

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ ROBERTO PINHEIRO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS HARMÔNICAS
EM UM SISTEMA DE ATERRAMENTO

SANTOS/SP

2017

JOSÉ ROBERTO PINHEIRO

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DAS HARMÔNICAS
EM UM SISTEMA DE ATERRAMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Dr. Mauricio Conceição Mario e do Professor Dr. Luiz Augusto Pereira Fernandes.

SANTOS/SP

2017

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

621.31923 Pinheiro, José Roberto.

P72e Estudo da Influência das Harmônicas em um Sistema de Aterramento / José Roberto Pinheiro - 2017

78 pag.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Conceição Mario

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Pereira Fernandes

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2017.

1. Aterramento 2. Resistividade do solo 3. Harmônicas
I. Mario, Mauricio Conceição, II. Fernandes, Luiz Augusto Pereira.
III. Estudo da Influência das Harmônicas em um Sistema de Aterramento.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Alcione, minhas filhas Vanessa e Talita e meu neto Felipe que me apoiaram e tiveram paciência para suportar a minha ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, pela minha vida, minha inteligência, minha família, meus amigos e meu trabalho.

Aos meus pais Bernardino e Hilda *in memoriam*, pelo amor que sempre me dedicaram.

À minha esposa Alcione, pelo carinho, dedicação, incentivo, paciência e amor.

Às minhas filhas Vanessa e Talita e meu neto Felipe pelo carinho.

Aos professores e amigos Dr. Mauricio Conceição Mario e Dr. Luiz Augusto Pereira Fernandes pela orientação e dedicação neste trabalho, sempre prontos para o esclarecimento de dúvidas e apresentando sugestões muito valiosas.

Ao professor e amigo Dr. João Inácio da Silva Filho pelo incentivo e pela colaboração e formatação do trabalho.

Ao professor e amigo Me. José Roberto Abud Jorge pelo incentivo inicial.

Ao amigo Alexandre Uliana, pela colaboração com o equipamento Amplificador de Áudio, cedido até o término do trabalho.

Ao amigo Gilberto Branco, pela colaboração com os equipamentos, Gerador de funções e o Osciloscópio DSO nano, cedido até o término do trabalho.

As secretárias Sandra Helena Aparecida de Araujo e Imaculada Scorza pelo carinho e dedicação com todos nós.

RESUMO

O aterramento de máquinas e motores é de extrema importância para assegurar a proteção das pessoas, a qualidade da energia elétrica e o pleno funcionamento dos equipamentos em geral. O constante estudo sobre o tema é fundamental para atender as diferentes necessidades de proteção de sistemas. O aumento do uso de cargas não lineares, geradores de harmônicas, torna relevante o estudo da característica da resistência em função da frequência. Para garantir a ausência de interferências externas, neste trabalho foi construído um modelo experimental isolado (MEI), onde foi feita uma pesquisa em um total de 17 experimentos. Além das leituras de corrente e tensão elétrica, foram monitoradas a temperatura ambiente, temperatura do solo e a umidade ambiente. Essas leituras adicionais foram obtidas por meio de uma plataforma de *hardware/software* especificamente programada para esta pesquisa. Os resultados das medições efetuadas no MEI demonstraram que as variações da frequência e da umidade do solo afetam as condições do sistema de aterramento. Foi feito um comparativo entre as características de um sistema puramente resistivo e do solo, onde podem ser observadas estas variações. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se a existência de uma característica elétrica capacitiva para o solo. Ao final da dissertação são apresentados, em forma de gráficos, os resultados das medições da resistência do solo e outros valores obtidos. Com o modelo construído neste estudo pode-se inferir que é de fundamental importância o conhecimento das características do solo no qual serão colocadas as hastes ou a malha de aterramento. O solo apresenta uma impedância, indicando que a variação da frequência afeta diretamente esta característica, alterando o valor de sua resistividade.

Palavras Chave: Aterramento. Resistividade do solo. Harmônicas.

ABSTRACT

Grounding of machines and motors is of extreme importance to ensure the protection of people, the quality of electrical energy and the full operation of the equipment in general. The constant study on the subject is fundamental to meet the different needs of system's protection. The increasing use of nonlinear loads, harmonic generators, makes relevant the study of the characteristic of resistance as a function of frequency. To guarantee the absence of external interferences, an isolated experimental model (IEM) was constructed in this work, where a research was done in a total of 17 experiments. In addition to current and voltage readings, the ambient temperature, soil temperature and ambient humidity were monitored. These additional readings were obtained through a specifically programmed hardware / software platform for this research. The results of IEM measurements showed that variations in frequency and soil moisture affect the conditions of the grounding system. A comparison was made between the characteristics of a purely resistive and soil system, where these variations can be observed. According to the results, the existence of a capacitive electrical characteristic for the soil was verified. At the end of the dissertation are presented, in graph form, the results of measurements of soil resistance and other values obtained. With the model constructed in this study it can be inferred that it is of fundamental importance the knowledge of the characteristics of the soil in which the rods or the grounding grid will be placed. The soil presents an impedance, indicating that the frequency variation directly affects this characteristic, changing the value of its resistivity.

Keywords: Grounding. Soil resistivity. Harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema simplificado de geração de harmônicas.	15
Figura 2.1 - Cuba para medição em laboratório.	18
Figura 2.2 - Diagrama de ligações do Megger.	28
Figura 2.3 - Circuito que representa uma parte do aterramento.....	30
Figura 3.1 - Vista do Modelo Experimental Isolado MEI.....	32
Figura 3.2 - Circuito do Modelo Experimental Isolado MEI.	33
Figura 3.3 - Solo seco com eletrodo.....	35
Figura 3.4 - Fixação dos condutores.	35
Figura 3.5 - Conexão dos eletrodos.	36
Figura 3.6 - Condição inicial, solo seco.....	36
Figura 3.7 - Frequência máxima aplicada.	37
Figura 3.8 - Sensor DHT22 (AM2302).....	38
Figura 3.9 - Sensor DS18B20.	38
Figura 3.10 - Módulo Micro-SD.	39
Figura 3.11 - Placa Arduino UNO R3.	39
Figura 3.12 - Ligações dos sensores ao Arduino.	40
Figura 3.13 - Cartão Micro-SD conectado.....	40
Figura 3.14 - Falha de leitura do Micro-SD.	41
Figura 3.15 - Arquivo de leituras no cartão Micro-SD.....	41
Figura 3.16 - Sonda DS18B20.	42
Figura 4.1 - Validação do Método.	43
Figura 4.2 - Início do Experimento - Solo seco.....	46
Figura 4.3 - Vista do solo seco.	46
Figura 4.4 - Adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.	47
Figura 4.5 - Centro do MEI seco.	48
Figura 4.6 - 24h após a adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.	49
Figura 4.7 - Adição de 250 ml de água no centro do MEI.	50
Figura 4.8 - 24h após adição de 250 ml de água no centro do MEI.	51
Figura 4.9 - Adição de 250 ml de água em todo MEI.	52
Figura 4.10 - 24h após adição de 250 ml de água em todo MEI.....	53
Figura 4.11 - Adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	54
Figura 4.12 - 24h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	55
Figura 4.13 - 48h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	56
Figura 4.14 - 4 Dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	57
Figura 4.15 - 8 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	58
Figura 4.16 - 12 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	59
Figura 4.17 - 14 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	60
Figura 4.18 - 16 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	61
Figura 4.19 - 18 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	62
Figura 4.20 - Comparativo entre solo seco inicial e final.	63
Figura 4.21 - Efeito da umidade em quatro experimentos seguidos.	64
Figura 4.22 - Efeito da umidade nos experimentos de 3 à 12	65
Figura 4.23 - Efeito da umidade nos experimentos 1, 2, 13 até 16	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Sensações do corpo humano com a corrente elétrica.	26
Tabela 4.1 - Validação do Método.....	44
Tabela 4.2 - Início do Experimento - Solo seco.....	45
Tabela 4.3 - Adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.....	47
Tabela 4.4 - 24h após a adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.	48
Tabela 4.5 - Adição de 250 ml de água no centro do MEI.	49
Tabela 4.6 - 24h após adição de 250 ml de água no centro do MEI.	50
Tabela 4.7 - Adição de 250 ml de água em todo MEI.	51
Tabela 4.8 - 24h após adição de 250 ml de água em todo MEI.	52
Tabela 4.9 - Adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	53
Tabela 4.10 - 24h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	54
Tabela 4.11 - 48h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.....	55
Tabela 4.12 - 4 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	56
Tabela 4.13 - 8 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	57
Tabela 4.14 - 12 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	58
Tabela 4.15 - 14 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	59
Tabela 4.16 - 16 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	60
Tabela 4.17 - 18 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.	61
Tabela 4.18 - Variações entre valores iniciais e finais em todos os experimentos....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
Amp	Amplificador de Áudio.
A	Ampère.
AC	Corrente alternada.
FAI	Falhas de Alta Impedância.
h	Umidade do solo
Hz	Hertz.
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
kA	quiloampère.
kg	quilograma.
kHz	quilohertz.
km	quilômetro.
kV	quilovolts.
LED	<i>Light Emitting Diode.</i>
MEI	Modelo Experimental Isolado.
MHz	Mega Hertz.
MIT	Motor de indução trifásica.
MRT	Rede de distribuição elétrica Monofilar com Retorno por Terra.
MTE	Ministério do Trabalho e Emprego.
mm	milímetro.
ms	milissegundo.
NBR	Norma Brasileira.
NR	Norma Regulamentadora.
P _A	Peso da água.
P _S	Peso do solo seco.
P _T	Peso total do solo.
R _x	Resistência do solo.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
VAC	Tensão Alternada.
VDC	Tensão Contínua.
V _{rms}	Tensão <i>root mean square</i> (Valor eficaz).
W	Watt.

LISTA DE SIMBOLOS

σ	Condutividade elétrica.
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius.
Ω	Ohms.
Ωm	Ohms metro.
ϵ	Permissividade elétrica.
μ	Permeabilidade magnética.
ρ	Resistividade elétrica.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Histórico	13
1.2	Objetivos	15
1.3	Organização do trabalho	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Aterramento.....	17
2.2	Aterramento e o solo	17
2.3	Descargas Atmosféricas.....	20
2.4	Alta Impedância.....	22
2.5	Transitórios.....	23
2.6	Qualidade de energia e segurança.....	24
2.7	Choque elétrico	25
2.8	Potencial de passo	26
2.9	Potencial de toque.....	26
2.10	Resistividade do solo.....	26
2.11	Compactação e umidade do solo	29
2.12	Modelo de sistema de aterramento com impedância	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Materiais.....	32
3.1.1	Modelo Experimental Isolado (MEI)	32
3.1.2	Circuito para os Experimentos	33
3.2	Métodos.....	34
3.2.1	Ajustes Iniciais	36
3.2.2	Medições de Temperatura e Umidade	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Validação do Método.....	43
4.2	Experimento 1	45
4.3	Experimento 2	47
4.4	Experimento 3	48
4.5	Experimento 4	49
4.6	Experimento 5	50
4.7	Experimento 6	51
4.8	Experimento 7	52
4.9	Experimento 8	53
4.10	Experimento 9	54
4.11	Experimento 10	55
4.12	Experimento 11	56
4.13	Experimento 12	57
4.14	Experimento 13	58
4.15	Experimento 14	59
4.16	Experimento 15	60
4.17	Experimento 16	61
4.18	Análises Comparativas.....	62
5.	CONCLUSÕES	67
5.1	Trabalhos Futuros	67
	REFERÊNCIAS.....	68
	ANEXO - 1	75
	ANEXO - 2	76

1. INTRODUÇÃO

1.1 Histórico

Com origem no século XVIII pela descoberta da resistividade das rochas por Gray & Wheeler, e a condutividade do solo por Watson, em 1746 iniciou-se os métodos Geométricos. No século XX, têm-se os primeiros trabalhos em prospecção mineral usando estes métodos. Conrad Schlumberger e Frank Wenner introduziram o arranjo de quatro eletrodos para obtenção da resistividade de superfície (IEZZI, 2008).

Segundo Nayel (2013), o método de quatro eletrodos é considerado o mais preciso para se medir a resistividade do solo no local. As configurações mais utilizadas são de *Wenner* e *Schlumberger*.

No início do século XX, houve um interesse em se medir parâmetros eletromagnéticos no solo. Foi previsto por Maxwell a existência de ondas eletromagnéticas, porém se deteve ao estudo da luz. As primeiras tentativas de se gerar outras ondas eletromagnéticas foram realizadas por O. Lodge e G. F. FitzGerald entre 1879 e 1883. Mesmo conseguindo produzir tais ondas, não sabiam como detectar as mesmas. Somente entre 1887 e 1888, H. Hertz conseguiu, em pequenas distâncias, transmitir e receber ondas eletromagnéticas. Tentando transmitir ondas eletromagnéticas, ele percebeu que havia grande influência do solo na sua propagação, sendo estas experimentalmente suas primeiras verificações (ALÍPIO, 2013).

Desde 1925, são utilizadas as fundações das estruturas dos prédios como parte do aterramento elétrico. Foi somente na década de 1960 que se começou a adotar as fundações como aterramento, isto ocorreu na Alemanha. Foi constatado que devido à umidade no subsolo o concreto das fundações apresentava uma resistividade próximo a do solo sendo de média a baixa. Para as fundações norte-americanas, tem-se uma resistividade próxima a 30 Ωm em média. Na Alemanha, os valores encontrados foram entre 120 Ωm e 500 Ωm . No final da década de 1970, os norte-americanos passaram a recomendar o aterramento com condutores embutidos no concreto das fundações. Exemplos são mostrados em pesquisas experimentais, com malhas convencionais envolvido em concreto, comprovando a eficiência do método com valores de impedâncias menores em relação às hastes convencionais, bem como o

comportamento em relação à frequência (BEZERRA, 2011), (CANNABRAVA, 2016).

Para se projetar um sistema de aterramento é necessário medir a resistividade do solo com precisão. Um projeto inicial bem elaborado evita retrabalho melhorando a redução dos custos e proporcionando um longo período de funcionamento (NAYEL, 2013).

O solo é tratado como uma impedância e não como um sistema resistivo puramente. Com isso as características de frequência na impedância do solo exercem uma influência significativa em sua resistividade. Amostras de solo são testadas em laboratório, porém algumas características se alteram devido à escavação, temperatura e umidade local (NAYEL, 2013).

Atualmente, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) vem sofrendo acréscimo da sua capacidade. Junto com esse crescimento, há uma grande utilização de cargas não lineares e dispositivos de chaveamento, sendo esta uma preocupação tanto das concessionárias como dos consumidores.

Tais cargas não lineares e os dispositivos chaveados são fontes geradoras de harmônicas (corrente elétrica com frequência múltipla da fundamental 60 Hz) e provocam distorções de corrente e tensão, prejudicando o bom funcionamento do sistema (GARCIA, 2017).

Segundo Teixeira (2009) cargas não lineares como fornos a arco, podem gerar harmônicas. Não só a indústria, mas também residências ou comércios estão sujeitos a geração de harmônicas, provenientes de retificadores, controladores de velocidade, laminadores, fontes chaveadas dentre outros dispositivos. Esses equipamentos têm comportamento como fontes geradoras de harmônicas, causando efeitos indesejáveis como: aquecimento de máquinas rotativas, interferências em dispositivos de proteção, ressonância, perdas em banco de capacitores, dentre outros.

Um Motor de Indução Trifásica (MIT) sendo alimentado por um Sistema Elétrico de Potência (SEP), que também está alimentando cargas não lineares, sofre a influência das harmônicas geradas por tais cargas transferidas pelo próprio (SEP). Pode ser visto na Figura 1.1, a seguir, um sistema simplificado onde a carga devolve ao SEP as harmônicas geradas.

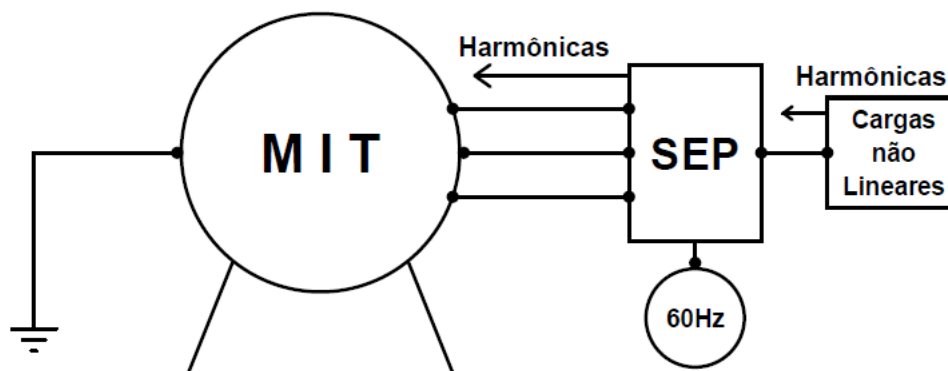


Figura 1.1 - Sistema simplificado de geração de harmônicas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho está em desenvolver um método para encontrar valores da variação da resistividade do solo em função da frequência da tensão aplicada e da umidade presente para aperfeiçoar sistemas de aterramento e propor recomendações para normas técnicas.

Para alcançar o objetivo principal serão feitos os seguintes procedimentos como objetivos secundários:

- Construir um Modelo Experimental Isolado (MEI) obtendo uma situação isolada de qualquer corrente que possa interferir no sistema em estudo, optando-se por um modelo experimental adequado.
- Estabelecer critérios para medição confiável no Modelo Experimental Isolado (MEI) para que este não sofra influência de outros sistemas de aterramento.
- Obter resultados por meio do estudo experimental da resistividade do solo no Modelo Experimental Isolado (MEI).
- Obter resultados por meio do estudo experimental da variação da resistência do solo em função da frequência no Modelo Experimental Isolado (MEI).
- Obter resultados por meio do estudo experimental da variação da resistência do solo em função da umidade presente no Modelo Experimental Isolado (MEI).

1.3 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo-se a Introdução.

No capítulo 2 é descrita uma revisão da literatura envolvendo o assunto com trabalhos que abrangem novas linhas de pesquisa no que se refere ao aterramento elétrico. Vários trabalhos de mestrado, doutorado, artigos e até apostilas foram consultados, retirando de seu conteúdo um apanhado geral para o contexto deste trabalho.

No capítulo 3 é descrita toda a metodologia aplicada para a obtenção das tabelas de medições ao longo de todos os experimentos.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussão sobre os 17 experimentos da pesquisa.

No capítulo 5 são colocadas as conclusões bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Aterramento

Segundo a ABNT (NBR-15749:2009), aterramento elétrico significa “ligação intencional de parte eletricamente condutiva à terra, por meio de um condutor elétrico”.

O aterramento funcional consiste em se ligar um dos condutores do sistema elétrico à terra denominado de condutor neutro, servindo de referência de potencial para o sistema. Já o aterramento de proteção é a ligação de partes metálicas do equipamento à terra, com a finalidade de drenar possíveis correntes de falta que possam causar choques por contato indireto. Ainda pode-se ter o aterramento temporário, onde são conectados os condutores um ao outro ou todos com a terra, tornando-se possível o trabalho de manutenção do sistema com segurança contra acidentes (FEIS UNESP, 2016).

Ao efetuar-se a ligação entre um sistema de aterramento, uma carcaça metálica de um equipamento elétrico ou até um equipamento eletrônico com a terra, dá-se o nome de aterramento. Essa conexão é uma *interface*, envolvendo o sistema e os dispositivos por meio de ligações com soldas, conectores ou junções prensadas. É um assunto composto por muitas dúvidas em relação às normas e procedimentos. O desconhecimento teórico necessário poderá causar a queima de equipamentos ou choque elétrico nos seres vivos com consequências graves. Deve-se dar a atenção necessária, para que todo o sistema possa funcionar adequadamente e que possa operar os dispositivos de proteção com rapidez e segurança (FEIS UNESP, 2016).

2.2 Aterramento e o solo

A investigação do solo por meio de resistividade elétrica tem como princípio básico a aplicação de uma tensão constante nas sondas inseridas no solo e a medição da corrente que flui entre as sondas, sendo esta inversamente relativa com a resistência do solo. Essa resistividade elétrica sofre grandes variações que dependem principalmente do teor de água no solo (CHIK, 2012).

Não se tem uma definição clara para os tipos de solo no que trata de aterramento elétrico. Por experiência, são encontrados diferentes valores de resistividade para um determinado tipo de solo em locais diferentes. Este é um

parâmetro que não se pode atribuir um valor real de resistividade para um determinado tipo de solo. O que se consegue é a medição local da resistividade, atribuindo-se faixas de valores para serem usados em projetos de aterramento (FEIS UNESP, 2016).

Para um bom projeto de um sistema de aterramento específico, tem-se que obter a resistividade do solo local para instalação do sistema em si. O conhecimento destes dados permite que a ligação à terra seja bem calculada, evitando-se problemas futuros em mudanças ou melhorias. Amostras de solo são testadas em laboratório para se obter características de frequência de impedância, porém podem ser alteradas em função da retirada do material, alterando os parâmetros de temperatura e umidade (GAMITO, 2016).

Segundo Viana (2016) basicamente para a medição da resistividade do solo, utiliza-se duas formas:

- A primeira com amostra retirada do local, em profundidades mais estáveis do solo, onde não sofrem tanto as variações ambientais e examinadas em laboratório. Pode-se verificar por meio da Figura 2.1 a seguir.

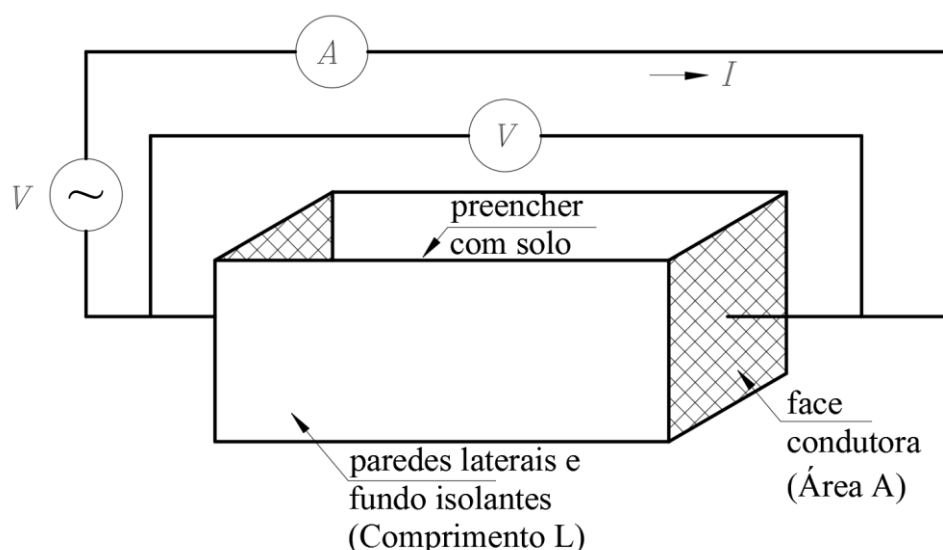


Figura 2.1 - Cuba para medição em laboratório.

Fonte (VIANA, 2016).

A amostra do solo é colocada na cuba e é medida entre as duas faces opostas, tendo-se as faces laterais com material isolante. O solo deve estar bem compactado para o procedimento. Com isso podem-se ter alterações nas

características do solo como compactação e umidade que pode se perder em função do manuseio, trazendo assim certa alteração nas características principais, porém servindo como base de comparação com outros métodos.

- A segunda por meio de hastes verticais, por serem de fácil cravação no solo, variando-se sua profundidade e efetuando-se as referidas leituras (VIANA, 2016).

