

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da  
integridade de malhas de aterramento em subestações energizadas**

**Rogério de Lima e Sá**

**Rogério de Lima e Sá**

**Desenvolvimento de um equipamento para avaliação da  
integridade de malhas de aterramento em subestações  
energizadas**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Fabrício Bradaschia, *D.Sc.*

Coorientador: Márcio Evaristo da C. Brito, *D.Sc.*

Recife, Brasil

Outubro de 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Sá, Rogério .

Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação da Integridade de Malhas de Aterramento em Subestações Energizadas / Rogério Sá. - Recife, 2020.

122 : il., tab.

Orientador(a): Fabrício Bradaschia

Coorientador(a): Márcio Evaristo

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

Inclui referências, apêndices, anexos.

1. Aterramento elétrico em subestações. 2. Diagnóstico de problemas em malha de aterramento. 3. Método de medições de resistência de malhas de aterramento. 4. Medições de malhas em alta e baixa frequência. 5.

Desenvolvimento de um protótipo para medições de malhas energizadas. I. Bradaschia, Fabrício. (Orientação). II. Evaristo, Márcio. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

*Dedico a minha família, grande alegria da minha vida.*

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Deus por ter guiado meu caminho, concedendo sabedoria e sempre me dando força nas horas de necessidade. Agradeço a CELPE, em especial aos líderes que passaram pelo Departamento da Manutenção da Subtransmissão no período que realizei o curso, por permitir a viabilização deste Mestrado através da flexibilização dos horários de trabalho. Agradeço a minha família, que sempre posso contar em qualquer situação, seja ela boa ou ruim, sendo um recanto de conforto para mim. Agradeço ao meu orientador Prof. Fabrício Bradaschia e ao meu coorientador Prof. Márcio Evaristo da Cruz Brito por me guiarem em todos os passos deste trabalho e todos ensinamentos passados, sempre confiando em meu potencial, sendo mais do que um orientador, um amigo. Agradeço aos meus amigos, os quais posso contar em qualquer ocasião, em especial a Erik Oliveira e Márcio Macedo, pela parceria ao longo deste curso de mestrado.

## Resumo

Os sistemas de aterramento são parte integrante das subestações, possuindo várias funções, sendo a principal garantir a proteção de equipamentos e pessoas. Estes sistemas exigem avaliação frequente, devido ao envelhecimento dos componentes, corrosão e vandalismo. Portanto, é preciso realizar inspeções, verificações das interligações dos equipamentos, medições de tensão de passo e toque e, principalmente, medição da resistência de malha de aterramento conforme métodos apresentados pelas normas Brasileira NBR15749 (2009) e Americana IEEE81 (2012) para garantir seu correto funcionamento. Esta dissertação faz uma extensa revisão acerca dos principais métodos de medições descritos nas principais normas e em referências acadêmicas internacionais, destacando quando aplicar cada método, as principais vantagens e limitações. Um detalhamento maior é dado para o método de queda de potencial com frequência variável, principal método aplicado para medições de subestações energizadas e objetivo principal desta dissertação. São realizadas comparações entre os métodos de medições utilizando baixas frequências e altas frequências, detalhando as principais características e justificativas até a definição do método mais apropriado para medição de malhas de aterramento de subestações em operação. Para realizar um diagnóstico mais preciso, principalmente para subestações energizadas, faz-se necessário a utilização de equipamentos específicos, que não sofram influências eletromagnéticas existentes nas instalações. No mercado nacional, não existe opção de instrumento para este fim, fazendo com que as únicas opções sejam de instrumentos importados e de alto custo. Dentro deste contexto, este trabalho irá mostrar as etapas do desenvolvimento de um equipamento nacional para este fim, fruto do projeto P&D “Desenvolvimento de Fonte para Injeção de Corrente em Malha de Terra para Medição de Resistência Aterramento em Subestações”, realizado pelo Grupo Neoenergia, UFPE e Montrel Tecnologia. Também será mostrado os principais resultados obtidos em testes realizados em subestações energizadas e de diferentes tamanhos e condições, mostrando que o protótipo desenvolvido obteve resultados muito próximos quando comparados com equipamento utilizado como referência neste projeto (CPC 100 OMICROM). Detalhes coletados em campo durante as medições, por osciloscópio, serão mostrados, de forma a analisar formas de ondas obtidas durante os testes (tensão e corrente), além de tratamento dos dados em MATLAB no que se refere aos espectros harmônicos de tensão e corrente, e utilização da ferramenta de espectro harmônico (*FFT - Fast Fourier Transform*) para obter as amplitudes dos sinais de forma mais precisa.

**Palavras-chave:** Resistência de malha de aterramento, Método de queda de potencial, Fonte de corrente.

## **Abstract**

Grounding systems are an integral part of substations, having several functions, the main one being the protection of equipment and people. These systems require frequent evaluation, due to the aging of components, corrosion and vandalism. Therefore, it is necessary to carry out inspections, verifications of the equipment interconnections, measurements of step and touch voltage and, mainly, measurement of the grounding loop resistance according to methods presented by the Brazilian NBR15749 (2009) and American IEEE81 (2012) standards to ensure its correct functioning. This dissertation makes an extensive review about the main measurement methods described in the main standards and in international academic references, highlighting when to apply each method, the main advantages and limitations. Further details are given for the Fall of potential method with variable frequency, the main method applied for measurements of energized substations and the main objective of this dissertation. Comparisons are made between the measurement methods using low frequencies and high frequencies, detailing the main characteristics and justifications until the definition of the most appropriate method for measuring substation grounding meshes in operation. In order to make a more accurate diagnosis, mainly for energized substations, it is necessary to use specific equipment, which does not suffer electromagnetic influences existing in the installations. In the national market, there is no instrument option for this purpose, making the only options available for imported and expensive instruments. Within this context, this work will show the stages of the development of a national equipment for this purpose, as a result of the P&D project “Development of Source for Current Injection in Earth Mesh for Measurement of Grounding Resistance in Substations”, carried out by the Group Neoenergia, UFPE and Montrel Technology. The main results obtained in tests carried out in energized substations and of different sizes and conditions will also be shown, showing that the developed prototype obtained very close results when compared with equipment used as a reference in this project (CPC100 OMICROM). Details collected in the field during the measurements, by oscilloscope, will be shown, in order to analyze waveforms obtained during the tests (voltage and current), in addition to data treatment in MATLAB regarding the harmonic spectra of voltage and current, and use of the harmonic spectrum tool (textit FFT - Fast Fourier Transform) to obtain the amplitudes of the signals more precisely.

**Keywords:** Ground impedance, Fall of potencial method, Current source.

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Falta monofásica: caminhos de corrente pelo solo. . . . .	20
Figura 2 – Tensões que podem aparecer em uma SE durante um teste de resistência de malha. . . . .	21
Figura 3 – Equipamentos comerciais utilizados para a medição da resistência de sistemas de aterramento em subestações. . . . .	23
Figura 4 – . . . . .	27
Figura 5 – Potenciais durante uma falta para terra. . . . .	28
Figura 6 – Medição de resistividade de solo pelo método de Wenner. . . . .	30
Figura 7 – Tela de software para realização de projeto de malha de aterramento. . . . .	32
Figura 8 – Projeto - verificação de tensão de passo. . . . .	32
Figura 9 – Componentes de malhas. . . . .	33
Figura 10 – Aterramento de equipamentos e estruturas. . . . .	34
Figura 11 – Ilustração do surgimento de tensão de passo. . . . .	36
Figura 12 – Ocorrência de falta e o risco de choque elétrico. . . . .	36
Figura 13 – Contorno de potencial e tensão de passo. . . . .	37
Figura 14 – Valores permissivos de circulação de corrente para o corpo humano. . . . .	38
Figura 15 – Momento de um teste de tensão de toque em uma estrutura de um equipamento de subestação. . . . .	38
Figura 16 – Ilustração de teste de uma malha de aterramento através do método de dois pontos. . . . .	40
Figura 17 – Método de Queda de Potencial definido na norma IEEE81. . . . .	41
Figura 18 – Circuito para método de queda de potencial. . . . .	42
Figura 19 – Teste usando o método de queda de potencial. . . . .	43
Figura 20 – Curvas típicas de resistência de aterramento em função das posições relativas dos eletrodos auxiliares de potencial e de corrente. . . . .	44
Figura 21 – Arranjo de medição de impedância. . . . .	44
Figura 22 – Método <i>Clamp-on</i> - circuito a ser medido com vários eletrodos em paralelo. . . . .	46
Figura 23 – Método <i>Clamp-on</i> - detalhe da técnica de medição utilizada. . . . .	47
Figura 24 – Teste de resistência de pé de torre utilizando o método combinado de queda de potencial com <i>Clamp-on</i> . . . . .	47
Figura 25 – Teste realizado com SE energizada com frequências de 60 e 70Hz. . . . .	49
Figura 26 – Segundo ensaio realizado com 70Hz. . . . .	50
Figura 27 – Teste realizado a uma distância de 150 metros e utilizando frequência de 70Hz. . . . .	50
Figura 28 – Esquema de medição de malha de aterramento. . . . .	51
Figura 29 – Curva de medição para 80Hz e resistividade do solo de $100\Omega$ - m. . . . .	52
Figura 30 – Curva de medição para 80Hz e resistividade do solo de $10\Omega$ - m. . . . .	53

Figura 31 – Comparação dos gráficos de medições para frequências de 80 e 500Hz, para um solo com resistividade de $100\Omega - m$ . . . . .	54
Figura 32 – Efeitos de medição em alta frequência. . . . .	55
Figura 33 – Comportamento da distribuição de potencial (Vddp) nos condutores da malha de aterramento em baixas e altas frequências. . . . .	55
Figura 34 – Comportamento de um aterramento para descargas atmosféricas. . . . .	56
Figura 35 – Característica típica de impulso de corrente de alta frequência. . . . .	56
Figura 36 – Recorte da versão redline da norma IEEE 81 (2012), mostrando a eliminação do uso deste método em alta frequência para medição de resistência de curtos-circuitos. . . . .	59
Figura 37 – Região de patamar para definição da resistência de aterramento da malha que está sendo medida. . . . .	62
Figura 38 – Arquitetura do sistema. . . . .	65
Figura 39 – Configuração do transformador isolador do sistema. . . . .	68
Figura 40 – Módulo de Medição e Potência - MMP. . . . .	69
Figura 41 – Detalhamento do inversor. . . . .	70
Figura 42 – Formas de onda do PWM unipolar. . . . .	71
Figura 43 – Esquema geral de operação do Módulo de Controle. . . . .	72
Figura 44 – Estrutura do Módulo de Controle. . . . .	73
Figura 45 – Diagrama de blocos geral do sistema de medição de resistência de aterramento. . . . .	76
Figura 46 – Divisão do MMP em placas. . . . .	77
Figura 47 – Diagrama de alto nível do MMP com descrição do conteúdo das PCIs. . . . .	78
Figura 48 – Vista frontal 3D do projeto da placa de Potência Principal. . . . .	79
Figura 49 – Vista superior 3D do projeto da placa de Potência Principal com detalhamento da separação funcional. . . . .	80
Figura 50 – Principais partes do protótipo. . . . .	81
Figura 51 – Principais partes do protótipo. . . . .	81
Figura 52 – Protótipo finalizado. . . . .	82
Figura 53 – Visão geral das placas do protótipo em bancada. . . . .	83
Figura 54 – Curvas relativas ao ponto 4 de medição da tabela 6. Traço 1: Corrente injetada (azul, 2A/div); Tensão injetada (laranja, 100V/div); Tensão medida (verde, 500V/div); Traço 2: Zoom do Traço 1 na transição de 50 para 70Hz. . . . .	85
Figura 55 – Visão geral do teste de medição do aterramento da subestação do Centro de Tecnologia e Geociências, realizado no laboratório da UFPE. . . . .	87
Figura 56 – Curvas relativas ao ponto 6 de medição da Tabela 7. Traço 1: Corrente injetada (azul, 1A/div); Tensão injetada (laranja, 50V/div); Tensão medida (verde, 20V/div); Traço 2: Zoom do Traço 1 para frequência de 70Hz. . . . .	88
Figura 57 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação Tejipió. . . . .	88

Figura 58 – Comparação dos resultados obtidos para o terceiro teste - medições na SE Tejipió. . . . .	89
Figura 59 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação do Ibura. . .	90
Figura 60 – Comparação dos resultados das medições na SE Ibura, relativo ao quarto teste.	91
Figura 61 – Preparação para realizar as medições na SE Ibura. . . . .	91
Figura 62 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação de Bom Jardim.	92
Figura 63 – Comparação dos resultados das medições na SE Bom Jardim durante o quinto teste. . . . .	93
Figura 64 – Tensões residuais (remanescente) nas hastes sem nenhuma injeção de corrente referente à Bom Jardim: tensão na haste de tensão (em vermelho, 50V/div); tensão na haste de corrente (em amarelo, 50v/div). . . . .	95
Figura 65 – Espectro harmônico da tensão residual (remanescente) na haste de medição de tensão sem nenhuma injeção de corrente referente à SE Bom Jardim. . .	95
Figura 66 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo no equipamento CPC 100 para uma medição realizada na SE Bom Jardim. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (amarelo, 50V/div); Tensão na haste de medição de tensão (vermelho, 50V/div); Corrente injetada na malha (azul, 1A/div); Traço 2: Zoom do traço 1.	96
Figura 67 – Formas de onda obtidas pelo osciloscópio usando o protótipo para uma medição na SE Bom Jardim. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (amarelo, 50V/div); Tensão na haste de medição de tensão (vermelho, 50V/div); Corrente injetada na malha (azul, 1A/div); Traço 2: Zoom do traço 1. . . . .	96
Figura 68 – Espectro da tensão residual na haste de tensão antes de injetar corrente nos testes na SE Bom Jardim. . . . .	97
Figura 69 – Espectro da tensão na haste de tensão durante a injeção de corrente em 100Hz durante os testes na SE Bom Jardim. . . . .	97
Figura 70 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação de Cruz de Rebouças. . . . .	98
Figura 71 – Comparação dos resultados das medições na SE Cruz de Rebouças. . . . .	99
Figura 72 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o CPC 100 na distância de 20 metros para a SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (50V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (50V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (1A/div); Traço 4: Zoom temporal dos traços 1, 2 e 3. . . . .	100
Figura 73 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o protótipo na distância de 20 metros para a SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (20V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (20V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (0,2A/div); Traço 4: Zoom temporal dos traços 1, 2 e 3. . . . .	100

Figura 74 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o protótipo na frequência de 50Hz para uma distância de 20 metros na SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente e seu espectro harmônico; Traço 2: corrente na haste de injeção e seu espectro harmônico; Traço 3: Tensão medida na haste de injeção e seu espectro harmônico. . . . .	101
Figura 75 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o protótipo na frequência de 100Hz para uma distância de 20 metros na SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente e seu espectro harmônico; Traço 2: corrente na haste de injeção e seu espectro harmônico; Traço 3: Tensão medida na haste de injeção e seu espectro harmônico. . . . .	102
Figura 76 – Representação das dimensões da malha de aterramento da subestação de Paratibe. . . . .	103
Figura 77 – Preparação para a realização das medições na SE Paratibe. . . . .	104
Figura 78 – Comparação dos resultados das medições na SE Paratibe. . . . .	105
Figura 79 – Formas de onda obtidas nos oscilógrafo usando o CPC 100 na distância de 30 metros na SE Paratibe. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (50V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (50V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (200mA/div); Traço 4,5,6: Zoom temporal dos traços 1,2 e 3. . . . .	106
Figura 80 – Formas de onda obtidas nos oscilógrafo usando o protótipo na distância de 30 metros na SE Paratibe. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (100V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (100V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (0,2A/div). . . . .	106
Figura 81 – Traço 1,2,3: Zoom temporal dos traços da Fig. 80. . . . .	107
Figura 82 – Formas de onda obtidas nos oscilógrafo para a operação do protótipo na frequência de 100Hz na SE Paratibe. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente e seu espectro harmônico; Traço 2: Corrente na haste de injeção e seu espectro harmônico; Traço 3: Tensão medida na haste de injeção e seu espectro harmônico. . . . .	107
Figura 83 – Medições na SE Paratibe após calibração. . . . .	109
Figura 84 – Medições na SE Paratibe após a calibração do protótipo e sua comparação com o equipamento CPC 100. . . . .	111
Figura 85 – Representação das dimensões da malha de aterramento da subestação TAR. . . . .	111
Figura 86 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação TAR. . . . .	112
Figura 87 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento CPC 100 na subestação TAR. . . . .	112
Figura 88 – Representação das dimensões da malha de aterramento da subestação TUR. . . . .	113

Figura 89 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação TUR. . . . .	114
Figura 90 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento CPC 100 na subestação TUR. . . . .	114
Figura 91 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação BTG. . . . .	115
Figura 92 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação TAT. . . . .	115

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Principais métodos de diagnósticos de malha de aterramento. . . . .	22
Tabela 2 – Características dos equipamentos pesquisados. . . . .	24
Tabela 3 – Resistividade de solos. . . . .	31
Tabela 4 – Tipos de conexões. . . . .	33
Tabela 5 – Resumo dos principais métodos, vantagens e limitações. . . . .	61
Tabela 6 – Resultados obtidos no primeiro teste. . . . .	85
Tabela 7 – Resultados obtidos no segundo teste, realizado na malha de aterramento da subestação do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. . . . .	86
Tabela 8 – Resultados obtidos para o terceiro teste (SE Tejipió) com erro % tomando como referência a CPC-100. . . . .	89
Tabela 9 – Resultados obtidos para o quarto teste (SE Ibura) com erro % tomando como referência a CPC-100. . . . .	90
Tabela 10 – Resultados obtidos no quinto teste (SE Bom Jardim) com erro % e utilizando como referência a CPC-100. . . . .	93
Tabela 11 – Resultados do quinto teste na SE Bom Jardim detalhados por frequência - protótipo. . . . .	94
Tabela 12 – Resultados dos testes realizados na SE Cruz de Rebouças detalhados por frequência - protótipo. . . . .	98
Tabela 13 – Resultados dos testes realizados na SE Cruz de Rebouças detalhados por frequência - CPC 100. . . . .	99
Tabela 14 – Resultados do equipamento CPC 100 detalhados por frequência na SE Cruz de Rebouças adquiridos por um oscilógrafo e filtrados pela aplicação da FFT no MATLAB. . . . .	102
Tabela 15 – Resultados do protótipo detalhados por frequência na SE Cruz de Rebouças adquiridos por um oscilógrafo e filtrados pela aplicação da FFT no MATLAB. . . . .	103
Tabela 16 – Resultados detalhados por frequência obtidos na SE Paratibe - dados CPC 100. . . . .	104
Tabela 17 – Resultados detalhados por frequência obtidos na SE Paratibe - dados protótipo. . . . .	105
Tabela 18 – Resultados do protótipo detalhados por frequência na SE Paratibe adquiridos por um oscilógrafo e filtrados pela aplicação da FFT no MATLAB. . . . .	108
Tabela 19 – Resultados obtidos na SE Paratibe - valores medidos com CPC 100. . . . .	108
Tabela 20 – Resultados obtidos na SE Paratibe - valores medidos com protótipo com nova filtragem. . . . .	109
Tabela 21 – Resultados obtidos na SE Paratibe - Aplicação da FFT nos dados de osciloscópio - valores medidos pelo osciloscópio. . . . .	110
Tabela 22 – Resultados finais obtidos na SE Paratibe após calibração - valores medidos pelo protótipo. . . . .	110

## Lista de abreviaturas e siglas

SE	Subestação de Energia Elétrica.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
QEE	Qualidade de Energia Elétrica.
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica.
STEE	Sistema de Transmissão de Energia Elétrica.
FOP	<i>Fall-of-Potential method</i> ou método de queda de potencial.
FAI	Falta de Alta Impedância.
DEC	Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
FEC	Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora.
IED	Dispositivo Eletrônico Inteligente.
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i> ou Dispositivo Eletrônico Inteligente.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
P&D	Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento
SPDA	Sistema de Proteção de Descargas Atmosféricas.
TP	Tensão de Passo.
TT	Tensão de Toque.
OR	Operação Remota.
GMS	Ground Monitoring System.
CELPE	Companhia Energética de Pernambuco.

## Lista de símbolos

$\delta$	Delta
<i>omega</i>	Velocidade angular (Omega)
$\Omega$	Resistência ohmica

## Sumário

<b>1</b>	<b>CONSIDERAÇÕES GERAIS . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>A importância do Aterramento Elétrico . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Contextualização . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivo . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>1.4</b>	<b>Organização textual . . . . .</b>	<b>26</b>
<b>2</b>	<b>PRINCIPAIS ASPECTOS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>Aspectos básicos para projetos de malhas de aterramento . . . . .</b>	<b>29</b>
<b>2.2</b>	<b>Aspectos de segurança . . . . .</b>	<b>35</b>
2.2.1	Teste de potencial de terra e tensão de passo e toque . . . . .	37
<b>2.3</b>	<b>Principais métodos de medições de resistência em malhas de aterramento</b>	<b>39</b>
2.3.1	Método de dois pontos . . . . .	39
2.3.2	Método de queda de potencial (Fall-of-potencial - FOP) . . . . .	40
2.3.3	Método da queda de potencial com injeção de correntes elevadas . . . . .	44
2.3.4	Medições de resistência pelo método Clamp-on ou sem utilizar eletrodos de medição . . . . .	45
2.3.5	Medições de resistência pelo método FOP combinado com o método Clamp-on	46
2.3.6	Método da queda de potencial com frequência variável . . . . .	48
2.3.7	Medição de queda de potencial em altas frequências . . . . .	50
2.3.8	Métodos alternativos de medição de resistência de aterramento e potenciais no solo em instalações energizadas . . . . .	59
<b>2.4</b>	<b>Método Escolhido . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>60</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>3.1</b>	<b>Avaliação das características do sistema e definição dos critérios do equipamento . . . . .</b>	<b>64</b>
3.1.1	Arquitetura do sistema . . . . .	64
3.1.2	Variáveis monitoradas pelo protótipo . . . . .	65
3.1.3	Medição de corrente . . . . .	66
3.1.4	Medição de tensão . . . . .	67
<b>3.2</b>	<b>Módulo de Medição e Potência (MMP) . . . . .</b>	<b>67</b>
3.2.1	Configuração definida do MMP . . . . .	68
3.2.2	Baterias . . . . .	69
3.2.3	Conversor de potência . . . . .	70
<b>3.3</b>	<b>Módulo de Controle - MC . . . . .</b>	<b>71</b>

3.3.1	Comunicação com o MMP . . . . .	74
3.3.2	Módulo de comunicação remota . . . . .	75
<b>3.4</b>	<b>Aplicativo de Gerenciamento . . . . .</b>	<b>75</b>
<b>3.5</b>	<b>Montagem do Protótipo . . . . .</b>	<b>76</b>
3.5.1	Placa de Potência Principal . . . . .	79
3.5.2	Placa de Condicionamento e Controle . . . . .	80
3.5.3	Placa de Medição e Seleção de Faixa . . . . .	80
<b>3.6</b>	<b>Protótipo final . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>3.7</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>82</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>83</b>
<b>4.1</b>	<b>Primeiro teste: Medição com hastes em terreno da UFPE . . . . .</b>	<b>84</b>
<b>4.2</b>	<b>Segundo teste: SE do Centro de Tecnologia da UFPE . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>4.3</b>	<b>Terceiro teste: SE Tejipió . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>4.4</b>	<b>Quarto teste: SE Ibura . . . . .</b>	<b>89</b>
<b>4.5</b>	<b>Quinto teste: SE Bom Jardim . . . . .</b>	<b>92</b>
<b>4.6</b>	<b>Sexto teste: SE Cruz de Rebouças . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>4.7</b>	<b>Sétimo teste: SE Paratibe . . . . .</b>	<b>103</b>
<b>4.8</b>	<b>Oitavo teste: repetição dos testes na SE Paratibe após calibração do protótipo . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>4.9</b>	<b>Medições comparativas de equipamentos que utilizam o método de queda de potencial em baixas e altas frequências em subestações energizadas. . . . .</b>	<b>109</b>
<b>4.10</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>116</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>118</b>

## 1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O sistema elétrico de potência está em constante crescimento de demanda por energia elétrica no mundo. Diante deste cenário, é natural que os consumidores fiquem cada vez mais exigentes no aspecto da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e exijam uma maior continuidade deste fornecimento. No Brasil, as concessionárias que atuam neste setor são fortemente reguladas pelo órgão regulador do setor, que é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), e estão sujeitas aos procedimentos bem definidos e forte fiscalização. As empresas que possuem concessões para geração, transmissão e distribuição de energia elétrica estão sujeitas às exigências cada vez maiores para atendimento às regras de qualidade de fornecimento, buscando a plenitude das atividades relativas ao mercado de energia elétrica.

A qualidade do fornecimento de energia no sistema de distribuição é afetada principalmente por eventos como desequilíbrios, curto-circuitos e descargas atmosféricas. A integridade das malhas de aterramento das subestações de energia é fundamental para que o Sistema Elétrico de Potência (SEP) possa se recuperar de tais eventos e retomar as suas condições nominais de operação. Portanto, os sistemas de aterramento são essenciais para a operação segura das subestações, visto que estão associados aos sistemas de proteção e à manutenção dos gradientes de potenciais em limites seguros para os profissionais que atuam nas instalações.

Malhas de aterramento corretamente dimensionadas e em boas condições, mesmo após terem sido instaladas há certo tempo, é sempre algo desejável nas instalações de energia elétrica de maneira geral. Para isto, os profissionais que atuam nas subestações devem adotar práticas de inspeção e avaliação para tais componentes periodicamente, de forma a gerar um diagnóstico e identificar problemas tais como: interligações e "rabichos" precários dos equipamentos à malha de aterramento; problemas de tensão de passo e toque; verificações da integridade das hastes, condutores e conexões que estão enterradas, através das medições para identificar o valor de resistência de aterramento da malha.

Dentre as ações para avaliação da integridade das malhas de aterramento, é consenso na comunidade técnica e acadêmica mundial e descrito nas normas brasileira NBR15749 (2009) e americana IEEE81 (2012) que a melhor forma de quantificar a condição da malha é através da medição da resistência de aterramento ou por meio de simulações computacionais.

Tais procedimentos, quando realizados de forma regular e com equipamentos apropriados, trazem benefícios como:

- Detecção e diagnóstico das malhas devido ao envelhecimento, à corrosão e ao vandalismo;
- Mitigação dos riscos de queimas de equipamentos de maneira geral, mas

principalmente equipamentos como *Intelligent Electronic Device* ou Dispositivo Eletrônico Inteligente(IED), de proteção e dispositivos de telecomunicações, que são mais sensíveis;

- Detecção antecipada da degradação das malhas mitigando os riscos de interrupções no fornecimento de energia elétrica decorrente dos danos às instalações e o impacto nos índices de continuidade Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (DEC) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (FEC);
- Mitigação de riscos de acidentes no SEP;
- Redução dos índices de reclamações das empresas;
- Redução da severidade das Variações de Tensão de Curta Duração(VTCD), devido a correta atuação dos sistemas de proteção;
- Eliminar a necessidade de deslocamento de um agente de manutenção para reparos emergenciais no sistema de automação e telecomunicações;
- Eliminação da necessidade de alocação de uma equipe de prontidão e operadores de subestações para realização de manobras;
- Altos custos para substituição dos equipamentos danificados.

Medições de resistência de aterramento em subestações energizadas requer cuidados e técnicas específicas, além da utilização de equipamentos apropriados para não gerar erros de diagnósticos. Ma e Dawalibi (2001) é um dos trabalhos em maior destaque deste tema no mundo, onde é feita uma análise comparativa com demonstração de resultados relevantes, como será mostrada mais à frente, fornecendo subsídios para a escolha do método apropriado para realizar este tipo de medição em campo.

Assim, é fundamental ter disponível no mercado equipamentos que possam avaliar a integridade operacional das malhas de aterramento, sobretudo nas instalações mais antigas. Na próxima seção será detalhada a importância das malhas de aterramento para a operação do sistema elétrico. Tais considerações serão aprofundadas no Capítulo 2.

## **1.1 A importância do Aterramento Elétrico**

Para que o SEP opere corretamente, com uma adequada continuidade, qualidade e segurança de serviço, é fundamental dar uma atenção especial ao aterramento elétrico.

De acordo com KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995), esta atenção deve ser traduzida através da elaboração de projetos específicos que considerem dados disponíveis e parâmetros pré-fixados considerando todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido.

O aterramento elétrico é uma ligação elétrica proposital de um sistema elétrico ao solo para proteção da instalação e, principalmente, das pessoas que frequentam o local. Desta forma, no caso de uma fuga de corrente elétrica decorrente de perda de isolamento de algum equipamento, a eletricidade tende a ir para o menor potencial, ou seja, a terra que tem o potencial próximo de zero. Finalmente as pessoas que realizam trabalhos ou ficam próximos a equipamentos energizados não ficam sujeitas àquelas correntes que acontecem devido a falhas ou tem seu efeito mitigado. Suas principais funções são:

- Proteger o operador do equipamento na SE contra contatos diretos e indiretos, através da constituição de um caminho alternativo de baixa impedância para a terra;
- Descarregar cargas estáticas acumuladas nas carcaças das máquinas ou equipamentos para a terra;
- Garantir que os dispositivos de proteção não sofram interferências e atuem corretamente, isolando rapidamente as falhas;
- Proporcionar um caminho de escoamento para as correntes das descargas atmosféricas;
- Possibilitar a operação apropriada dos equipamentos que trabalham em conjunto na SE;
- Prover a equalização de potencial, ou seja, reduzir ou extinguir diferenças de potencial indevidas entre equipamentos, estruturas e quadros;
- Usar a terra como retorno para sistemas Monofásicos com Retorno pelo Terra (MRT).

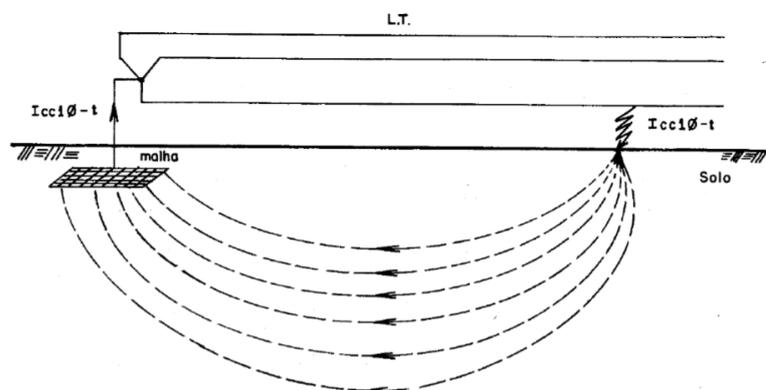
A figura 1 apresenta de forma esquemática a ocorrência de um curto-circuito monofásico. A corrente de curto busca o caminho de menor impedância para circular. O correto dimensionamento do aterramento e as boas condições operativas da malha são fundamentais para que a circulação da corrente não gere sobretensões indesejadas na SE, protegendo, assim, as pessoas e os equipamentos.

## **1.2 Contextualização**

De acordo com a norma ABNT NBR15749 (2009), quando ocorre uma falta para terra em uma SE, as correntes que fluem pelo aterramento provocam o surgimento de diferenças de potencial entre:

- Pontos da superfície do solo (tensão de passo);
- Partes metálicas aterradas da instalação e o solo (tensão de toque), como é o caso de estruturas-suporte, carcaças de equipamentos, entre outros;

Figura 1 – Falta monofásica: caminhos de corrente pelo solo.



Fonte: Adaptado de KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995).

- Circuitos ligados à malha de aterramento e pontos distantes da superfície do solo ou outros sistemas de aterramento afastados (por potencial transferido). É o caso dos circuitos de controle e comunicação, cabos para-raios, blindagem de cabos de potência e outros.

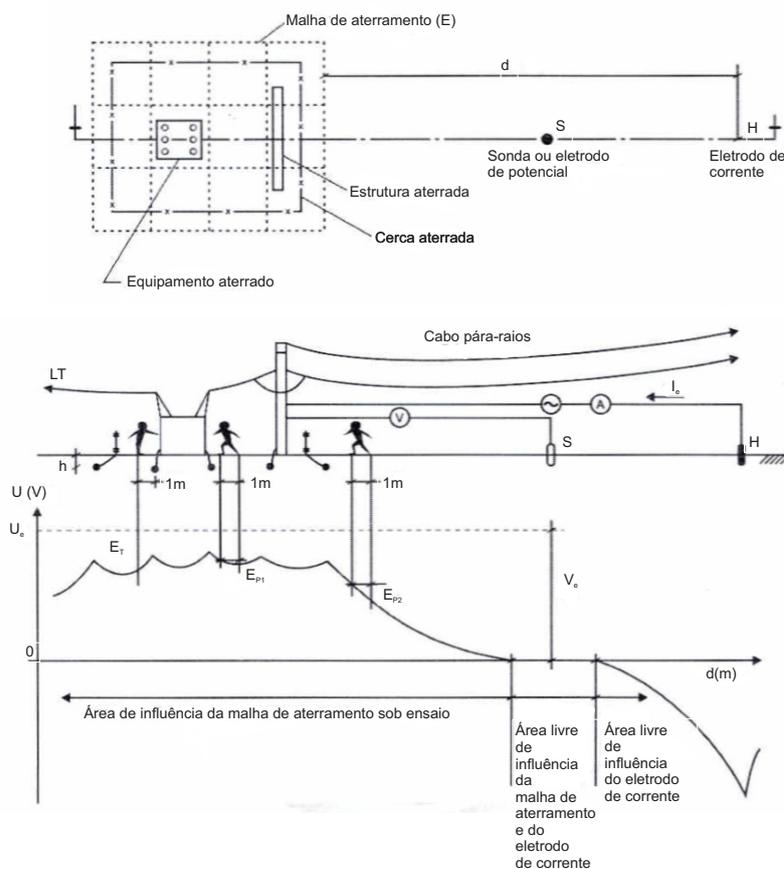
A figura 2 exemplifica e ilustra medição em uma malha de aterramento através do método de queda de potencial - FOP (*Fall-Of-Potential* - será detalhado no capítulo 2) e mostra a distribuição de potencial no solo, bem como as tensões de passo/toque que podem aparecer em uma determinada instalação durante a operação ou um teste de resistência da malha, como foi o caso. Durante os procedimentos de medição dois eletrodos são posicionados fora da SE (cravados no solo), sendo os eletrodos de corrente (H) e o de potencial (S). O eletrodo H deve ficar a uma distância que corresponda de 3 a 5 vezes o comprimento da maior diagonal da malha a ser medida (d). No momento do teste, uma corrente de ensaio ( $I_e$ ) circula entre o eletrodo de corrente e a malha. Neste momento, é possível medir uma diferença de potencial entre a malha e um ponto remoto (eletrodo S), denominada  $V_e$  ou elevação de potencial da malha de aterramento.

No gráfico de potencial (V) em função da distância (m), é possível identificar:

- Área de influência da malha de aterramento sob ensaio, que é a própria área que a malha faz parte até as proximidades de fora da SE;
- Área livre de influência da malha, que é a área nas proximidades do eletrodo S;
- Área de influência do eletrodo de corrente, que é a área próxima do eletrodo H;
- Tensões de passo  $E_{p1}$  e  $E_{p2}$  e Tensão de Toque  $E_t$

Ainda de acordo com a norma ABNT NBR15749 (2009), a medição em campo é o procedimento mais eficaz para verificação dos valores da resistência da malha de aterramento e dos valores dos potenciais de passo e toque calculados em projeto, com finalidade de verificação

Figura 2 – Tensões que podem aparecer em uma SE durante um teste de resistência de malha.



Fonte: Adaptado de NBR15749 (2009).

de níveis de segurança em instalações antigas ou, ainda, em ensaios de comissionamento de instalações novas. Estas medições visam basicamente:

- Verificar a eficácia dos eletrodos ou da malha de aterramento;
- Definir possíveis alterações para uma malha de aterramento existente;
- Detectar possíveis tensões de toque e passo perigosos;
- Confirmar a interligação adequada de todos os equipamentos e partes metálicas;
- Determinar a elevação de potencial da malha de aterramento em relação ao terra de referência, objetivando garantir a proteção do pessoal que mantenha ou não contato com as instalações, circuitos de comunicação, controle e outros.

Por essa razão, as malhas de aterramento exigem uma avaliação permanente, sendo necessário realizar inspeções periódicas e medições da resistência de aterramento com objetivo de garantir o correto funcionamento do aterramento, além de atendimento às exigências legais estabelecidas pela NR 10.

Para realizar um diagnóstico periódico nas malhas, a norma brasileira ABNT NBR15749 (2009), destaca o método de queda de potencial (*Fall-Of-Potential* - FOP) como o método mais tradicional para medição da resistência da malha de aterramento. Um outro método que a norma brasileira comenta, mas de forma breve, é o método de alta frequência.

De forma semelhante, a norma americana IEEE81 (2012) define como método clássico as medições de resistência de aterramento através do método de queda de potencial (FOP). De forma complementar, as medições das interligações dos equipamentos à malha e as medições de tensões de passo e toque são fundamentais para garantir o bom funcionamento e a segurança da malha de aterramento.

A norma IEEE81 (2012) também menciona a realização de medições de resistência de malha utilizando alta frequência, mas de forma bem genérica. Nela, a aplicação do método da alta frequência ficou circunscrito aos casos em que se deseje emular componentes de alta frequência que surgem devido a surtos atmosféricos. Todas as menções ao uso de alta frequência para medição de resistência de aterramento foram eliminadas.

Estas normas também dão destaques a aplicação do método FOP com frequência variável, como é o caso da realização dos ensaios com baixas frequências, para eliminação de influências eletromagnéticas conhecidas a 60Hz. Desta forma, tanto a norma nacional ABNT como a americana (IEEE) destacam o método de queda de potencial (*Fall-Of-Potential* - FOP) como sendo o mais recomendado para medições de resistência de aterramento em sistemas de aterramento de SE de distribuição. A tabela 1 resume os métodos citados em normas com as características principais.

Tabela 1 – Principais métodos de diagnósticos de malha de aterramento.

<b>Normas</b>	<b>Método FOP freq. variável</b>	<b>Método FOP altas freq.</b>
<b>ABNTNBR15749</b>	Recomendado	Descrito de forma genérica
<b>IEEE81</b>	Recomendado	Ensaio de surtos atmosféricos

Fonte: próprio autor.

Atualmente, só existem no mercado nacional equipamentos para testes de resistência de malhas de aterramentos para subestações desenergizadas. Este fato faz com que a maioria das concessionárias de energia elétrica utilizem equipamentos que não são específicos, como o terrômetro, para realizar medições em SE energizada. Quando o terrômetro é utilizado em SE desenergizadas os resultados são adequados, mas quando utilizado em SE energizada poderá gerar resultados imprecisos e induzirá os profissionais de manutenção a erros de diagnósticos de problemas.

Não há equipamento disponível no mercado nacional que possibilite um diagnóstico de aterramento para subestações energizadas, que estão expostas às influências dos campos eletromagnéticos no entorno dos equipamentos submetidos a alta e média tensão. Os equipamentos que realizam avaliações em malhas energizadas são importados e de alto custo.

A figura 3 mostra as opções de equipamentos comerciais existentes atualmente. De acordo com a pesquisa realizada para os principais equipamentos disponíveis no mercado, foram levantadas as principais características desses equipamentos como os níveis de tensão, corrente, frequência, fonte de alimentação do equipamento, capacidade de medição da resistência de terra, capacidade de operar remotamente, capacidade de medição de tensão de toque e passo. Os equipamentos comparados foram:

Figura 3 – Equipamentos comerciais utilizados para a medição da resistência de sistemas de aterramento em subestações.



Fonte: próprio autor.

