

Thiago Schmoeller

**ANÁLISE DE MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA E IMPEDÂNCIA  
DE IMPULSO APLICADAS A MALHAS DE ATERRAMENTO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Elétrica  
Orientador: Prof. Dr. Adroaldo Raizer  
Coorientador: Prof. Dr. Vilson Luiz  
Coelho

Florianópolis  
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Schmoeller, Thiago  
ANÁLISE DE MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA E IMPEDÂNCIA  
DE IMPULSO APLICADAS A MALHAS DE ATERRAMENTO /  
Thiago Schmoeller ; orientador, Adroaldo Raizer,  
coorientador, Vilson Luiz Coelho, 2018.  
141 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

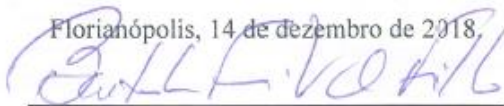
1. Engenharia Elétrica. 2. Aterramento elétrico.  
3. Resistência de aterramento. 4. Impedância de  
impulso. 5. Medição em locais com restrição de espaço.  
I. Raizer, Adroaldo. II. Coelho, Vilson Luiz. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Thiago Schmoeller

**ANÁLISE DE MEDIÇÕES DE RESISTÊNCIA E IMPEDÂNCIA  
DE IMPULSO APLICADAS A MALHAS DE ATERRAMENTO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de  
“Mestre em Engenharia Elétrica” e aprovada em sua forma final pelo  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

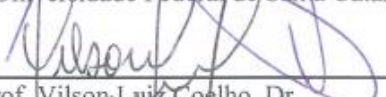
Florianópolis, 14 de dezembro de 2018.



Prof. Bartolomeu Ferreira Uchôa Filho, Dr.  
Coordenador do Curso



Prof. Adroaldo Raizer, Dr.  
Orientador - Universidade Federal de Santa Catarina

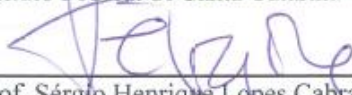


Prof. Wilson Luiz Coelho, Dr.  
Coorientador - Faculdade SATC

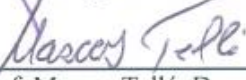
**Banca Examinadora:**



Prof. Wilson Valente Júnior, Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina – IFSC



Prof. Sérgio Henrique Lopes Cabral, Dr.  
Fundação Universidade Regional de Blumenau - FURB



Prof. Marcos Telló, Dr.  
Companhia Estadual de Energia Elétrica – CEEE RS



Dedico este trabalho a toda minha família e amigos, mas em especial a meus pais Volnei e Angelina, minhas irmãs Luana e Tathiana, e minha esposa Karin.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a toda minha família e meus amigos pelo apoio, incentivo e companhia ao longo destes quatro anos dedicados à realização deste estudo.

Agradeço aos professores Adroaldo Raizer e Vilson Luiz Coelho, pela orientação, apoio e confiança ao longo da elaboração desta pesquisa.

Agradeço aos amigos do MagLab-GEMCO, em especial Mikael Pontes Fonseca e Joana Ventura da Silva, pelas várias conversas, discussões e contribuições neste estudo.

Agradeço também aos amigos da NSC, em especial Sandro Pelicioli e Washington Gasparotto, pela flexibilidade de horários e pela possibilidade de conciliação das obrigações acadêmicas com as obrigações profissionais.

A Deus, por todas as oportunidades recebidas ao longo desta caminhada.

O meu mais sincero muito obrigado!





## RESUMO

O conhecimento do comportamento da impedância de aterramento é um fator determinante e indispensável na análise de segurança elétrica, tanto em subestações quanto em instalações susceptíveis a surtos de origem atmosférica, conduzidos ou radiados. Subestações de distribuição e instalações elétricas industriais estão geralmente posicionadas em regiões urbanas pavimentadas e intensamente edificadas. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é a contribuição para o desenvolvimento de um método de medição de impedância de impulso em locais com restrição de espaço. A partir dos dados das medições de campo, em diferentes topologias de malha, é realizada uma análise sobre os dados obtidos, e apresentada uma proposta de equacionamento geral que descreva o comportamento dos valores medidos em função das dimensões da malha, do ponto de medição, e dos próprios valores medidos. Este equacionamento, denominado Fator de Correção, permite a correção dos valores medidos em distâncias reduzidas, tanto para impedância de impulso como para resistência de aterramento, obtendo como resultado o valor de patamar de uma medição pelo método convencional. Outra importante contribuição deste estudo é o desenvolvimento do Método da Derivada de Corrente, que determina o instante de tempo em que a impedância transitória  $Z(t)$  corresponde ao valor da resistência de aterramento em regime permanente. Ambos os métodos são testados e validados a partir dos dados obtidos em campo, e comparados com os métodos atualmente aceitos na literatura.

**Palavras-chave:** Aterramento elétrico, resistência de aterramento, impedância de impulso, medição em locais com restrição de espaço.



## ABSTRACT

Knowing the behavior of the grounding impedance is decisive and indispensable for the proper assessment of electrical safety both in substations and installations susceptible to conducted or radiated surges of atmospheric origin. Distribution substations and industrial electrical installations are generally located in paved, heavily built urban areas. In this respect, this study aims to assist in the development of a method to measure the impulse impedance in constricted spaces. The data collected from in-field measurements in different mesh topologies are analyzed, and this analysis leads to a proposed general equation describing the behavior of the measured values in function of the mesh dimensions, the measuring point, and the measured values. This equation, the Correction Factor, allows the correction of the measured values at reduced distances both for impulse impedance and grounding resistance, and provides the baseline value of a measurement by the conventional method as a result. Another relevant contribution of this study is the development of the Current Derivative Method, which determines the precise time in which the transient impedance  $Z(t)$  corresponds to the value of the steady-state grounding resistance. The two methods have been tested and validated using the field data, then compared with the currently accepted methods available in scientific literature.

**Keywords:** Electrical grounding, grounding resistance, impulse impedance, measurement in constricted spaces.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia de uma malha de aterramento regular. ....	30
Figura 2 – Hastes nas extremidades da malha de aterramento e escoamento das correntes. ....	31
Figura 3 – Efeito da ionização do solo durante um surto. ....	34
Figura 4 – Método da queda de potencial. ....	35
Figura 5 – Curva típica resistência em função da distância para eletrodos de tensão e corrente no mesmo sentido .....	36
Figura 6 – Curva típica de medição de resistência de aterramento para eletrodos auxiliares no mesmo sentido e em sentidos opostos. ....	37
Figura 7 – Configuração da medição pelo método da queda de potencial para impedância de aterramento. ....	38
Figura 8 – Leituras de tensão e corrente de um surto aplicado a uma malha de aterramento. ....	39
Figura 9 – Comparação métodos Tagg e Tagg Estendido. ....	42
Figura 10 – Comparação curvas de resistência (p.u.) em função de $dA/D$ PRED. ....	43
Figura 11 – Comparação curvas de resistência em função de $dA/D$ PRED. ....	44
Figura 12 – Local de instalação das malhas de aterramento. ....	47
Figura 13 – Geometria da malha de aterramento 10 m x 10 m. .	47
Figura 14 – Disposição das malhas de aterramento e dos eletrodos auxiliares de tensão $dP$ e corrente $dA$ . ....	49
Figura 15 – Terrômetro MTD-20KWe. ....	50
Figura 16 – Gerador de surtos portátil. ....	51
Figura 17 – Osciloscópio Tektronix série 3000. ....	51
Figura 18 – Ponteira de alta tensão P6015A. ....	52
Figura 19 – Ponteira de corrente TCP0020. ....	52
Figura 20 – Bancada do “setup” de medição para resistência e impedância. ....	55
Figura 21 – Condutores da bancada de medição até os eletrodos auxiliares. ....	56
Figura 22 – Estacas para suporte dos condutores dos eletrodos auxiliares. ....	56
Figura 23 – Tela do osciloscópio com surto de 2 kV a vazio. ....	57
Figura 24 – Forma de onda de tensão $v(t)$ com picos após início da estabilização .....	58
Figura 25 – Ponteira de alta tensão conectada diretamente na malha de aterramento .....	59