Para avaliarem-se as condições de um aterramento elétrico, devem-se conhecer as características químicas, físicas e biológicas do solo onde será implantado. Para o sistema ser preservado, levam-se em consideração muitas variáveis. Todo aterramento tem como objetivo principal fornecer um caminho seguro para a circulação de corrente preservando-se a segurança do sistema, evitando-se a ocorrência de interferência eletromagnética, garantindo a equipotencialização, preservando a segurança de pessoas e dos equipamentos. Essa análise de dispersão da corrente é complexa, dependente de variáveis como; condições de umidade, temperatura, composição do solo, compactação e outros (VICENTE *et al.*, 2009).

Para se projetar uma malha de aterramento, é importante definir a corrente máxima que pode circular pela malha bem como a estratificação do solo onde será instalada. Tendo-se estas informações, são sugeridos arranjos de eletrodos. Para isso, têm-se os dados iniciais que são basicamente o modelo do solo, a corrente máxima suportada pela malha, o máximo tempo de proteção e a área disponível da instalação (RAGGI, 2009).

Em condições de curtos-circuitos ou transitórios eletromagnéticos, devem-se levar em consideração uma análise mais profunda, devido a causas como topologia e características físicas e meteorológicas do território como um todo. Principalmente no Brasil, esses fatores são representativos, devido ao aterramento do neutro no sistema trifásico, além de estarem distribuídos em regiões com alto índice de descargas atmosféricas e um solo que em geral apresenta elevados valores de resistividade. A importância do aterramento do neutro deve-se ao fato de ser fornecido um referencial nos vários níveis de tensão. Tem-se um sistema muito importante para a região rural denominado Sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT). Por outro lado, devem-se tomar devidos cuidados, conectando-se o neutro às carcaças e estruturas metálicas, evitando-se assim tensões induzidas, falhas internas de

equipamentos, contatos acidentais com partes energizadas, colocando-se em risco o ser humano ou equipamentos (NOGUEIRA, 2006).

A maioria dos sistemas de aterramento tem como referência os métodos adotados na NBR-15749:2009 que estipula um valor máximo de $10\ \Omega$, aprovando, segundo a norma, o sistema de aterramento propriamente dito. Porém, nos dias de hoje, para aterramentos destinados à proteção contra descargas atmosféricas, são levados em consideração as frequências de um impulso transitório que varia de 5 Hz a 50 kHz, podendo chegar até 1 MHz. Em função destes transitórios, tem-se o tratamento para análise do sistema de aterramento como uma impedância e não simplesmente uma resistência. Tendo-se em vista o exposto, aplicam-se eletrodos na configuração horizontal, diminuindo-se a impedância de aterramento aumentando a dissipação dessas correntes impulsivas para o solo com maior eficiência (MODENA, 2013).

Projetos de aterramento nas concessionárias, normalmente são referenciados a eventos de baixa frequência. Como os níveis de segurança e desempenho estão cada vez maiores, é necessário levar-se em consideração os transitórios eletromagnéticos associados às correntes impulsivas de descargas atmosféricas. O que se deve levar em consideração, é que o tema é bastante abrangente (BRÉDER, 2016).

Para todo e qualquer sistema elétrico, o aterramento deve ser um caminho de baixa impedância, garantindo a atuação dos sistemas de proteção, visando manter os potenciais de passo e toque a níveis aceitáveis pelos seres vivos (BRÉDER, 2016).

2.3 Descargas Atmosféricas

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tem-se cerca de 70% de desligamentos na linha de transmissão e 40% em linhas de distribuição com a queima de 40% dos transformadores, provocados por descargas atmosféricas (INPE, 2017).

No que se refere às descargas atmosféricas ou sobre tensões em linhas de transmissão, o aterramento elétrico deve possuir baixa resistência elétrica e ligações seguras para absorver os distúrbios atmosféricos. A associação de um bom aterramento com circuitos de proteção pode garantir um sistema em funcionamento e a segurança pessoal (GRUPO INTELLI, 2017).

Descargas atmosféricas representam grande influência nos sistemas de energia. Seus efeitos são muito importantes para linhas de transmissão, que ao receberem correntes em elevadas amplitudes, causam sobretensões com consequente desligamento do sistema, levando-se a elaborados estudos sobre o assunto, com objetivo de minimizar seus efeitos danosos. Ao se analisar um sistema de aterramento perante a injeção de correntes impulsivas, é comum associar-se a impedância impulsiva, parâmetro obtido pela relação dos valores de pico da tensão e da corrente. Quando essa corrente é muito alta, tem-se o fenômeno de ionização do solo que está ao redor do eletrodo de aterramento, podendo resultar na diminuição de sua impedância. Isto ocorre também em função das características do solo no local. É um fenômeno bem similar ao efeito corona em eletrodos aéreos de linhas de transmissão, porém, sua ocorrência não é uniforme devido à composição do solo não ser homogênea (CERQUEIRA LIMA, 2008).

Pelo fato de estar próximo ao equador e devido a sua grandeza territorial, tem-se no Brasil uma grande incidência de descargas atmosféricas. A duração média de um raio está em torno de 250 ms com um percurso de 5 a 10 Km. Nesse período, a corrente tem grandes variações, podendo em raros casos chegar a mais de 200 kA. Essa corrente circula através de um “canal” com diâmetro de poucos centímetros e pode atingir valores de 30.000°C com pressão de dezenas de atmosferas, expandindo o ar ao redor em grande velocidade. Com isto é gerada uma onda sonora na faixa de 50 a 100 Hz de frequência à qual é comumente chamada de trovão (PEREIRA, 2008).

Quando um elevado campo elétrico é criado entre nuvens, ou mesmo entre nuvens e o solo, rompendo-se a rigidez dielétrica do ar, têm-se as descargas atmosféricas, provocando um grande movimento de cargas. Têm-se mais conhecimentos dessa descarga nuvem solo por ser motivo de perturbações nos sistemas elétricos. Em um relâmpago podem-se ter várias descargas com uma duração em torno de 40 ms. A corrente que pode ser produzida no solo tem cerca de 30 a 40 kA (COELHO, 2005).

A formação de um raio se dá pelas múltiplas descargas entre nuvens e solo. O início chamado de líder escalonado, com influência do campo elétrico formado entre a nuvem e o solo, tem-se pelo movimento de elétrons, com etapas de algumas dezenas de metros, com duração de um microssegundo,

espaçadas em 50 microssegundos, surgindo após alguns milissegundos na base da nuvem, direcionando-se ao solo. A corrente média é em torno de 1 kA. O potencial elétrico ao chegar próximo ao solo pode chegar a 100 milhões de volts (INPE, 2017).

Por definição, uma corrente elétrica de grande intensidade na atmosfera com duração em torno de 0,5 segundo com trajetória entre 5 e 10 Km, é chamado de relâmpago. Ocorre devido ao movimento de elétrons de um lado para outro. O atrito entre os elétrons e o ar que está sendo percorrido é tão intenso que libera uma quantidade de luz muito grande. Quando esta conexão é entre nuvem e solo, dá-se o nome de raio (INPE, 2017).

2.4 Alta Impedância

Faltas de Alta Impedância (FAI), assim chamadas na literatura, nada mais são que curto circuitos pela alta impedância no ponto de falta, normalmente causado pela queda do condutor sem o desligamento do circuito. Sistemas de proteção, normalmente detectam curtos circuitos envolvendo altas correntes, não sendo suficientes para a detecção de uma FAI, podendo ocasionar acidentes graves para seres humanos ou animais, além de incêndios, provocados pela queda de condutores energizados com níveis altos de tensão. O problema está mais direcionado com a segurança de seres humanos ou animais do que propriamente a proteção do sistema elétrico. Em função disto, concessionárias, universidades e fabricantes em geral têm procurado desenvolver equipamentos que detectam o problema e desenergizam o circuito elétrico evitando assim danos maiores. Mesmo sendo baixo o número de ocorrências deste tipo, em comparação com a proteção por faltas de alta corrente, é importante uma solução confiável para evitar acidentes com pessoas ou prevenir incêndios de grandes proporções (JUNIOR, 2006).

A preocupação em se detectar uma FAI tem sido pesquisada há mais de trinta anos. Recentemente é que começaram a surgir no mercado produtos para exercer esta função com segurança (ADAMIAK, 2017).

As FAIs tem maior preocupação na segurança pública do que na proteção de equipamentos, pois se sabe que a atuação dos sistemas de proteção não opera devido às baixas correntes. Isso ocorre quando se tem uma linha em contato com galhos de árvores ou quando decorrente de algum problema a

linha de transmissão se rompe entrando em contato com o solo propriamente dito (6th ANNUAL CLEMSON, 2007).

2.5 Transitórios

A corrente elétrica em materiais condutores ocorre pelo deslocamento de elétrons, partículas negativas, ao se aplicar um campo elétrico. Para o solo em geral, a condução pode ocorrer de acordo com a composição do mesmo. Pode-se assim ter-se a corrente eletrônica, a eletrolítica e a dielétrica (MIRANDA NETO, 2002).

A corrente eletrônica que ocorre em materiais condutores, segue a lei de Ohm, sendo também denominada de corrente Ôhmica. Para alguns tipos de solo, como argila, isso ocorre na superfície, devido à grande quantidade de minerais presentes. Na condução eletrolítica, tem-se o deslocamento de íons que estão presentes no solo, sendo a mais importante para a condutividade do solo, devido à grande quantidade de íons dissolvidos. Para a condução dielétrica, tem-se o que ocorre em materiais pouco condutores, podendo polarizar algumas moléculas ou pequenos aglomerados de solo (PACHECO, 2004).

Quando ocorrem transitórios eletromagnéticos, principalmente com descargas atmosféricas, a variedade de fenômenos é muito grande. Variações bruscas de tensão ou corrente podem afetar o sistema mesmo a quilômetros de distância. Têm-se ainda as correntes de falta, energização de transformadores e banco de capacitores, operações de manobras e equipamentos de proteção. A determinação da resistividade do solo usando-se o método de Wenner não é aplicável à realidade do sistema para determinados locais. Faz-se uso, assim, de simulações por meio de modelos oferecendo-se ao projetista dados para especificações de equipamentos ou até uma análise do quadro que provocou o desequilíbrio do sistema (RAIZER, 2015).

No SEP, um dos principais fatores para o estudo de fenômenos transitórios é a representação adequada dos efeitos do aterramento. Sua maior importância está no comportamento eletromagnético do solo, caracterizado pelos parâmetros de permissividade elétrica ϵ , condutividade elétrica σ e a permeabilidade magnética μ . Em baixas frequências, os parâmetros do solo já são bastante abordados em toda literatura, sendo a resistividade obtida em

frequências abaixo de 100 Hz desprezando-se a corrente de deslocamento. James H. Scott, em 1967 trabalhou para verificar a variação da condutividade do solo com a frequência entre 100 Hz e 1 MHz. Conforme o autor, a condutividade do solo pode se dar por meio de medidas em campo da resistividade e relacionando-se estatisticamente com parâmetros obtidos em laboratório (PEDROSA, 2010).

2.6 Qualidade de energia e segurança

As lesões elétricas são classificadas em quatro tipos principais, a eletrocussão, o choque elétrico, queimaduras e quedas. Ao receber um choque elétrico, dependendo da quantidade de energia pode ocorrer algum dos quatro fatores acima. Ao ser exposto a uma quantidade muito elevada de energia, tem-se a eletrocussão. Ao se expor a um arco elétrico, pode-se sofrer alguma queimadura na região próxima ao evento ou até mesmo pela queima da roupa que se está usando. Em determinados casos, a magnitude da corrente elétrica é tão intensa, que pode haver fratura esquelética ou causar a queda de uma determinada altura (NIOSH, 1998).

Na sociedade atual, o uso da energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento da vida moderna. A maioria das indústrias funciona a base da eletricidade por ser uma energia limpa. Para que sejam reduzidos ao máximo os perigos que envolvem a energia elétrica, devem-se conhecer todos os riscos em relação à vida humana. Constantemente o ser humano está exposto às condições que o obrigam a usar a energia elétrica, estando na maioria das vezes desprevenido sobre os perigos que o cercam (GARAVITO, 2009).

A principal função do aterramento é servir de referência para as tensões do sistema. Em condições normais, a terra é o ponto comum, servindo de base para toda e qualquer referência. Por apresentar o mesmo potencial em qualquer ponto, se mantém uniforme, pelo fato de que devido à condutividade do solo, mesmo sendo considerada baixa, existe uma distribuição das cargas elétricas em sua superfície, impedindo o acúmulo em certas regiões (POMILIO, 2010).

A pesquisa de novos materiais é o grande motivo de estudos no meio científico. A intenção não é inventar e sim encontrar algum material cuja composição o torne único em relação aos outros já existentes. As propriedades

elétricas são importantes, no sentido de se obter novos materiais. A resistividade elétrica de um determinado material é uma propriedade única quando se deseja características específicas. A maioria dos métodos apresentados na literatura, não têm grandes sofisticações levando os pesquisadores e estudiosos à utilização de novas teorias ou modelos matemáticos (GIROTTI, 2001).

A energia elétrica tornou-se essencial. Porém, isso trouxe uma preocupação grande em relação à segurança, pois ela é comum a todos os segmentos da sociedade atual. Por não ser percebida, oferece grandes riscos tanto a usuários como profissionais do setor. Pesquisas relacionadas com o choque elétrico levaram à criação de Normas Regulamentadoras na Segurança e Saúde do Trabalho (NR), ditadas pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), assim como normas técnicas elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT (LOURENÇO, 2007).

2.7 Choque elétrico

A presença de água no corpo humano, cerca de 70% no total, faz com que haja a formação de íons das substâncias presentes na forma de sais, ácidos ou mesmo bases, facilitando assim a condução elétrica. Mesmo assim, existe certa resistência nas células provocando uma geração de calor, ocasionando assim a queimadura nos tecidos humanos. O choque elétrico nada mais é que a ação da corrente elétrica circulando pelos nervos e músculos do corpo humano causando vários tipos de sensação como dor, tremedeira, desequilíbrio etc. Em alguns casos, devido ao uso de tecidos sintéticos, pode-se ter o acúmulo de cargas eletrostáticas no corpo humano que atingem até 3 kV de diferença de potencial com a terra, ocasionando descargas elétricas desagradáveis. Nas residências, a tensão de trabalho é de 110 VAC ou 220 VAC dependendo da região. Nesses valores de tensão, o maior problema do choque elétrico pode ser o efeito secundário como queda, provocando assim graves acidentes. Correntes acima de 2 A podem levar a uma parada cardíaca. Correntes menores podem levar a fibrilação ventricular como visto na Tabela 2.1 a seguir (MARQUES, 2017).

Tabela 2.1 - Sensações do corpo humano com a corrente elétrica.

Corrente em Miliampères	Efeito Provável
1 mA	Nível da percepção, formigamento.
5 mA	Choque ligeiro, não é doloroso, mas perturbador.
6 mA - 16 mA	Choque doloroso começa a perder o controle muscular.
17 mA - 99 mA	Dor extrema, parada respiratória, contrações musculares graves.
100 mA - 2000 mA	Fibrilação ventricular (bombeamento irregular e não coordenado do coração).
> 2,000 mA	Parada cardíaca, danos aos órgãos internos e queimaduras graves.

Adaptado pelo autor.

Fonte: (MARQUES, 2017).

2.8 Potencial de passo

Por definição, é a diferença de potencial entre dois pontos equidistantes entre si de 1 metro, na superfície do solo. O cuidado com a observação do limite imposto pela tensão de passo é tomado em subestações e em sistemas de distribuição usando-se a terra como condutor, chamados de MRT. Uma pessoa caminhando por esta superfície, está sujeita a um choque elétrico se os níveis permitidos de potencial forem ultrapassados (POMILIO, 2017).

2.9 Potencial de toque

Por definição, é a diferença de potencial entre partes metálicas aterradas afastadas em 1 metro de um ponto no solo onde está este equipamento ou estrutura aterrada. Também é tomado o devido cuidado para que uma pessoa, ao encostar-se a uma carcaça de equipamento ou em uma estrutura metálica, não receba um choque elétrico (POMILIO, 2017).

2.10 Resistividade do solo

Resistência elétrica é a oposição da passagem de corrente elétrica através de um material condutor. A resistência elétrica de um tipo de material está ligada diretamente ao fluxo de elétrons que passa por uma determinada seção reta deste material. Pode-se afirmar que quanto maior o comprimento desta seção, maior será sua resistência. Por outro lado, quanto maior a área desta seção, maior será o fluxo de elétrons, ou seja, maior a intensidade de corrente. Com isto, tem-se uma menor resistência elétrica em função da área da seção transversal.

Alguns fatores alteram a resistência elétrica, como temperatura, tamanho, área da seção transversal e o tipo de material.

Por definição, o cálculo de uma resistência elétrica é visto na equação

(2.1) a seguir.

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.1)$$

Onde:

- R = Resistência ôhmica do material,
- L = comprimento do material,
- S = área da seção transversal e
- ρ = resistividade do material.

Tomando-se um cubo de arestas de um metro com solo compactado e homogêneo e medindo-se a resistência entre duas faces opostas, tem-se a resistividade do solo. A unidade é Ohm.metro ($\Omega.m$).

Em seu estado natural, o solo é considerado como mal condutor de eletricidade. Se estiver totalmente seco, tem um comportamento isolante.

Na prática o desejável é que essa resistividade seja a menor possível, permitindo assim o desvio de correntes indesejadas para a terra.

O conhecimento do solo, em relação à sua resistividade elétrica, é um dado importante para efetuar-se um projeto de aterramento adequado.

Um sistema de aterramento é constituído basicamente em:

- Eletrodos de aterramento,
- Conexões entre um ponto do sistema e os eletrodos,
- Solo onde estão colocados os eletrodos.

Suas principais funções são:

- Proteção do usuário do equipamento,
- Permitir o perfeito funcionamento de dispositivos de proteção,
- Drenar para terra, cargas estáticas que possam acumular nas carcaças metálicas dos equipamentos.

Pode-se aterrar um sistema de várias maneiras, ou seja, por meio de uma simples haste ou placas de tamanhos e formas diferentes até configurações mais complexas. Os eletrodos de aterramento, na maioria dos projetos, são hastes metálicas cobertas de cobre eletrolítico. Mas podem ser também placas metálicas, ou mesmo malhas de cobre. Assim têm-se várias formas, de acordo com a aplicação.

As mais usadas são:

- Hastes verticais: Pela facilidade de cravação no solo ou quando a resistividade é menor em camadas mais profundas.
- Eletrodos horizontais: Com profundidades no máximo de 0,5 metro para um melhor controle do gradiente de potencial na superfície do solo (KINDERMANN, 1995).

O instrumento utilizado para efetuar as medições da resistividade do solo, pelo método de Wenner diretamente no local, é chamado de Megger. Na Figura 2.2 tem-se o esquema de ligações do mesmo.

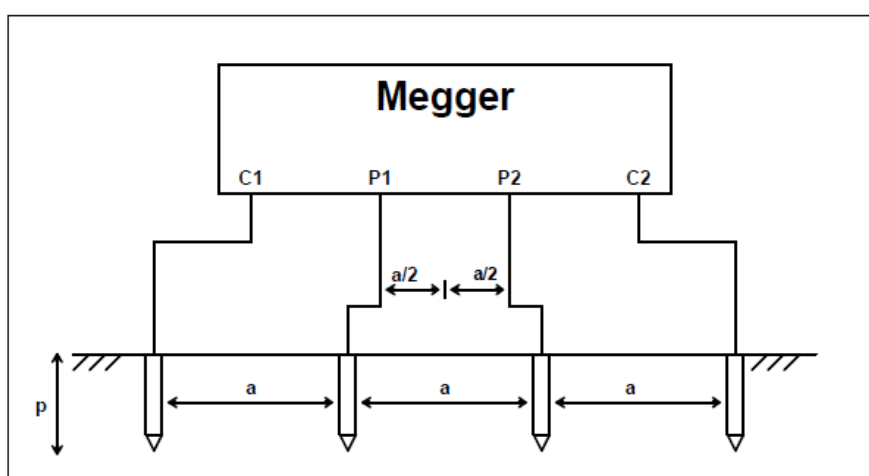


Figura 2.2 - Diagrama de ligações do Megger.

Fonte adaptado pelo autor - (KINDERMANN, 1995).

Onde:

a Distância entre as hastes de medição,

p Profundidade da haste no solo,

C_1 e C_2 Eletrodos de corrente,

P_1 e P_2 Eletrodos de potencial.

O instrumento mostra diretamente o valor calculado de R .

A equação (2.2) que efetua o cálculo da resistividade do solo ρ é vista a seguir.

$$\rho = \frac{4 \pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + (2p)^2}} - \frac{2a}{\sqrt{(2a)^2 + (2p)^2}}} \quad [\Omega m] \quad (2.2)$$

Usada no método de Wenner, a equação (2.2) é conhecida como Fórmula de Palmer.

Se o espaçamento entre as hastes for $a > 20p$, p será desprezível, tendo-se uma simplificação na equação (2.2), como mostrado na equação (2.3).

$$\rho = 2 \pi a R \quad [\Omega m] \quad (2.3)$$

Para o cálculo da resistência de uma haste vertical, tendo-se o comprimento L e o diâmetro em metros, usa-se a equação (2.4).

$$R = \frac{\rho a}{2 \pi L} \ln \left(\frac{4L}{d} \right) \quad (2.4)$$

Onde:

ρa Resistividade aparente do solo em $[\Omega.m]$,

L Comprimento da Haste em $[m]$,

d Diâmetro da Haste $[m]$.

2.11 Compactação e umidade do solo

Tanto em laboratório como em campo, as características hidráulicas do solo é um trabalho demorado e dispendioso, considerando-se as variações das propriedades do mesmo, motivando pesquisadores no desenvolvimento de abordagens preditivas em função de medidas rotineiras do solo (BACCHI, 1996).

A compactação do solo é um processo manual ou mecânico visando à redução de seu volume de vazios e, aumentando assim a resistência mecânica do mesmo, melhorando a permeabilidade e a absorção de água (CAPUTO, 1988).

Por definição, tomando-se a razão entre o peso de água em certo volume de solo, com o peso da parte sólida deste volume multiplicado por 100, tem-se a umidade do solo h expressa em porcentagem, conforme a equação (2.5) (CAPUTO, 1988).

$$h\% = \frac{P_A}{P_S} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Para isto, com o cuidado para não se perder umidade, toma-se o peso de uma amostra de solo úmido P_T , leva-se esta amostra à uma estufa entre 105°C a 110°C até sua completa secagem, pesando-se assim a parte seca P_S . Tem-se assim a equação (2.6) (CAPUTO, 1988).

$$P_A = P_T - P_S \quad (2.6)$$

Onde:

$h\%$ umidade do solo em porcentagem,

P_A peso da água contida na amostra,

P_S peso do solo seco,

P_T peso total da amostra do solo.

2.12 Modelo de sistema de aterramento com impedância

Para a avaliação dos sistemas de aterramento, deve ser considerado que existe uma impedância de aterramento, sendo esta a oposição do solo à uma corrente elétrica aplicada nele, pelos eletrodos, expressa pela relação da tensão e a corrente resultante. O circuito da Figura 2.3 a seguir mostra a condição equivalente de um aterramento (FEIS UNESP, 2016).

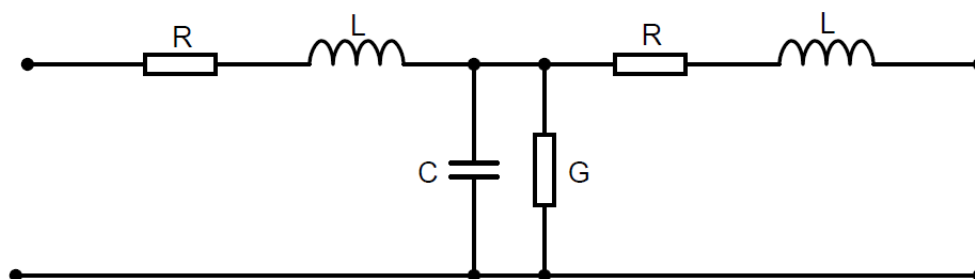


Figura 2.3 - Circuito que representa uma parte do aterramento.