- *Multi-functional primary test system CPC100 Omicron.* Equipamento que mais se destaca no cenário internacional, de fabricação austríaca. O CPC-100 é o único do mercado projetado para medições de malhas de aterramento em SEs energizadas. É um equipamento multifunção, capaz também de realizar comissionamentos de transformadores e disjuntores de alta tensão em subestações.
- *Terrômetro digital 20KWE Megabrás.* Equipamento muito popular no mercado nacional e muito utilizado para medições de resistividade do solo e resistência de malhas de aterramento. No entanto, não é indicado para medições de malhas de subestações em operação, visto que sofre bastante influências eletromagnéticas durante as medições, podendo gerar erros significativos.
- *Testador de aterramento GEO Fluke 1625-2.* Trata-se de um testador de aterramento capaz de medir as resistências do *loop* de aterramento usando apenas alicates – chamado de teste sem utilização de hastes. Trata-se de medições de interligações de equipamentos

para malhas de grande porte, ou medições de resistências de eletrodos de aterramentos individuais para sistemas de pequeno porte.

- *High-Frequency Earth Resistance Meter ABB HW2S* é um equipamento mais indicado para determinar as resistências de aterramento de torres de linhas de transmissão aéreas com cabo guarda na parte superior da torre. O instrumento foi projetado especialmente para o controle rotineiro da eficácia dos aterramentos da torre com o mínimo de esforço e tempo. Utiliza também o método de medição de alta frequência de forma a eliminar a influência de aterramentos de torre adjacentes conectados pelo cabo guarda.
- Terrômetro digital TM25R Megabrás é um terrômetro que utiliza alta frequência, sendo mais indicado para medições de pé de torre de Linhas de Transmissão. Possui frequência de operação de 25kHz e intervalo de medição de 0 até 300 $\Omega$  e minimiza o efeito do cabo de guarda durante as medições.
- O equipamento MTR1530, de fabricação da Minipa, é um terrômetro com intervalo de medição de 0,01 até 4k $\Omega$ . Sistema de medição através de inversor de corrente constante. Para subestações desenergizadas poderá ser utilizado, mas para SE energizada possui muitas limitações principalmente por conta da capacidade limitada de injeção de corrente para teste.

A Tabela 2 resume as características dos equipamentos pesquisados. Além dos dados mais conhecidos, como corrente, frequência de operação e alimentação, a tabela também indica se os equipamentos possuem funcionalidades de medições de TP (Tensão de Passo), TT (Tensão de Toque) e OR (Operação Remota). A coluna "Aplicação" destaca a indicação do fabricante para uso. Algumas informações não estavam disponíveis (N/I).

Tabela 2 – Características dos equipamentos pesquisados.

<b>Equipamentos</b>	<b>Corrente</b>	<b>Freq.</b>	<b>Alimentação</b>	<b>OR/TP/TT</b>	<b>Aplicação</b>
OMICROM CPC100	0 a 6A	15 a 400Hz	CA	Sim	SE energizada
MEGAB. MTD-20KWE	15mA	90Hz	Bateria	Não	SE desenergizada
MEGABRÁS TM25R	20mA	25kHz	Bateria	Sim	Pé de torre de LT
ABB HW2S	20mA	N/I	Bateria	Não	Pé de torre de LT
FLUKE 1625-2	250mA	40 a 400Hz	Bateria	Não	Interligações
MINIPA MTR1530	2mA	820Hz	Bateria	Não	SE desenergizada

Fonte: próprio autor.

Dentre os equipamentos comerciais pesquisados, apenas o CPC100 da Omicrom é isolado e trabalha com correntes elevadas, o que permitiria a sua utilização em subestações

energizadas. No entanto, este equipamento ainda apresenta o inconveniente de não ser alimentado a bateria, dificultando o seu uso em subestações desenergizadas. Outra característica importante do CPC100 é ser multifunção e importado, o que faz com que o seu preço seja bastante elevado (da ordem de algumas centenas de milhares de Reais).

No que diz respeito a utilização em alta frequência, dois equipamentos se destacam: o Megabrás 25R e o ABB HW2S3. É dito de forma bastante clara nas especificações técnicas de ambos os equipamentos que a alta frequência é utilizada apenas na verificação da qualidade do aterramento das linhas de transmissão (como citado na IEEE 81-2012).

A necessidade de realizar medições em malhas de aterramento de subestações em operação é uma realidade para as áreas de manutenções de todas as concessionárias de energia elétrica e grandes indústrias. Com exceção das empresas que utilizam o CPC100, a grande maioria das concessionárias no Brasil estão utilizando equipamentos inadequados para medições de SE energizadas. Tais medições acarretam um falso diagnóstico das condições de aterramento, podendo gerar prejuízos como:

- A permanência de condições precárias, podendo acarretar queima de equipamentos e graves acidentes;
- Queima de IED (*Intelligent Electronic Devices*) e equipamentos eletrônicos;
- Elevado grau de comprometimento da segurança nas instalações;
- Podem causar desligamentos desnecessários, contribuindo negativamente para os indicadores de qualidade das distribuidoras;
- Elevado custo de manutenção para substituição de equipamentos avariados e indisponíveis.

### 1.3 Objetivo

Projetar e implementar um equipamento específico para avaliação das condições das malhas de aterramento de subestações energizadas, através de medições de resistência de malha, testes de interligações dos equipamentos e tensões de passo e toque. Todas essas verificações possibilitam um diagnóstico mais preciso e irão subsidiar decisões de investimentos das áreas de manutenção das empresas para restabelecer as condições de projeto das malhas de aterramento das SE. Trata-se de uma solução muito mais acessível financeiramente, quando comparada às opções importadas, além de apresentar funcionalidades que tornam o produto portátil, de utilização remota e com inovações tecnológicas que agrega bastante no aspecto de segurança para as equipes de manutenção que precisam realizar medições periodicamente.

O método escolhido para desenvolvimento deste trabalho é o método de queda de potencial com frequência variável, fazendo uso de um equipamento eletrônico capaz de injetar

correntes elevadas de frequência diferente da fundamental, possibilitando assim eliminar as possíveis interferências causadas pelo sistema.

O desejado é que este equipamento tenha um custo dezenas de vezes menor do que o CPC100, possibilitando que este método de medição seja mais difundido entre as concessionárias e a prática de medições em instalações energizadas seja realizada de forma mais periódica, acarretando um monitoramento mais frequente dos sistemas de aterramento das empresas.

Assim, este trabalho é fruto de um projeto de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) com o desenvolvimento de um equipamento que possua como características técnicas não encontradas em outros dispositivos:

- Equipamento alimentado por bateria;
- Equipamento projetado de acordo com as normas internacionais de segurança IEC 61010-1, CAT IV;
- O equipamento deve ser comandado através de um dispositivo móvel usando rede sem fio Wi-Fi;
- A frequência de operação pode ser ajustada para qualquer valor na faixa de 40 a 100 Hz e o sinal de corrente para qualquer forma de onda contínua desejável;
- A capacidade de produzir corrente de injeção com valor máximo de 15 A;
- Equipamento capaz de realizar ensaios para determinar as tensões de passo e toque.

#### 1.4 Organização textual

Este trabalho está organizado em:

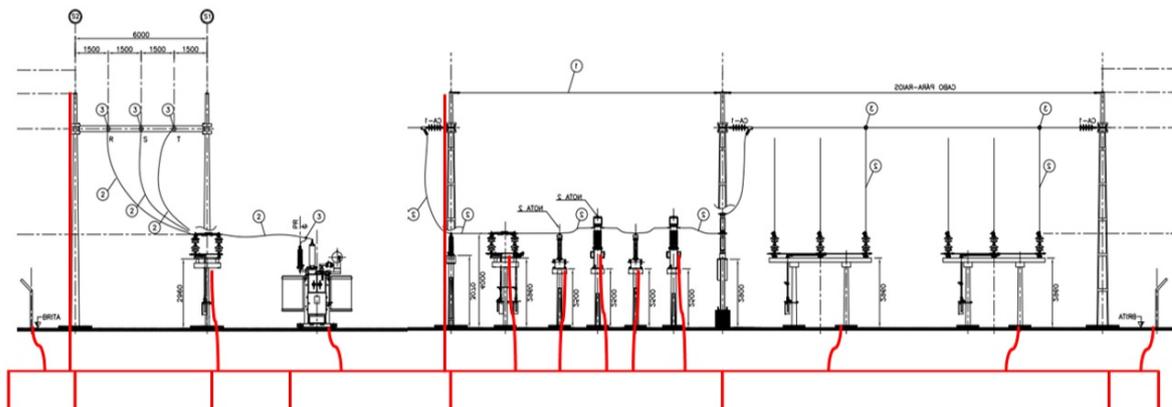
- **Capítulo 2** - Descreve-se de forma mais detalhada sobre aterramento e os principais aspectos de segurança. Também são abordados os principais métodos de medições de malhas de aterramento, além da justificativa técnica para a escolha do método de queda de potencial com injeção de alta corrente;
- **Capítulo 3** - É apresentado todo desenvolvimento do equipamento, com a composição do protótipo, suas aplicações e os testes realizados em campo;
- **Capítulo 4** - São apresentados os principais resultados obtidos com o equipamento desenvolvido;
- **Capítulo 5** - São apresentadas as conclusões e as sugestões de trabalhos futuros.

## 2 PRINCIPAIS ASPECTOS DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

As SEs de energia elétrica são formadas por um conjunto de equipamentos usados para controlar, modificar, comandar, distribuir e direcionar o fluxo de energia. Possuem a função estratégica no SEP de fazer a ligação entre as linhas de transmissão com as redes de distribuição que, por sua vez, fornecem energia elétrica aos consumidores finais, de forma segura e com menor número de interrupções. Os sistemas de aterramento são componentes fundamentais dentro das SEs e possuem funções muito importantes, visando a proteção do sistema, a segurança dos seres vivos e a proteção de máquinas e equipamentos. O aterramento é também responsável por manter as instalações elétricas em equilíbrio, possibilitando o controle e fornecendo um potencial de referência, para todos os equipamentos a ela interligados. Com isso, possibilita a operação apropriada dos inúmeros equipamentos que operam em conjunto na SE. Nesse contexto, as malhas de aterramento são de fundamental importância para a proteção dos equipamentos que compõem as SEs e dos indivíduos nelas presentes durante a ocorrência de uma falta elétrica na rede. Têm, também, a função de estabelecer uma conexão intencional com o potencial elétrico da Terra através da utilização de um ou vários eletrodos de cobre ou outro metal de boa condutibilidade, cravados no solo e interconectados, formando assim uma malha.

Na figura 4, é visto um projeto de um arranjo eletromecânico (perfil) de uma SE e destaca que todos os equipamentos elétricos que fazem parte do pátio desta instalação devem, por norma, estarem interligados na mesma malha, ficando conectados ao mesmo potencial elétrico, como destacado em linha vermelha. Desta forma, é possível identificar a Interligações dos equipamentos da SE à malha de aterramento.malha instalada abaixo dos equipamentos.

Figura 4



Fonte: adaptado de relatórios CELPE.

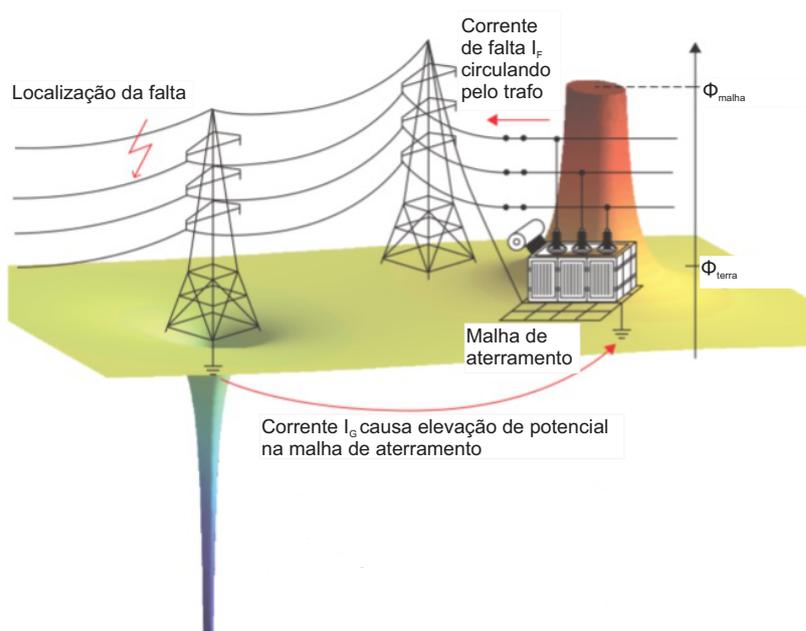
A próxima seção irá mostrar detalhes dos principais aspectos para elaboração de projetos

de malha de aterramento.

Conforme descrito em Klingenchmid e Pikisch (2017), durante uma falta à terra, a corrente retorna ao neutro da rede. Para estabelecer um caminho de retorno de baixa resistência ôhmica para a corrente de falta, os sistemas de aterramento devem permitir uma conexão de baixa impedância entre o solo e o neutro da rede. Em princípio, uma malha de aterramento consiste em elementos condutores, como cabos, hastes e conexões. Esses elementos têm contato direto com o solo, o que permite circular uma corrente entre o solo e o neutro. Quanto mais elementos condutores são conectados ao solo, melhor a condição da malha de aterramento.

A Figura 5 mostra o potencial no caso de uma falta à terra em uma linha. A corrente de retorno através do solo provoca um aumento de potencial da malha de aterramento em relação ao solo de referência. O potencial de referência é representado pela planície verde. Na vizinhança da malha de aterramento, a corrente de retorno causa um aumento de potencial em forma de cone de acordo com a teoria do campo eletromagnético. O aumento do potencial de terra  $V_G$  é considerado como a tensão que surge entre a malha de aterramento e um local infinitamente remoto. Praticamente, o potencial dessa localização é representado pela parte plana em torno do aumento potencial da malha de aterramento. Esta zona é considerada como não sendo mais diretamente influenciada pela malha de aterramento. Além disso, é introduzido o conceito de impedância de aterramento,  $Z_G$ , que representa a tensão que surge entre a malha de aterramento e o terra de referência. O aumento do potencial de terra é igual à corrente que circula pela malha de aterramento multiplicada pela impedância desta malha. Assim, observando a figura 5, nota-se que:

Figura 5 – Potenciais durante uma falta para terra.



Fonte: adaptado de Klingenchmid e Pikisch (2017).

- Aumento de potencial de malha:

$$V_G = \Phi_{malha} - \Phi_{terra} \quad (1)$$

- Impedância de aterramento:

$$|Z_G| = \frac{|V_G|}{|I_G|} \quad (2)$$

Uma elevação muito grande no potencial da malha em relação ao potencial do solo durante uma falta indica um contato insuficiente (mau contato) entre a malha de aterramento e os equipamentos protegidos e/ou um contato insuficiente entre a malha de aterramento e o solo. Como consequência, a impedância de aterramento apresenta um valor bastante elevado também. Portanto, essa impedância é um bom indicativo da qualidade da malha de aterramento, sendo que um valor baixo indica um bom contato dos elementos da SE e o solo, enquanto um valor elevado indica um mau contato / deterioração dos componentes. Para reduzir a impedância de aterramento, a malha de aterramento deve ser estendida por elementos condutores adicionais ou elementos condutores deteriorados existentes devem ser substituídos.

## 2.1 Aspectos básicos para projetos de malhas de aterramento

Como ponto principal para ser avaliado durante a elaboração do projeto de aterramento, é fundamental conhecer o tipo de solo e, principalmente, sua resistividade elétrica. De acordo com NBR15749 (2009), seguem os principais conceitos associados à resistividade:

- Resistividade aparente do solo é a resistividade vista por uma malha de aterramento qualquer, em um solo com característica de resistividade homogênea ou estratificado em camada, cujo valor é utilizado para o cálculo da resistência de aterramento desse sistema;
- Resistividade elétrica do solo é a resistência entre faces opostas do volume de solo, consistindo em um cubo homogêneo e isótropo cuja aresta mede uma unidade de comprimento;
- Resistividade média do solo a uma dada profundidade é o valor resultante da avaliação das condições locais e do tratamento estatístico dos resultados de diversas medições de resistividade do solo para aquela profundidade, efetuadas numa determinada área ou local, e que possa ser considerado representativo das características elétricas do solo.

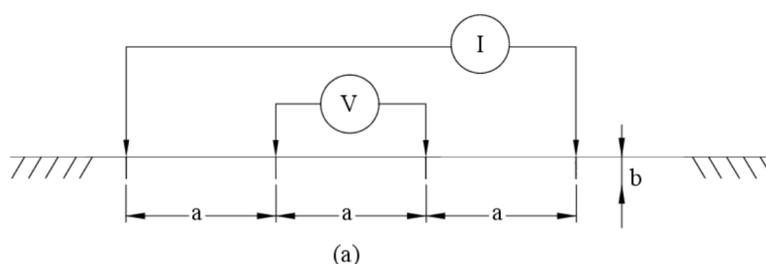
A referência KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995) define os principais fatores que influenciam a resistividade do solo:

- Tipo de solo;
- Mistura de diversos tipos de solo;

- Solos constituídos por camadas estratificadas com profundidades e materiais diferentes;
- Teor de umidade;
- Temperatura;
- Compactação e pressão;
- Composição química e concentração dos sais dissolvidos na água retida.

A figura 6 mostra o principal método para medição da resistividade do solo (método de Wenner), de acordo com NBR7117 (2012). Esta medição deve ser realizada para diversos pontos e em várias direções (norte, sul, nordeste, sudoeste, noroeste, sudoeste) para poder avaliar o solo do terreno como um todo. As medições devem ser feitas num período seco e, se possível, com local já terraplanado e compactado. Os dados obtidos devem ser convenientemente analisados, tendo em vista a eliminação de valores considerados atípicos, resultantes da influência de interferências locais, tais como rochas ou condutores enterrados no solo, não representativos, portanto, do solo local.

Figura 6 – Medição de resistividade de solo pelo método de Wenner.



Fonte: adaptado de IEEE81 (2012).

As combinações relacionadas anteriormente resultam em uma diferente resistividade do solo. A tabela 3 mostra a variação da resistividade para solos de natureza distintas.

A resistividade do solo está diretamente relacionada ao valor de resistência de aterramento final da malha, ou seja, a resistividade do solo onde a subestação foi construída tem uma influência direta na definição do valor da resistência da malha de aterramento. A referência Ma e Dawalibi (2001) deixa clara esta influência e mostra alguns resultados comparativos de testes realizados em instalações com alta e baixa resistividade do solo e será visto na seção sobre método de queda de potencial em altas frequências.

Já a referência Ma e Dawalibi (2000) analisa resultados de testes de impedância de malhas de aterramento, utilizando o método de queda de potencial, sob o aspecto de diferentes estruturas de solos. As estruturas de solos consideradas foram: solos em camadas horizontais, verticais, cilíndricas, esféricas e finitos solos volumosos. Os resultados mostram que a regra de

Tabela 3 – Resistividade de solos.

<b>Tipo de solo</b>	<b>Resistividade [<math>\Omega.m</math>]</b>
Lama	5 a 100
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1500 a 5000
Argila com 20% de umidade	330
Areia molhada	1300
Areia seca	de 3000 a 8000

Fonte: adaptado de NBR7117 (2012).

definição da região do patamar em 62%, que define o valor de resistência de aterramento medida - será detalhada melhor na seção 2.3.2, não é válida para solos não homogêneos. O erro pode chegar a 44% em solos verticais. A referência Ma e Dawalibi (2000) mostra que é essencial realizar a medição de resistividade do solo antes ou durante as medições de queda de potencial, de forma a determinar com precisão a impedância de malha de aterramento à partir das curvas medidas e melhorar o entendimento e interpretação destas curvas.

Ainda de acordo com KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995), existem diversos tipos de sistemas de aterramentos. Os principais são:

- Uma simples haste cravada no solo;
- Hastes alinhadas;
- Hastes em triângulos;
- Hastes em quadrado;
- Hastes em círculos;
- Placas de material condutor enterradas no solo;
- Fios ou cabos enterrados no solo, formando diversas configurações, tais como estendido em vala comum; em cruz; em estrela; quadriculados, formando uma malha de terra.

Os tipos de malhas de aterramentos são definidos à partir dos dados coletados no terreno onde será construída a SE. Informações como valores das medições de resistividade do solo e valores de níveis de curto-circuito calculado, tanto curto monofásico como trifásico nos

barramentos de tensão primária e secundária em determinada região onde será implantada a SE são fundamentais para serem utilizadas em software específico. A figura 7 mostra um exemplo em que os valores de medições de resistividade do solo são inseridos no software como um dos dados fundamentais para o cálculo e elaboração do projeto da malha de aterramento.

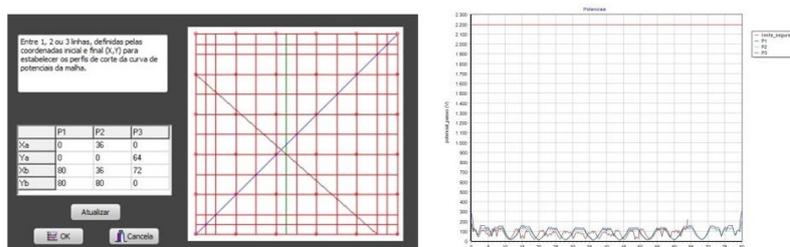
Figura 7 – Tela de software para realização de projeto de malha de aterramento.



Fonte: adaptado de relatórios CELPE.

Já a Figura 8 mostra, para o mesmo exemplo visto na Figura 7, detalhes do projeto da malha mais avançados. É possível verificar a forma geométrica da malha e como os componentes estarão distribuídos. Um gráfico mostrando o cálculo estimado de como irá se comportar a tensão de passo também está disponível para o projetista.

Figura 8 – Projeto - verificação de tensão de passo.



Fonte: adaptado de relatórios CELPE.

De acordo com NBR7117 (2012), o software realiza também todos os cálculos para dimensionamento térmico para definição do condutor a ser utilizado cuja seção (S) seja capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima ( $I_f$ ) durante um determinado tempo (t). A temperatura deste condutor deve ser avaliada para ficar dentro de um valor-limite suportável ( $T_m$ ), considerando uma temperatura ambiente ( $T_a$ ) e que toda energia térmica fica retida no condutor devido a pequena duração da corrente de curto.

A referência NBR7117 (2012) define ainda os tipos de conexões e de condutores para serem utilizados em sistemas de aterramentos, dependendo do projeto. A tabela 4 mostra os tipos mais utilizados em malhas, onde vale destacar que a solda exotérmica, conhecida como

aluminotermia, tem conexão feita através da fusão obtida pela ignição e combustão de uma formulação em um molde.

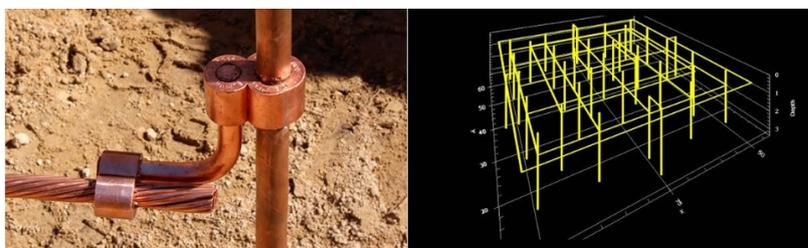
Tabela 4 – Tipos de conexões.

Conexões	$T_m$ °C
Mecânica (aparafusada ou por compressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850
Emenda à compressão	850

Fonte: adaptado de NBR7117 (2012).

A figura 9 mostra detalhes de uma malha de aterramento. A figura da esquerda mostra uma haste conectada com o cabo de cobre através de conexão à compressão. Este tipo de conexão é resistente aos esforços mecânicos e agentes químicos aos quais as malhas normalmente ficam submetidas no solo (vibração, recalque, acidez do solo, etc). Já a figura da direita mostra mais detalhes de projeto realizado em software específico.

Figura 9 – Componentes de malhas.

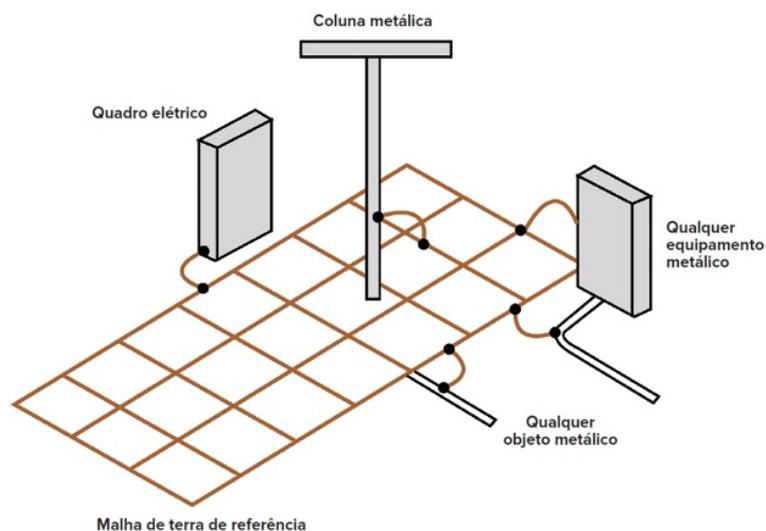


Fonte: Pabloguimaraes (2020).

Analisando a disposição dos equipamentos no pátio de uma subestação, um ponto fundamental que a referência KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995) destaca é que devem ser aterradas todas as partes metálicas da SE e seus equipamentos que possam eventualmente ter contato com as partes energizadas. Assim, um contato acidental de uma parte energizada com a massa metálica aterrada estabelecerá um curto-circuito, provocando a atuação da proteção e interrompendo a ligação do circuito energizado com a massa. A figura 10 mostra um exemplo em que todos os equipamentos ou componentes metálicos estão aterrados.

Assim, conforme as etapas verificadas anteriormente, para o bom funcionamento da malha de aterramento projetada, faz-se necessário aterrar todas as partes metálicas de

Figura 10 – Aterramento de equipamentos e estruturas.



Fonte: Alemetec... (2020).

componentes e massa dos equipamentos à malha. Para projetar adequadamente, deve-se seguir as seguintes etapas:

- Definir o local de aterramento, baseando-se também nos dados mostrados na tabela 3;
- Providenciar várias medições de resistividade do solo no local, conforme mostrado na figura 6 através do método de Wenner. Estas medições ajudam na estratificação do solo nas respectivas camadas;
- Aplicar os parâmetros obtidos de resistividade do solo, tamanho e geometria do terreno e níveis de curto-circuitos em software específico. O software irá calcular e dimensionar o tamanho e geometria adequada da malha de aterramento, levando em conta a sensibilidade dos relés e os limites de segurança pessoal (fibrilação ventricular do coração).

Um dos softwares mais conhecidos no mercado para elaboração de projetos de malhas de aterramento é o TecAt. Dentre as principais funções, de acordo com TECAT (2016) realiza:

- Resistividade do solo pelo método de Wenner ou Schlumberger em 2, 3 ou 4 camadas;
- Malhas para SE - Cálculos numéricos em 2, 3 ou 4 camadas / Resistência de aterramento / Potenciais de toque, passo e superfície;
- Malhas industriais / comerciais e residenciais - qualquer formato, até milhares de condutores de dimensões variadas, horizontais, verticais ou inclinados - cálculo numérico em duas, três ou quatro camadas;
- Relatórios descritivos, gráficos e tabelas.

## 2.2 Aspectos de segurança

Do ponto de vista da segurança, o aterramento deve ser projetado e mantido de forma que os valores de diferença de potencial sejam tais, que pessoas que, porventura, caminhem próximas a estruturas aterradas ou mesmo toquem na carcaça de estruturas aterradas não sofram nenhum tipo de choque elétrico. Uma vez que nosso corpo apresenta resistência elétrica, uma diferença de potencial elétrico entre quaisquer duas partes do corpo humano fará passar por ele uma corrente elétrica. Caso esta corrente esteja acima de certos limiares, efeitos danosos podem ocorrer ao organismo.

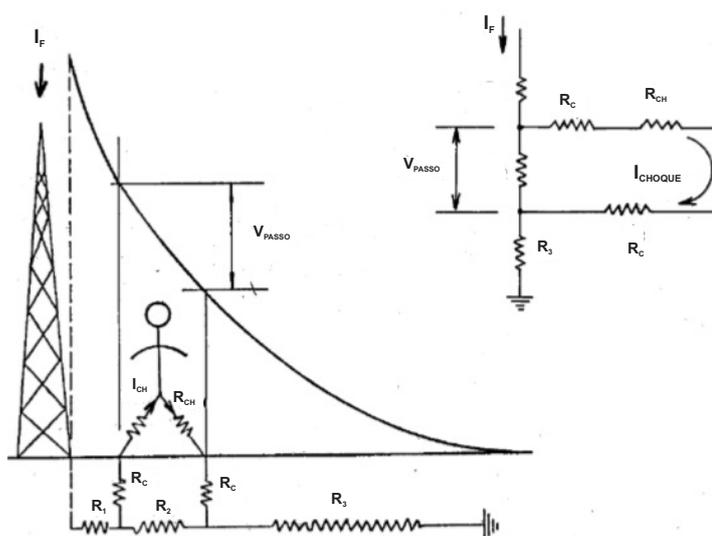
Dentro dos conceitos de segurança, vale destacar os conceitos da referência KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995):

- Tensão de passo: se uma pessoa caminha sobre uma malha de aterramento pela qual flui uma corrente, uma diferença de potencial elétrico aparece entre seus pés. Esta diferença de potencial é dita tensão de passo, classicamente definida como a tensão entre dois pontos situados no chão e distanciados de 1 metro. Este comprimento é um valor normatizado como máximo para um passo em uma caminhada. Se a tensão de passo ultrapassar um dado limiar, a corrente que flui pelo corpo pode ser prejudicial. A Figura 11 exemplifica uma distribuição de potencial elétrico no solo devido a uma corrente de falta vinda da torre (If) e as resistências que ele encontra.
- Tensão de toque: Se uma pessoa toca um equipamento aterrado acidentalmente energizado ou o próprio condutor, uma diferença de potencial elétrico aparece entre sua mão e seus pés. Esta tensão é dita tensão de toque. Conforme ilustrado na Figura 12, se esta tensão ao passar pela resistência do corpo humano e pela resistência de contato do corpo com o chão causar uma corrente acima de dado limiar, danos ocorrerão à saúde da pessoa. Uma tensão de toque é definida como a diferença de potencial entre um objeto aterrado e um local de 1 m de distância no caso de uma falta à terra. Este cenário representa o pior caso para uma pessoa que toca neste objeto, já que um braço máximo de 1 m é assumido. Uma tensão escalonada é definida como a diferença de potencial entre dois locais distantes 1 m um do outro no caso de uma falta à terra. Este cenário representa o pior caso para uma pessoa ser exposta a uma tensão de degrau ao ficar de pé com os pés a 1 m de distância.

A Figura 13 traz outro exemplo de aumento potencial de uma malha de aterramento durante uma falta, onde circula uma corrente de falta  $I_f$ . Em contraste com a ilustração simplificada da Figura 5, o contorno de potencial dentro da malha de aterramento não é plano. Portanto, conforme relatado em Stevenson (1986), as tensões de passo e de toque devem ser consideradas dentro e fora da subestação para segurança do pessoal.

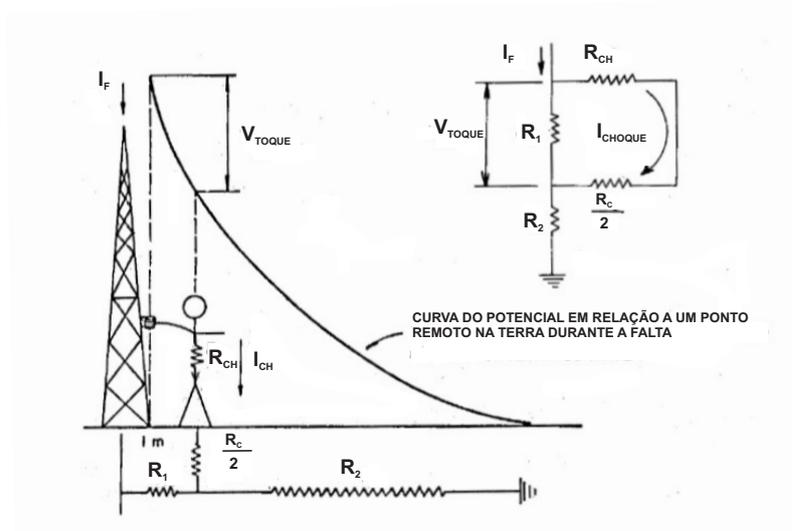
As referências Saadat (2002) e KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995) definem correntes corporais admissíveis conforme mostrado na Figura 14. Essas correntes corporais

Figura 11 – Ilustração do surgimento de tensão de passo.



Fonte: adaptado de KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995).

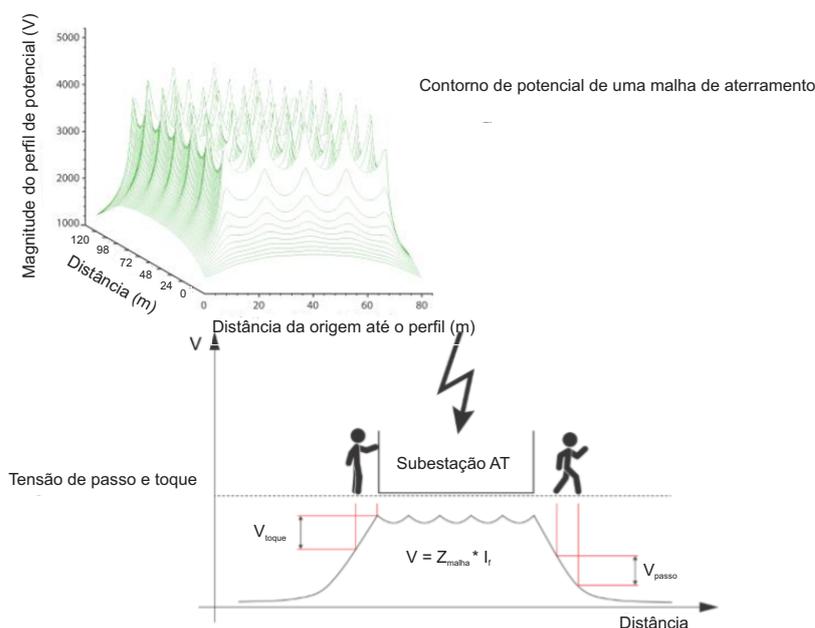
Figura 12 – Ocorrência de falta e o risco de choque elétrico.



Fonte: adaptado de KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995).

dependem da duração máxima da falta. Quanto maior a duração da falta, menor a corrente corporal admissível. A impedância do corpo é considerada como  $1 \text{ k}\Omega$  em ambos os padrões, o que significa que a tensão de toque permitida é igual à da corrente do corpo, apenas em V. No entanto, para a medição e avaliação das tensões de passo e toque, dois padrões definem diferentes abordagens. Saadat (2002) recomenda um método simulando o corpo humano, medindo a tensão de toque através de um resistor de  $1 \text{ k}\Omega$  e usando uma placa de metal, que simula os pés descalços.

Figura 13 – Contorno de potencial e tensão de passo.



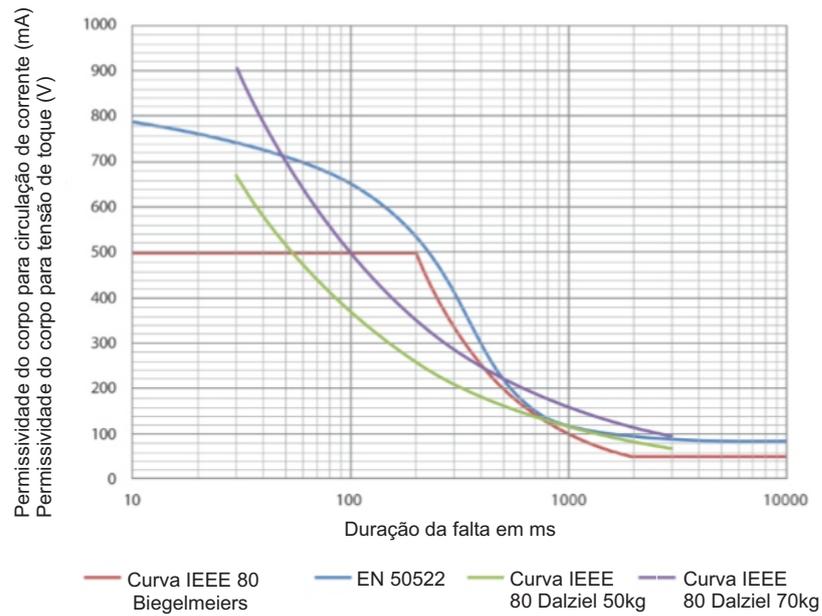
Fonte: adaptado de Klingenchmid e Pikisch (2017).

Saadat (2002) também recomenda que o solo embaixo da placa de metal esteja úmido, a fim de simular o pior caso. Paulino e Junior (2014) recomenda medir tensões de passo e de toque com um voltímetro de alta impedância e uma haste, que é fixada pelo menos 150 cm no solo. Por este meio, a tensão de toque medida é mais alta que a tensão de toque na qual uma pessoa seria exposta. Portanto, KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995) também consideram resistências adicionais para a avaliação de tensões de passo e de toque.

### 2.2.1 Teste de potencial de terra e tensão de passo e toque

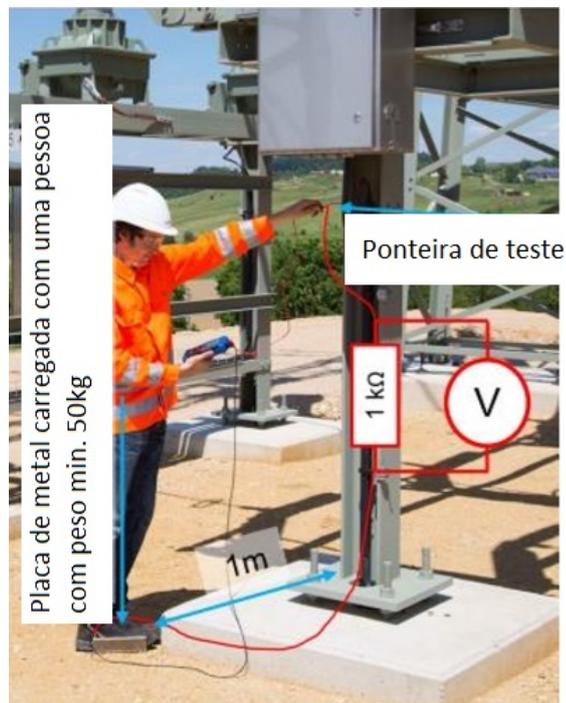
Uma malha de aterramento é projetada para limitar as tensões de passo e de toque em toda sua área, dentro dos limites toleráveis. Uma boa prática é realizar estas medições, seja durante o comissionamento de novas instalações ou durante uma manutenção periódica, visando comparar com os parâmetros definidos no projeto. De acordo com EN50522 (2011), a medição é através de injeção de corrente em um circuito montado em um determinado ponto da subestação. Este método simula tensão de toque através de um resistor de  $1k\Omega$  e usando uma placa de metal para mais se aproximar de uma situação de uma pessoa com os pés descalços a 1 metro de distância do objeto. A placa deve ter dimensões de 20 X 20 cm e ser carregada com pelo menos 50 kg, de preferência uma pessoa que pisar nela, conforme mostrado na figura 15. O solo sob a placa de metal deve estar úmido para simular o pior cenário possível.

Figura 14 – Valores permissivos de circulação de corrente para o corpo humano.



Fonte: adaptado de Klingenchmid e Pikisch (2017) e IEEE80 (2013).

Figura 15 – Momento de um teste de tensão de toque em uma estrutura de um equipamento de subestação.



Fonte: Adaptado de Klingenchmid e Pikisch (2017).

## 2.3 Principais métodos de medições de resistência em malhas de aterramento

O conhecimento do valor da resistência de aterramento é de suma importância para a ampliação ou manutenção da malha de terra de uma SE. Estando de posse do valor da resistência de aterramento, pode-se compará-lo com os dados originais do projeto, analisando assim a sua qualidade. Caso o valor da resistência de aterramento seja maior do que o calculado no projeto, há um indicativo de mau dimensionamento da malha de terra ou mesmo algum problema na malha de aterramento, como o rompimento de algum cabo de aterramento, falhas nas soldas, etc.