Figura 26 – Forma de onda de tensão $v(t)$ com e sem acoplamento .....	60
Figura 27 – Diagrama do curto circuito entre eletrodos de tensão e corrente.....	61
Figura 28 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido, $dA = 5D$ , $dP = 0,6 dA$ .....	64
Figura 29 – Curvas de impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido .....	65
Figura 30 – Curvas de impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido.....	66
Figura 31 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido, $dA = 5D$ , $dP = 0,6 dA$ .....	66
Figura 32 – Curvas de impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....	67
Figura 33 – Curvas de impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....	68
Figura 34 – Curvas de resistência: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido.....	69
Figura 35 – Curvas de resistência: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido.....	70
Figura 36 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal, $dA = 5D$ , $dP = 0,6 dA$ ..	74
Figura 37 – Curvas de impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	75
Figura 38 – Curvas de impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	76
Figura 39 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal, $dA = 5D$ , $dP = 0,6 dA$ .....	77
Figura 40 – Curvas de impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	78
Figura 41 – Curvas de impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	79
Figura 42 – Curvas de resistência: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	80
Figura 43 – Curvas de resistência: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	81
Figura 44 – Curva de impedância transitória $Z(t)$ : malha 10 m x 10 m .....	83

Figura 45 – Curva de impedância transitória $Z(t)$ indicando momento de estabilização da derivada da corrente malha 10 m x 10 m.....	84
Figura 46 – Curvas de resistência de aterramento obtidas pelo terrômetro e pelo Método da Derivada de Corrente para malha 10 m x 10 m.....	85
Figura 47 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido.....	87
Figura 48 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido.....	88
Figura 49 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	89
Figura 50 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	90
Figura 51 – Curvas de resistência em p.u.: malha 5 m x 5 m.....	92
Figura 52 – Curvas de impedância de impulso em p.u.: malha 5 m x 5 m.....	93
Figura 53 – Curvas de resistência em p.u.: malha 10 m x 10 m.....	93
Figura 54 – Curvas de impedância de impulso em p.u.: malha 10 m x 10 m.....	94
Figura 55 – Comportamento das curvas de resistência de aterramento em p.u.: malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m.....	95
Figura 56 – Curvas de impedância de impulso em p.u.: malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m.....	96
Figura 57 – Curvas de resistência de aterramento em p.u.: malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m.....	97
Figura 58 – Comportamento da curva $FC$ medido para impedância de impulso.....	99
Figura 59 – Comportamento da curva $FC$ medido para resistência de aterramento.....	100
Figura 60 – Comportamento da curva $FC$ interpolado para impedância de impulso.....	102
Figura 61 – Comportamento da curva $FC$ interpolado para resistência de aterramento.....	104
Figura 62 – Curvas de impedância de impulso corrigidas pela equação $FC$ : malha 5 m x 5 m.....	105
Figura 63 – Curvas de impedância de impulso corrigidas pela equação $FC$ : malha 10 m x 10 m.....	106
Figura 64 – Curvas de resistência de aterramento corrigidas pela equação $FC$ : malha 5 m x 5 m.....	108

Figura 65 – Curvas de resistência de aterramento corrigidas pela equação  $FC$ : malha 10 m x 10 m ..... 109



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de incerteza do osciloscópio e das ponteiros .....	54
Tabela 2 – Parâmetros de ajuste do osciloscópio para “setup” montado.....	57
Tabela 3 – Impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido .....	64
Tabela 4 – Impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido.....	65
Tabela 5 – Impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....	67
Tabela 6 – Impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....	68
Tabela 7 – Resistência de aterramento: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido .....	69
Tabela 8 – Resistência de aterramento: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....	70
Tabela 9 – Valores de patamar para resistência e impedância de impulso com eletrodos no mesmo sentido .....	71
Tabela 10 – Aplicação dos métodos PRED e Tagg Estendido para $dA = 0,75D$ .....	72
Tabela 11 – Impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal .....	75
Tabela 12 – Impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	76
Tabela 13 – Impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	77
Tabela 14 – Impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	78
Tabela 15 – Resistência de aterramento: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	79
Tabela 16 – Resistência de aterramento: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	80
Tabela 17 – Valores de patamar para resistência e impedância para eletrodos em ortogonal .....	82
Tabela 18 – Aplicação dos métodos PRED e Tagg Estendido para $dA = 0,75D$ .....	82
Tabela 19 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido .....	86

Tabela 20 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....	87
Tabela 21 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal .....	89
Tabela 22 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal .....	90
Tabela 23 – Valor de <i>FC</i> medido para impedância de impulso 5 m x 5 m .....	98
Tabela 24 – Valor de <i>FC</i> medido para impedância de impulso 10 m x 10 m .....	98
Tabela 25 – Valor de <i>FC</i> medido para resistência de aterramento 5 m x 5 m .....	99
Tabela 26 – Valor de <i>FC</i> medido para resistência de aterramento 10 m x 10 m .....	100
Tabela 27 – Valor de <i>FC</i> interpolado para impedância de impulso 5 m x 5 m .....	101
Tabela 28 – Valor de <i>FC</i> interpolado para impedância de impulso 10 m x 10 m .....	102
Tabela 29 – Valor de <i>FC</i> interpolado para resistência de aterramento 5 m x 5 m .....	103
Tabela 30 – Valor de <i>FC</i> interpolado para resistência de aterramento 10 m x 10 m .....	103
Tabela 31 – Valor da impedância de impulso corrigida pela equação <i>FC</i> : malha 5 m x 5 m .....	105
Tabela 32 – Valor da impedância de impulso corrigida pela equação <i>FC</i> : malha 10 m x 10 m .....	106
Tabela 33 – Valor da resistência de aterramento corrigida pela equação <i>FC</i> : malha 5 m x 5 m .....	107
Tabela 34 – Valor da resistência de aterramento corrigida pela equação <i>FC</i> : malha 10 m x 10 m.....	108

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>23</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	23
1.2	OBJETIVOS .....	24
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	24
<b>2</b>	<b>ATERRAMENTO ELÉTRICO.....</b>	<b>27</b>
2.1	DEFINIÇÃO .....	27
2.2	PROPÓSITOS DO ATERRAMENTO ELÉTRICO.....	27
<b>2.2.1</b>	<b>Aterramento de segurança e proteção.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Aterramento de serviço ou funcional .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Aterramento para controle do ruído elétrico.....</b>	<b>28</b>
2.3	MALHA DE ATERRAMENTO APLICADA EM SUBESTAÇÕES.....	29
<b>2.3.1</b>	<b>Topologia das malhas de aterramento .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Dimensionamento de uma malha de aterramento.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Fatores de influência na resistência e impedância das malhas de aterramento .....</b>	<b>32</b>
2.3.3.1	Resistividade do solo .....	32
2.3.3.2	Características das correntes de falta: frequência e intensidade	33
2.4	MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	34
<b>2.4.1</b>	<b>Medição da resistência de aterramento sem restrição de espaço</b>	<b>35</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Medição da impedância de aterramento sem restrição de espaço</b>	<b>37</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Medição de resistência de aterramento para locais com restrição de espaço .....</b>	<b>40</b>
2.4.3.1	Método da inclinação ou método Tagg .....	40
2.4.3.2	Método Tagg Estendido .....	41
2.4.3.3	Método PRED .....	42