Fonte adaptado (FEIS UNESP, 2016).

Esta impedância pode ser definida como a relação entre a tensão aplicada no solo e a corrente resultante (FEIS UNESP, 2016), como visto a seguir na equação (2.7).

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.7)$$

Onde:

Z impedância calculada,

V tensão aplicada,

I corrente medida.

Por definição, uma reatância capacitiva tende a diminuir em função do aumento da frequência aplicada, conforme se vê na equação (2.8).

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.8)$$

Onde:

X_c valor da reatância capacitiva em ohms,

π valor constante,

f frequência aplicada,

C valor do capacitor em *farad*.

Ao passo que uma reatância indutiva tende a aumentar, com o aumento da frequência aplicada como pode ser visto na equação (2.9) a seguir.

$$X_L = 2\pi f L \quad (2.9)$$

Onde:

X_L valor da reatância indutiva em ohms,

π valor constante,

f frequência aplicada,

L valor do indutor em *henry*.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Modelo Experimental Isolado (MEI)

Inicialmente foi construído o Modelo Experimental Isolado (MEI) por meio de uma cuba plástica retangular de 450 mm de comprimento, 200 mm de largura por 150 mm de profundidade, totalmente isolada de qualquer outra possível fonte de corrente elétrica. Foi adicionada terra do tipo “barro vermelho” e compactada para adição gradativa do volume de água, ao longo dos experimentos.

Para a compactação do solo, foi adicionada água e pressionado manualmente. Dois eletrodos cilíndricos de cobre de 6,35 mm de diâmetro foram inseridos no solo com uma distância fixa de 400 mm entre eles e uma profundidade de 100 mm. Foi adicionado, então, água uniformemente em toda a superfície. Os condutores de ligação foram presos no centro do MEI, fixados com auxílio de um fio de *nylon* preso às laterais da cuba, impedindo assim que não ocorra nenhuma movimentação dos mesmos. O recipiente foi deixado ao sol para secagem e início dos experimentos. Optou-se pela colocação fixa dos eletrodos, para que todos os experimentos não sofressem nenhuma variação de posicionamento, mantendo-se assim sua condutividade em contato com o solo. A Figura 3.1 mostra o MEI construído para esta pesquisa.

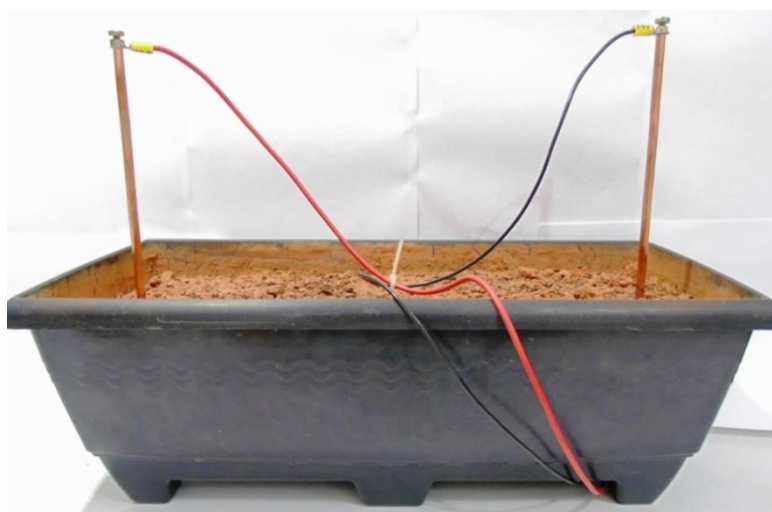


Figura 3.1 - Vista do Modelo Experimental Isolado MEI.

Os materiais para a construção do MEI e do sistema de medidas e

experimentação são listados a seguir:

- 12 kg de terra do tipo barro vermelho (origem de Serra Negra-SP),
- Amplificador de Áudio Cygnus AC500,
- Cuba plástica de 450 mm de comprimento, 200 mm de largura 150 mm de profundidade,
- Dois multímetros *True rms* Hikari modelo HM-2090,
- Dois eletrodos tubulares de cobre de 6,35 mm de diâmetro, 280 mm de comprimento,
- Gerador de funções ICEL Manaus - GV-2002,
- Osciloscópio DSO Nano,
- Plataforma Arduino Uno R3 com micro controlador ATMEGA328P-PU,
- Sensor de umidade e temperatura integrado DHT22 (AM2303),
- Sensor de temperatura DS18B20,
- Módulo Micro-SD para Arduino.

Podem ser vistos no Anexo-1 os endereços eletrônicos dos fabricantes dos equipamentos bem como os endereços eletrônicos dos *Datasheets* dos componentes eletrônicos que foram utilizados neste trabalho.

3.1.2 Circuito para os Experimentos

Foi montado um circuito especial para os experimentos conforme a figura 3.2 a seguir.

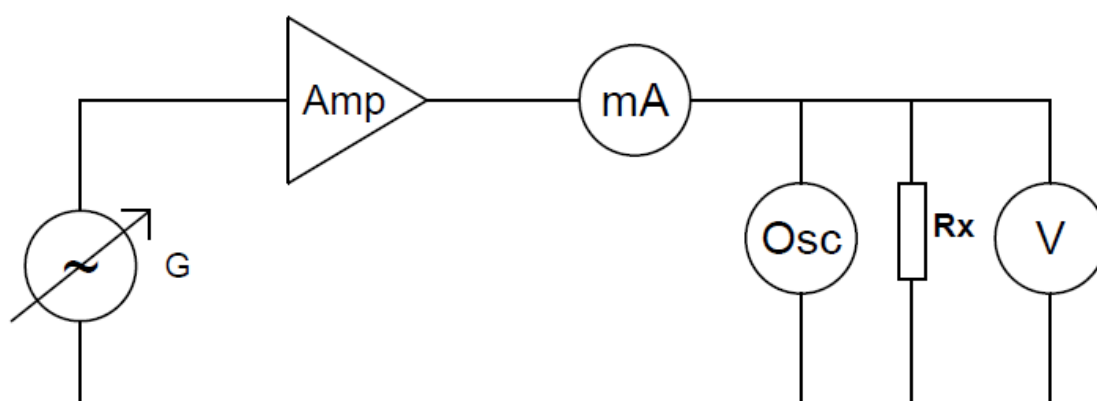


Figura 3.2 - Circuito do Modelo Experimental Isolado MEI.

Onde

- G é o gerador de função senoidal,

- Amp é o amplificador, dos sinais de tensão de frequência variável,
- Osc é o Osciloscópio DSO Nano,
- Rx é a resistência de solo propriamente dita interligada ao circuito através dos eletrodos,
- V e mA os aparelhos de medição de tensão e corrente respectivamente.

Conforme visto na Figura 3.2, um osciloscópio e um voltímetro, colocados em paralelo com Rx, monitoram a forma de onda aplicada e sua amplitude para que não haja nenhuma alteração. A corrente AC medida no miliamperímetro varia em função da variação da frequência aplicada pelo gerador de funções G e da umidade presente.

3.2 Métodos

Para as experiências o gerador de funções G fornecerá a variação da frequência da onda senoidal. Este sinal passa pelo amplificador de áudio Amp para elevar a saída a níveis adequados às medições.

Monitora-se a variação da corrente com o primeiro multímetro na escala de miliampères AC, a variação da tensão com o segundo multímetro na escala de tensão AC e a forma de onda da frequência aplicada com o osciloscópio.

A tensão em Rx deve ser mantida constante e a forma de onda observada não deve apresentar nenhuma deformação.

Adotando-se este modelo experimental isolado (MEI) foram adicionadas quantidades de água e alteração da frequência aplicada entre os eletrodos, para o monitoramento da variação da resistividade.

O posicionamento dos eletrodos inseridos no solo se mantém constante em todos os experimentos, evitando-se assim variações na condutividade do mesmo em relação ao solo.

Como as medições envolvem um longo período de tempo entre a colocação de água e a secagem do solo, ao natural, optou-se por colocar eletrodos cravados no solo e não uma chapa lateral colocada na cuba como visto na Figura 2.1. Foi observado que, com a secagem do solo, existe uma retração das laterais para dentro, levando assim ao afastamento das placas consequentemente diminuindo a condutividade das mesmas, ao passo que o eletrodo cravado se mantém firme no local de inserção. Pode ser visto nas

Figuras 3.3 a e 3.3 b, detalhes dos eletrodos e as laterais do MEI.



3.3 a



3.3 b

Figura 3.3 - Solo seco com eletrodo.

Para impedir a movimentação dos condutores de conexão evitando uma possível alteração na condutividade dos eletrodos com o solo foi colocado suporte de fixação com amarração. A Figura 3.4 mostra esta fixação no centro do MEI com fio de *nylon* preso nas laterais.

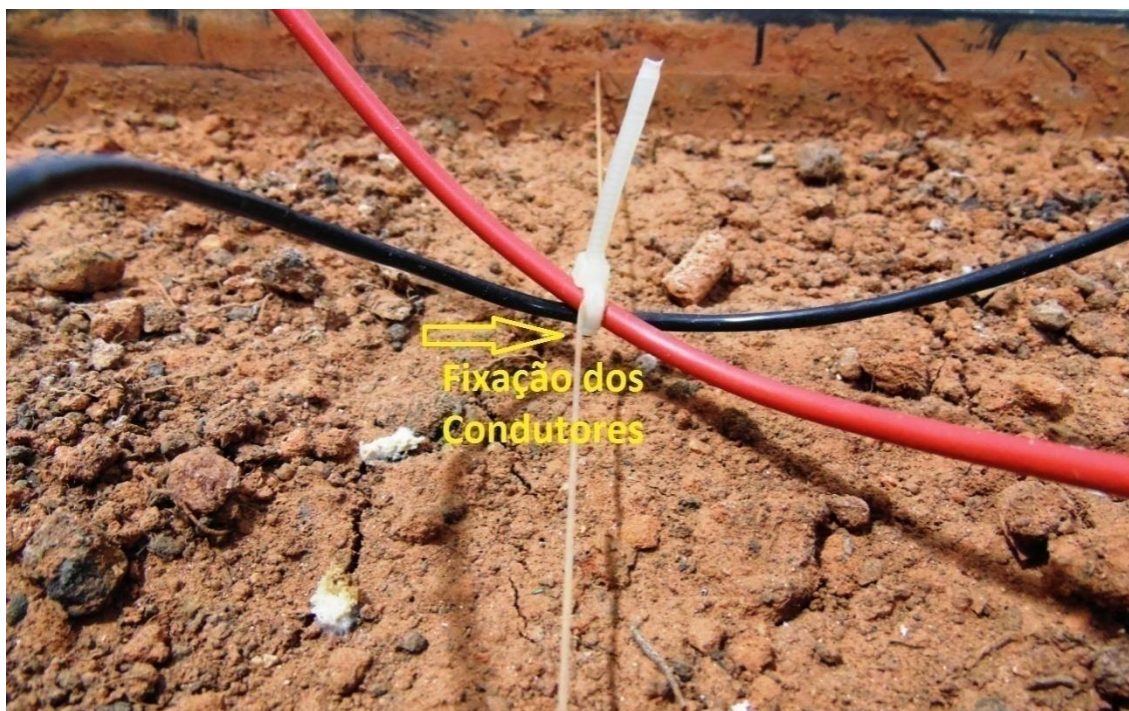


Figura 3.4 - Fixação dos condutores.

O processo envolve o início com solo seco, e aumentando-se a quantidade de água gradativamente verificando-se assim as variações ocorridas.

Para cada adição de água, é aplicada através dos eletrodos uma tensão fixa que é monitorada por um multímetro na escala de tensão AC. Dessa forma

variando-se a frequência faz-se a monitoração, através do outro multímetro na escala de miliampères AC, da corrente que está circulando neste momento.

Uma rosca interna no eletrodo para fixação do parafuso e uma contra porca para aperto do terminal com o eletrodo garantiu uma boa conexão, conforme visto nas Figuras 3.5 a e 3.5 b.



3.5 a



3.5 b

Figura 3.5 - Conexão dos eletrodos.

3.2.1 Ajustes Iniciais

Para que não houvesse correntes da ordem de microampères, houve a necessidade de efetuar um aumento da tensão aplicada, com o amplificador de áudio, visto que o gerador de funções utilizado fornece em sua saída um valor máximo de 3,5 Vrms. Essas tensões foram de 5 a 15 Vrms de acordo com cada experimento.

Foi adotado, como ponto de partida, uma corrente no sistema de 2 mA, visto que valores abaixo são muito instáveis para a leitura e valores acima o solo já apresenta uma certa umidade, conforme visto na Figura 3.6 a seguir.



Figura 3.6 - Condição inicial, solo seco.

Esta condição inicial foi para o solo bem seco, onde se observa uma corrente de 2,1 mA e uma tensão aplicada de 15 Vrms. A frequência aplicada é de 60 Hz.

O valor aplicado para variação da frequência foi de 60 Hz a 3.000 Hz, nos intervalos a cada 60 Hz. Nesta faixa de frequência, o amplificador de áudio responde linearmente.

Pode ser visto na Figura 3.7 a estabilidade do sinal para a frequência máxima aplicada aos experimentos de 3.000 Hz.

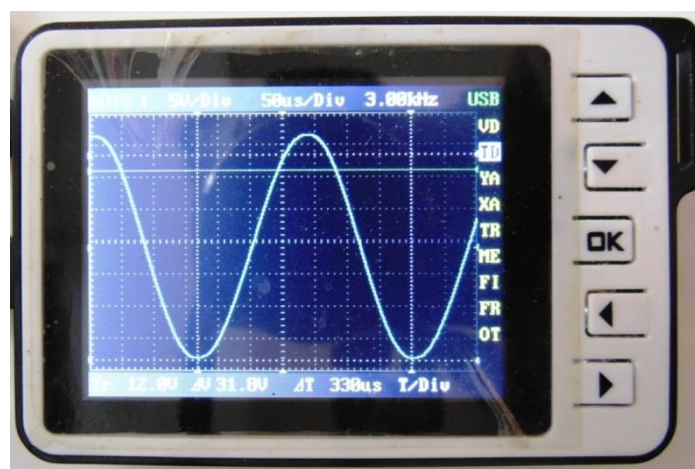


Figura 3.7 - Frequência máxima aplicada.

Uma frequência inicial ajustada em 60 Hz, com uma tensão de 12 VAC, monitorada através de um voltímetro, foi aplicada ao MEI. Foi então anotada a corrente circulando pelo sistema, através do miliamperímetro. Em seguida, elevou-se a frequência para o próximo passo de 120 Hz.

Caso houvesse alguma alteração na tensão monitorada, esta era imediatamente ajustada por meio do gerador de funções, voltando-se ao patamar inicial, anotando-se assim a corrente medida neste novo intervalo de frequência. Os intervalos de medições são a cada 60 Hz, até a frequência de 3.000 Hz, escolhida até a quinquagésima harmônica, tendo-se como base os 60 Hz.

As medições foram efetuadas seguidas uma da outra. Em alguns casos, onde houve a necessidade de ajuste da saída do gerador, foi aguardado um instante a mais para evitar alguma possível variação, anotando-se o valor quando as leituras se tornaram estáveis.

3.2.2 Medições de Temperatura e Umidade

Foi usada uma plataforma de prototipagem Arduino Uno R3 para o monitoramento da temperatura ambiente, umidade ambiente e a temperatura do solo.

Para as medições da temperatura e umidade ambiente, foi implementado um circuito com o sensor DHT22 visto na Figura 3.8 a seguir.



Figura 3.8 - Sensor DHT22 (AM2302).

Para a obtenção da temperatura do solo, foi usado o sensor DS18B20, visto na Figura 3.9 a em forma de sonda. O modelo em formato de componente é visto em 3.9 b



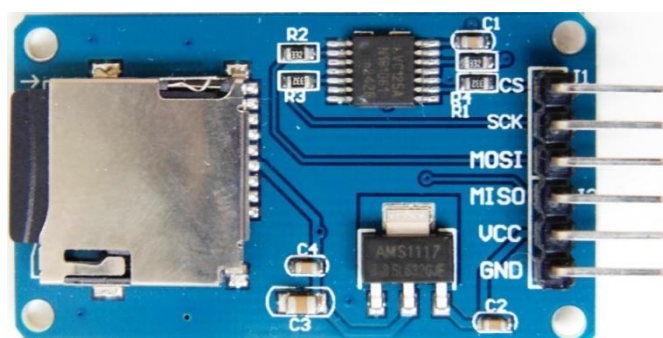
3.9 a



3.9 b

Figura 3.9 - Sensor DS18B20.

Junto com os sensores, tem-se um módulo micro-SD *Secure Digital* para o armazenamento das leituras captadas pelo Arduino, para tratamento futuro dos dados. Pode ser visto na Figura 3.10 a o *slot* com o cartão micro SD em 3.10 b, a seguir.



3.10a



3.10b

Figura 3.10 - Módulo Micro-SD.

A Figura 3.11 a seguir mostra o aspecto de uma placa Arduino UNO R3. Podem ser vistos os conectores que recebem os fios de *jump*, bem como os conectores USB e o de alimentação externa de 9 VDC.



Figura 3.11 - Placa Arduino UNO R3.

Usando-se fios de conexões *jump* foi efetuada a interligação entre os componentes externos (sensores e o módulo micro-SD) com os respectivos pontos de ligação na placa Arduino. Como são conexões não soldadas, os cuidados para um possível mau contato devem ser tomados, bem como as

ligações corretas entre os pontos de ligação evitando-se uma possível queima de algum componente ou da própria placa. Um LED externo foi colocado para visualização do funcionamento do circuito, sendo acionado a cada 2.000 ms, ficando aceso por 50 ms e apagado por 1.950 ms.

O diagrama de ligações entre os sensores, o módulo micro-SD e o Arduino, podem ser vistos na Figura 3.12 a seguir.

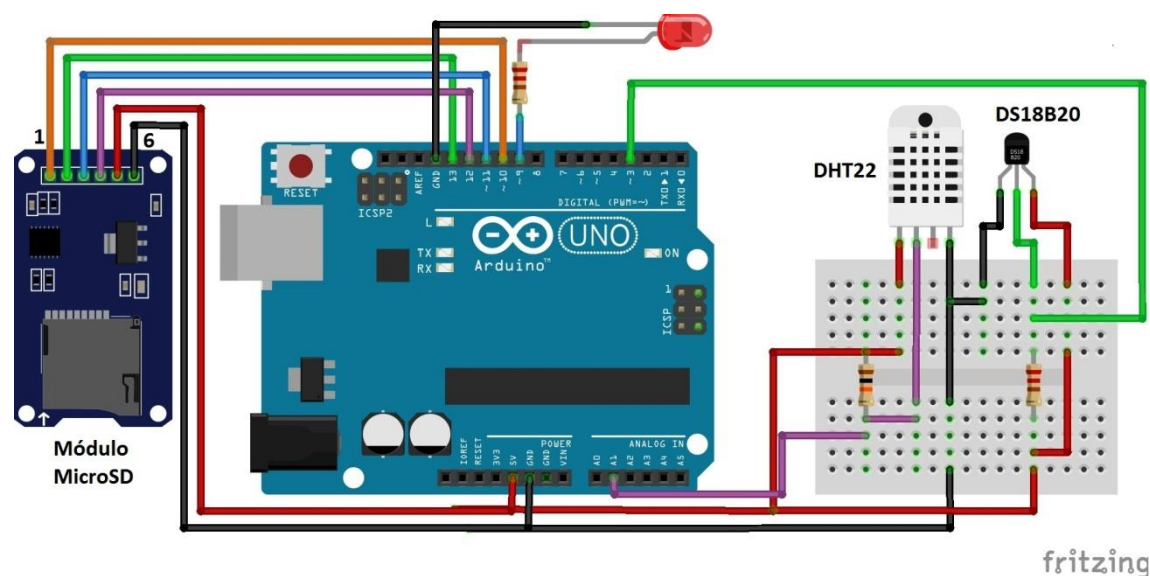


Figura 3.12 - Ligações dos sensores ao Arduino.

Caso o módulo micro-SD esteja presente, a mensagem vista na Figura 3.13 abaixo é impressa no serial monitor, na inicialização do Arduino.

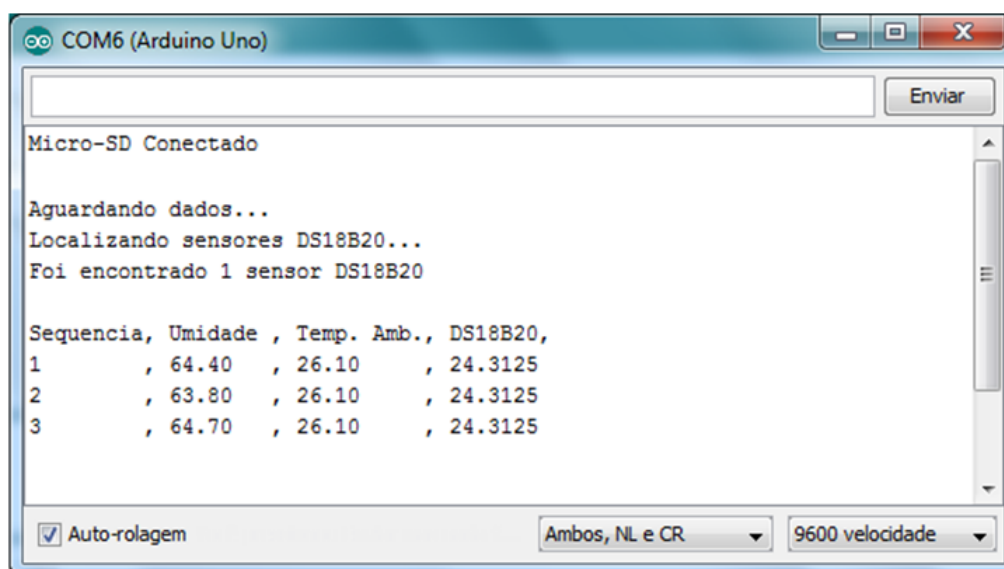


Figura 3.13 - Cartão Micro-SD conectado.

Caso o módulo micro-SD não esteja presente ou apresente algum problema, a mensagem vista na Figura 3.14 abaixo é impressa no serial monitor, na inicialização do Arduino. Isto não impede a leitura dos sensores, porém os dados não serão salvos para utilização futura.

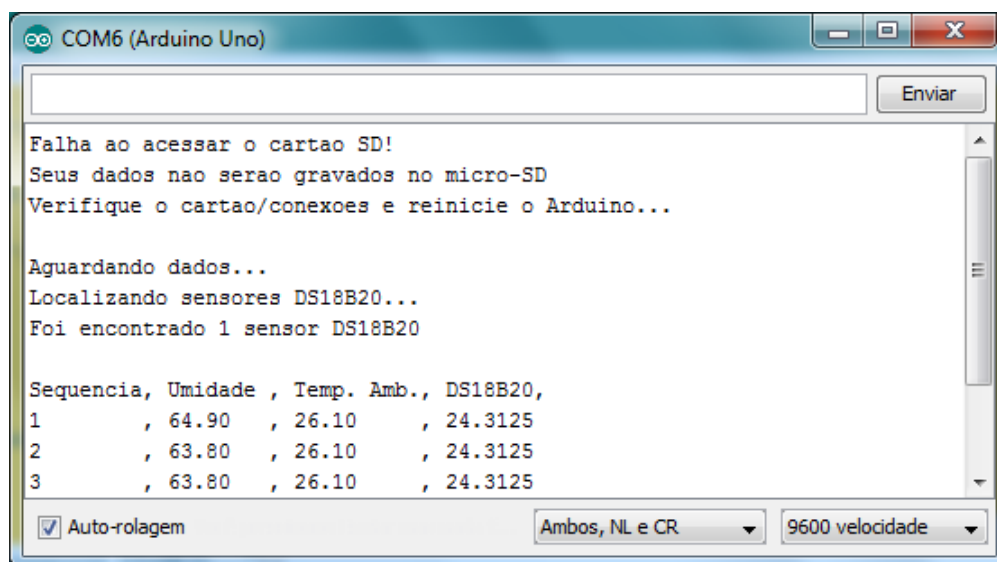


Figura 3.14 - Falha de leitura do Micro-SD.

