutor enterrado na horizontal em forma de círculo.

2.1.1 Dimensionamento de sistema de aterramento com hastes em triângulo

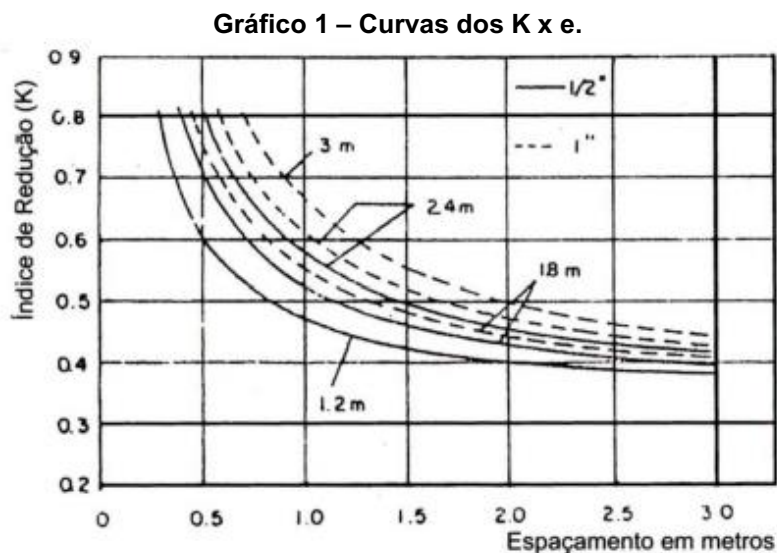
Para Kindermann e Campagnolo (1995, p.76) neste sistema as hastes são cravadas nos vértices de um triângulo equilátero, com lados espaçados de (e) [m], como pode ser visto na Figura 1.



O dimensionamento do sistema em triângulo, tem como base a definição do índice de redução (K), que é encontrado por meio da relação entre a resistência equivalente do sistema (Req) e a resistência própria de cada uma das hastes (R_{1haste}), com a manipulação da Equação 1 (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

$$Req = K * R_{1haste} \quad (1)$$

Os índices de redução (K) podem ser encontrados por meio das curvas do Gráfico 1.



Fonte: Kindermann e Campagnolo (2011, p.83).

No Gráfico 1 as curvas mostradas são para hastes de $1/2''$ e $1''$ com comprimentos de 1,2, 1,8, 2,4 e 3,0 metros.

A resistência própria de cada uma das hastes (R_{1haste}) pode ser encontrada por meio da Equação 2.

$$R_{1haste} = \frac{\rho a}{2\pi L} * \ln\left(\frac{4L}{d}\right) \quad (2)$$

Onde:

ρa : Resistividade aparente do solo [Ωm].

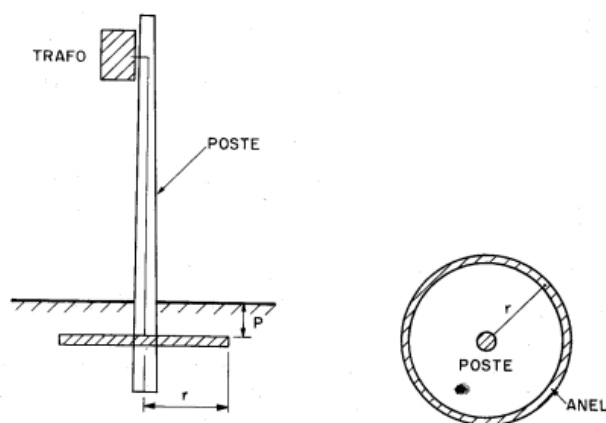
L : Comprimento da haste [m].

d : Diâmetro do círculo equivalente à área da seção transversal da haste [m].

2.1.2 Dimensionamento de sistema de aterramento com condutor enterrado na horizontal em forma de círculo

Kindermann e Campagnolo (1995, p.88) apontam que este sistema de aterramento pode ser utilizado para aproveitar a furação já feita, para a instalação do poste, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Aterramento em forma de círculo.



Fonte: Kindermann e Campagnolo (1995, p.88).

A resistência de aterramento em círculo leva em consideração a profundidade que está enterrado o círculo (p), o raio (r) e o diâmetro equivalente da seção transversal dos condutores que formam o círculo (d), todos em metros e obedece a Equação 3 (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

$$R_{\text{círculo}} = \frac{\rho a}{\pi^2 r} * \ln\left(\frac{4r^2}{dp}\right) \quad (3)$$

2.2 Hastes de aterramento

Kindermann e Campagnolo (1995, p.7 - 8) afirmam que os materiais das hastes de aterramento necessitam apresentar os seguintes aspectos:

- Boa condutividade elétrica.
- Interação nula, ou mínima, com ácidos e sais dissolvidos no solo.
- Resistente a corrosão galvânica.
- Resistência mecânica suficiente para suportar a cravação e movimentação do solo.

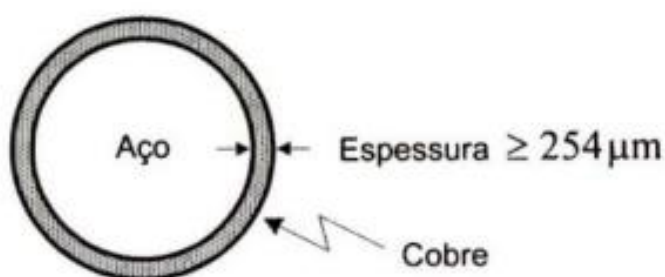
Kindermann e Campagnolo (1995, p.8) defendem que as melhores hastes são as cobreadas:

- Tipo Copperweld: barra de aço de seção circular que possui cobre fundido sobre a própria barra.
- Tipo Encamisado por Extrusão: possui a alma de aço revestida por um tubo de cobre por meio do processo de extrusão.
- Tipo Cadweld: possui cobre depositado eletroliticamente sobre a alma de aço.

Outro tipo que também é muito utilizado é a haste de cantoneira de ferro zincada.

Moreno e Costa (1999, p. 21) afirmam que ao utilizar o tipo copperweld a camada de cobre mínima deve ser de 0,254 milímetros. Além disso, defendem que o eletrodo de terra pode ter a forma de cabo, barra chata, redonda ou tubo, com seções mínimas de 50mm² para o cobre, 80mm² para aço galvanizado e 100mm² para o aço inoxidável.

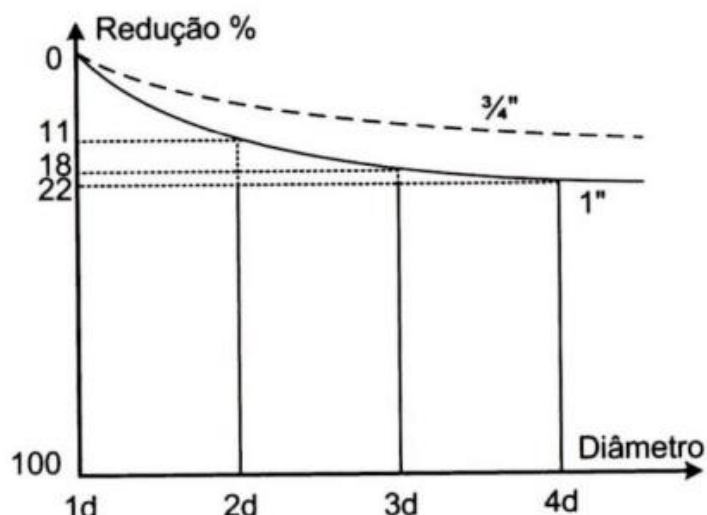
Figura 3 – Espessura mínima de cobre na haste de aterramento.



Fonte: Kindermann e Campagnolo (2011, p.11).

O aumento do diâmetro da haste promove uma pequena diminuição na sua resistência elétrica. Porém, ao aumentar muito o diâmetro da haste ocorre uma saturação nessa diminuição da resistência, conforme pode ser observado no Gráfico 2. Vale ressaltar que um grande aumento no diâmetro da haste encarece o projeto (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995, p. 64).

Gráfico 2 – Redução do valor da resistência de uma haste vertical em função do diâmetro da haste.

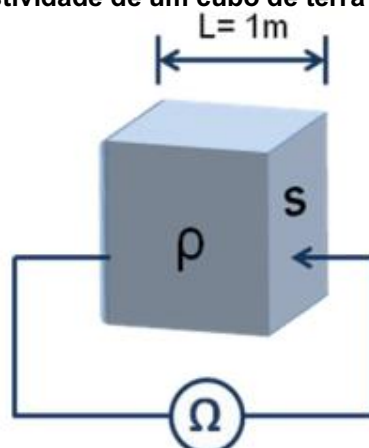


Fonte: Kindermann e Campagnolo (2011, p.73).

2.3 Resistividade do solo

A resistividade do solo (ρ) é a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias preenchido com este solo conforme mostra a Figura 4. O solo é um mau condutor no seu estado natural, considerando que o mesmo esteja completamente seco, ele pode ser considerado um isolante. A relação entre resistência elétrica e a resistividade pode ser observada pela Equação 4 (VISACRO, 2002).

Figura 4 – Resistividade de um cubo de terra de 1m de aresta.



Fonte: Procobre (2009, p.13).

$$R = \rho * \left(\frac{L}{A}\right) \quad (4)$$

Onde:

L: aresta do cubo.

A: área das faces.

Procobre (2009, p.14) afirma que a resistividade do terreno depende da sua natureza, estratificação, umidade, salinidade e temperatura. Pode também, ser afetada pelas variações climáticas. Sabe-se também que com o aumento das partículas, a resistividade é maior. Isso explica o motivo do cascalho ter resistência maior que a areia e uma resistividade superior à argila.

2.3.1 Tipo de solo

Para Procobre (2009, p. 14) conhecer o tipo de solo é o primeiro passo para a realização de um sistema de aterramento adequado.

Visacro (2002, p. 26) aponta que não é possível atribuir um valor específico de resistividade para um tipo de solo. Porém, pode-se encontrar faixas de valores típicos para os diferentes tipos de solo, estando eles em suas condições normais de umidade como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1- Solos e suas respectivas resistividades.

| Composição de solo | Resistividade ($\Omega.m$) |
|------------------------------------|--|
| Limo | 20 a 100 |
| Humus | 10 a 150 |
| Lama | 5 a 100 |
| Terra de jardim com 50% de umidade | 140 |
| Terra de jardim com 20% de umidade | 480 |
| Argila com 40% de umidade | 80 |
| Argila com 20% de umidade | 330 |
| Argila seca | 1500 a 5000 |
| Areia com 90% de umidade | 1300 |
| Areia comum | 3000 a 8000 |
| Calcário fissurado | 500 a 1000 |
| Calcário compacto | 1000 a 5000 |
| Granito | 1500 a 10000 |
| Basalto | 10000 a 20000 |

Fonte: adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995, p.3).

2.3.2 Umidade

Para Kindermann e Campagnolo (1995, p.3) a resistividade muda conforme as variações da umidade. Isso se deve, pois, a condução de cargas elétricas no solo é em sua maioria iônica. Logo, quando a percentagem de umidade do solo é maior, os sais presentes se dissolvem, o que forma um meio eletrolítico facilitando a passagem de corrente iônica. A Tabela 2 mostra a variação da resistividade em função da umidade.

Tabela 2 - Resistividade de um solo arenoso com concentração de umidade.

| Índice de umidade (% por peso) | Resistividade ($\Omega.m$) |
|--------------------------------|------------------------------|
| 0,0 | 10.000.000 |
| 2,5 | 1500 |
| 5,0 | 430 |
| 10,0 | 185 |
| 15,0 | 105 |
| 20,0 | 63 |
| 30,0 | 42 |

Fonte: adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995, p. 3).

Kindermann e Campagnolo (1995, p. 3) apontam que a resistividade do solo muda conforme os períodos de seca e chuva de uma região. Assim, os aterramentos melhoram seu desempenho nos períodos de chuva e pioram nos tempos de seca.

É errôneo considerar que todo solo que retém muita água, apresentará resistividade baixa, pois se a concentração de sais dissolvidos na água for pequena, ou mesmo se a água estiver congelada, devido a sua estrutura cristalina, esse solo apresentará resistividade alta. Na Tabela 2 foi possível exemplificar valores de resistividade para tipos diferentes de solo, com base nas condições de umidade em que são encontrados usualmente nos ambientes, apesar dessas faixas não serem claramente definidas (VISACRO, 2002).

2.3.3 Concentração de sais no solo

Uma vez que é conhecido que a resistividade do solo depende da quantidade de água retida neste, e que a resistividade da água varia com os sais dissolvidos nela,

então pode-se perceber que a resistividade do solo varia com a quantidade e tipos de sais dissolvidos na água que está presente no solo (VISACRO, 2002).

A areia normalmente possui concentração baixa de sais minerais, dessa forma, quando a areia é umedecida com água destilada, os valores de sua resistividade apresentam baixa variação, pois apesar da areia estar úmida, há falta de sais para que ocorra a eletrólise (VISACRO, 2002).

A relação da influência na resistividade com adição de sais dissolvidos na água de um solo arenoso, de umidade 15% em peso e temperatura de 17°C, pode ser vista na Tabela 3.

Tabela 3 - Influência da concentração de sais na resistividade do solo arenoso (17°C, umidade 15%).

| Sal adicionado (% por peso) | Resistividade ($\Omega.m$) Solo arenoso |
|-----------------------------|---|
| 0 | 107 |
| 0,1 | 18 |
| 1,0 | 1,6 |
| 5,0 | 1,9 |
| 10,0 | 1,3 |
| 20,0 | 1,0 |

Fonte: adaptado de Visacro (2002, p.30).

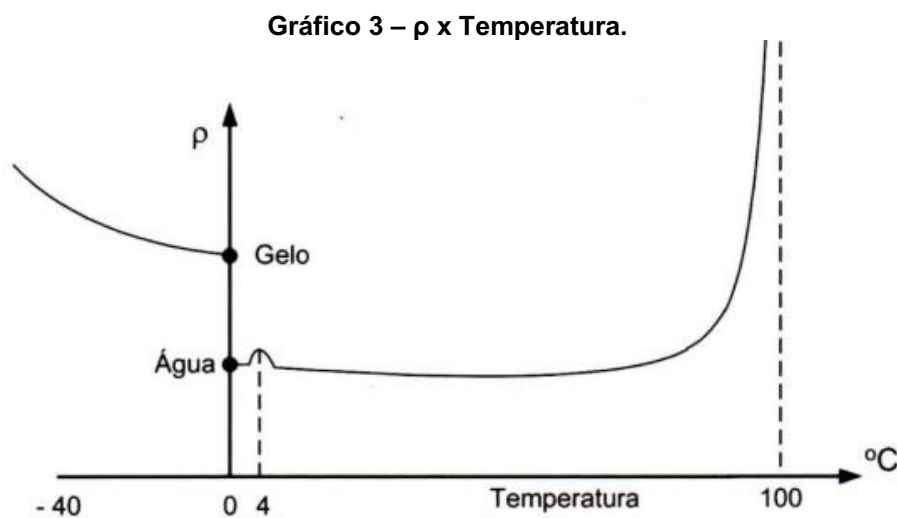
2.3.4 Compacidade e granulometria do solo

Quando o solo é mais compacto ele possui uma maior continuidade física, o que contribui para um valor de resistividade menor. Por essa razão, é recomendado que a medição da resistência de um aterramento seja feita após um tempo da sua instalação (VISACRO, 2002).