2.5	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....	45
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES DE CAMPO.....</b>	<b>46</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS DE ATERRAMENTO .....	46
3.2	RELAÇÃO DE PONTOS A SEREM MEDIDOS .....	48
3.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	49
<b>3.3.1</b>	<b>Cálculo de incerteza das medidas de campo.....</b>	<b>53</b>
3.4	REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE CAMPO .....	54
<b>3.4.1</b>	<b>Cuidados para mitigação de interferências nas medições</b>	<b>58</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Posicionamento da ponteira de tensão .....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Acoplamento indutivo entre os condutores dos eletrodos auxiliares de tensão e corrente.....</b>	<b>59</b>
<b>3.4.4</b>	<b>Fontes de alimentação e referência de terra remoto.....</b>	<b>60</b>
3.5	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....	62
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES.....</b>	<b>63</b>
4.1	RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO PARA MEDIÇÕES COM ELETRODOS AUXILIARES NO MESMO SENTIDO .....	63
<b>4.1.1</b>	<b>Impedância de impulso e impedância de surto na malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Impedância de impulso e impedância de surto na malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Resistência de aterramento na malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido.....</b>	<b>69</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Resistência de aterramento na malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido.....</b>	<b>70</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Estabelecimento dos valores teóricos e de patamar, e aplicação dos métodos PRED e Tagg estendido .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Avaliação do acoplamento indutivo entre os condutores dos eletrodos auxiliares de tensão e corrente.....</b>	<b>72</b>
4.2	RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO PARA MEDIÇÕES COM ELETRODOS AUXILIARES EM ORTOGONAL	

<b>4.2.1</b>	<b>Impedância de impulso e de surto na malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Impedância de impulso e de surto na malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....</b>	<b>77</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Resistência de aterramento na malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....</b>	<b>79</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Resistência de aterramento na malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....</b>	<b>80</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Estabelecimento dos valores teóricos e de patamar, e aplicação dos métodos PRED e Tagg estendido.....</b>	<b>81</b>
<b>4.3</b>	<b>PROPOSTA DE MÉTODO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE NA CURVA DE IMPEDÂNCIA TRANSITÓRIA: MÉTODO DA DERIVADA DE CORRENTE.....</b>	<b>83</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Resultados da aplicação método derivada da corrente para eletrodos no mesmo sentido.....</b>	<b>86</b>
4.3.1.1	Resultados da aplicação do Método da Derivada de Corrente na malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido.....	86
4.3.1.2	Resultados da aplicação do Método da Derivada de Corrente na malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido.....	87
<b>4.3.2</b>	<b>Resultados da aplicação método derivada da corrente para eletrodos em ortogonal.....</b>	<b>88</b>
4.3.2.1	Resultados da aplicação do Método da Derivada De Corrente na malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal.....	88
4.3.2.2	Resultados da aplicação do Método da Derivada De Corrente na malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal.....	90
<b>4.4</b>	<b>ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS MALHAS DE ATERRAMENTO E PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA UM FATOR DE CORREÇÃO PARA MEDIDAS COM ELETRODOS EM ORTOGONAL.....</b>	<b>91</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Resultados da aplicação da equação do Fator de Correção para impedância de impulso.....</b>	<b>104</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Resultados da aplicação da equação do Fator de Correção para resistência de aterramento.....</b>	<b>107</b>

4.5	CONSIDERAÇÕES PARCIAIS .....	109
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>111</b>
5.1	CONFIABILIDADE DOS DADOS OBTIDOS NOS TESTES DE CAMPO .....	111
5.2	ESTUDO DA BIBLIOGRAFIA.....	111
5.3	MÉTODO DA DERIVADA DE CORRENTE .....	111
5.4	COMPORTAMENTO DAS MEDIDAS DE CAMPO EM FUNÇÃO DAS DIMENSÕES DAS MALHAS DE ATERRAMENTO E PROPOSTA DA METODOLOGIA DO FATOR DE CORREÇÃO 111	
5.5	SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS .....	112
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	113
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO A – Relação de pontos medidos .....</b>	<b>118</b>
	<b>ANEXO B – Incerteza expandida e erros relativos das medidas de resistência de aterramento obtidas pelo terrômetro e pelo Método da Derivada de Corrente .....</b>	<b>120</b>
	<b>ANEXO C – Estratificação do solo e cálculo da resistividade aparente.....</b>	<b>128</b>
	<b>ANEXO D – Valores do Fator de Correção <i>FC</i> para resistência e impedância de impulso em p.u. ....</b>	<b>130</b>
	<b>ANEXO E – Erros relativos de resistência de aterramento e impedância de impulso corrigidos pelo Fator de Correção <i>FC</i> .....</b>	<b>134</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A existência de um caminho de baixa impedância para o solo, para drenar as correntes dos surtos, é um dos fatores determinantes e indispensáveis na análise de segurança elétrica, tanto em subestações quanto em ambientes sujeitos às descargas atmosféricas. A constatação da real existência deste caminho só é possível por meio das medições de impedância e resistência de aterramento [1].

Por sua vez, para uma correta medição, é necessário observar as distâncias mínimas (e consideráveis) entre o sistema a ser avaliado e os eletrodos auxiliares de tensão e de corrente. Essas distâncias, dependendo do local de instalação e das dimensões do sistema de aterramento, nem sempre estão disponíveis, como geralmente é o caso das malhas de aterramento de subestações em ambientes urbanizados [2].

Para suprir essas restrições, algumas técnicas foram adaptadas, como, por exemplo, o uso de linhas de transmissão e malhas de aterramento de outras subestações “próximas”, como eletrodos auxiliares de tensão e corrente. Porém, além destas estruturas de aterramento nem sempre estarem disponíveis, medições com eletrodos auxiliares a grandes distâncias são muito susceptíveis a interferências eletromagnéticas externas, que podem afetar os valores dos resultados das medições [3].

Para a medição da resistência de aterramento, alguns métodos foram propostos para suprir os obstáculos das grandes distâncias envolvidas, utilizando-se desenvolvimento numérico e analítico. É o caso do método Tagg (ou método da inclinação), de 1970 [4], Tagg Estendido, de 2015 [5], e o PRED, de 2017 [3]. Estes métodos diminuem consideravelmente a necessidade das distâncias mínimas entre o sistema sob medição e os eletrodos auxiliares.

Para as medições de impedância de aterramento, apesar de existirem muitos esforços no meio acadêmico, ainda não há um método adequado com garantia de resultados e exatidão na obtenção destes valores em locais com restrição de espaço.

Portanto, o que se pretende com este estudo é a realização de uma análise e contribuição para o desenvolvimento de um método de medição de impedância de impulso em locais com restrição de espaço.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a análise de medidas de campo de resistência e impedância de impulso de malhas aterramento em locais com restrição de espaço, condições encontradas em malhas de aterramento de subestações em ambientes urbanos. Esta análise será embasada em dados obtidos em medições de campo em duas diferentes topologias de malhas de aterramento, variando-se as distâncias e a disposição dos eletrodos auxiliares de tensão e de corrente. Espera-se, ao final desta análise, uma contribuição para o desenvolvimento de um novo método de medição de impedância de impulso em locais com restrição de espaço, lacuna hoje existente nesta área.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução. É apresentada uma breve introdução do trabalho, abrangendo as justificativas e objetivos que motivaram o desenvolvimento deste estudo;

Capítulo 2: Aterramento Elétrico. Resultados da revisão bibliográfica sobre o tema aterramento elétrico e medições em locais com restrição de espaço. Neste capítulo são apresentadas, de forma resumida, as necessidades de se ter um aterramento elétrico, os fatores que influenciam na resistência e impedância de um sistema de aterramento, bem como os métodos de medição de resistência de aterramento, em baixas frequências, e de impedância de aterramento, em altas frequências. São apresentados também métodos de medição de resistência com restrição de espaço já difundidos e aceitos no meio acadêmico, onde é evidenciada a ausência de um método de medição de impedância de impulso em locais com restrição de espaço.

Capítulo 3: Metodologia das Medições de Campo. Neste capítulo são apresentados as malhas e instrumentos utilizados, fatores ambientais a que estão submetidas as malhas deste estudo, bem como a metodologia empregada e cuidados utilizados para mitigar interferências e erros durante as medições.