Para a recuperação dos dados armazenados, a leitura pode ser feita posteriormente usando-se o bloco de notas do Windows ou importar no Excel, como campo separado por vírgula, mostrado na Figura 3.15 a seguir.

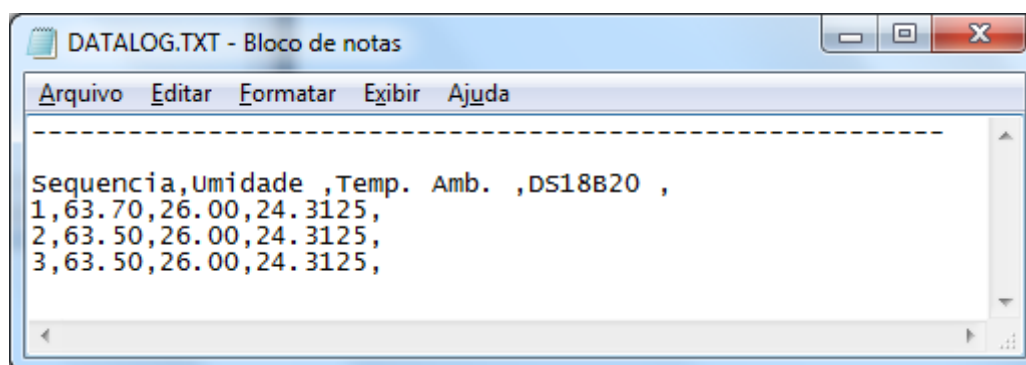


Figura 3.15 - Arquivo de leituras no cartão Micro-SD.

A sonda de temperatura DS18B20 é um componente em encapsulamento plástico tipo TO-92 inserido em um invólucro tubular de aço inox, onde uma parte é fechada e, pela outra, saem os fios de conexão com o componente. Sendo assim, o mesmo é protegido contra umidade podendo até ser submerso

mantendo suas ligações totalmente isoladas, como visto anteriormente na Figura 3.9.

A sonda DS18B20 foi inserida no MEI a uma profundidade de 50 mm, monitorando a temperatura do solo, mostrada na Figura 3.16. Em paralelo um sensor de temperatura e umidade ambiente DHT22, foi colocado próximo do MEI, monitorando a temperatura ambiente e a umidade ambiente.

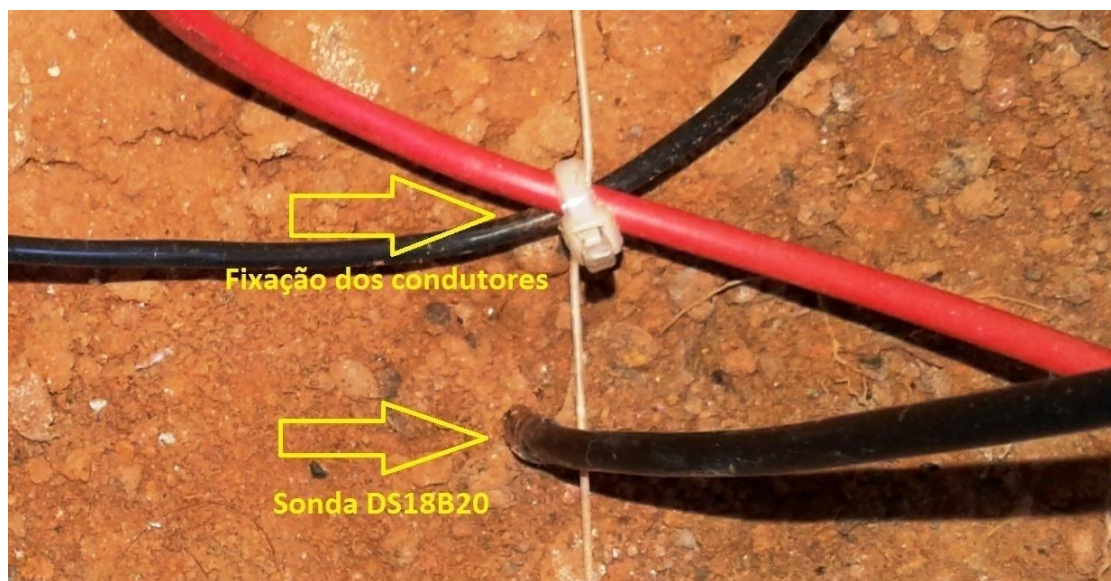


Figura 3.16 - Sonda DS18B20.

O programa que efetua as leituras é descrito no Anexo-2, com detalhes e comentários no próprio programa. No início e no final de cada experimento, são anotadas as referidas temperaturas e a umidade ambiente, sendo observadas através do serial monitor quando o programa está em funcionamento. A média destas leituras é colocada nos respectivos gráficos no canto superior direito.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Validação do Método

Houve a necessidade de comprovação da eficiência do método aplicado, visto que o solo é tratado como uma impedância mista conforme representado na Figura 2.3, envolvendo-se uma parcela resistiva propriamente dita com uma parcela indutiva e uma parcela capacitiva.

Inicialmente foram efetuados vários testes, para encontrar-se um método adequado ao experimento. Verificou-se, assim, que a resistência medida alterava-se com a variação da frequência e da umidade do solo. Com esses dados iniciais, buscando-se uma confiabilidade do sistema, efetuaram-se todos os procedimentos (sem a água) para um resistor de valor fixo.

Foi verificado o resistor, por meio do ohmímetro, encontrando-se um valor real de $8.470 \, \Omega$. Os dados impresso no resistor são de $8.200 \, \Omega$, $8 \, W$ 10% .

Substituindo-se o Rx visto no circuito do MEI pelo resistor de $8.470 \, \Omega$, aplicando-se uma tensão de $5 \, V_{rms}$ em seus terminais e variando-se a frequência aplicada pelo gerador de funções, de $60 \, Hz$ até $3.000 \, Hz$ em intervalos de $60 \, Hz$, levantou-se o gráfico mostrado na Figura 4.1 a seguir.

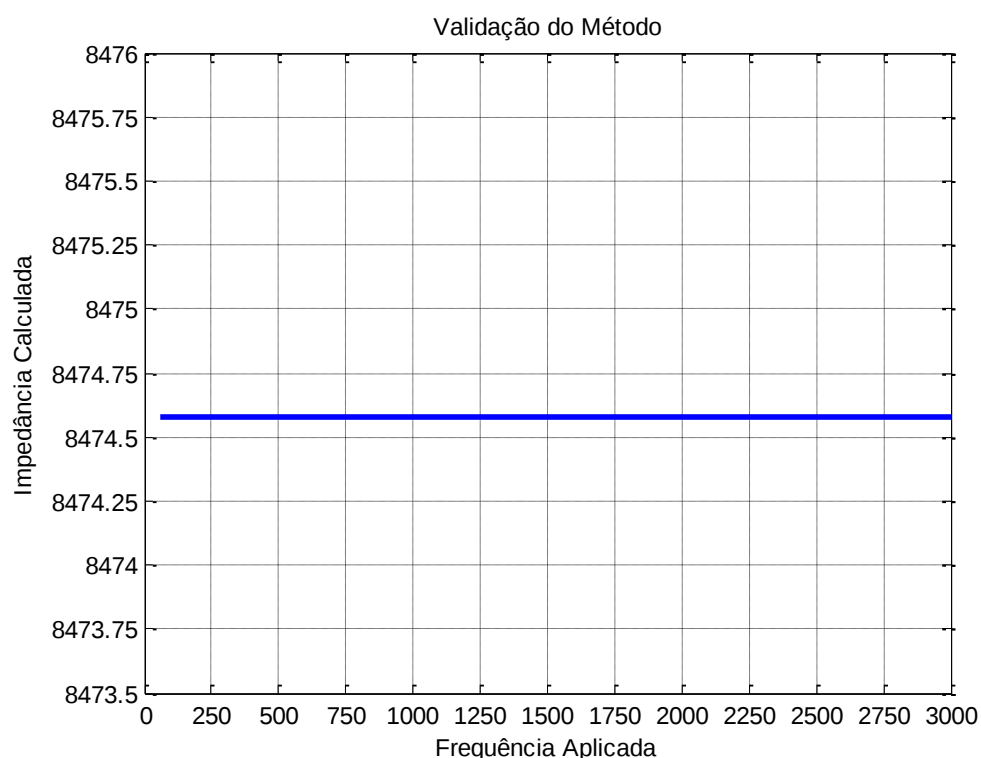


Figura 4.1 - Validação do Método.

Observa-se que o valor de $8474,58 \Omega$ obtido por meio do experimento em toda gama de frequência aplicada, manteve-se constante, validando-se assim o método aplicado.

Pode ser visto na Tabela 4.1 as medições obtidas com o valor de tensão aplicada de 5 Vrms na faixa de frequência entre 60 Hz e 3.000 Hz.

Tabela 4.1 - Validação do Método.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	0,59	8.474,58	660	0,59	8.474,58	1260	0,59	8.474,58	1860	0,59	8.474,58	2460	0,59	8.474,58
120	0,59	8.474,58	720	0,59	8.474,58	1320	0,59	8.474,58	1920	0,59	8.474,58	2520	0,59	8.474,58
180	0,59	8.474,58	780	0,59	8.474,58	1380	0,59	8.474,58	1980	0,59	8.474,58	2580	0,59	8.474,58
240	0,59	8.474,58	840	0,59	8.474,58	1440	0,59	8.474,58	2040	0,59	8.474,58	2640	0,59	8.474,58
300	0,59	8.474,58	900	0,59	8.474,58	1500	0,59	8.474,58	2100	0,59	8.474,58	2700	0,59	8.474,58
360	0,59	8.474,58	960	0,59	8.474,58	1560	0,59	8.474,58	2160	0,59	8.474,58	2760	0,59	8.474,58
420	0,59	8.474,58	1020	0,59	8.474,58	1620	0,59	8.474,58	2220	0,59	8.474,58	2820	0,59	8.474,58
480	0,59	8.474,58	1080	0,59	8.474,58	1680	0,59	8.474,58	2280	0,59	8.474,58	2880	0,59	8.474,58
540	0,59	8.474,58	1140	0,59	8.474,58	1740	0,59	8.474,58	2340	0,59	8.474,58	2940	0,59	8.474,58
600	0,59	8.474,58	1200	0,59	8.474,58	1800	0,59	8.474,58	2400	0,59	8.474,58	3000	0,59	8.474,58

Com a validação do método, iniciaram-se assim todos os experimentos, alterando-se no sistema apenas a quantidade de água adicionada ao solo e a frequência aplicada.

Adotou-se um volume total de 1.250 ml, próximo a 10% em peso referente ao solo utilizado, distribuídos ao longo dos experimentos. A primeira adição, equivalente a 500 ml de água, foi distribuída em duas partes iguais de 250 ml.

Na fase inicial, como o solo estava seco, a água foi adicionada lentamente da lateral para dentro, tomando-se o cuidado de não ultrapassar 150 mm para o centro do MEI. A intenção foi manter-se as laterais úmidas e o centro do MEI seco. Como a cuba tem 450 mm de comprimento e os eletrodos estão distantes 400 mm um do outro, tomou-se como base 150 mm de cada lado, deixando 150 mm central sem água.

Para todos os experimentos a seguir, a água é adicionada lentamente. Após a estabilização da corrente monitorada, foram feitas as leituras variando-se a frequência em intervalos de 60 Hz, anotando-se nas respectivas tabelas os valores de corrente obtidos.

A seguir, têm-se o procedimento individual para cada variação da umidade, da frequência aplicada, as tabelas contendo as respectivas medições

e os gráficos mostrando as variações.

Com exceção da Tabela 3.1 obtida por meio da aplicação de 5 Vrms, da Tabela 3.2 e da Tabela 3.17 obtida por meio da aplicação de 15 Vrms, todas as outras tabelas foram utilizados valores de 12 Vrms.

Após cada adição de água, aguardaram-se, pelo menos, duas horas para que houvesse uma estabilização na corrente medida. Em seguida, com uma tensão de trabalho para o experimento e a frequência inicial em 60 Hz, monitorou-se pelo menos 15 minutos o sistema, verificando-se o miliamperímetro até que houvesse uma leitura constante, para o início das medições.

Em todas as tabelas foi anotado o valor da corrente medida, com o miliamperímetro na escala AC, mantendo-se constante a tensão sobre Rx para cada intervalo de frequência.

O cálculo do valor do Rx obtido é a relação entre a tensão aplicada no experimento e a corrente medida em cada intervalo de frequência.

A seguir serão mostrados os resultados dos experimentos efetuados nesta pesquisa.

4.2 Experimento 1

Tomando-se o MEI contendo o solo seco como descrito anteriormente, aplicou-se uma tensão de 15 Vrms entre os eletrodos. Na Tabela 4.2 têm-se os valores obtidos com a variação da frequência, sendo visualizados na Figura 4.2.

Tabela 4.2 - Início do Experimento - Solo seco.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	2,34	6410,26	660	2,47	6072,87	1260	2,57	5836,58	1860	2,65	5660,38	2460	2,72	5514,71
120	2,37	6329,11	720	2,48	6048,39	1320	2,58	5813,95	1920	2,66	5639,10	2520	2,73	5494,51
180	2,39	6276,15	780	2,49	6024,10	1380	2,59	5791,51	1980	2,67	5617,98	2580	2,74	5474,45
240	2,40	6250,00	840	2,50	6000,00	1440	2,60	5769,23	2040	2,67	5617,98	2640	2,75	5454,55
300	2,41	6224,07	900	2,51	5976,10	1500	2,61	5747,13	2100	2,68	5597,01	2700	2,76	5434,78
360	2,42	6198,35	960	2,52	5952,38	1560	2,61	5747,13	2160	2,69	5576,21	2760	2,76	5434,78
420	2,43	6172,84	1020	2,53	5928,85	1620	2,62	5725,19	2220	2,70	5555,56	2820	2,77	5415,16
480	2,44	6147,54	1080	2,54	5905,51	1680	2,63	5703,42	2280	2,70	5555,56	2880	2,78	5395,68
540	2,45	6122,45	1140	2,55	5882,35	1740	2,64	5681,82	2340	2,71	5535,06	2940	2,78	5395,68
600	2,46	6097,56	1200	2,56	5859,38	1800	2,64	5681,82	2400	2,72	5514,71	3000	2,79	5376,34

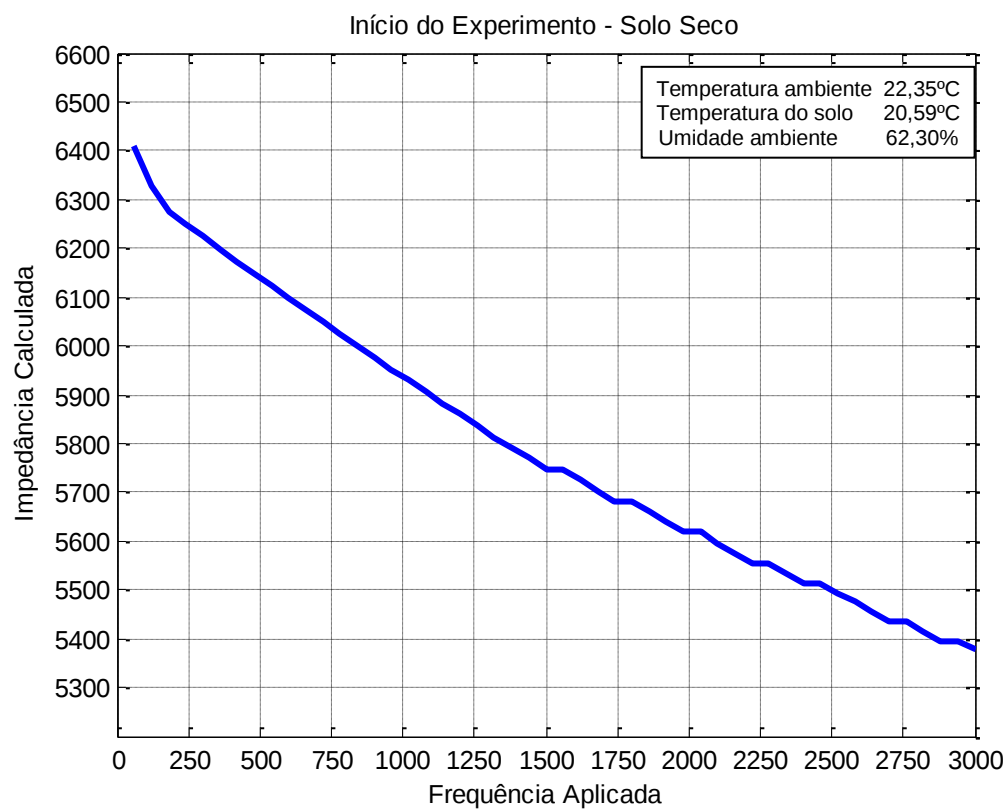


Figura 4.2 - Início do Experimento - Solo seco.

Pode ser visto na Figura 4.3 que o MEI está bem seco. Para o experimento 2 foi adicionado 250 ml de água lentamente em volta de cada eletrodo, para que não houvesse uma dispersão ao longo da superfície.

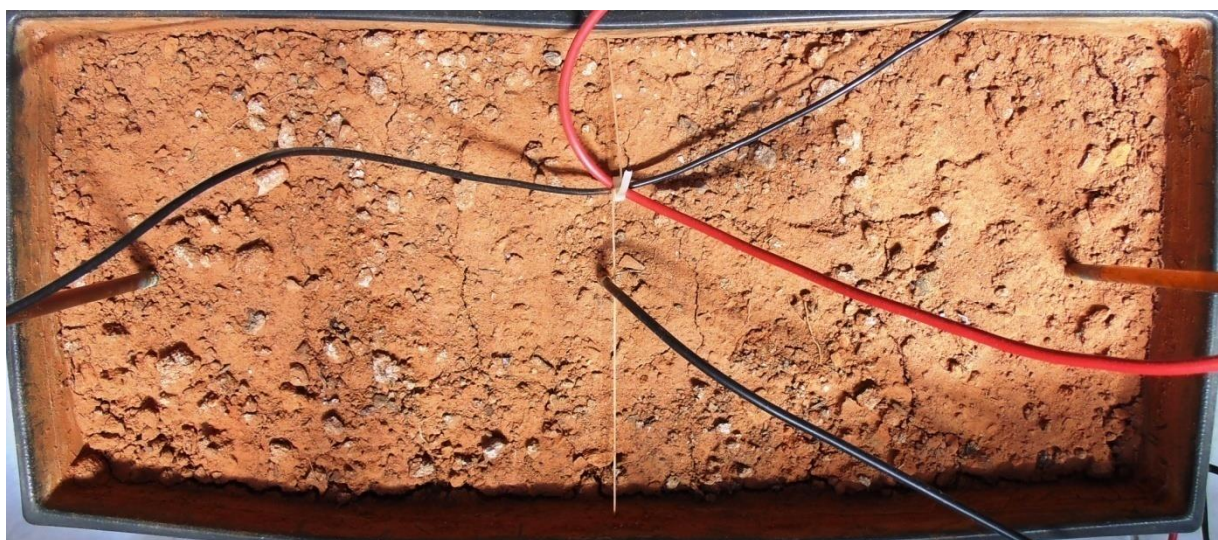


Figura 4.3 - Vista do solo seco.

4.3 Experimento 2

Foi adicionado 250 ml de água em volta de cada eletrodo, mantendo-se o centro do MEI nas condições anteriores. Com a diminuição da área seca, surgindo assim uma parte bem úmida, pode-se observar uma grande variação na resistividade em relação ao experimento anterior, conforme ilustrado na Figura 4.4. A Tabela 4.3 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.3 - Adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	9,95	1206,03	660	10,09	1189,30	1260	10,17	1179,94	1860	10,26	1169,59	2460	10,34	1160,54
120	9,97	1203,61	720	10,10	1188,12	1320	10,18	1178,78	1920	10,27	1168,45	2520	10,35	1159,42
180	9,99	1201,20	780	10,11	1186,94	1380	10,19	1177,63	1980	10,27	1168,45	2580	10,36	1158,30
240	10,01	1198,80	840	10,11	1186,94	1440	10,19	1177,63	2040	10,28	1167,32	2640	10,36	1158,30
300	10,03	1196,41	900	10,12	1185,77	1500	10,20	1176,47	2100	10,28	1167,32	2700	10,37	1157,18
360	10,04	1195,22	960	10,13	1184,60	1560	10,21	1175,32	2160	10,29	1166,18	2760	10,38	1156,07
420	10,05	1194,03	1020	10,13	1184,60	1620	10,22	1174,17	2220	10,30	1165,05	2820	10,39	1154,96
480	10,06	1192,84	1080	10,14	1183,43	1680	10,23	1173,02	2280	10,31	1163,92	2880	10,40	1153,85
540	10,07	1191,66	1140	10,15	1182,27	1740	10,24	1171,88	2340	10,32	1162,79	2940	10,41	1152,74
600	10,09	1189,30	1200	10,16	1181,10	1800	10,25	1170,73	2400	10,33	1161,67	3000	10,42	1151,63

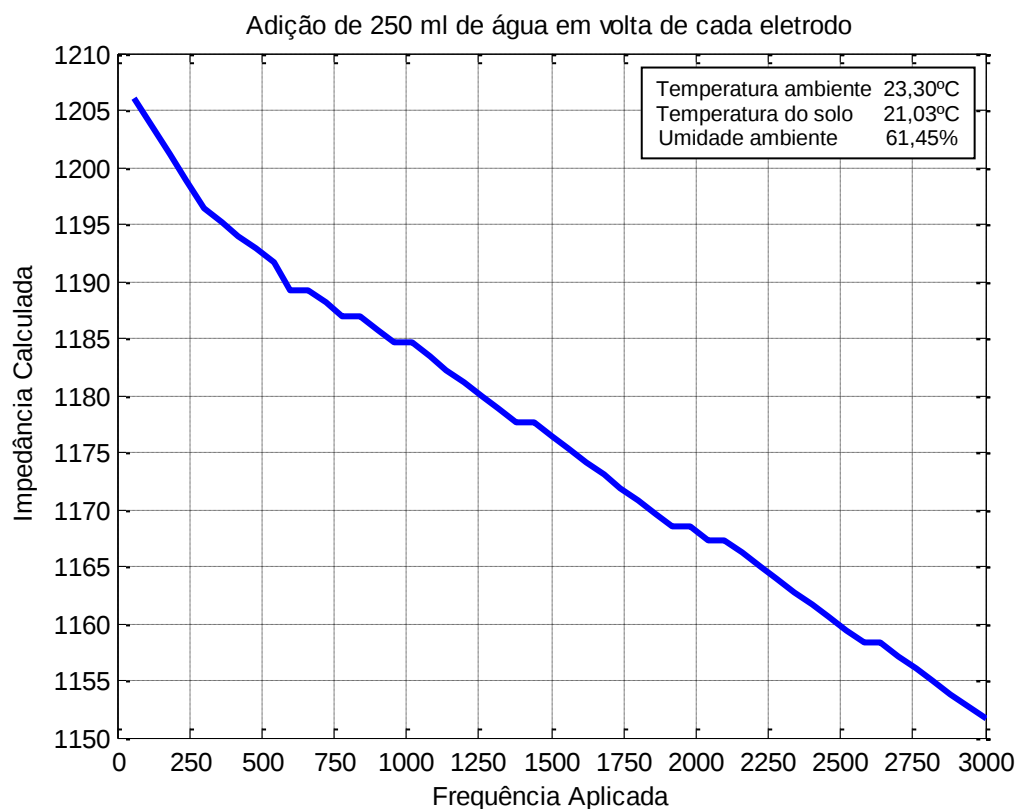


Figura 4.4 - Adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.