No caso de não se ter algum dado do projeto original, o valor da resistência de aterramento pode ser usado como um valor inicial de referência para a manutenção ou ampliação / reforma na malha de aterramento. O valor da resistência é definido desde a etapa de projeto da malha e é recomendado a medição em campo, durante o período de comissionamento, para confirmação dos valores de projeto. Como o seu valor pode variar ao longo do tempo, é recomendado programar adequadamente medições periódicas para manter um histórico do perfil de seu comportamento. Existem vários métodos para a medição da resistência de aterramento, cuja escolha depende de como está, no momento da medição, o fornecimento de energia à SE (ou seja, se está energizada ou não) e também do seu tamanho e arquitetura. Para cada método, existem aparelhos específicos para a sua medição.

As principais normas que definem os métodos para medição das malhas de aterramento são a IEEE81 (2012) e NBR15749 (2009). A seguir, são relacionados os principais métodos, suas vantagens e limitações.

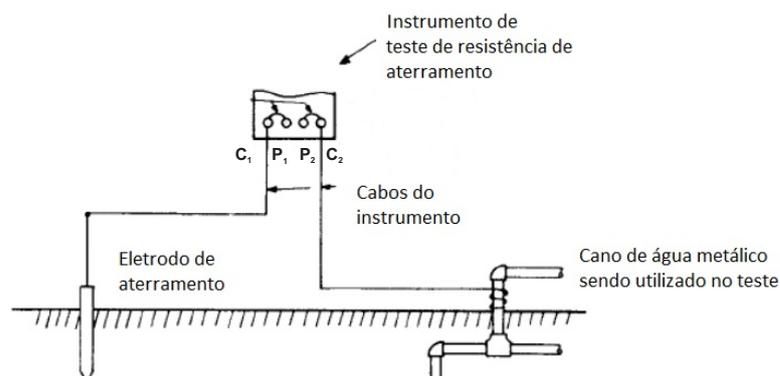
A norma IEEE81 (2012) descreve os métodos gerais de medição da impedância de aterramento. O valor da impedância medido é chamado de resistência, mesmo que contenha a componente reativa. A componente reativa pode ser muito significativa para sistemas de aterramento grandes ou interconectados. A resistência de um eletrodo de aterramento geralmente é determinada com corrente alternada ou uma onda quadrada simétrica. Isso minimiza o efeito de tensões galvânicas que podem estar presentes nas sondas e a interferência de correntes diretas no solo da proteção catódica ou correntes telúricas. Durante os testes e medições, a aplicação de correntes de teste que operam em uma frequência diferente da frequência da rede elétrica ou suas harmônicas minimizará a interferência de possíveis correntes dispersas.

### 2.3.1 Método de dois pontos

Também conhecido como *Death Earth* ou "método de terra morta", é aplicado em áreas onde a utilização de eletrodos de aterramento seja mais limitada. A resistência do eletrodo de aterramento em questão é medida em série com um eletrodo de aterramento auxiliar. Presume-se que a resistência do aterramento auxiliar seja insignificante em comparação com a resistência do aterramento em questão. O valor medido representa então a resistência do aterramento que se deseja medir.

A figura 16 exemplifica este método, em que o eletrodo auxiliar deve ser algum elemento metálico separado, como é o caso do cano de água. O método de terra morta é a maneira mais simples de obter uma leitura de resistência de aterramento, mas não é preciso e deve ser usado apenas como último recurso. É mais eficaz para testar rapidamente as conexões e condutores entre os pontos de conexão.

Figura 16 – Ilustração de teste de uma malha de aterramento através do método de dois pontos.



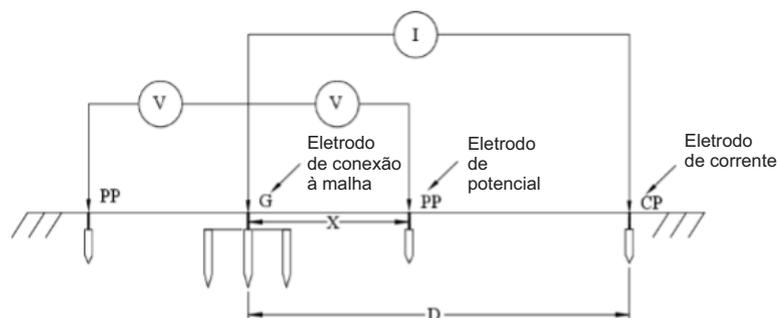
Fonte: adaptado de Muttaqi (2018).

### 2.3.2 Método de queda de potencial (Fall-of-potential - FOP)

Os métodos aplicáveis às avaliações em malhas de subestações no Brasil e no mundo são compostos por vários procedimentos onde a etapa principal é a obtenção da resistência da malha em ensaio. O método clássico de ensaio da malha de aterramento para diagnóstico de possíveis problemas necessita que a subestação esteja desenergizada para se ter um resultado preciso e seguro no momento das medições. Entretanto, as possibilidades de se desenergizar uma SE tem se tornado praticamente nulas por conta da preocupação em não causar interrupções no fornecimento de energia. Por isso cresceu a necessidade de se buscar alternativas de medição da resistência da malha de aterramento com as SEs energizadas, sendo esses métodos preferíveis aos convencionais. Conforme mostrado em IEEE81 (2012), o método de queda de potencial consiste em fazer circular uma corrente através da malha de aterramento (G) sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente (CP) e medir a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio de um eletrodo auxiliar de potencial (PP), conforme indicado na Figura 17.

Para minimizar as influências entre os eletrodos devido às resistências mútuas, o eletrodo de corrente é geralmente colocado a uma certa distância do eletrodo de aterramento sob teste. Normalmente, essa distância é pelo menos cinco vezes a maior dimensão (diagonal) da malha que está sendo medida. O eletrodo de potencial é normalmente posicionado na mesma direção

Figura 17 – Método de Queda de Potencial definido na norma IEEE81.



Fonte: adaptado de IEEE81 (2012).

da sonda de corrente, mas pode ser posicionado na direção oposta, como mostrado na Figura 17. Na prática, a distância “X” para o eletrodo de potencial é geralmente escolhida para ser de 62% da distância do eletrodo de corrente quando os eletrodos de corrente e potencial estão na mesma direção (regra de 62%). Esta distância é baseada na posição teoricamente correta para medir a impedância exata do eletrodo para um solo homogêneo, pressupõe uma distância suficiente entre o eletrodo de aterramento sob teste e os eletrodos auxiliares presentes. Trata-se de uma distância onde, estatisticamente, encontra-se a região livre de influências tanto da malha de aterramento quanto do eletrodo de corrente.

Cada vez mais se faz necessário realizar medições com instalações energizadas, de modo a manter a continuidade do serviço. No entanto, a medição da resistência de aterramento em SE's energizadas é mais complexa do que em SEs desligadas. Isto acontece, pois com a SE energizada ocorrem correntes parasitas, interferência eletromagnética, entre outros fatores, que podem dificultar a obtenção das medidas. Alternativamente, para viabilizar a execução dos ensaios em condições energizadas com o sistema operando normalmente, sem trazer prejuízos ao fornecimento de energia, pode-se modificar o procedimento convencional. Uma das alternativas disponíveis consiste em se fazer uso de um equipamento eletrônico capaz de injetar uma corrente de frequência diferente da fundamental, possibilitando assim eliminar as possíveis interferências causadas pelo SEP. Os eletrodos auxiliares de corrente e de tensão são constituídos cada um deles por uma ou mais hastes metálicas interligadas e cravadas no solo, de forma a garantir a menor resistência de aterramento do conjunto.

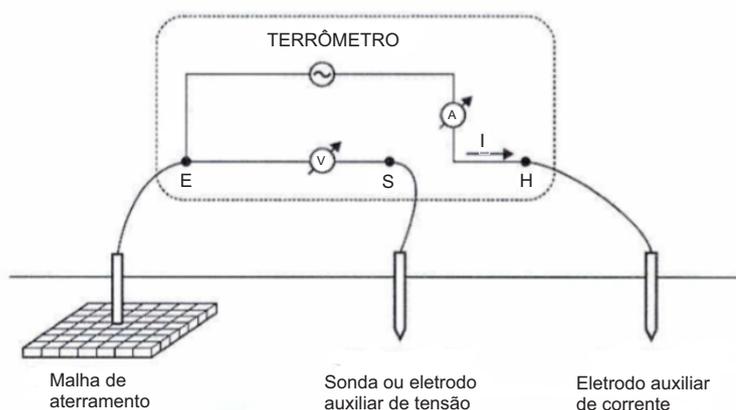
Conforme definido na norma IEEE81 (2012), no processo de medição, o eletrodo de potencial deve ser deslocado ao longo de uma direção predefinida, a partir da periferia da malha de aterramento sob ensaio, em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância d. As Figuras 18 e 19 mostram uma perspectiva superior do ensaio de medição da malha de aterramento, onde o eletrodo de corrente está a uma distância d da periferia da malha de aterramento. Uma corrente I de ensaio é aplicada ao eletrodo auxiliar de corrente, que está conectado ao borne

H do instrumento de medição (Terrômetro). O borne S está conectado ao Eletrodo auxiliar de potencial, que servirá para medições da queda de potencial durante o ensaio, e o borne E está ligado diretamente à periferia da malha de aterramento sob medição.

Fazendo-se a leitura da resistência em cada posição, obtém-se a curva da resistência em função da distância, conforme mostrado também na Figura 19. Dessa curva, pode-se concluir que as medições de aterramento possuem comportamento semelhante, desde que respeitem as distâncias de medições. A Figura 19 destaca a região denominada de zona de patamar de potencial, ou seja, uma curva onde se identifica a região designada “patamar”, localizada entre os pontos A e B. Para valores de medições entre a região A e B, considera-se que estão em uma “região distante” ou no “infinito”, também chamado terra remoto. Com o eletrodo PP posicionado nesta região, portanto, determina-se o valor da resistência de aterramento.

Uma vez respeitadas as condições de distâncias de medições (onde "D" deve ser de três a cinco vezes o valor da maior diagonal da SE) e considerando um solo em boas condições de medição, é estatisticamente comprovado que a curva das medições se comporta desta forma e que as medições da zona de patamar são as que definem o valor da resistência da malha de aterramento. Valores de distâncias fora da região A e B são considerados zona de influência do aterramento sob medição (lado próximo da malha que está sendo testada) e zona de influência do eletrodo auxiliar de corrente (lado próximo do eletrodo CP). Um gráfico onde a região de patamar (ver Figura 19) não fica bem definida, como a curva “b” da Figura 20, indica que os procedimentos de medição precisam ser reavaliados e uma nova medição precisa ser feita.

Figura 18 – Circuito para método de queda de potencial.

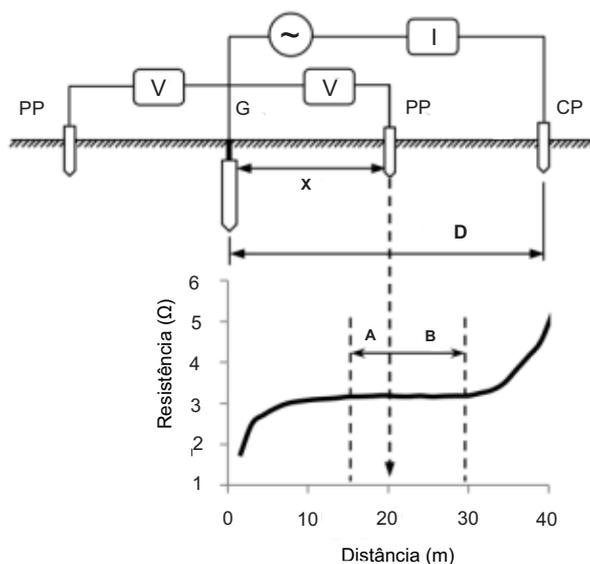


Fonte: adaptado de Stevenson (1986).

A Figura 20 mostra os resultados mais comuns de se encontrar durante as medições, considerando problemas no solo ou até erros de medições:

- Se o deslocamento do eletrodo de potencial PP for coincidente com a direção e o sentido do eletrodo de corrente CP, como mostrado na Figura 19, e este último estiver a uma

Figura 19 – Teste usando o método de queda de potencial.



Fonte: adaptado de Lima (2015).

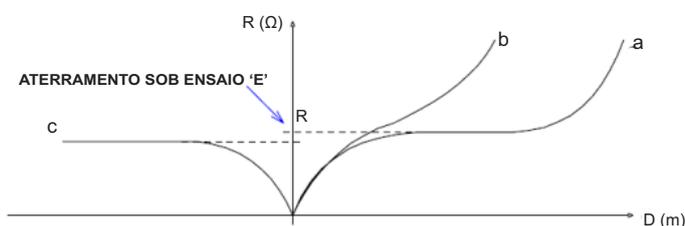
distância satisfatória, maior que a zona de influência do sistema ensaiado E, é obtida uma curva semelhante à curva "a".

- Se o deslocamento do eletrodo de potencial PP for coincidente com a direção e o sentido do eletrodo de corrente CP, como mostrado na Figura 19, e este último estiver a uma distância insuficiente e próximo da zona de influência do sistema ensaiado E, é obtida uma curva semelhante à curva "b".
- Se o eletrodo de potencial PP se deslocar na mesma direção e em sentido contrário ao eletrodo CP, para o outro lado do sistema sob ensaio E, partindo do princípio que o espaçamento entre CP e E seja satisfatório, é obtida uma curva semelhante à curva "c".

O trecho horizontal (patamar) das curvas **a** e **c** da figura 20 representa o valor aproximado da resistência de aterramento do aterramento sob ensaio. A curva "b" não possui patamar, indicando resultado inadequado para avaliação e sendo necessário mudança de direção ou reavaliação da distância considerada para inserir os eletrodos e realização de novas diagnóstico do problema.

Para situações onde é necessário mudar a posição do eletrodo de potencial em relação ao eletrodo de corrente (curva "c" método de queda de potencial), a referência Ma e Dawalibi (2002) faz uma análise acerca de várias posições para fixação do eletrodo de potencial em solos homogêneos. São possíveis posições representadas pelo ângulo teta e uma indicação de erro de medições para cada posicionamento do eletrodo de potencial, conforme mostrado na Figura 21. Já é conhecido que para teta igual a zero, ou seja, a direção do eletrodo de potencial na mesma

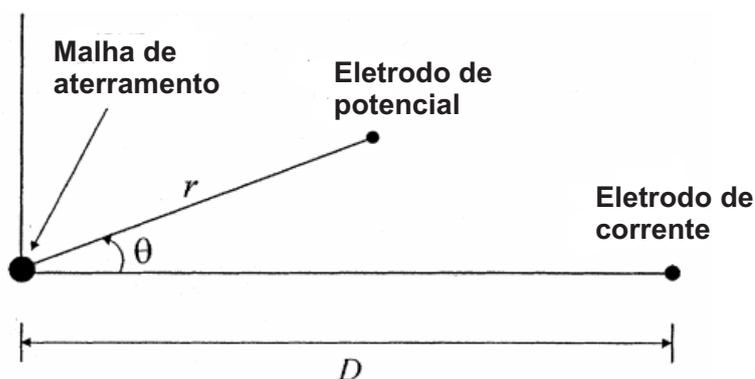
Figura 20 – Curvas típicas de resistência de aterramento em função das posições relativas dos eletrodos auxiliares de potencial e de corrente.



Fonte: adaptado de NBR15749 (2009).

direção e sentido do eletrodo de corrente, é possível determinar que a localização do eletrodo de potencial é  $r=0,82D$  (região de patamar).

Figura 21 – Arranjo de medição de impedância.



Fonte: Ma e Dawalibi (2002).

### 2.3.3 Método da queda de potencial com injeção de correntes elevadas

Nos casos de SE onde são evidentes as limitações de distância apresentada no método de queda de potencial, é possível utilizar o método de injeção de correntes elevadas. Conforme detalhado na IEEE81 (2012) consiste em circular uma alta corrente entre a malha de aterramento sob ensaio e o solo por meio de um eletrodo auxiliar de corrente, medindo-se os potenciais na sua superfície. O valor da resistência ôhmica pode ser realizado de forma bem similar ao que é feito no método da queda de potencial. No entanto, pode ser usado como alternativa uma linha de transmissão desenergizada como circuito de injeção de corrente que chegue à instalação ou até mesmo subestações que possuem cabos para-raios. Geralmente utiliza-se uma torre de linha de transmissão como eletrodo auxiliar de corrente, ou até mesmo uma malha de aterramento de subestação adjacente ou também uma malha de aterramento instalada especificamente para este fim. É importante respeitar as distâncias mínimas de, pelo menos, 3 a 5 vezes a maior diagonal da

malha a ser medida e a zona de influência do eletrodo de corrente, para que não haja influência nas medições.

O eletrodo de potencial será uma haste cravada no solo e deve ser deslocado radialmente a partir da periferia da malha a ser medida. O deslocamento do eletrodo de potencial deve ser em uma direção que faça um ângulo entre 90 e 180 graus em relação à direção do eletrodo de corrente para evitar eventuais acoplamentos entre estes dois circuitos. A resistência de aterramento do sistema sob ensaio é dada por:

$$R = \frac{|V|}{|I|} \quad (3)$$

Onde V é a tensão medida (fora da região de influência da malha e do eletrodo de corrente) em volts; I é a corrente total injetada no eletrodo de corrente, expressa em ampéres.

Essa solução é empregada utilizando correntes elevadas, ficando clara a pouca praticidade do método. É fundamental estar atento para a segurança durante a realização deste ensaio, tanto para as pessoas que estão participando do teste quanto as pessoas que transitam nas proximidades. Além disso, a fonte de injeção de corrente deve ter potência e tensão adequadas para fornecer corrente elevada, de modo a reduzir os erros nas medições provenientes das correntes de interferência que normalmente circulam no solo. Quanto maior for a distância do circuito de medição, maior poderá ser esta interferência. Em geral, se emprega um grupo-gerador ou transformador isolador ligado a uma rede primária ou secundária de distribuição que passe nas proximidades da malha de aterramento sob ensaio. Além disso, são necessários amperímetros, voltímetros, ou seja, são necessários vários equipamentos para ser possível realizar o ensaio.

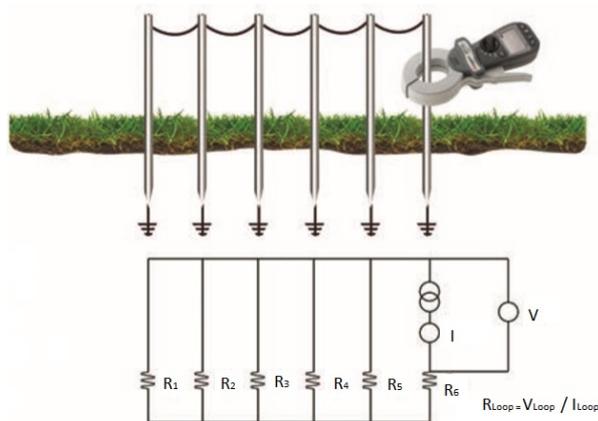
#### 2.3.4 Medições de resistência pelo método Clamp-on ou sem utilizar eletrodos de medição

Este método se propõe a realizar a medição da resistência de aterramento, conforme ilustrado na Figura 22 e descrito na IEEE81 (2012). A realização da medição não necessita de eletrodos. O operador deve ter certeza de que a terra está incluída no loop de retorno. Conforme mostrado na Figura 23, a resistência completa (*loop*) é medida através de uma tensão induzida, que por consequência induz uma corrente que circula pelos elementos do *loop*, medidos em paralelo ou em série. O método pressupõe que apenas a resistência do eletrodo de aterramento em teste contribui significativamente. A principal vantagem deste método é a facilidade e rapidez de realização. O eletrodo de aterramento não precisa ser desconectado do sistema para realizar a medição e nenhum eletrodo precisa ser acionado ou cabo conectado. Além disso, inclui a conexão dos equipamentos à malha de aterramento e sua resistência.

Quando ligado, o instrumento induz uma tensão com uma frequência definida, geralmente entre 1 kHz e 3,4 kHz, na malha de aterramento integrado, incluindo o eletrodo de aterramento em medição. A precisão da medição é baseada no encaixe e alinhamento adequados das garras. Embora esse método seja prático e amplamente utilizado para linhas de transmissão e distribuição, sua teoria se presta a algumas limitações de aplicação, conforme listado a seguir:

- A aplicação é limitada a um eletrodo de aterramento conectado a uma malha de aterramento de impedância relativamente baixa;
- Um grande erro pode ser introduzido na medição de teste se a reatância indutiva dos eletrodos que compõem a malha de aterramento ou do sistema neutro sob teste for significativa em comparação com a resistência que está sendo medida. Isso é particularmente verdadeiro em sistemas que requerem altas frequências de teste de 1 kHz a 3,4 kHz para manter suas formas compactas, assumindo que não seja feito nenhum esforço para explicar a reatância no circuito de teste. A alta frequência injetada no circuito de teste aumentará a impedância reativa do circuito e poderá distorcer muito as leituras de teste se a indutância for significativa.
- O método não é aplicável a um sistema de eletrodo de aterramento com múltiplas conexões, como uma malha de aterramento da subestação, pólo multiconectado ou aterramento da estrutura. Desconecte o aterramento de estrutura multiconectados, exceto na perna de medição. Verifique se qualquer fio terra está desconectado de maneira segura.

Figura 22 – Método *Clamp-on* - circuito a ser medido com vários eletrodos em paralelo.

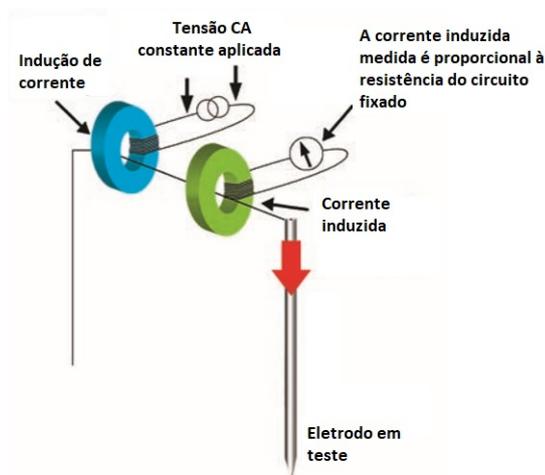


Fonte: adaptado de *Guide To Clamp-On Ground Testing MEGGER*.

### 2.3.5 Medições de resistência pelo método FOP combinado com o método *Clamp-on*

A medição de resistência de uma malha de aterramento pode ser combinada utilizando o método de queda de potencial e o método de *Clamp-on*, conforme mostrado na Figura 24 e descrito na IEEE81 (2012). Os eletrodos de corrente e tensão são colocadas da mesma maneira que a exigida para o método de queda de potencial. Além de passar a corrente para uma malha de aterramento, um TC de encaixe mede a parte da corrente de teste que flui para malha de aterramento. Uma relação entre a tensão medida e a corrente de terra medida determina a resistência de aterramento. Este método é frequentemente usado ao medir as resistências de

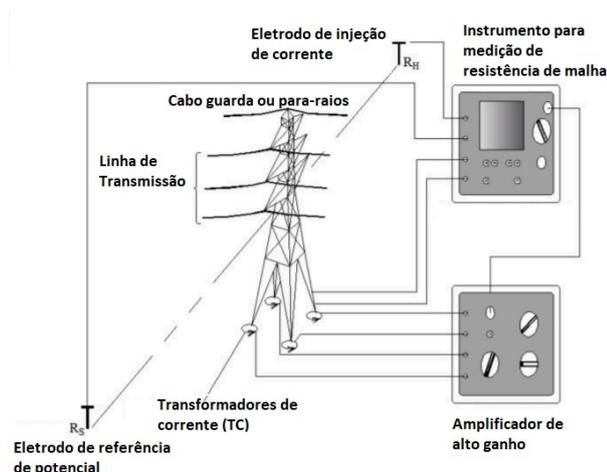
Figura 23 – Método *Clamp-on* - detalhe da técnica de medição utilizada.



Fonte: adaptado de *Guide To Clamp-On Ground Testing MEGGER*.

estruturas de linhas de transmissão com várias pernas ou com terminais que não possuem sistemas de eletrodos de aterramento dedicados. Para medir a corrente que flui no solo, um TC de núcleo dividido é usado, como mostra a Figura 24. No caso de uma torre de quatro pernas, a resistência de cada perna é medida separadamente antes de combiná-las para determinar a resistência geral da estrutura. Recentemente, foi desenvolvido um dispositivo que permite a medição de todas as quatro resistências simultaneamente.

Figura 24 – Teste de resistência de pé de torre utilizando o método combinado de queda de potencial com *Clamp-on*.



Fonte: adaptado de IEEE81 (2012).

### 2.3.6 Método da queda de potencial com frequência variável

Cada vez mais se faz necessário realizar medições com instalações energizadas, de modo a manter a continuidade do serviço. No entanto, a medição da resistência de aterramento em SEs energizadas é mais complexa do que em SEs desenergizadas. Isto acontece, pois com a SE energizada ocorrem correntes parasitas, interferências eletromagnéticas, entre outros fatores, que podem dificultar a obtenção das medidas. Por causa da interferência natural da SE em funcionamento, são necessários métodos e equipamentos mais complexos e específicos para a medição da resistência de aterramento. Toda instalação energizada está sujeita a eventos aos quais está conectada, ou seja, pode estar sujeita a curto-circuitos, elevações de potencial e sobretensões transitórias. Em especial, qualquer instrumento conectado a esta instalação também estará sujeito a tais eventos de risco e, portanto, terá, em seus terminais, tensões elevadas e perigosas para os seres humanos e equipamentos. Portanto, será necessário prover proteção de sobrecorrente e sobretensão a todos os circuitos envolvidos na medição.

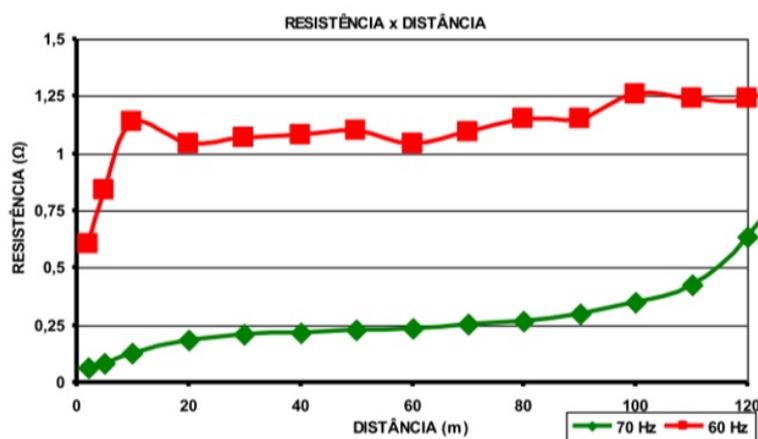
Dentre os efeitos das subestações energizadas, é importante destacar que normalmente estas SEs possuem tensões remanescentes quando comparadas a um ponto remoto (haste de potencial fora da SE). Normalmente estas tensões remanescentes são oriundas de alimentadores desequilibrados ou até mesmo subestações que possuem circuitos monofásicos com retorno pelo terra (MRT). Tais instalações geram diferenças de potenciais da SE em relação a um ponto remoto fora da instalação, causando problemas e dificuldades para realização de medições de resistência da malha de aterramento e exigindo equipamentos que sejam aptos para realizar medições mesmo com estas dificuldades.

Adicionalmente, as instalações energizadas estão sujeitas a ruídos, tensões espúrias e tensões desequilibradas, além de componentes harmônicas de tensão. Essas anormalidades introduzem uma dificuldade adicional ao processo de medição e podem até impossibilitar determinados métodos de serem usados. Os instrumentos devem identificar as anomalias, filtrá-las e permitir que somente os sinais decorrentes da corrente injetada sejam medidos. Os métodos apresentados até aqui não são adequados porque, em geral, injetam correntes na frequência da rede elétrica e/ou tem pouca praticidade. No entanto, é possível obter um método válido ao fazer algumas adaptações no método da queda de potencial.

Conforme IEEE81 (2012) e NBR15749 (2009), uma forma de se realizar uma medição em uma SE energizada é injetar no sistema uma corrente com frequência diferente de 60 Hz, de tal forma a evitar que as tensões e correntes naturais da operação da SE não gerem erros e distorções nas medições realizadas durante a injeção, conforme descrito na referência Paulino e Junior (2014). A Figura 25 mostra os resultados de um ensaio realizado em uma SE energizada com as frequências de 60 e 70 Hz usando uma fonte eletrônica OMICROM CPC 100. No ensaio considerado, a maior diagonal da malha considerada foi de 40 metros. O eletrodo auxiliar de corrente foi colocado a uma distância de aproximadamente 150 metros. A corrente injetada foi na ordem de 2,37 A em 60 Hz e em 70 Hz. A diferença entre as duas medições se deve a grande

interferência quando o teste é realizado na frequência da rede. Um outro ponto importante é que em 70 Hz é possível ver o comportamento claro da curva e um valor de patamar formado, enquanto que em 60 Hz os valores não seguem uma tendência. Os valores medidos de tensão no teste em 60 Hz apresentaram valores muito maiores, não correspondentes à corrente injetada pelo equipamento. Isto se deve ao nível alto de corrente residual que circula pela malha e a respectiva tensão residual que surge. Para que fosse possível obter o valor da resistência na frequência de 60 Hz, seria necessário injetar uma corrente de amplitude muito maior na malha para que a corrente residual se tornasse insignificante na medição. Esta não seria uma alternativa prática, uma vez que a fonte teria que possuir níveis de potência e tensão muito elevados, o que tornariam o procedimento menos seguro e o equipamento mais complexo, caro e volumoso.

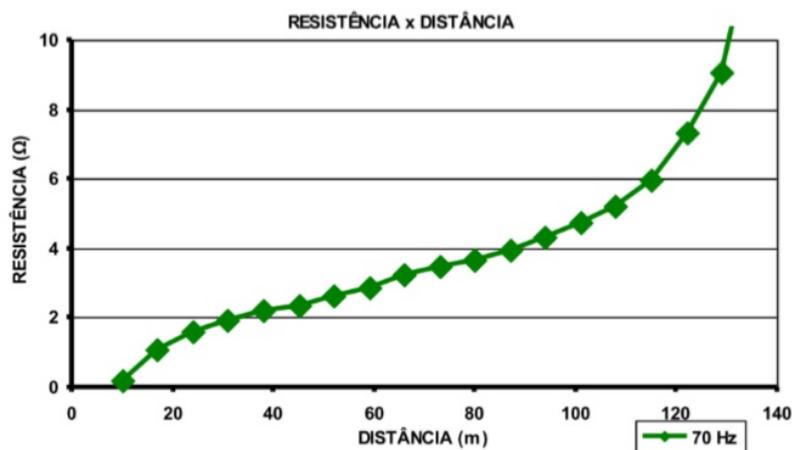
Figura 25 – Teste realizado com SE energizada com frequências de 60 e 70Hz.



Fonte: adaptado de Paulino e Junior (2014).

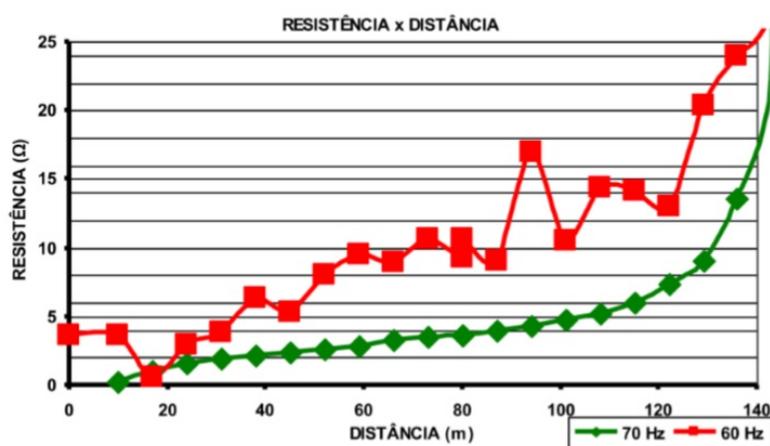
É preciso explicitar, neste ponto, que este método sofre das mesmas limitações com distâncias elevadas que foram apresentadas na seção do método de queda de potencial convencional. Para evidenciar este fato, foi realizado um segundo ensaio em que a maior diagonal da SE media aproximadamente 80 metros. A máxima distância que foi possível colocar o eletrodo auxiliar de corrente foi de 150 metros. A Figura 26 a seguir mostra o resultado do teste realizado em 70 Hz. Note que não foi possível definir um valor de resistência para a malha, uma vez que a região de patamar não ficou bem definida. A Figura 27 mostra o mesmo teste realizado nas frequências de 60 e 70 Hz. Mais uma vez, o teste realizado na frequência da rede obteve resultados bastante inconsistentes, ou seja, oscilatórios e sem patamar. É importante salientar que podem acontecer situações em que um teste na frequência de 70 Hz não obtenha resultados satisfatórios. Isso vai depender dos níveis de interferências presentes, se existem inter harmônicos presentes no sistema, etc. Por essa razão, é interessante ter um equipamento que pudesse trabalhar em uma faixa ajustável de frequências como é o caso da OMICROM CPC 100.

Figura 26 – Segundo ensaio realizado com 70Hz.



Fonte: adaptado de Paulino e Junior (2014).

Figura 27 – Teste realizado a uma distância de 150 metros e utilizando frequência de 70Hz.



Fonte: adaptado de Paulino e Junior (2014).

### 2.3.7 Medição de queda de potencial em altas frequências

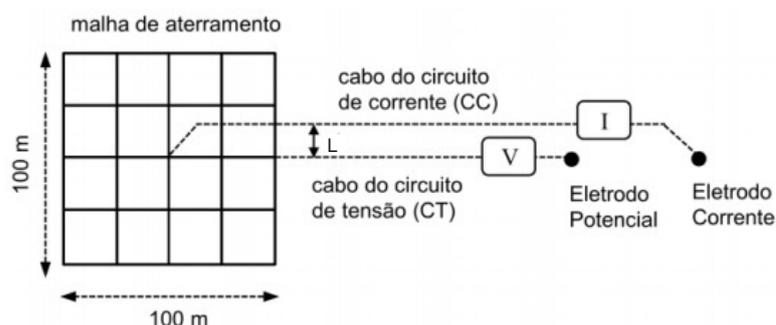
O método em alta frequência é descrito de forma bastante genérica nas normas NBR15749 (2009) e IEEE81 (2012). De acordo a IEEE81 (2012), a impedância de aterramento em instalações do Sistema Elétrico de Potência (SEP) é normalmente avaliada em baixa frequência, geralmente na frequência de fornecimento de energia (50-60Hz). Para esta faixa de valor, a impedância de aterramento é essencialmente resistiva, com um componente indutivo tornando-se perceptível apenas para malhas de aterramento muito grandes e interconectadas.

Vários trabalhos na comunidade científica mostraram que, mesmo para baixas frequências, alguns problemas precisam ser mitigados. A exemplo, a referência Ma e Dawalibi (2001) mostra que a **variação da influência do acoplamento indutivo dos cabos de medição**

dos circuitos auxiliares de corrente e potencial, a resistividade do solo, o tamanho da malha de aterramento, a distância de separação dos circuitos auxiliares de medição, diferentes estruturas de solo e a variação de frequência de medição influenciam significativamente nos resultados finais de identificação do valor de resistência da malha. A seguir iremos mostrar algumas simulações realizadas por Ma e Dawalibi (2001) e que comprovam e ajudam a entender estas variações.

A Figura 28 ilustra uma malha de aterramento de 100m por 100m e localizado em um terreno cuja resistividade do solo está em torno de  $100 \Omega\cdot\text{m}$ . De acordo com Ma e Dawalibi (2001), o método clássico de queda de potencial foi utilizado para realizar algumas medições e entender melhor as influências comentadas anteriormente. A haste auxiliar de corrente está localizada a uma distância  $D=1000\text{m}$  à partir do centro da malha de aterramento, enquanto que a haste auxiliar de potencial está localizada a uma distância  $X=0.618D$ . A distância de separação entre cabos de medições do circuito de corrente e potencial estão separados por uma distância  $L$ .

Figura 28 – Esquema de medição de malha de aterramento.



Fonte: adaptado de Lima (2015).

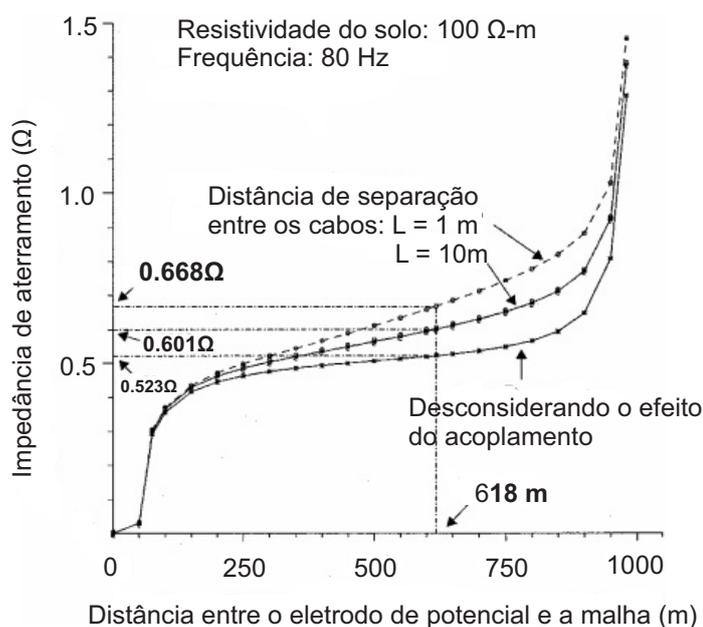
Para as primeiras medições, em que a frequência utilizada foi de 80Hz, foram obtidas três curvas distintas para as seguintes características: curva desconsiderando o efeito de acoplamento indutivo; curva considerando o acoplamento indutivo dos cabos de medições com distância  $L$  de 1m; curva considerando o acoplamento indutivo dos cabos de medições com distância  $L$  de 10m. As curvas são mostradas nas Figuras 29 e 30.

**De acordo com os resultados apresentados, podemos concluir que:**

- Efeito do acoplamento indutivo dos cabos de medição. De acordo com Ma e Dawalibi (2001) e conforme mostrado na Figura 29, a curva correspondente aos resultados desconsiderando o efeito de acoplamento indutivo reflete o correto valor de medição da malha de aterramento ilustrada na Figura 28. As outras duas curvas mostram que o efeito de acoplamento indutivo dos cabos contribuem para um aumento no valor de impedância medida. Para um ponto localizado exatamente na região definida como zona de patamar ( $61,8\%D$ ), o valor de impedância encontrado foi de  $0.523\Omega$ , enquanto que

as curvas considerando os efeitos de acoplamentos indutivos para  $L=10\text{m}$  foi de  $0.601\Omega$  e para  $L=1\text{m}$  foi de  $0.668\Omega$ , respectivamente, representando um erro relativo de 15% e 28%. Apesar de podermos verificar que os efeitos de acoplamento indutivo dos cabos de medições podem ser mitigados com o aumento do distanciamento destes cabos, na prática não é nada fácil viabilizar estas separações, por conta de disponibilidade de terreno e objetos que possam atrapalhar as medições;

Figura 29 – Curva de medição para 80Hz e resistividade do solo de  $100\Omega\text{-m}$ .