Capítulo 4: Resultados e Análises. Este capítulo apresenta os resultados dos levantamentos de campo, e as análises que resultaram nas contribuições para medições de malhas de aterramento em locais com restrição de espaço.



Capítulo 5: Conclusão. Apresenta as conclusões, comparando os objetivos, resultados e contribuições obtidos durante a realização deste estudo.

Capítulos 6 e 7: Apresentam as referências bibliográficas e anexos, respectivamente.



## 2 ATERRAMENTO ELÉTRICO

Este capítulo apresenta o resultado da revisão bibliográfica sobre aterramento elétrico e medidas de aterramento.

Esta revisão apresenta inicialmente conceitos sobre a necessidade dos aterramentos em sistemas elétricos, dos pré-requisitos de uma malha de aterramento em uma subestação, e dos fatores que influenciam no desempenho de uma malha de aterramento.

São apresentados também os métodos de medição atualmente disponíveis na literatura. Inicia-se pelo método de medição de resistência e impedância para locais sem restrição de espaço, conhecido como o método da Queda de Potencial [2]. Posteriormente, apresentam-se métodos alternativos para medição da resistência de aterramento em locais com restrição de espaço (Tagg [4], Tagg Estendido [5] e PRED [3]).

### 2.1 DEFINIÇÃO

Do ponto de vista da engenharia, o aterramento elétrico é definido como a ligação intencional de um equipamento ou sistema à terra, por meio de dispositivos condutores de eletricidade adequados, de modo a criar um caminho seguro e de baixa impedância à passagem da corrente elétrica. Esta ligação pode ser necessária por vários motivos, desde a proteção e correto funcionamento do sistema elétrico, até a proteção de seres humanos e animais que possam estar em contato direto com este sistema [6].

O aterramento elétrico é constituído basicamente de três elementos: conexões elétricas, que interligam os componentes do sistema, eletrodos de aterramento, e o solo que envolve os eletrodos [6].

### 2.2 PROPÓSITOS DO ATERRAMENTO ELÉTRICO

O aterramento elétrico é associado a uma ampla gama de propósitos que influenciam diretamente no desempenho e funcionamento dos sistemas elétricos, de proteção e de segurança.

Esta ampla gama de funções pode ser classificada em três grupos: Aterramento de Segurança ou Proteção, Aterramento de Serviço ou Funcional, e Aterramento para Controle do Ruído Elétrico [7].

### **2.2.1 Aterramento de segurança e proteção**

Se aplica nas situações na qual a principal finalidade do aterramento é a de interligar partes metálicas expostas não energizadas. Esta interligação busca evitar acidentes no caso destas partes metálicas serem energizadas acidentalmente, fazendo com que as proteções do sistema elétrico atuem. O aterramento, quando empregado com esta finalidade, visa a segurança de pessoas e animais, pois é projetado para limitar os potenciais de toque e de passo produzidos durante um eventual fluxo de corrente de falta para o solo [7].

Os valores aceitáveis dos potenciais de toque e de passo, a metodologia de cálculo e de medição são normalizadas pela IEEE 80 [1], uma das referências deste estudo.

### **2.2.2 Aterramento de serviço ou funcional**

São os sistemas integrantes dos circuitos elétricos, conectados ao aterramento, que visam garantir a utilização correta e confiável da instalação elétrica. Nesta aplicação, os condutores que formam o caminho efetivo de aterramento devem ser permanentes e contínuos, dimensionados com capacidade de escoamento da corrente de falta que qualquer fonte poderá impor a ele. Além disso, o aterramento deverá possuir baixa impedância, limitando a elevação de potencial e facilitando a atuação das proteções dos circuitos [7].

Conforme NBR 5410, dependendo da topologia de aterramento utilizada, é aceitável que este condutor de aterramento seja o condutor de neutro, mas o uso de um condutor de terra exclusivo vem sendo cada vez mais utilizado nas instalações elétricas [8].

### **2.2.3 Aterramento para controle do ruído elétrico**

Este grupo inclui os sistemas projetados para proteção contra transitórios, relacionados diretamente com a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). O objetivo deste tipo de aterramento é a equipotencialização durante os transitórios e faltas à terra [7].

Esta equipotencialização é feita parcialmente quando existe um condutor interligando o aterramento do equipamento com o aterramento da fonte de alimentação, mas isto pode não ser eficiente por dois motivos:

- O primeiro, este condutor geralmente é longo, implicando em uma indutância e resultando em uma impedância durante os transitórios;
- O segundo, com o aterramento dos cabos de sinais, este equipamento passa a estar conectado em mais de um ponto de aterramento. Se não houver equipotencialização entre estes pontos, podem surgir correntes transitórias, denominados laços de corrente, que em casos graves resultam na queima dos equipamentos.

Para criação de sistemas equipotenciais, são empregados condutores complementares, instalação de chapas de aterramento ao invés de cabos, malhas de aterramento, placas de aterramento de baixa indutância, dentre outros [7].

Vale salientar que o emprego do projeto de equipotencialização de um sistema não pode desconsiderar o uso do aterramento para segurança de seres vivos. Por isso, o aterramento para controle do ruído elétrico deve ser tratado como complementar, e não como uma solução que substitua o aterramento de proteção e segurança [7].

### 2.3 MALHA DE ATERRAMENTO APLICADA EM SUBESTAÇÕES

Quando há necessidade da instalação de um sistema de aterramento em uma subestação de energia, a topologia de aterramento utilizada é a malha de aterramento. Apenas com o uso da malha de aterramento é possível controlar as tensões de passo e de toque que surgem durante descargas e surtos à terra, oferecendo um valor de impedância de aterramento suficientemente baixo para sensibilizar as proteções de sobrecorrente e curto circuito da subestação [9].

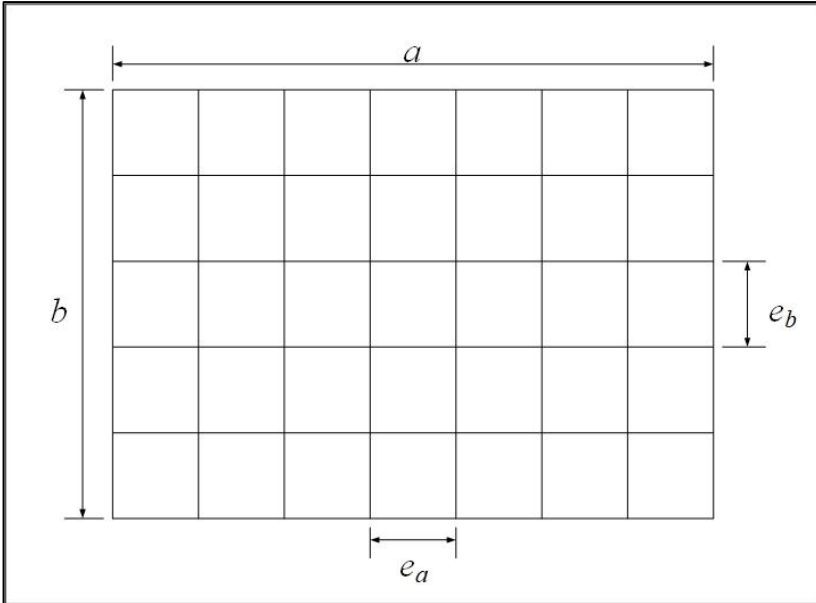
De uma forma geral, pode-se dizer que a malha de aterramento em subestações é dimensionada para, ao mesmo tempo, atender aos três grandes propósitos do aterramento elétrico elencados no item 2.2: aterramento de segurança e proteção, aterramento de serviço ou funcional, e aterramento para controle do ruído elétrico.

Neste item, é apresentada a topologia de uma malha de aterramento, assim como fatores de influência para aumento ou decréscimo da impedância e resistência de aterramento.

