

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

GIOVANA PEREIRA DOS SANTOS LIMA

**MÉTODO ALTERNATIVO PARA DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TERRA
UTILIZANDO CRISTAL ABSORVENTE LÍQUIDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

GIOVANA PEREIRA DOS SANTOS LIMA

**MÉTODO ALTERNATIVO PARA DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TERRA
UTILIZANDO CRISTAL ABSORVENTE LÍQUIDO**

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 Antonio Ferreira Finocchio

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Giovana Pereira dos Santos Lima

MÉTODO ALTERNATIVO PARA DIMINUIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TERRA UTILIZANDO CRISTAL ABSORVENTE LÍQUIDO

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 12/06/2018 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). Me(a). João Cesar de Paula Salve - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Luiz Marcelo Chiesse da Silva - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e Nossa Senhora mãe de Jesus por estarem iluminando meus caminhos, por todas as bênçãos e vitórias concedidas em minha vida. Aos meus pais Silvana Pereira dos Santos Lima e Jose Antonio de Lima, pelo esforço, carinho e dedicação comigo. Aos meus avós maternos e paternos, João e Albertina, Benedita e Antonio. Aos meus tios e tias, Walmir, Valcir, Valnice, Cirlene, Juliana, Jacinta, Salete, Francisco, Maria de Fátima, seus esposos (as) e filhos (as). Aos demais familiares que torcem por mim, e contribuem para realização dos meus sonhos.

Ao Prof. Me. Marco Antonio Ferreira Finocchio pelo apoio, confiança e paciência na orientação deste trabalho, aos professores da banca examinadora, ao Prof. Dr. Luiz Marcelo Chiesse da Silva e ao Prof. Me. João Cesar de Paula Salve pelas contribuições dadas. À todos os servidores da UTFPR e professores que me transmitiram muitos ensinamentos, Marilu Martens Oliveira, Katya R. Freitas, Marcio Sadao Hirata, Walter Ramazzina, Maria Eugenia Dajer, Rosiane Walter, Cassio H. S. Amador, Eduardo Heinemann, Carla F. Machado, Milena Barbosa, Lígia Bitencourt, Cintia Paião, Leonice, Tatiane Martins, Joana D'Arc, Celso Naves.

Aos meus amigos que me acompanharam na graduação, Laryssa Urata, Rodrigo Mansueli Nunes, André Fernandes, Pedro H. T. Zugaib, Higor Trabuco, Luana Souza, Thaianara de Araújo, Kauane Benites, Daiane Correa Bento, Fabiane Gimenes, Mayara Delanhese, Murilo Cinel, Denis R. Cola, Eduardo H. Nazu, Luiz Yamashita, Matheus Presotto, Victória Melo, Gustavo Funchal, Jessica Barretos, Camila Mangialardo, Thiago Bussacarini Mariano, Kelvin Lacerda, Rafael Nascimento, Júlio e Ana Buzanelli. Aos meus amigos de infância e adolescência que ainda continuam presentes mesmo com as distâncias, Irma Luisa Ristau, Isabelly Olívio Cruz, Louyse Pontara de Oliveira, Isabela Maria Silva, Suelen Gimenes e Thais Gimenes.

À UTFPR-CP e ESIGELEC, pela oportunidade de intercambio na França, pelo meu percurso acadêmico e aprendizados adquiridos. Ao DCE, ao projeto “Livre Para Amar” da professora Marines Ribeiro, ao projeto “Ensino de Artes” na APAE, ao Rotaract Club e ao Rotary Club Cornélio Procópio Sul. À todas as pessoas que conheci através de atividades de cunho social, que pude participar na minha cidade, Cornélio Procópio, e fora dela, Unicef Seine Maritime 76 e ASAR – Associação de apoio aos sem abrigos de Rouen, na França. Estas me trouxeram inúmeras lições, valores humanitários e sabedoria para a toda vida.

RESUMO

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 Procopio, 2018.

Os sistemas de aterramento elétrico possuem a função de proteger instalações e equipamentos elétricos, além da vida das pessoas que possam estar em contato com estes. A redução da resistência de aterramento é um dos principais fatores para melhoria da qualidade e segurança das instalações. Este trabalho foi baseado em uma experimentação com duas hastes de aço zincado aterradas verticalmente, uma de maneira convencional e outra com cristais gel absorventes de líquidos, e nesta, verificou-se a redução da resistência do eletrodo de terra. Foi elaborado um estudo comparativo das duas formas de aterramento testadas, a partir de medições diárias de resistência elétrica com o terrômetro, análises do tipo de solo, e possíveis fatores climáticos influentes nas curvas de resistividade, obtidas pelas resistências de cada haste.

Palavras Chave: Resistência de aterramento. Medições. Fatores climáticos. Resistividade.

ABSTRACT

LIMA, Giovana P. dos S. **Alternative method for decreasing earth resistance using liquid-absorbent crystals.** 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Federal Technology University of Parana. Cornélio Procópio, 2018.

Electrical grounding systems have the function of protecting electrical installations and equipments, as well as the person's life who may be in contact with it. Reducing ground resistance is one of the principal factors in improving the quality and safety of installations. This project is based on experimentation with two vertically grounded zinc-plated steel rods, one in conventional way and the other with liquid-absorbent gel crystals in the latter, reduction in ground resistance was verified at the ground. A comparative study was made from the two forms of grounds tested, using daily measurements of electrical resistance with the terrometer, soil type analysis and possible climatic factors influencing the resistivity curves obtained by the resistances of each rod.

Keywords: Grounding resistance. Measurements. Climatic factors. Resistivity

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resistividade em relação à concentração de sais.....	21
Gráfico 2 – Curva da resistividade, da água e temperatura.....	22
Gráfico 3 – Resistividades calculadas do mês de março.....	40
Gráfico 4 – Resistividades calculadas do mês de abril.....	41
Gráfico 5 – Resistências medidas do mês de março.....	41
Gráfico 6 – Resistências medidas do mês de abril.....	42
Gráfico 7 – Temperaturas e resistividade no mês de março.....	44
Gráfico 8 – Temperaturas e resistividade no mês de abril.....	45
Gráfico 9 – Umidade e resistividade no mês de março.....	46
Gráfico 10 – Umidade e resistividade no mês de abril.....	47
Gráfico 11 – Chuvas e resistividade no mês de março.....	48
Gráfico 12 – Chuvas e resistividade no mês de abril.....	49
Gráfico 13 – Radiação solar e resistividade no mês de março.....	50
Gráfico 14 – Radiação solar e resistividade no mês de abril.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Solos e suas resistividades respectivas.....	19
Tabela 2 - Relação entre umidade e resistividade.....	20
Tabela 3 - Desvio padrão para as duas hastes.....	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Malha de aterramento em uma subestação.....	18
Figura 2 – Dispersão radial da corrente.....	24
Figura 3 – Ponto sob a superfície de solo homogêneo.....	25
Figura 4 – Modelo matemático do solo.....	26
Figura 5 –Disposição das hastes para o método de Wenner.....	27
Figura 6 – Esquema de ligação do terrômetro.....	28
Figura 7 – Dois aterramentos instalados.....	31
Figura 8 – Tipos de solo da região de experimentação.....	32
Figura 9 – Haste convencionalmente aterrada.....	33
Figura 10 – Segunda instalação sem os cristais absorventes de líquido.....	34
Figura 11 – Segunda instalação com os cristais absorventes de líquido.....	34
Figura 12 – Terrômetro.....	35
Figura 13- Eletrodo auxiliar para a medição com o Terrômetro.....	36
Figura 14- Eletrodos auxiliares colocados no solo.....	37
Figura 15- Medição da instalação com tratamento.....	37
Figura 16- Estações Meteorológicas Automáticas do Brasil.....	38
Figura 17- Uso do PROCV no Excel.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Problemas e premissas.....	13
1.2	Objetivos.....	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivos específicos.....	14
1.3	Justificativa.....	14
1.4	Método da pesquisa.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Sistemas de aterramento elétrico.....	16
2.2	Eletrodos de aterramento.....	17
2.3	Resistividade do solo.....	18
2.3.1	Tipo de solo.....	19
2.3.2	Umidade.....	20
2.3.3	Concentração de sais no solo.....	20
2.3.4	Compacidade e granulometria do solo.....	21
2.3.5	Temperatura.....	21
2.4	Resistência de terra.....	22
2.4.1	Medição de resistência de terra e resistividade do solo.....	23
2.4.1.1	Medições no local do sistema de aterramento.....	23
2.4.1.2	Influência da estratificação do solo.....	26
2.4.1.3	Método de Wenner	27
2.4.1.4	Resistência a partir de uma haste vertical aterrada.....	28
2.4.2	Tratamento químico do solo.....	29
2.4.2.1	Particularidades do método alternativo testado.....	30
3	METODOLOGIA DE EXPERIMENTAÇÃO.....	31
3.1	Local do experimento.....	31
3.2	Descrição da instalação dos sistemas de aterramento.....	33
3.3	Coleta e tratamento de dados.....	35
3.3.1	Obtenção das resistências de aterramento.....	35
3.3.2	Obtenção dos dados climáticos.....	38
4	RESULTADOS.....	40
4.1	Resistividades e resistências obtidas.....	40

4.2	Comportamento climático e resistividade do solo.....	43
4.2.1	Temperatura e resistividade.....	43
4.2.2	Umidade do ar e resistividade.....	45
4.2.3	Precipitações e resistividade.....	47
4.2.4	Radiação e resistividade.....	49
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
	REFERÊNCIAS.....	54
	APÊNDICE A – Resistência e resistividades do mês de março de 2018.....	57
	APÊNDICE B – Resistência e resistividades do mês de abril de 2018.....	58
	APÊNDICE C – Dados climáticos obtidos de março de 2018.....	59
	APÊNDICE D – Dados climáticos obtidos de abril de 2018.....	60

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos têm suas tensões designadas a partir de um ponto de referência zero volts e a terra é uma ótima opção para este ponto, já que abrange todos os locais com sistemas instalados. Dizer que um sistema está aterrado significa que algum de seus elementos está ligado à terra, através de um condutor comum. O intuito do aterramento é fornecer um trajeto para a circulação de corrente, possibilitando uma detecção de conexão indesejada entre a terra e condutores vivos. A tensão nesses condutores é removida por dispositivos automáticos, havendo limite no esforço de tensão na isolação dos condutores e redução do risco de choque para os indivíduos que estejam sujeitos ao contato com condutores energizados (MORENO & COSTA, 1999).

Para garantir a segurança de qualquer sistema de energia elétrica é necessário que o sistema de proteção seja planejado corretamente, sendo fundamental a implantação de um sistema de aterramento. Kindermann e Campagnolo (2011) destacam que os principais quesitos que devem estar presentes em um sistema de aterramento são:

- Menor resistência de aterramento possível para o caminho de correntes de falta à terra;
- As correntes de falta com potenciais dentro dos limites de segurança, impossibilitando a fibrilação do coração humano;
- Equipamentos de proteção sensíveis com isolamento das falhas a terra;
- Caminho para as descargas atmosféricas escoarem para a terra;
- O uso da terra como retorno de corrente no sistema MRT (monofilar com retorno por terra);
- Escoamento de cargas estáticas geradas por carcaças metálicas de equipamentos.

A NBR 5419/2004 recomenda para os eletrodos uma menor resistência possível, afim de garantir que a corrente de uma descarga atmosférica disperse pelo solo sem causar sobretensões de perigo. Essa recomendação é dada como uma forma de reduzir os gradientes de potencial no solo e as chances de centelhamento perigoso. A corrente elétrica emanada ou absorvida por um sistema de aterramento se dá através de uma resistividade aparente que o solo apresenta à haste utilizada no aterramento.

A partir de um estudo comparativo, este trabalho pretende testar um método de diminuição da resistência terra que possa ser implantado em sistemas de aterramento,

melhorando a qualidade e segurança dos sistemas de energia elétrica, quando confrontado com os sistemas de aterramento convencionais.

1.1 Problemas e premissas

Cada tipo de instalação requer um sistema de proteção com características singulares, porém quando se trata de aterramento há princípios e problemas universais a serem averiguados. O solo é o elemento mais influente, já que este possui diversas irregularidades como heterogeneidade, alterações de suas propriedades conforme as estações do ano e também anisotropias, ou seja, devido a sua composição, algumas propriedades físicas se diferenciam conforme a direção. Em diversas implantações de aterramento são detectados erros primários, como colocação de hastes profundas em solos que possuem camadas de resistividade desiguais, e a cravação de curtas hastes exatamente na camada de resistividade mais alta, sendo que a parte menos resistiva se encontra em uma profundidade maior. Com isto, pode-se afirmar que existem problemas culturais e naturais, onde os naturais são reduzidos conforme o avanço das pesquisas, e os culturais dependem da evolução individual de cada profissional (LEITE & FILHO, 1996).

Entre os tipos de acidentes mais comuns com os trabalhadores da indústria, em setores de manutenção principalmente, é o contato com partes metálicas energizadas, submetendo, o corpo a uma tensão entre fase e terra. Se um indivíduo entra em contato com uma massa aterrada de alto valor de resistência, ele pode estar sob uma tensão de toque e uma corrente de valores perigosos, podendo causar a morte (MAMEDE, 2010). Sendo assim, a impedância de terra implica diretamente na segurança do sistema elétrico aterrado.

1.2 Objetivos

Este tópico visa expor o objetivo geral e os objetivos específicos que este trabalho possui.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo comparativo entre o método convencional de implantação de um sistema de aterramento e outro que utilize um material retentor de líquido junto à haste de aterramento. Por fim, comprovar a melhor eficiência obtendo valores de resistência de terra da e resistividade do solo da instalação tratada.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar os fatores gerais que determinam a resistência dos sistemas de aterramento, as influências de resistividade do solo e sua relação com a resistência de terra das instalações;
- Realizar a experimentação no solo, aterrando duas hastes de aço zincado, sendo uma de forma convencional e a outra com tratamento do solo, efetuando medições com terrômetro.
- A partir das medidas de resistência de terra obtidas durante a experimentação, verificar as possíveis influências climáticas na resistividade calculada das duas formas de aterramento experimentadas.
- Realizar uma descrição comparativa dos dois tipos de situações, apontando a que possibilitou melhores resistências de terra, e a mais vantajosa em termos qualitativos para os sistemas elétricos.

1.3 Justificativa

Os equipamentos elétricos possuem condições limites para o funcionamento, e a ocorrência de uma sobretensão pode ser fatal para o seu desempenho de operação. Chaveamentos dos circuitos ou de cargas nas instalações e quedas de raios são responsáveis por gerar sobretensões. Os danos resultantes, podem significar a perda de aparelhos eletrônicos sensíveis, programas, comunicação entre sistemas, enfim, prejuízos de grande valor. Os dispositivos de proteção desviam do circuito de alimentação os excessos de tensão, impedindo estragos, e este desvio é realizado pelo sistema de aterramento (MORENO & COSTA, 1999).

Para projetos elétricos em edificações, residências e indústrias, é fundamental que exista a segurança tanto das pessoas quanto dos equipamentos. No setor industrial, tem-se a preocupação de reduzir os gastos e desperdícios. É indispensável garantir a proteção dos equipamentos, já que estes podem possuir um valor muito alto ou podem custar um tempo de produção, gerando grandes prejuízos quando danificados. Tendo em vista estes motivos, as melhorias dos sistemas de proteção são sempre bem-vindas. O estudo de um método que diminua a resistência de aterramento, analisado neste trabalho, pretende fornecer um embasamento para os projetos e estudos no âmbito de segurança das instalações.