A granulometria interfere na resistividade do solo por influenciar em dois aspectos, o primeiro é na capacidade do solo reter a água e o segundo na continuidade física do solo. Quando a granulometria é grande a resistividade aumenta, pois, o solo deixa de reter água e possui uma descontinuidade maior. Porém, quando há grãos de diferentes tamanhos a resistividade costuma diminuir, uma vez que grãos maiores tem seus espaços preenchidos por grãos menores, isso aumenta a continuidade e a retenção de água (VISACRO, 2002).

2.3.5 Temperatura

O desempenho de um solo que tem sua temperatura variada pode ser observado no Gráfico 3.



Fonte: Kindermann e Campagnolo (1995, p. 5).

Pode-se observar que no ponto de temperatura 0°C (água), ocorre uma descontinuidade na curva, aumentando o valor da resistividade no ponto 0°C (gelo). Isso se deve, a mudança repentina no estado da ligação entre os grânulos que formam a concentração eletrolítica (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Com um decréscimo acelerado na temperatura há uma concentração no estado molecular o que deixa o solo mais seco, o que aumenta a sua resistividade (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Quando as temperaturas estão altas, próximas de 100°C , a evaporação deixa o solo mais seco, com bolhas internas, o que dificulta a condução de corrente, o que aumenta a resistividade (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

2.4 Resistência de terra

A interligação à terra possui resistência, capacitância e indutância, fatores estes, que impactam diretamente na oposição oferecida à passagem da corrente para terra. Dessa forma, é preciso considerar inicialmente que existe uma impedância e não apenas uma resistência de terra. O solo se comporta aproximadamente como uma resistência linear, quando a frequência, corrente e valores de resistividade são

baixas, assim, os efeitos capacitivos e de ionização do solo podem ser desprezados (VISSACRO, 2002).

Considerando o sistema com baixa frequência, o valor da resistência de aterramento (R_T) pode ser compreendido por meio da relação entre o valor da tensão resultante (V_T) no eletrodo e o valor da corrente aplicada (I) no solo através da equação 5 (VISSACRO, 2002).

$$R_T = \frac{V_T}{I} \quad (5)$$

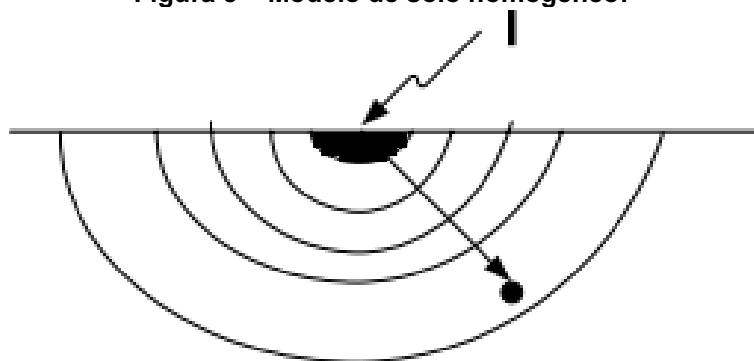
A ABNT NBR 5419:2005 aponta que o aterramento é considerado bom quando possui resistência de terra baixa, isso é necessário para que haja circulação de corrente elétrica para terra. Para garantir que a corrente dissipada para terra não origine sobretensões perigosas de toque e de passo, sugere-se que a resistência de terra apresente aproximadamente 10Ω .

Caso a resistência de terra apresente valores superiores a 10Ω em solo úmido e 25Ω para solos secos, é necessário aplicar algum dos seguintes métodos: tratamento químico do solo, aumentar a quantidade de hastes de aterramento, aumentar a profundidade, ou ainda, aumentar a área das hastes. Dessa forma, consegue-se reduzir o valor das resistências (FERREIRA, 2017).

A relação entre a tensão do eletrodo e a corrente aplicada no solo, resulta o valor da resistência de terra. Há três componentes relevantes para a resistência de aterramento frente uma corrente elétrica (VISSACRO, 2002):

- A resistência dos próprios eletrodos e ligações elétricas, que apresentam valores mínimos uma vez que são feitos de metais condutivos.
- Resistência de contato entre solo e eletrodo.
- Resistência de terra circunvizinha, que compõe o valor da resistência e varia principalmente com a resistividade do solo e com a corrente oriunda do eletrodo, este último pode variar devido a sua forma e tamanho.

Figura 5 – Modelo de solo homogêneo.



Fonte: Adaptado de FEIS - UNESP (2020, p. 9).

O solo conforme representado na Figura 5, possui diferentes valores de resistências que são representadas por fatias. A soma de todas as resistências até uma distância infinita, resulta o valor da resistência de aterramento (FEIS -UNESP, 2020, p.10).

Essas fatias possuem a mesma espessura, então, a fatia que está mais próxima do eletrodo tem maior resistência, já que a área atravessada pela corrente é menor. Dê outra maneira, quando a distância do eletrodo é considerável, a área dessa fatia fica grande o suficiente que torna a resistência desprezível. Dessa forma, a resistência de aterramento é definida pela terra mais próxima do eletrodo, sendo a colaboração das fatias mais distantes desprezível (VISACRO, 2002, p.43).

Para determinar o valor da resistência de aterramento é necessário desenvolvimentos analíticos, que podem ser básicos ou de alta complexidade, dependendo do arranjo dos eletrodos. Para fins didáticos, nos cálculos a seguir foi utilizado como modelo a configuração hemisférica da Figura 5 (VISACRO, 2002, p.45).

Kindermann e Campagnolo (1995, p. 15) orientam que para calcular o campo elétrico E no ponto p deve-se utilizar a Lei de Ohm local, conforme Equação 6.

$$E_p = \rho \cdot J_p \quad (6)$$

Onde:

J_p : Densidade de corrente no ponto p .

Como a densidade de corrente é a mesma sobre a superfície da haste hemisférica de raio r , obedece a Equação 7.

$$J_p = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (7)$$

Substituindo a Equação 7 na Equação 6, encontra-se a Equação 8.

$$E_p = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (8)$$

Sendo o potencial p , devido à essa corrente em direção ao infinito estabelecido pela Equação 9.

$$V_p = \int_r^{\infty} E \cdot dr \quad (9)$$

Onde:

dr : é a variação infinitesimal na direção radial ao longo do raio r .

Substituindo a equação 8 na equação 9 e resolvendo a integral, obtém-se a equação 10.

$$V_p = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi} \int_r^{\infty} \frac{dr}{r^2} \quad (10)$$

$$V_p = \frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (11)$$

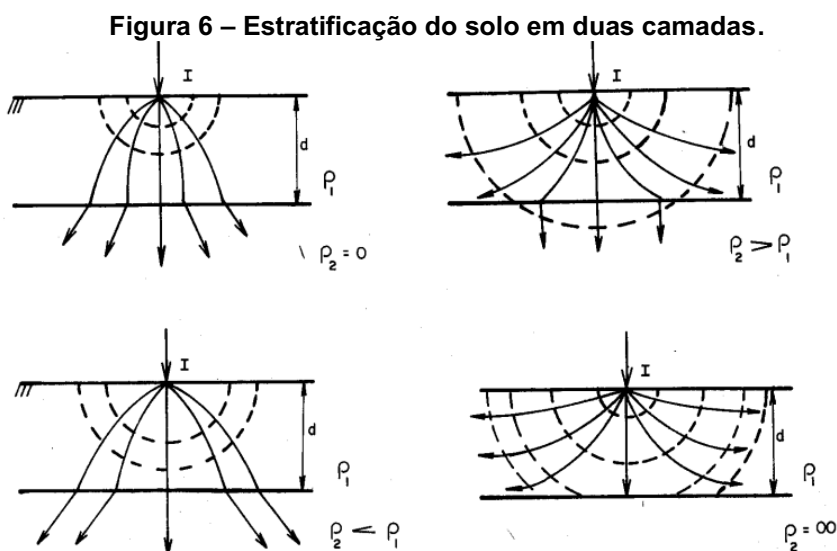
Com a substituição da Equação 11, na Equação 5, consegue-se a Equação 12 de resistência de aterramento.

$$R_T = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (12)$$

É possível determinar a resistência de aterramento para outros arranjos geométricos, seguindo o procedimento acima. A variação se dará apenas na maneira em que acontece a distribuição da densidade de corrente no solo, que se submete a forma e dimensão do eletrodo, resultando assim, em uma equação específica para o campo elétrico (VISACRO, 2002, p.45).

2.4.1 Estratificação do solo

A maioria dos solos não são homogêneos, ou seja, são formados por inúmeras camadas de resistividade e profundidades diferentes. No geral, essas camadas são horizontais e paralelas à superfície do solo, porém, em alguns casos essas camadas podem estar inclinadas ou até mesmo, verticais. Para fins de estudos, os solos são considerados horizontais. Como existe a variação da resistividade das camadas do solo, ocorre a dispersão da corrente no solo heterogêneo, ao redor do aterramento, conforme a Figura 6, sendo necessário adotar um modelo equivalente para possibilitar a implementação do sistema de aterramento (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).



Fonte: Kindermann e Campagnolo (1995, p. 6).

2.4.2 Medição da resistência de terra e resistividade do solo

A ABNT NBR 15749:2009 estabelece os critérios e procedimentos referentes à medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. É necessário que haja procedimentos e padronizações para as realizações das medições, uma vez que se deve garantir a segurança dos envolvidos na tarefa e a fidelidade dos valores aferidos. Nessas medições são obtidos os valores da resistência do eletrodo de terra, potenciais de passo e de toque para projetos. Pelo método de medição da queda de potencial que pode ser realizada com

o terrômetro, pode-se obter o valor da resistência de aterramento (MODENA e SUETA, 2011).

A aferição da resistividade do solo pode ser feita por amostragem, que acontece no laboratório a partir de uma amostra do solo, ou, no próprio local onde quer saber o valor da resistividade, assim basta submeter o solo aos sinais eletromagnéticos utilizando os eletrodos e verificar os potenciais apresentados (VISACRO, 2002).

2.4.3 Definição e medições no local da instalação do sistema de aterramento

É de fundamental importância que a localização do aterramento em uma subestação seja escolhida de forma a favorecer os equipamentos elétricos importantes do sistema elétrico, objeto de estudo. Para tanto, deve-se verificar o centro geométrico de cargas, local com terreno disponível, terreno acessível economicamente, local seguro de inundações e não prejudicar a segurança da população (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Na distribuição de energia elétrica, o aterramento é instalado próximo à equipamentos, como: transformador, religador, seccionizador, regulador de tensão, chaves etc. Em sistemas de distribuição com neutro multi-aterrado, o aterramento é realizado ao longo da linha com distâncias próximas entre si. Dessa forma, questões como a estabilidade da pedologia do terreno, verificação se o terreno é ou estará suscetível a inundações a longo prazo, e se a localização favorece, ou não medições locais. Na ocorrência de qualquer inadequação do local, outro deve ser adotado (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Uma vez que o local para a implementação do projeto foi escolhido, é necessário fazer medições nesse terreno, a fim de obter informações para a realização de um sistema de aterramento com bom desempenho.

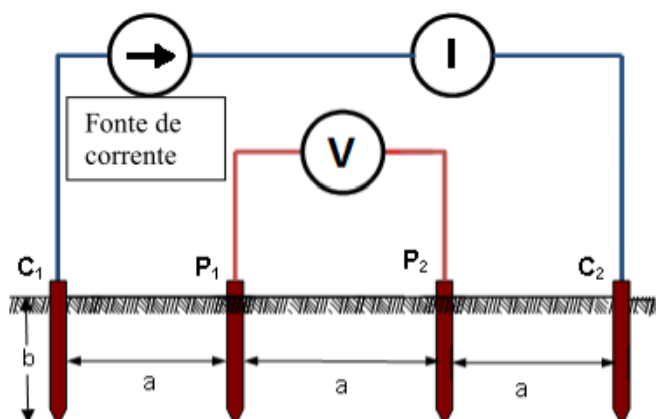
2.4.4 Método de Wenner

Utilizado para medir a resistividade, este método utiliza quatro eletrodos que devem ser colocados em linha reta, igualmente afastados (a) e com uma boa profundidade (p) de penetração no solo. O método de medição tem como referência a Equação 13, onde na Figura 7, nota-se que os eletrodos C1 e C2 (externos) injetam

corrente (I) e os eletrodos P1 e P2 (internos) medem a diferença de potencial, que, sendo dividida pela corrente injetada fornece o valor da resistência (R) (PROCOBRE, 2009).

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{I + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4a^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + p^2}}} \quad (13)$$

Figura 7 – Configuração de Wenner.



Fonte: Procobre (2009, p. 25).

Se a distância enterrada (b) for inexpressiva (vinte vezes menor) em relação à distância entre os eletrodos (a), a expressão acima pode ser simplificada para a Equação 14 (PROCOBRE, 2009).

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (14)$$

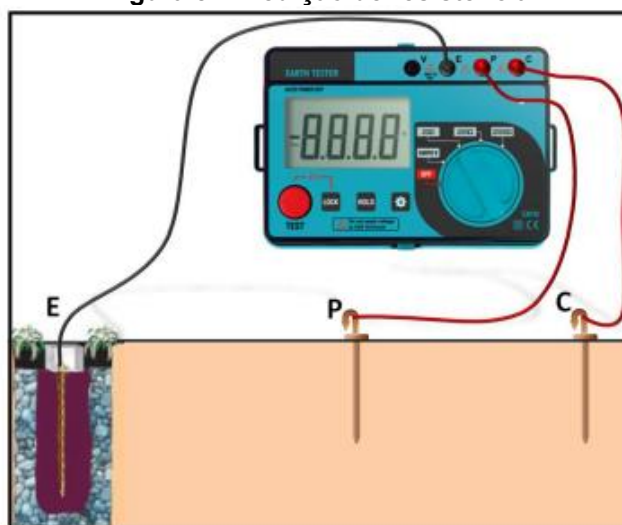
A resistividade resultante das Equações 13 e 14 representam a resistividade média de uma parte do terreno de um raio igual ao afastamento dos eletrodos (PROCOBRE, 2009).

2.4.5 Resistência medida por terrômetro

A medição realizada pelo terrômetro, utiliza o método da queda de potencial, que insere uma corrente no sistema de aterramento que se deseja obter a resistência, e ao mesmo tempo mensura-se a tensão entre a malha de aterramento e o terra de

referência, através de um eletrodo auxiliar de potencial conforme a Figura 8 (MODENA e SUETA, 2011).

Figura 8 – Medição de resistência.

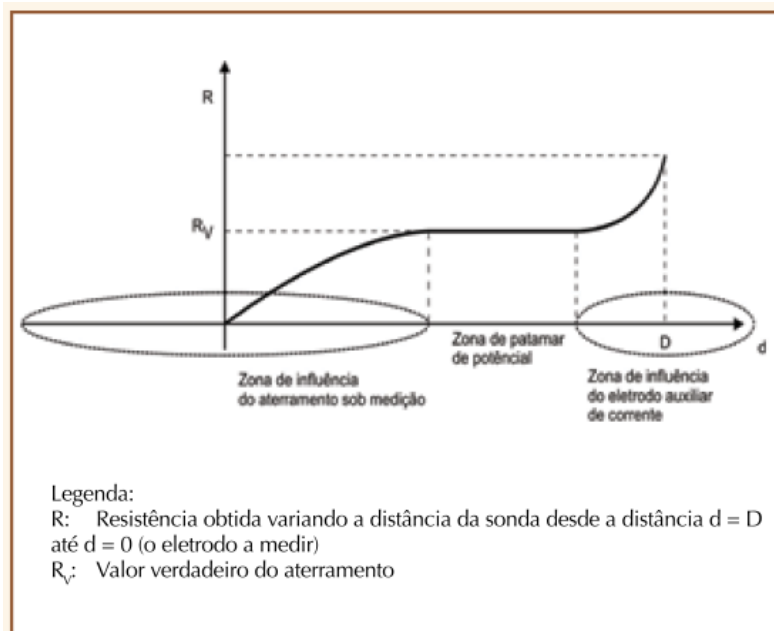


Fonte: Procobre (2009, p. 30).