### 2.3.1 Topologia das malhas de aterramento

A malha de aterramento regular é caracterizada por uma série de condutores enterrados a uma profundidade  $H$ , dispostos em reticulados horizontais, cobrindo uma área  $A$  (produto de  $a$  por  $b$ ) e comprimento total de condutores  $L_{total}$ , espaçados por um espaçamento  $e_a$  e  $e_b$  entre si [9].

Figura 1 – Topologia de uma malha de aterramento regular.



Fonte: Kindermann e Campagnolo, figura 8.7.1 (2011).

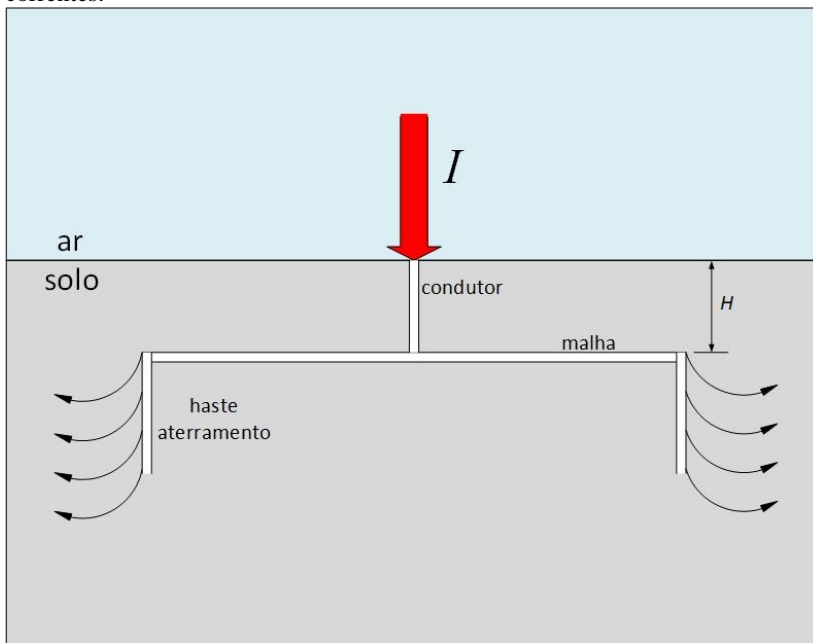
Uma das equações que determina a resistência de aterramento desta topologia, em baixas frequências, é conhecida como fórmula de Sverak, e é dada por [1]:

$$R_{Sverak} = \rho_a * \left[ \frac{1}{L_{total}} + \frac{1}{\sqrt{20 * A}} * \left( 1 + \frac{1}{1 + H * \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] [\Omega] \quad (1)$$

Onde  $\rho_a$  é a resistividade aparente do solo em que a malha se encontra instalada.

É comum também encontrar variações desta topologia utilizando hastes de aterramento vertical nas extremidades da malha, facilitando o escoamento das correntes para as camadas mais profundas do solo.

Figura 2 – Hastes nas extremidades da malha de aterramento e escoamento das correntes.



Fonte: Adaptado de Kindermann e Campagnolo, figura 8.9.2 (2011).

O cálculo da resistência desta topologia continua sendo feito pela fórmula de Sverak, porém o uso da haste é ponderado no cálculo do comprimento total dos condutores da seguinte forma [9]:

$$L_{total} = L_{cabos} + 1,15 * L_{hastes} \text{ [m]} \quad (2)$$

O emprego desta técnica faz-se necessário quando o valor da resistência de aterramento desejado no sistema não for alcançado. Desta forma, é possível obter um valor mais baixo de resistência de aterramento em uma mesma área, se comparada à da topologia apresentada na Fig. 1.

### 2.3.2 Dimensionamento de uma malha de aterramento

A elaboração de um projeto de uma malha de aterramento de uma subestação possui um considerável acervo técnico difundido na literatura, mas apesar disso, os processos de elaboração e de implantação deste sistema de aterramento não são triviais.

Um aterramento mal dimensionado pode causar a morte de seres vivos em função de elevados potenciais de toque e de passo. Pode gerar também desligamentos inesperados nesta subestação, nas linhas de transmissão ligadas à esta subestação, ou até mesmo em outras subestações.

O projeto de uma malha de aterramento é um processo iterativo, onde parte-se de uma malha inicial, são verificados se os requisitos de segurança e funcionalidade foram atendidos, e parte-se para o detalhamento final de projeto [9].

Esses requisitos, os valores aceitáveis dos potenciais de toque e de passo, e a metodologia de cálculo são definidos pelas normas IEEE 80 [1] e NBR 15751 [10], ambas referências deste estudo.

### 2.3.3 Fatores de influência na resistência e impedância das malhas de aterramento

#### 2.3.3.1 Resistividade do solo

A Eq. 1, conhecida como fórmula de Sverak, apresenta uma relação direta entre a resistência de aterramento e a resistividade do solo.

A resistividade do solo  $\rho$  é definida como a resistência elétrica  $R$ , medida entre as faces opostas de um cubo preenchido com solo, multiplicada pela área  $A$  das faces e dividida pela aresta  $l$ . A unidade de medida da resistividade é  $\Omega.m$ . [6]. Esta definição é representada pela seguinte equação:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \text{ou} \quad \rho = R \frac{A}{l} \quad (3)$$

Além do tipo de material que o solo é constituído, conforme Kindermann e Campagnolo [9] e Visacro [6], existem ainda outros fatores que também possuem influência no valor da resistividade do solo: umidade do solo, tipos de sais dissolvidos no solo, compactação, granulometria e temperatura do solo.



Para medições em campo, a medição da resistividade do solo é usualmente realizada por meio do método de Wenner, também conhecido como método das quatro hastes, normalizado pela IEEE 81 [2].

### 2.3.3.2 Características das correntes de falta: frequência e intensidade

Além da resistividade do solo, a intensidade e a frequência da corrente de falta também possuem influência no desempenho do sistema de aterramento.

Em ocorrências de baixa frequência, baixa corrente e imerso em um solo de baixa resistividade, os efeitos das capacitâncias distribuídas e da ionização do solo podem ser desprezados. Desprezando-se estes efeitos, a resistência de aterramento pode ser vista como uma resistência pura [6].

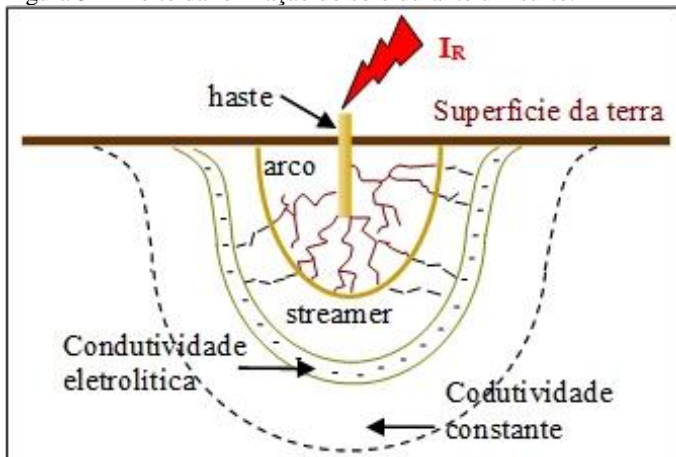
Este mesmo sistema, quando submetido a correntes de intensidade e frequência elevadas, apresenta uma alteração de comportamento. Nestes casos, é necessário considerar os efeitos capacitivos (principalmente em solos de alta resistividade) e da reatância indutiva associada ao comprimento dos condutores e eletrodos. Isso faz com que a resistência de aterramento, que podia ser considerada como uma resistência pura, tenha de ser substituída por uma impedância, com componentes de origem resistiva, capacitiva e indutiva. Correntes de alta intensidade geradas por descargas atmosféricas são as principais fontes destes efeitos [6].