1.4 Método da pesquisa

Este trabalho visa apresentar conceitos básicos para a compreensão dos sistemas de aterramento, evidenciando os benefícios de se obter um método que reduza, ao máximo, o valor da resistência de terra da instalação. A proposta do trabalho é composta de quatro partes descritas a seguir:

- Primeira: Estudo bibliográfico sobre instalações de aterramento, apresentando os tipos e conceitos básicos que influenciam no sistema de aterramento elétrico, evidenciando os predominantes, como resistividade e tratamento químico do solo, hastes metálicas e os fatores que interferem na resistência de terra;
- Segunda: Experimentação e a aquisição das medidas da resistência de terra de duas formas de aterramento, onde duas hastes metálicas são enterradas no solo, e mantidas pelo mesmo período de tempo. Em uma situação, a haste é introduzida ao solo de forma convencional, e em outra com o mesmo tipo de haste, porém com a presença de um material retentor de água (esferas em gel que inflam na presença de umidade, absorvendo líquido).
- Terceira: Apresentação dos resultados, comparação das duas situações e observações das possíveis influências climáticas nos valores de resistividade, a partir de planilhas gráficas referente aos valores experimentais medidos e coletados.
- Quarta: Conclusão, apresentando a verificação do método não convencional testado, descrição das vantagens e desvantagens de cada uma, e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta os aspectos e conceitos teóricos, referentes aos equipamentos e materiais, cabíveis à compreensão plena deste trabalho.

2.1 Sistemas de aterramento elétrico

A instalação de um sistema de aterramento deve estar presente em qualquer instalação elétrica de média tensão, trata-se de uma garantia de segurança e uma exigência da NBR 14039, norma técnica brasileira de média tensão. Além de proteger pessoas e as próprias instalações, estão entre as intenções: a melhoria da qualidade dos serviços e estipulação de um referencial de tensão para a instalação. Com isso pode-se atribuir ao aterramento uma classificação relacionada à sua função (CUNHA, 2003):

- Aterramento funcional: tem o objetivo de proporcionar o funcionamento adequado da instalação. É o aterramento de um condutor vivo, geralmente o neutro;
- Aterramento de proteção: tem o objetivo de proteger contra choques por contatos indiretos. É o aterramento de massas, carcaças metálicas e elementos condutores estranhos à instalação;
- Aterramento para trabalho: tem o objetivo de proporcionar segurança para execução de determinados trabalhos. Consiste em aterrar uma parcela do circuito, que é normalmente submetida a uma tensão, mas necessita ser posta sob ausência de tensão por um período determinado, é um aterramento temporário.

Os sistemas de aterramento no geral, precisam ser projetados de forma que haja uma ligação adequada com a terra, levando em conta a importância do sistema de energia envolvido, o local e o custo. Os principais tipos 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 enterrados ao solo e, a mais eficiente, malha de terra (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 2011).

O valor da resistência de terra quase sempre ultrapassa os limites mínimos para alta resistividade aparente do solo em malhas de terra de pequenas dimensões geométricas (MAMEDE, 2010). Para obter o valor da resistência da malha de terra correspondentes a condutores horizontais, utiliza-se a Equação 1.

$$R_{mc} = \frac{\rho_a}{4 \times R} + \frac{\rho_a}{L_{cm}} (\Omega) \quad (1)$$

Onde:

R_{mc} - resistência da malha de terra

R - raio do espaço destinado a malha de terra

ρ_a - resistividade aparente do solo

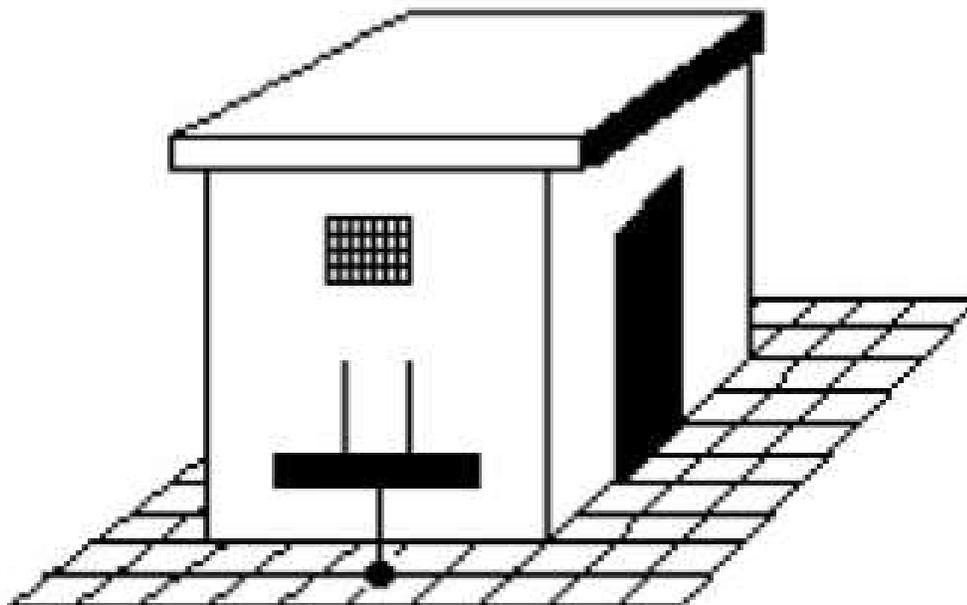
L_{cm} - comprimento do condutor da malha de terra

2.2 Eletrodos de aterramento

Os eletrodos devem ser resistentes a solicitações térmicas, termomecânicas e eletromecânicas, além de possuir uma robustez ou proteção mecânica contra influências externas. A condutividade elétrica é obviamente essencial para desempenhar a sua função em uma instalação de aterramento, sendo importante não oxidar com o solo, para manter suas propriedades durante um longo período de tempo (CLUNK, 2013).

De acordo com Cunha (2003), um condutor ou um conjunto de condutores enterrados ao solo para a ligação com a terra é denominado eletrodo de aterramento convencional: este deve constituir um anel circundando a edificação, devem ser adequados com as características do solo e ao valor de resistência de terra exigido (calculado ou medido). Existem também os eletrodos classificados como naturais, os quais não são instalados com a função de aterrar, como os profissionais da área de engenharia civil que realizam o projeto dos eletrodos naturais com o foco apenas nas estruturas da construção. Os mais usados são de armaduras de aço embutidas no concreto das edificações, com características elétricas excelentes, apresentando baixa resistência de aterramento, podendo constituir o sistema de proteção contra descargas atmosféricas (aterramento e gaiola de faraday). Há também eletrodos de aterramento para subestação de média tensão, que também deve constituir um anel no perímetro da edificação, e faz parte de um sistema de aterramento que protege contra choque elétrico por contato indireto. A Figura 1 ilustra a utilização do eletrodo de aterramento em malha para uma subestação.

Figura 1 - Malha de aterramento e uma subestação



Fonte: Cunha, 2003

2.3 Resistividade do solo

O solo é mau condutor de eletricidade, podendo ser isolante na ausência total de umidade. Possui resistividade muito alta, enquanto condutores comuns como cobre e alumínio possuem valores na ordem de $10^{-8} \Omega \cdot m$, os solos mais comuns variam de 5 a 20000 $\Omega \cdot m$. A resistividade do solo é a resistência elétrica de um cubo de terra de faces unitárias, sua unidade é “ $\Omega \cdot m$ ”. A relação entre resistência elétrica (R) e resistividade (ρ) está descrita na Equação 2, definida pelo valor da resistividade que multiplica a divisão da aresta (l) pela área (A) (VISACRO, 2002).

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (2)$$

Para um projeto de aterramento, conhecer as características do solo previamente é primordial (MAMEDE, 2010). Os fatores que influenciam a resistividade do solo são: tipos de solo, umidade, concentração e tipos de sais dissolvidos na água, compactidade do solo, granulometria do solo, temperatura.

2.3.1 Tipo de solo

Para Belchior (2014), o tipo de solo está entre os principais fatores que contribuem para característica da resistividade. A Tabela 1 mostra os tipos de solo e suas respectivas resistividades.

Tabela 1- Solos e suas resistividades respectivas

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 (2011).

Os solos têm capacidades de retenção de cátions, e a troca destes ocorre devido à características específicas, como texturas, propriedades físicas, conteúdo de matéria orgânica, e teores de argila. Os que contém mais argila retém mais cátions, já nos arenosos ocorre a percolação de água com mais rapidez, pois são mais macroporosos. As diferenças de resistividade entre os tipos de solo acontecem pelos seguintes fatores: saturação, porosidade, tamanho e formato dos sólidos que constituem, espessura e composição da camada de cátions dos argilominerais. Em uma análise sem variação da umidade, sabe-se que solos com teor superior de argila possuem uma facilidade maior de propiciar a passagem de corrente elétrica, ao contrário de solos arenosos em que a resistividade é maior (BECEGATO & FERREIRA, 2005).

2.3.2 Umidade

Clunk (2013) destaca que o índice de umidade é um dos responsáveis pela resistividade do solo. As variações de resistividade por umidade são causadas devido à condução de cargas elétricas ser predominantemente iônica. Quanto mais úmido o solo, maior a facilidade da passagem de corrente iônica, contribuindo para a dissolução dos sais que o compõem. Com isto, na presença de diferentes concentrações de umidade ao longo de sua extensão, haverá variação nos valores de sua resistividade. A Tabela 2 mostra a influência da umidade do solo nos valores de resistividade em um solo arenoso:

Tabela 2- Relação entre umidade e resistividade.

Índice de umidade (% por peso)	Resistividade
0,0	10.000.000
2,5	1.500
5,0	430
10,0	185
15,0	105
20,0	63
30,0	42

Fonte: Kindermann e Campagnolo (2011).

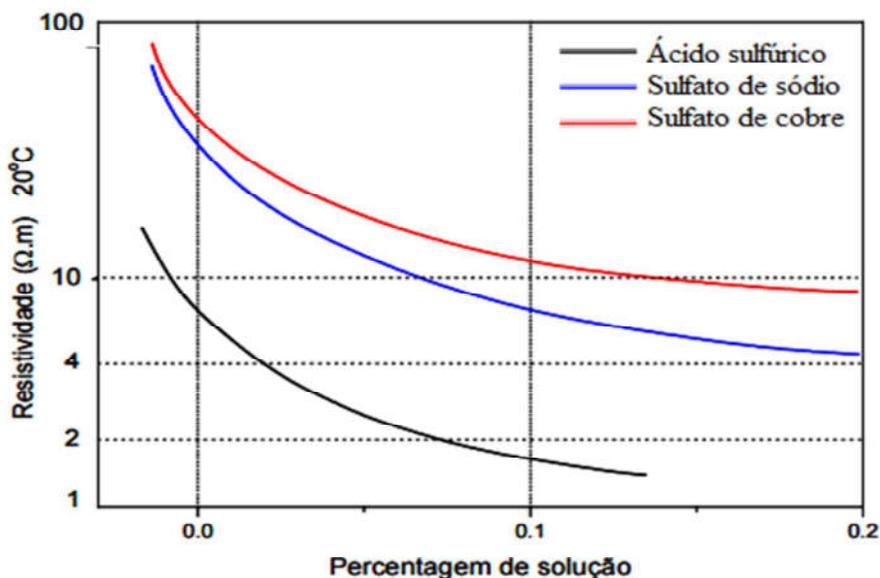
A umidade do solo será afetada pelo clima, conseqüentemente os valores de resistividade também. Os períodos secos e chuvosos de um local irão interferir na qualidade do aterramento, que serão melhores quando o solo estiver úmido, e piores em períodos de seca (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 2011).

2.3.3 Concentração de sais no solo

Os sais presentes no solo é um fator que influencia na resistividade. A água pura sem sais possui resistividade quase infinita, sendo um isolante, pois seria impossível a corrente elétrica, já que não haveria ionização. A areia é carente em sais minerais, com isto se houver adição de água destilada, pode-se notar que a resistividade varia pouquíssimo já que há falta de condições para o processo de eletrólise (TUMA, 2005).

O Gráfico 1 exibe os efeitos da concentração de ácido sulfúrico, sulfato de sódio e sulfato de cobre. As curvas mostram que em menores concentrações de sais ou ácidos haverá maiores índices de resistividade.

Gráfico 1- Resistividade em relação à concentração de sais.



Fonte: Tuma, 2005

2.3.4 Compacidade e granulometria do solo

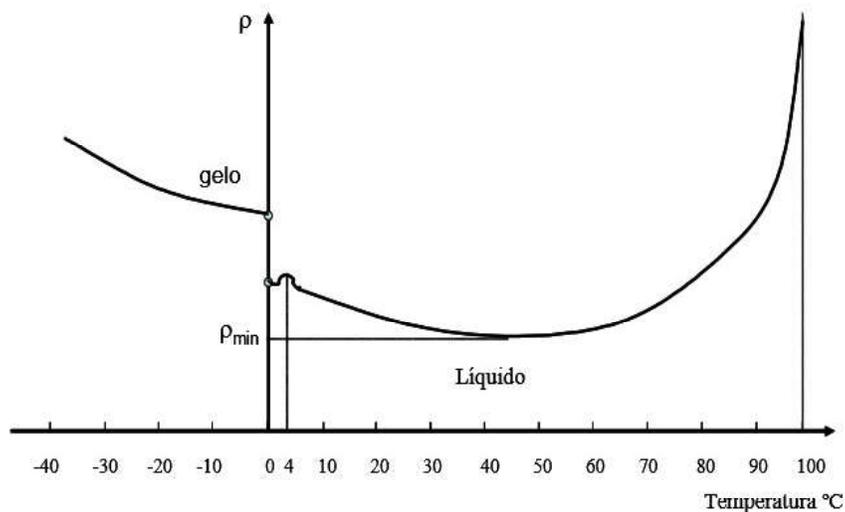
A compacidade será um fator que definirá a continuidade física do solo, quanto mais compacto mais contínuo fisicamente, contribuindo para um baixo valor de resistividade. Já a granulometria, além de interferir na continuidade física, também é um parâmetro influente na capacidade de retenção líquida. Se um solo é composto por grãos de tamanho maior a resistividade será maior também, já que o contato entre os grãos adjacentes é menor. A presença de grãos de dimensões diversas propicia a diminuição da resistividade, pois os espaços vazios entre os grãos grandes serão preenchidos pelos grãos pequenos, havendo uma massa de solo com maior continuidade (FLORES, 2014).

2.3.5 Temperatura

Existem dois aspectos que explicam o modo com que a temperatura do solo influencia na resistividade. O primeiro mostra que, conforme a temperatura local aumenta, há

maior evaporação da água contida no solo, desfavorecendo a umidade. O segundo, diz que a resistividade cresce com a diminuição da temperatura, considerando que a água contida no solo possui um grande coeficiente negativo de temperatura (LIMA, 2008). Este comportamento pode ser visto pela curva de resistividade versus temperatura da água, no Gráfico 2.

Gráfico 2- Curva da resistividade, da água e temperatura.



Fonte: TUMA, 2005.

2.4 Resistência de terra

Um aterramento pode ser considerado satisfatório quando se tem baixa resistência de terra, possibilitando a circulação de uma corrente elétrica para uma terra circunvizinha. É considerada condenável uma resistência de terra superior a trinta ohms (30Ω), sendo valores entre este e cinco ohms (5Ω) classificados como razoáveis, e excelentes os inferiores à cinco ohms (5Ω). Os fatores que definem o valor da resistência de terra são: a resistividade do solo, a profundidade das hastes do sistema e a qualidade do material das hastes. Para obter a melhor resistência de terra utilizam-se métodos de aprofundamento das hastes, aumento da quantidade de hastes, tratamento do solo e aumento da área das próprias hastes (BELCHIOR, 2014).

O valor da resistência de aterramento se dá através da relação entre a tensão resultante no eletrodo e a corrente aplicada no solo. Existem três componentes de suma importância para a resistência de um aterramento oferecida à uma corrente elétrica (VISACRO, 2002):

- A própria resistência dos eletrodos e ligações elétricas que possuem valor muito baixo devido à constituição de metais altamente condutivos;
- A resistência de contato entre solo e eletrodo;
- A resistência de terra circunvizinha, que define o valor da resistência e depende principalmente da resistividade do solo e da corrente vinda do eletrodo, devido à sua forma e tamanho.