Pode ser visto na Figura 4.5 que o centro do MEI foi mantido ainda seco. A adição da água foi feita lentamente em volta de cada eletrodo, para que não houvesse uma dispersão ao longo da superfície.

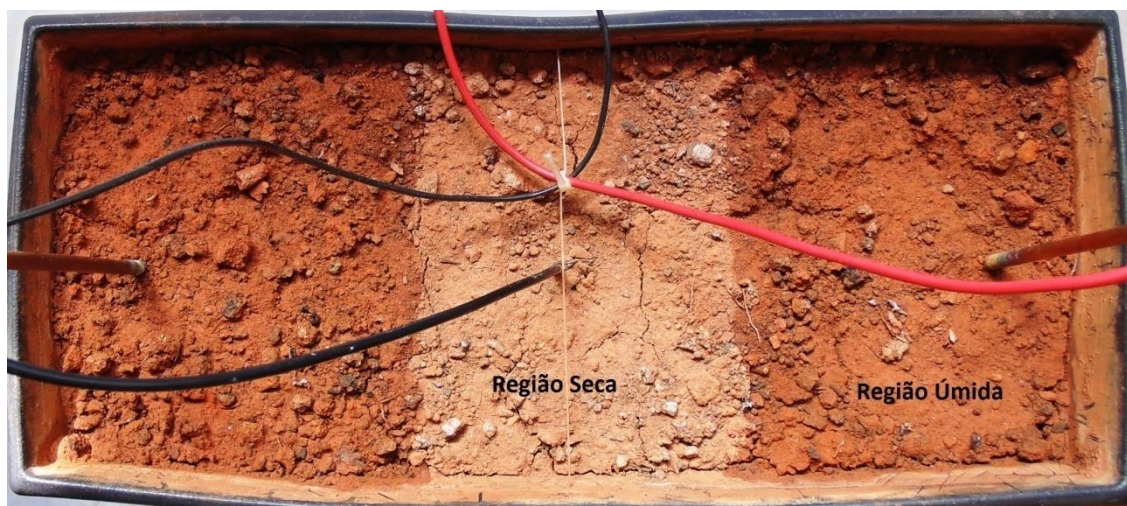


Figura 4.5 - Centro do MEI seco.

Para o próximo experimento, foram aguardadas 24 horas, permitindo assim uma distribuição uniforme da água adicionada.

4.4 Experimento 3

Decorridas 24 horas após a primeira adição de água, repetiu-se as medições, observando-se que a resistividade ainda diminuiu um pouco mais. Isso se deve ao fato que a água espalhou-se ainda mais em direção ao centro da cuba pelo efeito de capilaridade, conforme ilustrado na Figura 4.6. A Tabela 4.4 com os resultados das medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.4 - 24h após a adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	10,66	1125,70	660	10,75	1116,28	1260	10,78	1113,17	1860	10,82	1109,06	2460	10,85	1105,99
120	10,68	1123,60	720	10,75	1116,28	1320	10,79	1112,14	1920	10,82	1109,06	2520	10,86	1104,97
180	10,69	1122,54	780	10,75	1116,28	1380	10,79	1112,14	1980	10,83	1108,03	2580	10,86	1104,97
240	10,70	1121,50	840	10,76	1115,24	1440	10,80	1111,11	2040	10,83	1108,03	2640	10,86	1104,97
300	10,71	1120,45	900	10,76	1115,24	1500	10,80	1111,11	2100	10,83	1108,03	2700	10,87	1103,96
360	10,72	1119,40	960	10,76	1115,24	1560	10,80	1111,11	2160	10,84	1107,01	2760	10,87	1103,96
420	10,73	1118,36	1020	10,76	1115,24	1620	10,80	1111,11	2220	10,84	1107,01	2820	10,87	1103,96
480	10,73	1118,36	1080	10,77	1114,21	1680	10,81	1110,08	2280	10,85	1105,99	2880	10,87	1103,96
540	10,74	1117,32	1140	10,78	1113,17	1740	10,81	1110,08	2340	10,85	1105,99	2940	10,88	1102,94
600	10,75	1116,28	1200	10,78	1113,17	1800	10,82	1109,06	2400	10,85	1105,99	3000	10,88	1102,94

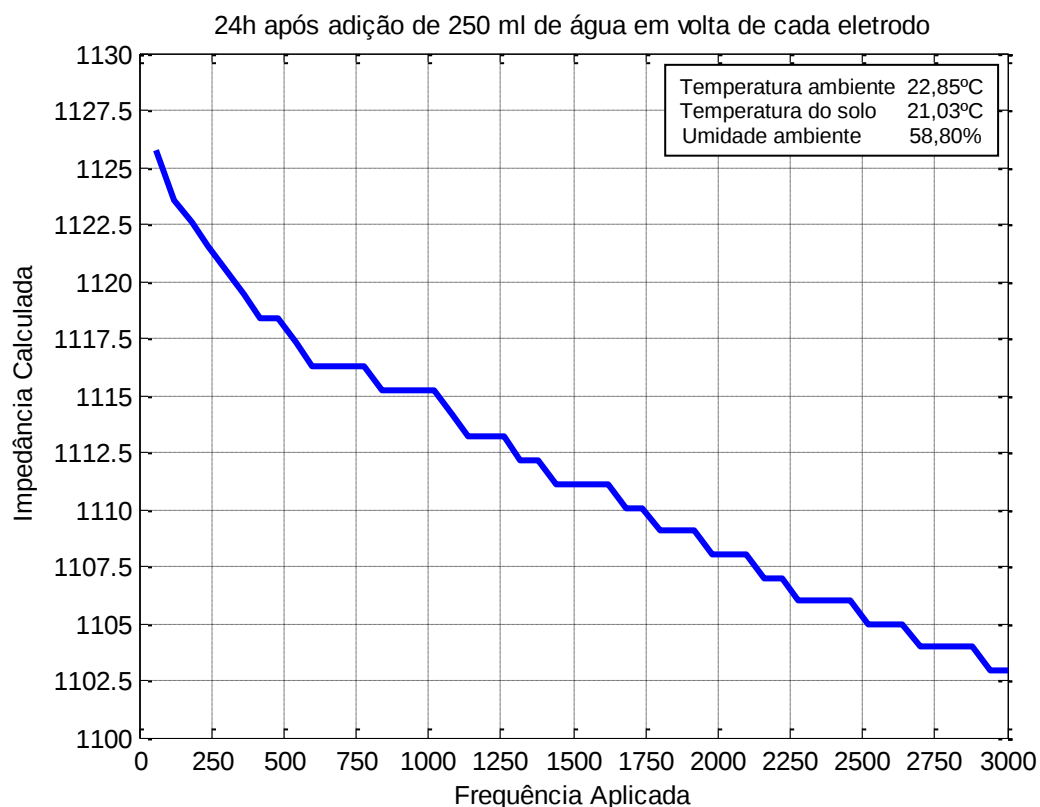


Figura 4.6 - 24h após a adição de 250 ml de água em volta de cada eletrodo.

4.5 Experimento 4

Finalizada as medições do experimento 3, foi adicionado 250 ml de água no centro do MEI, entre os eletrodos, tornando-se úmida toda a superfície. Pode-se observar uma variação maior na resistividade em relação ao experimento 3, conforme ilustrado na Figura 4.7. A Tabela 4.5 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.5 - Adição de 250 ml de água no centro do MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	15,81	759,01	660	16,04	748,13	1260	16,12	744,42	1860	16,22	739,83	2460	16,31	735,74
120	15,87	756,14	720	16,05	747,66	1320	16,13	743,96	1920	16,23	739,37	2520	16,32	735,29
180	15,92	753,77	780	16,06	747,20	1380	16,14	743,49	1980	16,24	738,92	2580	16,34	734,39
240	15,94	752,82	840	16,06	747,20	1440	16,15	743,03	2040	16,25	738,46	2640	16,36	733,50
300	15,97	751,41	900	16,07	746,73	1500	16,16	742,57	2100	16,26	738,01	2700	16,37	733,05
360	15,98	750,94	960	16,08	746,27	1560	16,17	742,12	2160	16,26	738,01	2760	16,39	732,15
420	15,99	750,47	1020	16,09	745,80	1620	16,18	741,66	2220	16,27	737,55	2820	16,40	731,71
480	16,00	750,00	1080	16,10	745,34	1680	16,19	741,20	2280	16,28	737,10	2880	16,42	730,82
540	16,02	749,06	1140	16,11	744,88	1740	16,20	740,74	2340	16,29	736,65	2940	16,43	730,37
600	16,03	748,60	1200	16,11	744,88	1800	16,21	740,28	2400	16,30	736,20	3000	16,44	729,93

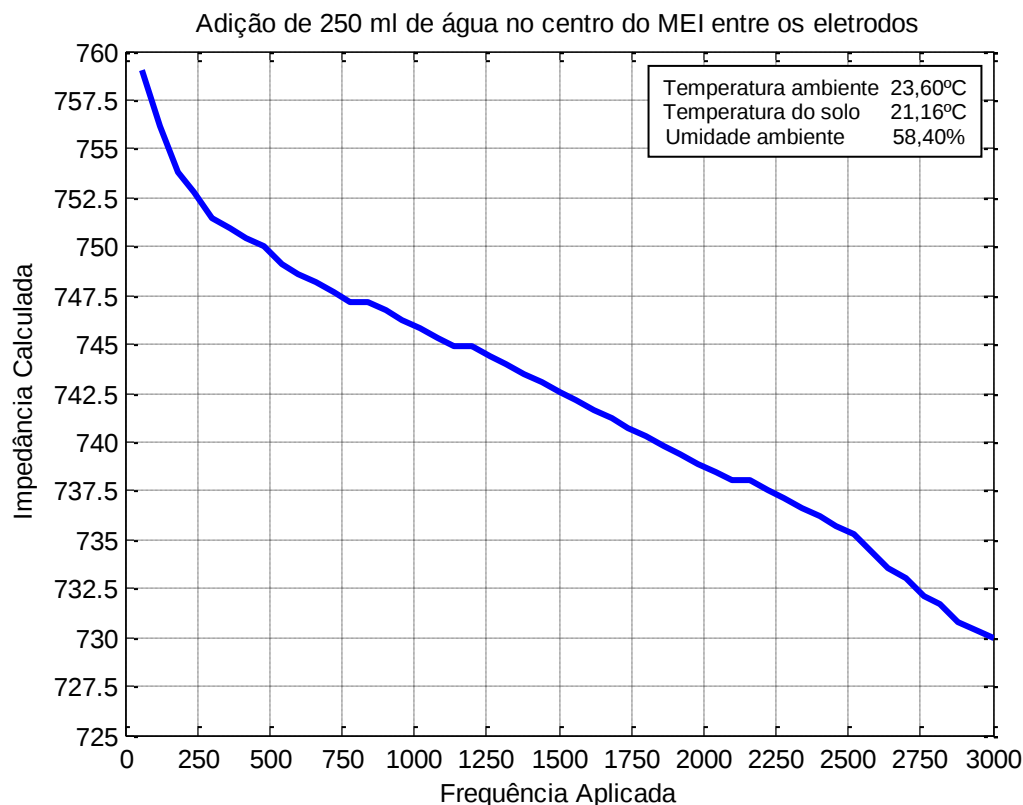


Figura 4.7 - Adição de 250 ml de água no centro do MEI.

4.6 Experimento 5

Decorridas 24 horas após a adição de água no experimento 4, foram efetuadas novas medições. Verificou-se que a variação agora não foi muito grande, devido ao solo estar totalmente úmido, conforme ilustrado na Figura 4.8. A Tabela 4.6 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.6 - 24h após adição de 250 ml de água no centro do MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	15,45	776,70	660	15,59	769,72	1260	15,66	766,28	1860	15,72	763,36	2460	15,77	760,94
120	15,48	775,19	720	15,60	769,23	1320	15,66	766,28	1920	15,73	762,87	2520	15,78	760,46
180	15,51	773,69	780	15,61	768,74	1380	15,67	765,79	1980	15,73	762,87	2580	15,78	760,46
240	15,52	773,20	840	15,61	768,74	1440	15,67	765,79	2040	15,73	762,87	2640	15,79	759,97
300	15,54	772,20	900	15,62	768,25	1500	15,68	765,31	2100	15,74	762,39	2700	15,79	759,97
360	15,55	771,70	960	15,63	767,75	1560	15,68	765,31	2160	15,74	762,39	2760	15,80	759,49
420	15,56	771,21	1020	15,63	767,75	1620	15,69	764,82	2220	15,75	761,90	2820	15,80	759,49
480	15,57	770,71	1080	15,64	767,26	1680	15,70	764,33	2280	15,75	761,90	2880	15,81	759,01
540	15,58	770,22	1140	15,65	766,77	1740	15,70	764,33	2340	15,76	761,42	2940	15,82	758,53
600	15,58	770,22	1200	15,65	766,77	1800	15,71	763,84	2400	15,77	760,94	3000	15,83	758,05

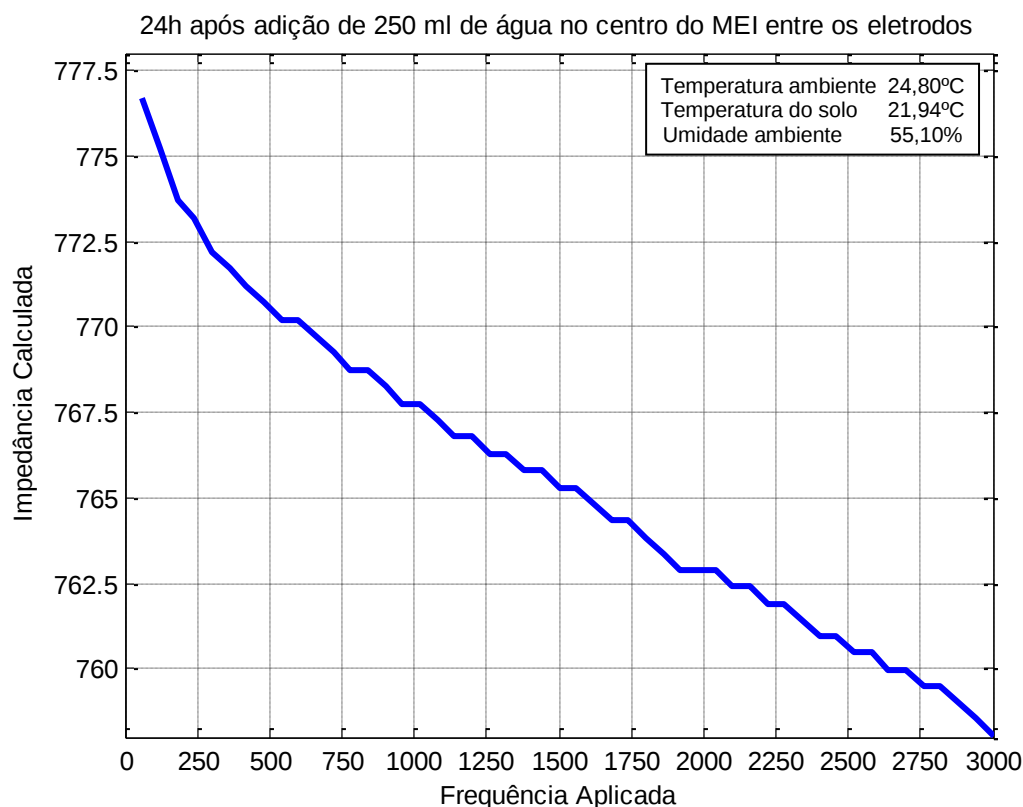


Figura 4.8 - 24h após adição de 250 ml de água no centro do MEI.

4.7 Experimento 6

Finalizada as medições do experimento 5, foi adicionado 250 ml de água em todo o MEI, espalhando-se por toda a superfície, anotando-se as novas leituras. Pode-se observar que a variação da resistência foi pequena conforme mostra a Figura 4.9. A Tabela 4.7 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.7 - Adição de 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	20,78	577,48	660	20,96	572,52	1260	21,02	570,88	1860	21,06	569,80	2460	21,10	568,72
120	20,82	576,37	720	20,96	572,52	1320	21,03	570,61	1920	21,06	569,80	2520	21,10	568,72
180	20,85	575,54	780	20,97	572,25	1380	21,03	570,61	1980	21,07	569,53	2580	21,11	568,45
240	20,87	574,99	840	20,97	572,25	1440	21,03	570,61	2040	21,07	569,53	2640	21,11	568,45
300	20,89	574,44	900	20,98	571,97	1500	21,04	570,34	2100	21,07	569,53	2700	21,11	568,45
360	20,90	574,16	960	20,98	571,97	1560	21,04	570,34	2160	21,08	569,26	2760	21,11	568,45
420	20,92	573,61	1020	20,99	571,70	1620	21,04	570,34	2220	21,08	569,26	2820	21,12	568,18
480	20,93	573,34	1080	21,00	571,43	1680	21,05	570,07	2280	21,09	568,99	2880	21,12	568,18
540	20,94	573,07	1140	21,01	571,16	1740	21,05	570,07	2340	21,09	568,99	2940	21,13	567,91
600	20,95	572,79	1200	21,02	570,88	1800	21,05	570,07	2400	21,09	568,99	3000	21,13	567,91

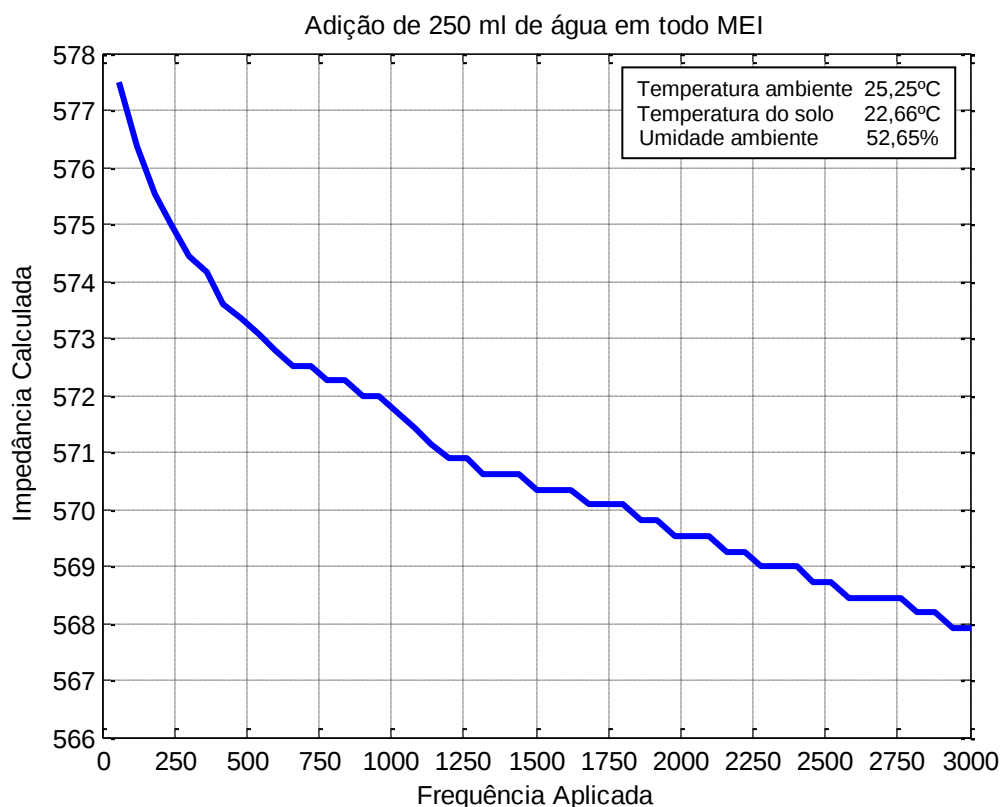


Figura 4.9 - Adição de 250 ml de água em todo MEI.

4.8 Experimento 7

Decorridas 24 horas após a adição de água no experimento 6, foram efetuadas novas medições. Observou-se ainda uma pequena variação, devido ao solo estar totalmente úmido, conforme mostra a Figura 4.10. A Tabela 4.8 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.8 - 24h após adição de 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	19,12	627,62	660	19,29	622,08	1260	19,36	619,83	1860	19,42	617,92	2460	12,49	960,77
120	19,16	626,30	720	19,30	621,76	1320	19,37	619,51	1920	19,42	617,92	2520	12,49	960,77
180	19,19	625,33	780	19,31	621,44	1380	19,37	619,51	1980	19,42	617,92	2580	19,50	615,38
240	19,21	624,67	840	19,31	621,44	1440	19,38	619,20	2040	19,43	617,60	2640	19,50	615,38
300	19,22	624,35	900	19,32	621,12	1500	19,38	619,20	2100	19,44	617,28	2700	19,51	615,07
360	19,24	623,70	960	19,33	620,80	1560	19,39	618,88	2160	19,45	616,97	2760	19,51	615,07
420	19,24	623,70	1020	19,34	620,48	1620	19,39	618,88	2220	19,46	616,65	2820	19,52	614,75
480	19,25	623,38	1080	19,34	620,48	1680	19,40	618,56	2280	19,47	616,33	2880	19,52	614,75
540	19,27	622,73	1140	19,35	620,16	1740	19,41	618,24	2340	19,47	616,33	2940	19,53	614,44
600	19,28	622,41	1200	19,35	620,16	1800	19,41	618,24	2400	19,48	616,02	3000	19,53	614,44

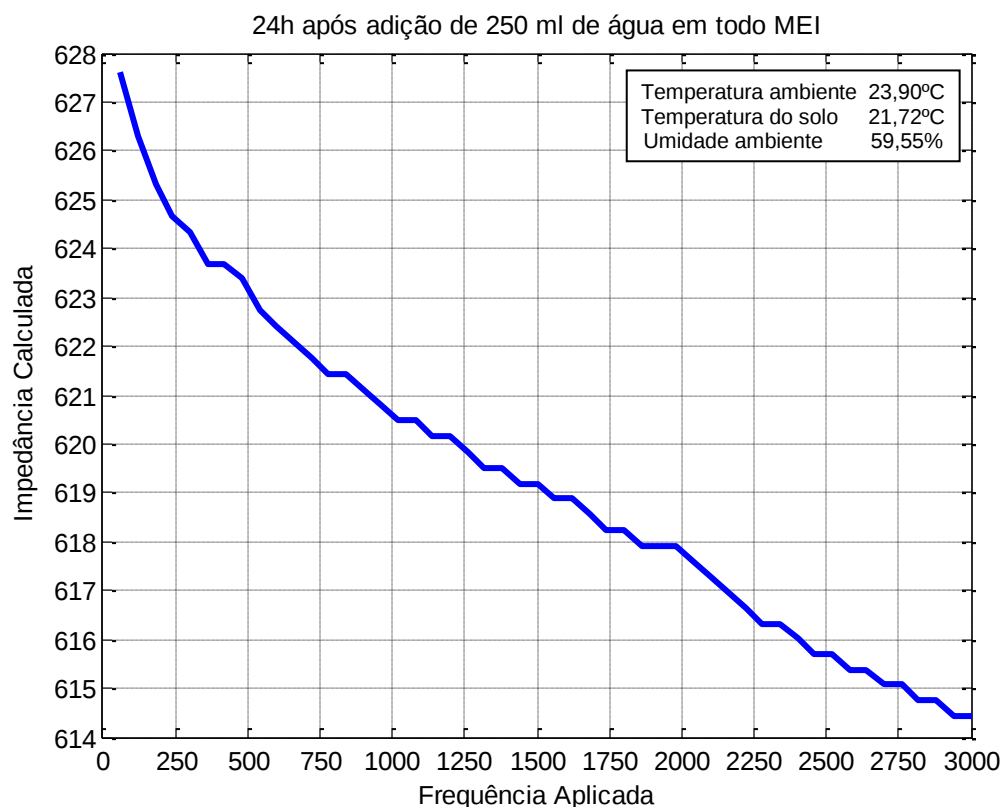


Figura 4.10 - 24h após adição de 250 ml de água em todo MEI.