O eletrodo auxiliar de tensão, deve ser alinhado e deslocado em uma linha reta entre a malha de aterramento em teste e o eletrodo de corrente, em distâncias regulares de 5% da distância total (d) como mostra o Gráfico 4. Geralmente a distância (d) deve ser de no mínimo três vezes a maior dimensão da malha (MODENA e SUETA, 2011).

O Gráfico 4 mostra uma curva que é dividida em três partes, sendo elas: zona de influência, zona de patamar de potencial e zona de influência do eletrodo auxiliar de corrente. Na zona de patamar de potencial é onde se encontra o valor real de resistência de aterramento (MODENA e SUETA, 2011).

Gráfico 4 – Curva característica teórica da resistência de aterramento de um eletrodo pontual.



Fonte: Modena e Sueta (2011, p. 42).

Nos solos homogêneos e com sistemas pequenos, ou seja, com maior dimensão menor que 10 metros, a zona de patamar de potencial se situa a 62% da distância (d). Para solos heterogêneos ou com configurações de aterramentos complexos essa definição não deve ser utilizada (MODENA e SUETA, 2011).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta como e onde os experimentos foram implementados, quais ferramentas foram utilizadas e como se desenvolveu o processo de extração de dados, para embasar a análise comparativa entre as duas topologias de aterramento.

3.1 Local da instalação

O presente estudo comparativo entre aterramento de haste em triângulo e condutor enterrado na horizontal em forma de círculo foi desenvolvido na UTFPR - Campus Cornélio Procópio, e as instalações estão entre o Bloco P e a quadra, como ilustra a Figura 9.

Figura 9 – Diferentes topologias de aterramento.

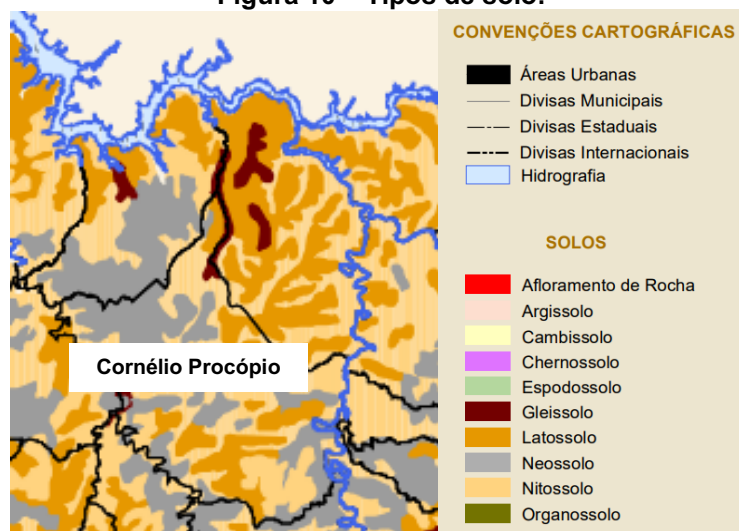


Fonte: Adaptado de Rodrigues (2018, p. 28).

3.1.1 Características do local de instalação

Como citado ao longo de todo o Capítulo 2, deste trabalho, é de extrema importância conhecer as características do solo, onde será instalado o sistema de aterramento. Dessa forma, se fez necessário conhecer as características do solo da região de Cornélio Procópio, que podem ser observadas na Figura 10.

Figura 10 – Tipos de solo.



Fonte: Adaptado de ITCG (2008).

Na Figura 10 percebe-se que os tipos de solos predominantes na região de Cornélio Procópio, são: Neossolo, Nitossolo, Latossolo e o Gleissolo, este último, que tem representatividade mínima na cidade. Os autores Lima C., Lima R. e Mello (2012, p.3) definiram da seguinte forma esses solos:

- Neossolo: solos novos em desenvolvimento, geralmente apresentam pouca espessura e possui presença de pedras. Geralmente são arenosos e por esse motivo, possuem pouca capacidade de retenção de água.
- Nitossolo: considerado homogêneo e argiloso, não encharcado, mas com constituição que ajuda na retenção de água.
- Latossolo: solos profundos, muito porosos, permeáveis e com boa drenagem. Relevo quase plano, não possui pedras. Os Latossolos do norte do Paraná possuem mais areia em sua constituição.
- Gleissolos: solo encharcado, geralmente localizado em proximidade de rios e lagos.

3.2 Instalação dos sistemas de aterramento

Na realização do sistema de aterramento de haste em triângulo, foram inseridas três hastes de aterramento de aço zincado, de diâmetro 3/8" e de 2,4 metros de comprimento cada uma, de maneira que permanecesse exposto 20cm de das hastes, para a medição. As três hastes formam o triângulo equilátero de lado igual a 60cm, com interligação feita por cabo de cobre flexível de 16mm². Na instalação

também foi colocado uma camada de pedras britas de basalto para cobrir a superfície do solo, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Aterramento de haste em triângulo.



Fonte: Autoria própria.

O aterramento do condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, foi construído com um cabo de cobre nu de seção 16mm^2 com um comprimento total de 3 metros, sendo que desses, 10cm ficaram expostos para possibilitar a medição, 40cm verticais até chegar a circunferência que tem 2,5 metros de perímetro e 80cm de diâmetro. Além do cabo, também foram colocadas pedras britas sobre o solo que abriga a instalação como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Aterramento de condutor na horizontal em forma de círculo.



Fonte: Autoria própria.

3.3 Coleta e tratamento de dados

A coleta de dados foi realizada por meio da medição da resistência de terra nas duas instalações. A medição foi feita com um terrômetro, também foram feitas medições do pH, temperatura e umidade do solo, desde o dia 13 de agosto até o dia 15 de outubro de 2018. Os valores medidos de pH, temperatura e umidade podem ser encontrados nos APÊNDICES C e D.

Tanto o terrômetro, quanto o medidor de umidade e temperatura digital de solo e o medidor de pH digital, as especificações técnicas desses equipamentos encontram-se no ANEXO A, foram disponibilizados pela universidade e esses dois últimos, podem ser observados na Figura 13 e Figura 14 respectivamente.

Figura 13 – Medidor de umidade e temperatura digital.



Fonte: Autoria própria.

Figura 14 – Medidor de pH digital.



Fonte: Autoria própria.

Foram necessárias também outras medições, tais como: radiação solar e chuva que foram obtidas pelo Instituto Nacional Meteorológico (INTMET).

3.3.1 Medição das resistências de aterramento

O terrômetro digital utilizado para a coleta das resistências de terra, possui três entradas como pode ser visto na Figura 15, dessa forma, tornou-se inviável realizar o método de Wenner, portanto, foi utilizado o método de queda de potencial, ambas topologias explicadas nos itens 2.4.4 e 2.4.5 deste trabalho, considerou-se portanto o solo homogêneo.

Figura 15 – Terrômetro.



Fonte: Autoria própria.

A medição em cada um dos sistemas de aterramento, aconteceram obedecendo as instruções de uso do terrômetro, que podem ser encontradas no item 2.4.5 deste trabalho. Todos os passos realizados em campo, encontram-se descritos abaixo:

Antes de ser iniciada a medição das resistências de terra, foi necessário verificar se haviam influencias de tensão nos sistemas de aterramento, por meio da medição da tensão de terra, para evitar a sobreposição das zonas de influência do sistema de aterramento e do eletrodo de corrente, o que geraria um valor de resistência de terra não confiável (MODENA e SUETA, 2011), (ICEL, 2020).

O procedimento realizado para a obtenção da tensão de terra, pode ser acompanhado abaixo:

- 1º Passo: Inserção das hastes auxiliares. Os eletrodos auxiliares possuem 20cm de comprimento, destes, foi inserido no solo 18cm e 2cm foi mantido exposto para possibilitar a medição. O eletrodo de potencial foi o primeiro a ser inserido no solo, posicionado à 5,5 metros do sistema a ser estudado. Já o eletrodo de corrente, foi cravado em alinhamento com todo o conjunto, aterramento e haste auxiliar de potência, à 9 metros do aterramento principal.
- 2º Passo: Conexão dos cabos. Então o cabo verde foi conectado pela garra ao sistema de aterramento que ia ser avaliado e à entrada “E” do terrômetro, o cabo amarelo foi ligado à entrada “P” do equipamento e à haste de potencial intermediária. Por final, o cabo vermelho foi conectado à entrada “C” do terrômetro e na última haste auxiliar. Vale lembrar que o equipamento estava desligado até esse passo.
- 3º Passo: Medição. Foi então selecionado a função “ACV” por meio da chave seletora de funções, e obteve-se a leitura do valor de terra no display do terrômetro.

Os passos acima citados foram realizados individualmente, para o aterramento de haste em triângulo e para o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo.

Os resultados para os valores de tensão de terra, foram de 0V para os dois sistemas de aterramento estudados nesse trabalho. Esse valor de tensão garante que o valor da resistência que foi medido posteriormente, possui exatidão.

Os procedimentos realizados na medição da resistência de terra podem ser compreendidos a seguir:

- 1º Passo: Escolha da escala adequada. O terrômetro utilizado possui opção de escala de medição de resistências de 20 Ω , 200 Ω e 2k Ω , assim, optou-se por utilizar a escala de 200 Ω , que viabilizava a medição de valores superiores a 20 Ω .
- 2º Passo: Inserção dos eletrodos auxiliares. Procedimento igual ao 1º Passo realizado para a medição da tensão de terra, que foi anteriormente explicado. A haste auxiliar pode ser observada na Figura 16.

Figura 16 – Haste auxiliar.



Fonte: Autoria própria.

- 3º Passo: Conexão dos cabos nas hastes. Procedimento igual ao 2º Passo feito para a medição da tensão de terra, que foi abordado anteriormente. Pode-se observar o procedimento realizado na Figura 17.

Figura 17 – Circuito para medição.



Fonte: Autoria própria.

- 4º Passo: Realização da medição e coleta do valor da resistência de aterramento. Para verificar o valor da resistência do sistema de aterramento, apertou-se o botão *push-on* do terrômetro como pode ser observado na Figura 18.

Figura 18 – Medição.

Fonte: LIMA (2018, p. 36).

- 5º Passo: Limpeza e armazenamento dos equipamentos. Após a medição separadamente em cada sistema de aterramento, os equipamentos de medição foram limpos, as hastes auxiliares lavadas e todos foram guardados.

De posse das medições da resistência de aterramento, criou-se um banco de dados com o histórico do comportamento das duas instalações com um total de 33 leituras no primeiro período, compreendido entre agosto e setembro, e 31 leituras no segundo período, nos meses de setembro e outubro para cada uma das instalações, esses valores podem ser encontrados nas tabelas dos APÊNCIDES A e B.

As medições foram realizadas obedecendo as orientações mínimas de segurança, tais como: não fazer medições em dias de chuva ou com condições atmosféricas adversas, uma vez que existe o risco de ocorrência de raios, não permitir a entrada de animais ou pessoas não envolvidas na tarefa e utilização de calçados fechados (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

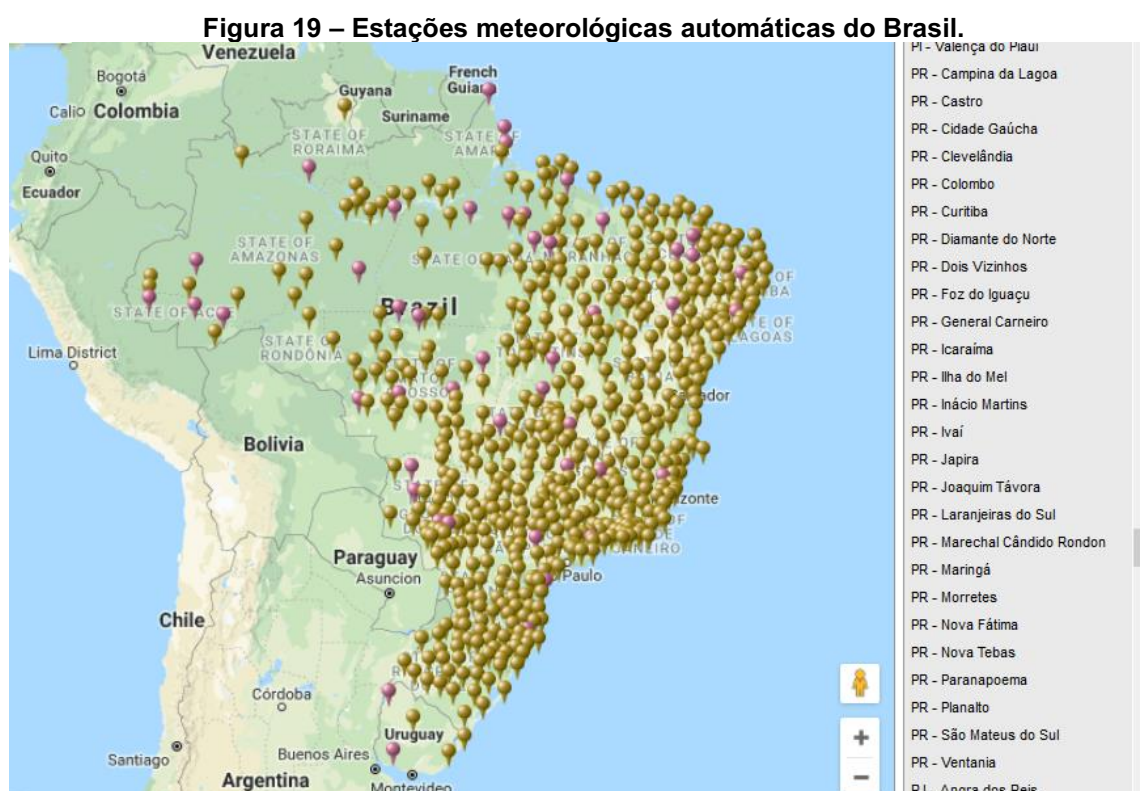
Nos dias em que não foi possível realizar as medições, devido às chuvas, utilizou-se como informação a medição realizada no dia anterior, mantendo dessa forma o banco de dados atualizado.

3.3.2 Dados climáticos

Os dados climáticos foram fornecidos pela Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática, do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, localizada na cidade de Nova Fátima que fica a aproximadamente 30km de onde foi realizado o estudo.

A estação meteorológica automática (EMA) funciona coletando de minuto a minuto as informações de temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos e radiação solar da região onde está instalada. Esses dados são enviados de hora em hora para o INMET, Brasília (INMET, 2020).

Estas estações mostradas na Figura 19 estão instaladas por todo o Brasil. As cidades paranaenses onde pode ser encontrada um EMA, estão descritas na lateral direita da Figura 19.



Fonte: LIMA (2018, p. 38).

Na plataforma do INMET é possível acessar as informações climáticas, selecionando o período necessário para o desenvolvimento da análise. A parte selecionada para a obtenção dos dados foi de 13 de agosto até 15 de outubro de 2018, onde está compreendido o intervalo das medições realizadas para este trabalho. As informações obtidas foram de: radiação solar e precipitação.