2.4.1 Medição de resistência de terra e resistividade do solo

Em 2009 foi publicada a ABNT NBR 157549 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento, que determina os métodos de medição de resistência de terra e de potenciais superficiais do solo. Para fins de segurança e pesquisa, os ensaios de campo são eficazes para obtenção dos valores de resistência da haste de terra, potenciais de passo e de toque para projetos. Essas medições tem como finalidade verificar a eficiência do eletrodo em sua função no sistema de aterramento, detectar tensões superficiais de risco e estabelecer o potencial do sistema de aterramento relacionado ao terra de referência. A medição da resistência de aterramento pode ser feita pelo método da queda de potencial, que é realizado com a utilização do terrômetro e queda de potencial com injeção de alta corrente. Além destes, foram normalizados os métodos: síncrono à frequência industrial; o do batimento; o de injeção de corrente com amperímetro, voltímetro e wattímetro adicional; e os alternativos de medição com instalações energizadas. Independentemente do método escolhido, há regras de segurança a serem seguidas, como as relacionadas com vestimentas e aos aparelhos que devem ser utilizados (MODENA & SUETA, 2011).

A medição da resistividade do solo pode ser efetuada por amostragem ou por medição local. A primeira acontece a partir de uma amostra de solo que é medida em laboratório, a medição local já acontece em uma determinada região do solo em que se deseja saber a resistividade, com a imposição de sinais eletromagnéticos utilizando eletrodos e assim obtendo os potenciais do local (VISACRO, 2002).

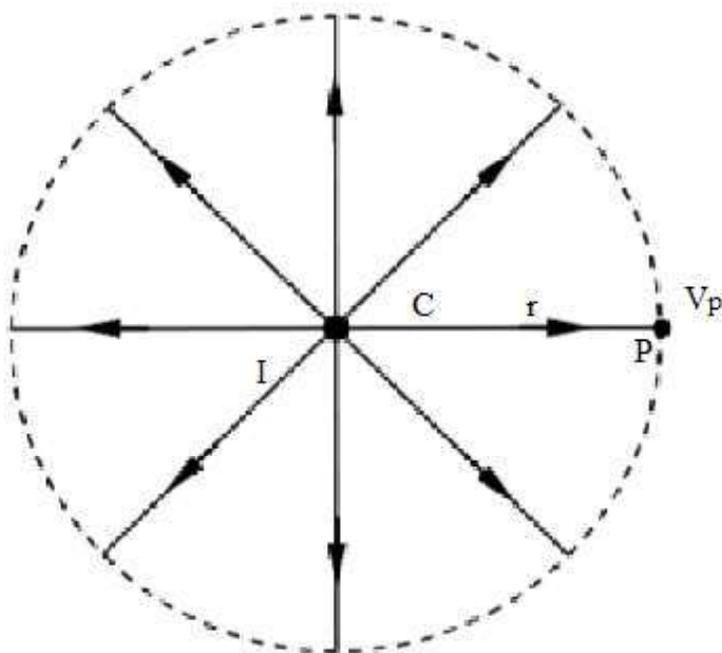
2.4.1.1 Medições no local do sistema de aterramento

Primeiramente deve-se realizar a escolha do local de implantação do aterramento que depende da disposição dos equipamentos do sistema elétrico envolvido. Para uma subestação devem ser analisados: o centro geométrico de cargas; a disponibilidade e custo do

terreno; a segurança da população próxima ao terreno e também a garantia de que não ocorra inundações no local. Após definir o local é necessário conhecer a resistividade aparente para fazer o projeto, sabe-se que conforme a área do local aumenta, as camadas de solo mais profundas são atingidas pelas correntes de dispersão (KINDERMANN & CAMPAGNOLO, 2011). A ocorrência da dispersão das correntes, pode ser compreendida com a análise dos conceitos de “potencial em um ponto” e de “potencial em um ponto sob a superfície de um solo homogêneo”:

- **Potencial em um ponto:** Considera-se um ponto “C” que emana uma corrente elétrica sob um solo homogêneo e infinito, como representado na Figura 2, esta corrente possui um fluxo radial. Pela lei de Ohm, é possível definir o campo elétrico no ponto “p” (equação 3) em relação a sua densidade de corrente (J_p) no mesmo ponto, onde ρ representa a resistividade.

Figura 2- Dispersão radial da corrente.



Fonte: Kindermann & Campagnolo, 2011.

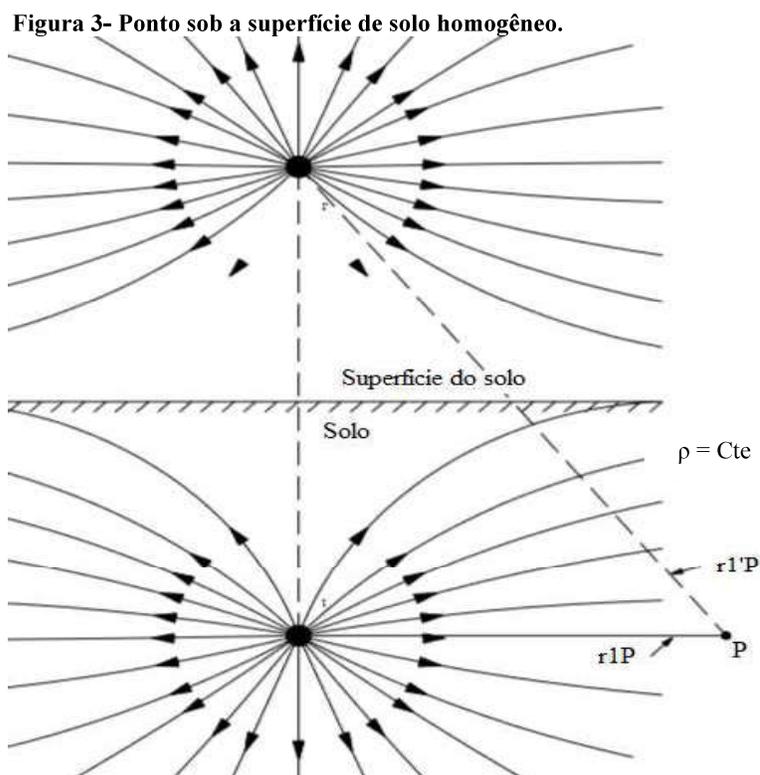
$$E_p = \rho \cdot J_p \quad (3)$$

Segundo Edminister (2006) tem-se a densidade de corrente dada pela Equação 4, para superfície simétricas na configuração de cargas. Havendo a possibilidade de saber o potencial do ponto p (equação 5), integrando o campo elétrico (E_p) em relação ao raio (r).

$$J_p = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (4)$$

$$V_p = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r} \quad (5)$$

- Potencial em um ponto sob a superfície de um solo homogêneo: considera-se a presença de uma fonte de corrente pontual simétrica a superfície do solo representada pela Figura 3. Possibilitando a obtenção do potencial no ponto p através da duplicação da Equação 6, analisando assim o efeito de cada fonte de corrente por meio da superposição.



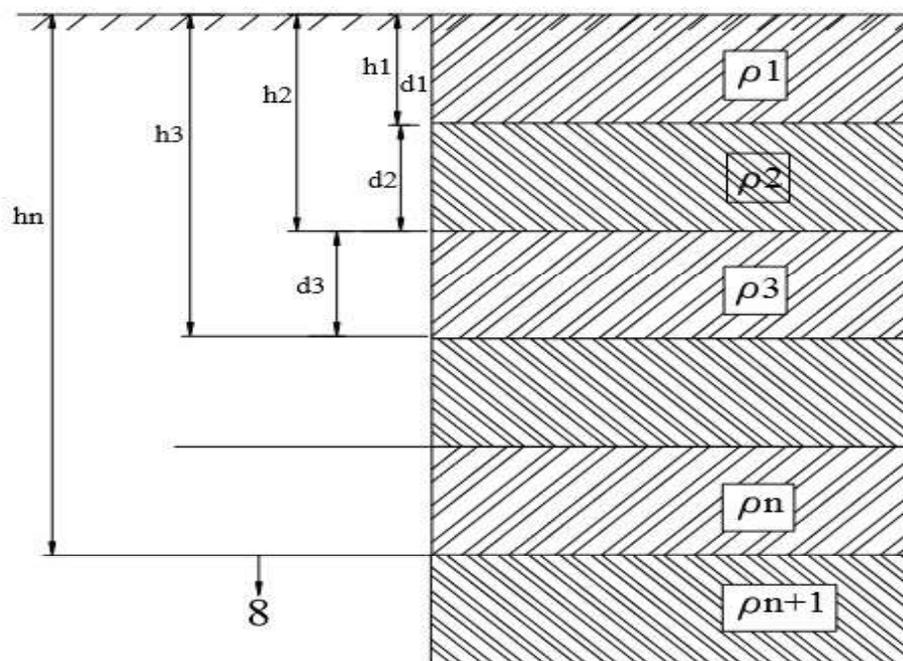
Fonte: adaptado de Kindermann & Campagnolo, 2011.

$$V_p = \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r_{1p}} + \frac{\rho \cdot I}{4 \cdot \pi \cdot r'_{1p}} \quad (6)$$

2.4.1.2 Influência da estratificação do solo

De acordo com Kindermann & Campagnolo (2011) a maioria dos solos não possuem características de homogeneidade, sua formação é constituída de camadas com resistividades específicas a cada nível de profundidade. A ocorrência dessas camadas paralelas à superfície do solo se dá a partir da sua formação geológica. Existem casos menos típicos em que há falhas nesta disposição da camada, com inclinações ou até mesmo serem verticais. É possível obter um modelo matemático de duas partes horizontais do solo com informações de resistividade e da altura correspondentes a cada uma, como visto na Figura 4. Isto é possível graças aos conceitos de eletromagnetismo e medidas obtidas com o método de Wenner ou método dos quatro pontos (explicado no próximo tópico).

Figura 4- Modelo matemático do solo



Fonte: Kindermann & Campagnolo, 2011

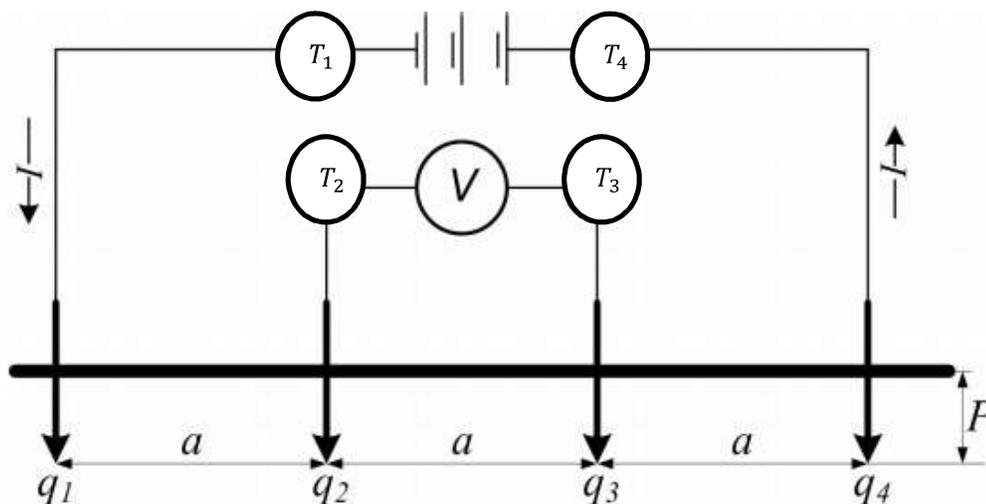
Tendo em vista estas diferenças de resistividade ao decorrer da profundidade de um solo, no estudo de um terreno para aterramento é necessário aproximá-lo a um modelo equivalente, definindo suas peculiaridades. Para realizar o projeto de uma malha de terra e obter o valor da resistência de aterramento adequado, é comum para solos heterogêneos o uso da estratificação por duas camadas com suas respectivas resistividades e alturas definidas, sendo que, quanto maior o número de camadas, maior a complexidade (RAGGI, 2009).

2.4.1.3 Método de Wenner

O método de Wenner, descrito neste tópico, é baseado na norma ABNT NBR 7117/1981 que tem o objetivo de estabelecer as condições adequadas para as medições de resistividade pelo método dos quatro pontos. Esta forma de obtenção de resistividade do solo se dá com a cravação de quatro hastes no solo com as mesmas profundidades (p) e distâncias (a) iguais entre si, como ilustrado na Figura 5. Uma corrente I é fornecida na haste q_1 causando um potencial nos pontos q_2 e q_3 e com isto a resistividade é definida pela Equação 7, onde R é a resistência ôhmica fornecida pelo medidor.

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{I + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4a^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + p^2}}} \quad (7)$$

Figura 5- Disposição das hastes para método de Wenner.



Fonte: CALIXTO et al, 2014

A medição de R (Ω) pode ser feita com um instrumento denominado terrômetro, que possui dois terminais de corrente e dois terminais de potencial, ou por meio de voltímetro e amperímetro. A fórmula da resistividade pode ser reduzida a Equação 8 quando a distância entre as hastes é maior que vinte vezes o tamanho da profundidade.

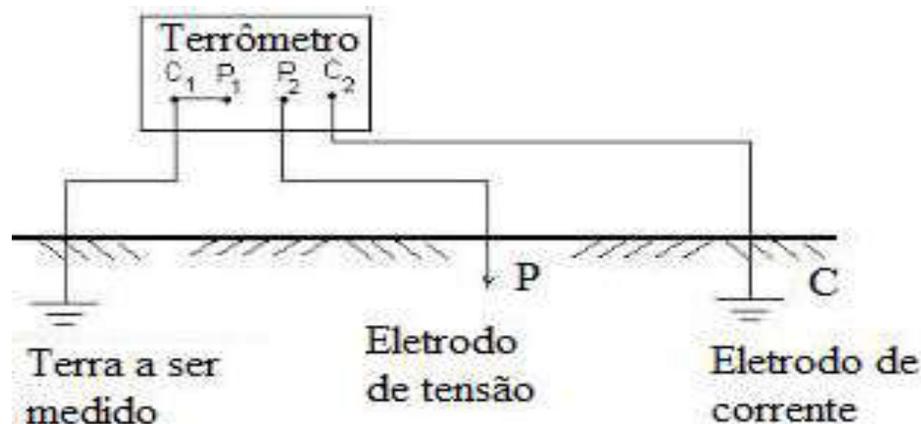
$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (8)$$

Para eficiência da medição, esta norma possui algumas recomendações referentes a profundidade da cravação dos eletrodos e do espaçamento entre eles. A introdução dos eletrodos ao solo deve ser profunda o suficiente para garantir o contato, e em caso de solos arenosos pode-se utilizar panos molhados. As distâncias entre os eletrodos podem variar de 1 metro a 64 metros (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 metros), ou até mesmo distâncias superiores.

2.4.1.4 Resistência a partir de uma haste vertical aterrada

Para o estudo de um aterramento de uma haste vertical, pode-se utilizar o terrômetro com três entradas, representado pelo esquema da Figura 6, para coletar a resistência considerando a resistividade da terra que a circunvizinha.

Figura 6- Esquema de ligação do terrômetro.



Fonte: Adaptado de WALENIA, 2008

De acordo com Mamede (2010), os conectores C1 e P1 são ligados à um eletrodo da periferia do sistema de aterramento em análise, ou simplesmente a haste a ser medida. Os outros dois eletrodos auxiliares devem estar colocados no solo, alinhados, de forma que: o eletrodo C, esteja à uma distância onde a densidade de corrente, que flui do subsolo, não exista ou seja aproximadamente zero, sendo esta, no mínimo, equivalente ao comprimento da haste. O eletrodo P, deve estar no ponto médio entre o C e a haste da instalação. O terminal C1 injeta uma corrente no solo que retorna ao terrômetro pela entrada C2, através do eletrodo auxiliar C. Assim ocorrem potenciais entre o eletrodo de tensão P e a haste de terra a ser medida, o instrumento processa essas informações de tensão e corrente, gerando o valor da resistência.

Recomenda-se que as hastes auxiliares tenham cerca de 20 cm de sua extensão introduzidas ao solo, e posicionadas com 2,4,8,16 ou 32 metros de espaçamento uma da outra.