As descargas atmosféricas geram um surto de alta intensidade de corrente, da ordem de milhares de Ampères. Durante um raio, as ondas de corrente e tensão geradas possuem componentes de frequência significativas desde corrente contínua até próximo de um Mega-hertz. A IEC 61000-4-5 [11] recomenda que a padronização dos tempos de onda de tensão seja de 1,2  $\mu$ s para frente de onda, e de 50  $\mu$ s para o tempo de meia onda. Para os tempos de onda de corrente, a padronização é de 8  $\mu$ s para frente de onda, e de 20  $\mu$ s para o tempo de meia onda.

Quanto a influência da frequência do surto na resistividade do solo, e consequentemente na impedância de aterramento, pode-se destacar os resultados de Visacro et al. em 2011 [12] e 2012 [13], e Alípio [14]. Nestes estudos, foi constatado que a resistividade do solo é também influenciada pela frequência do surto a que está sendo submetido, e assumindo ainda comportamentos distintos para solos de baixa e de alta resistividade.

Com relação à influência da intensidade do surto no valor da resistividade do solo, ela é caracterizada pela ionização do solo. Este efeito ocorre quando um elevado valor de corrente, da ordem de kA, flui por um condutor de aterramento, gerando elevados valores de campo elétrico na região próxima ao condutor. A partir de um determinado valor de campo elétrico, ocorre o efeito da ionização do solo [15].

Figura 3 – Efeito da ionização do solo durante um surto.



Fonte: Telló et al., figura 5 (2017) [7].

A região ionizada ao redor do eletrodo é influenciada diretamente pelo valor do campo elétrico a que está sendo submetido: quanto maior o seu valor, maior será a região sob efeito da ionização do solo e menor será a resistividade do solo que envolve o condutor de aterramento [7].

Apesar destes dois fatores de influência serem extremamente relevantes dentro desta área de pesquisa, eles não serão abordados neste estudo. Para maiores detalhes e informações, recomenda-se a consulta das referências [7], [12], [13] e [14] deste estudo.

## 2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO

A realização da medição da impedância e resistência de um sistema de aterramento é empregada para testar a eficácia de um novo sistema, validando o projeto e a instalação. Além disso, a medição também é necessária para acompanhamento do desempenho de um sistema de aterramento existente ao longo de sua vida útil, identificando

possíveis alterações e possibilitando as devidas intervenções de manutenção quando necessário.

Neste item, serão apresentadas técnicas de medição de sistemas de aterramento, divididas em três grupos: medição da resistência de aterramento sem restrição de espaço, medição da impedância de aterramento sem restrição de espaço, e medição da resistência de aterramento para locais com restrição de espaço.

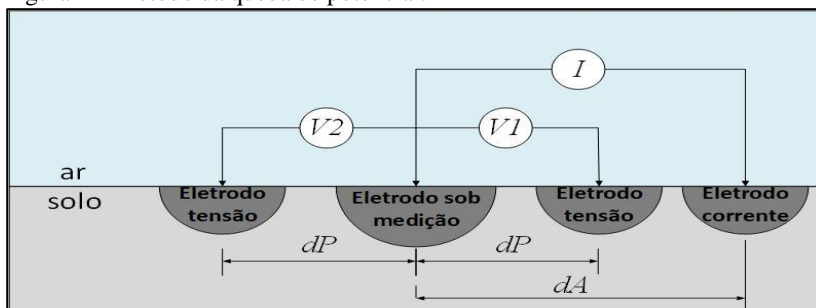
#### 2.4.1 Medição da resistência de aterramento sem restrição de espaço

As medidas de resistência de aterramento são utilizadas desde o início dos anos 50, e ainda são as mais utilizadas para verificação do desempenho do sistema de aterramento, seja para o aterramento de segurança ou proteção, aterramento de serviço ou funcional, e aterramento para controle do ruído elétrico [2].

O método da queda de potencial é o método recomendado para a medição da resistência de aterramento, onde o equipamento utilizado é o terrômetro. Considerando que o terrômetro possui uma fonte de tensão de baixa frequência, as componentes capacitivas e indutivas presentes são desconsideradas [16]. Além disso, considera-se também que o sistema de aterramento se comporta como um eletrodo semiesférico e de que o solo possui uma resistividade aparente uniforme [2].

Feitas estas aproximações, o método consiste em medir a tensão entre o sistema de aterramento e o eletrodo de tensão auxiliar, também conhecido como terra remoto. Esta tensão é resultante da circulação de corrente entre o sistema de aterramento e o eletrodo auxiliar de corrente, conforme demonstra a Fig. 4 [2].

Figura 4 – Método da queda de potencial.

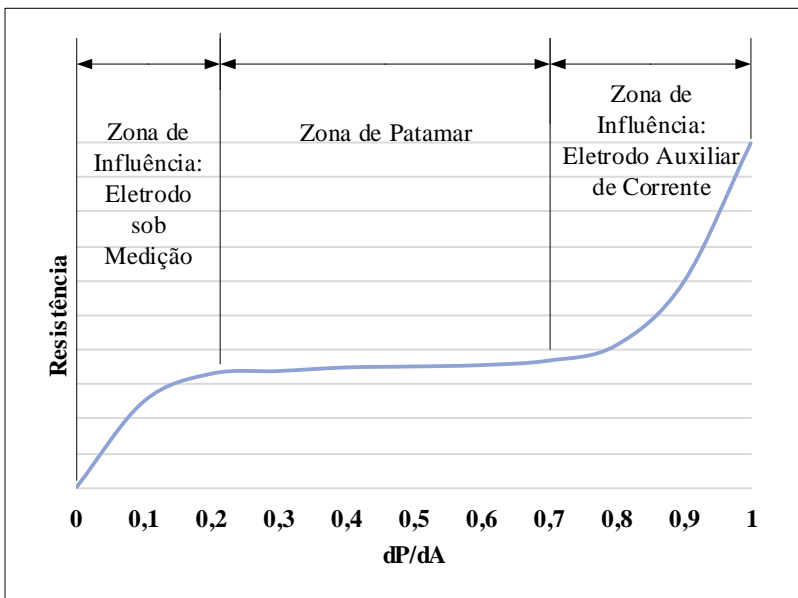


Fonte: Adaptado de IEEE 81, figura 6 [2].

Para uma correta medição, a distância  $dA$  do eletrodo auxiliar de corrente deve ser de quatro a dez vezes a maior diagonal  $D$  do sistema de aterramento sob medição. A direção do eletrodo de tensão  $dP$  é opcional: ela pode ser na mesma direção do eletrodo auxiliar de corrente, medindo a tensão  $V1$ , ou na direção oposta, medindo a tensão  $V2$ . Em ambos os casos, a distância  $dP$  deve ser de 62% de  $dA$  para a correta medição do valor da resistência de aterramento  $R$  do sistema. Variando-se o eletrodo de tensão no mesmo sentido do eletrodo de corrente, e utilizando a relação  $R = V1/I$ , espera-se a obtenção da curva típica da resistência de aterramento do sistema [2] [17].

Na Fig. 5 estão ilustradas as três zonas de comportamento durante a medição da resistência de aterramento. A zona de influência próxima do sistema sob medição apresenta valores abaixo do valor de patamar, enquanto que a zona de influência próxima do eletrodo auxiliar de corrente apresenta valores de resistência de aterramento acima do valor de patamar. A zona de interesse para o método da queda de potencial é a zona de patamar, obtendo nesta região o valor correto da resistência de aterramento do sistema sob medição [16].