4.9 Experimento 8

Finalizada as medições do experimento 7, estando o solo aparentemente encharcado, foi adicionado mais 250 ml de água em todo o MEI, espalhando-se pela superfície. Após as medições, notou-se que ainda houve uma variação pequena, diminuindo assim o valor da resistência, conforme mostra a Figura 4.11. A Tabela 4.9 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.9 - Adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	23,57	509,12	660	23,78	504,63	1260	23,85	503,14	1860	23,92	501,67	2460	24,00	500,00
120	23,63	507,83	720	23,79	504,41	1320	23,86	502,93	1920	23,92	501,67	2520	24,01	499,79
180	23,66	507,19	780	23,80	504,20	1380	23,87	502,72	1980	23,93	501,46	2580	24,02	499,58
240	23,68	506,76	840	23,81	503,99	1440	23,88	502,51	2040	23,94	501,25	2640	24,02	499,58
300	23,70	506,33	900	23,82	503,78	1500	23,89	502,30	2100	23,95	501,04	2700	24,03	499,38
360	23,72	505,90	960	23,82	503,78	1560	23,89	502,30	2160	23,96	500,83	2760	24,04	499,17
420	23,74	505,48	1020	23,83	503,57	1620	23,90	502,09	2220	23,97	500,63	2820	24,04	499,17
480	23,75	505,26	1080	23,83	503,57	1680	23,90	502,09	2280	23,98	500,42	2880	24,05	498,96
540	23,77	504,84	1140	23,84	503,36	1740	23,91	501,88	2340	23,98	500,42	2940	24,06	498,75
600	23,77	504,84	1200	23,84	503,36	1800	23,91	501,88	2400	23,99	500,21	3000	24,07	498,55

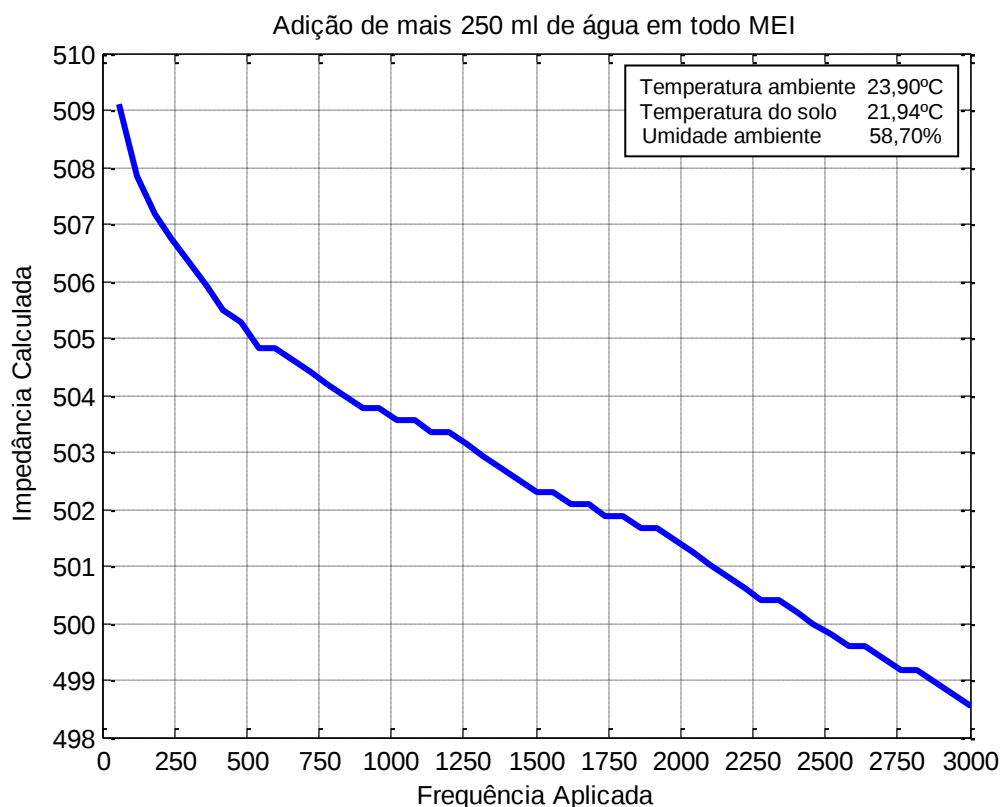


Figura 4.11 - Adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.10 Experimento 9

Decorridas 24 horas após a última adição de água no experimento 8 (a partir daqui, não se adicionou mais água), foram efetuadas novas medições, constatando-se que a variação foi muito pequena, conforme mostra a Figura 4.12. A Tabela 4.10 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.10 - 24h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	24,80	483,87	660	24,96	480,77	1260	25,01	479,81	1860	25,06	478,85	2460	25,12	477,71
120	24,84	483,09	720	24,97	480,58	1320	25,01	479,81	1920	25,07	478,66	2520	25,12	477,71
180	24,87	482,51	780	24,97	480,58	1380	25,02	479,62	1980	25,07	478,66	2580	25,13	477,52
240	24,89	482,12	840	24,98	480,38	1440	25,02	479,62	2040	25,08	478,47	2640	25,13	477,52
300	24,90	481,93	900	24,98	480,38	1500	25,03	479,42	2100	25,08	478,47	2700	25,14	477,33
360	24,92	481,54	960	24,99	480,19	1560	25,04	479,23	2160	25,09	478,28	2760	25,15	477,14
420	24,93	481,35	1020	24,99	480,19	1620	25,04	479,23	2220	25,09	478,28	2820	25,16	476,95
480	24,94	481,15	1080	25,00	480,00	1680	25,05	479,04	2280	25,10	478,09	2880	25,16	476,95
540	24,94	481,15	1140	25,00	480,00	1740	25,05	479,04	2340	25,11	477,90	2940	25,17	476,76
600	24,96	480,77	1200	25,00	480,00	1800	25,06	478,85	2400	25,12	477,71	3000	25,17	476,76

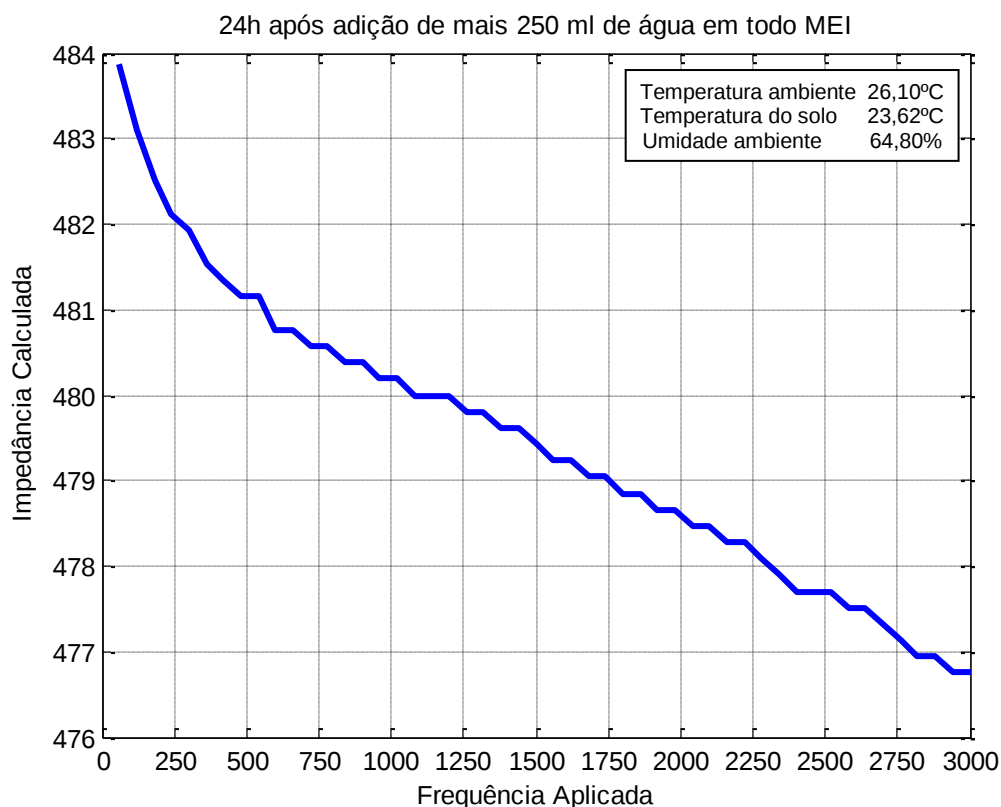


Figura 4.12 - 24h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.11 Experimento 10

Decorridas 48 horas do experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência já começou a subir, indicando a perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.13. A Tabela 4.11 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.11 - 48h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	21,52	557,62	660	21,66	554,02	1260	21,71	552,74	1860	21,76	551,47	2460	21,81	550,21
120	21,56	556,59	720	21,67	553,76	1320	21,72	552,49	1920	21,77	551,22	2520	21,82	549,95
180	21,57	556,33	780	21,67	553,76	1380	21,72	552,49	1980	21,77	551,22	2580	21,82	549,95
240	21,59	555,81	840	21,68	553,51	1440	21,73	552,23	2040	21,78	550,96	2640	21,83	549,70
300	21,60	555,56	900	21,68	553,51	1500	21,73	552,23	2100	21,78	550,96	2700	21,84	549,45
360	21,62	555,04	960	21,69	553,25	1560	21,74	551,98	2160	21,79	550,71	2760	21,84	549,45
420	21,63	554,79	1020	21,69	553,25	1620	21,74	551,98	2220	21,79	550,71	2820	21,85	549,20
480	21,64	554,53	1080	21,70	553,00	1680	21,75	551,72	2280	21,80	550,46	2880	21,85	549,20
540	21,64	554,53	1140	21,70	553,00	1740	21,75	551,72	2340	21,80	550,46	2940	21,86	548,95
600	21,66	554,02	1200	21,71	552,74	1800	21,76	551,47	2400	21,81	550,21	3000	21,86	548,95

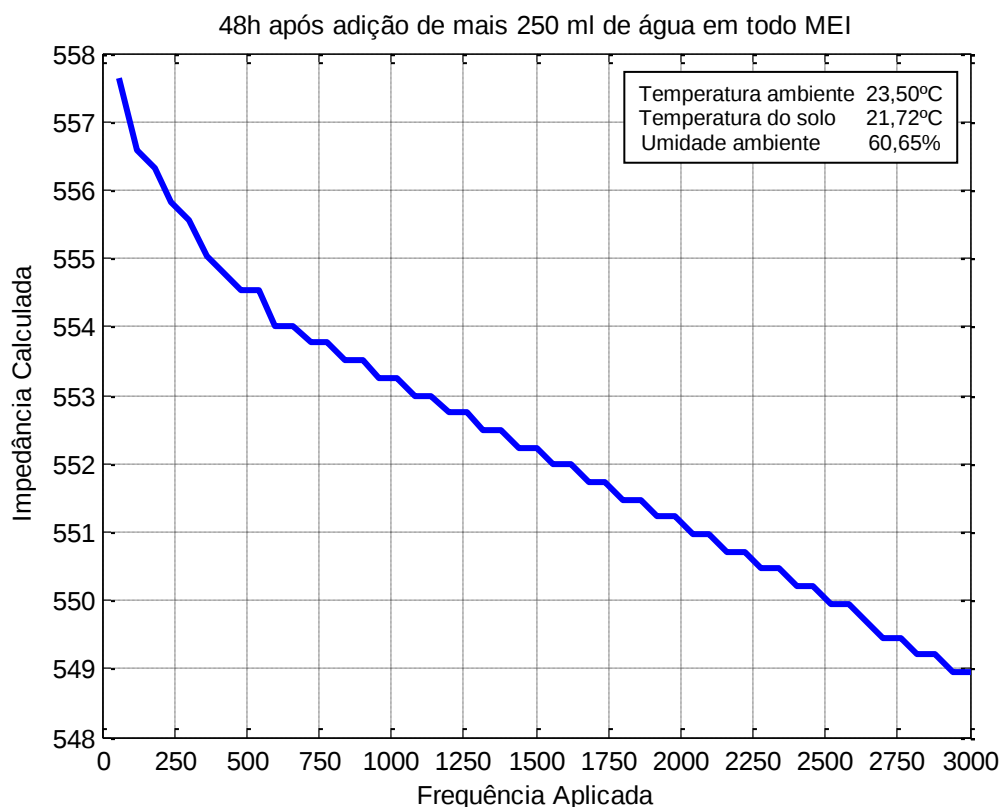


Figura 4.13 - 48h após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.12 Experimento 11

Decorridos 4 (quatro) dias após o experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência continuou subindo, indicando a perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.14. A Tabela 4.12 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.12 - 4 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	18,37	653,24	660	18,52	647,95	1260	18,57	646,20	1860	18,62	644,47	2460	18,67	642,74
120	18,41	651,82	720	18,53	647,60	1320	18,58	645,86	1920	18,63	644,12	2520	18,67	642,74
180	18,43	651,11	780	18,53	647,60	1380	18,58	645,86	1980	18,63	644,12	2580	18,68	642,40
240	18,45	650,41	840	18,54	647,25	1440	18,59	645,51	2040	18,64	643,78	2640	18,68	642,40
300	18,46	650,05	900	18,54	647,25	1500	18,59	645,51	2100	18,64	643,78	2700	18,69	642,05
360	18,48	649,35	960	18,55	646,90	1560	18,60	645,16	2160	18,65	643,43	2760	18,69	642,05
420	18,49	649,00	1020	18,55	646,90	1620	18,60	645,16	2220	18,65	643,43	2820	18,70	641,71
480	18,49	649,00	1080	18,56	646,55	1680	18,61	644,81	2280	18,66	643,09	2880	18,70	641,71
540	18,50	648,65	1140	18,56	646,55	1740	18,61	644,81	2340	18,66	643,09	2940	18,71	641,37
600	18,51	648,30	1200	18,57	646,20	1800	18,62	644,47	2400	18,66	643,09	3000	18,71	641,37

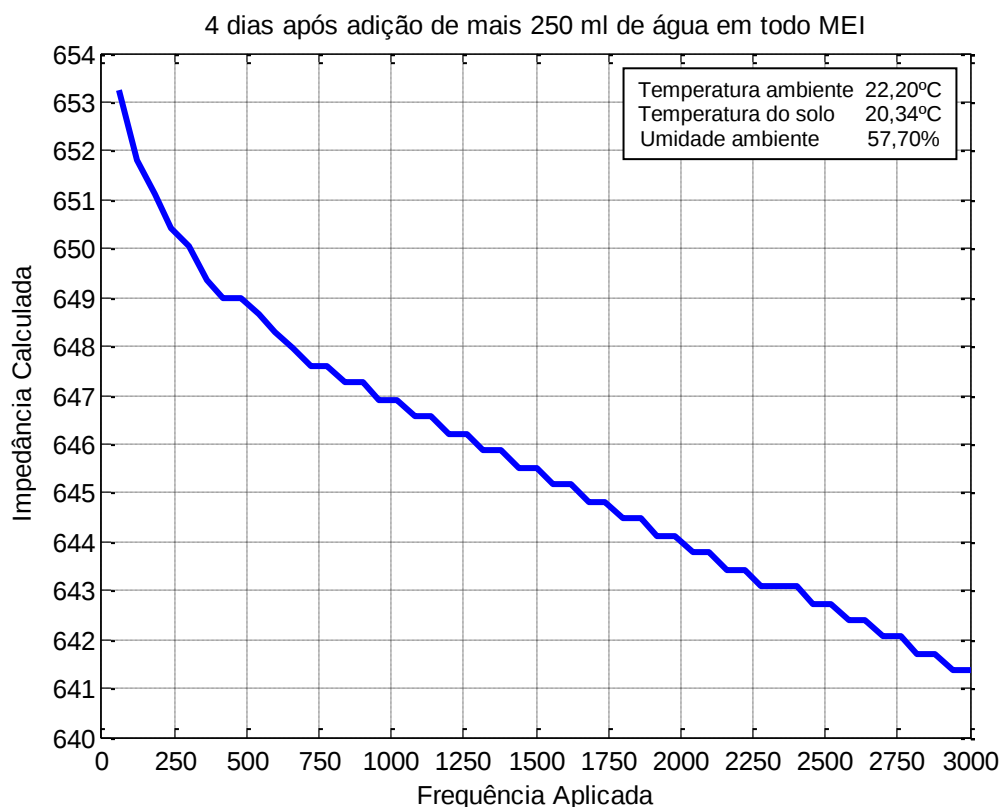


Figura 4.14 - 4 Dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.13 Experimento 12

Decorridos 8 (oito) dias após o experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência ainda continuou subindo, indicando a grande perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.15. A Tabela 4.13 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.13 - 8 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	12,12	990,10	660	12,22	982,00	1260	12,25	979,59	1860	12,27	978,00	2460	12,30	975,61
120	12,15	987,65	720	12,22	982,00	1320	12,25	979,59	1920	12,28	977,20	2520	12,31	974,82
180	12,17	986,03	780	12,22	982,00	1380	12,25	979,59	1980	12,28	977,20	2580	12,31	974,82
240	12,18	985,22	840	12,23	981,19	1440	12,26	978,79	2040	12,28	977,20	2640	12,31	974,82
300	12,18	985,22	900	12,23	981,19	1500	12,26	978,79	2100	12,28	977,20	2700	12,31	974,82
360	12,19	984,41	960	12,23	981,19	1560	12,26	978,79	2160	12,29	976,40	2760	12,32	974,03
420	12,19	984,41	1020	12,24	980,39	1620	12,26	978,79	2220	12,29	976,40	2820	12,32	974,03
480	12,20	983,61	1080	12,24	980,39	1680	12,27	978,00	2280	12,29	976,40	2880	12,32	974,03
540	12,21	982,80	1140	12,24	980,39	1740	12,27	978,00	2340	12,30	975,61	2940	12,33	973,24
600	12,21	982,80	1200	12,25	979,59	1800	12,27	978,00	2400	12,30	975,61	3000	12,33	973,24

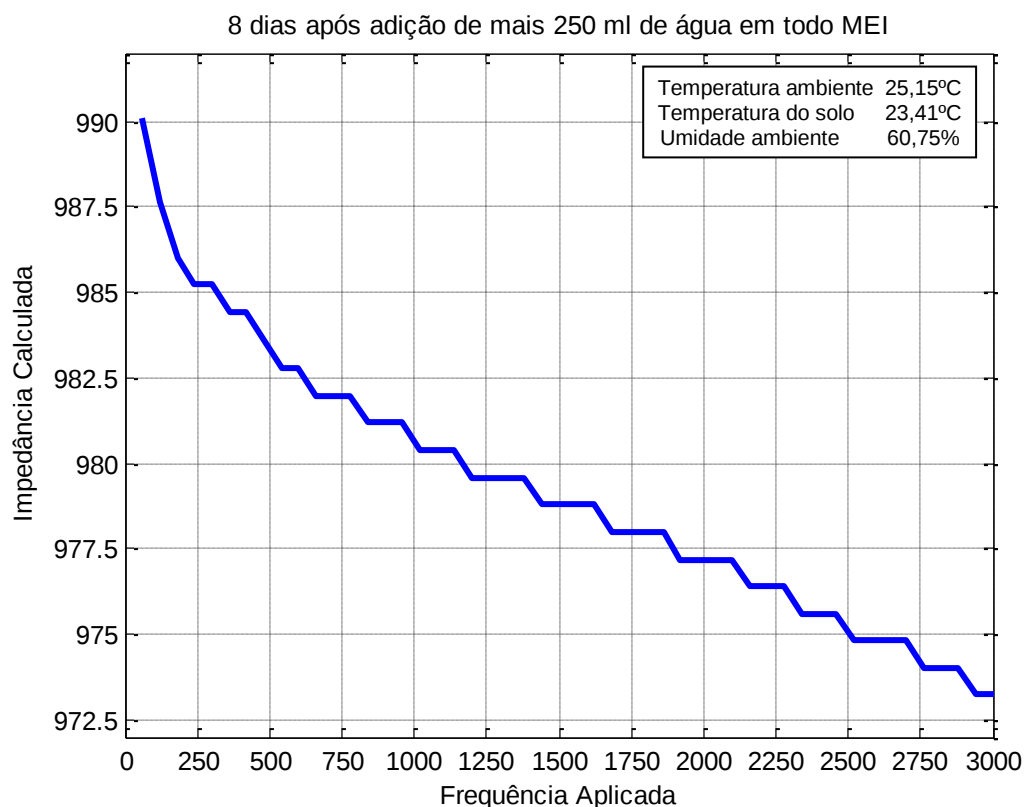


Figura 4.15 - 8 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.14 Experimento 13

Decorridos 12 (doze) dias após o experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência ainda continuou subindo, indicando a grande perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.16. A Tabela 4.14 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.14 - 12 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	5,88	2.040,82	660	6,02	1.993,36	1260	6,06	1.980,20	1860	6,09	1.970,44	2460	6,11	1.963,99
120	5,92	2.027,03	720	6,03	1.990,05	1320	6,06	1.980,20	1920	6,09	1.970,44	2520	6,11	1.963,99
180	5,95	2.016,81	780	6,03	1.990,05	1380	6,07	1.976,94	1980	6,09	1.970,44	2580	6,11	1.963,99
240	5,96	2.013,42	840	6,04	1.986,75	1440	6,07	1.976,94	2040	6,09	1.970,44	2640	6,11	1.963,99
300	5,97	2.010,05	900	6,04	1.986,75	1500	6,07	1.976,94	2100	6,09	1.970,44	2700	6,11	1.963,99
360	5,98	2.006,69	960	6,04	1.986,75	1560	6,07	1.976,94	2160	6,10	1.967,21	2760	6,12	1.960,78
420	5,99	2.003,34	1020	6,05	1.983,47	1620	6,08	1.973,68	2220	6,10	1.967,21	2820	6,12	1.960,78
480	6,00	2.000,00	1080	6,05	1.983,47	1680	6,08	1.973,68	2280	6,10	1.967,21	2880	6,12	1.960,78
540	6,01	1.996,67	1140	6,06	1.980,20	1740	6,08	1.973,68	2340	6,10	1.967,21	2940	6,13	1.957,59
600	6,02	1.993,36	1200	6,06	1.980,20	1800	6,08	1.973,68	2400	6,10	1.967,21	3000	6,13	1.957,59