A densidade de corrente no solo, se distribui dependendo da dimensão e forma do condutor, com isto pode-se determinar a resistência de aterramento através de um eletrodo vertical, $R_{el} (\Omega)$, pela equação (9). Onde, os parâmetros da fórmula são: $\rho (\Omega)$, a resistividade do solo, L_h (m), o comprimento da haste cravado na terra e D_h (m), o diâmetro da haste.

$$R_{el} = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L_h} \cdot \left(\ln \left(\frac{4 \cdot L_h}{D_h} \right) - 1 \right) \quad (9)$$

Cotrim (2003) observa nesta expressão que, quanto maior o comprimento da haste introduzida ao solo, menor a resistência. Já o diâmetro, tem pouca influência visto que a resistência depende do seu logaritmo.

2.4.2 Tratamento químico do solo

Quando o número de barras de aterramento é aumentado e mesmo assim não exerce sua função de diminuir a resistência de terra, é preciso utilizar outro método. Sendo a última opção o tratamento químico do solo. É considerado o último recurso pois os elementos introduzidos no solo para realização do tratamento, são absorvidos com o passar do tempo. Essa solução passa a não ser eficaz, pois após a absorção dos elementos químicos, a resistência de terra retorna valores mais altos prejudicando o sistema de aterramento (CAPELLI, 2000). Deve-se aplicar esta ação de tratar o solo quimicamente, apenas quando já existe o aterramento implantado com resistência indesejada, e em casos em que não se pode trocar o local do sistema.

Kindermann e Campagnolo (2011) afirmam que os materiais utilizados para diminuir resistividade do solo devem: possuir boa capacidade de absorção de água; não ser lixiviável; não ser corrosivo; possuir um baixo valor de resistividade elétrica; ser estável quimicamente no solo; não possuir componentes tóxicos e nenhuma característica que cause danos ao meio ambiente. Após a execução de qualquer tipo de tratamento do solo para correção de resistência de terra, são necessárias medições periódicas para checar a estabilidade do tratamento. A bentonita, uma substância argilosa usada com adição de gesso, o earthron líquido com componente da polpa de madeira acrescido de um agente geleificador e sais inorgânicos, e o gel, composto de sais e água, são os produtos mais comuns utilizados para este fim.

2.4.2.1 Particularidades do método alternativo testado

O tratamento do solo local do aterramento de uma haste vertical, também pode ser realizada, alterando-se alguns materiais comuns do aterramento e adicionando outros:

- As britas normalmente usadas em aterramento, são de basalto, estas podem ser trocadas pelas britas de calcário, com uma composição capaz de alterar propriedades químicas do solo. Segundo a Fundação das Indústrias do Estado do Paraná (2013), o calcário é um composto fortemente básico e de baixa solubilidade, além de aumentar a capacidade de trocas de cátion no local onde ele se encontra. As britas de basalto são originárias do grupo de rochas ígneas, também chamadas de magmáticas, originadas do interior da crosta terrestre, da solidificação do magma. Estas apresentam porosidade máxima de 1,5 %, enquanto as rochas sedimentares, grupo que abrange o calcário, tem índice maior, com valor máximo de 5% (HOEK, 2000).
- Utilização de cristais absorventes de líquido em contato com o solo ao redor da haste aterrada. Este material também chamado de *crystal ice*, é revestido por uma membrana semi-permeável que, quando mergulhados em solução líquida durante 3 horas, retêm água chegando ao seu volume máximo (PONTO CIÊNCIA, 2009). Quando as esferas hidratadas são colocadas ao redor da haste sobre o solo, perdem líquido para o local pelo processo de osmose. Com isto tem-se a alteração na umidade da terra circunvizinha do eletrodo, um parâmetro que influencia na resistividade.
- Com a necessidade de hidratar os cristais frequentemente, além da água natural da torneira, pode-se adicionar água sanitária, de fácil acesso, amplamente comercializada como produto de limpeza e de baixo custo. (INMETRO, 2018) Além disso, é um composto químico de hipoclorito de sódio, que contém cerca de 2 a 2,5% de cloro, sendo eficaz no combate ao desenvolvimento de fungos e bactérias.

3 METODOLOGIA DE EXPERIMENTAÇÃO

Esta seção descreve a experimentação realizada, ferramentas utilizadas e a coleta de dados para o estudo do método alternativo de aterramento elétrico, e seus possíveis fatores de influência.

3.1 Local do experimento

A implantação dos dois sistemas de aterramento foi realizada nas proximidades da quadra de esportes da UTFPR- Campus Cornélio Procópio, como mostra a Figura 7.

Figura 7- Os dois aterramentos instalados



Fonte: Autoria própria

No capítulo 3, fundamentação teórica, observou-se que, cada tipo de solo possui um teor de argila, sais, compactidade, granulometria, porosidade, estrutura entre outros fatores que influenciam na sua resistividade característica, e conseqüentemente na resistência de terra. Buscou-se então, conhecer os tipos de solo da região da experimentação, visando contribuir para a análise dos resultados deste trabalho.

a rocha, chega à 50 cm no máximo. O último possui minerais primários e material superficial apoiado sobre rocha.

3.2 Descrição da instalação dos sistemas de aterramento

Foram aterradas duas hastes de aterramento de aço zincado, de diâmetro 3/4” e de 2,4 metros de comprimento cada uma, de forma que sua extremidade ficasse 30cm exposta para medição, ou seja 2,1 metros do eletrodo sob a superfície do solo. Devido aos cuidados com as influências de dispersão de corrente no solo, as duas hastes foram colocadas a uma distância próxima de 4,3 m uma da outra, sendo maior que a sua profundidade aterrada. Nas duas, foram usadas caixas de concreto quadradas com dimensões iguais, sendo a aresta externa de 35 cm e a interna de 27 cm, com aberturas circulares laterais.

Na primeira instalação, Figura 9, foi utilizada uma camada de britas de basalto cobrindo o solo, por dentro da caixa como usualmente são feitos os aterramentos.

Figura 9 - Haste convencionalmente aterrada



Fonte: Autoria Própria

Na segunda instalação, Figura 10, foram utilizadas britas de calcário, e foi colocado uma camada de isopor revestindo as laterais interiores da caixa de inspeção, inclusive a tampa, com o intuito de manter por mais tempo a umidade ao redor da haste.

Figura 10- Segunda instalação sem os cristais absorventes de líquido



Fonte- Autoria própria

Em seguida, colocou-se os cristais retentores de líquido previamente hidratados, constituindo uma grossa camada cobrindo até a extremidade da haste, exibido na Figura 10. Foi necessário hidratar do material quando percebia-se que o volume das esferas havia diminuído. Esta hidratação consistia em retirar os cristais, da instalação e mergulhá-los em uma solução de água misturada com água sanitária, conforme visto no item 3.4.2.1.

Figura 11- Segunda instalação com os cristais absorventes de líquido



Fonte- Autoria própria

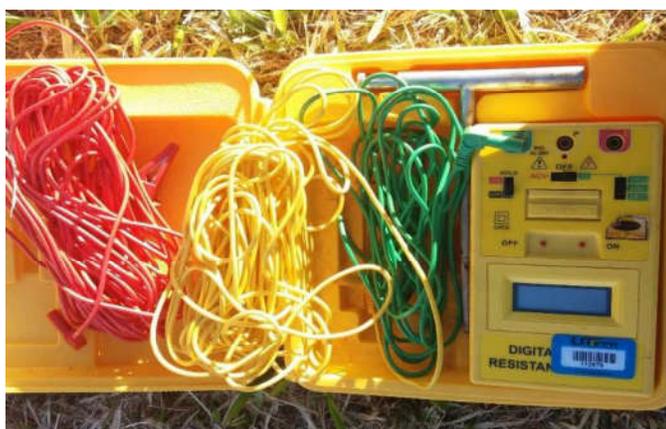
3.3 Coleta e tratamento de dados

Esta etapa da experimentação consistiu em medições de resistência de terra nas duas instalações, realizadas com um terrômetro, por volta das 16 horas diariamente, durante março e abril de 2018. Para a posterior análise das variações das medidas, e observações do comportamento da resistividades em relação ao clima, foram coletados os dados de: umidade do ar, radiação, chuva e temperaturas (máximas, mínimas e instantânea) fornecidos pelo INMET – Instituto Nacional Meteorológico.

3.3.1 Obtenção das resistências de aterramento

Através das medidas da resistência de aterramento, cria-se um banco de dados, resultando em um histórico do comportamento da instalação, viabilizando a identificação e resolução de problemas de instalação elétrica de estabelecimentos em casos de danos devido à algum acidente, sobre carga do sistema ou outros motivos (WALENIA, 2008). Neste trabalho foi utilizado um terrômetro digital de três entradas. Assim, não sendo possível realizar o método de Wenner, que exige quatro hastes aterradas, sendo necessário um medidor de quatro entradas. O instrumento usado é mostrado pela Figura 12, com três cabos de cores verde, amarelo e vermelho.

Figura 12 - Terrômetro fornecido pela Universidade



Fonte: Autoria própria

A realização da medição para cada haste ocorreu conforme as regras sobre o uso do terrômetro explicadas no item 3.4.1.4. As etapas a seguir descrevem o procedimento realizado:

- 1ª etapa: Seleção da escala. Visto que o aparelho oferece a opção de selecionar as escalas de 20 Ω , 200 Ω e 2k Ω , e considerando as dimensões da instalação, estimou-se a escala a ser utilizada no aparelho de 200 Ω , possibilitando medir valores superiores a 20 Ω .
- 2ª etapa: Colocação dos eletrodos auxiliares. Observando o ambiente da instalação, considerando a acessibilidade e ausência de obstruções do local, foi escolhido o ponto onde cada eletrodo auxiliar (Figura 13) devia ser instalado. Foram introduzidos ao solo de forma alinhada, com 18 cm de comprimento sob o solo, e 2 centímetros expostos para a conexão dos cabos. O primeiro foi colocado à uma distância de 2 metros, e a segundo à 4 metros, da haste aterrada, conforme na Figura 14.

Figura 13- Eletrodo auxiliar para medição com o Terrômetro

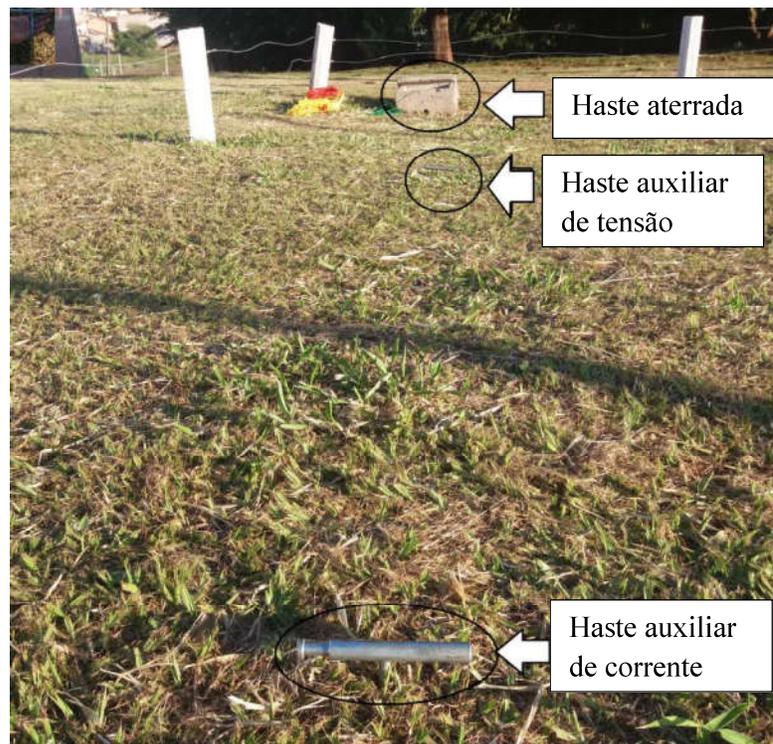


Fonte: Autoria própria

- 3ª etapa: Conexão dos cabos. Após a colocação dos eletrodos auxiliares, seguiu-se para a etapa de conexão do terrômetro à instalação. A haste de aço-zincado aterrada foi ligada, pelo cabo verde, à entrada E do equipamento. O primeiro eletrodo auxiliar, foi ligado à entrada P do equipamento, pelo cabo amarelo. O cabo vermelho, conectou o último ao ponto C do aparelho medidor.

Após a finalização da medição da haste de aterramento convencional, esta foi desconectada do equipamento, os cabos e hastes auxiliares foram devidamente limpos e guardados dentro da caixa do terrômetro. Repetiu-se o processo na segunda instalação (Figura 15).

Figura 14 - Eletrodos auxiliares colocadas no solo



Fonte: Autoria própria

Figura 15-Medição da instalação com tratamento



Fonte: Autoria própria

Foram seguidas as instruções de segurança básicas, sugeridas por Mamede (2010, p.421) “evitar medições sob condições atmosféricas adversas” devido à possibilidade de raios. Nos dias de muita chuva não foi realizada a medição, montando-se a tabela de dados foi considerado a resistência do dia anterior; “uso de calçados e luvas” e “evitar a presença de

animais e pessoas alheias ao serviço”. Obtiveram-se 30 valores de resistência de terra no mês de março, e 31 no mês de abril, para cada uma das instalações (APÊNDICE A).

3.3.2 Obtenção dos dados climáticos

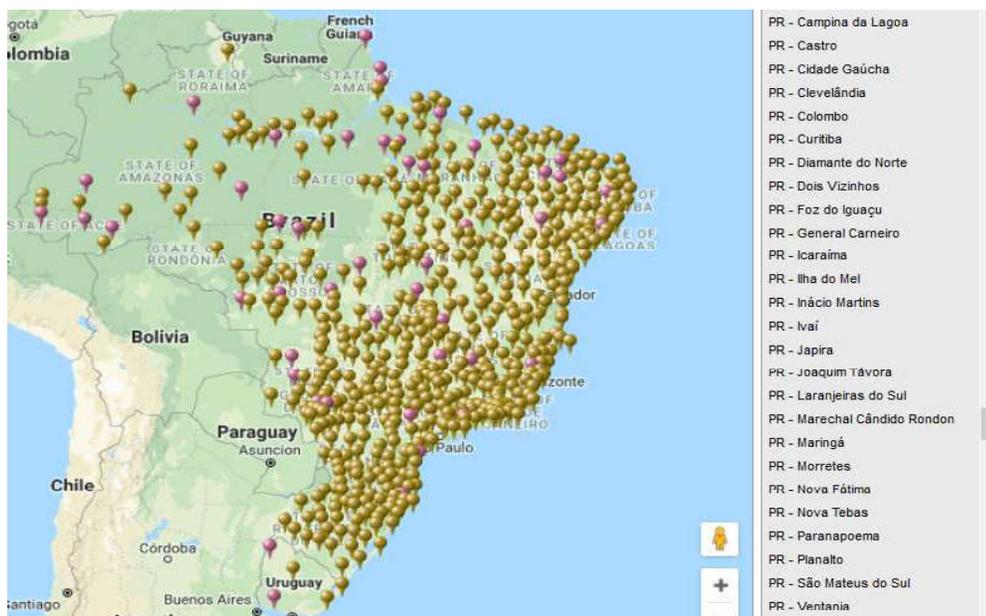
Os dados climáticos, foram obtidos da Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), situada na cidade de Nova Fátima, região de Cornélio Procópio, cerca de 30 km do local do experimento. (INMET, 2018) O funcionamento de uma estação meteorológica automática (EMA) é descrita como um sistema que:

(...) coleta, de minuto em minuto, as informações meteorológicas (temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos, radiação solar) representativas da área em que está localizada. A cada hora, estes dados são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, via satélite ou telefonia celular, para a sede do INMET, em Brasília. O conjunto dos dados recebidos é validado, através de um controle de qualidade e armazenado em um banco de dados.