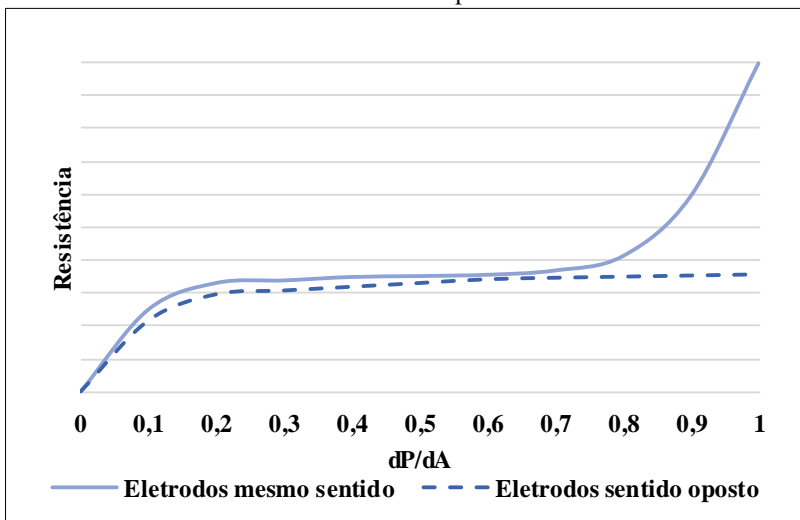
Figura 5 – Curva típica resistência em função da distância para eletrodos de tensão e corrente no mesmo sentido



Fonte: Adaptado da NBR 15749, figura 3 [16].

Quando a medição não é realizada com os eletrodos auxiliares no mesmo sentido, a zona de influência do eletrodo auxiliar de corrente deixa de existir. Com isso, a curva da resistência de aterramento, obtida pela relação  $R = V2/I$ , apresenta a resposta da linha tracejada da Fig. 6.

Figura 6 – Curva típica de medição de resistência de aterramento para eletrodos auxiliares no mesmo sentido e em sentidos opostos.



Fonte: Adaptado de IEEE 81, figura 7 [2].

A zona de interesse para o método da queda de potencial com eletrodos em sentidos opostos continua sendo a zona de patamar [16] [17].

#### 2.4.2 Medição da impedância de aterramento sem restrição de espaço

A determinação da impedância de um sistema de aterramento faz-se necessário quando este sistema deve ser eficaz, também, para proteções contra descargas atmosféricas e surtos de alta intensidade [2].

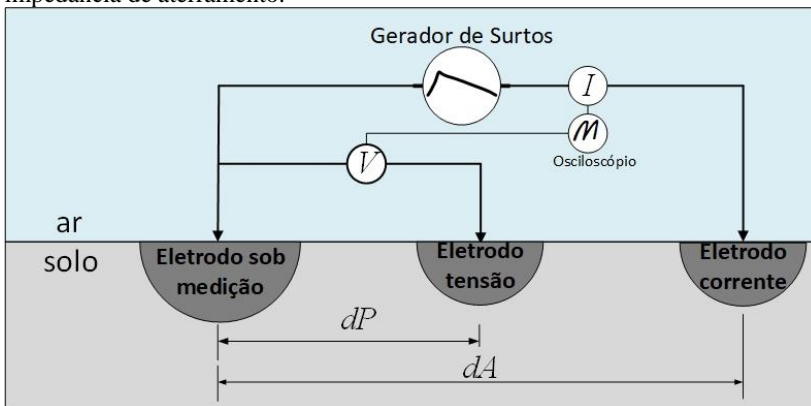
Da mesma forma que a resistência de aterramento pode ser determinada pelo método da queda de potencial, a determinação da impedância de aterramento também pode ser obtida por este mesmo método. Os requisitos de distância entre eletrodos auxiliares e o sistema de aterramento sob medição continuam sendo os mesmos: a distância  $dA$

deve ser de quatro a dez vezes a maior diagonal  $D$  do sistema, e a distância  $dP$  deve ser de 62% de  $dA$ .

O terrômetro, utilizado para obtenção da resistência de aterramento, possui uma fonte de tensão de baixa frequência, aproximando-se de uma fonte de corrente contínua. Para a obtenção do comportamento da impedância de aterramento, as medições são realizadas com uma fonte de tensão com tempo de frente de onda extremamente rápido, similar aos tempos de frente de onda de uma descarga atmosférica, padronizada pela IEC 61000-4-5 [11]. Uma fonte com estas características é conhecida como gerador de surtos [2].

Para a leitura da tensão e da corrente injetadas pelo gerador de surtos, ao invés da utilização de um simples voltímetro e um amperímetro, é necessário a utilização de um osciloscópio, com as devidas ponteiros de tensão e corrente, para gravação das formas de onda de tensão  $v(t)$  e corrente  $i(t)$  [2].

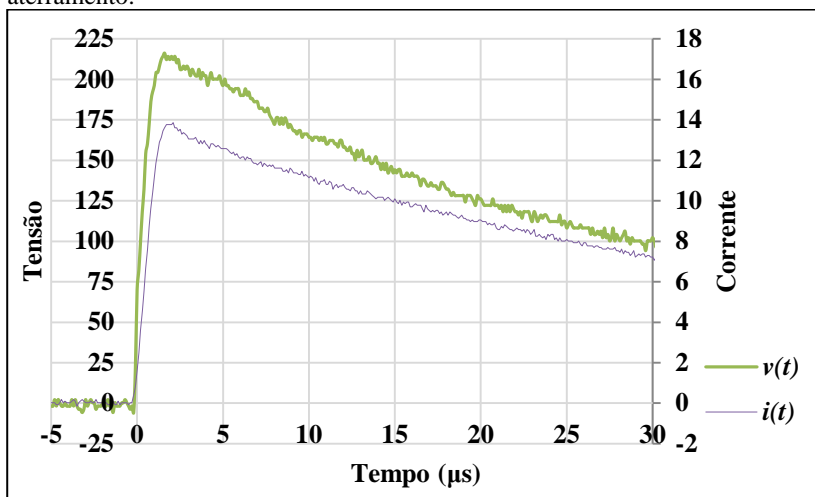
Figura 7 – Configuração da medição pelo método da queda de potencial para impedância de aterramento.



Fonte: Adaptado de IEEE 81, figura 21 [2].

Como exemplo da leitura da aplicação de um surto, a Fig. 8 apresenta as curvas de tensão e corrente resultantes da aplicação de um surto em uma malha 10 m x 10 m.

Figura 8 – Leituras de tensão e corrente de um surto aplicado a uma malha de aterramento.



Fonte: Do autor.

A impedância de impulso é definida pela razão entre o valor máximo da tensão  $v(t)$  e o valor máximo da corrente  $i(t)$ , independentemente do instante de tempo em que elas ocorram. A impedância de surto é definida pela razão da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$  no instante de tempo em que corrente  $i(t)$  possuir o seu valor máximo, ou seja, no instante de tempo em que a derivada da corrente for igual a zero ( $di/dt = 0$ ) [2].

Para o caso da Fig. 8, a aplicação do surto gerou uma corrente máxima de 13,86 A. Esta circulação de corrente gerou uma tensão máxima de 216,24 V entre  $dP$  e a malha de aterramento, resultando em uma impedância de impulso de 15,60  $\Omega$ . O instante de tempo em que ocorreu o pico da corrente  $i(t)$  foi em 2,1  $\mu s$ . Neste instante de tempo, a tensão  $v(t)$  apresentava um valor de 212,2 V, o que resultou em uma impedância de surto de 15,32  $\Omega$ .

Neste trabalho, o objetivo é a contribuição para uma nova metodologia de medição para impedância de impulso em locais com restrição de espaço, por isso não serão estudados demais parâmetros possíveis de serem extraídos da curva de impedância transitória  $Z(t)$ .

### 2.4.3 Medição de resistência de aterramento para locais com restrição de espaço

No método da queda de potencial, método utilizado para determinação da impedância e da resistência de aterramento, existem distâncias mínimas que devem ser respeitadas para a correta obtenção do valor de patamar do sistema de aterramento. Dependendo do tamanho do sistema de aterramento, estas distâncias mínimas podem resultar em distâncias da ordem de centenas de metros, que nem sempre estão fisicamente disponíveis nos locais onde o sistema de aterramento está instalado. Esse problema é mais evidente nas subestações instaladas em ambientes urbanizados.

Neste tópico, busca-se a apresentação sucinta dos métodos para medição da resistência de aterramento em locais com restrição de espaço. Inicia-se apresentando o método mais difundido na literatura científica, o método da inclinação ou método Tagg, de 1970, e termina-se apresentado dois métodos recentes: Tagg Estendido, de 2015, e PRED, de 2017.