Os dados coletados do INMET foram armazenados em um arquivo no *Excel*®. Eles foram separados por período, sendo a primeira planilha, “Periodo01-INMET”, composta dos valores referentes ao dia 13 de agosto até o dia 14 de setembro e a segunda planilha, “Periodo02-INMET”, de 15 de setembro até 15 de outubro de 2018. As medições eram feitas no turno da tarde, às 15 horas.

Dentre as diversas informações que o INMET fornece, optou-se por utilizar apenas a radiação solar e a precipitação, pois como a estação meteorológica fica a aproximadamente 30km de distância do local das instalações, as informações medidas diretamente do solo de temperatura e umidade, são mais pertinentes ao estudo.

A precipitação fornecida pelo INMET refere-se à quantidade de chuva em milímetros por hora de cada um dos dias. Nesse sentido, visando entender os impactos diretos da precipitação na resistividade do solo, utilizou-se a somatória de toda a quantidade de chuva para cada um dos dias.

A radiação solar também é fornecida pelo INMET de hora em hora para todos os dias, porém, por ser uma grandeza com muita oscilação, optou-se por utilizar a média de radiação solar diária. Na Figura 20 é possível observar o banco de dados com a radiação e precipitação fornecido pelo INMET

Figura 20 – Dados INMET.

| Data | Hora (UTC) | Radiacao (KJ/m ²) | Chuva (mm) | Data 13 ago - 14 set 2018 | Média de Radiação Solar (KJ/m ²) do dia | Chuva (mm) do dia |
|------------|------------|-------------------------------|------------|---------------------------|---|-------------------|
| 13/08/2018 | 0 | | 0 | 13-ago | 1706,58 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 1 | | 0 | 14-ago | 1837,03 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 2 | | 0 | 15-ago | 1056,57 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 3 | | 0 | 16-ago | 1187,01 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 4 | | 0 | 17-ago | 1636,33 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 5 | | 0 | 18-ago | 1663,65 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 6 | | 0 | 19-ago | 1491,15 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 7 | | 0 | 20-ago | 1616,72 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 8 | | 0 | 21-ago | 1280,47 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 9 | | 0 | 22-ago | 771,46 | 3,40 |
| 13/08/2018 | 10 | | 0 | 23-ago | 1297,91 | 2,80 |
| 13/08/2018 | 11 | 266,76 | 0 | 24-ago | 1083,37 | 17,60 |
| 13/08/2018 | 12 | 1081,24 | 0 | 25-ago | 1541,35 | 21,80 |
| 13/08/2018 | 13 | 1838,79 | 0 | 26-ago | 1700,83 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 14 | 2404,99 | 0 | 27-ago | 1749,66 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 15 | 2827,84 | 0 | 28-ago | 1663,04 | 0,00 |
| 13/08/2018 | 16 | 2802,92 | 0 | 29-ago | 1662,54 | 0,00 |

Fonte: Autoria própria.

As medições extraídas no INMET podem ser encontradas no APÊNDICES C e D e estão dispostas em colunas, onde cada linha corresponde a cada dia.

Com todas as medições organizadas, foi possível gerar os gráficos de cada mês, com os dados diários para cada parâmetro, no *Excel*®.

4. RESULTADOS

Este capítulo contempla os cálculos e os gráficos realizados no software Excel®, bem como os dados coletados na prática tanto do aterramento de haste em triângulo quanto do condutor enterrado na horizontal em forma de círculo.

4.1 Valores de Resistências e resistividades

Uma vez coletados todos os valores de resistências de terra para os sistemas de haste em triângulo e condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, calculou-se as resistividades para cada um dos sistemas.

Para o sistema em triângulo, manipulou-se as Equações 1 e 2 apresentadas no item 2.1.1, isolando a resistência própria da haste R_{1haste} na Equação 1 e substituindo na Equação 2, resultando a Equação 15.

$$\rho a = \frac{R_{eq} \cdot 2\pi L}{K \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot L}{D}\right)} \quad (15)$$

O valor de K utilizado foi de 0,79, sendo este uma estimativa realizada a partir do Gráfico 1 mostrado no item 2.1.1, para haste de diâmetro 3/8".

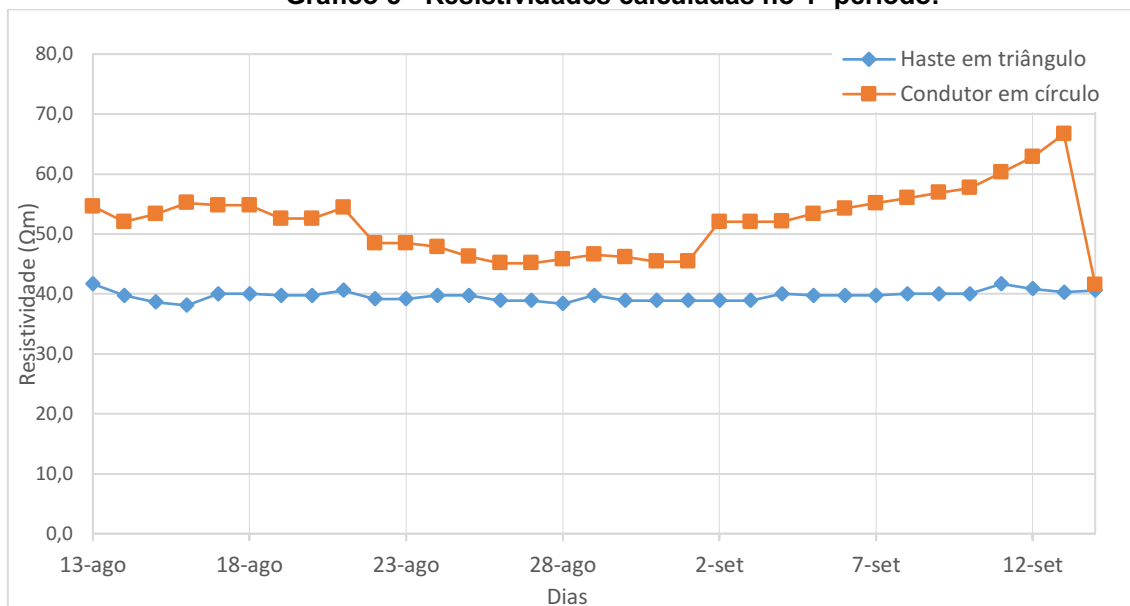
Para o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, utilizou-se a Equação 3 mostrada no item 2.1.2, isolando a resistividade ρa obteve-se a Equação 16.

$$\rho a = \frac{R_{circulo} \cdot \pi^2 \cdot r}{\ln\left(\frac{4 \cdot r^2}{dp}\right)} \quad (16)$$

As Equações 15 e 16 foram utilizadas respectivamente para cada sistema de aterramento, em todas as resistências medidas, nos dois períodos, dessa forma, foi possível encontrar a resistividade das terras circunvizinhas às hastes aterradas, para cada dia.

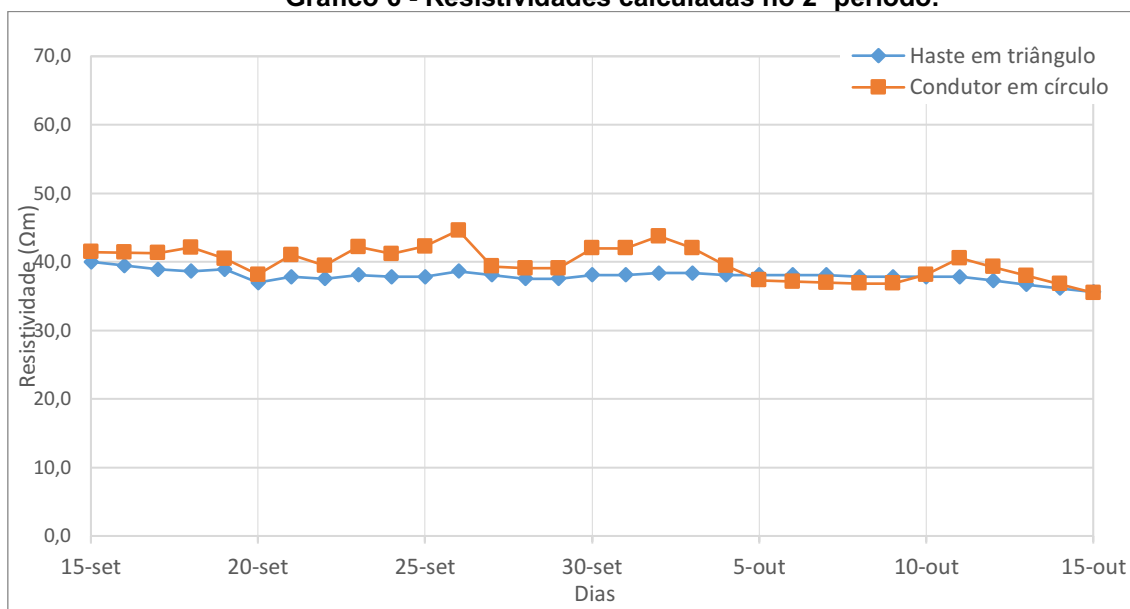
Nos APÊNDICES A e B podem ser observados todas as resistividades calculadas para o primeiro e segundo período respectivamente. Os Gráficos 5 e 6 revelam o comportamento da resistividade para os dois períodos respectivamente.

Gráfico 5 - Resistividades calculadas no 1º período.



Fonte: Autoria própria.

As resistividades calculadas no primeiro período, possuem valores que vão de 38,1Ω.m até 66,7Ω.m. O sistema de aterramento com haste em triângulo apresentou média de 39,7Ω.m, já o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo obteve o valor médio de 52,0Ω.m.

Gráfico 6 - Resistividades calculadas no 2º período.

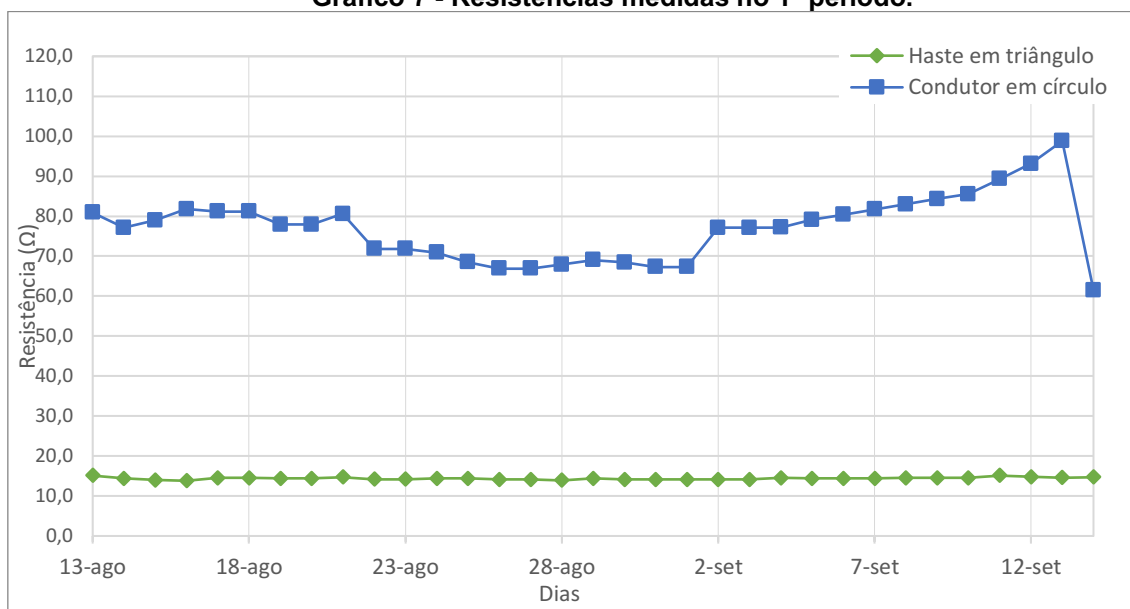
Fonte: Autoria própria.

No segundo período, os valores ficaram entre 35,5Ω.m e 44,6Ω.m. A média para o sistema de haste em triângulo foi de 37,7Ω.m e para o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo teve a média de 39,8Ω.m.

Ao observar os gráficos de resistividade para os dois períodos, percebe-se que o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo apresentou os maiores valores de resistividade, logo, as resistências de terra medidas, tiveram o mesmo desempenho, como pode ser verificado nos Gráficos 7 e 8.

Ao analisar as médias de resistência de terra, observou-se que a haste em triângulo teve o valor de 14,4Ω e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo 77Ω, ambos resultados verificados no primeiro período.

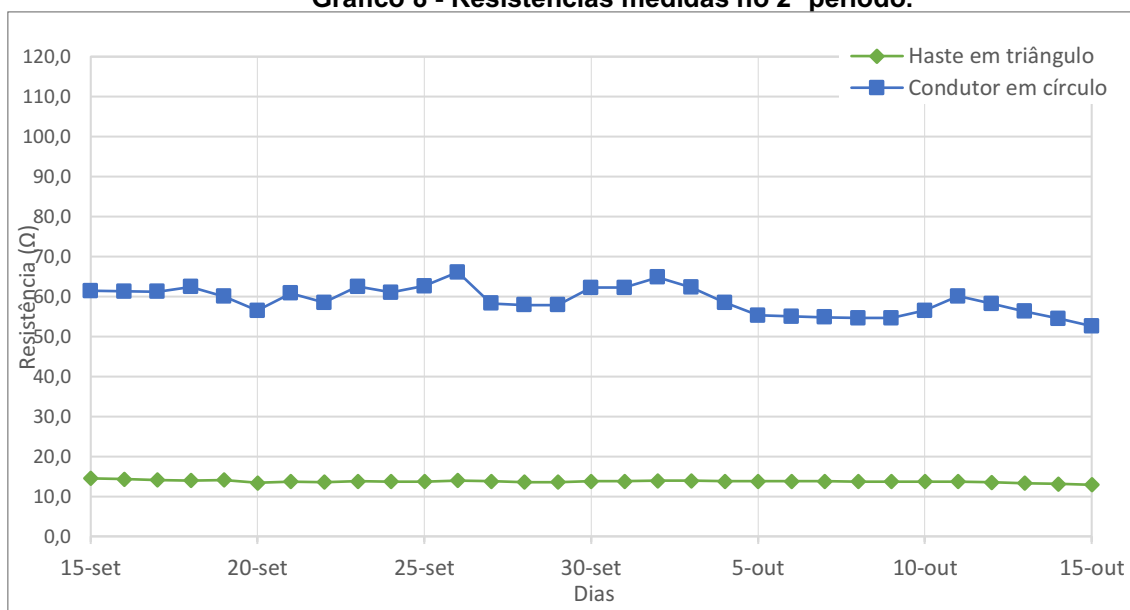
Gráfico 7 - Resistências medidas no 1º período.



Fonte: Autoria própria.

Os valores de resistência de terra medidos no segundo período podem ser observados no Gráfico 8. A média para a haste em triângulo ficou com 13,7Ω e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo 59,1 Ω

Gráfico 8 - Resistências medidas no 2º período.



Fonte: Autoria própria.

Na análise dos dados utilizou-se a ferramenta estatística denominado desvio padrão, que é a medida de dispersão em relação média, de um conjunto de dados.

Por tanto, o desvio padrão deve apresentar valor pequeno, o mais próximo de zero possível, para indicar que os dados são homogêneos (GOUVEIA, 2019).

Utilizou-se, portanto, a Equação 17 para calcular o desvio padrão (dp) das medidas de resistência e resistividade, conforme orientação de Magalhães e Lima (2004, p. 104).

$$dp = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{méd})^2} \quad (17)$$

Onde:

n : representa o número total de dados.