A Figura 16, contém a disposição das estações presentes no plano do território brasileiro, sendo que este *site* fornece dados das cidades de todos os estados do Brasil que possuem uma estação instalada. Os municípios paranaenses que possuem uma EMA, podem ser vistos na lateral direita da imagem.

O Inmet possibilita a escolha do período em que se deseja obter os dados. Selecionou-se então, do primeiro dia de março ao último dia de abril, intervalo de tempo referente ao período de medição. Foram coletados os índices de: temperatura instantânea, temperaturas máximas e mínimas do ar, a umidade relativa máxima e mínima do ar, a radiação solar e a precipitação. Visto que são fornecidos para cada hora do dia, durante dos dois meses escolhidos, totalizando 1464 dados para cada parâmetro. Foi criada uma pasta de planilha de dados para cada mês, possibilitando posteriormente, a montagem dos gráficos para a análise de resultados. Na primeira coluna das planilhas, foram colocados os valores de temperaturas para o horário da medição (16 horas). Utilizando uma função de pesquisa e referência, foi possível localizar o valor da temperatura das quatro horas da tarde, sem a necessidade de uma procura manual. A Figura 17 mostra como foi utilizada esta ferramenta, este valor (16) do primeiro dia do mês, definido por “março01”, e o número 2 se trata da segunda coluna onde estão os valores da temperatura de cada hora nomeada “Inst”, de instantânea.

Figura 16- Estações Meteorológicas Automáticas do Brasil



Fonte: INMET, 2018

Figura 17- Uso do PROCV no Excel

=PROCV(16;março01;2;0)											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Data	Horário	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Umidade (%)	Radiação	Chuva		
2		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	(kJ/m²)	(mm)	Data (Março 2018)	Temperatura às 16:00 hrs
3	01/03/2018	0	20.7	21.6	20.7	86	79	-3.54	0	1	28,50
4	01/03/2018	1	21	21.1	20.5	87	85	-3.52	0	2	29,30
5	01/03/2018	2	20.9	21.3	20.3	91	84	-2.99	0	3	29,20
6	01/03/2018	3	20.5	20.9	20.1	91	87	-2.61	0	4	29,20
7	01/03/2018	4	20.4	20.5	19.9	92	88	-3	0	5	30,30
8	01/03/2018	5	19.8	20.4	19.7	95	90	-2.73	0	6	31,30
9	01/03/2018	6	19.7	21.1	19.6	97	85	-1.22	0	7	29,40
10	01/03/2018	7	19.6	19.9	19.6	98	96	-2.89	0	8	25,50
11	01/03/2018	8	19.7	19.9	19.3	99	97	-2.5	0	9	27,60
12	01/03/2018	9	19.7	19.8	19.6	98	96	-2.26	0	10	28,20
13	01/03/2018	10	20.2	20.2	19.7	96	93	68.04	0	11	29,60

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros foram organizados em colunas, sendo uma linha para cada dia, disponíveis nos APÊNDICES C e D. Assim, para os valores de temperatura máxima e mínima foram coletados no intervalo de 24 horas, utilizando apenas o maior e o menor valor de temperatura do dia. Estes mesmos procedimentos foram utilizados para os parâmetros de umidade máxima e mínima, e para a radiação e a chuva, foi calculado o valor médio, das horas de cada dia. Com estes dados organizados foram gerados gráficos mensais, com os valores diários para cada parâmetro, no *Matlab*.

4 RESULTADOS

Esta seção contém os cálculos realizados e os gráficos obtidos com a análise dos resultados da experimentação de aterramento dos dois eletrodos.

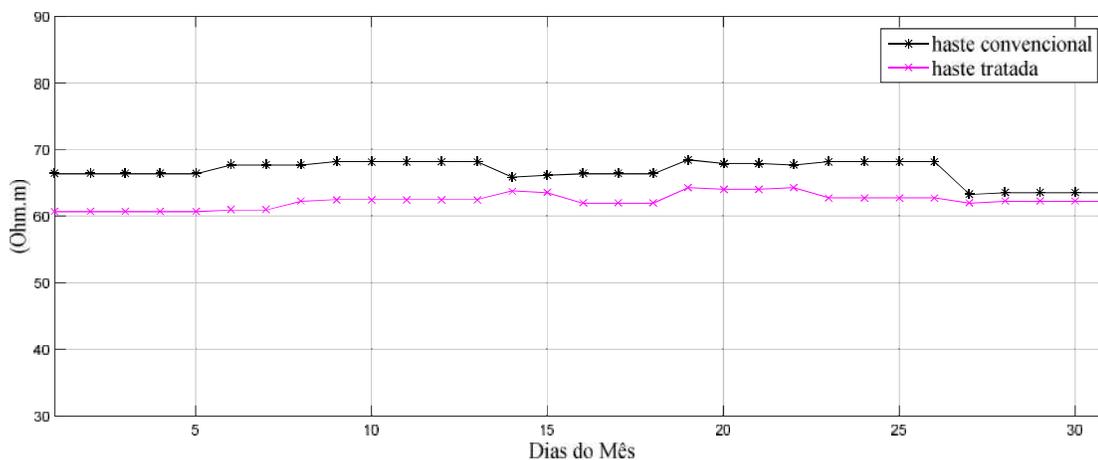
4.1 Resistividades e resistências obtidas

Com os valores de resistências de aterramento para cada haste, foram calculadas as resistividades. Para isto, manipulou-se a Equação (9) presente no item 3.4.1.4, isolando a sua resistividade, o que resultou na Expressão (10). Esta fórmula foi aplicada para cada resistência medida, adquirindo o valor da resistividade para cada dia, das regiões circunvizinhas as hastes aterradas.

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot L_h \cdot R_{el}}{\ln\left(\frac{4 \cdot L_h}{D_h}\right) - 1} \quad (10)$$

Podem ser vistos nos APÊNDICES A e B referentes aos meses de março e abril respectivamente, os valores de resistividade calculados, nas colunas denominadas “rhc [Ω.m]”, para a instalação convencional e “rhg [Ω.m]”, para a instalação com tratamento. Os Gráficos 3 e 4 mostram o comportamento da resistividade de março e abril, respectivamente.

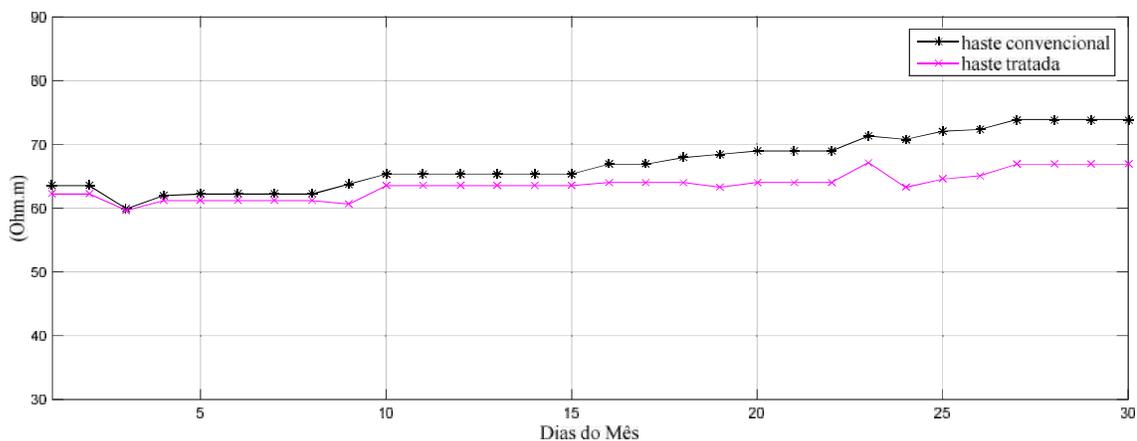
Gráfico 3 - Resistividades calculadas do mês de março



Fonte: Autoria própria

As resistividades obtidas, possuem seus valores variando entre 60 e 70 $\Omega.m$. Com os dados do mês de março calculou-se a média das resistividades, resultando em 66,74 $\Omega.m$, pela haste convencional, e 62,31 $\Omega.m$ pela haste tratada. Com os valores do mês de abril, calculou-se também as resistividades médias da haste convencional e tratada resultando respectivamente em 67,09 $\Omega.m$ e 63,57 $\Omega.m$.

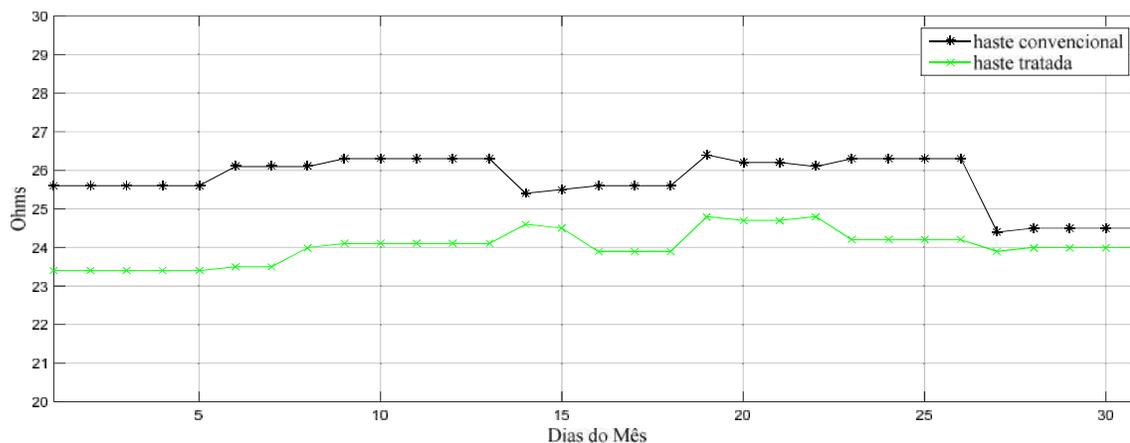
Gráfico 4 - Resistividades calculadas do mês de abril



Fonte: Autoria Própria

Com as curvas de resistividade nos dois meses, nota-se que os valores foram maiores para a haste convencional, conseqüentemente a resistência medida apresentou o mesmo comportamento, como se pode observar nas curvas dos Gráficos 5 e 6. Da mesma forma calculou-se suas grandezas médias para cada haste, sendo 25,74 Ω para a haste convencional, e 24,03 Ω para a haste com tratamento, no mês de março.

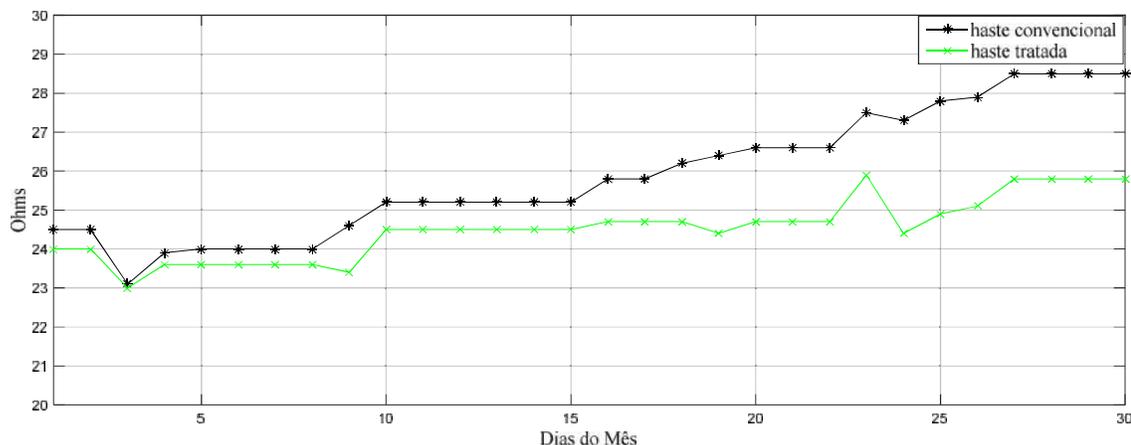
Gráfico 5- Resistências medidas do mês de março



Fonte: Autoria própria

No mês de março têm-se uma diferença de dois ohms entre as resistências das duas instalações, que reduz pela metade no dia 14/03, e volta a variar entre 1 e 2 ohms no período que compreende o dia 15 até o dia 26. A partir do dia 27 até o último dia do mês, a diferença entre as medidas das hastes são significativamente menores, chegando a meio ohm. A diferença média do mês calculada, foi de $1,71 \Omega$ entre as duas instalações.

Gráfico 6 - Resistências medidas do mês de abril



Fonte: Autoria própria

A pequena diferença se mantém com valores menores que meio ohm, entre as duas hastes, na primeira quinzena do mês de abril. A partir do dia 15/04 a resistência medida da haste convencional começa a apresentar valores maiores, chegando a cerca de $28,5 \Omega$ nos 4 últimos dias do mês. Enquanto isto, a haste tratada também apresenta valores maiores nestes dias, porém abaixo de 26Ω , sendo a maior diferença obtida (dois ohms e meio). Neste mês as resistências médias foram de $25,88 \Omega$ para haste convencional, e $24,52 \Omega$ para a haste com tratamento, sendo a diferença média de $1,36 \Omega$.

Calculou-se o desvio padrão com o intuito de verificar a dispersão dos valores de resistência e resistividade nos dois meses, a partir da Equação 10, os valores obtidos encontram-se na tabela 3. Martins (2013) define este parâmetro (σ), como uma dimensão da dispersão dos dados com relação à média destes, assumindo somente valores positivos. O desvio se trata da raiz da variância amostral, onde n é o número de dados, que possibilita a interpretação da variação do conjunto de valores.

$$\sigma = \sqrt{\left(\sum \frac{(xi - média)^2}{(n-1)}\right)} \quad (10)$$

Tabela 3- Desvio padrão para as duas hastes

Meses	Haste convencional		Haste sob tratamento	
	Resistência	Resistividade	Resistência	Resistividade
Março	0,645	1,672	0,424	1,099
Abril	1,617	4,792	0,777	2,014

Fonte: Autoria própria.

4.2 Comportamento climático e resistividade do solo

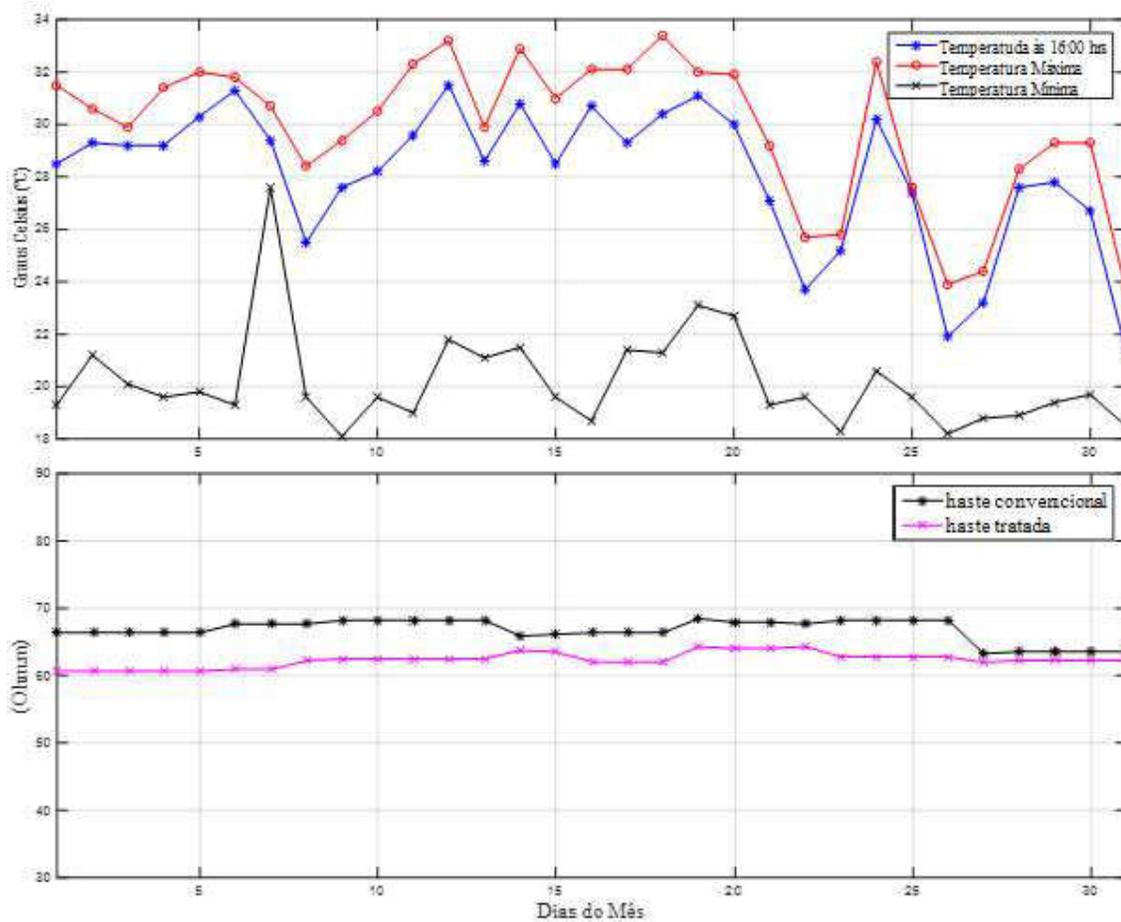
Observou-se o comportamento climático durante os períodos de medição. Os parâmetros de temperatura, radiação, precipitação, e umidade foram comparados separadamente com a resistividade do solo, para cada mês da experimentação da haste sob tratamento e da haste convencional.