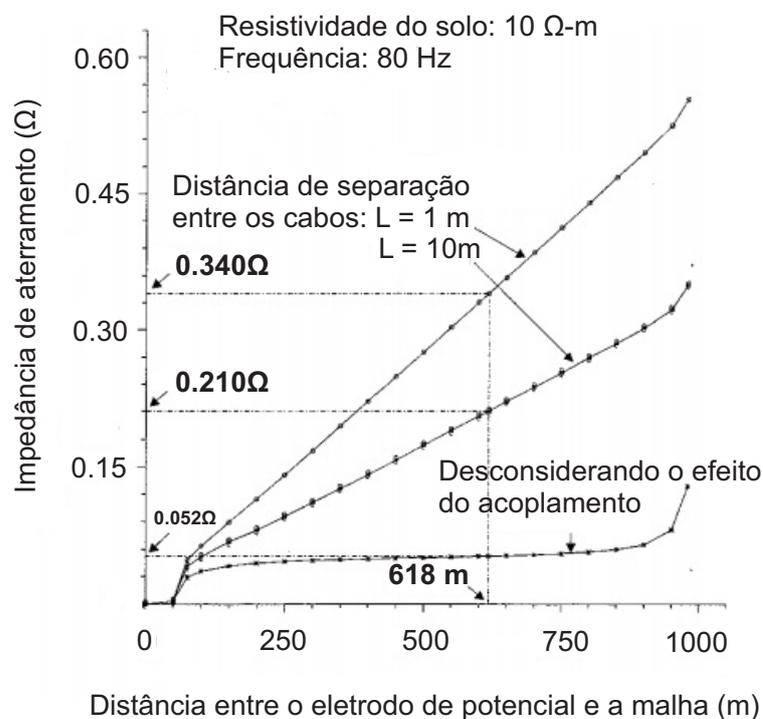


Fonte: adaptado de Ma e Dawalibi (2001).

- Efeito da baixa resistividade do solo. A referência Ma e Dawalibi (2001) também realizou uma simulação para avaliar o comportamento das curvas de impedância da malha de aterramento ilustrada na Figura 28 em função da influência do acoplamento indutivo dos cabos de medições, mas desta vez considerou um terreno com resistividade de  $10\Omega\text{-m}$ . A Figura 30 mostra os resultados - três curvas, sendo a primeira desconsiderando o efeito de acoplamento indutivo, a segunda considerando o acoplamento indutivo dos cabos de medições com distância  $L$  de 1m e, por fim, a terceira considerando o acoplamento indutivo dos cabos de medições com distância  $L$  de 10m. Fica evidente que, para este exemplo, as curvas considerando os efeitos de acoplamento indutivo dos cabos ficam muito mais discrepantes quando comparada com a curva sem efeito de acoplamento. A baixa resistividade do solo contribuiu para aumentar o efeito do acoplamento indutivo, acarretando em erros de medições, na região de patamar (distância  $X = 618\text{m}$ ), acima de 500%. O valor de impedância de aterramento para a curva que não sofreu influência de acoplamento foi de  $0.052\Omega$ . Já para o exemplo mais discrepante (distância dos cabos de

medições de 1m), esse valor chegou a  $0.340\Omega$ . É possível concluir que estes valores são bem mais discrepantes quando comparados às medições em solo cuja resistividade foi de  $100\Omega - m$ .

Figura 30 – Curva de medição para 80Hz e resistividade do solo de  $10\Omega - m$ .



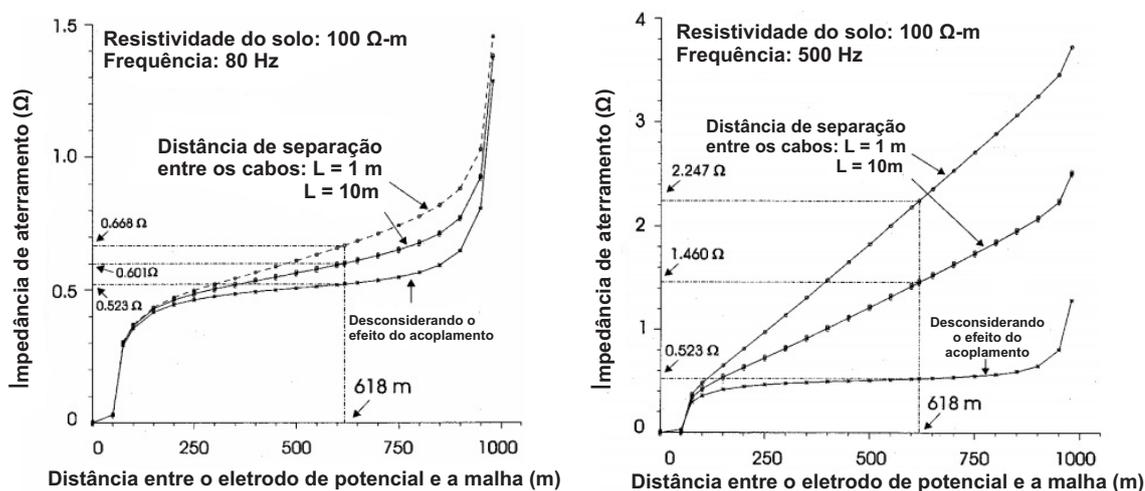
Fonte: adaptado de Ma e Dawalibi (2001).

O artigo de autoria de Ma e Dawalibi (2001) realizou mais testes, só que desta vez a frequência utilizada foi de 500Hz e com solo cuja resistividade está em  $100\Omega - m$ . Os critérios são semelhantes ao utilizado anteriormente, em que foram obtidas três curvas distintas para as seguintes características: curva desconsiderando o efeito de acoplamento indutivo; curva considerando o acoplamento indutivo dos cabos de medições com distância  $L$  de 1m; curva considerando o acoplamento indutivo dos cabos de medições com distância  $L$  de 10m. As curvas são mostradas na Figura 31.

De acordo com a Figura 31, existem dois gráficos. O gráfico do lado esquerdo é o mesmo mostrado anteriormente na Figura 29. Já o do lado direito são os resultados utilizando a mesma metodologia das simulações anteriores, mas desta vez com frequência de medição de 500Hz. É possível observar que a influência do acoplamento indutivo dos cabos de medições é bem maior na frequência de 500Hz do que na frequência de 80Hz. O erro de medição no ponto de patamar ( $X=618\text{m}$ ) chegou a mais de 300% para o caso de distância de separação dos cabos de 1m, mostrando que o efeito do acoplamento indutivo dos cabos de medição dos circuitos

auxiliares de corrente e potencial tende a aumentar significativamente o erro durante as medições de campo.

Figura 31 – Comparação dos gráficos de medições para frequências de 80 e 500Hz, para um solo com resistividade de  $100\Omega \cdot m$ .



Fonte: adaptado de Ma e Dawalibi (2001).

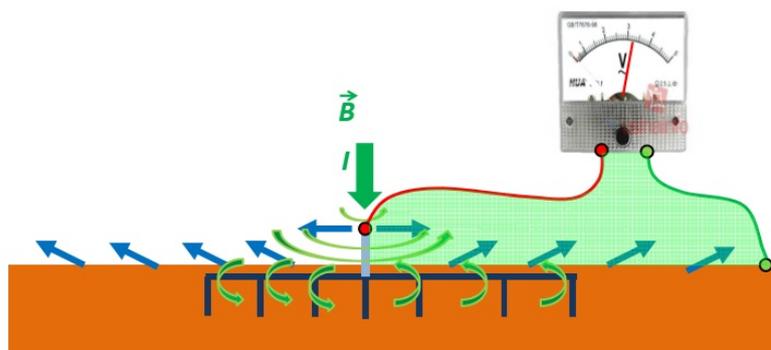
Diversas técnicas foram desenvolvidas na tentativa de eliminar estes problemas, como por exemplo a referência Kostic e Raicevic (2016) utilizaram aplicações de altas correntes diretas (DC) nas medições, para evitar efeitos de polarização nos eletrodos. Mais recentemente, Hu S. Ni e Zhang (2016) propuseram uma técnica interessante que mede a indutância mútua entre os cabos de medição e compensa seus efeitos na resistência de aterramento medida. Assim como os desafios encontrados para medições em baixas frequências, espera-se que estes desafios aumentem para aplicações em altas frequências, como por exemplo, medições de impedância de surtos, onde correntes impulsivas são frequentemente utilizadas através do método de queda de potencial tradicional com hastes de correntes e de potencial.

A referência Panicali e Barbosa (2019) também mostra que, quando mede-se um valor de resistência ôhmica variando frequência no tempo, o percurso dos cabos de medição passa a influir na medição. Para valores de 0 até 10 MHz, os efeitos de variação da frequência injetada na malha afetam profundamente a distribuição de correntes nos eletrodos. A Figura 32 ilustra o momento de uma medição de malha de aterramento utilizando alta frequência. O terminal disponível para medição da malha está submetido a campos elétricos e magnéticos variando no tempo, e deseja-se medir a impedância de aterramento ( $Z_{medido}$ ).

A Figura 33 mostra uma comparação da distribuição de potencial em uma malha de aterramento para baixas e altas frequências. Percebe-se que, para altas frequências, o comportamento da distribuição é diferente ao longo da superfície da malha.

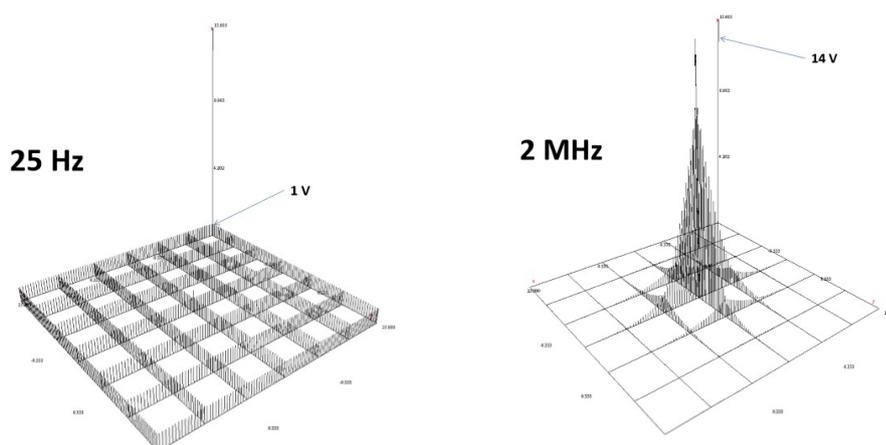
Para ficar mais evidente a causa desta diferença na distribuição de potencial entre os

Figura 32 – Efeitos de medição em alta frequência.



Fonte: adaptado de Panicali e Barbosa (2019).

Figura 33 – Comportamento da distribuição de potencial (Vddp) nos condutores da malha de aterramento em baixas e altas frequências.

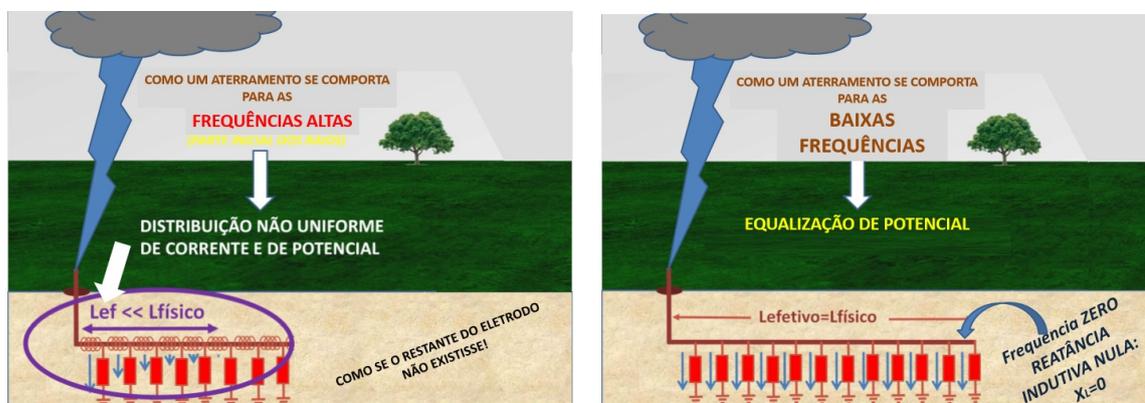


Fonte: adaptado de Panicali e Barbosa (2019).

componentes da malha, as ilustrações da Figura 34 destacam o comportamento da configuração dos circuitos à partir de uma descarga atmosférica representando alta frequência (parte inicial dos raios - ilustração do lado esquerdo) e baixa frequência (ilustração do lado direito). Para frequências altas, observa-se uma distribuição não uniforme de corrente e de potencial. De acordo com a referência Panicali e Barbosa (2019) surge o conceito de comprimento efetivo ( $L_{ef}$ ) muito menor do que a indutância física no ponto onde caiu o raio na malha, como se o restante dos eletrodos não existissem, justificando o comportamento mostrado na Figura. No entanto, de forma oposta ao mostrado anteriormente, a ilustração do lado direito representa o comportamento de uma malha de aterramento submetido a uma suposta descarga atmosférica de baixa frequência. O comportamento do aterramento passa a ser uniforme, com reatância indutiva nula ( $L_{efetivo} = L_{físico}$ ). A malha possui um comportamento predominantemente resistivo,

facilitando as análises de comportamento.

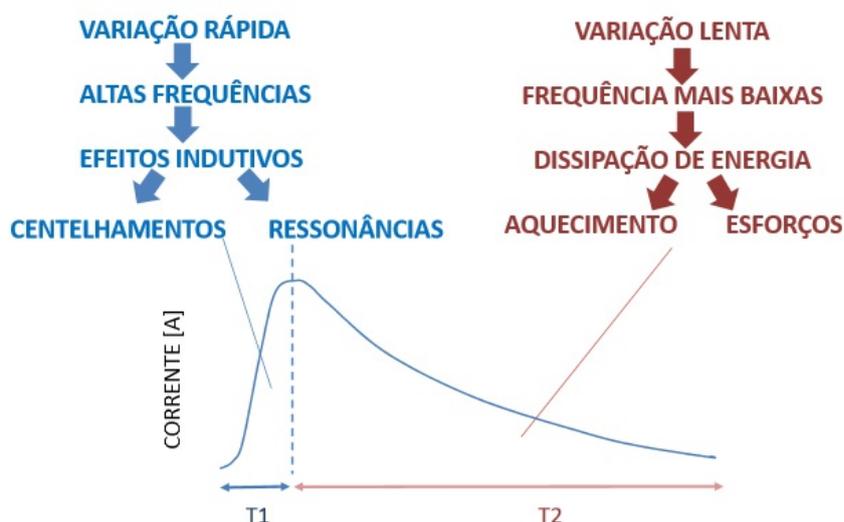
Figura 34 – Comportamento de um aterramento para descargas atmosféricas.



Fonte: adaptado de Panicali e Barbosa (2019).

A Figura 35 detalha o comportamento transitório de um impulso atmosférico no tempo. A figura destaca comportamentos em dois momentos: T1 e T2. Durante o tempo T1 observa-se variações rápidas e altas frequências, observando-se efeitos indutivos das malhas de aterramento. Já durante o tempo T2, existe uma variação lenta e com baixas frequências, apresentando efeitos predominantemente resistivos e dissipação de energia.

Figura 35 – Característica típica de impulso de corrente de alta frequência.



Fonte: adaptado de Panicali e Barbosa (2019).

De acordo com a referência Panicali e Barbosa (2019), a impedância de aterramento estaria definida exclusivamente para medições em baixas frequências, enquanto atinge o valor

gerado pelo potencial escalar. Para altas frequências, a impedância de aterramento não pode ser definida simplesmente como definida para baixas frequências, visto que a tensão obtida pela integração do campo elétrico depende do caminho a ser medido.

É fundamental levar em consideração que, para medir qualquer tensão entre o eletrodo de aterramento e um ponto remoto, é necessário colocar um cabo de medição entre esses pontos. Nesse caso, o campo elétrico atuará ao longo desse cabo e tensões dispersas induzidas que viajam ao longo do cabo. Este é o mesmo fenômeno considerado no cálculo das tensões induzidas por raios nas linhas aéreas, como explicitado em referências Paulino C. F. Barbosa e Miranda (2015) e Barbosa e Paulino (2019). Para medições em baixa frequência, esses efeitos de propagação não são considerados e a medição fornecerá o potencial escalar do eletrodo, que também é independente da trajetória do cabo de medição. Para altas frequências, no entanto, é provável que os efeitos de propagação influenciem a tensão medida e, conseqüentemente, a impedância medida. Desta forma, é fundamental destacar que a medição da impedância de aterramento usando alta frequência deve levar em conta não apenas a direção que o cabo de medição está inserido, mas também os efeitos de propagação nele decorrentes, tornando pouco prática a análise deste método.

A maneira mais assertiva de ter uma impedância de aterramento exclusivamente em alta frequência parece depender da configuração usada pelos cabos de medição, ou seja, da forma como os cabos estão estendidos e a direção escolhida. No entanto, essa configuração deve estar relacionada à aplicação prática do valor medido, onde uma tensão de interesse (por exemplo, através de um isolador ou na porta de entrada de um equipamento) está relacionada à corrente de excitação. Em outras palavras, em um sistema composto por parâmetros distribuídos, parece que não é possível definir uma impedância única em alta frequência. Por outro lado, é possível definir exclusivamente uma impedância de transferência, que relaciona uma tensão específica à corrente de excitação correspondente.

O objetivo principal da alta frequência seria emular componentes de alta frequência que surgem devido a surtos atmosféricos ou chaveamentos na subestação. No entanto, é importante observar que as normas em questão não fazem distinção sobre o escopo de aplicação do método. Fica, então, em aberto a possibilidade de utilizá-lo para medir resistência de malha de aterramento, como resistência de aterramento das torres de linhas de transmissão. Entretanto, a resistência elétrica que um sistema apresenta na presença de um surto (descarga atmosférica) é diferente da resistência durante uma falta em 60 Hz (curto - circuito), segundo KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995). Essa diferença de resistências é tanto maior quanto maior for a resistividade do solo. Num solo com alta resistividade, a resistência de surto cai em relação a resistência de curto. Já em solo com baixa resistividade, as resistências de surto e curto tendem a possuir valores mais próximos, segundo KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995). Este fato indica que o método em alta frequência, que emula um surto eletromagnético, seja mais adequado para medições de resistências em pés de torre de transmissão.

Um bom exemplo de utilização de técnicas de alta frequência para análises de comportamento de um eletrodo de aterramento durante surto atmosférico é o da referência Llovera J. LLiso e Quijano (2008). Durante uma resposta transitória, como um raio ou outro fenômeno transitório rápido, surgem fenômenos como correntes de alta frequência que podem induzir sobretensões maiores do que o esperado de um sistema puramente resistivo. Desta forma, estudos específicos são necessários para proteções de surtos atmosféricos e transitórios.

A referência Beltani (2007) afirma que o posicionamento do eletrodo de corrente se dará a distâncias em torno de 1,25 vezes a maior dimensão da malha de aterramento. Outro método descrito em Beltani (2007) utiliza uma metodologia não normatizada chamada de DDPprox (diferenças de potencial em pontos próximos a malha de aterramento). Essa metodologia se aplica a sistemas de aterramento, energizados ou não, em locais com áreas disponíveis reduzidas (tais como áreas urbanas) para colocação de eletrodos de corrente e de potenciais. Nessas medições, são utilizadas as frequências de 270 Hz, 1470 Hz e 25 kHz. Nessa metodologia não se utiliza o conceito da queda de potencial em relação a um ponto remoto, o que é feito convencionalmente, e que tem inviabilizado as medições notadamente de sistemas de aterramento de médias e grandes dimensões. São realizadas, em espaços pequenos, medidas de diferença de potencial em pontos pré-determinados da malha de aterramento, dependendo do grau de conhecimento que se tenha de sua configuração, relativamente ao ponto de injeção de corrente. A determinação dos parâmetros do aterramento é feita, então, por um método de estimação. No entanto, o fato desta metodologia não estar normatizada e ainda serem necessários estudos adicionais que possam determinar a sua efetividade, não parece ser adequado adotar este método como referência.

Em 2012, o IEEE lançou uma atualização da sua norma de sistemas de aterramento, a IEEE81 (2012). Nela, a aplicação do método em alta frequência ficou circunscrito aos casos em que se deseje emular componentes de alta frequência que surgem devido a surtos atmosféricos (olhar capítulo 12 da norma em questão). Todas as menções ao uso de alta frequência para medição de resistência de falta a 60 Hz foram eliminadas, como mostra um recorte na Figura 36 da versão red line da norma IEEE81 (2012) (página 124 da norma redline). A medição da resistência de aterramento em torres apresenta uma grande dificuldade em razão de todas as torres estarem eletricamente interconectadas através dos cabos de guarda (pára-raios) utilizados para proteger as linhas das descargas atmosféricas. Por causa desta interconexão, toda tentativa de medir a resistência de aterramento de uma torre usando um terrômetro convencional em baixa frequência conduz a resultados errôneos pois se está medindo a resistência de aterramento de todas as torres em paralelo.

Desconectar o cabo de guarda de uma linha energizada é uma operação de risco, tanto pela necessidade de escalar até o topo da torre, como pela proximidade dos condutores de alta tensão. O princípio de funcionamento consiste na utilização de uma corrente de alta frequência, para a qual a impedância indutiva do cabo de guarda - considerando um espaçamento padrão entre torres - é razoavelmente alta, o que permite reduzir o efeito das outras torres adjacentes a

aquela que está sendo medida. O equipamento mede somente a resistência de aterramento da torre sob estudo, incluindo a do pé de apoio da mesma. Em sistemas de aterramento extensos, como malhas, contrapesos, canos metálicos, etc., a alta frequência só gerará efeito em elementos mais próximo do ponto de injeção, de tal modo que o valor lido represente o comportamento frente a um sinal de impulso, semelhante à descarga atmosférica. Desta forma, os valores de resistência obtidos por esse método são valores que melhor representam a capacidade do sistema para conduzir à terra as correntes do raio, de uma maneira mais eficaz que os valores obtidos com equipamentos convencionais de baixa frequência, mesmo com o cabo de guarda desconectado.

Figura 36 – Recorte da versão redline da norma IEEE 81 (2012), mostrando a eliminação do uso deste método em alta frequência para medição de resistência de curtos-circuitos.

#### ~~12.6 High-Frequency Earth Resistance Meter~~

~~This relatively new instrument described in detail in [B32] is intended for measuring the ground resistance of transmission line towers (not equipped with continuous counterpoises) with the static wires ON (insulated or not).~~

~~Danger will be avoided as work shall not be done near energized conductors. For operating principle see Fig 19.~~

~~The high frequency meter is fully transistorized. A Ni-Cd battery is used as the power source. The generator is a self excited power oscillator at 25 kHz. The loop current  $i$  flows through the current electrode H and the tower's ground M. The high frequency receiver compares the measured voltage with a reference internal voltage.~~

~~It should be borne in mind that this meter uses the fall of potential method (the effect of the static wire is eliminated by use of high frequency and neutralizing circuits). Therefore, adequate spacing between the test electrodes must be used in order to obtain reliable results.~~

Fonte: adaptado de IEEE81REDLINE (2012).

Desta forma e de acordo com a referência Panicali e Barbosa (2019), pode-se concluir que o método de alta frequência

- É importante para avaliar efeito de surtos e fenômenos de alta frequência (raios, transitórios de chaveamento, curtos);
- Deve ser testado em todos os possíveis pontos de injeção de correntes espúrias;
- Deve induzir sinais o mais próximo possível da situação real, sendo que o comprimento e trajetória dos cabos pode influir nos resultados.

#### 2.3.8 Métodos alternativos de medição de resistência de aterramento e potenciais no solo em instalações energizadas

Conforme Anexo G da norma ABNT NBR15749 (2009), existe método alternativo específico para instalações energizadas e em operação:

**Método da queda de potencial com correntes na forma de onda quadrada:** a medição é após a injeção de correntes altas (da ordem de até dezenas de ampères (A)) ou baixas (da ordem de dezenas de miliampères (mA)), desde que essa corrente injetada seja de forma de onda e frequência diferentes das do SEP, e que o medidor possua filtros adequados para selecionar os resultados advindos apenas do sinal injetado filtrando os ruídos e tensões presentes na instalação sob ensaio. Esta medição pode ser efetuada com instrumento dedicado, baseado em uma fonte de corrente, capaz de manter a amplitude da corrente constante, com uma forma de onda não senoidal e com frequência diferente, porém próxima de 60Hz. Por exemplo, pode ser utilizado um instrumento que injete uma corrente de 50 mA com forma de onda quadrada na frequência de 70Hz. Alternativamente, um gerador pode ser utilizado, desde que possua as mesmas características do instrumento dedicado. Para realização das medições, é necessário desconectar o aterramento sob ensaio dos demais elementos da malha de aterramento - cabos pára-raios, neutros, blindagens, contrapeso etc.

## 2.4 Método Escolhido

Diante das opções de métodos definidos nas normas nacionais e internacionais e de forma a facilitar o entendimento, a Tabela 5 resume os métodos abordados, contendo as principais características, vantagens e desvantagens.

Assim, diante das limitações e imprecisões mostradas nos diversos tipos de métodos existentes, o método mais adequado para o desenvolvimento deste trabalho será o método de queda de potencial com frequência variável, fazendo uso de um equipamento eletrônico capaz de injetar uma corrente de frequência diferente da fundamental, possibilitando assim eliminar as possíveis interferências causadas pela operação natural da SE. O foco principal deste método são as medições em subestações energizadas, como embasado pela norma IEEE81 (2012) e outras referências, como Klingenchmid e Pikisch (2017).

Para aplicação do método escolhido, o principal equipamento disponível no mercado é o do fabricante OMICROM (CPC 100). No entanto, por se tratar de um equipamento multifunção e importado, o custo associado é muito alto para difundir o uso nesta aplicação que está sendo tratada. Assim, torna-se viável o desenvolvimento de um equipamento que faça tal funcionalidade, agregando melhorias na operação e segurança, tornando uma solução nacional de baixo custo para ser utilizado no setor elétrico de forma mais difundida. O equipamento a ser desenvolvido será validado usando o CPC-100 da Omicrom como *benchmarking*.

## 2.5 Conclusão

No capítulo 2, foram vistos os principais aspectos de aterramento elétrico, como aspectos de projeto e de segurança. Foi explanado também os principais métodos de medições de resistência em malhas de aterramento, baseados nas principais normas disponíveis. Por fim, foi

Tabela 5 – Resumo dos principais métodos, vantagens e limitações.

<b>Método</b>	<b>Principal vantagem</b>	<b>Limitações</b>
Dois pontos	Simplicidade para obtenção da resistência de aterramento	Pouco preciso, devendo ser utilizado com bastante critério
Queda de potencial	Método mais clássico e preciso	O sistema a ser medido deverá estar desenergizado
Queda de potencial com injeção de correntes elevadas	Aplicável a grandes sistemas e que exigem grandes distâncias para medições	Método pouco prático
<i>Clamp-on</i>	Não é necessário utilizar eletrodos auxiliares para viabilizar as medições	Aplicado apenas para medição de interligações e pontos de conexões à malha
Queda de potencial combinado com <i>Clamp-on</i>	Muito usado para medição de pé de torre de Linhas de transmissão	Pouco aplicado para subestações
Queda de potencial com frequência variável	Método clássico e preciso adaptado a subestações energizadas	Necessário desconectar cabos guardas
Queda de potencial em altas frequências	Dispensa desconexão de cabos guardas para medições em instalações energizadas	Teoria não consolidada para medições de resistências de aterramento em subestações (situação de falta), sendo mais aplicável quando se deseja observar o comportamento do aterramento frente à descargas atmosféricas (medições de pé de torre).

Fonte: próprio autor.

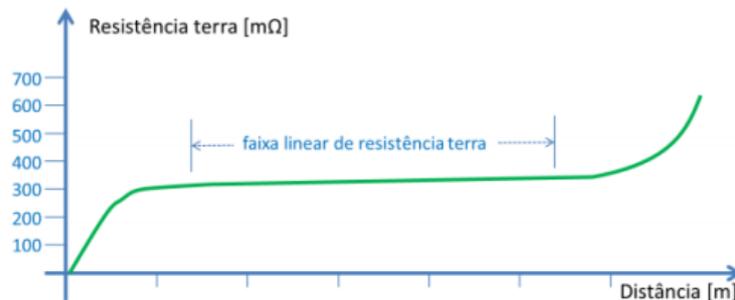
escolhido que o método a ser utilizado para este trabalho será o método de queda de potencial com frequência variável.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Neste capítulo detalharemos o desenvolvimento do protótipo capaz de realizar um diagnóstico de malhas de aterramento através do método de medição escolhido no capítulo 2.

De forma geral, o método de queda de potencial é um método vastamente conhecido e utilizado no setor elétrico em todo mundo para medições de sistemas de aterramento. A impedância de malha  $|Z| = |V| / |I|$ , onde V é a diferença de potencial entre a malha de aterramento e a haste de potencial à partir da distância do centro da malha, sendo medido através do voltímetro que está conectado à malha de aterramento e à haste de potencial. I é a corrente injetada na malha de aterramento através da haste auxiliar de corrente. Considerando o exemplo mostrado na Figura 28, uma fonte faz com que uma corrente flua entre o aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente. O eletrodo auxiliar de tensão deve variar de posição em vários pontos situados na mesma direção do eletrodo auxiliar de corrente para poder gerar várias medições. Em cada ponto, é utilizada a lei de Ohm para cálculo da resistência naquele ponto. O valor de patamar normalmente é encontrado quando o eletrodo auxiliar de potencial está situado a aproximadamente 60%D (D= distância entre o centro da malha até a haste auxiliar de corrente). A curva característica identificando a região de patamar destacada conforme mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Região de patamar para definição da resistência de aterramento da malha que está sendo medida.



Fonte: adaptado de Paulino e Junior (2014).

Para realização destas medições utilizando o método de queda de potencial em subestações energizadas, faz-se necessário utilizar equipamentos apropriados para mitigar os efeitos existentes nas SEs energizadas, conforme mostrado no capítulo 2. As dificuldades existentes atualmente no mercado nacional para encontrar equipamentos compatíveis para realizar tais medições é um desafio e foi detalhada no capítulo 1. Esta foi a principal motivação para desenvolvimento de um equipamento nacional apto para realizar diagnósticos confiáveis em malhas de aterramento de subestações.

Baseando-se na importância associada à realização de testes e medições com a

SE energizada e nas principais características pesquisadas e encontradas nos equipamentos comerciais, o projeto em questão priorizou a construção de um protótipo que possua características técnicas não encontradas em outros dispositivos:

- A capacidade de produzir corrente de injeção com valor máximo de 15A;
- Equipamento projetado de acordo com as normas internacionais de segurança IEC61010-1, CAT IV;
- O equipamento é comandado através de um dispositivo móvel usando rede sem fio Wi-Fi, agregando significativamente no aspecto de segurança pois o operador não terá contato direto com o equipamento em campo durante as medições;
- Frequência de operação pode ser ajustada para qualquer valor na faixa de 40 a 100 Hz e o sinal de corrente para qualquer forma de onda;
- Equipamento capaz de realizar ensaios para determinar as tensões de passo e toque, além de realizar testes de interligações dos equipamentos à malha de aterramento;
- Equipamento alimentado por bateria.

O equipamento desenvolvido trata-se de uma fonte de tensão compacta para injeção de corrente em malha de terra em SE para medição de resistência de aterramento. Este equipamento operará em conformidade com os requisitos da NBR 15749 e terá capacidade de produzir e injetar uma corrente configurável, com máximo de 15A, com frequência e tensão ajustáveis, na faixa de 40 a 100Hz (resolução de 1Hz) e 60 a 300V (resolução de 1V), respectivamente. Possui a funcionalidade de receber comandos ou de ter as informações das variáveis envolvidas nas medições (corrente, tensão e frequência) monitoradas ou configuradas remotamente por uma estação de comando e monitoramento, sem fio, baseada em uma tecnologia com capacidade de comunicação a uma distância segura do equipamento. O hardware do equipamento será composto por um sistema microcontrolado que terá a capacidade de controlar os testes de medição, registrar informações relacionadas aos testes de medição, e realizar comunicação remota com a estação de comando e monitoramento.

O principal desafio tecnológico do produto é o desenvolvimento de uma fonte que possa utilizar como alimentação um banco de baterias, seja isolada, forneça uma corrente estável com frequência e forma de onda ajustáveis e que possa ser controlada a distância.

A alimentação por baterias é uma característica desejável uma vez que, em muitos casos, é necessário medir a resistência da malha de aterramento em SEs remotas que ainda estão em fase de construção ou ainda não energizadas. O que se faz atualmente é usar um gerador diesel para a realização dos testes. Outro ponto de fundamental importância é a segurança da operação do equipamento, durante os testes em SEs energizadas. O equipamento foi todo projetado seguindo

as normas internacionais de segurança IEC 61010-1, CAT IV. O objetivo é mitigar os riscos para a equipe no momento das medições em campo. Esse é um dos pontos mais importantes e o mais desprezado nos equipamentos comerciais existentes. Outra característica pensada para diminuir os riscos é a utilização de um painel de controle através de um tablet comercial. A equipe construiu uma interface que se comunica com o equipamento através de rede Wi-Fi não havendo contato físico com o equipamento no momento da operação do mesmo.

O projeto de P&D no qual o equipamento foi desenvolvido durou 24 meses e passou por 11 (onze) etapas. Foram elas:

- Análise contextual. Definição de metodologia de medição;
- Avaliação das características do sistema. Definição dos critérios do equipamento;
- Modelagem computacional do sistema: estágios de potência e alimentação;
- Desenvolvimento da estratégia de controle;
- Projeto dos estágios de comunicação e instrumentação;
- Construção do(s) dispositivo(s);
- Programação do *firmware* do equipamento;
- Testes iniciais do(s) equipamento(s) em laboratório;
- Ajustes do projeto original, modificações de hardware e software. Testes de campo;
- Consolidação dos resultados finais, avaliação de impactos econômicos e sócio ambientais e fechamento contábil-financeiro.

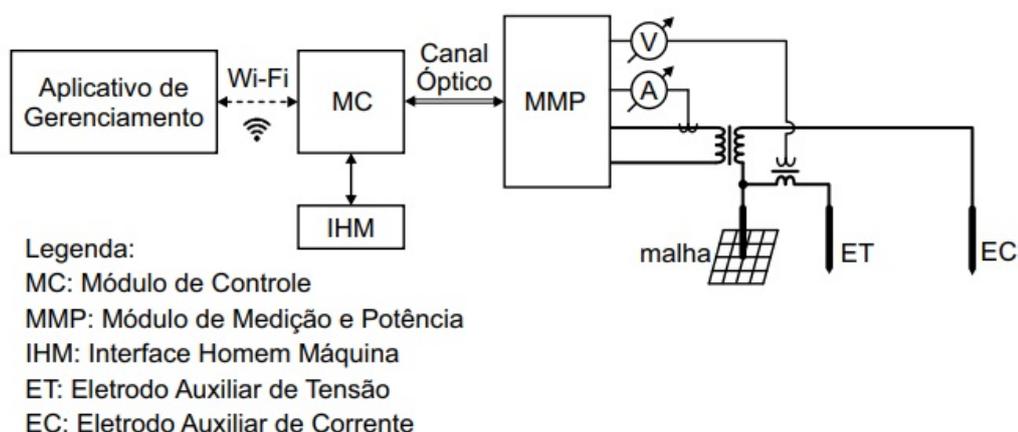
### **3.1 Avaliação das características do sistema e definição dos critérios do equipamento**

Esta etapa do projeto irá caracterizar o equipamento, definindo a arquitetura e os parâmetros do sistema e avaliando as melhores opções de tecnologia construtiva para cada um de seus blocos em frente às variáveis que afetam o desempenho do sistema.

#### **3.1.1 Arquitetura do sistema**

A arquitetura geral do equipamento é mostrada na Figura 38. O sistema foi projetado para medir a resistência da malha de aterramento de subestações utilizando o método da queda de potencial. Numa visão física e sistêmica, o equipamento é dividido em um módulo de medição e potência (MMP), um módulo de controle (MC) e o aplicativo de gerenciamento que opera o módulo de controle.

Figura 38 – Arquitetura do sistema.



Fonte: próprio Autor.

O MMP concentra toda a parte de potência e medição do equipamento. Este terá baterias que suprirão energia a um conversor de potência que fornece a corrente na frequência e intensidade desejada para cada ensaio e se conecta aos eletrodos de corrente por meio de um transformador isolador. Além disso, no MMP serão implementados os medidores de tensão e corrente necessários ao processo de medição da resistência, contendo circuitos de proteção, isolamento e condicionamento de sinais. Por requisitos de segurança, um transformador de alimentação confere isolamento galvânica entre o circuito de aplicação de corrente e o módulo de medição e potência (MMP), um transformador de potencial (TP) confere isolamento galvânica entre o circuito de medição da queda de potencial e o MMP e, por fim, um transformador de corrente (TC) confere isolamento galvânica na medição de corrente.

O MC possui quase toda a inteligência do equipamento. Este módulo indica ao MMP o ensaio a ser realizado e recebe deste as leituras de queda de tensão e corrente. Assim, o MC deve interpretar as leituras recebidas para determinar a resistência de aterramento. O MC também tem a função de realizar a comunicação remota com um software que o gerencia. Além disso, o MC também deve possuir função de armazenamento das informações das medições. A comunicação por meio de fibra óptica confere isolamento galvânica entre o MMP e o MC e uma comunicação sem fio (Wi-Fi) protege o operador de eventuais riscos.

### 3.1.2 Variáveis monitoradas pelo protótipo

Para a medição da resistência de aterramento, utilizando o método da queda de potencial, três variáveis precisam ser monitoradas:

- A corrente aplicada pelo equipamento na malha pelo eletrodo auxiliar de corrente;
- A tensão entre a malha de aterramento e o eletrodo auxiliar de tensão;
- A tensão no eletrodo auxiliar de corrente. Essa medição é realizada para verificar potenciais perigosos existentes na SE antes de injetar qualquer tipo de corrente - variável utilizada apenas para proteção e segurança.

Variando a posição do eletrodo auxiliar de tensão em intervalos de 5% da distância entre a periferia da malha de aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente, traça-se então a curva da resistência do aterramento em função da distância. O ensaio é finalizado ao encontrar-se um patamar em que o valor da resistência permanece constante para sucessivas posições de eletrodo auxiliar de tensão. Este valor da resistência do patamar constante é a resistência do aterramento sob ensaio.

Devido a ocorrência de faltas e surtos numa linha de distribuição, uma subestação energizada está sujeita a elevações de potencial e sobretensões transitórias. O equipamento para medição da resistência de aterramento de uma subestação energizada pode, assim, ter em seus eletrodos tensões elevadas da ordem de milhares de Volts que podem danificar severamente seus circuitos e oferecer riscos a pessoas que o operem, conforme a norma IEEE 81/2012. Assim, conforme rege a norma brasileira, a proteção contra sobretensões deve estar presente nos circuitos de aplicação de corrente e de medição da queda de potencial NBR15749 (2009). Para tanto, definiu-se primeiramente que o equipamento proposto possua isolamento galvânica entre a planta e o equipamento, conforme já mencionado na seção anterior. Com este isolamento, potenciais perigosos entre fase e terra no secundário do transformador são evitados do lado do equipamento. Além disso, pára-raios e relés devem ser adicionados no lado do equipamento para a abertura de seus circuitos de medição em casos de sobretensão.

### 3.1.3 Medição de corrente

Para que o equipamento seja capaz de medir resistências numa faixa de 10 mΩ a 1 kΩ, deve operar numa faixa de correntes entre 0,3 A e 15 A e numa faixa de tensão entre 0,15 V e 300 V.

Desta forma, uma faixa de medição de 0,1A a 25A é suficiente para que o controle de corrente seja capaz de alcançar estes valores limites. Transdutores de efeito Hall comerciais são escolhidas a serem avaliadas para a leitura nesta faixa, conforme disponível em LEM (2014). Estes dispositivos operam com uma banda de frequência mais que suficiente à aplicação (até 200 kHz) e, além disso, podem ter sua sensibilidade aumentada para que correntes da ordem de 0,1 A sejam medidas com precisão. Requisitos e características importantes para a medição de corrente são:

- Como medida de proteção, esta medição pode ser realizada no secundário do transformador de alimentação já isolado galvanicamente dos eletrodos de medição, conforme ilustrado na Figura 38;
- Circuitos para filtragem de sinais de alta frequência são necessários para eliminar interferências de alta frequência e para evitar problemas de distorção por *aliasing* na conversão analógica/digital;
- Circuitos de seleção automática de ganho são necessários para o melhor condicionamento do sinal medido. Esta funcionalidade aumenta o ganho para sinais pequenos e diminui o ganho para sinais grandes de forma a adequar o nível do sinal da medição para obter uma melhor sensibilidade na conversão analógica/digital nos microcontroladores responsáveis pelo processamento dos dados das medições.