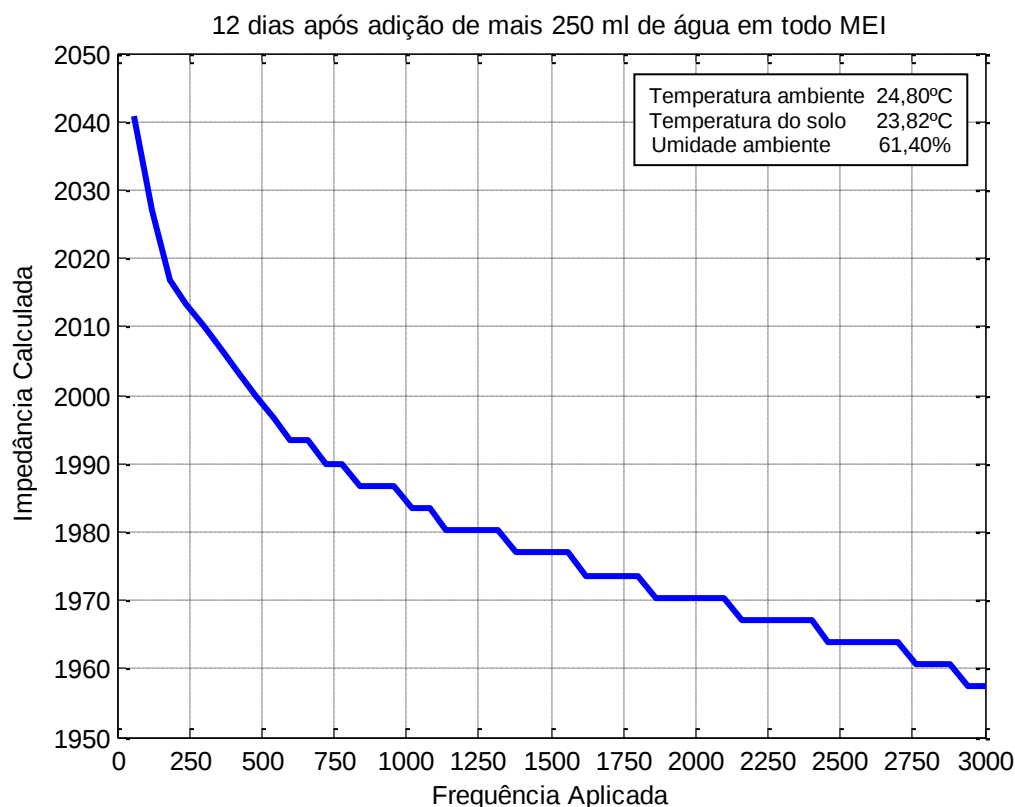


Figura 4.16 - 12 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.15 Experimento 14

Decorridos 14 (quatorze) dias após o experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência ainda continuou subindo, indicando a grande perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.17. A Tabela 4.15 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.15 - 14 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	3,47	3.458,21	660	3,72	3.225,81	1260	3,82	3.141,36	1860	3,89	3.084,83	2460	3,95	3.037,97
120	3,54	3.389,83	720	3,73	3.217,16	1320	3,82	3.141,36	1920	3,89	3.084,83	2520	3,96	3.030,30
180	3,57	3.361,34	780	3,74	3.208,56	1380	3,83	3.133,16	1980	3,90	3.076,92	2580	3,96	3.030,30
240	3,60	3.333,33	840	3,75	3.200,00	1440	3,84	3.125,00	2040	3,91	3.069,05	2640	3,97	3.022,67
300	3,62	3.314,92	900	3,76	3.191,49	1500	3,85	3.116,88	2100	3,91	3.069,05	2700	3,98	3.015,08
360	3,64	3.296,70	960	3,77	3.183,02	1560	3,85	3.116,88	2160	3,92	3.061,22	2760	3,99	3.007,52
420	3,65	3.287,67	1020	3,78	3.174,60	1620	3,86	3.108,81	2220	3,93	3.053,44	2820	3,99	3.007,52
480	3,67	3.269,75	1080	3,79	3.166,23	1680	3,87	3.100,78	2280	3,93	3.053,44	2880	4,00	3.000,00
540	3,69	3.252,03	1140	3,80	3.157,89	1740	3,87	3.100,78	2340	3,94	3.045,69	2940	4,00	3.000,00
600	3,71	3.234,50	1200	3,81	3.149,61	1800	3,88	3.092,78	2400	3,94	3.045,69	3000	4,01	2.992,52

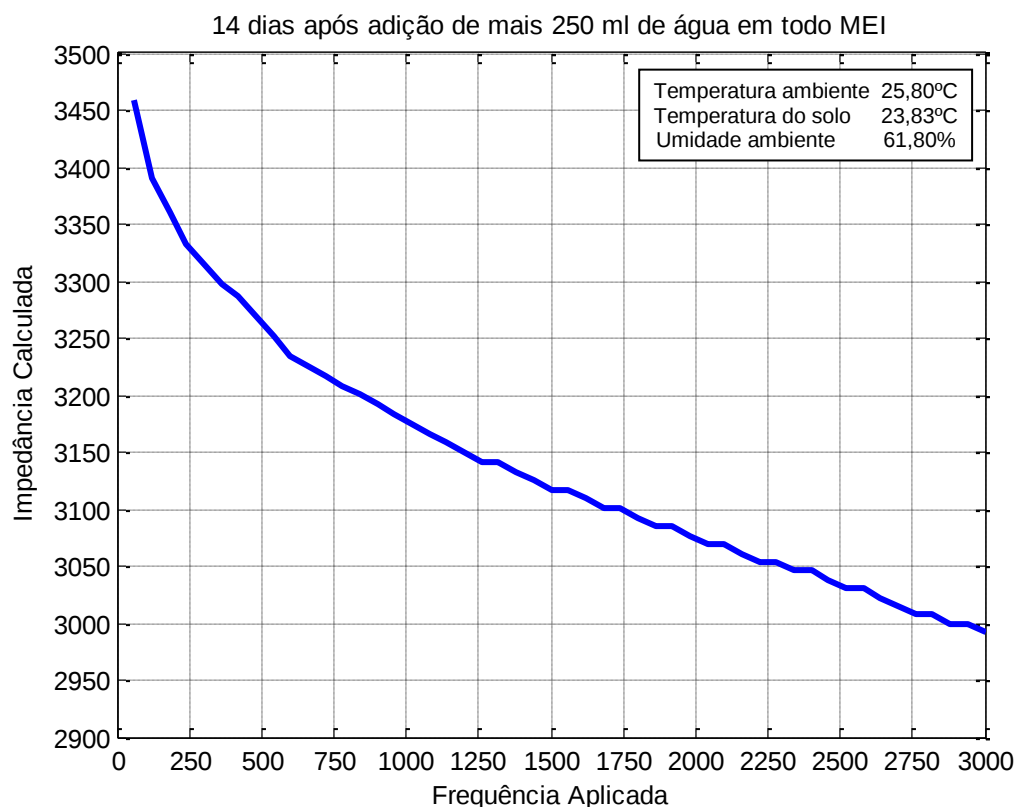


Figura 4.17 - 14 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.16 Experimento 15

Decorridos 16 (dezesseis) dias após o experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência alcançou um valor bem alto (próximo ao início dos experimentos), indicando a grande perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.18. A Tabela 4.16 com as medições pode ser vista a seguir.

Tabela 4.16 - 16 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	2,18	5.504,59	660	2,37	5.063,29	1260	2,47	4.858,30	1860	2,55	4.705,88	2460	2,62	4.580,15
120	2,22	5.405,41	720	2,38	5.042,02	1320	2,47	4.858,30	1920	2,55	4.705,88	2520	2,62	4.580,15
180	2,25	5.333,33	780	2,39	5.020,92	1380	2,48	4.838,71	1980	2,56	4.687,50	2580	2,63	4.562,74
240	2,27	5.286,34	840	2,40	5.000,00	1440	2,49	4.819,28	2040	2,57	4.669,26	2640	2,64	4.545,45
300	2,29	5.240,17	900	2,41	4.979,25	1500	2,50	4.800,00	2100	2,57	4.669,26	2700	2,64	4.545,45
360	2,31	5.194,81	960	2,42	4.958,68	1560	2,51	4.780,88	2160	2,58	4.651,16	2760	2,65	4.528,30
420	2,32	5.172,41	1020	2,43	4.938,27	1620	2,51	4.780,88	2220	2,59	4.633,20	2820	2,66	4.511,28
480	2,33	5.150,21	1080	2,44	4.918,03	1680	2,52	4.761,90	2280	2,60	4.615,38	2880	2,67	4.494,38
540	2,34	5.128,21	1140	2,45	4.897,96	1740	2,53	4.743,08	2340	2,60	4.615,38	2940	2,67	4.494,38
600	2,36	5.084,75	1200	2,46	4.878,05	1800	2,54	4.724,41	2400	2,61	4.597,70	3000	2,68	4.477,61

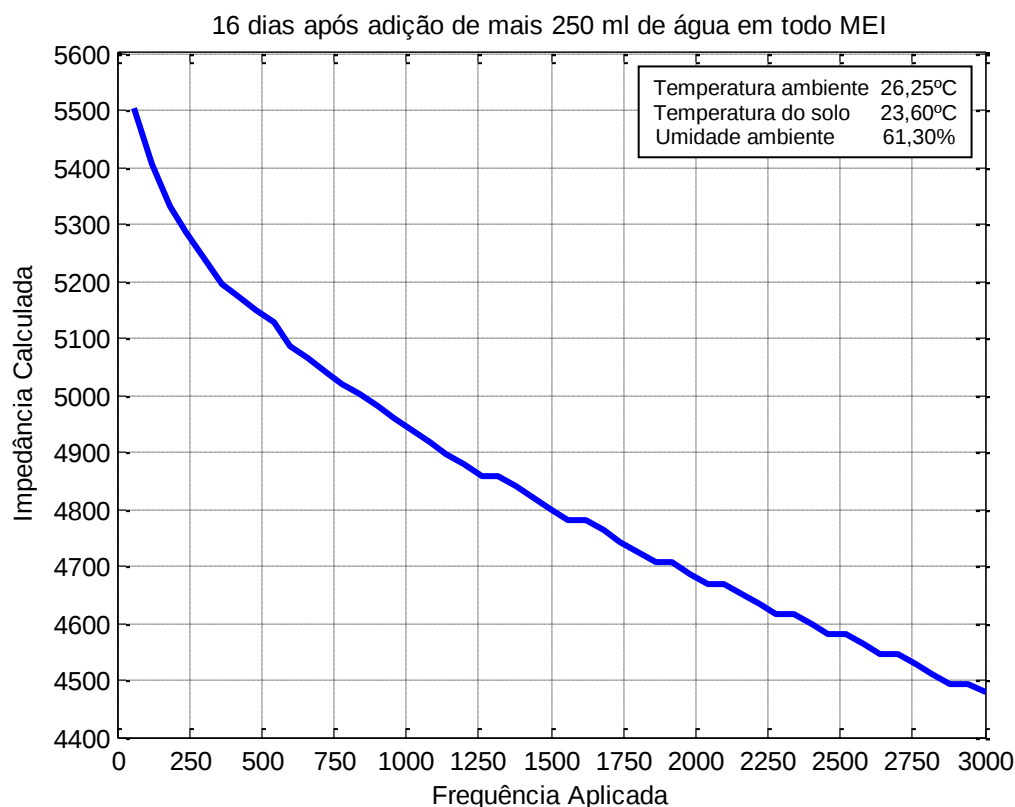


Figura 4.18 - 16 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.17 Experimento 16

Decorridos 18 (dezoito) dias após o experimento 8, foram efetuadas novas medições, constatando-se que a resistência alcançou um valor bem alto (ultrapassando o experimento inicial), indicando a grande perda de umidade, conforme mostra a Figura 4.19. A Tabela 4.17 com as medições pode ser vista a seguir. A tensão aplicada foi de 15 Vrms.

Tabela 4.17 - 18 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R	F Hz	I mA	R
60	1,91	7.853,40	660	2,04	7.352,94	1260	2,11	7.109,00	1860	2,17	6.912,44	2460	2,22	6.756,76
120	1,94	7.731,96	720	2,05	7.317,07	1320	2,12	7.075,47	1920	2,18	6.880,73	2520	2,22	6.756,76
180	1,96	7.653,06	780	2,05	7.317,07	1380	2,12	7.075,47	1980	2,18	6.880,73	2580	2,23	6.726,46
240	1,97	7.614,21	840	2,06	7.281,55	1440	2,13	7.042,25	2040	2,18	6.880,73	2640	2,23	6.726,46
300	1,98	7.575,76	900	2,07	7.246,38	1500	2,13	7.042,25	2100	2,19	6.849,32	2700	2,24	6.696,43
360	1,99	7.537,69	960	2,08	7.211,54	1560	2,14	7.009,35	2160	2,19	6.849,32	2760	2,24	6.696,43
420	2,00	7.500,00	1020	2,09	7.177,03	1620	2,14	7.009,35	2220	2,20	6.818,18	2820	2,25	6.666,67
480	2,01	7.462,69	1080	2,09	7.177,03	1680	2,15	6.976,74	2280	2,20	6.818,18	2880	2,25	6.666,67
540	2,02	7.425,74	1140	2,10	7.142,86	1740	2,16	6.944,44	2340	2,21	6.787,33	2940	2,26	6.637,17
600	2,03	7.389,16	1200	2,10	7.142,86	1800	2,16	6.944,44	2400	2,21	6.787,33	3000	2,26	6.637,17

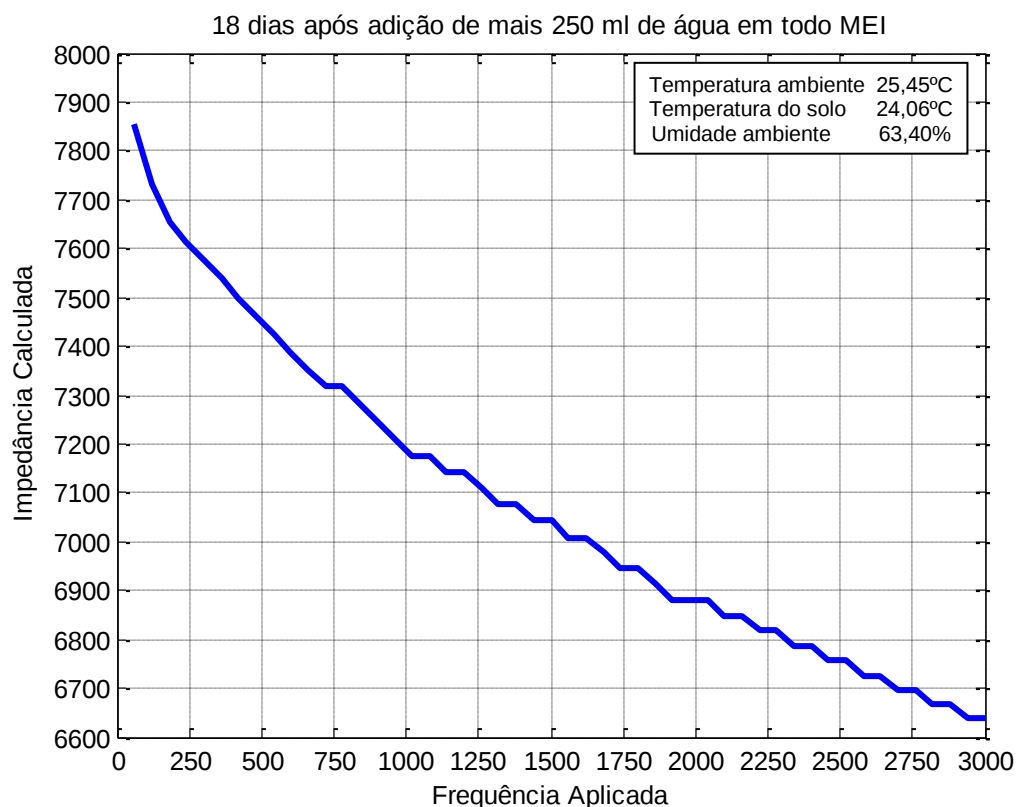


Figura 4.19 - 18 dias após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

4.18 Análises Comparativas

Nesta pesquisa preocupou-se em se manter uma boa conectividade entre os eletrodos e o solo, para que não fossem alteradas as medições ao longo do período de testes. Grandes problemas de aterramento se devem ao fato de oxidação e corrosão das hastes, com a consequência do aumento da resistência. A não movimentação dos eletrodos permitiu uma constante condutividade dos mesmos.

Todos os experimentos foram realizados em vinte e dois dias consecutivos. A adição total de água foi de 1.250 ml distribuídos nos quatro primeiros dias deste período. Para o início dos experimentos tomou-se como ponto de partida uma corrente em torno de 2 mA, indicando uma baixa umidade. Optou-se por não deixar o solo totalmente seco, porque a corrente seria da ordem de micro ampères ocasionando muita instabilidade nas medições.

Ao todo foram executados quatro conjuntos de medições completas, sendo que a primeira notou-se uma variação maior em relação às outras,

devido ao fato da terra ter sido preparada mesmo com a compactação manual.

Com a adição da primeira parcela de água, o solo se tornou mais homogêneo e compacto. Os eletrodos se aderiram mais ao solo em volta, permitindo uma melhor condutividade.

Todas as tabelas constantes deste trabalho referem-se à última série de medições, pois a segunda e a terceira foram bem próximas aos resultados obtidos.

Foi feito um comparativo entre o início dos experimentos e o final propriamente dito da última série de medições. Observa-se que houve uma semelhança entre as medições, encontradas nas Tabelas 4.2 e 4.17 respectivamente.

A Figura 4.20 mostra este comportamento, após 18 dias da última adição de água no experimento.

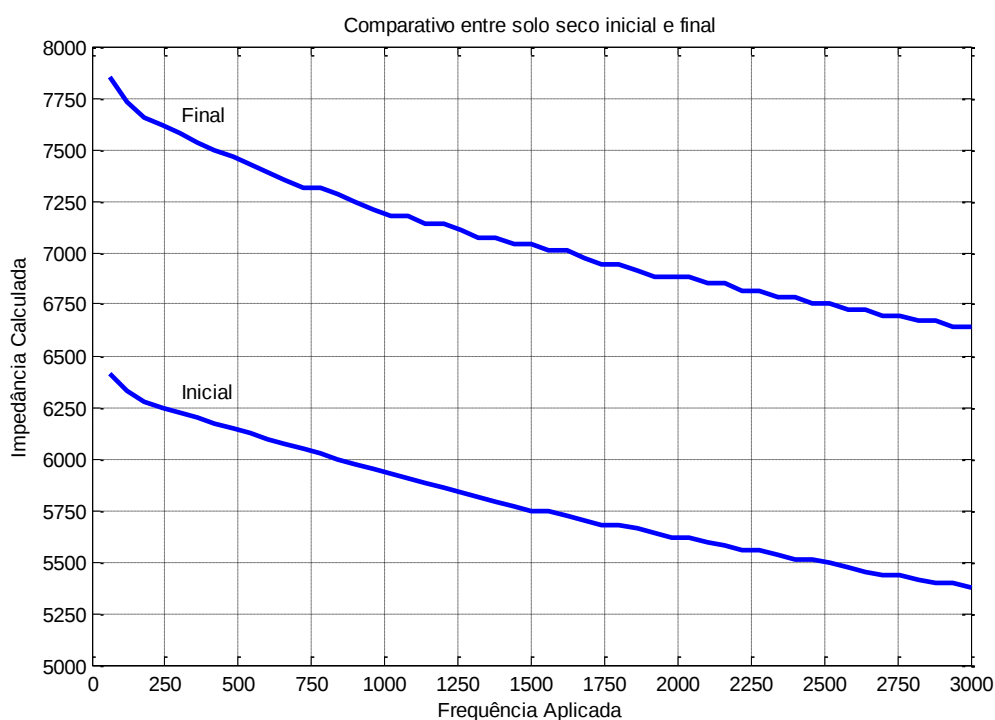


Figura 4.20 - Comparativo entre solo seco inicial e final.

Outro fator que se leva em consideração é a variação da Umidade.

Pode-se observar na Figura 4.21 a seguir, um comparativo entre quatro experimentos seguidos, evidenciando-se a variação da umidade sendo que:

- No experimento 5 foram efetuadas as medições 24h após adição de

250 ml de água no centro do MEI entre os eletrodos.

- No experimento 6 foram efetuadas as medições após a adição de 250 ml de água em todo o MEI.
- No experimento 7 foram efetuadas as medições 24h após a adição de 250 ml de água em todo o MEI.
- No experimento 8 foram efetuadas as medições após adição de mais 250 ml de água em todo MEI.

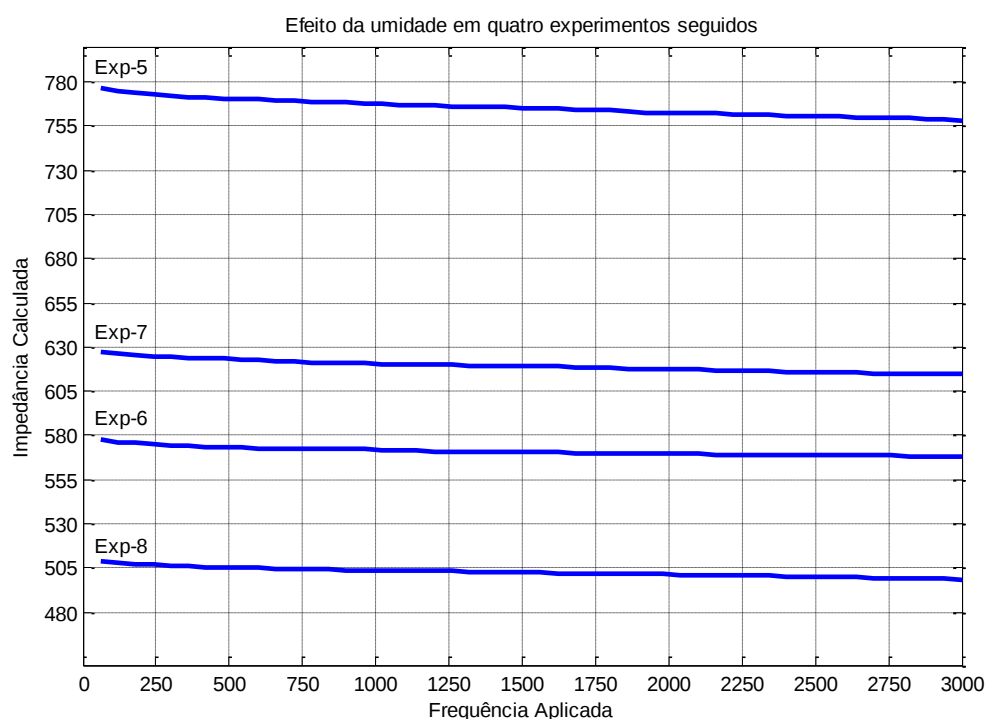


Figura 4.21 - Efeito da umidade em quatro experimentos seguidos.

Para melhor visualização dos efeitos da umidade em todos os experimentos, é observada na Figura 4.22 a seguir a colocação dos experimentos de 3 a 12, onde houve adição de água e em seguida deixou-se a mesma evaporar-se nas condições ambientes.

Não são mostrados os experimentos 1, 2 e de 13 a 16, devido ao fato que os mesmos estão com uma parte ainda bem seca.

Para estes experimentos, são mostrados a seguir na Figura 4.23.