4.2.1 Temperatura e resistividade

Visacro (2012) considera que a temperatura aumenta a resistividade de um solo, quando muito elevada, levando em conta a evaporação da água contida nele, diminuindo sua umidade. Ele também comenta por outra perspectiva, analisando o comportamento da água presente no solo, esta, em temperaturas negativas causa aumento da resistividade. Durante a medição, foi observado que o solo apresentou um aspecto mais seco e rígido, nos dias mais quentes, dificultando a perfuração dos eletrodos auxiliares em sua superfície. O primeiro índice climático observado foi a temperatura do dia, os Gráficos 7 e 8 contém as curvas da mínima, máxima e do horário da medição.

No primeiro mês de medição, houveram temperaturas maiores entre os dias 12 e 20, onde as máximas e as do horário de medição foram acima de 28 graus. No dia 19 a resistividade teve um aumento significativo para as duas hastes, com isto, este período de dias quentes podem ter contribuído para este aumento. A partir do dia 24 até o fim do mês, as temperaturas foram as menores comparadas aos dias anteriores. Quando ocorreu uma queda de temperatura do dia 25 para o dia 26, nota-se que e a resistividade da terra ao redor da haste convencional tem uma diminuição logo em seguida, do dia 26 para o dia 27, de 68 para 63 Ω .m, a haste com tratamento também sofre uma diminuição, porém em proporção reduzida tendo seu valor reduzido em 1 Ω .m.

Gráfico 7- Temperatura e resistividade no mês de março

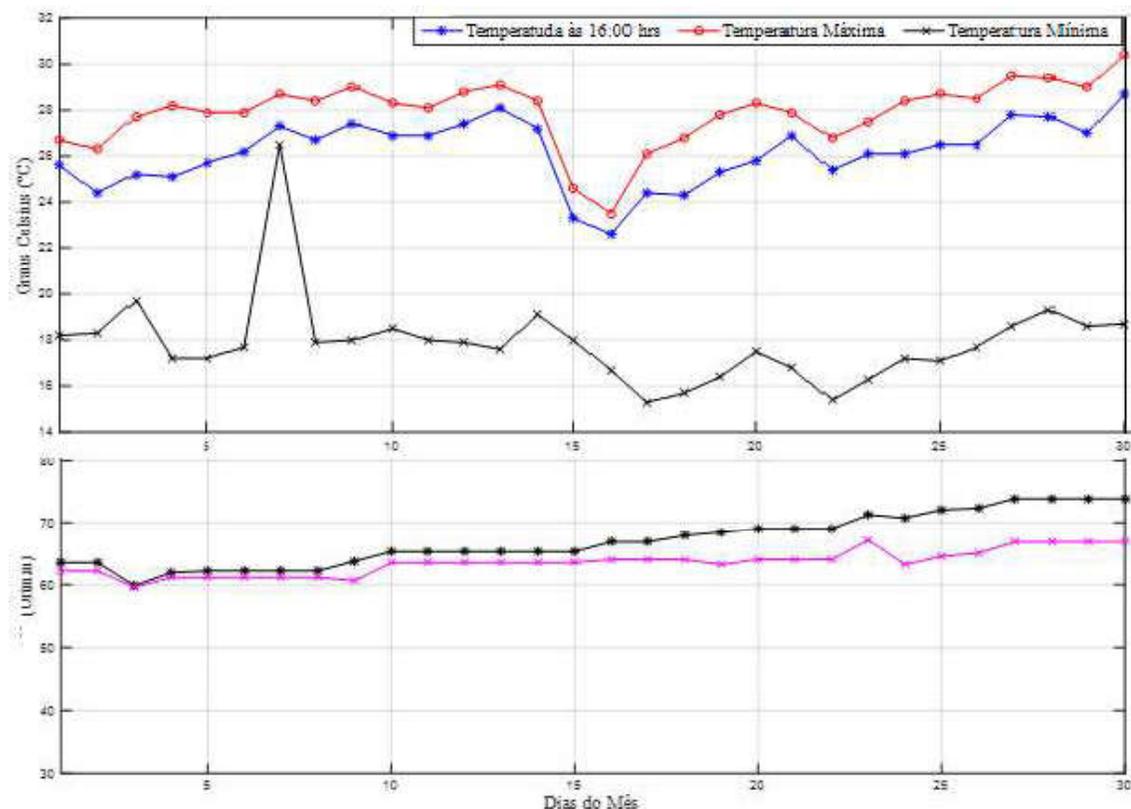


Fonte: Autoria própria

Em abril, ocorreu uma queda de temperatura do dia 14 ao dia 16, mas não houve variações nas curvas de resistividade. Pôde-se observar apenas que, a partir do dia 22 quando as temperaturas começaram a aumentar, inclusive as mínimas temperaturas, a resistividade sofreu uma elevação, sendo mais perceptível na curva haste convencional.

No horário da medição para os dois meses, as temperaturas foram próximas da máxima. As curvas de resistividade e temperatura não apresentaram uma relação constante durante todo o período, apenas alguns dias notou-se a influência deste fator climático. A temperatura média na hora da medição para março foi de 28,1 °C, e a de abril foi de 26,15 °C.

Gráfico 8 – Temperatura e resistividade no mês de abril



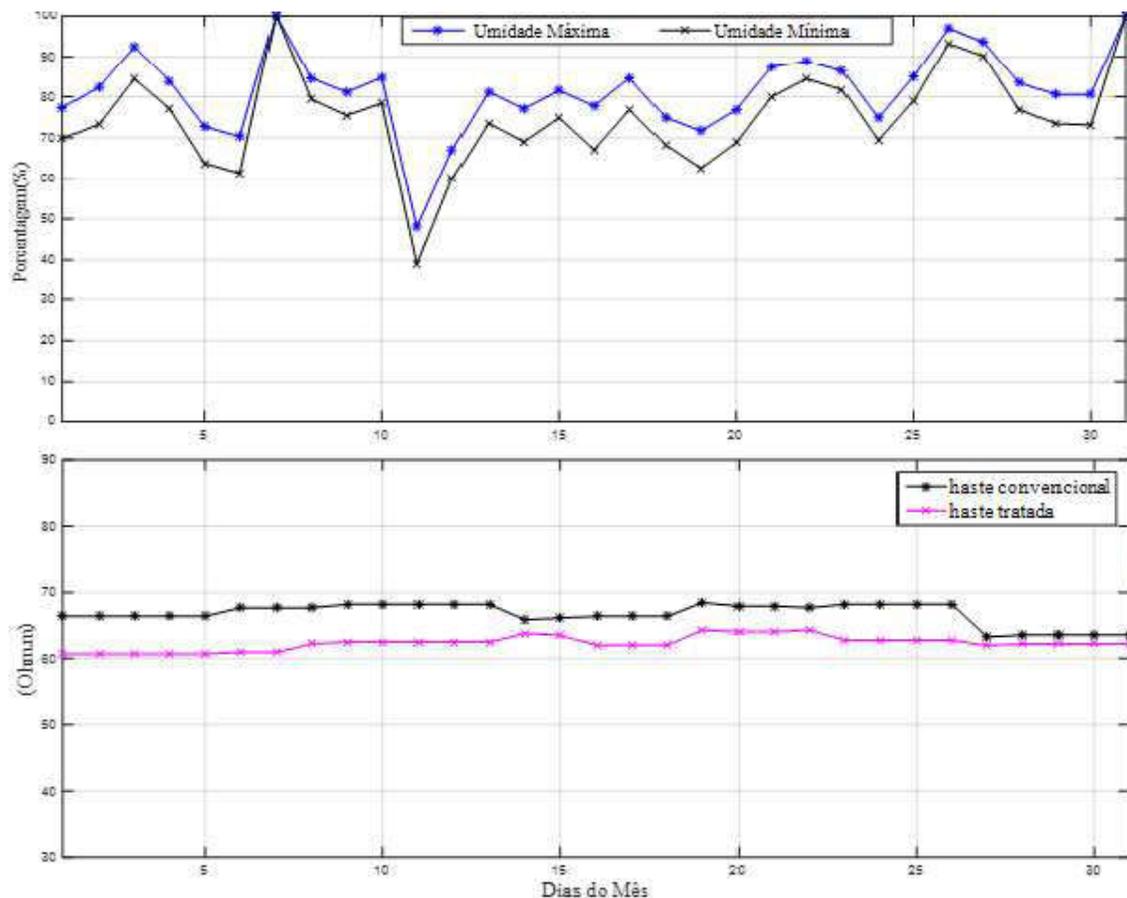
Fonte: Autoria própria

4.2.2 Umidade do ar e resistividade

Visacro (2002) diz que o clima afeta a variação da quantidade de água no solo, e explica que são os mecanismos eletrolíticos que permitem a condução, sendo que o aumento da umidade é capaz de diminuir a sua resistividade. Por essa linha de raciocínio observa-se que a umidade do ar contribui para a umidade do solo. Os Gráfico 9 e 10 mostram o comportamento dos teores de umidade do ambiente (%) no mês de março e abril, respectivamente. É importante ressaltar que a umidade do ar não é necessariamente a mesma do solo.

Em março os valores de umidade tiveram seu valor médio em 78,27 %, se mantendo maior durante os dias 3, 7 à 10, 21 à 23, e nos últimos quatro dias do mês, com percentuais próximos ou maiores que 80. Os valores de resistividade não oscilaram conforme este parâmetro. Mas, notou-se uma queda dos valores resistivos das duas hastes, principalmente na haste convencional, em um dos períodos com alto teor de umidade do ar, do dia 26 para o 27.

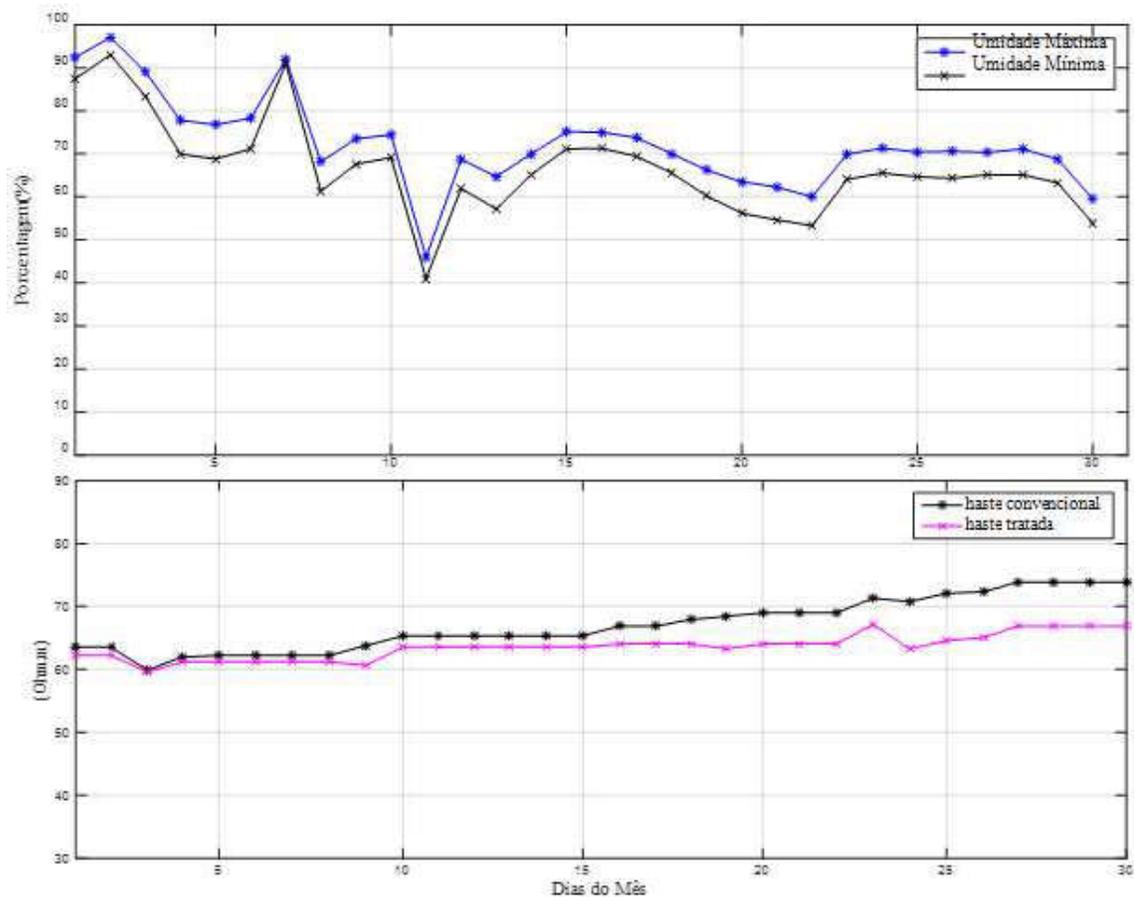
Gráfico 9 – Umidade e resistividade no mês de março



Fonte: Autoria própria

Em abril foi mais visível a possível influência da umidade do ar nas curvas de resistividade. Na primeira quinzena do mês o percentual atingiu valores maiores, sendo baixo apenas no dia 11 (inferior à 50 %). Com o pico entre 90 e 100% no segundo dia, as resistividades das hastes sofreram uma queda no terceiro dia do mês, sendo menor a variação referente a haste sob tratamento. Do dia quinze em diante, os índices não apresentaram oscilação significativa, e após o dia 18 foram constantemente menores (iguais ou inferiores à 70%) até o fim do mês, ao mesmo tempo que as resistividades foram mais altas. O valor médio para este mês foi de 69,36 %.