X_i : valor na posição i no conjunto de dados.

$X_{méd}$: média aritmética dos dados.

Os resultados do desvio padrão para os dois sistemas de aterramento, das medições realizadas nos dois períodos, pode ser observados na Tabela 4.

Tabela 4- Desvio padrão para os dois sistemas de aterramento.

| Meses | Haste em triângulo | | Condutor em círculo | |
|-----------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| | Resistência (Ω) | Resistividade ($\Omega.m$) | Resistência (Ω) | Resistividade ($\Omega.m$) |
| Ago - Set | 0,3 | 0,8 | 8,2 | 5,5 |
| Set - Out | 0,3 | 0,8 | 3,4 | 2,3 |

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 5 pode-se verificar os resultados do coeficiente de variação (cv) calculado com a Equação 18, que permite comparar a variação dos dados obtidos em relação à média. Quanto mais baixo o valor, menor ou igual a 25%, significa que o conjunto de dados é homogêneo (GOUVEIA, 2019).

$$cv = \frac{dp}{X_{méd}} .100 \quad (18)$$

Tabela 5- Coeficiente de variação.

| Meses | Haste em triângulo | | Condutor em círculo | |
|-----------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | Resistência (%) | Resistividade (%) | Resistência (%) | Resistividade (%) |
| Ago - Set | 2,1 | 2,1 | 10,6 | 10,6 |
| Set - Out | 2,2 | 2,2 | 5,7 | 5,7 |

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados da Tabela 5, pôde-se concluir que as medições estão com desvios aceitáveis estatisticamente e todo o conjunto de dados possui homogeneidade, já que os percentuais ficaram menores que 25%. Esse desempenho valida a realização da comparação entre os dois sistemas de aterramento estudados neste trabalho.

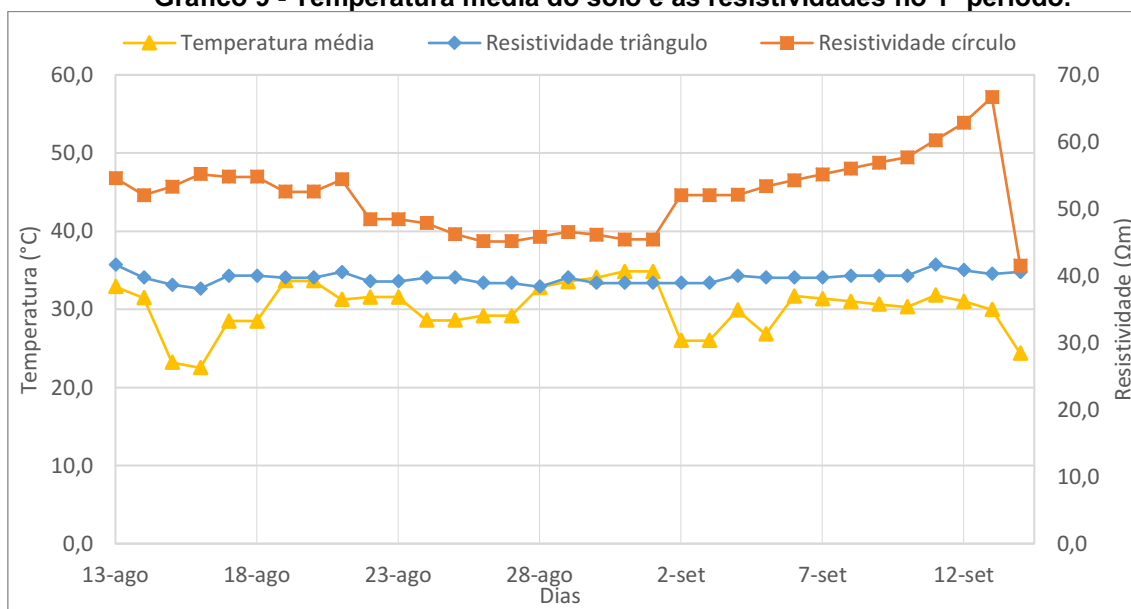
4.2 O impacto do clima na resistividade do solo

Durante os períodos de medição, as alterações climáticas foram acompanhadas. Dessa forma, as medidas de temperatura, umidade, precipitação, radiação e pH foram relacionadas com a resistividade do solo para cada um dos períodos de medição.

4.2.1 Temperatura e resistividade

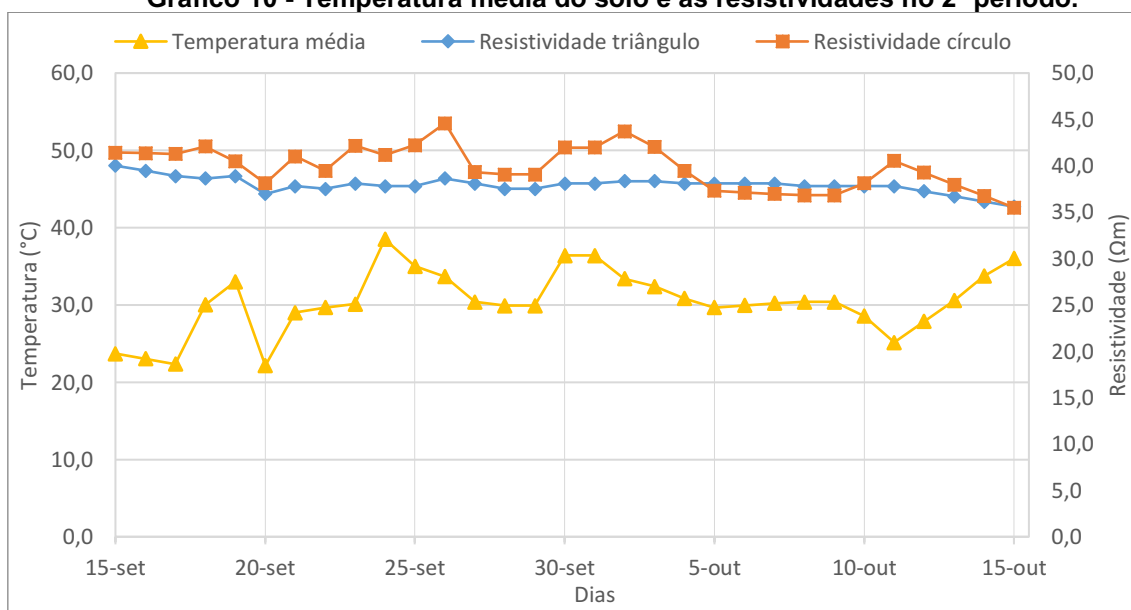
A alteração na temperatura influencia a resistividade do solo, pois, com aumentos de temperaturas próximas de 100°C a vaporização deixa o solo mais seco, aumentando a resistividade do solo. De forma semelhante, o decréscimo na temperatura, próximo de 0°C ocorre a mudança de estado líquido para sólido, e isso faz surgir uma concentração no estado molecular, dificultando a condução da corrente e elevando a resistência do solo (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

O comportamento da temperatura do solo observado durante a experimentação pode ser visto nos Gráficos 9 e 10, que se referem respectivamente ao primeiro e segundo períodos de medição.

Gráfico 9 - Temperatura média do solo e as resistividades no 1º período.

Fonte: Autoria própria.

Como citado no item 2.3.5 deste trabalho e ilustrado no Gráfico 3, a resistividade tende a apresentar alterações bruscas com temperaturas extremas de 0°C e 100°C. A temperatura média para o primeiro período foi de 30,2°C, dessa forma, não foi observado grandes alterações na resistividade em função da variação da temperatura neste primeiro ciclo de medição.

Gráfico 10 - Temperatura média do solo e as resistividades no 2º período.

Fonte: Autoria própria.

No segundo período de medições, percebeu-se uma relação no intervalo que

vai do dia 20 de setembro ao dia 10 de outubro. No dia 20 de setembro por exemplo, onde a temperatura atingiu o menor valor de todo o período, de 22,15°C, da mesma maneira a resistividade da haste em triângulo que estava em 40,5Ω.m no dia anterior, foi para 37Ω.m e o mesmo comportamento foi observado no condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, que estava com resistividade de 40,5Ω.m e foi para 38,1Ω.m. A média de temperatura do solo para todo esse ciclo foi de 30,4°C.

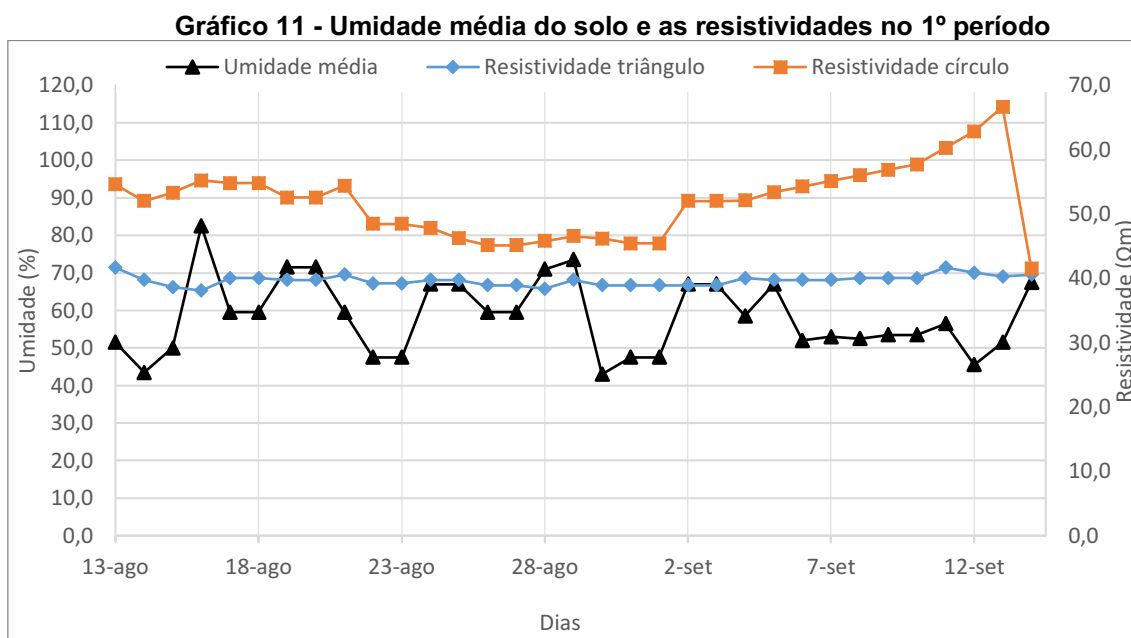
4.2.2 Umidade e resistividade

A resistividade é alterada com a variação da umidade do solo. Quando o solo tem menor umidade, os sais contidos nele, não se dissolvem e deixam de produzir um bom meio eletrolítico à passagem da corrente iônica. É por essa razão que a resistividade acompanha os períodos de seca e chuva da região onde o aterramento está instalado (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Nos Gráficos 11 e 12, pode-se encontrar o comportamento da umidade do solo durante os dois períodos em que foram realizadas as medições.

A média de umidade do solo no primeiro período foi de 58,3% e no segundo período 67,2%. Esse dado é de extrema relevância para o presente estudo, pois no primeiro período as resistividades foram superiores para as duas topologias de aterramento, onde a haste em triângulo apresentou média de resistividade igual a 39,7Ω.m e o condutor enterrado na horizontal em forma círculo ficou com média de 52Ω.m. No segundo período onde a média de umidade do solo foi superior, a haste em triângulo apresentou média de resistividade de 37,9Ω.m e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo 39,8Ω.m, este último tendo uma redução de 23,5% comparada ao primeiro período.

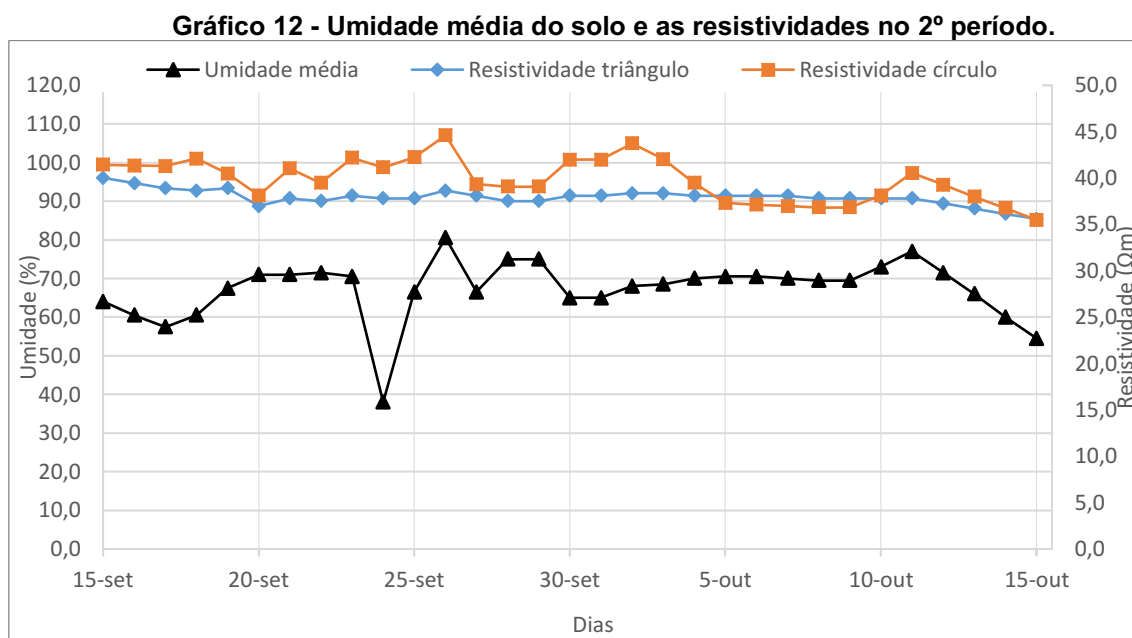
No primeiro ciclo Gráfico 11, a correspondência entre a alteração na resistividade devido as alterações na umidade ficaram evidentes, é possível notar durante todo o período uma correlação entre as duas grandezas.



Fonte: Autoria própria.

No dia 28 de agosto a média da umidade do solo foi de 71,0% e a resistividade para o condutor enterrado em círculo foi de 45,8Ω.m. O sistema de aterramento com haste em triângulo também apresentou redução na resistividade, chegando em 38,4Ω.m.

Analisando o segundo período, no dia 20 de setembro, percebeu-se que ocorreu um aumento na umidade média que foi de 67,5% no dia 19 para 71% no dia 20, neste mesmo dia, foi percebido uma diminuição nas resistividades das duas topologias de aterramento. O sistema com haste em triângulo apresentou 37Ω.m, e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo teve como resistividade 38,1Ω.m. Também foi percebido uma correlação entre a umidade e a resistividade durante o segundo período.



Fonte: Autoria própria.