#### 3.1.4 Medição de tensão

Para que seja galvanicamente isolada dos eletrodos, a medição de tensão deve acontecer por intermédio de um transformador de potencial (TP). Uma vez que não há necessidade de transdução nesta medição, o sinal do secundário do TP pode ser diretamente aplicado aos blocos de condicionamento de sinais. Este condicionamento, igualmente, deve filtrar sinais de alta frequência e ajustar automaticamente o nível do sinal medido para uma melhor sensibilidade na conversão analógica/digital.

### 3.2 Módulo de Medição e Potência (MMP)

O equipamento deverá ser capaz de medir resistências na faixa entre  $10\text{ m}\Omega$  e  $1\text{ k}\Omega$ , a partir de correntes senoidais que podem variar de 40 Hz a 100 Hz. Os valores máximos de tensão e corrente serão de 300 V e 15 A, respectivamente, enquanto que sua potência está prevista, inicialmente, para ser de 500 W. O MMP irá operar sob diferentes faixas de medição. Para cada faixa, o conversor irá impor o respectivo valor de corrente no eletrodo de corrente, para que então as medições de tensão ao longo da malha sejam coletadas. Na prática, o MMP sempre tentará realizar a medição em uma das faixas (de modo automático), sendo o MC responsável por determinar aquela faixa que obterá os melhores resultados.

Uma observação importante é que, na prática, existirão quedas de tensão nos interruptores de potência, resistências internas nos cabos, perdas no transformador, resistência das hastes e da própria malha de terra, que podem fazer com que a resistência interna equivalente do sistema, para uma determinada faixa, seja da mesma ordem de grandeza (ou até maior) do que a própria resistência da malha de terra. Nas outras faixas, este problema não tem chance de acontecer, pois a resistência da malha é muito maior do que a interna, tornando a medição mais precisa.

### 3.2.1 Configuração definida do MMP

Nesta subsecção, será mostrada as principais características da configuração definida de circuitos elétricos, com o objetivo de identificar os seguintes critérios:

- A configuração deve ser capaz de atender aos níveis de tensão e de corrente de faixas de operação propostas;
- A configuração deve ter o menor número de baterias possível;
- Evitar situações em que os conversores c.c./c.a operem sob condições extremas, ou seja, fora do intervalo em que

$$0,15 \leq D \leq 0,85 \quad (4)$$

onde D representa o ciclo de trabalho do conversor;

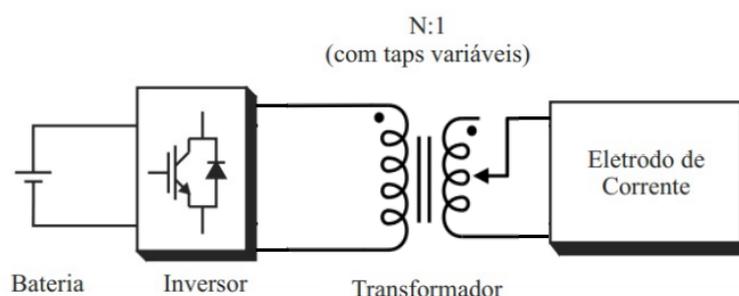
- A corrente nas baterias deve ser menor do que 10 A. Como cada célula de 5Ah da bateria pesa aproximadamente 500g, uma grande quantidade de células associadas resultaria em grande peso, conforme apresentado em Aliant (2014);

Além disso, para a análise, foram consideradas algumas simplificações, tais como:

- As baterias possuem os valores nominais de tensão e de corrente de 12 V e 10 A, respectivamente;
- Os conversores e os transformadores foram considerados ideais (sem perdas).

A configuração mostrada na Figura 39 é composta por um banco de baterias em série conectados diretamente a um inversor, que por sua vez está conectado a um transformador isolador, com taps variáveis.

Figura 39 – Configuração do transformador isolador do sistema.

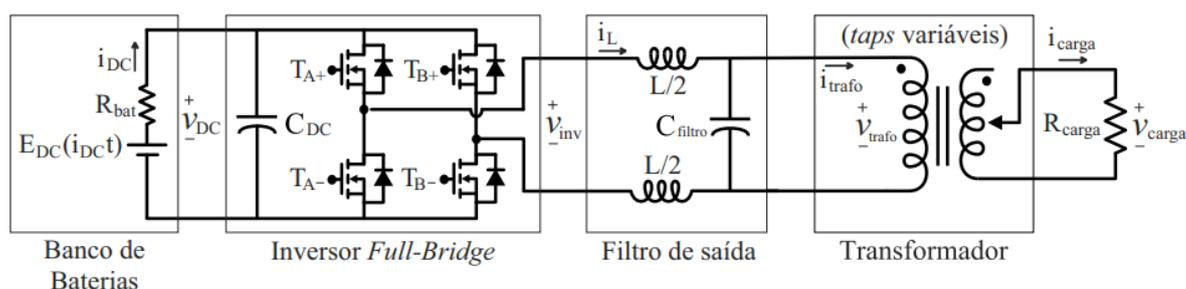


Fonte: próprio autor.

Desta forma, o transformador, por si só, é capaz de disponibilizar as tensões de cada faixa de operação, através dos seus taps variáveis. Esses taps podem ser comutados utilizando relés de forma a obter a tensão adequada para cada faixa de medição. Com isso, também é possível utilizar um número mínimo de baterias em série.

Foi definido que o Módulo de Medição de Potência seria composto por um conversor monofásico *Full-Bridge* (a partir de agora chamado por simplicidade de inversor) alimentado por um banco de baterias e conectado a um trafo multi-taps capaz de prover os ganhos de tensão necessários para injeção de corrente em malhas de aterramentos de diferentes faixas de resistências, além de conferir a isolamento galvânica necessária ao equipamento. Além destes estágios, um estágio com um filtro de saída passa-baixas será inserido a fim de atenuar o conteúdo harmônico na entrada do transformador conforme a Figura 40, uma vez que a saída “chaveada” do inversor possui relevante conteúdo harmônico.

Figura 40 – Módulo de Medição e Potência - MMP.



Fonte: próprio autor.

### 3.2.2 Baterias

Embora o termo “bateria” seja frequentemente usado, a unidade eletroquímica básica é conhecida como “célula”. Uma bateria consiste em uma ou mais células eletroquímicas, conectadas eletricamente em série ou paralelo para fornecer os níveis de tensão e corrente de operação necessários, incluindo, se houver, monitores, controle e outros componentes auxiliares como, por exemplo, fusíveis, diodos, etc.

De uma forma geral, as baterias podem ser classificadas em 2 tipos:

- Baterias primárias - são do tipo não-recarregáveis, pilhas comuns ou alcalinas;
- Baterias secundárias - são do tipo recarregáveis e satisfazem necessidades diversas.

Em relação às baterias recarregáveis, foi realizada uma análise de mercado e definiu-se a utilização de bateria de Lítio Ferro Fosfato *LiFePO4* YLP14 da Aliant (2014). Esta bateria

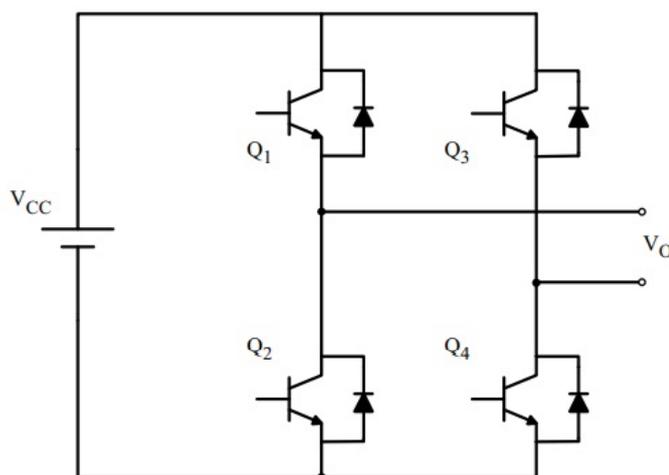
possui valores nominais de 13,3V e 10A, condizendo com os valores adotados para a realização do cálculo na seção anterior. São baterias portáteis aplicadas em motos.

### 3.2.3 Conversor de potência

Buscando desenvolver um protótipo funcional que apresente operação simplificada, optou-se pela utilização de um inversor monofásico de tensão no circuito de potência. O solo, em conjunto com a malha de aterramento, apresenta um comportamento predominantemente resistivo, o que favorece converter uma fonte de tensão em fonte de corrente. Dessa forma, se torna relativamente simples realizar o controle da corrente injetada no solo baseado na modulação da amplitude da tensão do conversor.

Além disso, a topologia em ponte completa para o inversor monofásico de tensão, quando comparado com outras topologias destinadas a funções similares, apresenta algumas características peculiares. Dentre as principais, podem destacar os baixos esforços de corrente e tensão nas chaves. Estas características acabam determinando a escolha desta topologia para situações onde a potência a ser processada ultrapassa 1kVA. As dificuldades desta estrutura estão no número de chaveamento e no fato de serem necessários sinais de comando isolados para os interruptores. A Figura 41 apresenta o circuito da topologia do conversor c.c/c.a em ponte completa, conforme visto em Mohan e Robbins (2002) e Erickson e Maksimovic (2001).

Figura 41 – Detalhamento do inversor.



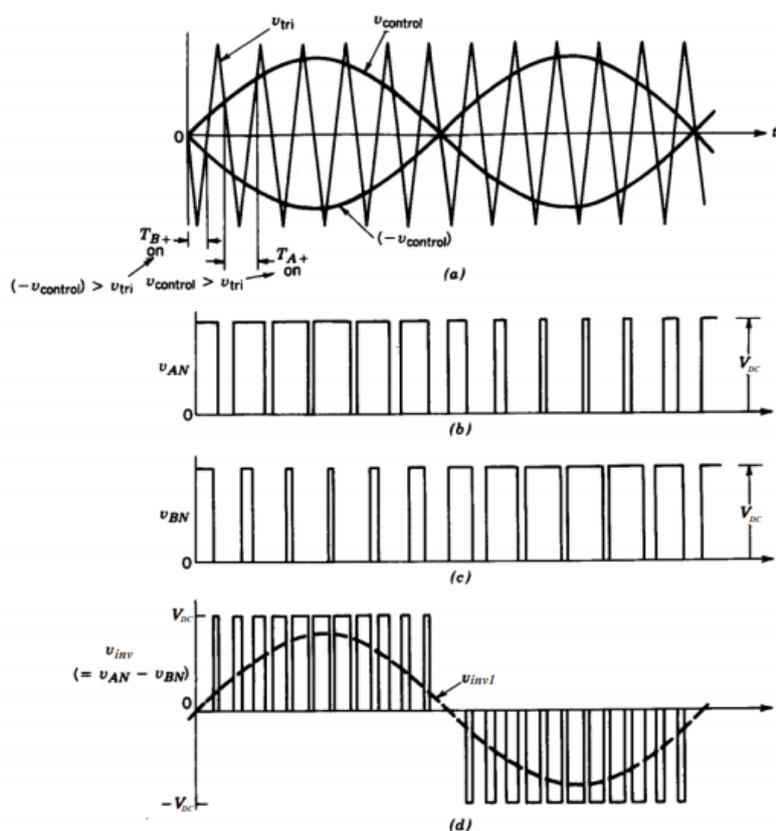
Fonte: próprio autor.

O princípio de funcionamento do inversor de tensão está ligado a uma estratégia de Modulação de Largura de Pulso (PWM - *Pulse Width Modulation*) a qual os componentes eletrônicos de comutação são submetidos. Conforme mostrado na Figura 42, a técnica de PWM fornece aos interruptores um sinal de comando em frequência fixa capaz de variar a razão cíclica de acordo com uma onda portadora, geralmente triangular. A tensão de saída gerada é uma

seqüência de pulsos determinada pela razão cíclica imposta que possui a freqüência fundamental da onda modulante, e componentes harmônicos relacionados com a freqüência da onda portadora - referência Pires (2012).

A partir de uma análise comparativa de projeto para utilização de PWM bipolar ou unipolar, a escolha adotada para o protótipo foi a utilização do PWM unipolar para o inversor *Full Bridge*, pois o mesmo gera a menor ondulação de corrente além de requerer um menor valor de capacitância para o filtro LC.

Figura 42 – Formas de onda do PWM unipolar.

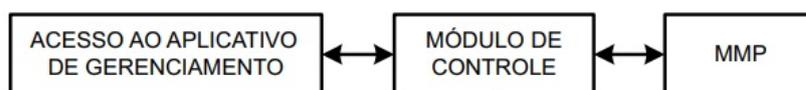


Fonte: Mohan e Robbins (2002).

### 3.3 Módulo de Controle - MC

Na seção anterior, foi descrita a estrutura do MMP, responsável por gerar, controlar e medir as variáveis elétricas relacionadas ao ensaio de medição de resistência de malha de terra. Embora o MMP seja o responsável pela parte de potência e medição do equipamento, sua operação é controlada pelo MC, conforme visto no esquema geral da Figura 43. O MC é a unidade central do equipamento, responsável por:

Figura 43 – Esquema geral de operação do Módulo de Controle.



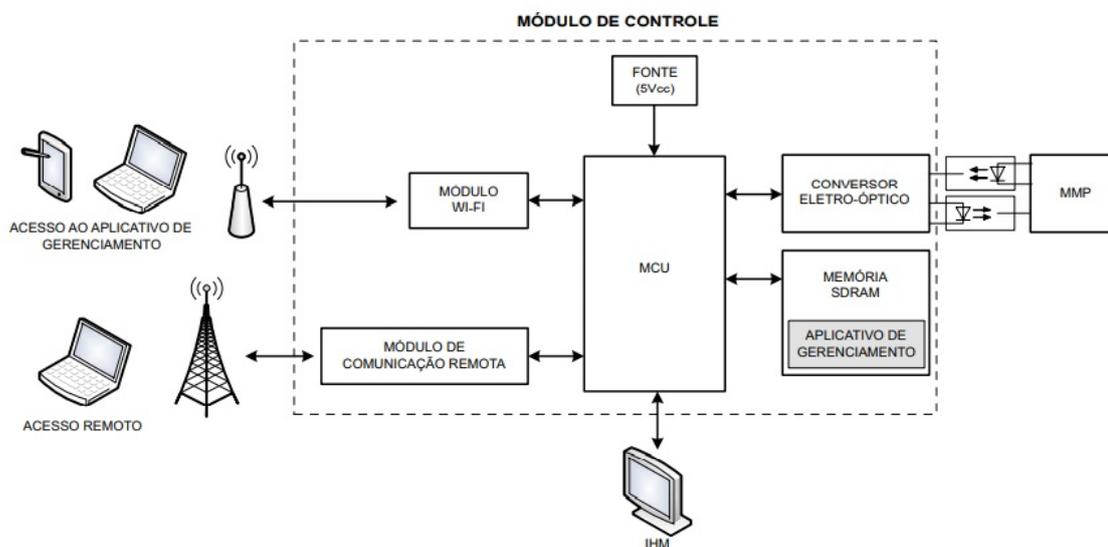
Fonte: próprio autor.

- Coordenar os testes de injeção de corrente e medição de tensão a serem realizados pelo MMP. Portanto, o MC define em qual faixa de medição o MMP irá trabalhar;
- Receber do MMP os valores de amplitude da corrente injetada, além do deslocamento de fase entre estas duas variáveis;
- Calcular o valor da resistência da malha de terra;
- Armazenar as informações das variáveis elétricas medidas e computadas nos ensaios em uma memória interna;
- Disponibilizar uma interface de interação com o usuário, de forma a facilitar a execução dos testes de medição em campo: essa interface é o aplicativo de gerenciamento armazenado na memória do MC. Nesta interface, os profissionais podem operar os ensaios, tendo acesso às informações em tempo real de cada etapa realizada;
- Registrar e gerenciar eventos relacionados à operação do equipamento (erros, alertas, etc.);
- Prover comunicação remota com a subestação para a transferência dos dados dos ensaios realizados.

O MC é o dispositivo central do equipamento, sendo responsável por gerenciar a operação dos outros módulos, controlar os ensaios de medição de resistência de malha de terra, disponibilizar o aplicativo de gerenciamento, além de se comunicar remotamente com a subestação. Para que o MC possa desempenhar estas funções, é proposta a configuração mostrada na Figura 44.

A alimentação do módulo é feita por uma fonte de tensão 5Vcc. O nível de tensão escolhido é compatível com a maioria dos microcontroladores, módulos de comunicação, memórias e interfaces disponíveis no mercado. Esta fonte de alimentação deve ser independente do banco de baterias que alimenta o MMP, de forma a prover isolamento galvânica entre o circuito de potência do MMP e o circuito de microeletrônica do MC. O objetivo principal é proteger o MC contra possíveis falhas ocorridas no MMP ou surtos de tensão ocorridos na malha de terra durante os ensaios, já que os componentes do MC possuem alto valor financeiro agregado. Devido ao baixo consumo energético do MC e à necessidade do equipamento ser portátil, o nível de tensão de 5Vcc pode ser provido por uma bateria portátil de alta capacidade, como,

Figura 44 – Estrutura do Módulo de Controle.



Fonte: próprio autor.

por exemplo, um *PowerBank* de 20.000 mAh da referência PINENG (2014). Vale ressaltar que outros níveis de tensão poderão ser adicionados ou derivados, caso exista a necessidade.

O componente central do MC é um microcontrolador (MCU - *MicroController Unit*), que é um pequeno computador em um único circuito integrado contendo um ou mais núcleos de processamento, memória, alguns periféricos de comunicação, medição e acionamento e entradas e saídas (I/O - *Input/Output*). A solução utilizada neste projeto é a família de microcontroladores ARM embarcados no miniPC *Raspberry Pi*, que possui sistema operacional incorporado e interface de programação de alto nível. O *Raspberry Pi 3 Model B* possui uma CPU (*Central Processing Unit*) de 64 bits com quatro núcleos operando a 1,2 GHz, 1 GB de memória RAM (*Random Access Memory*) e 40 terminais de entrada e saída para as mais diversas aplicações - referência Raspberry (2016).

Os periféricos necessários para o MCU são interfaces de comunicação serial USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*), bastante utilizadas em dispositivos microcontrolados, interface de comunicação *Ethernet* e barramento serial multi-mestre I2C (*Inter-Integrated Circuit*). Tais periféricos, presentes nos microcontroladores *Raspberry Pi* e PIC, servirão de interface de comunicação com a memória externa SDRAM (*Synchronous Dynamic Random Access Memory*), com o módulo de comunicação Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), com o conversor eletro-óptico e com o módulo de comunicação remota.

Para os ensaios de medição de malha de terra, a firmware instalada no microcontrolador do MC executará os seguintes passos:

1- O MCU recebe um comando para executar de um novo ensaio de medição. Este

comando é gerado pelo profissional que coordena os testes, que deve, ainda, informar o ponto no qual a haste de prova está inserida (distância percentual entre a haste de prova e a haste local). O comando pode ser gerado via aplicativo de gerenciamento;

2- O MCU faz uma tomada de decisão de que faixa de medição é mais adequada realizar o ensaio. Essa tomada de decisão é baseada nas medições anteriores do ensaio;

3- O MCU inicia o processo de comunicação com o MMP enviando uma mensagem pelo canal TX solicitando a execução do ensaio e informando a faixa de ensaio desejada;

4- O MMP executa o ensaio e retorna para o MCU mensagens pelo canal RX contendo as variáveis elétricas do teste: a tensão na haste de prova, a corrente injetada e o deslocamento de fase entre a tensão e a corrente. Caso a resistência da malha de terra esteja fora dos limites de resistência da faixa escolhida, o MMP irá informar ao MC que a faixa está inadequada;

5- O MCU, então, calcula o valor da resistência de malha de terra obtida na faixa de ensaio que executou o teste;

6- O MCU armazena na memória SDRAM um registro do ensaio contendo a estampa de tempo (data e hora), a localização da haste de prova, a faixa de ensaio, a resistência de malha de terra e as variáveis elétricas informadas pelo MMP;

7- Se necessário, o MCU repetirá os passos relacionados acima usando outras faixas de medição. O objetivo é coletar o máximo de medições possíveis para cada posição da haste de prova, permitindo um cálculo mais preciso da resistência da malha de terra;

8- O MCU envia para o aplicativo de gerenciamento os dados do último ensaio, mantendo o profissional informado dos valores obtidos;

9- Por fim, o MCU informa ao profissional a necessidade de deslocar a haste de prova para uma nova posição, permitindo a realização das outras medições necessárias para gerar o relatório final de medição de resistência da malha de terra.

### 3.3.1 Comunicação com o MMP

O MC se comunicará com o MMP via conversor eletro-óptico, utilizando um barramento de comunicação serial assíncrono com fluxo de dados nos dois sentidos (*Full Duplex*). O uso de conversor eletro-óptico se faz necessário para prover isolamento galvânica entre o MC e o MMP, cuja importância foi descrita anteriormente. Dois modelos de interfaceamento para o conversor eletro-óptico foram avaliados no projeto: por fibra óptica ou por acoplador óptico. O interfaceamento por fibra óptica foi o modelo escolhido e é baseado no uso de um conversor RS-232 para fibra óptica, que possui a capacidade de converter o sinal elétrico no padrão RS-232 de três fios-transmissor (TX), receptor (RX) e o terra elétrico (Gnd) - para um par de fibras ópticas multimodo (TX e RX). Um exemplo é o conversor da referência Analo (2010), que permite comunicação a uma taxa de até 115kbps.

A outra solução é por acoplador óptico (*optoacoplador ou optocoupler*), que utiliza um diodo emissor de luz (LED - *Light Emitting Diode*) para a transmissão e um fotosensor para a recepção do sinal. Neste caso, são necessários dois optoacopladores para os canais TX e RX da comunicação *Full Duplex*. Existem diversos tipos de optoacopladores capazes de fornecer isolamento galvânica acima dos 10kV , possuindo saída tipo TTL (*Transistor Transistor Logic*), transistor, TRIAC (*Triode for Alternating Current*), Darlington, etc. Por exemplo, o optoacoplador OPI110 - referência Electronics (2016b) utiliza um fototransistor como o estágio de saída com isolamento de 15kV , enquanto o OPI1268S - referência Electronics (2016a) utiliza saída tipo TTL com isolamento de 20kV . Ambos modelos são da TT *Electronics* e permitem comunicação a uma taxa de até 2Mbps.

### 3.3.2 Módulo de comunicação remota

O módulo de comunicação remota é a interface entre o MCU e o sistema supervisor da subestação ou entre o MCU e um banco de dados remoto. O objetivo deste módulo é permitir que os dados de ensaios de medição realizados na malha de terra da subestação sejam transferidos para o sistema supervisor, ou seja, armazenado em um banco de dados remoto. A comunicação se dará por um barramento de comunicação serial assíncrono (UART) ou uma interface de comunicação Ethernet a depender da tecnologia de transmissão de dados utilizada. Duas tecnologias foram consideradas no projeto: as tecnologias GPRS (*General Packet Radio Service*) e 3G/4G (terceira/quarta geração). Módulos GPRS são capazes de transferir os dados do MC ao equipamento remoto no formato de pacote de dados GPRS/GSM e geralmente são baseados no protocolo UART, como é o caso do módulo MG323-B da HUAWEI - referência RFsolution (2012). Já a outra opção (solução adotada) são os módulos 3G/4G capazes de transmitir os dados do MC ao equipamento remoto via rede 3G/4G e geralmente possuem interface Ethernet/Wi-Fi, como é o caso do módulo CM685T-W da Comset - referência Comset (2013).

## 3.4 Aplicativo de Gerenciamento

O aplicativo de gerenciamento, armazenado na memória *flash* e executado pelo microcontrolador do MC, é uma interface alternativa, permitindo que o profissional possa interagir com o equipamento de medição de forma similar à IHM. Essa solução foi concebida para dar flexibilidade e proteção extra ao usuário durante os ensaios de medição de resistência da malha de terra.

Tal aplicativo é flexível, contruído em uma plataforma Web, acessível por uma rede Wi-Fi gerenciada pelo microcontrolador do MC. Assim, o profissional poderá utilizar computadores desktop, laptops, tablets, smartphones ou quaisquer dispositivos com Wi-Fi para entrar na rede gerenciada pelo microcontrolador do MC e, assim, acessar uma página HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) via navegador, onde estará hospedado o aplicativo de gerenciamento. As

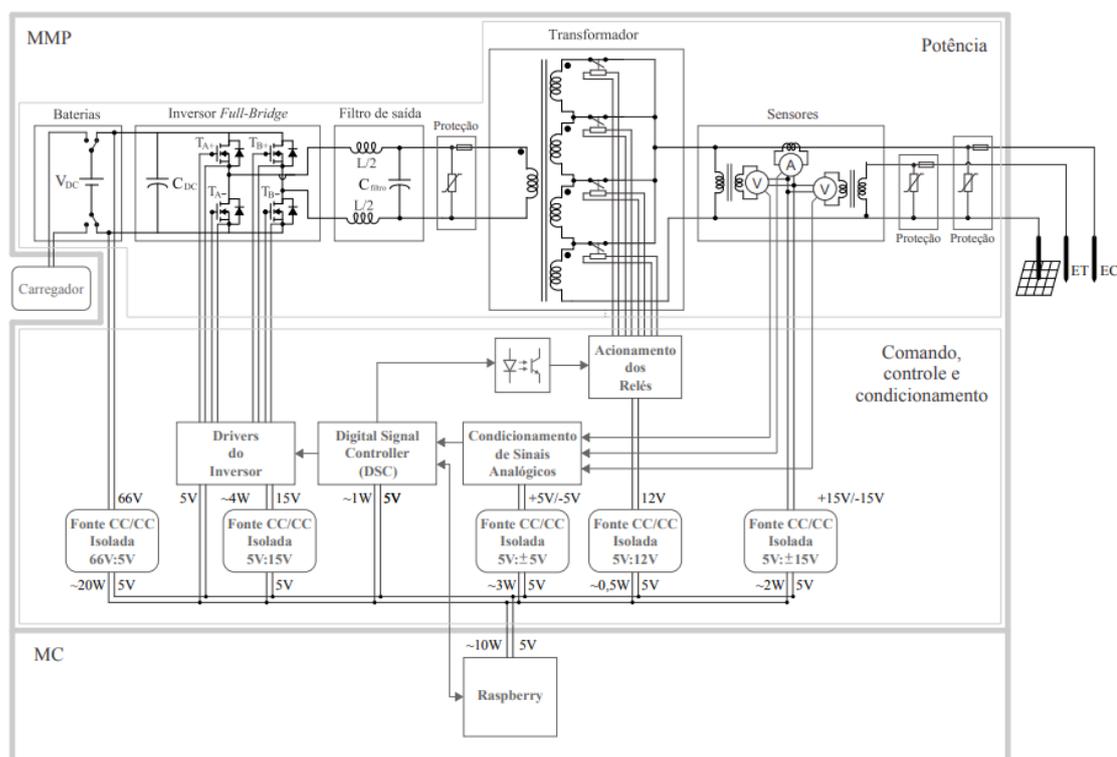
funcionalidades disponíveis neste aplicativo possuem vantagem de permitir que se armazene (via download), no dispositivo utilizado pelo profissional, tanto os relatórios de medição quanto o banco de dados disponível na memória do MC.

A segurança extra advém do fato de que o profissional não necessitará ficar próximo ao equipamento de medição durante a execução dos ensaios de medição, diferentemente da IHM que é fisicamente conectada ao equipamento. Assim, evita-se que possíveis surtos de tensão causados por descargas elétricas ou faltas, capazes de danificar o equipamento, cause danos ao profissional que está executando o ensaio.

### 3.5 Montagem do Protótipo

Nas seções anteriores, foram detalhadas arquiteturas, configurações e demais detalhes sobre o controle do Módulo de Medição e Potência (MMP), assim como a definição da plataforma microcontrolada para implementação do Módulo de Controle (MC) e das suas características e protocolos de comunicação. Como visto, o MC terá toda sua implementação realizada por software utilizando como plataforma um hardware que possui os recursos necessários para operacionalizar as ações de comando e visualização dos ensaios, escolhido como o *Raspberry Pi 3 model B*. A Figura 45 mostra mais detalhes do MMP em diagrama de blocos geral.

Figura 45 – Diagrama de blocos geral do sistema de medição de resistência de aterramento.



Fonte: próprio autor.

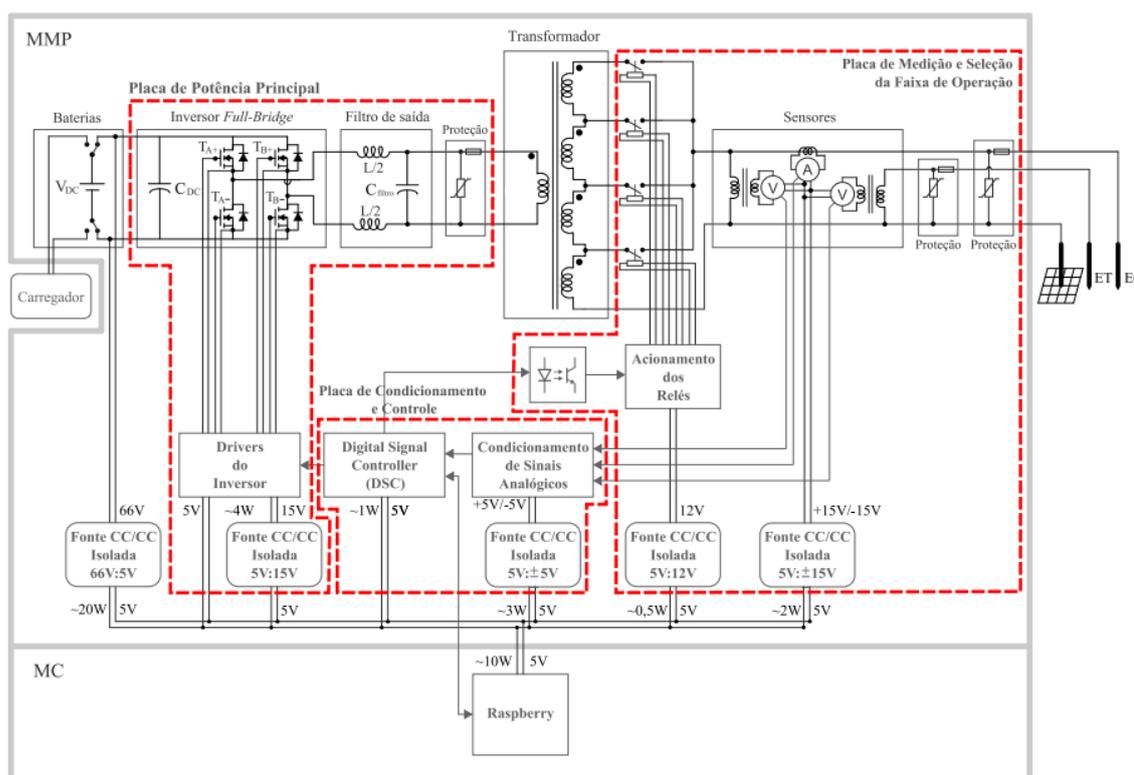
Esta etapa é dedicada para detalhar a construção do dispositivo cujo diagrama de blocos completo está mostrado na Figura 45, que introduz também os blocos necessários para o comando, controle, condicionamento dos sinais e proteção do MMP.

De posse do diagrama geral do MMP apresentado na Figura 45, dividiu-se os blocos que compõem o sistema em três placas de acordo com uma divisão lógica:

- 1- Placa de Potência Principal;
- 2- Placa de Condicionamento e Controle;
- 3 - Placa de Medição e Seleção de Faixa.

Assim, de forma representativa, mostra a divisão dos blocos do sistema em placas na Figura 46, e um diagrama de alto nível do MMP (Figura 47) com a descrição mais detalhada do conteúdo das PCIs e elementos externos (transformador e fonte auxiliar) que irão compor o equipamento.

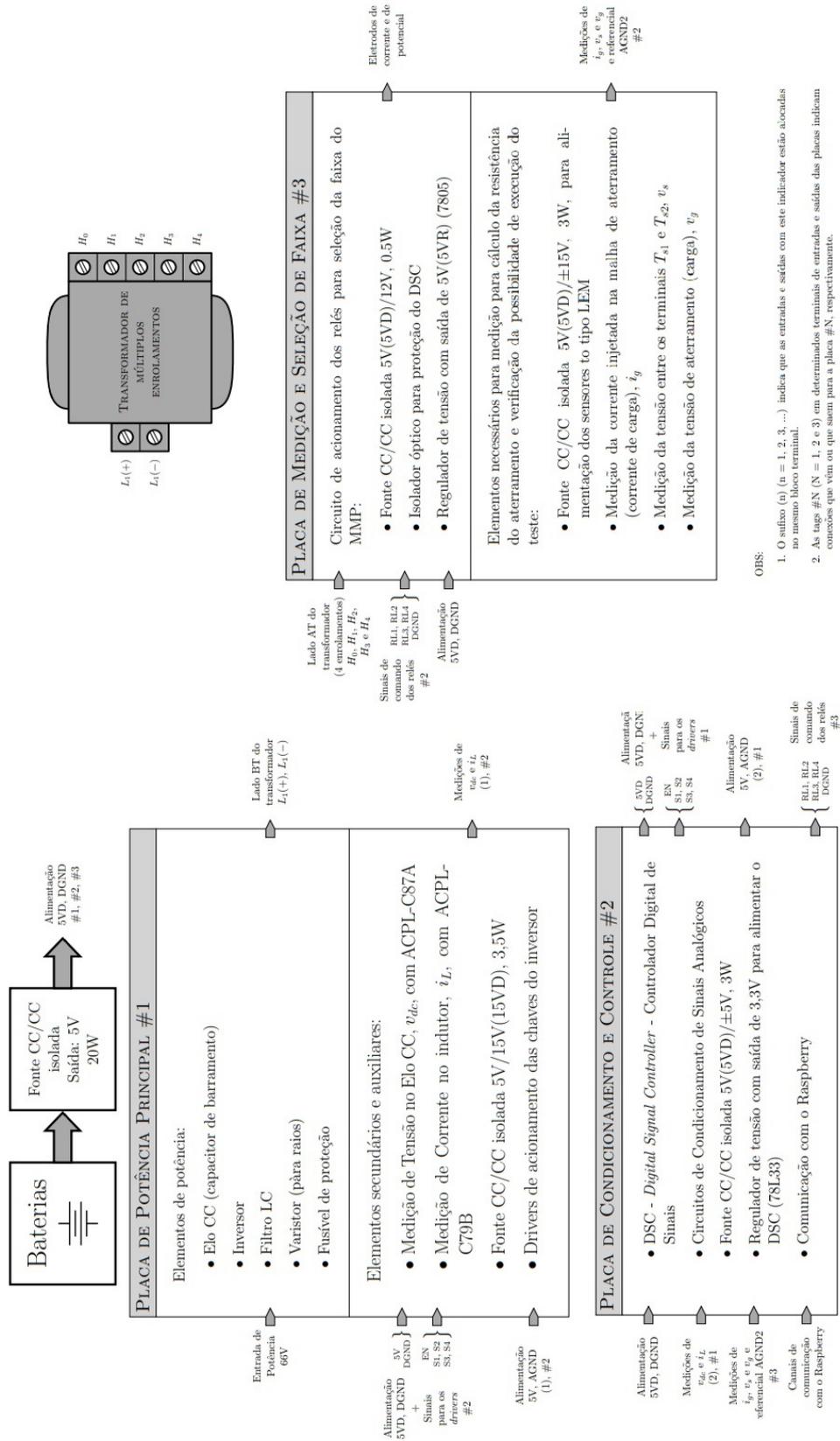
Figura 46 – Divisão do MMP em placas.



Fonte: próprio autor.

De forma a explicar mais detalhadamente os circuitos que compõem as placas, referentes aos blocos do diagrama apresentado, subdivide-se essa seção em três, conforme a divisão por placas em sequência.

Figura 47 – Diagrama de alto nível do MMP com descrição do conteúdo das PCIs.



Fonte: próprio autor.

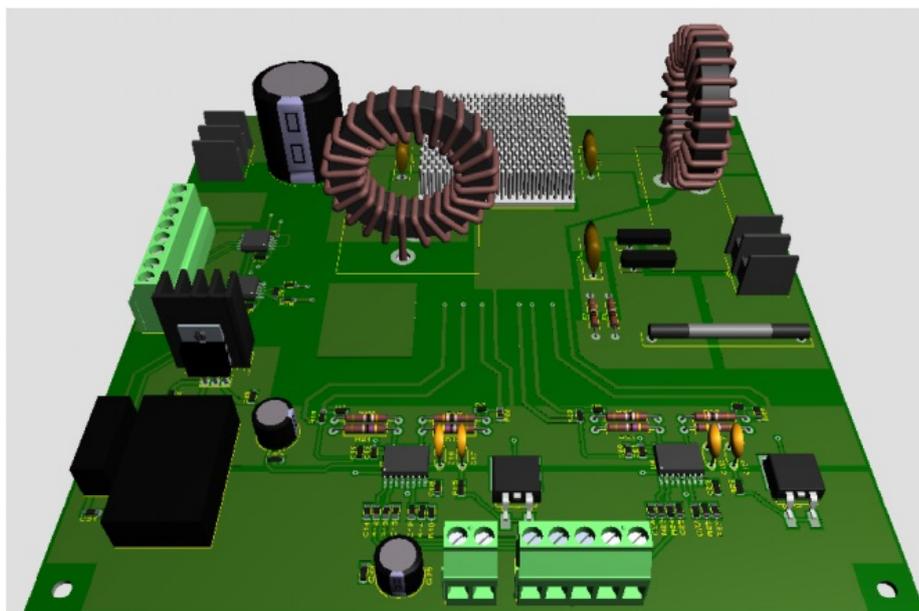
### 3.5.1 Placa de Potência Principal

A placa de Potência Principal engloba todos os elementos do MMP do lado BT do transformador de múltiplos enrolamentos, exceto a bateria e seu carregador. Ou seja, a placa é composta pelo inversor *full-bridge* e o elo CC (capacitor(es) de barramento), filtro LC de saída e proteção, conforme Figura 46. Ainda nesta placa tem-se os circuitos de comando das chaves (drivers do inversor) e suas fontes de alimentação (isoladas) de 5 e 15V.

Adicionalmente, tem-se ainda as medições da tensão no barramento CC, vdc, e da corrente no indutor,  $i_L$ , utilizando divisor resistivo e resistor *shunt* em conjunto com os sensores optoisolados (fotoacoplados) de tensão. As saídas desses sensores (sinais medidos) vão para a placa de Condicionamento e Controle, onde é feito o condicionamento adequado.

Com o esquemático da placa de Potência Principal pronto, apresenta-se a vista superior de seu esquema 3D prévio (representativamente) na Figura 48. Este projeto de placa tem medidas 18cm x 18cm.

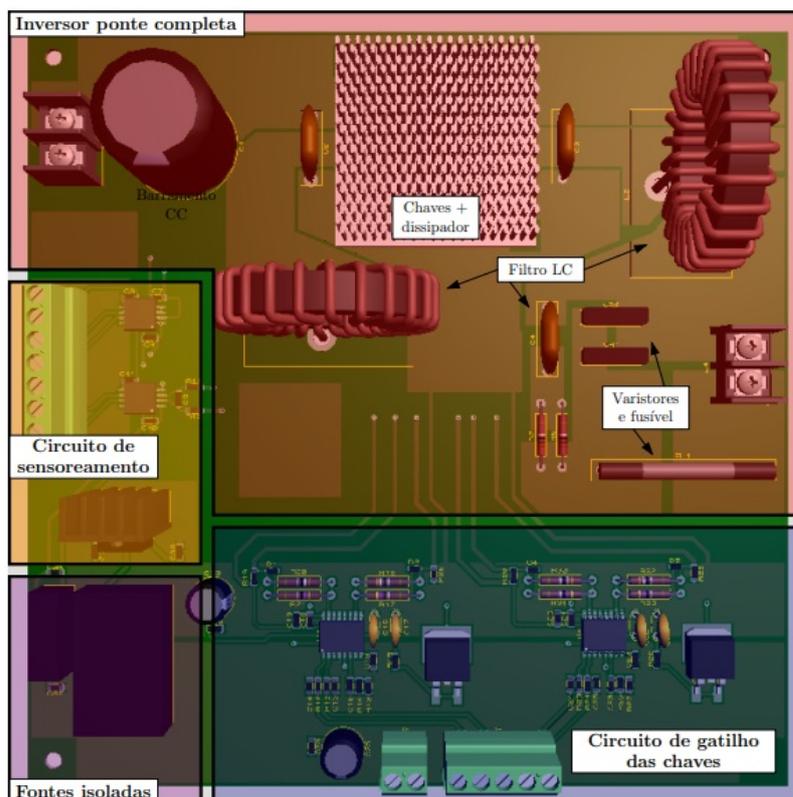
Figura 48 – Vista frontal 3D do projeto da placa de Potência Principal.