Gráfico 10 – Umidade e resistividade no mês de abril



Fonte: Autoria própria

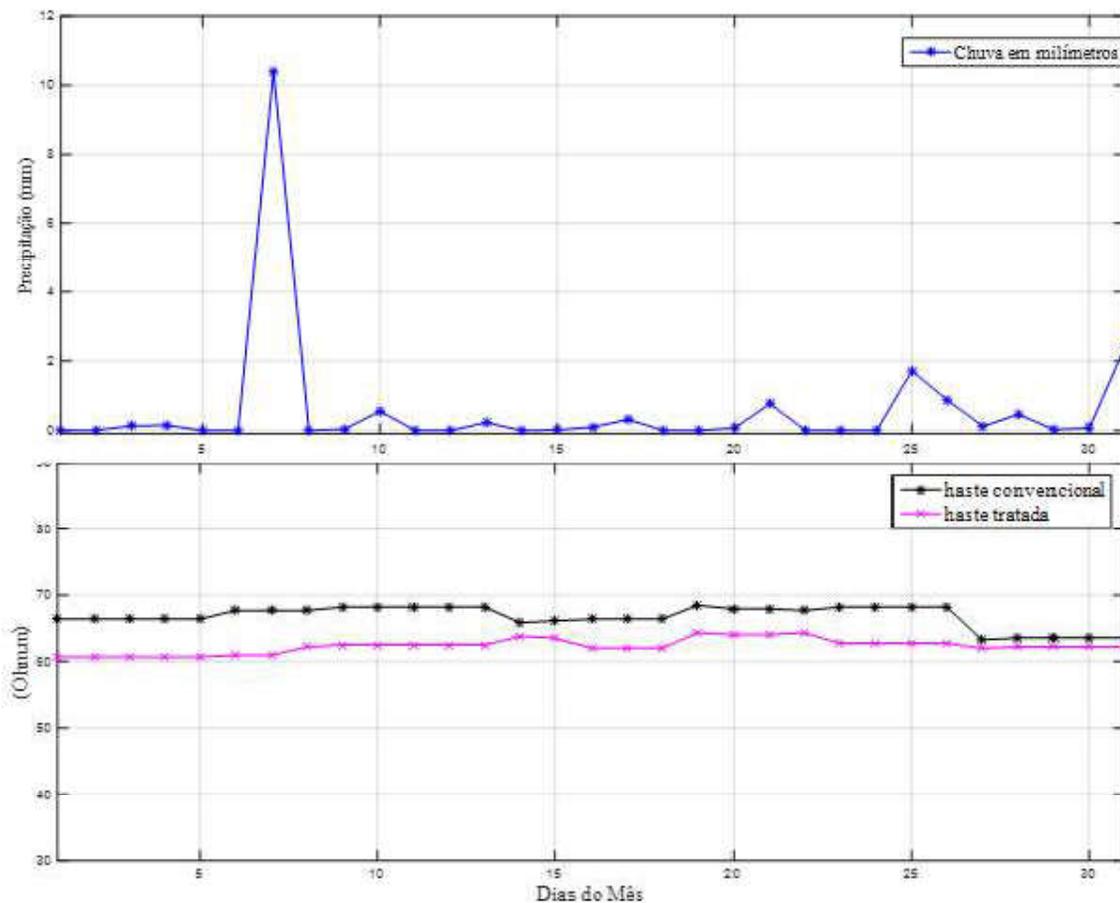
4.2.3 Precipitações e resistividade

Segundo COSTA et al (1999), um solo de perfil argiloso possui uma capacidade de infiltração limitada, mas isto depende também da sua granulometria e porosidade que podem ser contribuintes para sua permeabilidade. Sabendo disto, a chuva que atinge a superfície do solo é infiltrada para camadas inferiores, dependendo da capacidade de absorção líquida de cada camada. Considerando as chuvas, um dos contribuintes significativos para a umidade do solo e consequentemente sua resistividade, os índices em milímetros, de precipitações, foram traçados nos Gráficos 11 para o primeiro, e 12, para o segundo mês de experimentação.

Março apresentou um dia de chuva com mais de 10 milímetros no dia 7, e do dia 24 até o dia 31 houve ocorrência de precipitações contínuas, com índices menores de 2 milímetros (quase zero milímetros nos dias 27, 29, 30). A interferência no solo foi percebida no local, durante as medições realizadas no fim do mês, a superfície estava mais úmida e macia,

facilitando a perfuração dos eletrodos auxiliares. A resistividade foi menor referente as duas hastes, no dia 27 logo após uma sequência de dois dias de chuva (dias 25 e 26).

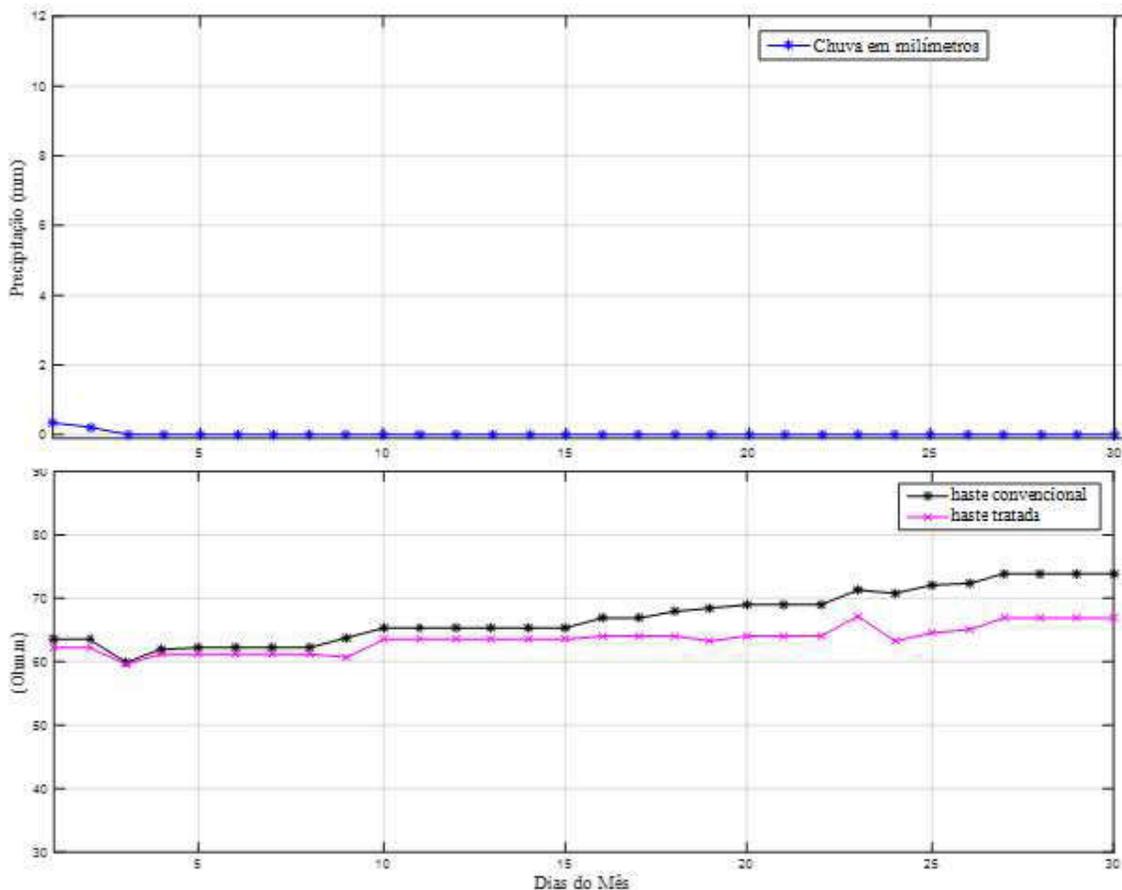
Gráfico 11 – Chuvas e resistividade no mês de março



Fonte: Autoria própria

O segundo mês mostrou-se mais seco, havendo ocorrência de chuvas apenas nos dois primeiros dias com índices abaixo de dois milímetros, visto que o valor médio para março foi de 0,6 milímetros, e para abril 0,02 milímetros. Notou-se que as curvas de resistividades foram crescentes até o fim do mês para as duas hastes. A haste convencional apresentou valor de resistividade aproximado ao da haste sob tratamento nos primeiros dias do mês. O aumento da diferença entre as duas hastes foi crescente até os últimos dias, mostrando que a instalação comum foi mais afetada pela falta de chuvas. Isso foi notável devido ao afastamento entre as curvas de resistividade, onde a haste convencional apresentou valores maiores e a sob tratamento manteve-se com pouca variação.

Gráfico 12 – Chuvas e resistividade no mês de abril



Fonte: Autoria própria

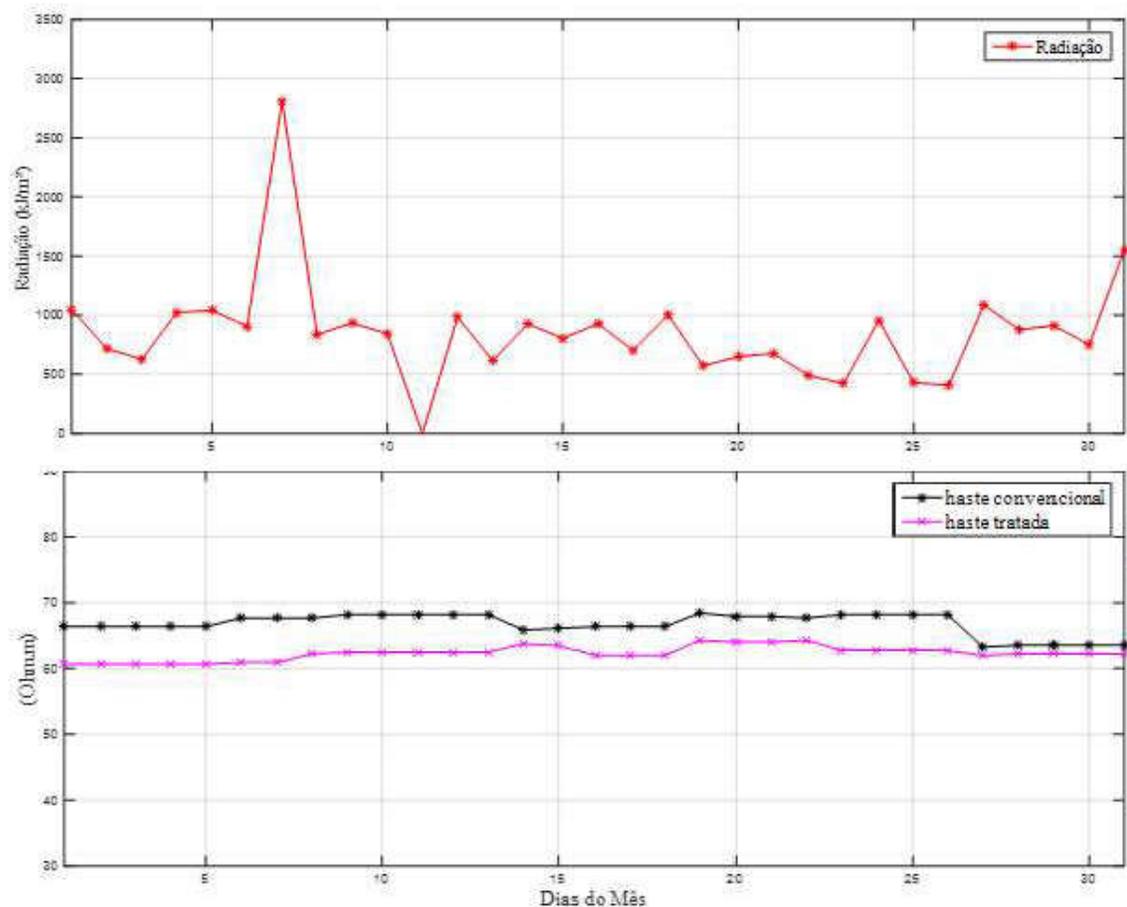
4.2.4 Radiação e resistividade

Pereira (2002) explica o potencial de energia solar como a quantidade máxima de radiação do sol que incide sobre a superfície terrestre, em um dia e local específico, considerando a ausência de nuvens. Este fenômeno afeta diversos processos físicos da superfície sob influência, como aquecimento e evaporação, sendo estes fatores que podem variar a umidade do solo, alterando a resistividade do mesmo. Assim, buscou-se identificar possíveis relações das curvas de resistividades com este índice meteorológico.

Até o dia 6 de março, a curva de radiação solar plotada no Gráfico 13, teve pequenas oscilações entre 600 e 1000kJ/m², neste mesmo período as resistividades das duas hastes foram constantes. No dia 7 a radiação teve o seu maior pico, alcançando quase 3000 kJ/m², um dia depois a resistividade da haste sob tratamento sofreu um leve aumento de 61 para 62 Ω.m mantendo neste valor até o dia 13 e a haste convencional havia aumentado um dia antes. O

menor índice de radiação ocorreu no dia 11, quando não se estabeleceu uma variação da resistividade conforme este parâmetro climático. O valor médio da radiação para março foi de 855,73 kJ/m².

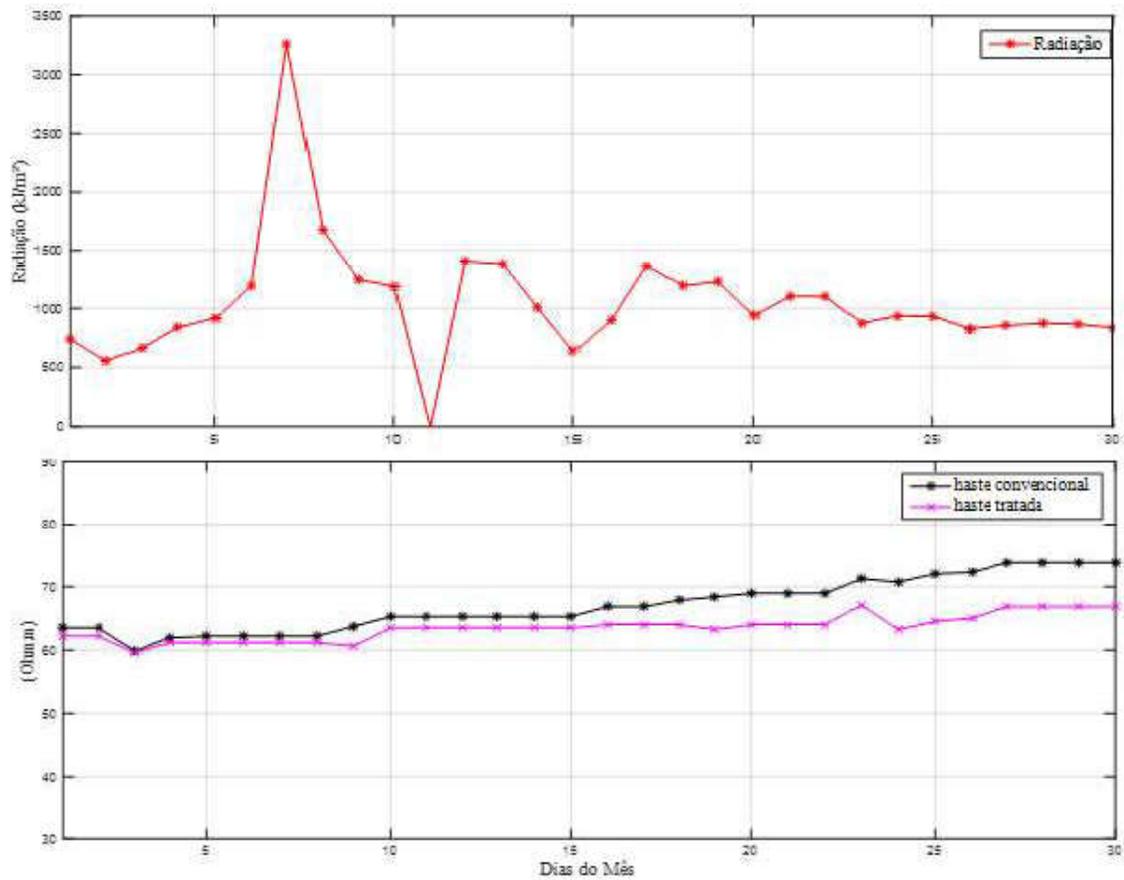
Gráfico 13 -Radiação solar e resistividade no mês de março



Fonte: Autoria própria

A curva do mês de abril mostrada no Gráfico 14, foi parecida com a do mês anterior, tendo seu grande pico maior no dia 7 e o menor no dia 11, se diferenciando no fim do mês, em que os valores não oscilaram tanto e se mantiveram inferiores a 1000 kJ/m². A radiação solar média para este mês foi de 1053,05 kJ/m². A relação com a característica resistiva das hastes para este mês, resultou em uma leve diminuição da radiação a partir do dia 22, ao mesmo tempo que as resistividades aumentaram.