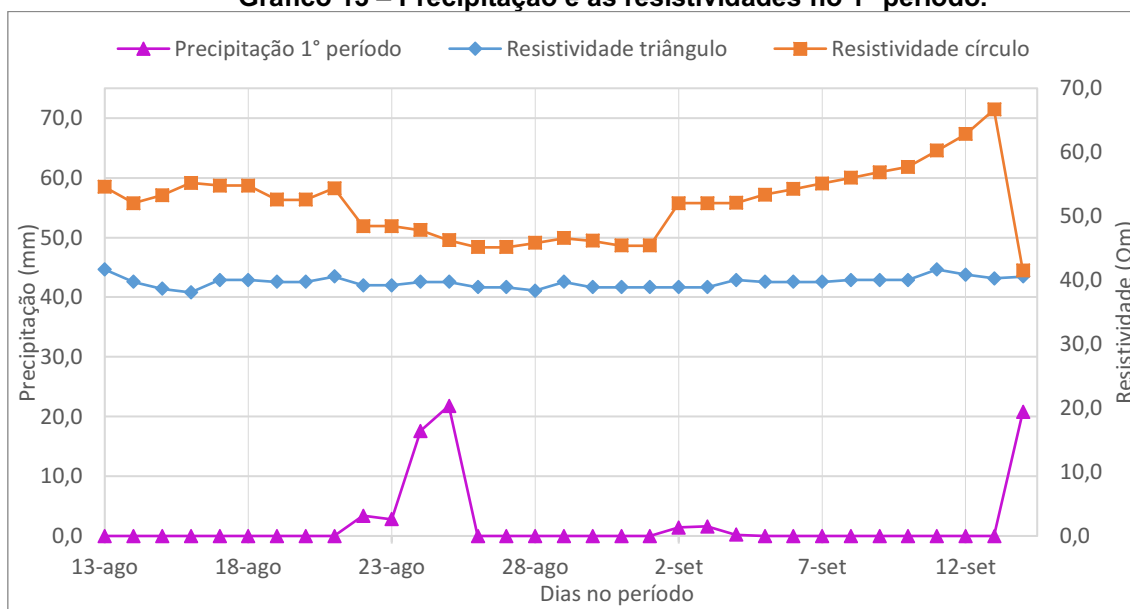
4.2.3 Precipitações e resistividade

A textura, estrutura e o tipo de cobertura do solo são os principais aspectos que interferem na sua infiltração, distribuição e capacidade de retenção de água. Os solos argilosos com estrutura estável podem apresentar altas taxas de infiltração, favorecendo a umidade e diminuindo a resistividade do solo. O solo onde estão instalados os aterramentos possuem gramado, essa característica favorece a infiltração da água no solo (BRANDÃO, 2003).

Levando-se em consideração que a ocorrência de chuva contribui de forma significativa, para o aumento da umidade do solo e interfere diretamente na sua resistividade, plotou-se os Gráficos 13 e 14 que mostram as quantidades de precipitação em milímetros para cada dia de medição e o comportamento das resistividades dos sistemas de aterramentos, nos dois períodos.

Como pôde-se notar no primeiro período de medições, a quantidade de chuva total no período foi de 69,60 milímetros, bem inferior ao segundo que teve 196 milímetros de precipitação. Essa informação vai de encontro com os cálculos de resistividade, uma vez que no segundo período esses valores foram menores para as duas topologias.

Gráfico 13 – Precipitação e as resistividades no 1º período.



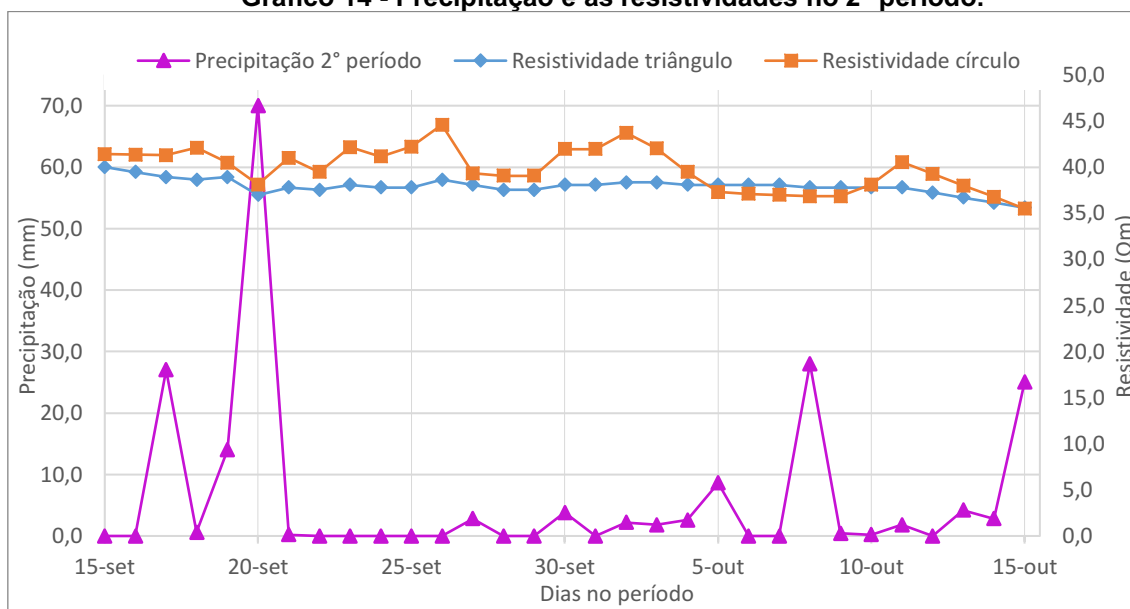
Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o dia 22 de agosto, pode-se perceber que com uma pequena ocorrência de precipitação, 3,40 milímetros, já ocorreu uma diminuição nas resistividades das duas topologias de aterramento. O sistema de haste em triângulo que tinha a resistividade no valor de 40,6Ω.m diminuiu para 39,2Ω.m neste dia, e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo estava com resistividade de 54,4Ω.m no dia anterior e foi para 48,4Ω.m.

As precipitações ocorreram do dia 22 até o dia 25 de agosto, totalizando 45,6 milímetros, e apenas o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo seguiu a tendência, diminuindo o valor da resistividade que chegou a 45,1Ω.m no dia 26 de agosto. As hastes em triângulo mantiveram-se com poucas oscilações durante todo esse ciclo de medição.

No último dia de medição do primeiro período, 14 de setembro, ocorreu uma precipitação de 20,8 milímetros, o que contribuiu de forma significativa para uma diminuição na resistividade do condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, que terminou o período com 41,5Ω.m de resistividade.

Gráfico 14 - Precipitação e as resistividades no 2º período.



Fonte: Autoria própria.

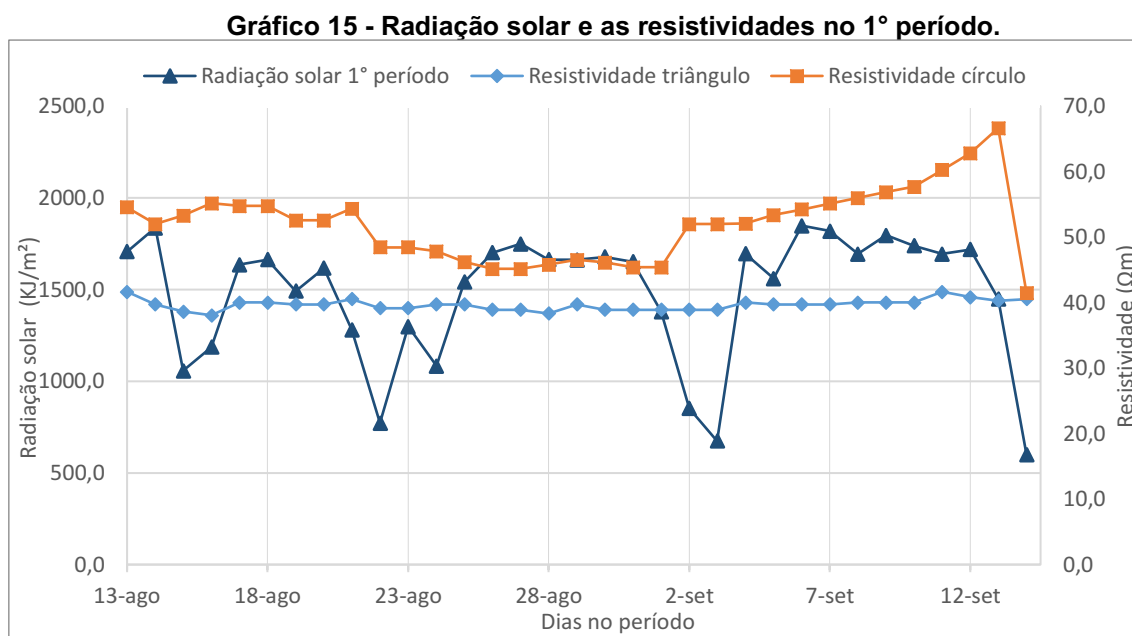
No segundo período no dia 20 de setembro, ocorreu uma precipitação de 70 milímetros e notou-se uma diminuição no valor das resistividades dos dois sistemas. As hastes em triângulo apresentaram uma pequena diminuição na resistividade de $38,9\Omega.m$ no dia 19, para $37\Omega.m$ no dia 20. O condutor enterrado na horizontal em forma de círculo foi de $40,5\Omega.m$ no dia anterior, para $38,1\Omega.m$ no dia 20. Portanto ficou estabelecido correlação entre as alterações nas resistividades com a ocorrência de precipitações nos dois ciclos de medições.

4.2.4 Radiação solar e a resistividade

A radiação solar exerce influência direta sobre a Terra, desse modo, ela interfere nas condições do clima e do tempo. De maneira geral, todos os fenômenos químicos, físicos e biológicos que acontecem na superfície da Terra estão direta, ou indiretamente, associados com a quantidade de radiação solar incidente na superfície. Uma vez entendida a importância da radiação solar, procurou-se investigar o comportamento das resistividades com as alterações desse indicador (CORRÊA, 2008).

Os Gráficos 15 e 16 mostram o comportamento da radiação e das resistividades para cada período de medição, respectivamente. O primeiro período

apresentou média de $1478,65\text{KJ/m}^2$ enquanto o segundo teve $1315,45\text{KJ/m}^2$ de radiação solar.

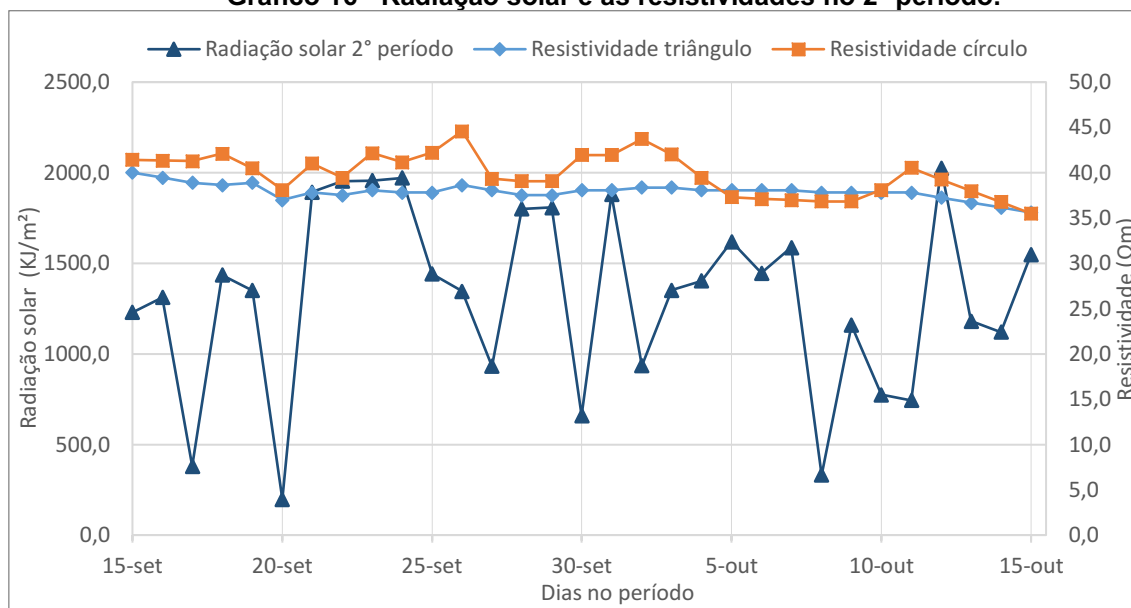


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser observado no Gráfico 15, existem alguns pontos de coincidência, como no dia 22 de agosto em que a radiação teve média de $771,46\text{KJ/m}^2$ e as resistividades dos dois sistemas diminuíram, a haste em triângulo atingiu $39,2\Omega.m$ e condutor enterrado na horizontal em forma círculo apresentou $48,4\Omega.m$, porém, é válido ressaltar que neste mesmo dia, ocorreu uma pequena incidência de chuva, $3,4$ milímetros.

Do dia 5 de setembro à 13 de setembro não houve incidência de chuva, no dia 6 de setembro a média de radiação solar atingiu o maior valor do período de $1848,46\text{KJ/m}^2$ e a resistividade do condutor enterrado na horizontal em forma de círculo apresentou acréscimo no valor da resistividade, esse aumento na resistividade seguiu até o dia 13 de setembro, onde este sistema atingiu seu valor máximo de $66,7\Omega.m$.

No segundo período de medição, do dia 21 ao dia 26 de setembro, foi o maior intervalo de tempo sem chuva desse ciclo. Nesses dias, a radiação solar apresentou a segunda maior média registrada em todo o período de $1970,92\text{KJ/m}^2$ e percebeu-se que o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo oscilou nesse mesmo intervalo, atingindo $41,2\Omega.m$, valor este superior à média calculada de $39,8\Omega.m$ para todo o segundo período.

Gráfico 16 - Radiação solar e as resistividades no 2º período.

Fonte: Autoria própria.

Foi observado correlação na variação da resistividade em função da alteração da radiação solar nos dois períodos de medição.

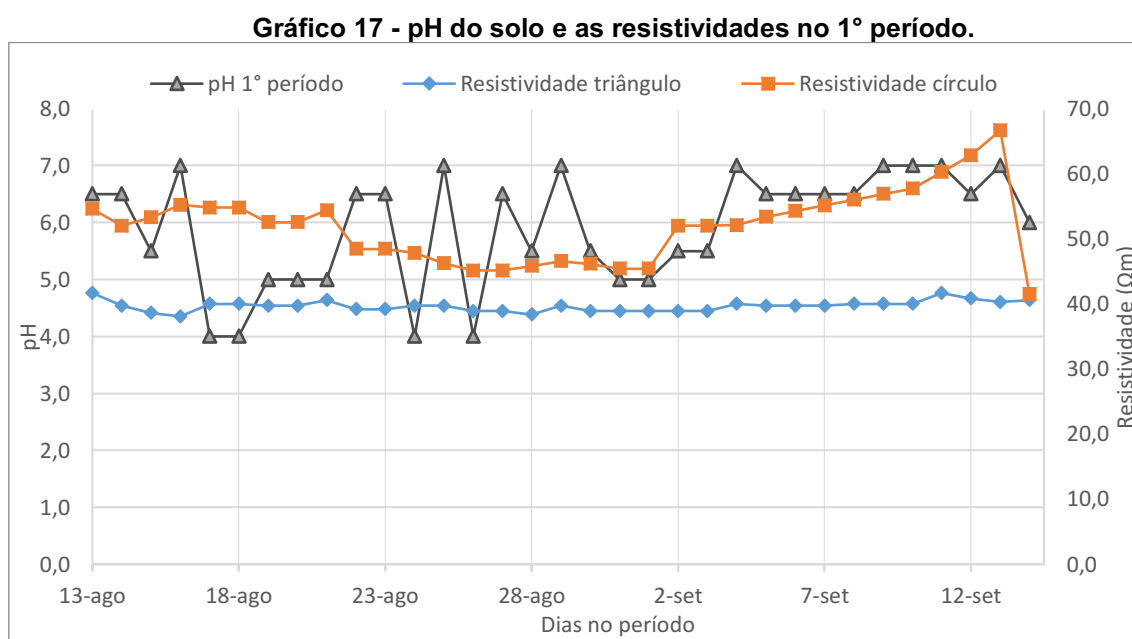
4.2.5 pH e a resistividade

O potencial hidrogeniônico (pH) demonstra o teor de hidrogênio na solução do solo. Por meio da medição do pH é possível classificar o solo em ácido ou alcalino. Valores de pH abaixo de 7,0 significam que o solo é ácido, pH igual a 7,0 solo neutro e acima de 7,0 solo alcalino (FOGAÇA, 2020). A medição do pH em estudos de aterramentos elétricos, se faz necessário para complementar o parâmetro resistividade do solo e identificar condições de corrosão dos metais, nesse sentido, o índice de pH recomendado deve estar entre 6,0 e 10,0 (PROCOBRE, 2009) e (SILVA, DIAS, FILHO, BATHKE, RODRIGUES, CERQUEIRA, ANDRADE, PEREIRA, RIBAS, CABUSSÚ, PORTELLA e SOTILE, 2010).