Fonte: próprio autor.

Com o objetivo de mostrar a localização dos elementos que compõem essa placa e facilitar a compreensão do leitor, apresenta-se uma vista de cima da placa com o detalhamento adequado na Figura 49, em que, observa-se uma clara separação entre a parte de potência (inversor), os circuitos de comando das chaves, os circuitos de sensoramento (vdc,  $i_L$ ) e localização das fontes isoladas utilizadas.

Figura 49 – Vista superior 3D do projeto da placa de Potência Principal com detalhamento da separação funcional.



Fonte: próprio autor.

### 3.5.2 Placa de Condicionamento e Controle

A Placa de Condicionamento e Controle basicamente é composta por um microcontrolador da Texas Instruments - referência Texas Instruments (2019) e os circuitos de condicionamento dos sinais, além de elementos auxiliares para as saídas lógicas, como resistores *pull-down*, e para o funcionamento adequado e programação (via JTAG) do microcontrolador.

### 3.5.3 Placa de Medição e Seleção de Faixa

Esta placa de Medição e Seleção de Faixa conta com componentes relativamente grandes, como os relés (com elevada isolação) que serão utilizados e os sensores do tipo LEM de medição de tensões e corrente, e, portanto, optou-se por utilizar uma terceira placa para estas funções, de modo a modularizar o MMP setorizadamente (lado AT do transformador de múltiplos enrolamentos).

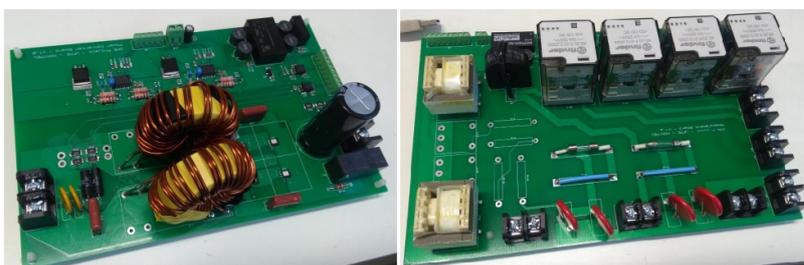
## 3.6 Protótipo final

O sistema de medição de resistência de malha de aterramento é formado por 3 partes principais:

- Placa do conversor de potência;
- Placa de condicionamento de sinais e processamento de dados;
- Placa de sensoriamento e comutação dos relés.

Na Figura 50, é mostrada as duas principais placas: a do conversor de potência e a placa de sensoriamento e comutação dos relés:

Figura 50 – Principais partes do protótipo.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 51, é possível ver a montagem dos principais componentes do protótipo. A Figura 52 mostra o protótipo finalizado.

Figura 51 – Principais partes do protótipo.



Fonte: próprio autor.

Figura 52 – Protótipo finalizado.



Fonte: próprio autor.

### 3.7 Conclusão

O capítulo 3 teve como principal objetivo mostrar detalhadamente as características construtivas e componentes escolhidos para aplicação no protótipo desenvolvido. Destacou-se também as principais funcionalidades, mostrando as principais divisões e diagramas de blocos e tecnologias empregadas. Por fim, fotos e detalhes de projetos em 3D foram mostrados para dar uma dimensão da composição do protótipo desenvolvido.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão mostrados os principais testes que foram realizados com o protótipo desenvolvido, além da sua comparação com os principais equipamentos disponíveis no mercado, tais como o CPC-100 da OMICROM e os Terrômetros MTD-20KWE e TM25R da Megabrás.

É importante destacar que o protótipo desenvolvido se baseou nos resultados do CPC-100 como referência de desempenho e qualidade de medição (*benchmarking*), visto que este equipamento é capaz de medir resistências em uma faixa variável de frequências diferentes de 60 Hz, mas próximo de 60 Hz (faixa industrial).

O protótipo desenvolvido é composto por três partes principais para medição de resistência de malha de aterramento:

- 1- Placa de Potência Principal;
- 2- Placa de Condicionamento e Controle;
- 3 - Placa de Medição e Seleção de Faixa.

Esse sistema pode ser visto na Figura 53, onde foi primeiramente testado utilizando resistências físicas de laboratório, com o objetivo de comissionar o protótipo. Após os testes de laboratório, essas placas, que formam o sistema, foram montadas numa caixa plástica juntamente com as baterias, transformador e um *Raspberry Pi 3* onde foi desenvolvida a IHM do sistema que se conecta com um tablet (o aplicativo de gerenciamento). Após validação dos testes em bancada, foram realizados os acabamentos finais até a montagem da versão final do protótipo, conforme mostrado na Figura 52.

Figura 53 – Visão geral das placas do protótipo em bancada.



Fonte: próprio autor.

Para validação de todas as partes do protótipo e identificação de melhorias, faz-se

necessário realizar testes em campo, de forma a abranger situações mais diversas possíveis, e que retratem a realidade das medições feitas pelas empresas do setor elétrico. Assim, após os testes em laboratório, foram realizados testes em pequenos sistemas de aterramento, testes em subestações desenergizadas até, efetivamente, realizar testes em grandes subestações energizadas, na presença de desequilíbrios e tensões remanescentes.

Foram realizadas medições de campo nas seguintes localidades e nesta sequência:

- 1 - Hastes de aterramento em terreno da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE);
- 2 - SE do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE;
- 3 - SE Tejipió - Subestação da Companhia Energética de Pernambuco (CELPE);
- 4 - SE Ibura - Subestação da CELPE;
- 5 - SE Bom Jardim - Subestação da CELPE;
- 6 - SE Cruz de Rebolsas - Subestação da CELPE;
- 7 - SE Paratibe - Subestação da CELPE.

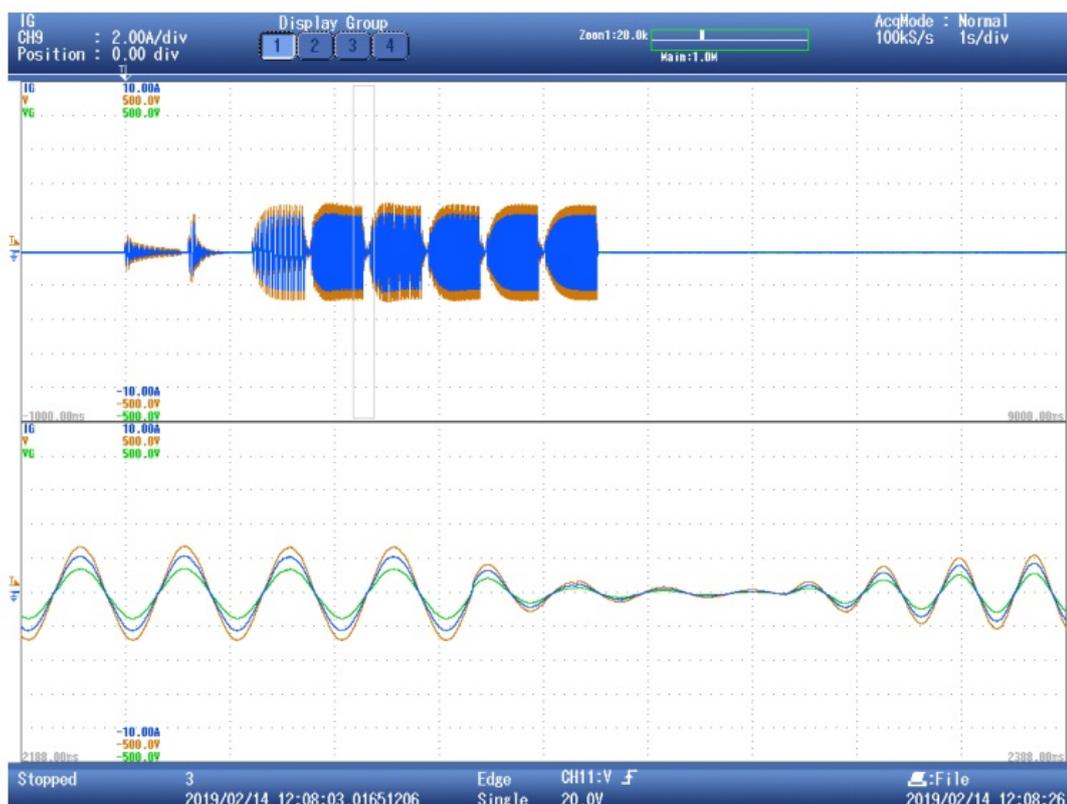
A metodologia utilizada foi a de queda de potencial com frequência variável, conforme definição descrita no final do capítulo 2.

#### **4.1 Primeiro teste: Medição com hastes em terreno da UFPE**

Esse primeiro teste foi realizado nas instalações do Centro de Tecnologia da UFPE em um terreno onde existem hastes para realização de práticas de medições de resistências de hastes de aterramento, ou seja, as instalações não estavam energizadas nem conectadas a nenhum circuito elétrico. As distâncias das medições foram variando até uma distância máxima 30 m, de forma a testar apenas a funcionalidade da fonte. As medições foram realizadas usando um terrômetro Minipa e o protótipo. O objetivo das primeiras medições de campo era validar o funcionamento do equipamento e observar a ordem de grandeza dos resultados encontrados em relação a um terrômetro comercial (dispositivo já conhecido pela sua imprecisão). Foram realizadas sete medições. Os resultados são mostrados na Tabela 6. O objetivo deste primeiro teste foi alcançado e os resultados obtidos estão na mesma ordem de grandeza.

Durante os testes, foi utilizado um osciloscópio para acompanhamento da corrente injetada, tensão aplicada e tensão medida. A Figura 54 mostra as curvas obtidas no osciloscópio durante o teste. As medições foram realizadas para frequência de 40 Hz, pois foi identificado pontos de melhorias visto que a fonte não havia conseguido entrar em regime permanente para as outras frequências.

Figura 54 – Curvas relativas ao ponto 4 de medição da tabela 6. Traço 1: Corrente injetada (azul, 2A/div); Tensão injetada (laranja, 100V/div); Tensão medida (verde, 500V/div); Traço 2: Zoom do Traço 1 na transição de 50 para 70Hz.



Fonte: próprio autor.

Tabela 6 – Resultados obtidos no primeiro teste.

Medições	Terrômetro Minipa	Protótipo
1	23,8 $\Omega$	23,2 $\Omega$
2	25 $\Omega$	24,6 $\Omega$
3	38 $\Omega$	32,8 $\Omega$
4	41,1 $\Omega$	33,2 $\Omega$
5	41,3 $\Omega$	33,9 $\Omega$
6	41,4 $\Omega$	34,3 $\Omega$
7	93,7 $\Omega$	79,1 $\Omega$

Fonte: próprio autor.

## 4.2 Segundo teste: SE do Centro de Tecnologia da UFPE

O segundo teste foi realizado na malha de aterramento da subestação do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. O sistema estava energizado durante o teste. Mesmo assim, as condições de teste não estavam desfavoráveis, ou seja, não houve dificuldades para implementar as hastes no terreno, além do fato que o terrômetro da Minipa conseguiria obter dados com alguma precisão. A Figura 55 mostra o *setup* do teste. Os cabos foram lançados pela janela do laboratório de Eletrônica de Potência da UFPE e conectados até a malha de aterramento da subestação que se localiza ao lado do laboratório. É possível verificar que os resultados obtidos são muito próximos aos obtidos pelo terrômetro comercial - Tabela 7. A Figura 56 mostra as curvas obtidas no osciloscópio durante o teste: corrente injetada, tensão aplicada e tensão medida. Os resultados mostrados na Tabela 7 foram obtidos para frequências de 40 Hz, pois foi identificado pontos de melhorias visto que a fonte não havia conseguido entrar em regime permanente para as outras frequências.

Tabela 7 – Resultados obtidos no segundo teste, realizado na malha de aterramento da subestação do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.

Medições	Terrômetro Minipa	Protótipo
1	0,40Ω	0,36Ω
2	0,50Ω	0,41Ω
3	0,60Ω	0,52Ω
4	0,70Ω	0,65Ω
5	0,80Ω	0,82Ω
6	1,50Ω	1,42Ω
7	1,90Ω	1,80Ω
8	2,70Ω	2,55Ω
9	5,70Ω	5,50Ω
10	32,0Ω	35,90Ω

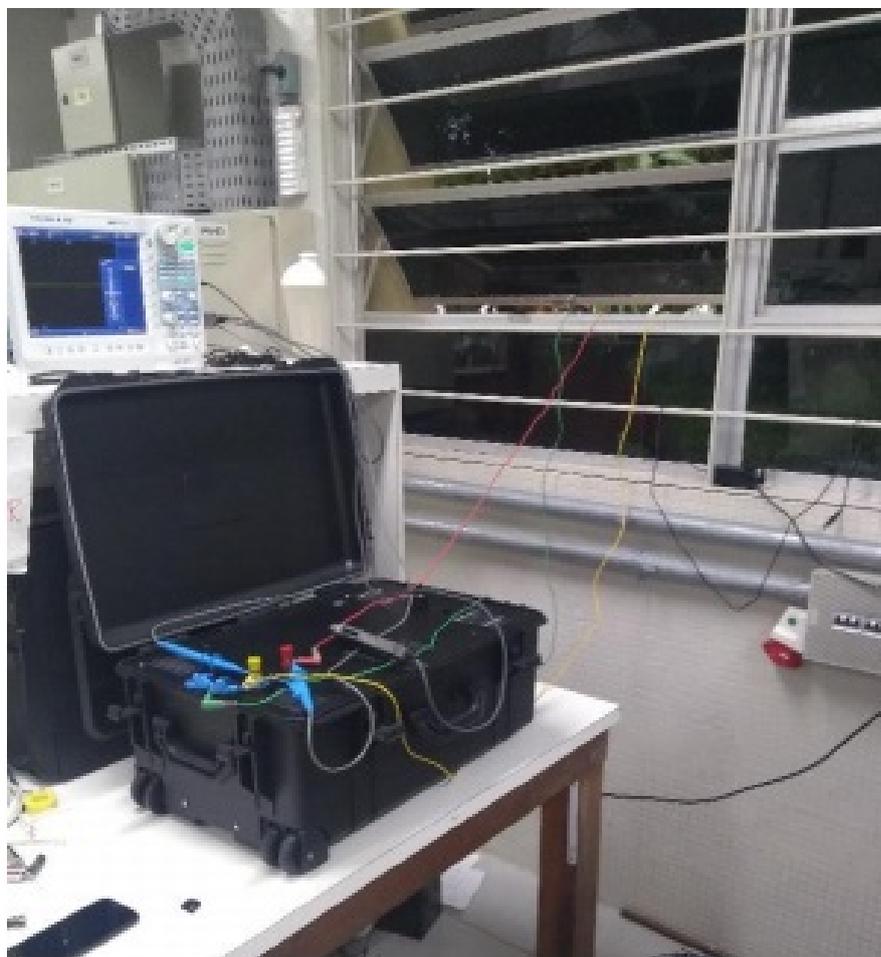
Fonte: próprio autor.

## 4.3 Terceiro teste: SE Tejipió

O teste na subestação de Tejipió foi o primeiro a ser realizado em uma subestação energizada.

A subestação de Tejipió possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 57. As hastes utilizadas são do tipo *COOPERWELD* 16x2400mm, e estão implantadas

Figura 55 – Visão geral do teste de medição do aterramento da subestação do Centro de Tecnologia e Geociências, realizado no laboratório da UFPE.

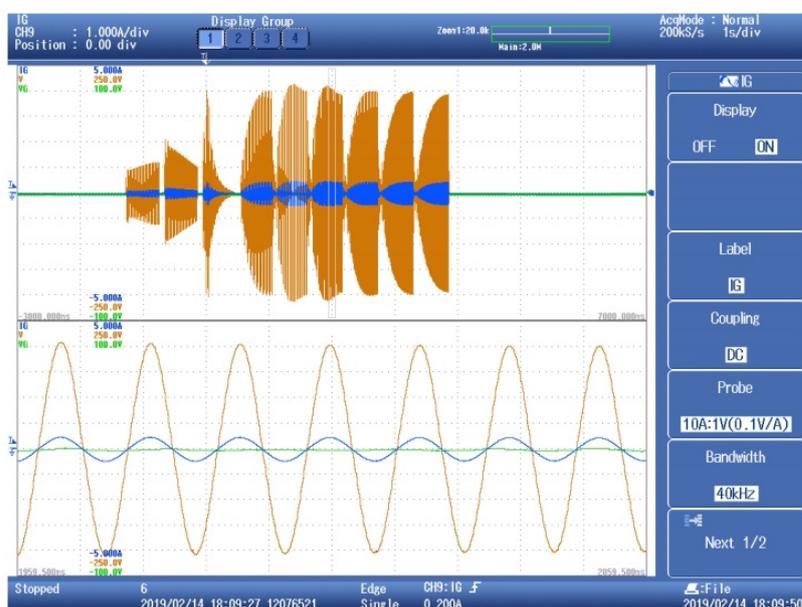


Fonte: próprio autor.

a uma profundidade de 1m do solo. Os cabos utilizados neste projeto são de cobre nu de 70mm<sup>2</sup>, e todas as conexões são exotérmicas em "X" ou em "T". A diagonal máxima desta instalação mede em torno de 75 m. A resistividade do solo de Tejipió está em torno de 10 $\Omega$ -m.

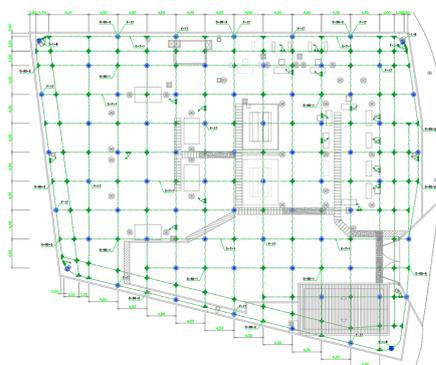
Foram usados nos testes os dispositivos comerciais Omicron CPC-100 (importado) e o Megabrás MTD-20KWe (nacional) além do protótipo desenvolvido. Os resultados obtidos nas medições são mostrados na Tabela 8. As frequências de interesse para o CPC100 e protótipo foram 40, 50, 70, 80, 90 e 100Hz. A tabela mostra apenas uma média desses resultados. Já o MTD-20KWe não permite ajuste de frequência, sendo que todos os resultados foram obtidos na frequência de 1.470 Hz. Pelos resultados é possível avaliar com estando adequadas as condições da malha (resistências encontradas bem baixas). Os resultados obtidos com o protótipo ficaram bem próximos aos obtidos com o CPC-100, enquanto os produzidos pelo Megabrás ficaram significativamente distantes. Some isso o fato de que o valor exibido no display digital do MTD-

Figura 56 – Curvas relativas ao ponto 6 de medição da Tabela 7. Traço 1: Corrente injetada (azul, 1A/div); Tensão injetada (laranja, 50V/div); Tensão medida (verde, 20V/div); Traço 2: Zoom do Traço 1 para frequência de 70Hz.



Fonte: próprio autor.

Figura 57 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação Tejipió.



Fonte: documentos CELPE.

20KWe oscilava bastante no momento da medição (o que denota a pouca precisão do instrumento). A Figura 58 apresenta os resultados da Tabela 8 graficamente, onde é possível verificar melhor que os resultados do MTD-20KWe são significativamente diferentes em comparação com os demais instrumentos. As medições do protótipo estão identificadas no gráfico como *Ground Monitoring System (GMS)*.

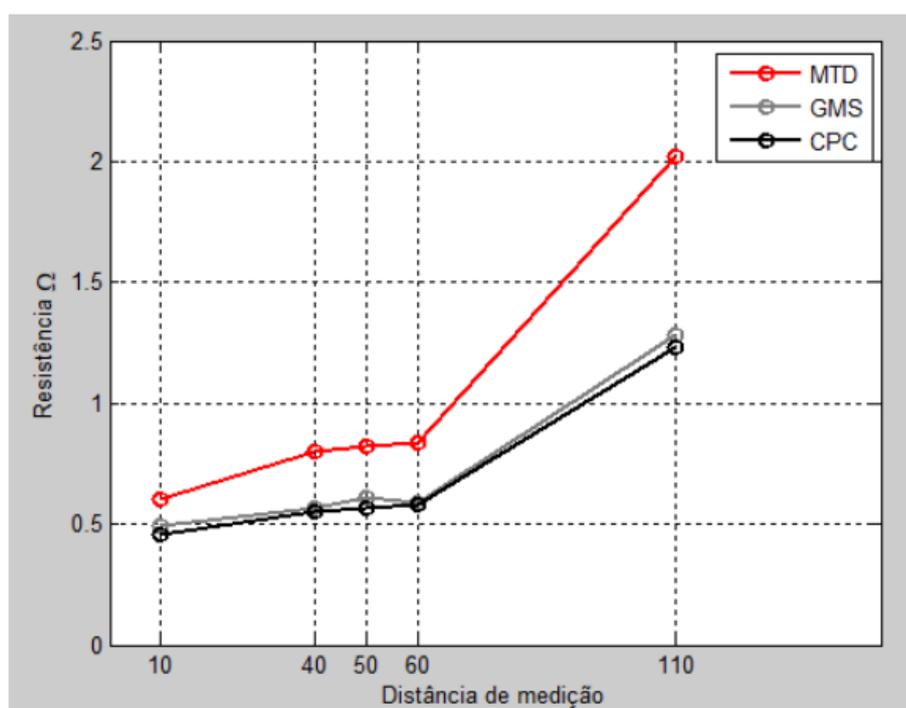
Analisando os dados da Tabela 8, observa-se que o equipamento MTD-20KWe apresentou erro de até 64%, em relação ao *benchmarking* CPC 100, para a distância de 110 m. Já o erro do protótipo não ultrapassou 4% para este mesmo ponto.

Tabela 8 – Resultados obtidos para o terceiro teste (SE Tejipió) com erro % tomando como referência a CPC-100.

Distância (m)	CPC-100	Protótipo	Erro	MTD-20KWe	Erro
10	0,46 $\Omega$	0,49 $\Omega$	6,52%	0,6 $\Omega$	30,4%
40	0,55 $\Omega$	0,57 $\Omega$	3,63%	0,8 $\Omega$	45,45%
50	0,57 $\Omega$	0,61 $\Omega$	7,01%	0,82 $\Omega$	43,85%
60	0,58 $\Omega$	0,59 $\Omega$	1,72%	0,84 $\Omega$	44,82%
110	1,23 $\Omega$	1,28 $\Omega$	4,06%	2,02 $\Omega$	64,22%

Fonte: próprio autor.

Figura 58 – Comparação dos resultados obtidos para o terceiro teste - medições na SE Tejipió.



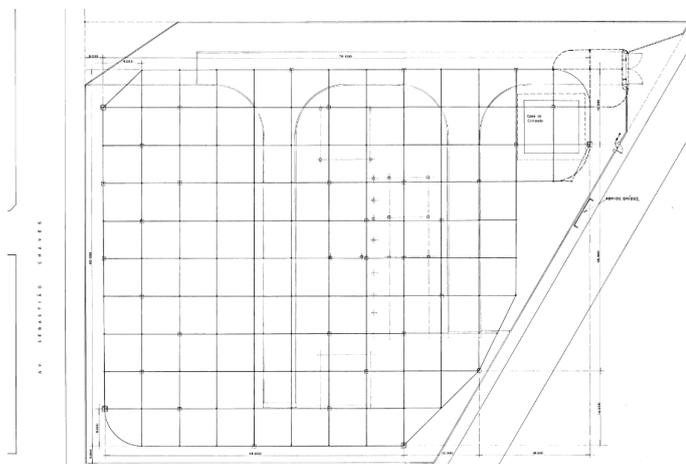
Fonte: próprio autor.

#### 4.4 Quarto teste: SE Ibura

O teste seguinte foi realizado na subestação energizada do Ibura, que possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 59. Trata-se de uma malha de aterramento que foi implantada em 1986. O projeto contemplou, na época, apenas 35 hastes do tipo *COOPERWELD*, enquanto que os cabos utilizados neste projeto são de cobre nu 4/0 AWG. Todas as conexões são do tipo *CADWELD* em "X" ou em "T". A diagonal máxima desta

instalação mede em torno de 98 m. A resistividade do solo de Ibura está em torno de  $3,39\Omega\cdot\text{m}$ .

Figura 59 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação do Ibura.



Fonte: documentos CELPE.

Os resultados dos testes aparecem na Tabela 9. Mais uma vez esta tabela mostra a média dos resultados obtidos nas 6 frequências ensaiadas. Novamente os resultados do protótipo ficaram bastante próximos do CPC 100. A Figura 60 compara os resultados graficamente, onde é possível visualizar também que os resultados do MTD-20KWe sempre ficam mais discrepantes quando comparados com os demais equipamentos.

Tabela 9 – Resultados obtidos para o quarto teste (SE Ibura) com erro % tomando como referência a CPC-100.

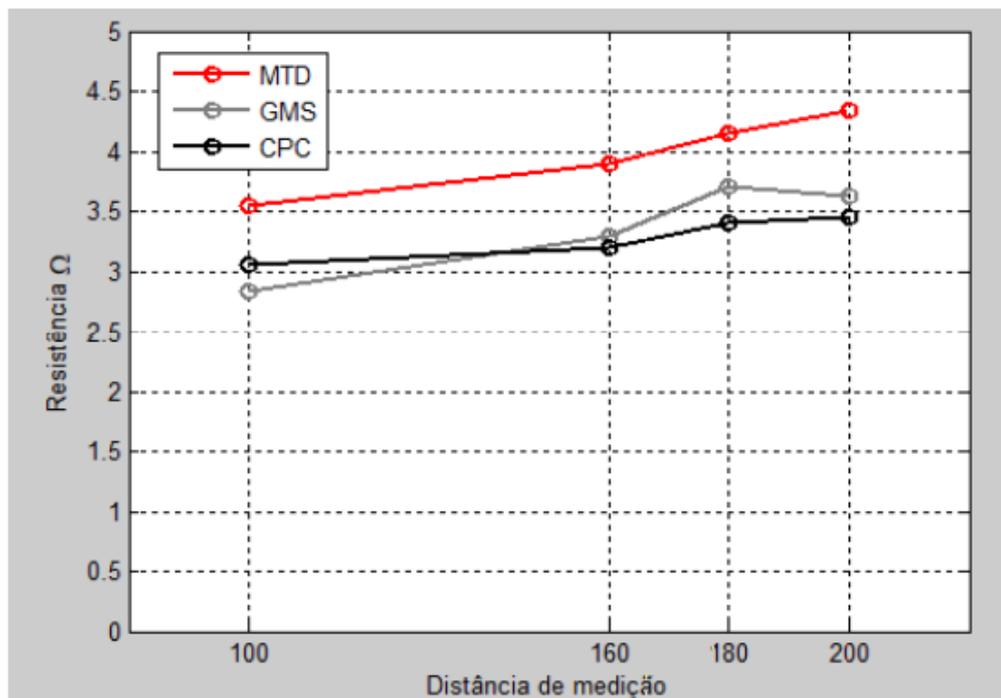
<b>Distância (m)</b>	<b>CPC-100</b>	<b>Protótipo)</b>	<b>Erro</b>	<b>MTD-20KWe</b>	<b>Erro</b>
100	3,05 $\Omega$	2,84 $\Omega$	-6,88%	3,55 $\Omega$	16,39%
160	3,20 $\Omega$	3,30 $\Omega$	3,12%	3,90 $\Omega$	21,87%
180	3,40 $\Omega$	3,70 $\Omega$	8,82%	4,15 $\Omega$	22,05%
200	3,45 $\Omega$	3,62 $\Omega$	4,92%	4,34 $\Omega$	25,79%

Fonte: próprio autor.

Analisando os dados da Tabela 9, observa-se que o equipamento MTD-20KWe apresentou erro de até 25,79%, em relação ao *benchmarking* CPC 100, para a distância de 200 m. Já o erro do protótipo não ultrapassou 8,82% para a distância de 180 m.

A Figura 61 mostra a preparação para realização das medições em campo na SE Ibura.

Figura 60 – Comparação dos resultados das medições na SE Ibura, relativo ao quarto teste.



Fonte: próprio autor.

Figura 61 – Preparação para realizar as medições na SE Ibura.

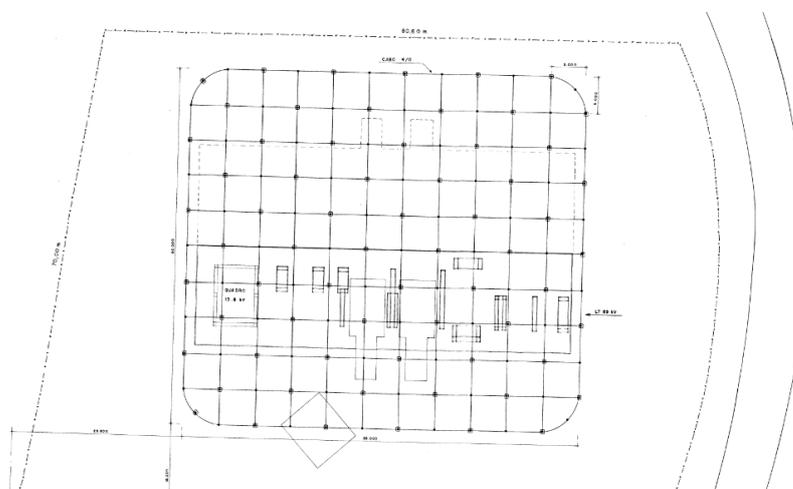


Fonte: próprio autor.

#### 4.5 Quinto teste: SE Bom Jardim

A subestação de Bom Jardim possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 62. Trata-se de uma malha de aterramento que foi implantada em 1977. O projeto contemplou, na época, 67 hastes do tipo *COOPERWELD* de 3 m p/ 3/4", enquanto que os cabos utilizados neste projeto são de cobre nu 4/0 AWG. Todas as conexões são do tipo *CADWELD* em "X" ou em "T". A diagonal máxima desta instalação mede em torno de 74 m. A resistividade do solo de Bom Jardim está em torno de  $10\Omega\cdot\text{m}$ .

Figura 62 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação de Bom Jardim.



Fonte: documentos CELPE.

O estado da malha de aterramento na SE energizada de Bom Jardim estava bastante deteriorado. Houve diversos problemas durante as medições como, por exemplo, o aparecimento de tensão entre dois pontos diferentes da própria malha (situação que já indica problemas na malha). Após algumas tentativas, a equipe encontrou um ponto adequado para fixação da conexão do sistema de medição com a malha de aterramento. A distância utilizada no teste media aproximadamente 300m. A Tabela 10 mostra os resultados obtidos considerando as médias obtidas para todas as frequências medidas em uma determinada distância. Os resultados obtidos com o MTD-20KWe ficaram bem distantes dos obtidos pelo CPC 100 enquanto os resultados obtidos pelo protótipo ficaram mais próximos.

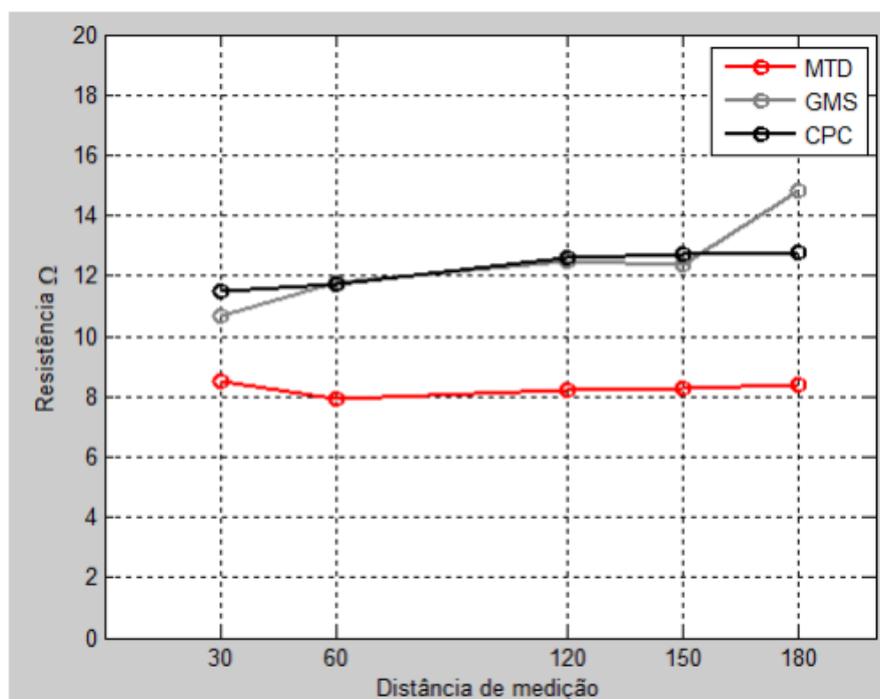
A Figura 63 compara os resultados graficamente. Um destaque deve ser dado para este caso, visto que os resultados do MTD-20KWe sugerem que este equipamento **não é indicado para medições em malhas de aterramento energizadas**. Observa-se que o resultado do MTD indicou a malha como "dentro do tolerável" quando utiliza-se valores de referência de resistência de malha até  $10\Omega$  como aceitável para operação. Neste caso, trata-se de um falso positivo, em que o erro chega até 66%. Vale observar também que as leituras do MTD oscilaram bastante durante as medições na SE Bom Jardim, assim como tinha ocorrido na SE Ibura.

Tabela 10 – Resultados obtidos no quinto teste (SE Bom Jardim) com erro % e utilizando como referência a CPC-100.

Distância (m)	CPC 100	Protótipo	Erro	MTD-20KWe	Erro
30	11,50Ω	10,69Ω	-7,04%	8,50Ω	-26,08%
60	11,70Ω	11,79Ω	0,76%	7,90Ω	-32,47%
120	12,60Ω	12,48Ω	-0,95%	8,20Ω	-34,92%
150	12,70Ω	12,35Ω	-2,75%	8,30Ω	-34,64%
180	12,75Ω	14,85Ω	16,47%	8,42Ω	-33,96%

Fonte: próprio autor.

Figura 63 – Comparação dos resultados das medições na SE Bom Jardim durante o quinto teste.



Fonte: próprio autor.

Os resultados detalhados por frequência, obtidos com o protótipo são mostrados na Tabela 11.

É possível observar que embora a média dos valores tenha ficado próxima aos resultados obtidos pela CPC100, algumas frequências obtiveram resultados mais próximos da referência que outras. Para entender melhor o resultado das medições, foi preciso analisar algumas formas de onda obtidas durante os testes. As Figuras 64 e 65 mostram tensões residuais (remanescentes)

Tabela 11 – Resultados do quinto teste na SE Bom Jardim detalhados por frequência - protótipo.

<b>Distância (m)</b>	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>30</b>	8,56Ω	11,82Ω	12,53Ω	11,65Ω	11,04Ω	8,54Ω
<b>60</b>	8,82Ω	12,03Ω	12,02Ω	14,33Ω	11,86Ω	11,65Ω
<b>120</b>	9,73Ω	13,79Ω	11,57Ω	15,58Ω	13,12Ω	11,07Ω
<b>150</b>	10,67Ω	13,25Ω	10,46Ω	15,82Ω	12,40Ω	11,47Ω
<b>180</b>	11,48Ω	18,96Ω	20,38Ω	13,76Ω	11,17Ω	13,33Ω

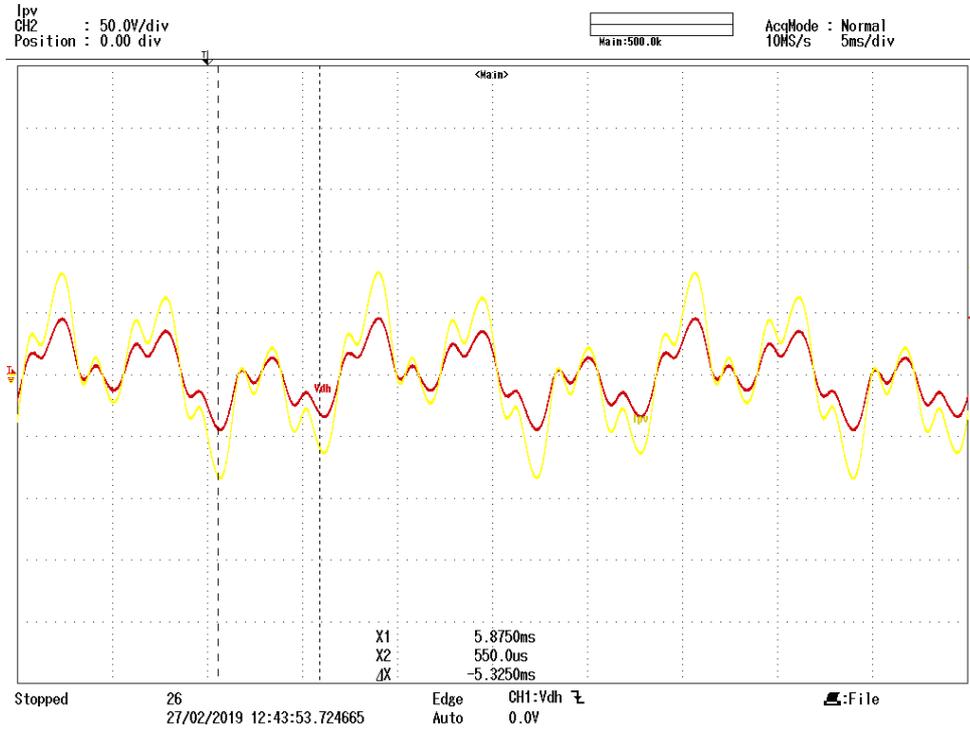
Fonte: próprio autor.

existentes nos circuitos de tensão e corrente sem nenhuma injeção de corrente por parte do equipamento, obtidas com o oscilógrafo Yokogawa DL850, e o conteúdo harmônico de tensão presente no circuito de tensão. É possível observar que o pico da tensão no circuito de corrente tem aproximadamente 85V, enquanto o conteúdo harmônico no circuito de tensão tem componentes preponderantes nas frequências de 60Hz, 180Hz (terceiro harmônico) e 540Hz (nono harmônico). Tais componentes harmônicas já existentes na malha não só se sobrepõem à componente de tensão que surge da injeção de corrente feita pelo equipamento, como também se sobressaem (são superiores), como será visto mais à frente.

Usando o osciloscópio foram obtidas as formas de onda mostrada na Figura 66 **para a fonte CPC 100**. A corrente injetada está bastante distorcida. Quanto mais degradada está a malha, maior a tensão que aparece entre as hastes, onde predominam as componentes de 60Hz e suas múltiplas. Essa tensão é vista pelo sistema de controle da fonte de injeção de corrente como uma perturbação. Portanto, quanto maior a amplitude da perturbação, maior a distorção da corrente injetada na malha no momento da medição.