Gráfico 14 - Radiação solar e resistividade no mês de abril



Fonte: Autoria própria

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir deste trabalho foi possível conhecer o solo local da instalação das hastes de aterramento, verificar conceitos discutidos na fundamentação teórica e validar o método de redução da resistência testada. As resistividades apresentadas pelas duas hastes no mês de março foram entre 60 e 70 ($\Omega.m$); e em abril chegaram a valores superiores à 70 $\Omega.m$. Pela Tabela 1 (3.3.1), que relaciona os solos a partir da resistividade, e pelo conhecimento sobre os tipos de solos que compõe a região da cidade, sendo em sua maioria, do tipo argiloso, pode-se dizer que a terra circunvizinha é mais próxima da classificação “argila com 40% de umidade”. Analisando as curvas de resistência elétrica e seus valores médios, referentes aos dois aterramentos, viu-se que a haste sob tratamento, teve índices inferiores aos da haste convencional durante os dois meses de experimentação. Com isto, pode-se afirmar que o uso dos cristais retentores de líquido hidratados frequentemente, atuou na umidade do solo local, diminuindo a resistência de terra. Conclui-se que é um método mais vantajoso para locais de clima seco e quente, considerando os dias observados com estas características, que apresentaram maiores diferenças entre as duas hastes. A hidratação dos cristais com água sanitária misturada à água se mostrou eficaz, considerando que não houveram danificações, alteração de cor ou formação de outras substâncias visíveis a olho nu.

Dos fatores climáticos observados, os que tiveram mais influência foram as ocorrências de chuvas e as variações de temperaturas, que implicaram diretamente, não por sua quantidade em um dia, mas pela ocorrência após dias seguidos. Visto que as alterações das curvas de resistência e resistividades ocorriam logo no fim ou após um período de mais de um dia, com mesma característica climática (chuvosa e menor temperatura, ou, quente e secos). Isso ocorreu de forma que uma sequência de dias chuvosos acompanhados de altas temperaturas e umidade do ar elevada, obtiveram índices de resistividade, e resistência de terra, menores. Já nos períodos de dias quentes, secos, associados à baixa umidade do ar, as resistências e resistividades eram elevadas. Não foi visto influência direta da radiação nas curvas de resistividade. Notou-se que o aterramento comum sofria mais alterações com fatores climáticos, onde as quedas e aumentos na curva da resistência eram maiores, chegando a valores muito próximos aos da haste tratada apenas após uma sequência de dias chuvosos. Com isto, vê-se que a terra ao redor da haste com os cristais hidratados chegou à uma característica de umidade referente à um solo de clima úmido e chuvoso, sendo mais uma vantagem do método experimentado.

Para os trabalhos futuros, indica-se melhorar este estudo substituindo os dados climáticos, por dados próprio solo. Com a temperatura e umidade da terra local, visualiza-se de forma direta a influência destas características na resistência do aterramento. Para aprofundar o estudo da resistividade, sugere-se a substituição da medição com o termômetro de três entradas pelo de quatro, utilizando o método de Wenner que permite conhecer a resistividade não só da terra circunvizinha ao eletrodo, mas a de uma área maior. E para facilitar a obtenção dos dados, pode-se adotar uma técnica automática de obtenção diária e armazenamento das resistências, com um sistema microcontrolado transmitindo automaticamente, por exemplo, coletando as medidas, e a inclusão de um sistema de sensoriamento mais diversificado, abrangente e completo.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419**. Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**. Medição de Resistividade do Solo: Método dos Quatro Pontos. Rio de Janeiro, 1981.
- BECEGATO, Valter A.; FERREIRA Francisco J. F.. **Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná**. Revista brasileira de geofísica, v23, n.4, p. 371-405, dez. 2005.
- BELCHIOR, F. N. **Medição da Resistividade de Solo e Resistência de Terra**. Abril. 2014. Disponível em: <http://www.gqee.unifei.edu.br/arquivos_upload/disciplinas/31/Cap_8_-_Medicao_da_Resistividade_de_Solo_e_Resisten%20cia_de_Terra.pdf>. Acessos em: 10 de setembro 2016.
- CALIXTO, W.P. et al. **Desenvolvimento de operador matemático para algoritmos de otimização heurísticos aplicado a problema de geoprospecção**. TEMA (São Carlos), São Carlos, v 15, n. 2, p. 177-194, Ago. 2014.
- CAPELLI, A. **Aterramento Elétrico**. Revista Saber Eletrônica. Ano 36, Nº 329. São Paulo: Junho, 2000.
- CLUNK, T. **Montagem e Manutenção**. Universidade de Santa Cruz do Sul, 2013.
- COSTA, Édio Luiz da S. et al . Infiltração de água em solo, determinada por simulador de chuvas e pelo método dos anéis. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 131-134, Ago. 1999.
- COTRIM, Ademaro A. M. B., **Instalações elétricas - revisão e adaptação técnica em conformidade com a NBR 5410: Geraldo Kindermann**. 4.ed. São Paulo: Prentice Hall 2003.
- CUNHA, João G. **Aterramento em subestações consumidoras**. São José dos Campos: Mi Omega Engenharia Ltda, 2003.
- EDMINISTER, Joseph A. **Teoria Dos Problemas De Eletromagnetismo**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- FEDERAÇÃO DE INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ. **Calcário é mais vantajoso do que gesso para corrigir solo**. FIEP: Curitiba, 2013.
- FLORES, Ana J. M. **Análise e Aplicação de Métodos para o Cálculo da Resistência de Terra em Sistemas com N Eléttodos Instalados em Solos Heterogéneos**. 2014. 96f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2014.
- HOEK, Evert. **Practical Rock Engineering**. 2000, <<https://www.rocsience.com/documents/hoek/corner/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>> Acesso em: 18 de maio 2018.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia: Estações Meteorológicas Automáticas.** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>> Acesso em 3 de março 2018.

INMETRO. **Água Sanitária - Produto e Segurança da Embalagem.** Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/agua_sanitaria2.asp> Acesso em: 18 de maio 2018.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico.** 6ª ed. do autor. UFSC, Labplan EEL. Florianópolis: Gráfica Editora Pallotti, 2011.

LEITE, Carlos Moreira; FILHO, Mário L. P. **Técnicas de aterramentos elétricos:** cálculos, projetos e software para aterramentos elétricos. São Paulo: Oficina de Mydia, 1996.

LIMA, José L. C. **Avaliação Experimental Sobre O Efeito De Ionização do Solo devido À Injeção de Correntes Impulsivas.** 2008. 142F. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

LIMA, Marcelo R. **Conhecendo os principais solos do Paraná.** Revista da Sociedade Brasileira de Ciência de Solos. Curitiba: UFPR, 2012.

MAMEDE, J. **Instalações Elétricas Industriais.** 8.ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2010.

MARTINS, Maria E. G. Desvio Padrão Amostral. **Revista de Ciência Elementar**, Lisboa, ed. 1, p. 1, Out. 2013.

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

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

PEREIRA, André Belmont; VRISMAN, Augusto Leandro; GALVANI, Emerson. Estimativa da radiação solar global diária em função do potencial de energia solar na superfície do solo. **Sci. agric. (Piracicaba, Brasil.)**, Piracicaba, v. 59, n. 2, p. 211-216, Junho 2002.

PONTO CIÊNCIA. **Cristais de água (osmose).** 2009. Disponível em: <<http://pontociencia.org.br/experimentos/visualizar/cristais-de-agua-osmose/187>> Acesso em: 17 de maio 2018.

RAGGI, Livia M. R., **Projeto De Malhas De Aterramento: Contribuição Ao Computo Da Estratificação Do Solo.** 2009, 103F. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

SEED (SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO). **Geografia do Paraná: Solos.** <<http://www.geografia.seed.pr.gov.br/modules/galeria/detalhe.php?foto=1538&evento=8#menu-galeria>> Acesso em: 13 de abril 2018.

TUMA, E. T. **Proposta De Um Novo Modelo Para Análise Dos Comportamentos Transitório E Estacionário De Sistemas De Aterramento, Usando-Se O Método FDTD.** 2005. 146f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará. Belém, 2005.

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

WALENIA, Paulo S. **Projetos Elétricos Industriais.** Curitiba: Base Didáticos, 2008.

APÊNDICE A- Resistência e resistividades do mês de março de 2018

MEDIÇÕES: Haste convencional e tratada			
Rhc [Ω]	rhc [$\Omega.m$]	Rhg [Ω]	rhg [$\Omega.m$]
25.6	66.376	23.4	60.672
25.6	66.376	23.4	60.672
25.6	66.376	23.4	60.672
25.6	66.376	23.4	60.672
25.6	66.376	23.4	60.672
26.1	67.673	23.5	60.931
26.1	67.673	23.5	60.931
26.1	67.673	24	62.228
26.3	68.191	24.1	62.487
26.3	68.191	24.1	62.487
26.3	68.191	24.1	62.487
26.3	68.191	24.1	62.487
26.3	68.191	24.1	62.487
25.4	65.858	24.6	63.784
25.5	66.117	24.5	63.524
25.6	66.376	23.9	61.969
25.6	66.376	23.9	61.969
25.6	66.376	23.9	61.969
26.4	68.451	24.8	64.302
26.2	67.932	24.7	64.043
26.2	67.932	24.7	64.043
26.1	67.673	24.8	64.302
26.3	68.191	24.2	62.746
26.3	68.191	24.2	62.746
26.3	68.191	24.2	62.746
26.3	68.191	24.2	62.746
24.4	63.265	23.9	61.969
24.5	63.524	24	62.228
24.5	63.524	24	62.228
24.5	63.524	24	62.228
24.5	63.524	24	62.228

APENDICE B - Resistência e resistividades do mês de abril de 2018

MEDIÇÕES: Haste convencional e tratada			
Rhc [Ω]	rhc [$\Omega.m$]	Rhg [Ω]	rhg [$\Omega.m$]
24.5	63.524	24	62.228
24.5	63.524	24	62.228
23.1	59.894	23	59.635
23.9	61.969	23.6	61.191
24	62.228	23.6	61.191
24	62.228	23.6	61.191
24	62.228	23.6	61.191
24	62.228	23.6	61.191
24.6	63.784	23.4	60.672
25.2	65.339	24.5	63.524
25.2	65.339	24.5	63.524
25.2	65.339	24.5	63.524
25.2	65.339	24.5	63.524
25.2	65.339	24.5	63.524
25.2	65.339	24.5	63.524
25.8	66.895	24.7	64.043
25.8	66.895	24.7	64.043
26.2	67.932	24.7	64.043
26.4	68.451	24.4	63.265
26.6	68.969	24.7	64.043
26.6	68.969	24.7	64.043
26.6	68.969	24.7	64.043
27.5	71.303	25.9	67.154
27.3	70.784	24.4	63.265
27.8	72.081	24.9	64.561
27.9	72.340	25.1	65.080
28.5	73.896	25.8	66.895
28.5	73.896	25.8	66.895
28.5	73.896	25.8	66.895
28.5	73.896	25.8	66.895

APÊNDICE C- Dados climáticos obtidos de março de 2018

Data (Março 2018)	Temperatura às 16:00 hrs	Temp. Máx	Temp. Min	Umidade Média Máx (%)	Umidade Média Min (%)	Radiação Média (kJ/m²)	Chuva Média (mm)
1	28.50	31.50	19.30	77.38	69.83	1047.70	0.00
2	29.30	30.60	21.20	82.46	73.33	720.32	0.01
3	29.20	29.90	20.10	92.38	84.42	627.09	0.13
4	29.20	31.40	19.60	83.92	77.17	1023.39	0.15
5	30.30	32.00	19.80	72.75	63.75	1042.05	0.00
6	31.30	31.80	19.30	70.29	61.29	904.76	0.00
7	29.40	30.70	27.60	100.00	100.00	2810.00	10.40
8	25.50	28.40	19.60	84.58	79.42	836.49	0.00
9	27.60	29.40	18.10	81.17	75.46	933.69	0.04
10	28.20	30.50	19.60	84.71	78.46	842.69	0.56
11	29.60	32.30	19.00	48.00	39.00	-3.54	0.00
12	31.50	33.20	21.80	67.13	60.04	984.94	0.00
13	28.60	29.90	21.10	81.25	73.54	614.52	0.23
14	30.80	32.90	21.50	77.08	69.04	925.93	0.00
15	28.50	31.00	19.60	81.58	74.88	804.46	0.02
16	30.70	32.10	18.70	77.79	67.08	925.93	0.10
17	29.30	32.10	21.40	84.58	76.88	703.75	0.32
18	30.40	33.40	21.30	74.92	68.25	1001.43	0.00
19	31.10	32.00	23.10	71.71	62.54	571.50	0.00
20	30.00	31.90	22.70	76.88	68.83	650.09	0.08
21	27.10	29.20	19.30	87.38	80.00	676.25	0.78
22	23.70	25.70	19.60	88.79	84.46	489.98	0.00
23	25.20	25.80	18.30	86.38	81.75	422.73	0.00
24	30.20	32.40	20.60	74.83	69.46	956.36	0.00
25	27.40	27.60	19.60	85.00	79.08	430.51	1.73
26	21.90	23.90	18.20	96.92	93.17	408.07	0.88
27	23.20	24.40	18.80	93.54	90.13	1086.71	0.13
28	27.60	28.30	18.90	83.50	76.96	878.27	0.47
29	27.80	29.30	19.40	80.58	73.46	911.03	0.03
30	26.70	29.30	19.70	80.67	73.13	750.49	0.08
31	21.40	23.70	18.50	100.00	100.00	1550.00	2.40

APENDICE D - Dados climáticos obtidos de abril de 2018

Data (Abril 2018)	Temperatura às 16:00 hrs	Temp Máx	Temp Min	Umidade Média Máx (%)	Umidade Média Min (%)	Radiação Média (kJ/m²)	Chuva Média (mm)
1	25.6	26.70	18.20	92.38	87.38	738.94	0.34
2	24.4	26.30	18.30	97.08	93.04	556.75	0.22
3	25.2	27.70	19.70	89.04	83.38	664.71	0.01
4	25.1	28.20	17.20	77.79	69.92	841.77	0.00
5	25.7	27.90	17.20	76.79	68.79	921.17	0.00
6	26.2	27.90	17.70	78.25	71.13	1195.77	0.00
7	27.3	28.70	26.50	92.00	91.00	3260.00	0.00
8	26.7	28.40	17.90	68.13	61.29	1671.53	0.00
9	27.4	29.00	18.00	73.50	67.58	1247.78	0.00
10	26.9	28.30	18.50	74.42	69.13	1188.41	0.00
11	26.9	28.10	18.00	46.00	41.00	-3.54	0.00
12	27.4	28.80	17.90	68.75	61.92	1407.96	0.00
13	28.1	29.10	17.60	64.67	57.17	1383.74	0.00
14	27.2	28.40	19.10	70.00	65.21	1011.35	0.00
15	23.3	24.60	18.00	75.08	71.13	643.06	0.01
16	22.6	23.50	16.70	75.04	71.29	901.83	0.00
17	24.4	26.10	15.30	73.75	69.42	1363.44	0.00
18	24.3	26.80	15.70	70.00	65.54	1195.43	0.00
19	25.3	27.80	16.40	66.21	60.21	1227.32	0.00
20	25.8	28.30	17.50	63.50	56.17	943.48	0.00
21	26.9	27.90	16.80	62.29	54.63	1106.41	0.00
22	25.4	26.80	15.40	60.00	53.29	1102.06	0.00
23	26.1	27.50	16.30	69.92	64.04	878.27	0.00
24	26.1	28.40	17.20	71.29	65.50	939.27	0.00
25	26.5	28.70	17.10	70.42	64.67	934.31	0.00
26	26.5	28.50	17.70	70.58	64.33	829.50	0.00
27	27.8	29.50	18.60	70.33	65.13	857.46	0.00
28	27.7	29.40	19.30	71.13	65.17	876.00	0.00
29	27	29.00	18.60	68.75	63.21	868.55	0.00
30	28.7	30.40	18.70	59.50	53.92	838.70	0.00