O comportamento do pH e das resistividades podem ser observados nos Gráficos 17 e 18, que se referem aos dois períodos de medição. A corrosividade do solo costuma ser determinada pela sua resistividade elétrica, devido ao fluxo de corrente iônica estar relacionada às reações de corrosão. Dessa forma, solos com alta resistividade normalmente apresentam baixa corrosão, porém isso não exclui a

possibilidade de ocorrência de outros processos corrosivos, tornando somente essa avaliação insuficiente (ROBERGE, 1999).

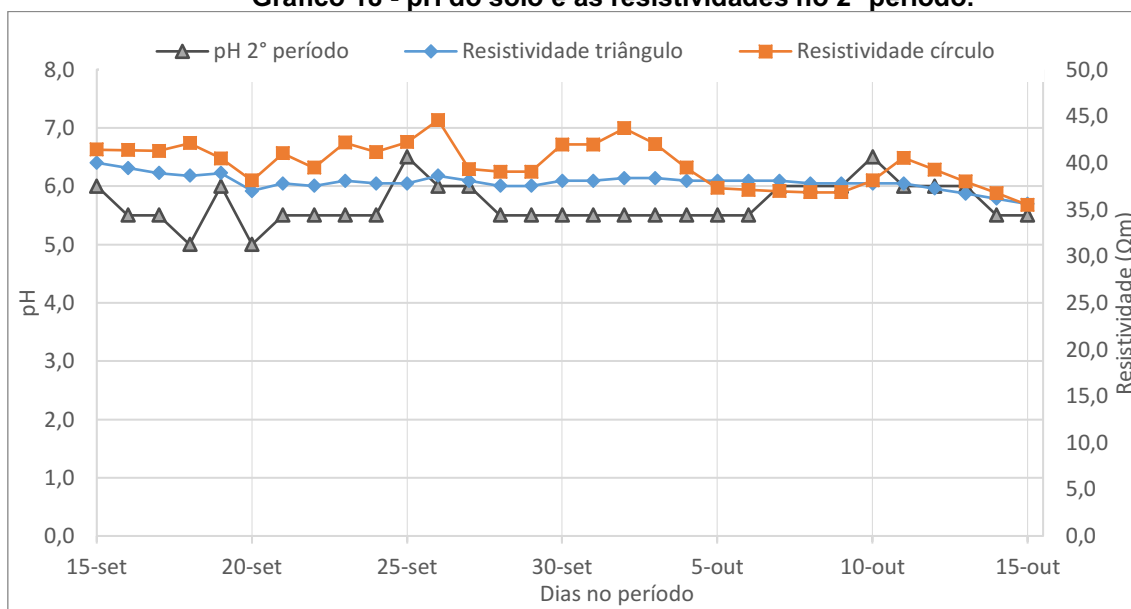
A média do pH no primeiro período foi de 5,9, ácido, e a média de resistividade 39,7 Ω .m para a haste em triângulo que se manteve com pouca variação. Já o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo oscilou bastante, atingindo o máximo de 66,7 Ω .m no dia 13 e mínimo de 41,5 Ω .m no dia 14 de setembro, com média de 52 Ω .m para todo o primeiro ciclo. No geral, foi possível observar algumas correlações, como no período do dia 2 ao dia 14 de setembro, em que a resistividade aumentou e o pH tendeu a tornar-se mais alcalino.



Fonte: Autoria própria.

Buscou-se verificar se no segundo ciclo de medição seria identificado uma correlação entre o comportamento do pH e da resistividade, de maneira geral, as médias de resistividades foram menores para os dois sistemas de aterramento, a haste em triângulo 37,9 Ω .m e o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo 39,8 Ω .m, e 5,7 de média do pH.

Gráfico 18 - pH do solo e as resistividades no 2º período.



Fonte: Autoria própria.

Nesse segundo período, com as médias de resistividades menores o pH tendeu a ser mais ácido, esse comportamento era esperado, demonstrando correlação entre as alterações do pH e da resistividade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho permitiu analisar o desempenho de duas topologias de aterramento elétrico, no mesmo solo e sob as mesmas condições climáticas, dessa maneira, o estudo comparativo entre, haste em triângulo e condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, se além as características intrínsecas dos sistemas. Durante todo o período de medição, a haste em triângulo apresentou média de resistividade inferior ao condutor enterrado na horizontal em forma de círculo. No primeiro período compreendido entre agosto e setembro, a média de resistividades foi de $39,7\Omega.m$ para a haste em triângulo e $52,0\Omega.m$ para o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo. No segundo período, setembro a outubro, as resistividades foram de $37,9\Omega.m$ para a haste em triângulo e $39,8\Omega.m$ para o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo. Analisando as resistividades calculadas, presentes nos APÊNDICES A e B para as duas topologias de aterramento, e com o conhecimento das características do solo da região, predominantemente argiloso, é possível classificar o solo como “argila com 40% de umidade” conforme a Tabela 1 da seção 2.3.1 deste trabalho.

Ao estudar as resistências elétricas medidas diariamente para cada um dos períodos, esses valores podem ser encontrados nos APÊNDICES A e B, é visível que o aterramento de haste em triângulo apresentou melhor desempenho, com valores médios de $14,4\Omega$ no primeiro e $13,7\Omega$ no segundo período de medição. O aterramento com o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo apresentou valor de resistência de terra superior no primeiro período, de $77,0\Omega$, já no segundo o valor reduziu para $59,1\Omega$. Conclui-se que entre as duas topologias de aterramento comparadas neste trabalho, o método de haste em triângulo apresentou melhor desempenho.

A influência das mudanças climáticas nas alterações das resistividades foi acompanhada diariamente, por meio da medição da temperatura, umidade, precipitação, incidência de radiação solar e pH. Os fatores climáticos que mais interferiram na resistividade e resistência dos sistemas de aterramento, foram: umidade do solo, precipitações e radiação solar. O aterramento com o condutor enterrado na horizontal em forma de círculo demonstrou mais suscetibilidade as variações climáticas, isso se deve principalmente à profundidade a qual está enterrado, de 0,4 metros e à área reduzida de contato do condutor, que possui seção

transversal de 16mm^2 e diâmetro aproximado de 0,0045 metros. Quanto ao aterramento de haste em triângulo, se revelou mais estável, pois, possui maior aprofundamento efetivo, de 2,2 metros, é composto por três hastes de aterramento e têm área de contato superior ao círculo, já que o diâmetro de cada haste é de aproximadamente 0,0095 metros, ou seja $3/8''$.

Para trabalhos futuros, sugere-se o aprofundamento no estudo da resistividade do solo, por meio da substituição do terrômetro de três entradas pelo de quatro, pois usando o método de Wenner é possível entender o comportamento da resistividade de uma área superior à área circunvizinha ao eletrodo. E por fim, indica-se a realização de um estudo comparativo com implementação de técnicas de tratamento do solo, no condutor enterrado na horizontal em forma de círculo, a fim de comprovar e analisar a taxa de efetividade dessas técnicas em diminuir a resistência de terra.

REFERÊNCIAS

- ÂMBITO JURÍDICO. **Estado responsabilizado por choque em criança na Expointer.** Disponível em: <https://ambito-juridico.jusbrasil.com.br/noticias/436996300/estado-responsabilizado-por-choque-em-crianca-na-expointer>. Acesso em: 30 set. 2018.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410. Instalações elétricas de baixa tensão.** Rio de Janeiro, 17 mar. 2008.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.** Rio de Janeiro, 29 ago. 2005.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117. Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo.** Rio de Janeiro, 19 ago. 2012.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15749. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento.** Rio de Janeiro, 13 set. 2009.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15751. Sistemas de aterramento de subestações - Requisitos.** Rio de Janeiro, 01 ago. 2013.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16527. Aterramento para sistemas de distribuição.** Rio de Janeiro, 06 out. 2016.
- BELCHIOR, F. N. **Medição da Resistividade de Solo e Resistência de Terra.** Abril. 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/14676243-Medicao-da-resistividade-de-solo-e-resistencia-de-terra.html>. Acesso em: 22 set. 2018.
- BRANDÃO, Viviane dos Santos. **Infiltração de água em solos sujeitos a encrostamento.** Viçosa: UFV, 2003.
- BELLAN, Júlio C.; CECCATTO, Demétrio T.; MACARIO, Deryck D.; SGARBOSA, Marco D. **O aterramento elétrico como forma de prevenção a sobretensões causadas por descargas atmosféricas.** Ling. Acadêmica, Batatais, v6, n1, p. 69-100, jan. /jun. 2016.
- CAPELLI, Alexandre. **Aterramento Elétrico.** Revista Saber Eletrônica. Nº 329. São Paulo: jun. 2000.
- CORRÊA, Manon P. **Influência da radiação solar na regeneração natural de mata atlântica.** Rio de Janeiro: UFRRJ, 2008.
- CUNHA, João G. **Aterramento.** São Paulo, 12 set. 2016. Disponível em: <https://www.getrotech.com.br/loja/Artigos/aterramento/>. Acesso em: 22 set. 2018.

FEIS, FACULDADE DE ENGENHARIA DO CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA – UNESP. **Aterramento**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aterramento.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

FERREIRA, Daniel Augusto Pagi. **Medidas e materiais elétricos**. Londrina: Editora e distribuidora educacional S.A. v1. 2017.

FOGAÇA, Jennifer. **PH do solo**. Disponível em: <https://www.manualdaquimica.com/curiosidades-quimica/ph-solo.htm>. Acesso em: 22 out. 2020.

GOUVEIA, Rosimar. **Desvio padrão**. 21 jan. 2019. Toda Matéria. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/desvio-padrao/>. Acesso em: 16 out. 2020.

ICEL, Manaus. **Manual de instruções do terrômetro digital modelo TR-4200**. Disponível em: <http://www.icel-manaus.com.br/imagens/produtos/TR-4200%20Manual.pdf>. Acesso em: 08 out. 2020.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia: Estações Meteorológicas Automáticas**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas> Acesso em 08 out. 2020.

ITCG, Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná. **Mapas_Solos**. 2008. Disponível em: http://www.itcg.pr.gov.br/arquivos/File/Produtos_DGEO/Mapas_ITCG/PDF/Mapa_Solos.pdf. Acesso em: 04 out. 2020.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Editora Sagra DC Luzzatto, 1995.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico**. Florianópolis: LabPlan, 2011.

LIMA, Giovana P. dos S. **Método alternativo para diminuição da resistência de terra utilizando cristal absorvente líquido**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

LIMA C., Valmiqui; LIMA R., Marcelo; MELO, Vander F. **Conhecendo os solos do Paraná**. Revista da Sociedade Brasileira de Ciência de Solos. Curitiba: UFPR, 2012.

MAGALHÃES, Marcos Nascimento; LIMA, Antônio Carlos Pedroso. **Noções de probabilidade e estatística**. ed. 6. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2004.

MODENA, J.; SUETA, H. **Métodos normalizados para medição de resistência de aterramento**. Setor Elétrico, São Paulo, ed. 65, p. 40-44, ago. 2011.

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

NR, NORMA REGULAMENTADORA. **NR 10**. Segurança em instalações e serviços em eletricidade. 2004.

PROCOBRE. **Curso de instalações elétricas módulo 3 - Sistemas de aterramento**. 2009. Disponível em: <https://www.procobre.org/pt/publicacion/curso-de-instalacoes-eletricas-modulo-3-sistemas-de-aterramento-2/>. Acesso em: 21 out. 2018.

ROBERGE, P.R. **Handbook of Corrosion Engineering**., p. 142-154. McGraw-Hill, 1999.

RODRIGUES, Nicholas G. **Comparativo de aterramento haste em triângulo e condutor enterrado na horizontal**. 2018. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica: apresentação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

SILVA, José M.; DIAS, Edson S.; FILHO, Célio S. B.; BATHKE, Rodolfo C.; RODRIGUES, Carlos B.; CERQUEIRA, Dailton P.; ANDRADE, Flávio C.; PEREIRA, Princia, Ap. M.; RIBAS, Rosane M.; CABUSSÚ, Mário S.; PORTELLA, Kleber F. SOTILE, Carlos A. **Melhoramento de solos não corrosivos para uso em aterramento elétrico visando casamento de impedância com cabo de descida de postes de distribuição**. INTERCORR 2010. Fortaleza, Ceará: maio 2010.

VISACRO, S. **Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artiliber Editora, 2002.