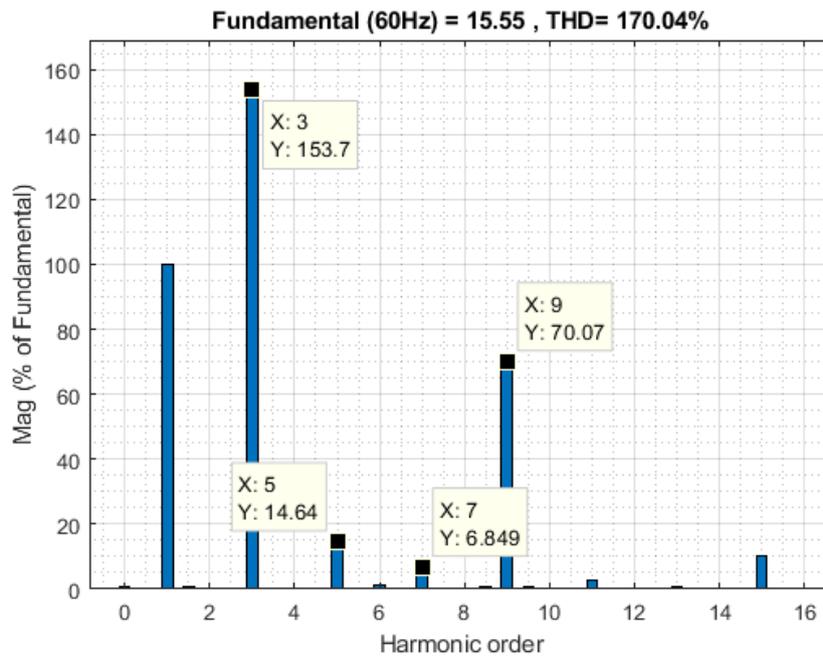
Já as formas de ondas obtidas pelo protótipo durante a realização do teste são mostradas na Figura 67. Da mesma forma que ocorreu com o CPC 100, as formas de onda ficaram distorcidas. A Figura 68 mostra o espectro harmônico da tensão residual que aparece na haste de tensão imediatamente antes da injeção de corrente pelo protótipo. A Figura 69 mostra o espectro da tensão na haste de tensão no momento da realização do teste com o protótipo para uma injeção de corrente na frequência de 100Hz. Note que a amplitude do sinal da tensão que se quer medir em 100Hz é menos de 20% da amplitude da tensão em 60Hz que está presente na malha. Isso sem considerar as outras componentes harmônicas existentes que possuem amplitudes até superiores à componente de 60 Hz. Para se obter a amplitude correta da tensão e da corrente em 100Hz é preciso ter uma medição bastante precisa e um bom algoritmo de tratamento de dados. Mesmo com esses problemas, a média dos resultados foi bastante satisfatória.

Figura 64 – Tensões residuais (remanescente) nas hastes sem nenhuma injeção de corrente referente à Bom Jardim: tensão na haste de tensão (em vermelho, 50V/div); tensão na haste de corrente (em amarelo, 50v/div).



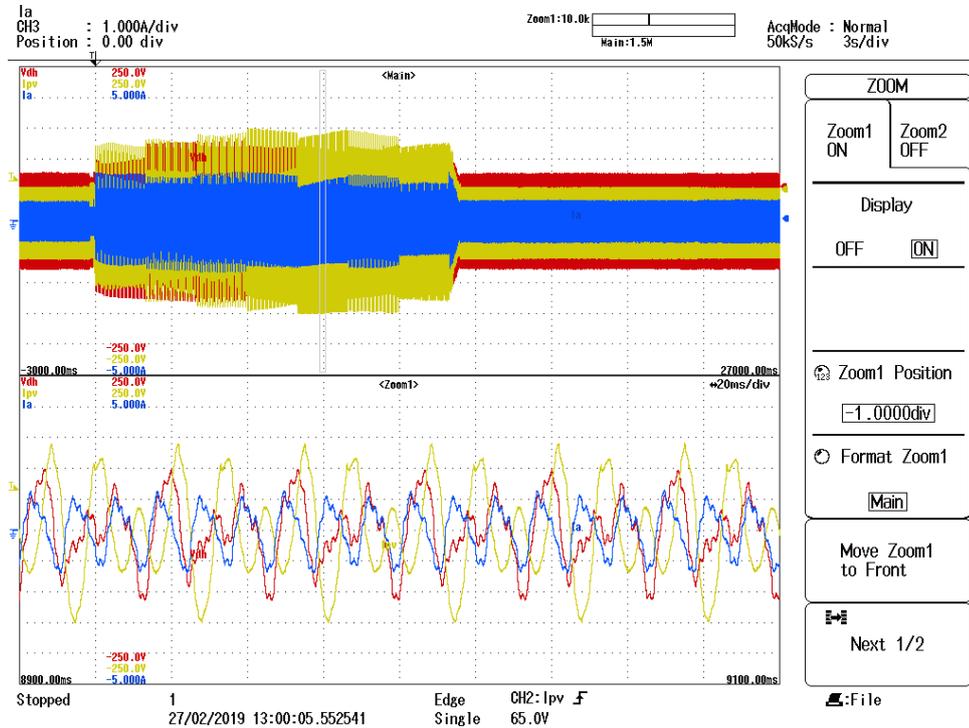
Fonte: próprio autor.

Figura 65 – Espectro harmônico da tensão residual (remanescente) na haste de medição de tensão sem nenhuma injeção de corrente referente à SE Bom Jardim.



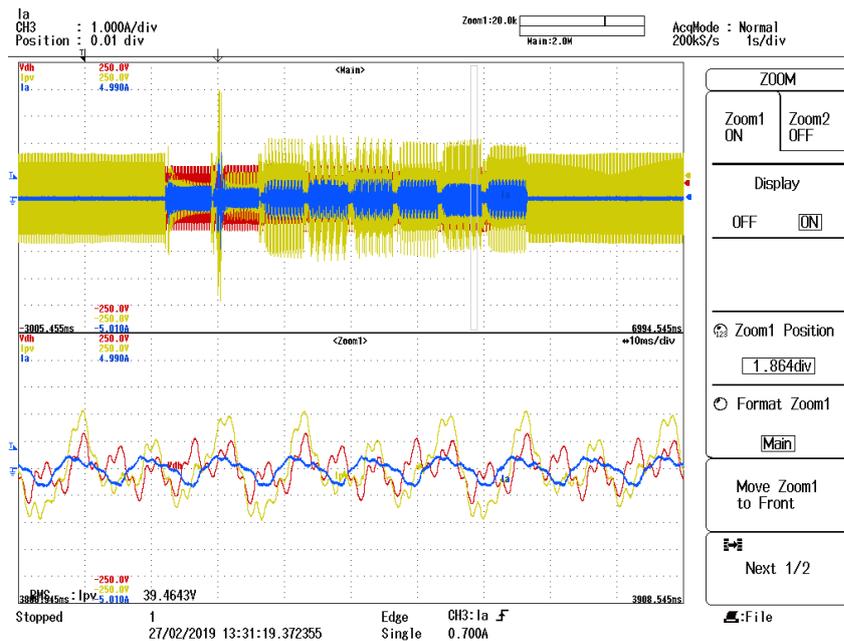
Fonte: próprio autor.

Figura 66 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo no equipamento CPC 100 para uma medição realizada na SE Bom Jardim. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (amarelo, 50V/div); Tensão na haste de medição de tensão (vermelho, 50V/div); Corrente injetada na malha (azul, 1A/div); Traço 2: Zoom do traço 1.



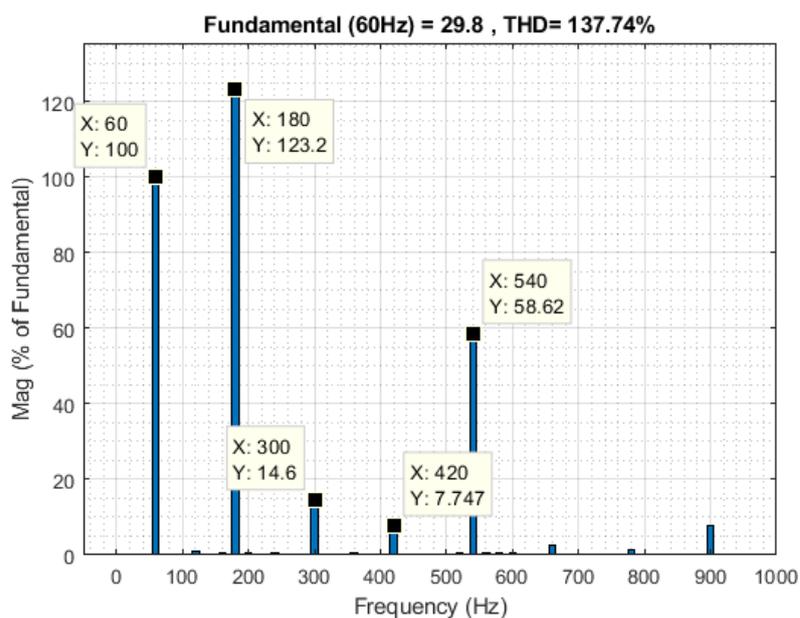
Fonte: próprio autor.

Figura 67 – Formas de onda obtidas pelo osciloscópio usando o protótipo para uma medição na SE Bom Jardim. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (amarelo, 50V/div); Tensão na haste de medição de tensão (vermelho, 50V/div); Corrente injetada na malha (azul, 1A/div); Traço 2: Zoom do traço 1.



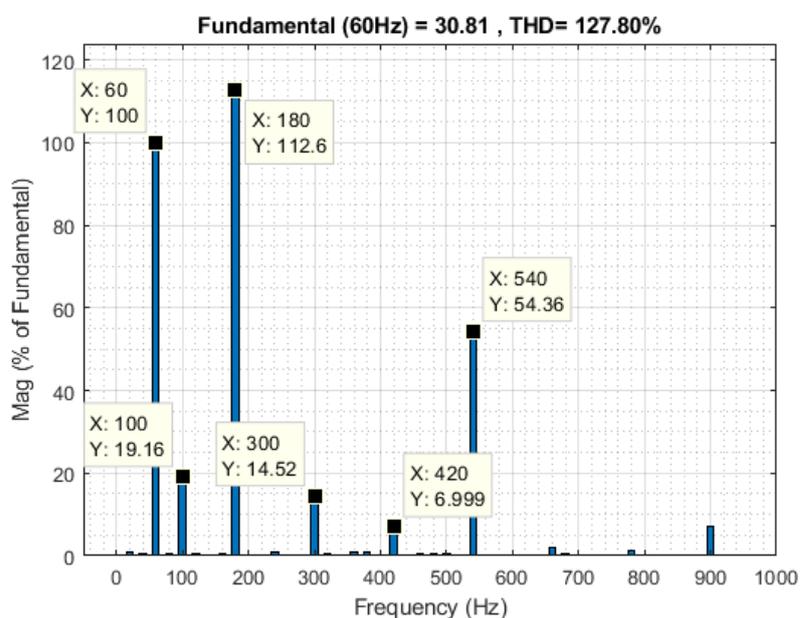
Fonte: próprio autor.

Figura 68 – Espectro da tensão residual na haste de tensão antes de injetar corrente nos testes na SE Bom Jardim.



Fonte: próprio autor.

Figura 69 – Espectro da tensão na haste de tensão durante a injeção de corrente em 100Hz durante os testes na SE Bom Jardim.



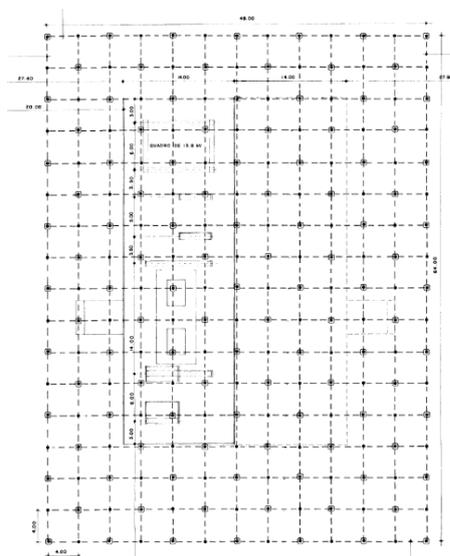
Fonte: próprio autor.

#### 4.6 Sexto teste: SE Cruz de Rebouças

O sexto teste foi realizado na SE Cruz de Rebouças, que possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 70. Trata-se de uma malha de aterramento que foi implantada em 1975. O projeto contemplou, na época, 127 hastes do tipo *COOPERWELD* de 3

m p/ 3/4", enquanto que os cabos utilizados neste projeto são de cobre nu 2/0 AWG. Todas as conexões são do tipo *CADWELD* em "X" ou em "T". A diagonal máxima desta instalação mede em torno de 80 m. A resistividade do solo de Cruz de Rebouças está em torno de  $2\Omega\cdot\text{m}$ .

Figura 70 – Projeto Eletromecânico da malha de aterramento da subestação de Cruz de Rebouças.



Fonte: documentos CELPE.

Além das medições obtidas pelo CPC 100 e pelo protótipo, foram salvas todas as formas de onda geradas pelo protótipo com o objetivo de se estudar melhor os resultados. Devido aos resultados inadequados apresentados pelo equipamento MTD-20KWe da Megabrás, como valores oscilatórios e até negativos, a equipe resolveu não realizar mais testes com este equipamento. Os resultados gerais em termos das resistências obtidas pelo CPC 100 e o protótipo, nos diversos valores de frequência, podem ser vistos nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Resultados dos testes realizados na SE Cruz de Rebouças detalhados por frequência - protótipo.

	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>20m</b>	1,23 $\Omega$	7,53 $\Omega$	8,96 $\Omega$	2,88 $\Omega$	1,01 $\Omega$	1,19 $\Omega$
<b>40m</b>	3,24 $\Omega$	9,06 $\Omega$	10,9 $\Omega$	2,55 $\Omega$	1,18 $\Omega$	2,16 $\Omega$
<b>60m</b>	3,77 $\Omega$	0,32 $\Omega$	0,47 $\Omega$	0,17 $\Omega$	2,41 $\Omega$	2,88 $\Omega$
<b>80m</b>	4,11 $\Omega$	10,3 $\Omega$	13 $\Omega$	1,67 $\Omega$	1,43 $\Omega$	2,47 $\Omega$
<b>100m</b>	5,2 $\Omega$	2,56 $\Omega$	3,16 $\Omega$	-,3 $\Omega$	3,19 $\Omega$	3,58 $\Omega$
<b>120m</b>	4,42 $\Omega$	10,1 $\Omega$	11,6 $\Omega$	3,98 $\Omega$	1,94 $\Omega$	2,59 $\Omega$

Fonte: próprio autor.

Tabela 13 – Resultados dos testes realizados na SE Cruz de Rebouças detalhados por frequência - CPC 100.

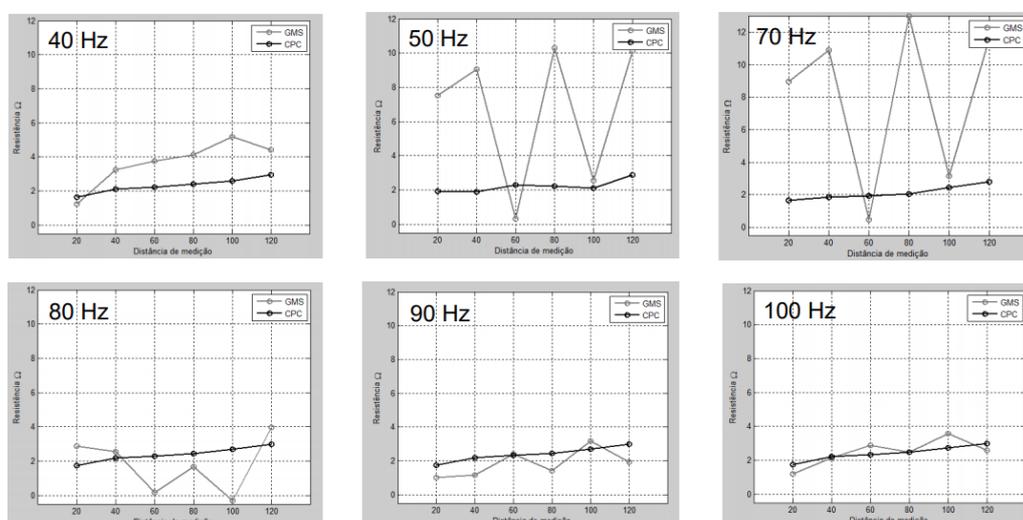
	40Hz	50Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz
20m	1,62Ω	1,93Ω	1,67Ω	1,76Ω	1,74Ω	1,75Ω
40m	2,13Ω	1,89Ω	1,83Ω	2,19Ω	2,20Ω	2,21Ω
60m	2,21Ω	2,28Ω	1,93Ω	2,31Ω	2,34Ω	2,33Ω
80m	2,41Ω	2,22Ω	2,05Ω	2,46Ω	2,44Ω	2,49Ω
100m	2,60Ω	2,13Ω	2,43Ω	2,71Ω	2,71Ω	2,73Ω
120m	2,96Ω	2,88Ω	2,78Ω	3,00Ω	2,99Ω	3,00Ω

Fonte: próprio autor.

Observando as tabelas 12 e 13, é possível verificar que os resultados obtidos pelo protótipo para uma mesma distância oscilaram bastante nas diferentes frequências de teste, enquanto os resultados obtidos pelo CPC 100 ficaram mais estáveis, conforme mostrado nos gráficos mostrados na Figura 71.

Portanto, para entender melhor a diferença entre os dois equipamentos, foi preciso, novamente, analisar algumas formas de onda obtidas durante os testes. A Figura 72 mostra as tensões injetadas e medida além da corrente na haste de injeção usando o CPC 100. Mais uma vez a tensão residual presente entre as hastes distorceu a corrente injetada. Resultado similar foi obtido pelo protótipo na Figura 73.

Figura 71 – Comparação dos resultados das medições na SE Cruz de Rebouças.



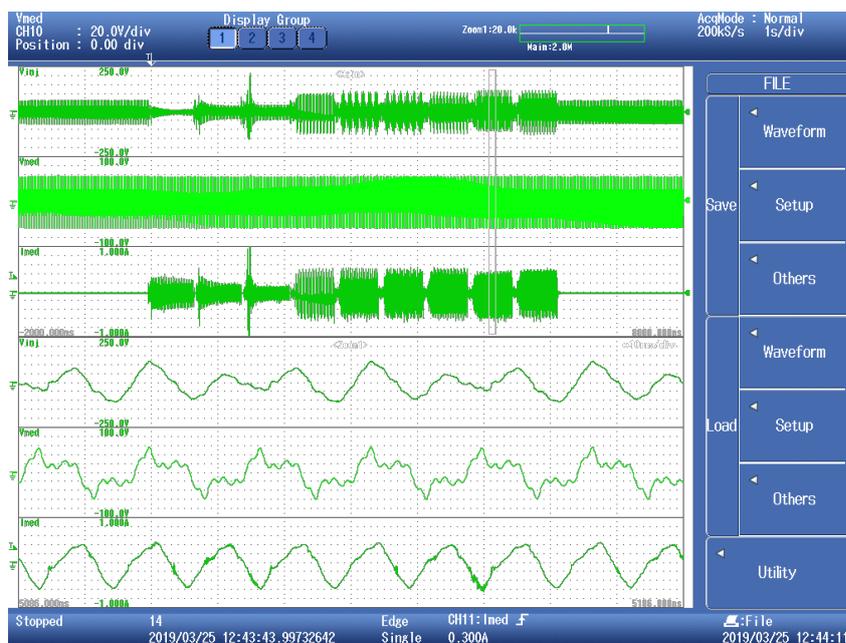
Fonte: próprio autor.

Figura 72 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o CPC 100 na distância de 20 metros para a SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (50V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (50V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (1A/div); Traço 4: Zoom temporal dos traços 1, 2 e 3.



Fonte: próprio autor.

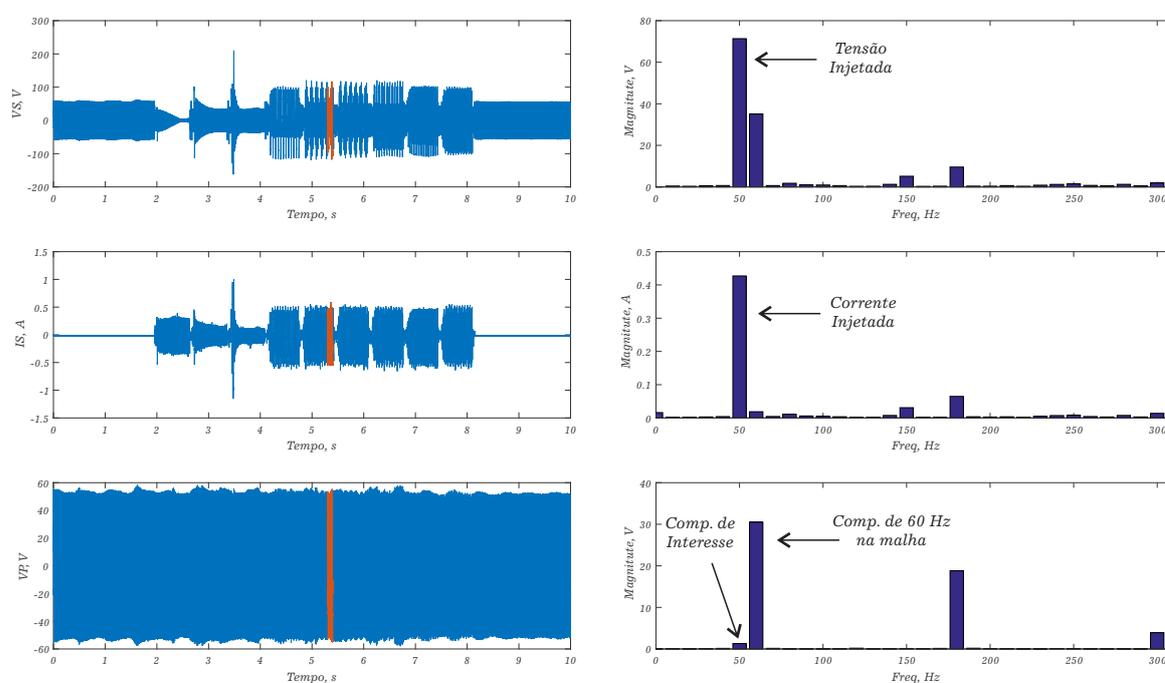
Figura 73 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o protótipo na distância de 20 metros para a SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (20V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (20V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (0,2A/div); Traço 4: Zoom temporal dos traços 1, 2 e 3.



Fonte: próprio autor.

As formas de onda medidas pelo osciloscópio na operação do protótipo foram levadas para análise no MATLAB. As Figuras 74 e 75 mostram os espectros harmônicos da tensão e corrente na haste de injeção de corrente, além do espectro harmônico da tensão medida na haste de medição de tensão para as frequências de 50Hz e 100Hz, respectivamente. Mais uma vez, é possível observar que a componente de interesse na Figura 74 (teste em 50Hz) tem amplitude bem inferior à componente vizinha de 60Hz (tensão residual da malha). O mesmo acontece para a componente de interesse em 100 Hz, vista na Figura 75. Tais resultados evidenciam a dificuldade de isolar a componente de interesse para ser amplificada, devido à presença de componentes muito próximas no espectro de frequência com amplitudes de ordem de grandeza superiores.

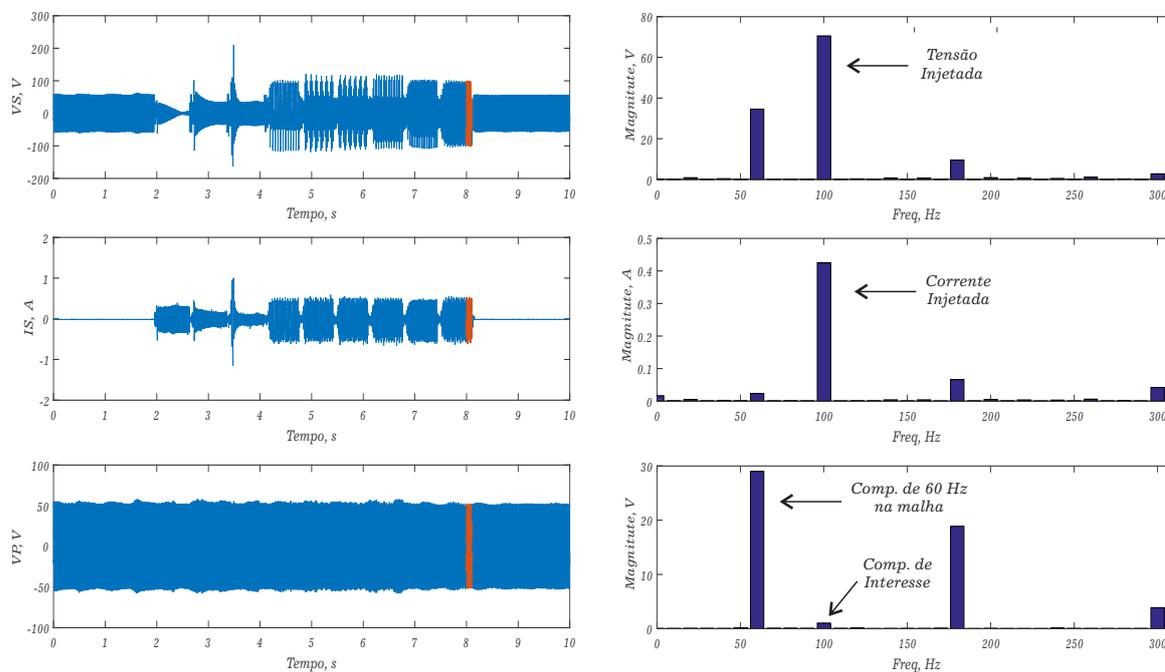
Figura 74 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o protótipo na frequência de 50Hz para uma distância de 20 metros na SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente e seu espectro harmônico; Traço 2: corrente na haste de injeção e seu espectro harmônico; Traço 3: Tensão medida na haste de injeção e seu espectro harmônico.



Fonte: próprio autor.

As Tabelas 14 e 15 foram elaboradas seguindo o mesmo procedimento adotado para se obter os resultados das Figuras 74 e 75, ou seja, partindo dos resultados adquiridos no oscilógrafo na operação do equipamento CPC 100 e do protótipo, foram extraídos os resultados das medições para cada componente de frequência de interesse (40, 50, 70, 80, 90 e 100Hz) usando o espectro harmônico (ferramenta *FFT - Fast Fourier Transform*) para se obter as amplitudes dos sinais de forma mais precisa que o próprio sistema de medição e condicionamento do protótipo. Desta forma, é possível observar que os resultados ficam bem mais próximos ao comparar um equipamento com o outro (Tabelas 14 e 15). Portanto, temos um indicativo que o sistema de medição e filtragem desenvolvido no protótipo não é seletivo suficiente para separar

Figura 75 – Formas de onda obtidas pelo oscilógrafo usando o protótipo na frequência de 100Hz para uma distância de 20 metros na SE Cruz de Rebouças. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente e seu espectro harmônico; Traço 2: corrente na haste de injeção e seu espectro harmônico; Traço 3: Tensão medida na haste de injeção e seu espectro harmônico.



Fonte: próprio autor.

as componentes de interesse das componentes de amplitudes elevadas em frequências bem próximas. Posteriormente será mostrada a solução adotada para resolver este problema.

Tabela 14 – Resultados do equipamento CPC 100 detalhados por frequência na SE Cruz de Rebouças adquiridos por um oscilógrafo e filtrados pela aplicação da FFT no MATLAB.

	40Hz	50Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz
20m	1,62Ω	1,93Ω	1,67Ω	1,76Ω	1,74Ω	1,75Ω
40m	2,13Ω	1,89Ω	1,83Ω	2,19Ω	2,20Ω	2,21Ω
60m	2,21Ω	2,28Ω	1,93Ω	2,31Ω	2,34Ω	2,33Ω
80m	2,41Ω	2,22Ω	2,05Ω	2,46Ω	2,44Ω	2,49Ω
100m	2,60Ω	2,13Ω	2,43Ω	2,71Ω	2,71Ω	2,73Ω
120m	2,96Ω	2,88Ω	2,78Ω	3,00Ω	2,99Ω	3,00Ω

Fonte: próprio autor.

Tabela 15 – Resultados do protótipo detalhados por frequência na SE Cruz de Rebouças adquiridos por um oscilógrafo e filtrados pela aplicação da FFT no MATLAB.

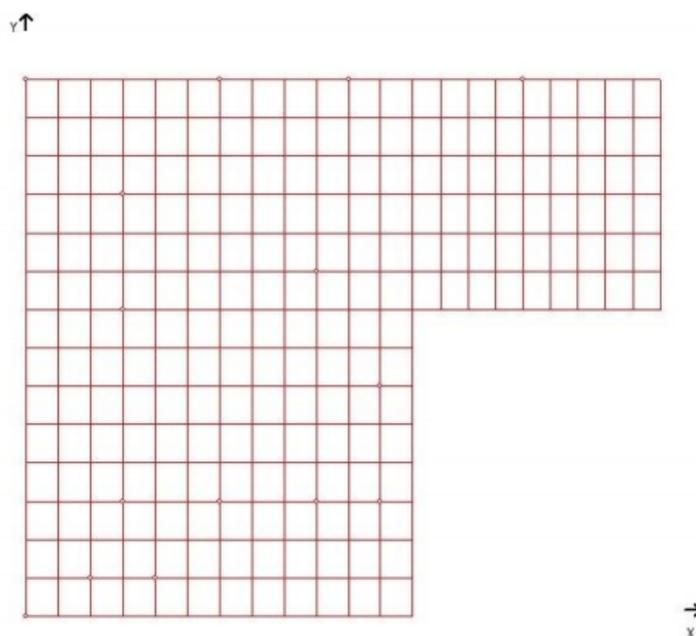
	40Hz	50Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz
20m	2,37 $\Omega$	2,57 $\Omega$	1,95 $\Omega$	2,33 $\Omega$	2,05 $\Omega$	2,41 $\Omega$
40m	1,74 $\Omega$	1,90 $\Omega$	1,92 $\Omega$	1,81 $\Omega$	1,77 $\Omega$	1,69 $\Omega$
60m	2,19 $\Omega$	3,05 $\Omega$	2,42 $\Omega$	2,37 $\Omega$	2,46 $\Omega$	2,42 $\Omega$
80m	2,35 $\Omega$	2,59 $\Omega$	2,58 $\Omega$	2,48 $\Omega$	2,61 $\Omega$	2,36 $\Omega$
100m	2,66 $\Omega$	3,14 $\Omega$	2,85 $\Omega$	2,80 $\Omega$	2,72 $\Omega$	2,84 $\Omega$
120m	2,85 $\Omega$	3,43 $\Omega$	2,92 $\Omega$	3,23 $\Omega$	3,01 $\Omega$	3,10 $\Omega$

Fonte: próprio autor.

#### 4.7 Sétimo teste: SE Paratibe

O sétimo teste do protótipo foi realizado na SE Paratibe, que possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 76. Esta malha possui 23 hastes de aço cobreado 2,4m x 5/8 e 2154m de cabo de cobre 95mm. A diagonal máxima desta instalação mede em torno de 75 m. A resistividade do solo de Paratibe está em torno de 54 $\Omega$ -m.

Figura 76 – Representação das dimensões da malha de aterramento da subestação de Paratibe.



Fonte: documentos CELPE.

A Figura 77 mostra a preparação dos equipamentos para realizar as medições em Paratibe.

Figura 77 – Preparação para a realização das medições na SE Paratibe.



Fonte: próprio autor.

Os resultados encontrados que foram medidos através da IHM do protótipo e do CPC 100 são mostrados nas Tabelas 16 e 17. De forma similar aos testes na SE Cruz de Rebouças, os resultados obtidos em uma mesma distância oscilaram bastante para as diferentes frequências escolhidas. Em alguns casos, foram obtidos valores negativos para as resistências.

Tabela 16 – Resultados detalhados por frequência obtidos na SE Paratibe - dados CPC 100.

	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>30m</b>	0,86Ω	0,85Ω	0,81Ω	0,85Ω	0,85Ω	0,85Ω
<b>80m</b>	1,02Ω	0,95Ω	0,88Ω	1,00Ω	1,01Ω	1,00Ω
<b>130m</b>	1,11Ω	0,88Ω	0,97Ω	1,10Ω	1,10Ω	1,10Ω
<b>180m</b>	1,18Ω	1,15Ω	1,16Ω	1,14Ω	1,14Ω	1,14Ω

Fonte: próprio autor.

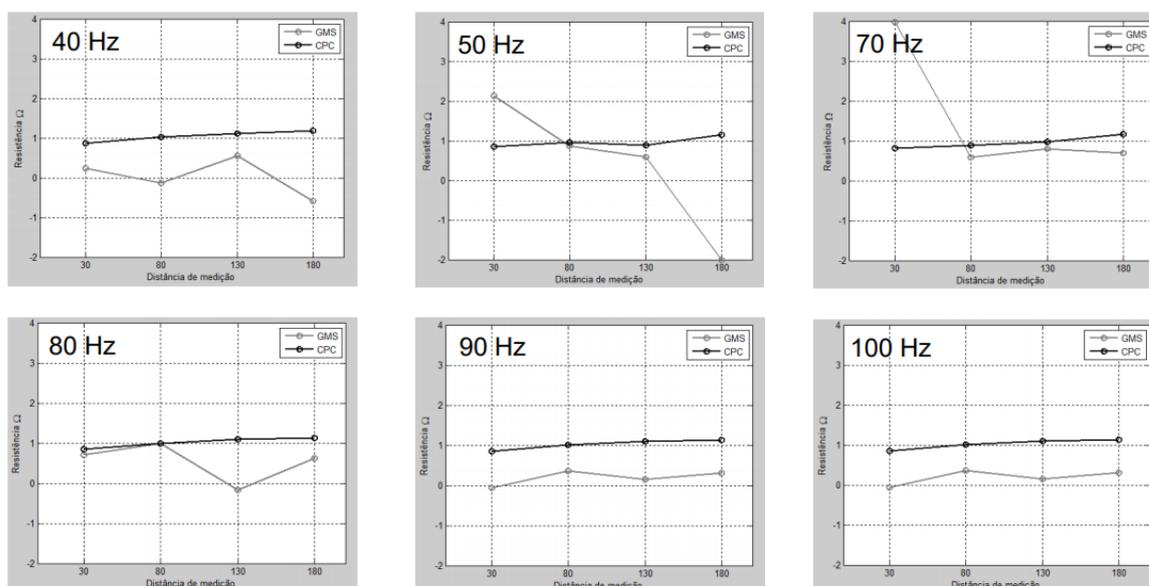
Da mesma forma que aconteceu na SE Cruz de Rebouças, os resultados obtidos na SE Paratibe, com o protótipo, oscilaram bastante nas diferentes frequências de teste, enquanto os resultados obtidos com o equipamento CPC 100 ficaram mais estáveis, conforme mostrado nos gráficos da Figura 78. Note que os resultados para as frequências de 50 Hz e 70 Hz (mais próximas de 60 Hz) são as que geram mais oscilações.

Tabela 17 – Resultados detalhados por frequência obtidos na SE Paratibe - dados protótipo.

	40Hz	50Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz
30m	0,23Ω	2,14Ω	3,98Ω	0,71Ω	-0,07Ω	0,21Ω
80m	-0,13Ω	0,87Ω	0,59Ω	0,99Ω	0,36Ω	0,05Ω
130m	0,56Ω	0,59Ω	0,79Ω	-0,17Ω	0,15Ω	0,47Ω
180m	-0,59Ω	-2,0Ω	0,69Ω	0,62Ω	0,30Ω	0,00Ω

Fonte: próprio autor.

Figura 78 – Comparação dos resultados das medições na SE Paratibe.



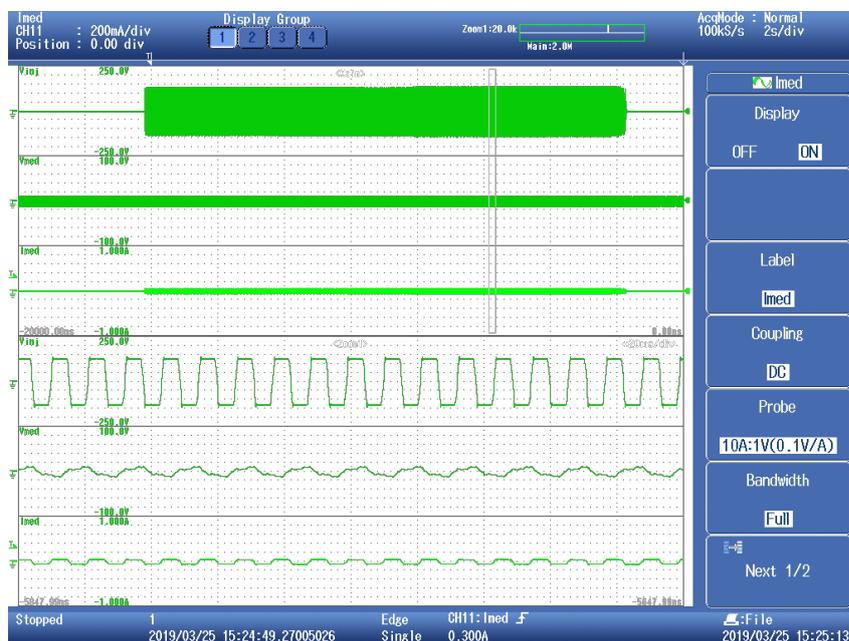
Fonte: próprio autor.

A Figura 79 mostra a tensão injetada e a medida, além da corrente na haste de injeção nas medições utilizando o CPC 100. Mais uma vez a tensão residual presente entre as hastes distorceu a corrente injetada. Resultado similar foi obtido no protótipo nas Figuras 80 e 81.

Os dados adquiridos através do oscilógrafo nos testes usando o protótipo foram levados para análise no MATLAB. A Figura 82 mostra os espectros harmônicos da tensão e corrente injetadas na haste de injeção além do espectro harmônico da tensão na haste de medição de tensão para a frequência de 100Hz. É possível observar que a componente de interesse na Figura 82 (teste em 100Hz) tem amplitude bem inferior a componente vizinha de 60Hz (tensão residual da malha). Em outras palavras, o problema é idêntico ao caso da SE Cruz de Rebouças.

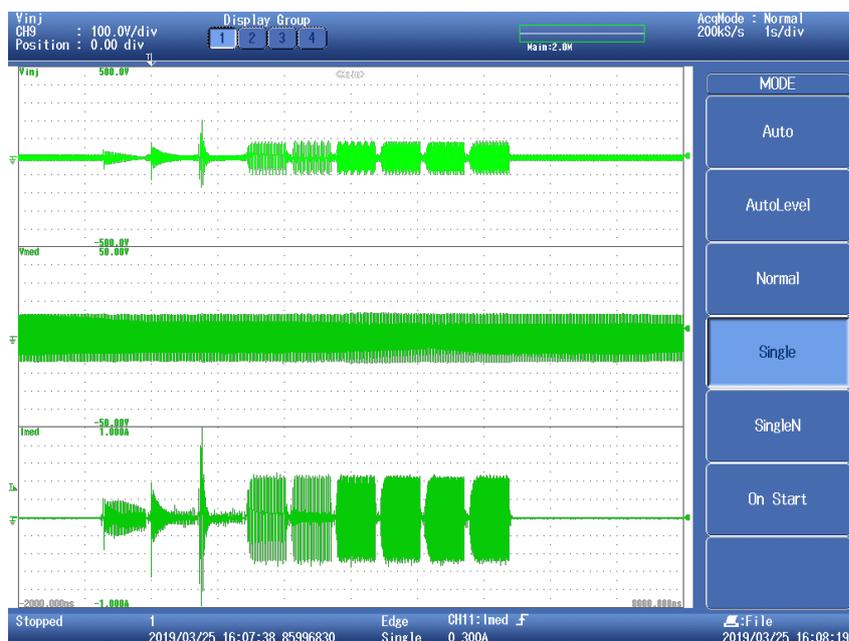
A Tabela 18 foi montada seguindo o mesmo procedimento adotado para se obter os

Figura 79 – Formas de onda obtidas nos oscilógrafo usando o CPC 100 na distância de 30 metros na SE Paratibe. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (50V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (50V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (200mA/div); Traço 4,5,6: Zoom temporal dos traços 1,2 e 3.



Fonte: próprio autor.