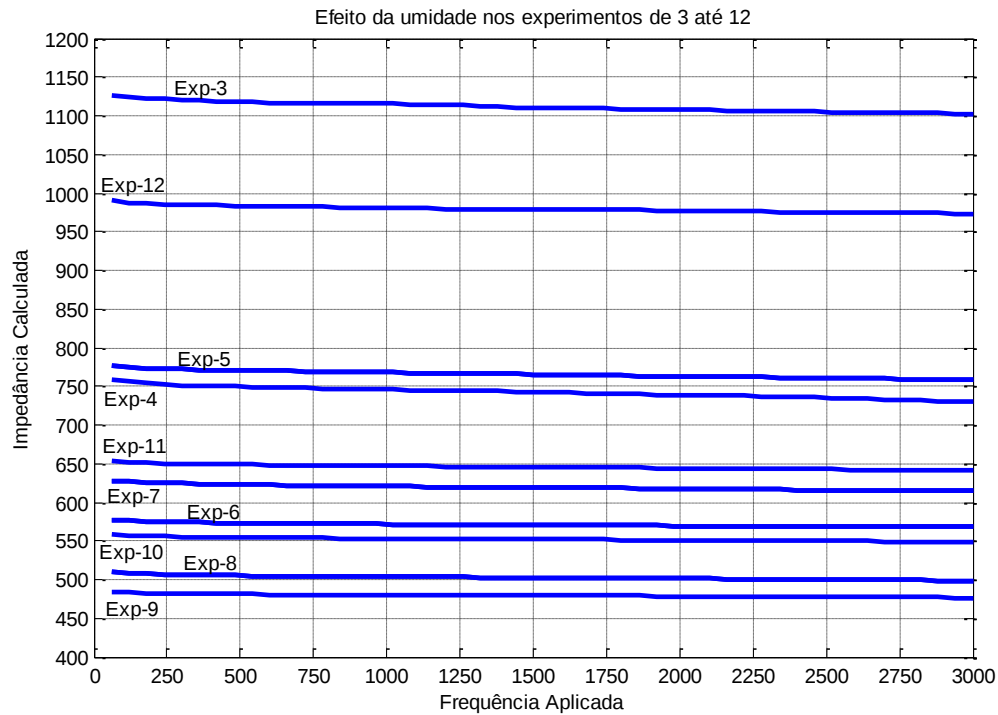


Figura 4.22 - Efeito da umidade nos experimentos de 3 à 12

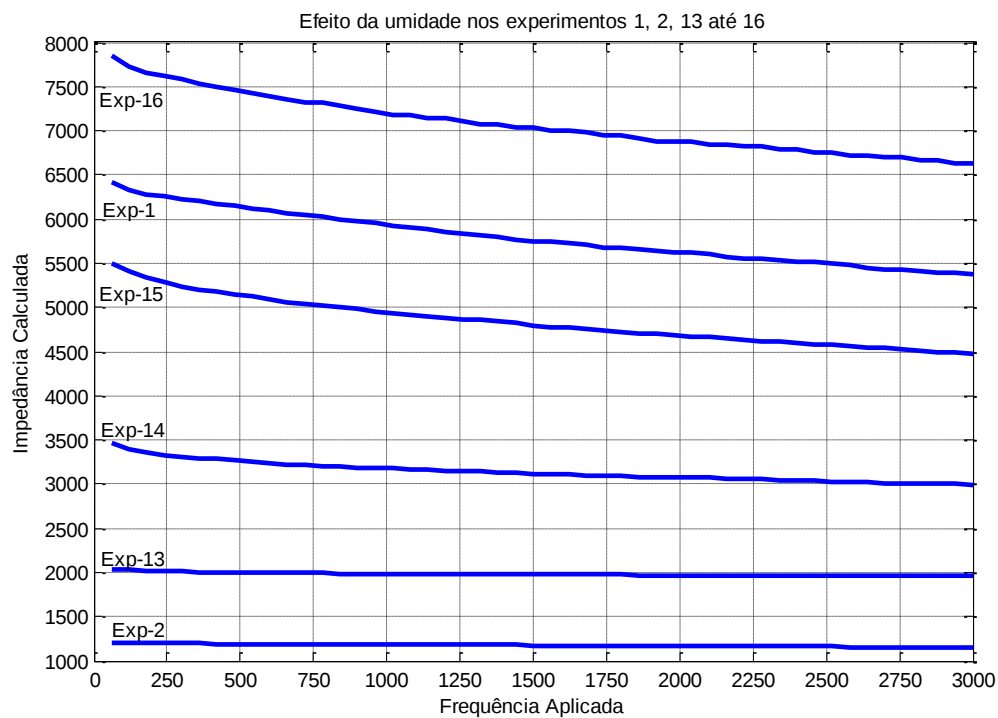


Figura 4.23 - Efeito da umidade nos experimentos 1, 2, 13 até 16

Outra análise comparativa foi feita com a variação em porcentagem dos valores iniciais e finais de cada experimento, mostrados a seguir na Tabela

4.18.

Tabela 4.18 - Variações entre valores iniciais e finais em todos os experimentos

	Exp-1	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5	Exp-6	Exp-7	Exp-8
Valor Inicial	6410,26	1206,03	1125,70	759,01	776,70	577,48	627,62	509,12
Valor Final	5376,34	1151,63	1102,94	729,93	758,05	567,91	614,44	498,55
% de Variação	19,2308	4,7236	2,0638	3,9848	2,4595	1,6843	2,1444	2,1213

	Exp-9	Exp-10	Exp-11	Exp-12	Exp-13	Exp-14	Exp-15	Exp-16
Inicial	483,87	557,62	653,24	990,10	2040,82	3458,21	5504,59	7853,40
Final	476,76	548,95	641,37	973,24	1957,59	2992,52	4477,61	6637,17
Variação	1,4919	1,5799	1,8508	1,7327	4,2517	15,5620	22,9358	18,3246

Durante as medições o MEI foi mantido em ambiente no qual não houvesse incidência do sol, evitando-se assim uma alteração brusca de temperatura e variações nas correntes medidas.

Todas as adições de água ao experimento foram feitas de forma lenta e uniforme, procurando-se manter uma boa dispersão da mesma na superfície do MEI.

Ao longo dos experimentos deste trabalho, o solo apresentou uma característica elétrica capacitiva, verificando-se que, com o aumento da frequência aplicada, a resistividade do mesmo diminuiu.

A água adicionada aumentou a umidade contribuindo para o deslocamento das curvas propriamente ditas, alterando-se o valor da resistividade, porém com a mesma tendência, mantendo a característica de um dielétrico entre os eletrodos.

A corrente verificada quando o solo estava seco, e o aumento da mesma quando se adicionou água, deve-se ao fato de que na composição química do solo os sais minerais presentes com a umidade se ionizam provocando uma passagem de corrente com maior intensidade.

A umidade altera a parcela resistiva do aterramento enquanto que a frequência altera a parcela capacitiva do aterramento similar ao modelo da Figura 2.3.

Nesta pesquisa verificou-se que as temperaturas do solo e ambiente, bem como a umidade ambiente mantiveram-se bem próximas ao longo dos experimentos.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho de pesquisa foi feito um criterioso estudo sobre os efeitos das harmônicas em sistemas de aterramento. O método utilizado baseou-se em processos experimentais efetuados em um sistema completamente isolado para garantir a ausência de interferências externas. Nas experiências efetuadas, em um total de 17, ficou demonstrado que tanto as variações da umidade do solo, bem como a variação da frequência, afetam as condições do sistema de aterramento o que comprova a característica de uma impedância, inclusive com efeito capacitivo, para o modelo representado pelo solo. Por meio dos resultados obtidos no estudo comparativo entre um sistema puramente resistivo e o solo propriamente dito, foi possível serem observadas estas variações. Os resultados obtidos são relevantes para a otimização e discussão de normas específicas para sistemas de aterramento. Este trabalho vem demonstrar que o método proposto é interessante pela simplicidade que apresenta.

5.1 Trabalhos Futuros

Deve-se observar que o modelo experimental MEI tem dimensões reduzidas e que em um sistema de aterramento as dimensões são em geral de grandes volumes de solo.

Portanto, para trabalhos futuros, fica como sugestão a utilização de uma área real em maiores escalas, bem como o estudo da proporcionalidade entre uma haste de tamanho real e os eletrodos aqui usados.

Neste trabalho a influência capacitiva ficou evidente, portanto, para verificar esta tendência, devem-se realizar estes ensaios com outras geometrias e materiais verificando-se também a granulometria do solo.

Para as medições pode-se projetar um circuito que faça o monitoramento constante ao longo de um período bem maior, levando-se em consideração as reais condições atmosféricas do sistema.

REFERÊNCIAS

6th Annual Clemson University Power Systems Conference Clemson, South Carolina - **Detection of High-Impedance Faults in Power Distribution Systems**, 2007. Disponível em:

<https://cdn.selinc.com/assets/Literature/Publications/Technical%20Papers/6248_DetectionHigh-Impedance_DH_20060914_Web.pdf?v=20151001-084811>.

Acesso em: 19 mai. 2017.

ADAMIAK, M.; WESTER, C.; THAKUR, M.; et al - **High Impedance Fault on Distribution Feeders**. Disponível em:

<<http://store.gedigitalenergy.com/faq/documents/f60/hizfeeder.pdf>>. Acesso

em: 18 mai. 2017.

ALÍPIO, R. S. - **Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no comportamento impulsivo de Aterramentos Elétricos**, 2013. Disponível em:

<<http://www.ppgel.net.br/gatci/documentos/Tese%20Rafael%20Alipio%20-%20FINAL%20ENTREGUE.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; VILLA NOVA, N.A. - **Fractal Scaling of Particle and Pore Size Distributions and its Relation to Soil Hydraulic Conductivity**. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90161996000200027> Acesso em: 18 out. 2017.

BEZERRA, S. R. C. - **Avaliação de sistemas de aterramento considerando a utilização de condutores e hastes envolvidos em concreto**, 2011. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-16082011-163415/publico/DissertSergio.pdf>>. Acesso em: 22 mai. de 2017.

BRÉDER, M. V. D. V.; SOARES, R.; SILVA de O.; ANDREI R.; et al - **Resposta de um aterramento a corrente elétrica impulsiva, impedância ou resistência?**, 2016. Disponível em:

<https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/resposta_de_um_aterramento_a_corrente_eletrica_impulsiva_impedancia_ou_resistencia.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2017.

CANNABRAVA, A. C. de A. - **Aterramento de redes de distribuição com a utilização de postes auto aterrados - Desenvolvimento e implantação**, 2016 - XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Disponível em:

<<http://www.sendi.org.br/wp-content/uploads/2016/12/3906.pdf>>. Acesso em: 22 mai. 2017.

CAPUTO, H. P. - **Mecânica dos solos e suas aplicações**, 6ª Edição, Volume 1, Editora LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS S.A., Rio de Janeiro 1988.

CERQUEIRA LIMA, J. L. - **Avaliação experimental sobre o efeito de ionização do solo devido a injeção de correntes impulsivas**, 2008. Disponível em:

<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-8CLE6B/jos__luiz_cerqueira_lima.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 mai. 2017.

COELHO, V. L. - **Influência das descargas atmosféricas no desempenho de sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica**, 2005. Disponível em:

<<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/102834/223187.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 mai. 2017.

CHIK, ZAMRI.; TAOHIDUL ISLAM, S.M. - **Finding Soil Particle Size through Electrical Resistivity in Soil Site Investigations**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sm_Taohidul_Islam/publication/266347019_Finding_Soil_Particle_Size_through_Electrical_Resistivity_in_Soil_Site_Investigations/links/5875a46308aebf17d3b3faeb/Finding-Soil-Particle-Size-through-Electrical-Resistivity-in-Soil-Site-Investigations.pdf> Acesso em: 18 out. 2017.

FEIS UNESP - **Aterramento**-. Disponível em:

<<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/aterramento.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2016.

GAMITO, M. A. R. - **Influência do sistema de aterramento na presença de distorção harmônica**, 2016. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-16112016-155721/publico/Marcos.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2017.

GARAVITO, J. - **Escuela Colombiana de Ingeniería Laboratorio de Producción - Eletricidade em El cuerpo humano**, 2009. Disponível em:

<<http://copernico.escuelaing.edu.co/lpinilla/www/protocolos/ERGO/electricidad.pdf>>. Acesso em: 07 mai. 2017.

GARCIA, F. R. -**Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. Disponível em:<http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCa.p.p>. Acesso em: 02 out. 2017.

GIROTTTO, E. M; SANTOS, I. A.; **Medidas de resistividade elétrica DC em sólidos: como efetuá-las corretamente**, 2001. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/qn/v25n4/10539.pdf>>. Acesso em: 08 abr. 2017.

GRUPO INTELLI -**Princípios e Medidas Práticas para a Obtenção de Aterramentos Seguros e Confiáveis por meio de Eletrodos Cravados**.

Disponível em: <<http://docplayer.com.br/1939211-Principios-e-medidas-praticas-para-a-obtencao-de-aterramentos-seguros-e-confiaveis-por-meio-de-eletrodos-cravados.html>>. Acesso em: 09 jan. 2017.

IEZZI, P. B. T. - **Testes de aplicabilidade de sonda de eletrorresistividade na avaliação de salinização secundária de solos**, 2008. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-15082008-104954/publico/PBTI.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Sistema**

Elétrico, Portal ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sisiste.eletrico.php>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Corrente elétrica do raio**. ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/caractericact.da.corrente.eletrica.php>>. Acesso em: 11 mai. 2017.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Relâmpago Definição**. ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica. Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/relamp/relampagos/definicao.php>>. Acesso em: 07 jun. 2017.

JÚNIOR, D. A. de O. - **Faltas de alta impedância: Detecção e localização de rompimento de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão**, 2006. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/421M.PDF>>. Acesso em: 18 mai. 2017.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. - **Aterramento Elétrico**, 3ª Edição, Editora SAGRA-DC LUZZATTO, Porto Alegre 1995.

LOURENÇO, S. R.; FARIAS S., T. A.; CATUREBA da S. F., SILVÉRIO - **Um estudo sobre os efeitos da eletricidade no corpo humano sob a égide da saúde e segurança do trabalho**. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81050114>>. Acesso em: 25 mai. 2017.

MARQUES, G. da C. - **Corrente elétrica no corpo humano**. E-book produzido pelo Centro de Ensino e Pesquisa Aplicada (CEPA), Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP). Disponível em: <https://midia.atp.usp.br/ensino_novo/eletromagnetismo/ebooks/mais_sobre_corrente_eletrica.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

MIRANDA NETO, M. I. de - **Investigação geoambiental em área de mangue**

na baía de Guanabara contaminada com resíduos industriais, 2002.

Disponível em:

<http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2002/teses/miranda%20neto_mi_02_t_m_geo.pdf>. Acesso em: 13 mai. 2017.

MODENA, J. - **Resistência ou Impedância? Parte I** - Revista O Setor Elétrico, 2013. Disponível em:

<<http://www.osetoelettrico.com.br/2016/2013/11/26/resistencia-ou-impedancia-parte-i/>>. Acesso em: 28 mai 2017.

NAYEL, M. - **Investigation of Ground Frequency Characteristics** - Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2013, 5, 322-327. Disponível em:

<http://file.scirp.org/pdf/JEMAA_2013080613244336.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2017

NIOSH, U.S. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES - **Worker deaths by electrocution**, 1998. A Summary of NIOSH Surveillance and Investigative Findings. Disponível em:

<<https://www.cdc.gov/niosh/docs/98-131/pdfs/98-131.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2017.

NOGUEIRA, R. L. S. - **Análise de sistemas de aterramento sob solicitações impulsivas: Otimização e critérios de segurança em aterramentos de estruturas de linhas de transmissão**, 2006. Disponível em:

<<http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2006031001.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2017.

PACHECO, A. de O. - **Ensaio de resistividade em solos saturados**, 2004. Disponível em:

<<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp018463.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2017.

PEDROSA, A. G. - **Comportamento Transitório de Eletrodos de Aterramento Considerando a Variação da Condutividade e da Permissividade Elétricas de Solos Típicos com a Frequência**, 2010.

Disponível em:

<<http://www.ppgel.ufsj.edu.br/portal/images/stories/Arquivos/dissertacao001.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2017.

PEREIRA, J. B. J. - **Modelagem de incertezas em sistemas de aterramento elétricos**, 2008. Disponível em:
<http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/1258/1/TESE_2008_JoaoBatistaJosePereira.pdf>. Acesso em: 19 mai. 2017.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Apostila - **Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica**. Campinas: DSCE-FEEC, 2010. Revisão e atualização em Fevereiro de 2017. Disponível em:
<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a8.pdf>>. Acesso em: 16 mai. 2017.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Apostila - **Aterramento e Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em:
<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a8.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2017.

RAGGI, L. M. de R. - **Projeto de malhas de aterramento: Contribuição ao cômputo da estratificação do solo**, 2009. Disponível em:
<<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/319M.PDF>>. Acesso em: 06 jun. 2017.

RAIZER, A (UFSC); Dias, G. A. D. (PUC-RS); Almaguer, H. D. (FURB); et al - **Avaliação da Influência da Resistência de Aterramento e Impedância de Surto na Operação do Sistema de Distribuição da Concessionária**, 2015. Disponível em:
<<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081205140417-it79.pdf>>. Acesso em: 11 mai. 2017.

TEIXEIRA, D. A. - **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial**, 2009. Disponível em: <<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/308M.PDF>>. Acesso em 10 out. 2017.

VIANA, F. M. - **Interpretação da Resistividade Aparente do Solo e Estratificação com Arranjo de Schlumberger**, 2016. Disponível em:

<<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tede/6644/5/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Fernando%20Moreira%20Viana%20-%202016.pdf>>. Acesso em: 23 mai. 2017.

VICENTE, O.; CERVANTES, S. G. de S.; SANTANA, H. et AL - **Um teste para avaliação da qualidade de aterramentos elétricos**, 2009. Disponível em:

<<http://www.espacoenergia.com.br/edicoes/11/EE011-02.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2017.

ANEXO - 1

Têm-se aqui os endereços eletrônicos dos fabricantes dos equipamentos, bem como o *datasheet* dos componentes utilizados neste trabalho:

- Stereo Integrated Control Amplifier AC-500 CYGNUS.

Fonte: Museu Virtual

<http://www.audiorama.com.br/cygnus/amplificador1.htm#AC-500>

- Multímetro Digital HIKARI Modelo: HM-2090.

Fonte: Página do fabricante na web

<http://www.hikariferramentas.com.br/multimetro-digital/hm-2090/291/104/>

- Gerador de funções ICEL - Manaus GV-2002.

Fonte: Página do fabricante na web

http://www.icel-manaus.com.br/produto_descricao.php?id=28

- Osciloscópio DSO Nano.

Fonte:

<https://electronilab.co/tienda/dso-nano-v3-osciloscopio-portatil-de-bolsillo/>

- Sensor de Umidade e Temperatura DHT22 (AM2303).

<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/DHT22.pdf>

- Sensor de temperatura DS18B20.

<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temp/DS18B20.pdf>

- Arduino Uno R3.

Site oficial do Arduino.

<https://www.arduino.cc/>

<https://www.arduino.cc/en/Main/Software>

- Micro-SD Card.

<https://www.arduino.cc/en/Reference/SDCardNotes>

ANEXO - 2

Programa para leitura das temperaturas ambiente, do solo e a umidade ambiente usado na plataforma Arduino com gravação dos dados no micro-SD.

```

/*
*****
*    07 de Agosto de 2017                                     *
*    Jose Roberto Pinheiro                                   *
*    Medidor de Umidade e Temperatura Ambiente DHT22        *
*    Medidor de Temperatura local DS18B20                   *
*    Gravacao de variaveis em Modulo Micro SD               *
*                                                           *
*    Ligacoes no Arduino                                     *
*    Umidade e Temp. Amb.  DHT22        Pino A1              *
*    Temperatura Local     DS18B20      Pino D3              *
*                                                           *
*                               LED        Pino D9            *
*                               CS do SD   Pino D10           *
*                               MOSI        Pino D11          *
*                               MISO        Pino D12          *
*                               SCK         Pino D13          *
*****
*/
#include <Adafruit_Sensor.h>      // Carrega as bibliotecas do DHT22
#include <DHT.h>
#define DHTPIN A1                // Pino conectado ao pino de dados
do sensor DHT22
#define DHTTYPE DHT22            // Sensor DHT22 (AM2302)
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);        // Definicoes do sensor DHT22:
pino, tipo
#include <OneWire.h>              // Sensor DS18B20
#include <DallasTemperature.h>
#include <SD.h>                   // Cartao SD
#include <SPI.h>
const int CS = 10;               // CS do Cartao SD
#define ONE_WIRE_BUS 3           // Porta do pino de sinal do
DS18B20
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);   // Define uma instancia do oneWire
para comunicacao com o sensor

int LED = 9;                     // LED Externo para monitoramento
int seq = 1;                     // Contador de intervalos
float tempC;                     // Variavel de temperatura para o
DS18B20
float tempMin = 999;              // Armazena temperaturas minima e
maxima para o DS18B20
float tempMax = 0;
DallasTemperature sensors(&oneWire);
DeviceAddress sensor1;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);           // Inicialisa a COM Serial
    pinMode(LED, OUTPUT);

```

```

        if (SD.begin(CS))                // Verifica se o micro-SD esta
presente ou não
        {
            Serial.print("Micro-SD Conectado");
        }
        else
        if (!SD.begin(CS))
        {
            Serial.println("Falha ao acessar o cartao SD!");
            Serial.println("Seus dados nao serao gravados no micro-SD");
            Serial.print("Verifique o cartao/conexoes e reinicie o
Arduino...");
        }
        Serial.println();
        Serial.println();
        File dataFile = SD.open("Datalog.txt", FILE_WRITE);
        if (dataFile)                    // Escreve a primeira linha no
modulo SD
        {
            dataFile.print("-----");
            dataFile.println();
            dataFile.println();
            dataFile.print("Sequencia");
            dataFile.print(",");
            dataFile.print("Umidade ");
            dataFile.print(",");
            dataFile.print("Temp. Amb. ");
            dataFile.print(",");
            dataFile.print("DS18B20 ");
            dataFile.print(",");
            dataFile.println();
            dataFile.close();            // Encerra a escrita no modulo SD
        }
        Serial.println("Aguardando dados...");
        dht.begin();                    // Iniclaiza o sensor DHT
        sensors.begin();
                                        // Localiza e mostra enderecos dos
sensores
        Serial.println("Localizando sensores DS18B20...");
        Serial.print("Foi encontrado ");
        Serial.print(sensors.getDeviceCount(), HEX);
        Serial.println(" sensor DS18B20");
        if (!sensors.getAddress(sensor1, 0))
        Serial.println("Sensores nao encontrados !");
        Serial.println();
        Serial.println("Sequencia, Umidade , Temp. Amb., DS18B20, ");
    }
    void loop()
    {
        float h = dht.readHumidity();    // Leitura da umidade para o DHT22
        float t = dht.readTemperature(); // Leitura da temperatura (Celsius)
para o DHT22
        if (isnan(h) || isnan(t))        // Verifica se o sensor esta

```

```

respondendo
{
    Serial.println("Falha ao ler dados do sensor DHT !!!");
    return;
}
sensors.requestTemperatures(); // Le a informacao do sensor
float tempC = sensors.getTempC(sensor1);
if (tempC < tempMin)           // Atualiza temperaturas minima e
maxima
{
    tempMin = tempC;
}
if (tempC > tempMax)
{
    tempMax = tempC;
}
File dataFile = SD.open("Datalog.txt", FILE_WRITE); // Escreve no
cartao SD
if (dataFile)
{
    dataFile.print(seq);           // Numero de sequencia
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(h,2);           // Umidade para o sensor DHT22
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(t,2);           // Temperatura para o sensor DHT22
    dataFile.print(",");
    dataFile.print(tempC,4);       // Temperatura para o sensor
DS18B20
    dataFile.print(",");
    dataFile.println();
    dataFile.close();
}
Serial.print(seq);                // Numero de sequencia
Serial.print("      , ");
Serial.print(h,2);                // Umidade do sensor DHT22
Serial.print("    , ");
Serial.print(t,2);                // Temperatura do sensor DHT22
Serial.print("      , ");
Serial.print(tempC,4);            // Temperatura do sensor DS18B20
Serial.println();
seq++;
int var = 0;
while(var < 15)                   // Fazer algo repetitivo 15 vezes
(30 segundos)
{
    digitalWrite(LED,HIGH);       // Liga o LED por 50 ms (aceso)
    delay(50);
    digitalWrite(LED,LOW);        // Desliga o LED por 1950 ms
(apagado)
    delay(1950);
    var++;
}
}

```