APÊNDICE A – Resistência e resistividades do primeiro período

| Dia/ 2018 | Haste em Triângulo | | Condutor em Círculo | |
|--------------|---------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| | R (Ω) | ρ_a ($\Omega.m$) | R (Ω) | ρ_a ($\Omega.m$) |
| 13-ago | 15,1 | 41,7 | 80,9 | 54,6 |
| 14-ago | 14,4 | 39,7 | 77,1 | 52,0 |
| 15-ago | 14,0 | 38,6 | 79,0 | 53,3 |
| 16-ago | 13,8 | 38,1 | 81,8 | 55,2 |
| 17-ago | 14,5 | 40,0 | 81,2 | 54,8 |
| 18-ago | 14,5 | 40,0 | 81,2 | 54,8 |
| 19-ago | 14,4 | 39,7 | 77,9 | 52,6 |
| 20-ago | 14,4 | 39,7 | 77,9 | 52,6 |
| 21-ago | 14,7 | 40,6 | 80,6 | 54,4 |
| 22-ago | 14,2 | 39,2 | 71,8 | 48,4 |
| 23-ago | 14,2 | 39,2 | 71,8 | 48,4 |
| 24-ago | 14,4 | 39,7 | 70,9 | 47,8 |
| 25-ago | 14,4 | 39,7 | 68,5 | 46,2 |
| 26-ago | 14,1 | 38,9 | 66,9 | 45,1 |
| 27-ago | 14,1 | 38,9 | 66,9 | 45,1 |
| 28-ago | 13,9 | 38,4 | 67,9 | 45,8 |
| 29-ago | 14,4 | 39,7 | 69,0 | 46,5 |
| 30-ago | 14,1 | 38,9 | 68,4 | 46,1 |
| 31-ago | 14,1 | 38,9 | 67,3 | 45,4 |
| 1-set | 14,1 | 38,9 | 67,3 | 45,4 |
| 2-set | 14,1 | 38,9 | 77,1 | 52,0 |
| 3-set | 14,1 | 38,9 | 77,1 | 52,0 |
| 4-set | 14,5 | 40,0 | 77,2 | 52,1 |
| 5-set | 14,4 | 39,7 | 79,1 | 53,4 |
| 6-set | 14,4 | 39,7 | 80,4 | 54,2 |
| 7-set | 14,4 | 39,7 | 81,7 | 55,1 |
| 8-set | 14,5 | 40,0 | 83,0 | 56,0 |
| 9-set | 14,5 | 40,0 | 84,3 | 56,9 |
| 10-set | 14,5 | 40,0 | 85,5 | 57,7 |
| 11-set | 15,1 | 41,7 | 89,3 | 60,2 |
| 12-set | 14,8 | 40,8 | 93,1 | 62,8 |
| 13-set | 14,6 | 40,3 | 98,8 | 66,7 |
| 14-set | 14,7 | 40,6 | 61,5 | 41,5 |
| Qtd de dias | Média R(Ω) | Média ρ_a ($\Omega.m$) | Média R(Ω) | Média ρ_a ($\Omega.m$) |
| 33 | 14,4 | 39,7 | 77,0 | 52,0 |

APÊNDICE B – Resistência e resistividades do segundo período

| Dia/ 2018 | Haste em Triângulo | | Condutor em Círculo | |
|-------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------|----------------------------------|
| | R (Ω) | ρ_a ($\Omega.m$) | R (Ω) | ρ_a ($\Omega.m$) |
| 15-set | 14,5 | 40,0 | 61,4 | 41,4 |
| 16-set | 14,3 | 39,5 | 61,3 | 41,4 |
| 17-set | 14,1 | 38,9 | 61,2 | 41,3 |
| 18-set | 14 | 38,6 | 62,4 | 42,1 |
| 19-set | 14,1 | 38,9 | 60,0 | 40,5 |
| 20-set | 13,4 | 37,0 | 56,5 | 38,1 |
| 21-set | 13,7 | 37,8 | 60,8 | 41,0 |
| 22-set | 13,6 | 37,5 | 58,5 | 39,5 |
| 23-set | 13,8 | 38,1 | 62,5 | 42,2 |
| 24-set | 13,7 | 37,8 | 61,0 | 41,2 |
| 25-set | 13,7 | 37,8 | 62,6 | 42,2 |
| 26-set | 14 | 38,6 | 66,1 | 44,6 |
| 27-set | 13,8 | 38,1 | 58,3 | 39,3 |
| 28-set | 13,6 | 37,5 | 57,9 | 39,1 |
| 29-set | 13,6 | 37,5 | 57,9 | 39,1 |
| 30-set | 13,8 | 38,1 | 62,2 | 42,0 |
| 1-out | 13,8 | 38,1 | 62,2 | 42,0 |
| 2-out | 13,9 | 38,4 | 64,8 | 43,7 |
| 3-out | 13,9 | 38,4 | 62,3 | 42,0 |
| 4-out | 13,8 | 38,1 | 58,5 | 39,5 |
| 5-out | 13,8 | 38,1 | 55,3 | 37,3 |
| 6-out | 13,8 | 38,1 | 55,0 | 37,1 |
| 7-out | 13,8 | 38,1 | 54,8 | 37,0 |
| 8-out | 13,7 | 37,8 | 54,6 | 36,8 |
| 9-out | 13,7 | 37,8 | 54,6 | 36,8 |
| 10-out | 13,7 | 37,8 | 56,5 | 38,1 |
| 11-out | 13,7 | 37,8 | 60,1 | 40,5 |
| 12-out | 13,5 | 37,3 | 58,2 | 39,3 |
| 13-out | 13,3 | 36,7 | 56,3 | 38,0 |
| 14-out | 13,1 | 36,1 | 54,5 | 36,8 |
| 15-out | 12,9 | 35,6 | 52,6 | 35,5 |
| Qtd de dias | Média R(Ω) | Média ρ_a ($\Omega.m$) | Média R(Ω) | Média ρ_a ($\Omega.m$) |
| 31 | 13,7 | 37,9 | 59,1 | 39,8 |

APÊNDICE C – Medições de temperatura, pH, umidade, radiação solar e precipitação do primeiro período

| Dia/ 2018 | Medições no solo | | | | | | | Medições INMET | |
|----------------|------------------|---------------|------------------------|----------------|--------------|--------------|------------------------------|--|---------------|
| | T (°C) min | T (°C) máx | T (°C) méd | pH | U min (%) | U máx (%) | U méd (%) | Média Radiação Solar (KJ/m ²) | Chuva (mm) |
| 13-ago | 32,9 | 32,9 | 32,9 | 6,5 | 47,0 | 56,0 | 51,5 | 1706,6 | 0 |
| 14-ago | 27,3 | 35,6 | 31,5 | 6,5 | 36,0 | 51,0 | 43,5 | 1837,0 | 0 |
| 15-ago | 22,5 | 23,9 | 23,2 | 5,5 | 44,0 | 56,0 | 50,0 | 1056,6 | 0 |
| 16-ago | 21,4 | 23,6 | 22,5 | 7,0 | 82,0 | 83,0 | 82,5 | 1187,0 | 0 |
| 17-ago | 20,8 | 36,2 | 28,5 | 4,0 | 55,0 | 64,0 | 59,5 | 1636,3 | 0 |
| 18-ago | 20,8 | 36,2 | 28,5 | 4,0 | 55,0 | 64,0 | 59,5 | 1663,7 | 0 |
| 19-ago | 26,5 | 40,8 | 33,7 | 5,0 | 50,0 | 93,0 | 71,5 | 1491,1 | 0 |
| 20-ago | 26,5 | 40,8 | 33,7 | 5,0 | 50,0 | 93,0 | 71,5 | 1616,7 | 0 |
| 21-ago | 27,3 | 35,2 | 31,3 | 5,0 | 51,0 | 68,0 | 59,5 | 1280,5 | 0 |
| 22-ago | 27,2 | 35,9 | 31,6 | 6,5 | 45,0 | 50,0 | 47,5 | 771,5 | 3,4 |
| 23-ago | 27,2 | 35,9 | 31,6 | 6,5 | 45,0 | 50,0 | 47,5 | 1297,9 | 2,8 |
| 24-ago | 23,8 | 33,4 | 28,6 | 4,0 | 52,0 | 82,0 | 67,0 | 1083,4 | 17,6 |
| 25-ago | 23,8 | 33,4 | 28,6 | 7,0 | 52,0 | 82,0 | 67,0 | 1541,4 | 21,8 |
| 26-ago | 24,8 | 33,5 | 29,2 | 4,0 | 49,0 | 70,0 | 59,5 | 1700,8 | 0 |
| 27-ago | 24,8 | 33,5 | 29,2 | 6,5 | 49,0 | 70,0 | 59,5 | 1749,7 | 0 |
| 28-ago | 25,8 | 39,8 | 32,8 | 5,5 | 60,0 | 82,0 | 71,0 | 1663,0 | 0 |
| 29-ago | 27,4 | 39,7 | 33,6 | 7,0 | 69,0 | 78,0 | 73,5 | 1662,5 | 0 |
| 30-ago | 26,8 | 41,3 | 34,1 | 5,5 | 42,0 | 44,0 | 43,0 | 1678,7 | 0 |
| 31-ago | 30,7 | 39,0 | 34,9 | 5,0 | 28,0 | 67,0 | 47,5 | 1651,3 | 0 |
| 1-set | 30,7 | 39,0 | 34,9 | 5,0 | 28,0 | 67,0 | 47,5 | 1379,2 | 0 |
| 2-set | 18,9 | 33,1 | 26,0 | 5,5 | 57,0 | 77,0 | 67,0 | 852,4 | 1,4 |
| 3-set | 18,9 | 33,1 | 26,0 | 5,5 | 57,0 | 77,0 | 67,0 | 674,3 | 1,6 |
| 4-set | 23,4 | 36,4 | 29,9 | 7,0 | 50,0 | 67,0 | 58,5 | 1696,1 | 0,2 |
| 5-set | 21,5 | 32,1 | 26,8 | 6,5 | 57,0 | 77,0 | 67,0 | 1559,5 | 0 |
| 6-set | 23,7 | 39,7 | 31,7 | 6,5 | 49,0 | 55,0 | 52,0 | 1848,5 | 0 |
| 7-set | 24,9 | 37,8 | 31,4 | 6,5 | 50,0 | 56,0 | 53,0 | 1818,8 | 0 |
| 8-set | 26,1 | 35,9 | 31,0 | 6,5 | 50,0 | 55,0 | 52,5 | 1694,3 | 0 |
| 9-set | 27,3 | 34,0 | 30,7 | 7,0 | 51,0 | 56,0 | 53,5 | 1795,4 | 0 |
| 10-set | 28,5 | 32,1 | 30,3 | 7,0 | 52,0 | 55,0 | 53,5 | 1739,5 | 0 |
| 11-set | 25,8 | 37,8 | 31,8 | 7,0 | 51,0 | 62,0 | 56,5 | 1693,6 | 0 |
| 12-set | 28,0 | 34,0 | 31,0 | 6,5 | 45,0 | 46,0 | 45,5 | 1719,0 | 0 |
| 13-set | 26,2 | 33,7 | 30,0 | 7,0 | 49,0 | 54,0 | 51,5 | 1448,9 | 0 |
| 14-set | 21,7 | 27,0 | 24,4 | 6,0 | 59,0 | 76,0 | 67,5 | 600,3 | 20,8 |
| Qtd de dias | | | Média Temp. (°C) | Média do pH | | | Média das Umid. (%) | Média (KJ/m ²) | Total (mm) |
| 33 | | | 30,2 | 5,9 | | | 58,3 | 1478,7 | 69,6 |

APÊNDICE D – Medições de temperatura, pH, umidade, radiação solar e precipitação do segundo período

| Dia/ 2018 | Medições no solo | | | | | | | Medições INMET | |
|-------------------|------------------|---------------|------------------------|----------------|--------------|--------------|------------------------------|--|---------------|
| | T (°C) min | T (°C) máx | T (°C) méd | pH | U min (%) | U máx (%) | U méd (%) | Média Radiação Solar (KJ/m ²) | Chuva (mm) |
| 15-set | 21,4 | 26 | 23,7 | 6 | 57 | 71 | 64 | 1230,1 | 0,0 |
| 16-set | 21,1 | 25 | 23,05 | 5,5 | 56 | 65 | 60,5 | 1312,4 | 0,0 |
| 17-set | 20,9 | 23,8 | 22,35 | 5,5 | 55 | 60 | 57,5 | 380,0 | 27,0 |
| 18-set | 27 | 33 | 30 | 5 | 47 | 74 | 60,5 | 1435,4 | 0,6 |
| 19-set | 29,2 | 36,8 | 33 | 6 | 58 | 77 | 67,5 | 1350,9 | 14,0 |
| 20-set | 20,1 | 24,2 | 22,15 | 5 | 66 | 76 | 71 | 198,0 | 70,0 |
| 21-set | 23,2 | 34,8 | 29 | 5,5 | 67 | 75 | 71 | 1893,8 | 0,2 |
| 22-set | 21,1 | 38,2 | 29,65 | 5,5 | 67 | 76 | 71,5 | 1953,3 | 0,0 |
| 23-set | 21,3 | 38,9 | 30,1 | 5,5 | 66 | 75 | 70,5 | 1956,4 | 0,0 |
| 24-set | 38 | 39 | 38,5 | 5,5 | 10 | 66 | 38 | 1970,9 | 0,0 |
| 25-set | 28,8 | 41,2 | 35 | 6,5 | 64 | 69 | 66,5 | 1441,4 | 0,0 |
| 26-set | 29,4 | 37,9 | 33,65 | 6 | 71 | 90 | 80,5 | 1345,4 | 0,0 |
| 27-set | 27,3 | 33,5 | 30,4 | 6 | 65 | 68 | 66,5 | 932,2 | 2,8 |
| 28-set | 27 | 32,8 | 29,9 | 5,5 | 65 | 85 | 75 | 1800,5 | 0,0 |
| 29-set | 27 | 32,8 | 29,9 | 5,5 | 65 | 85 | 75 | 1808,6 | 0,0 |
| 30-set | 35,1 | 37,7 | 36,4 | 5,5 | 65 | 65 | 65 | 659,1 | 3,8 |
| 1-out | 35,1 | 37,7 | 36,4 | 5,5 | 65 | 65 | 65 | 1880,8 | 0,0 |
| 2-out | 31,4 | 35,4 | 33,4 | 5,5 | 67 | 69 | 68 | 935,7 | 2,2 |
| 3-out | 30,5 | 34,3 | 32,4 | 5,5 | 67 | 70 | 68,5 | 1351,7 | 1,8 |
| 4-out | 28,5 | 33,2 | 30,85 | 5,5 | 68 | 72 | 70 | 1403,6 | 2,6 |
| 5-out | 27,8 | 31,5 | 29,65 | 5,5 | 68 | 73 | 70,5 | 1619,7 | 8,6 |
| 6-out | 27,5 | 32,4 | 29,95 | 5,5 | 66 | 75 | 70,5 | 1446,0 | 0,0 |
| 7-out | 27,1 | 33,3 | 30,2 | 6 | 64 | 76 | 70 | 1587,6 | 0,0 |
| 8-out | 26,8 | 34 | 30,4 | 6 | 61 | 78 | 69,5 | 331,9 | 28,0 |
| 9-out | 26,8 | 34 | 30,4 | 6 | 61 | 78 | 69,5 | 1158,5 | 0,4 |
| 10-out | 27,2 | 29,9 | 28,55 | 6,5 | 64 | 82 | 73 | 774,8 | 0,2 |
| 11-out | 24,2 | 26,1 | 25,15 | 6 | 69 | 85 | 77 | 743,7 | 1,8 |
| 12-out | 26,2 | 29,5 | 27,85 | 6 | 64 | 79 | 71,5 | 2025,5 | 0,0 |
| 13-out | 28,2 | 32,9 | 30,55 | 6 | 59 | 73 | 66 | 1181,0 | 4,2 |
| 14-out | 30,1 | 37,4 | 33,75 | 5,5 | 54 | 66 | 60 | 1121,0 | 2,8 |
| 15-out | 32,1 | 39,9 | 36 | 5,5 | 50 | 59 | 54,5 | 1549,1 | 25,0 |
| Qtd de dias | | | Média Temp. (°C) | Média do pH | | | Média das Umid. (%) | Média (KJ/m ²) | Total (mm) |
| 31 | | | 30,4 | 5,7 | | | 67,2 | 1315,5 | 196,0 |

ANEXO A – Especificação técnica dos equipamentos utilizados na medição

| Características técnicas do terrômetro TR-4200. | | | |
|---|-----------|------------------|------------------------|
| Sistema de medição através de inversor de corrente constante 820Hz/2mA. | | | |
| Escala | Resolução | Exatidão | Corrente de curto |
| 20 Ohm | 0,01 Ohm | ±(1,0% + 2 dig.) | 2mADC |
| 200 Ohm | 0,1 Ohm | | |
| 2000 Ohm | 1 Ohm | | |
| Sistema de medição de tensão de terra. | | | |
| Escala | Resolução | Exatidão | Resposta em frequência |
| 200 V | 0,1 V | ±(1,0% + 2 dig.) | 40 a 500Hz |

| Característica técnica do medidor de pH – X4 life. | | |
|---|-----------|----------|
| Escala | Resolução | Precisão |
| 3,5 – 9,0 Ph | 0,5 pH | ±0,02 |

| Característica técnica do higrômetro – TA 290. | | |
|---|-----------|----------|
| Sistema de medição de temperatura. | | |
| Escala | Resolução | Precisão |
| 0°C – 70°C | 0,1°C | ±1°C |
| Sistema de medição de umidade. | | |
| Escala | Resolução | Precisão |
| 10% - 98% | 0,1% | ±5% |