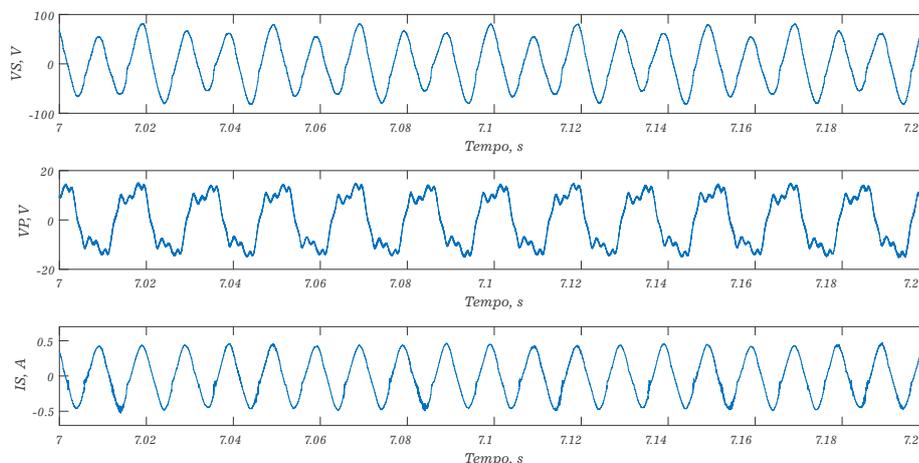
Figura 80 – Formas de onda obtidas nos oscilógrafo usando o protótipo na distância de 30 metros na SE Paratibe. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente (100V/div); Traço 2: Tensão na haste de medição de tensão (100V/div); Traço 3: Corrente injetada na malha (0,2A/div).



Fonte: próprio autor.

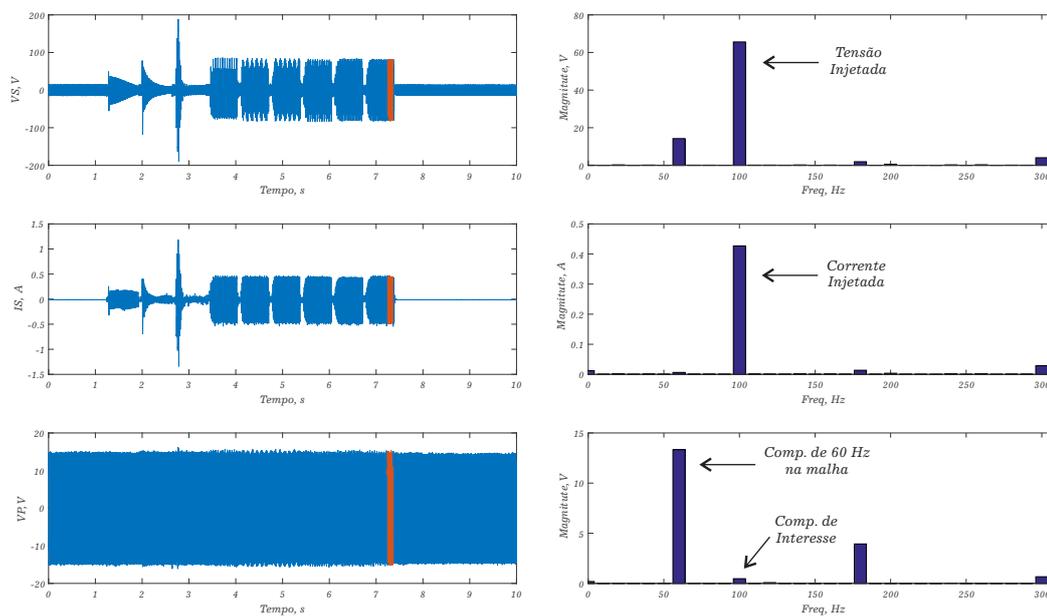
resultados da Figura 82, ou seja, a partir dos dados adquiridos no oscilógrafo (usando o protótipo) foram extraídos os resultados das medições para cada componente de frequência de interesse

Figura 81 – Traço 1,2,3: Zoom temporal dos traços da Fig. 80.



Fonte: próprio autor.

Figura 82 – Formas de onda obtidas nos oscilógrafo para a operação do protótipo na frequência de 100Hz na SE Paratibe. Traço 1: Tensão na haste de injeção de corrente e seu espectro harmônico; Traço 2: Corrente na haste de injeção e seu espectro harmônico; Traço 3: Tensão medida na haste de injeção e seu espectro harmônico.



Fonte: próprio autor.

(40, 50, 70, 80, 90 e 100Hz) usando a ferramenta FFT do MATLAB para se obter as amplitudes dos sinais de forma mais precisa. Mais uma vez, foi possível observar que os resultados obtidos ficaram mais próximos aos do equipamento CPC 100, visto na Tabela 16.

Tabela 18 – Resultados do protótipo detalhados por frequência na SE Paratibe adquiridos por um oscilógrafo e filtrados pela aplicação da FFT no MATLAB.

	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>30m</b>	0,91Ω	91Ω	0,87Ω	0,82Ω	0,88Ω	0,85Ω
<b>80m</b>	1,03Ω	0,95Ω	0,97Ω	1,01Ω	1,09Ω	1,07Ω
<b>130m</b>	1,14Ω	1,14Ω	1,11Ω	1,13Ω	1,12Ω	1,09Ω
<b>180m</b>	1,21Ω	1,37Ω	1,23Ω	1,27Ω	1,19Ω	1,18Ω

Fonte: próprio autor.

#### 4.8 Oitavo teste: repetição dos testes na SE Paratibe após calibração do protótipo

A equipe retornou a SE Paratibe, como visto na Figura 83, para realização de novos testes. Como os resultados obtidos através da IHM do protótipo diferiram do CPC 100, foram implementadas novas ferramentas de filtragem no protótipo. Os resultados obtidos pelo equipamento CPC 100, pelo protótipo após a alteração na sua filtragem e pelas medições feitas com o oscilógrafo e uso da FFT no MATLAB estão compilados nas Tabelas 19, 20, 21 e 22, respectivamente. É possível notar que todos os resultados obtidos pelo protótipo diferem dos resultados obtidos pelo oscilógrafo + MATLAB (Tabela 21) por um fator fixo de 1,5 (variando apenas na segunda casa decimal em todas as medições). Esta característica foi identificada durante a análise dos dados em Matlab e subsidiaram a decisão de projetar e implementar um filtro capaz de mitigar diferenças das medições em relação a CPC 100. Com isto, o filtro projetado Os resultados finais obtidos pelo protótipo pós calibração são mostrados na Tabela 22.

Tabela 19 – Resultados obtidos na SE Paratibe - valores medidos com CPC 100.

	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>30m</b>	0,87Ω	0,74Ω	0,38Ω	0,85Ω	0,86Ω	0,85Ω
<b>80m</b>	0,99Ω	1,01Ω	0,43Ω	0,95Ω	0,96Ω	0,95Ω
<b>120m</b>	1,00Ω	0,89Ω	0,99Ω	1,03Ω	1,03Ω	1,05Ω
<b>150m</b>	1,19Ω	1,05Ω	1,09Ω	1,16Ω	1,19Ω	1,14Ω
<b>180m</b>	2,01Ω	1,59Ω	1,45Ω	2,01Ω	2,00Ω	2,02Ω

Fonte: próprio autor.

Os gráficos na Figura 84 mostram os resultados comparativos após realização

Figura 83 – Medições na SE Paratibe após calibração.



Fonte: próprio autor.

Tabela 20 – Resultados obtidos na SE Paratibe - valores medidos com protótipo com nova filtragem.

	40Hz	50Hz	70Hz	80Hz	90Hz	100Hz
30m	0,63Ω	0,62Ω	0,62Ω	0,61Ω	0,62Ω	0,61Ω
80m	0,69Ω	0,69Ω	0,73Ω	0,68Ω	0,68Ω	0,67Ω
120m	0,75Ω	0,76Ω	0,76Ω	0,74Ω	0,73Ω	0,74Ω
150m	0,81Ω	0,81Ω	0,87Ω	0,82Ω	0,80Ω	0,81Ω
180m	1,36Ω	1,38Ω	1,37Ω	1,33Ω	1,33Ω	1,33Ω

Fonte: próprio autor.

da calibração. Observa-se que os valores do protótipo e do equipamento definido como *benchmarking* estão bem próximos. Apenas os valores para 50Hz e 70Hz continuam com pontos diferentes, mas esta diferença reduziu significativamente quando comparada com as medições iniciais e antes de implementação do filtro.

#### 4.9 Medições comparativas de equipamentos que utilizam o método de queda de potencial em baixas e altas frequências em subestações energizadas.

Esta seção irá mostrar algumas medições comparativas entre os métodos de queda de potencial com frequência variável, de forma a deixar evidente as diferenças entre as medições realizadas em frequências baixas (próximas de 60 Hz) e elevadas (na faixa de dezenas de kHz).

Tabela 21 – Resultados obtidos na SE Paratibe - Aplicação da FFT nos dados de osciloscópio - valores medidos pelo osciloscópio.

	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>30m</b>	0,97Ω	0,97Ω	0,98Ω	0,95Ω	0,94Ω	0,92Ω
<b>80m</b>	1,10Ω	1,04Ω	1,17Ω	1,06Ω	1,03Ω	1,04Ω
<b>120m</b>	1,11Ω	1,19Ω	1,19Ω	1,17Ω	1,10Ω	1,11Ω
<b>150m</b>	1,23Ω	1,13Ω	1,32Ω	1,24Ω	1,24Ω	1,26Ω
<b>180m</b>	2,16Ω	2,10Ω	2,10Ω	2,10Ω	2,13Ω	2,17Ω

Fonte: próprio autor.

Tabela 22 – Resultados finais obtidos na SE Paratibe após calibração - valores medidos pelo protótipo.

	<b>40Hz</b>	<b>50Hz</b>	<b>70Hz</b>	<b>80Hz</b>	<b>90Hz</b>	<b>100Hz</b>
<b>30m</b>	0,94Ω	0,93Ω	0,93Ω	0,91Ω	0,93Ω	0,91Ω
<b>80m</b>	1,03Ω	1,03Ω	1,09Ω	1,02Ω	1,02Ω	1,00Ω
<b>120m</b>	1,12Ω	1,14Ω	1,14Ω	1,11Ω	1,09Ω	1,11Ω
<b>150m</b>	1,21Ω	1,21Ω	1,30Ω	1,23Ω	1,20Ω	1,21Ω
<b>180m</b>	2,04Ω	2,07Ω	2,05Ω	1,99Ω	1,99Ω	1,99Ω

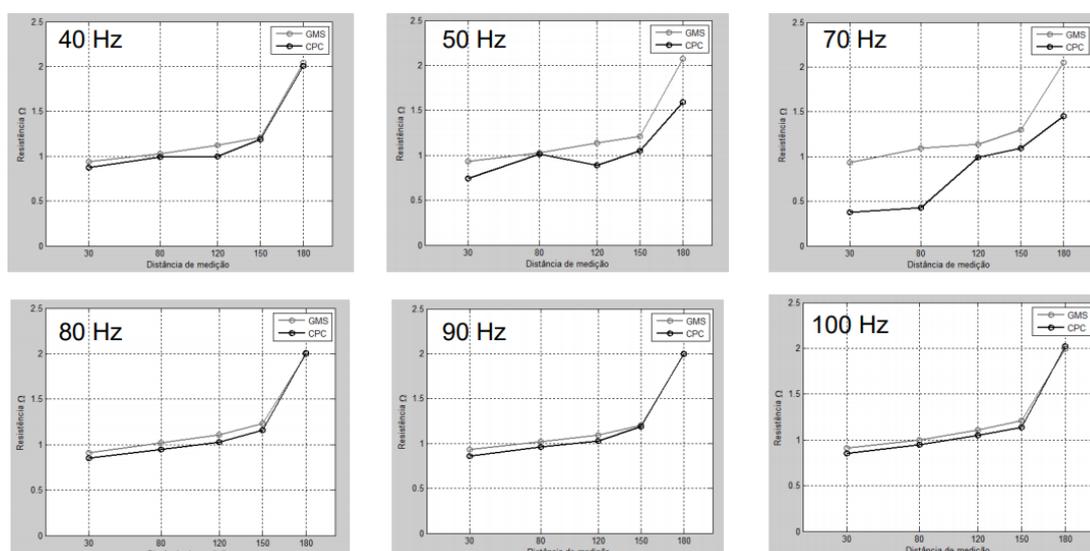
Fonte: próprio autor.

As medições foram realizadas em duas subestações de uma determinada distribuidora de energia elétrica brasileira. Também será mostrado exemplos de outras medições de malhas de aterramentos utilizando o terrômetro de alta frequência.

A primeira subestação, denominada SE TAR, possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 85. Esta malha possui 22 hastes de aço cobreado 2400mm x 16mm, 370 m de cabo de cobre nú de secção 70mm<sup>2</sup> mais 130 m de cabo de cobre nú de secção 50mm<sup>2</sup>. A diagonal máxima desta instalação mede em torno de 33 m. A resistividade do solo de Paratibe está em torno de 432Ω-m. A haste de corrente foi inserida a uma distância de 150 m do ponto de conexão com a malha.

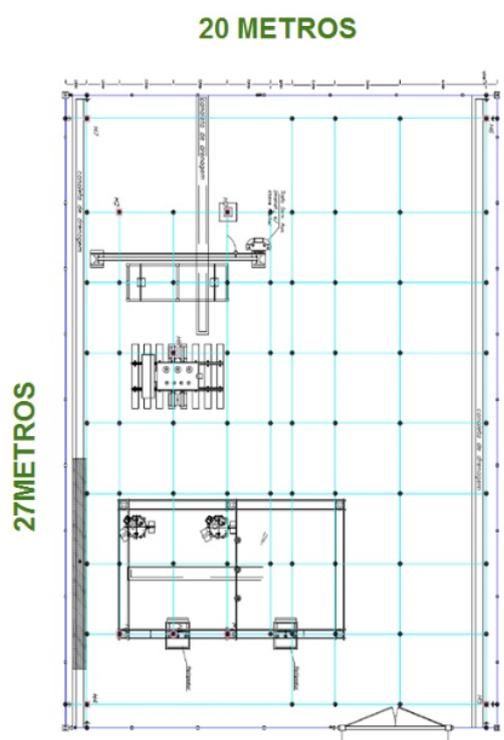
Para efeitos comparativos, foram realizadas medições utilizando dois equipamentos: o TM25R da Megabrás, equipamento utilizado para realizar medições de resistência de aterramento em 25 kHz, e o CPC 100, que realiza medições em baixas frequências (para esta medição utilizou-se 100Hz). A Figura 86 mostra o primeiro resultado, ou seja, os valores de medições obtidos para

Figura 84 – Medições na SE Paratibe após a calibração do protótipo e sua comparação com o equipamento CPC 100.



Fonte: próprio autor.

Figura 85 – Representação das dimensões da malha de aterramento da subestação TAR.

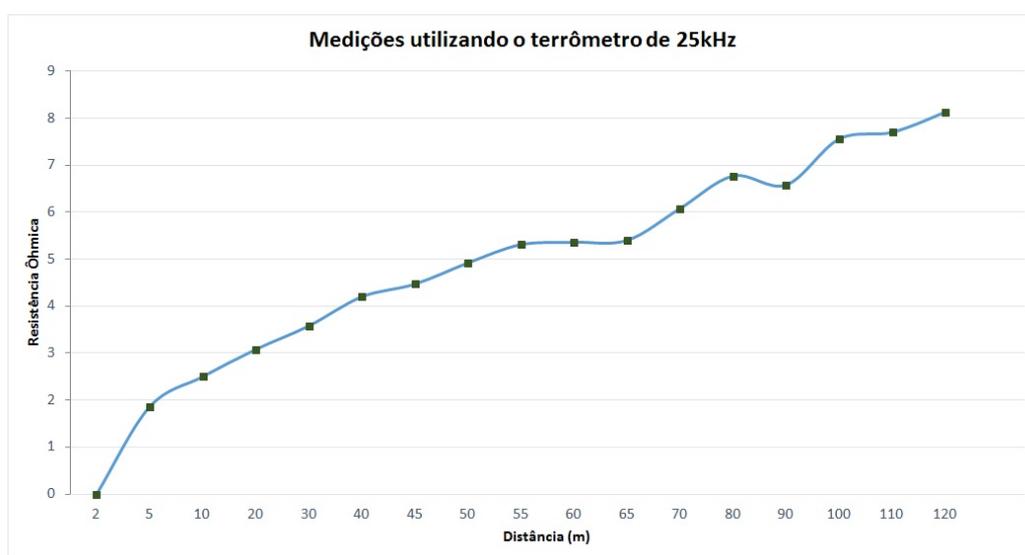


Fonte: documentos CELPE.

os testes em 25kHz. Já a Figura 87 mostra os valores obtidos para medições utilizando o CPC 100 para a frequência de 100 Hz. Pelo resultado mostrado, fica clara a diferença das leituras,

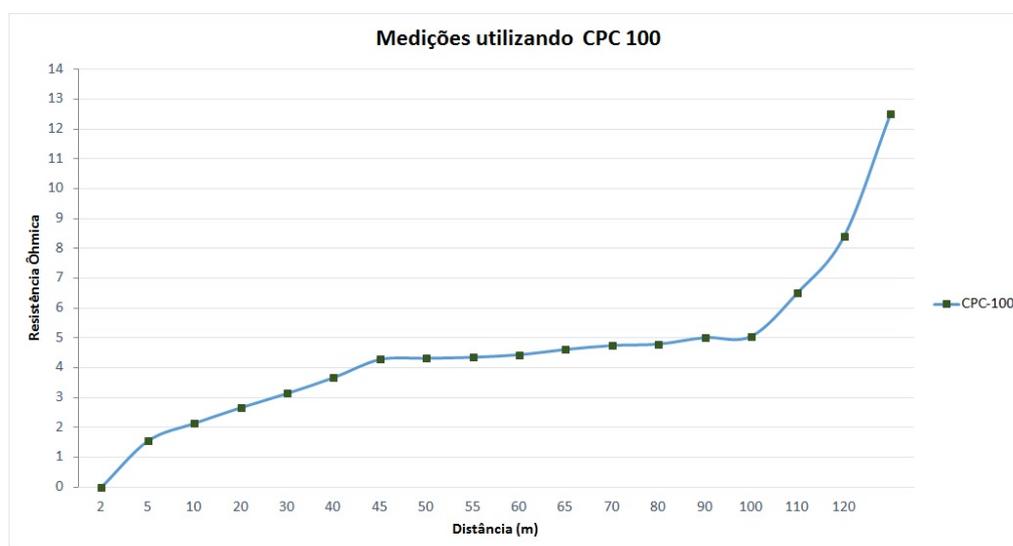
para as mesmas condições de medição. As leituras do CPC 100 formam uma região de patamar bem definida na região de distâncias entre 45 e 100 metros, com valor de resistência em torno de  $4,34\Omega$ . Quanto aos resultados obtidos pelo TM25R, um ponto que deve ser destacado é que a região de patamar não fica bem clara, dificultando a identificação da região livre de influência das hastes, necessária para identificar o valor de resistência medida. Este comportamento já havia sido previsto e mostrado na referência Ma e Dawalibi (2001).

Figura 86 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação TAR.



Fonte: próprio autor.

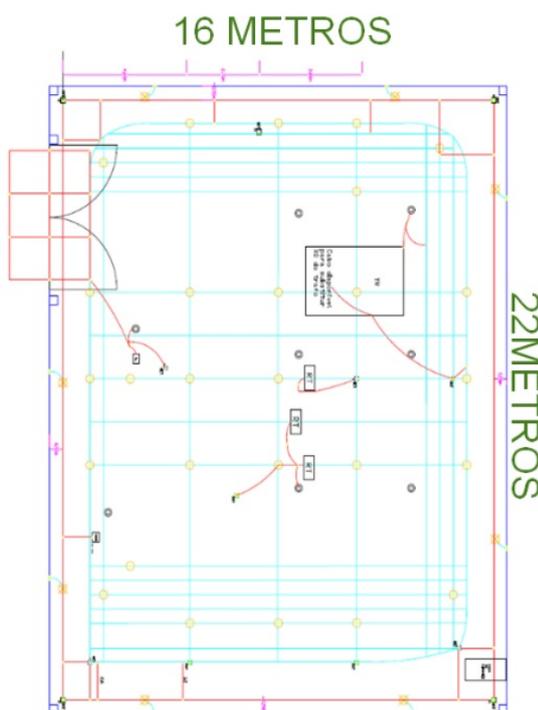
Figura 87 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento CPC 100 na subestação TAR.



Fonte: próprio autor.

A segunda subestação, denominada SE TUR, possui uma malha de aterramento com características mostradas na Figura 88. Esta malha possui 36 hastes de aço cobreado 2400mm x 12mm, 400 m de cabo de cobre nú de secção 2 AWG mais 145 m de cabo de cobre nú de secção 70mm<sup>2</sup>. A diagonal máxima desta instalação mede em torno de 27 m. A resistividade do solo de Paratibe está em torno de 250 $\Omega$ -m. A haste de corrente foi inserida a uma distância de 110 m do ponto de conexão com a malha.

Figura 88 – Representação das dimensões da malha de aterramento da subestação TUR.

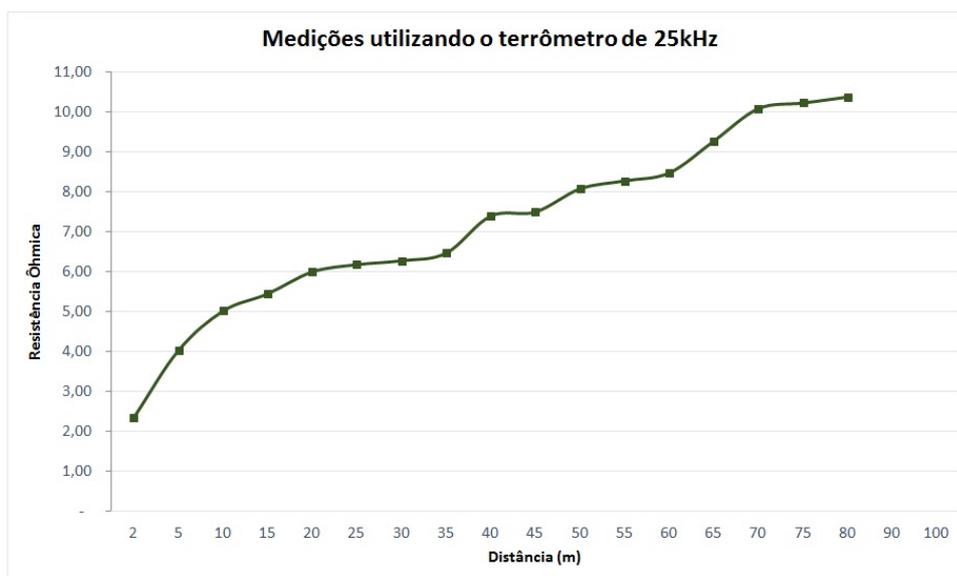


Fonte: documentos CELPE.

De forma semelhante ao caso visto anteriormente, foram realizadas medições comparativas utilizando os equipamentos CPC 100 e TM25R. A Figura 89 mostra o resultado das medições em 25kHz. Já a Figura 90 mostra os valores obtidos para medições em 100 Hz. Pelo resultado mostrado, mais uma vez, fica clara a diferença das leituras, para as mesmas condições de medição. As leituras do CPC 100 formam uma região de patamar bem definida na região de distâncias entre 45 e 70 metros, com valor de resistência em torno de 6,7 $\Omega$ . Quanto aos resultados obtidos pelo TM25R, a região de patamar fica indefinida, dificultando a análise para identificar o valor de resistência medida.

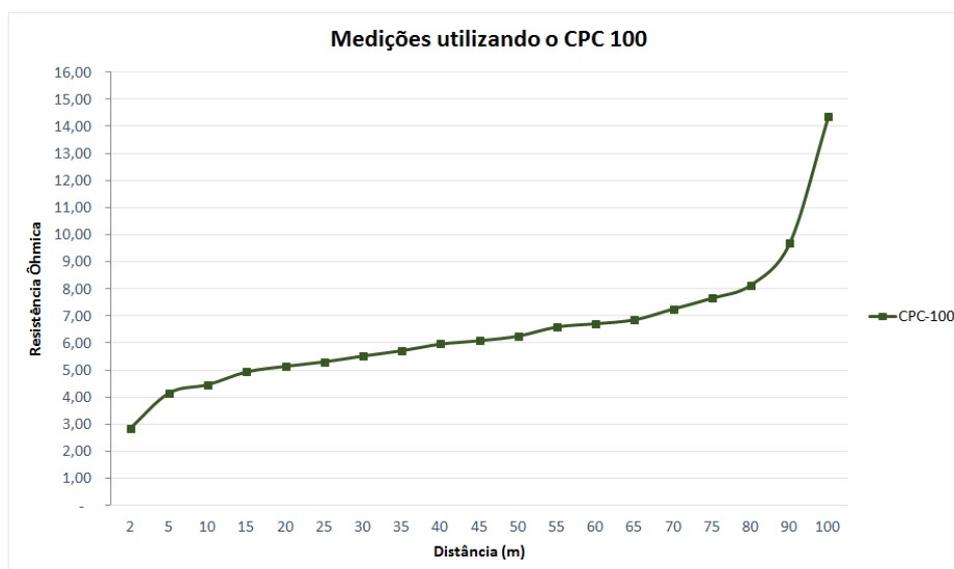
As Figuras 91 e 92 mostram mais exemplos de medições de resistência de malha de aterramento em alta frequência - 25 kHz em mais duas subestações de determinada concessionária de energia e identificadas pelas siglas TAT e BTG. Mais uma vez é possível constatar que é difícil distinguir a região de patamar e, conseqüentemente, definir qual seria o valor real de resistência da malha que está sendo avaliada.

Figura 89 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação TUR.



Fonte: próprio autor.

Figura 90 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento CPC 100 na subestação TUR.

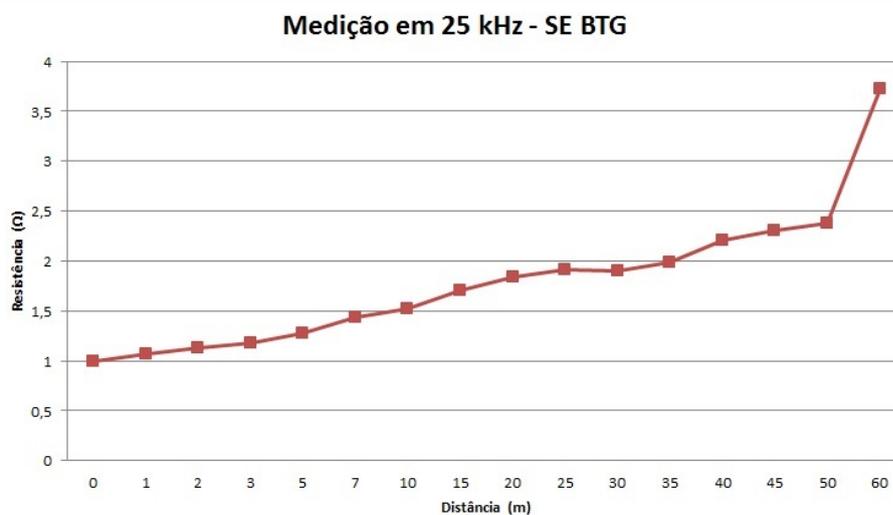


Fonte: próprio autor.

#### 4.10 Conclusão

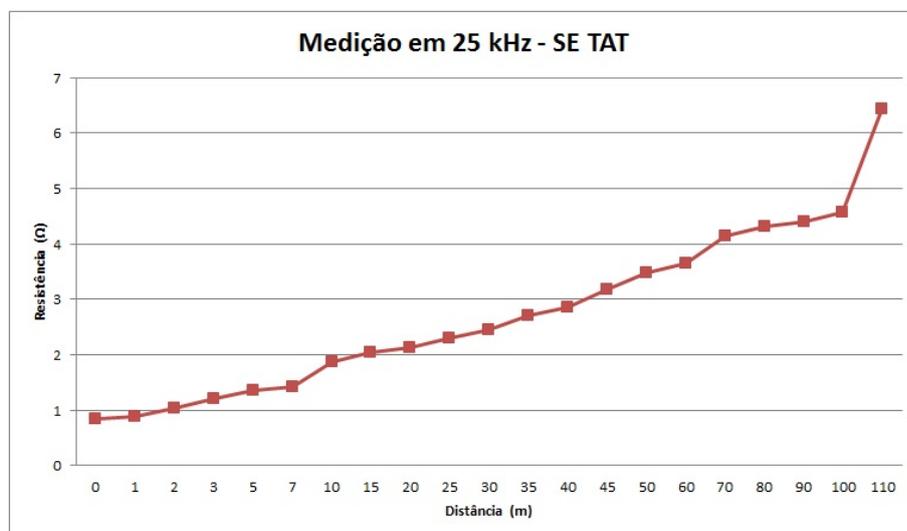
O capítulo 4 mostrou todos os detalhes dos testes realizados em campo em algumas subestações e os principais resultados obtidos. Análises comparativas entre os principais instrumentos comerciais e o protótipo foram detalhadas, destacando dados coletados de um osciloscópio utilizado durante os testes em campo. Foi mostrado também que foi necessário

Figura 91 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação BTG.



Fonte: próprio autor.

Figura 92 – Medições de resistência de aterramento utilizando o equipamento TM25R na subestação TAT.



Fonte: próprio autor.

realizar ajustes no protótipo, de forma a melhorar a precisão de medição e ficar de acordo com o *benchmarking* CPC 100. Desta forma, é possível concluir que os resultados finais são relevantes com excelente precisão.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação se propôs a realizar uma extensa análise até chegar na definição que o principal método a ser utilizado para medição de resistência de malhas de aterramento de subestações energizadas deve ser o método de queda de potencial com frequência variável. A partir desta definição, foi mostrado que o mercado nacional não disponibiliza opção de equipamento para este tipo de medição, fazendo com que as únicas opções sejam de instrumentos importados e de alto custo. Dentro deste contexto, esta dissertação mostrou as principais etapas do desenvolvimento de um equipamento nacional para este fim (protótipo), fruto de um projeto P&D “Desenvolvimento de Fonte para Injeção de Corrente em Malha de Terra para Medição de Resistência Aterramento em Subestações”.

No capítulo 2, foi visto, dentre os vários métodos, que as medições que utilizam altas frequências possuem teoria não consolidada para medições de resistências de aterramento em subestações (situação de falta), sendo mais aplicável quando se deseja observar o comportamento do aterramento frente à descargas atmosféricas (medições de pé de torre).

No capítulo 3 foi detalhado partes construtivas do protótipo, como diagramas de blocos, projetos e fotos. Os principais componentes e as justificativas de escolhas de tecnologias embarcadas foram explanados, mostrando a funcionalidade por completo do protótipo intitulado GMS.

No capítulo 4, foi mostrado os principais resultados obtidos em testes realizados em subestações energizadas e de diferentes tamanhos e condições, mostrando que o protótipo desenvolvido obteve resultados muito próximos quando comparados com equipamento *benchmarking* utilizado no projeto, que é o importado CPC 100 da Omicrom. Detalhes coletados em campo durante as medições, por osciloscópio, foram utilizados, que possibilitou analisar formas de ondas obtidas durante os testes (tensão e corrente), além de tratamento dos dados em MATLAB no que se refere aos espectros harmônicos de tensão e corrente, e utilização da ferramenta de espectro harmônico (*FFT - Fast Fourier Transform*) para obter as amplitudes dos sinais de forma mais precisa.

A dissertação foi finalizada mostrando resultados comparativos de medições de resistências de aterramento de subestações energizadas, utilizando equipamento de alta frequência e equipamento de baixa frequência. Nestas medições comparativas, fica claro que as medições em alta frequência ocasiona erros de medições elevados.

### Sugestões de trabalhos futuros

- Estudo dos impactos da conexão de Linhas de Transmissão com a malha da subestação através do cabo-guarda e desenvolvimento de estratégia para eliminação dos possíveis

erros;

- Ampliar mais o estudo comparativos das metodologias entre alta e baixa frequência, visando excluir dúvidas sobre a técnica de alta frequência que ainda possa existir;
- Avaliar a possibilidade, para o protótipo, de aplicar tensões com maiores amplitudes (talvez 400 ou 500V). Este caso é particularmente útil quando a haste de injeção de corrente está muito distante (que equivale a uma elevada resistência equivalente);
- Usar dois terminais diferentes para o "terra", ou seja, o terminal de retorno da corrente injetada e o terminal negativo de medição da haste de tensão serem distintos (medição à quatro fios).

## Referências

- ALEMETEC blogspot. Available:<https://alemetec.blogspot.com>: [s.n.], 2020. Citado na página 34.
- ALIAN. *Test Dinamico Pratico Bateria Aliant YLP14*, Aliant, 2014. <http://bateriasaliant.com.br/aliant/index.php>: [s.n.], 2014. Acesso em: 19 de Setembro 2020. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.
- ANALO. *Conversor RS232 - Fibra Óptica*, Analo Sistemas de Energia Ltda., 2010. Available:<http://www.analo.com.br/docs/produtos/ConversorRS232-FibraOptica.pdf>: [s.n.], 2010. Citado na página 74.
- BARBOSA, C. E. F. C. F.; PAULINO, J. O. S. *Effect of highresistivity ground on the lightning performance of overhead lines*. [S.l.]: Electric Power Systems Research, vol. 172, pp. 253-259, July 2019, 2019. Citado na página 57.
- BELTANI, J. M. *Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas*, in *Dissertação de Mestrado*. [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 58.
- COMSET. *CM685T/CM685T-W 3G Wi-Fi Router Datasheet*, Comset, 2013. Available: [http://comset.com.au/download/CM685TCM685T-W\\_Datasheet2.pdf](http://comset.com.au/download/CM685TCM685T-W_Datasheet2.pdf): [s.n.], 2013. Citado na página 75.
- ELECTRONICS, T. *High Voltage / High Speed Opto-Isolator - OPI1268S*, TT Electronics, Novembro 2016. Available: <http://www.ttelectronics.com/sites/default/files/download-files/OPI1268S.pdf>: [s.n.], 2016. Citado na página 75.
- ELECTRONICS, T. *Optically Coupled Isolator - OPI110, OPI1264 Series*, TT Electronics, Novembro 2016. Available: <http://www.ttelectronics.com/sites/default/files/download-files/OPI110-1264.pdf>: [s.n.], 2016. Citado na página 75.
- EN50522. *Earthing of power installations exceeding 1 kV AC*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado na página 37.
- ERICKSON, R. W.; MAKSIMOVIC, D. *Fundamentals of Power Electronics (Second Edition)*. [S.l.]: Boulder, Colorado: Springer, 2001, 2001. Citado na página 70.
- HU S. NI, B. Z. Z.; ZHANG, K. *New method of measuring ground impedance and mutual impedance between measuring lead wires*. [S.l.]: IEEE Trans. Power Del, 2016. Citado na página 54.
- IEEE80. *Guide for Safety in AC Substation Grounding*. [S.l.]: IEEE, 2013. Citado na página 38.
- IEEE81. *Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth*. [S.l.]: IEEE, 2012. Citado 14 vezes nas páginas 17, 22, 30, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 58 e 60.
- IEEE81REDLINE. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. [S.l.]: IEEE, 2012. Citado na página 59.
- KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. *Aterramento Elétrico*. Porto Alegre: Sagra Luzzatto., 1995. Citado 9 vezes nas páginas 18, 20, 29, 31, 33, 35, 36, 37 e 57.

- KLINGENCHMID, L.; PIKISCH, M. *Testing of small grounding systems with CPC 100*. Austria: OMICRON, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 28, 37, 38 e 60.
- KOSTIC, V. I.; RAICEVIC, N. B. *A study on high-voltage substation ground grid integrity measurement*. [S.l.]: Electric Power Syst. Res., vol. 131, pp. 31-40, Feb. 2016., 2016. Citado na página 54.
- LEM. *Current Transducer LA 25-P, LEM, 2014*. [http://www.lem.com/docs/products/la\\_25-p.pdf](http://www.lem.com/docs/products/la_25-p.pdf): EPE, 2014. Acesso em: 15 de abril 2020. Citado na página 66.
- LIMA, A. B. *Medição da Impedância e da Resistência de Aterramento Utilizando Ondas Impulsivas e Cabos de Pequeno Comprimento nos Circuitos de Tensão e de Corrente*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 51.
- LLOVERA J. LLISO, V. F. P.; QUIJANO, A. *Improved Methodology for High-Frequency Low-Current Measurement of Grounding Rod Impedance*. [S.l.]: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 23, NO. 4, OCTOBER 2008, 2008. Citado na página 58.
- MA, J.; DAWALIBI, F. *Influence of inductive coupling between leads on ground impedance measurements using the fall-of-potential method*. [S.l.]: IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 4, pp. 739-743, Oct. 2001, 2001. Citado 8 vezes nas páginas 18, 30, 50, 51, 52, 53, 54 e 112.
- MA, J.; DAWALIBI, F. *Extended Analysis of Ground Impedance Measurement Using the Fall-of-Potential Method*. [S.l.]: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 17, NO. 4, OCTOBER 2002, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.
- MA, W. R. J.; DAWALIBI, F. *Ground Impedance Measurement and Interpretation in Various Soil Structures*. [S.l.]: IEEE Xplore Safe Engineering Services 8r technologies ltd, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.
- MOHAN, T. M. U. N.; ROBBINS, W. P. *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. Wiley, 2002. [S.l.: s.n.], 2002. Citado 2 vezes nas páginas 70 e 71.
- MUTTAQI, T. *Multipoint grounding analysis for the power distribution network in the City of Idaho Falls*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 40.
- NBR15749, A. *Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009. Citado 12 vezes nas páginas 17, 19, 20, 21, 22, 29, 39, 44, 48, 50, 59 e 66.
- NBR7117, A. *Medição de Resistividade e determinação da estratificação do solo*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 30, 31, 32 e 33.
- PABLOGUIMARAES. Available:<https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/malha-de-aterramento>: [s.n.], 2020. Citado na página 33.
- PANICALI, A. R.; BARBOSA, C. F. *Effect of the integration path on the grounding impedance measurement at high frequency*. [S.l.: s.n.], 2019. Citado 4 vezes nas páginas 54, 55, 56 e 59.
- PAULINO C. F. BARBOSA, I. J. S. L. W. C. B. J. O. S.; MIRANDA, G. C. *Indirect lightning performance of aerial distribution lines considering the induced-voltage waveform*. [S.l.]: IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 57, no. 5, p. 1123-1131, Oct. 2015, 2015. Citado na página 57.

PAULINO, M. E. C.; JUNIOR, D. C. B. P. *Medições de resistência de aterramento em subestações energizadas utilizando variação de frequência - experiência da CELESC Distribuição*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 5 vezes nas páginas 37, 48, 49, 50 e 62.

PINENG. *PINENG PN-999 20000mAh Power Bank*. Available: <https://pineng.com.my/20000mAh-Power-Bank/PN-999/> PINENG-PN-999-20000mAh-Power-Bank-White: [s.n.], 2014. Citado na página 73.

PIRES, G. dos santos. “*Desenvolvimento de um equipamento para a medição de resistência e resistividade do solo em subestações energizadas*,” *Master’s thesis, UFMS, Campo Grande, 2012*. [S.l.: s.n.], 2012. Citado na página 71.

RASPBERRY. “*Raspberry pi beginner’s guide*,” *The MagPi - The official Raspberry Pi magazine, vol. 49, pp. 1–100, Setembro 2016*. Available: <https://www.raspberrypi.org/magpi-issues/MagPi49.pdf>: [s.n.], 2016. Citado na página 73.

RFSOLUTION. *HUAWEI MG323-B GSM LCC Module - Hardware Guide, HUAWEI, Julho 2012*. Available: <https://www.rfsolutions.co.uk/downloads/1456226716DS-HUAWEI-MG323-B.pdf>: [s.n.], 2012. Citado na página 75.

SAADAT, H. *Power System Analysis*. Boston: Mcgraw-Will, 2002. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.

STEVENSON, W. *Elementos de Análises de Sistemas de Potência*. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 42.

TECAT. [S.l.: s.n.], 2016. Citado na página 34.

TEXASINSTRUMENTS. *Digital Signal controlcard, Texas Instruments*. Available: <http://www.ti.com/tool/TMDSCNCD2833>: [s.n.], 2019. Citado na página 80.