#### 2.4.3.1 Método da inclinação ou método Tagg

Como uma alternativa para o método convencional da queda de potencial, que exige uma grande distância entre os eletrodos auxiliares e o sistema de aterramento, Tagg propôs, nos anos 70, um método alternativo para medição em menores distâncias, conhecido como método da inclinação [4].

Neste método, as aproximações, de que o sistema de aterramento se comporta como um eletrodo semiesférico e de que o solo possui uma resistividade aparente uniforme, permaneceram as mesmas do método convencional da queda de potencial. A diferença está na implementação de uma correção em função da inclinação do patamar dos dados obtidos nas medições de campo [2].

A IEEE 81 [2] traz um resumo da aplicação deste método:

- a) Escolher um ponto inicial conveniente para iniciar uma medição em linha reta. Fixar o eletrodo auxiliar de corrente a uma distância adequada;
- b) Inserindo o eletrodo auxiliar de tensão nas distâncias de  $0,2dA$ ,  $0,4dA$  e  $0,6dA$ , medir as respectivas resistências  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ ;
- c) Calcular o coeficiente de inclinação  $\mu$  pela Equação (4);



$$\mu = \frac{R3-R2}{R2-R1} \quad (4)$$

- d) Selecionar o valor de  $PP_T/CP$  correspondente ao valor  $\mu$  na tabela 5 da IEEE 81;
- e) Medir o verdadeiro valor da impedância de aterramento colocando a ponteira auxiliar de tensão  $dP$  na distância  $PP_T/CP$ .

Desta forma, é possível obter o valor da resistência de patamar para medições em que a distância mínima do eletrodo auxiliar de corrente não é possível de ser respeitada.

#### 2.4.3.2 Método Tagg Estendido

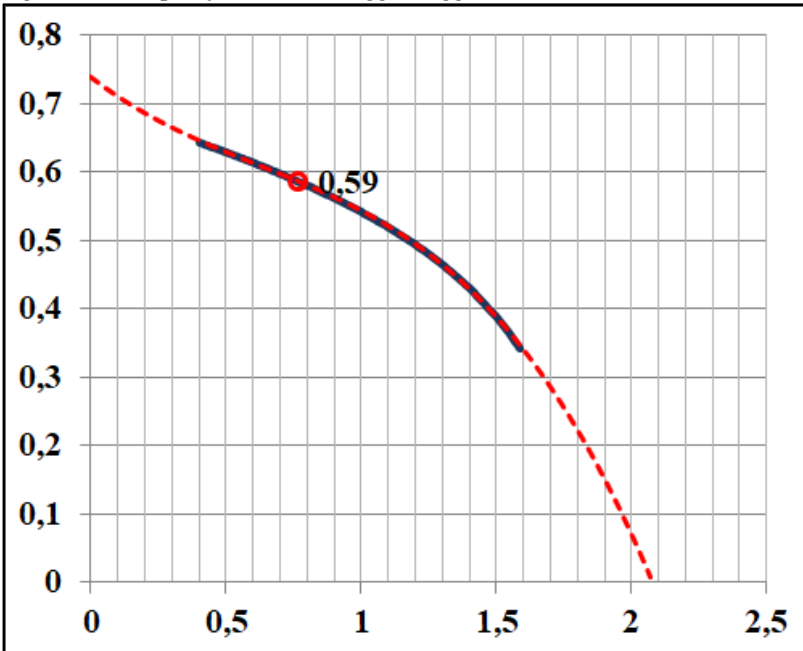
Este método foi proposto em 2015 por A. Raizer et al., e contempla medidas de resistência de aterramento. Este método tem como base o método Tagg, mantendo o mesmo princípio matemático envolvido nesse desenvolvimento. Este método surgiu pela percepção de que alguns valores levantados em campo para  $R1$ ,  $R2$  e  $R3$  resultavam em um coeficiente  $\mu$  fora do intervalo determinado, que varia desde 0,400 até 1,599 [5].

Para resolver os pontos em que o coeficiente  $\mu$  não está definido pelo método Tagg, uma interpolação polinomial de terceira ordem foi executada resultando na seguinte equação:

$$\frac{dP}{dA} = -0,1242\mu^3 + 0,2339\mu^2 - 0,3049\mu + 0,738 \quad (5)$$

A Fig. 9 apresenta uma comparação dos coeficientes determinados por Tagg, representados pela linha sólida, e os coeficientes interpolados pela Equação (5), representados pela linha tracejada.

Figura 9 – Comparação métodos Tagg e Tagg Estendido.



Fonte: SIPDA 2015, figura 1 [5].

Para validação desta aproximação matemática, foram feitos testes de campo em quatro malhas de aterramento de diferentes geometrias e dimensões. O erro relativo médio dos resultados obtidos entre estes dois métodos, quando  $dA$  é maior que cinco metros, é sempre menor que 5%. Esse pequeno erro associado faz com que esta aproximação matemática seja válida para medições de resistência de aterramento, possibilitando a implementação do método da inclinação em situações extremas onde coeficiente  $\mu$  esteja fora do intervalo definido por Tagg em seu estudo original [5].

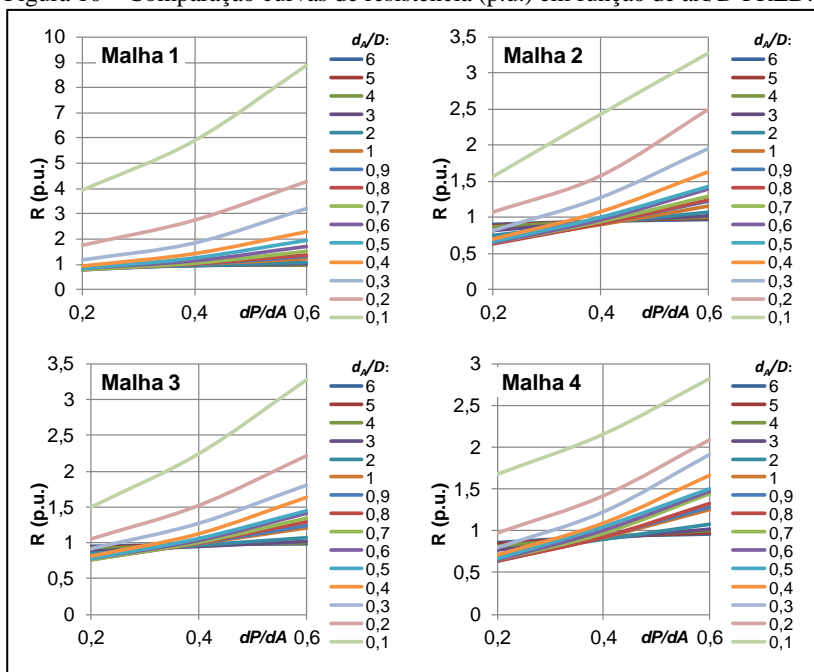
#### 2.4.3.3 Método PRED

O método PRED (Polynomial Regression from Database) foi proposto em 2017 por A. Raizer et al., e também contempla medidas de resistência de aterramento. O principal objetivo deste método também é permitir a medição da resistência de aterramento em locais com restrição de espaço [3].

Este método também faz uma aproximação matemática para estabelecer o valor correto de  $dP$  em função da relação entre  $D$  e  $dA$ . A diferença está na abordagem feita para estabelecer esta relação: enquanto que os demais métodos necessitam de três medidas iniciais para estabelecer a inclinação do patamar, o método PRED prevê, em função da relação  $dA/D$ , o ponto correto de medição onde se obtém o valor de patamar [3].

Após o levantamento de dados, por meio de testes de campo, a inclinação típica da curva de resistência em função da relação  $dA/D$  é apresentada na Fig. 10. Nesta figura, é possível verificar o comportamento das quatro diferentes malhas utilizadas na formulação desse método [3].

Figura 10 – Comparação curvas de resistência (p.u.) em função de  $dA/D$  PRED.



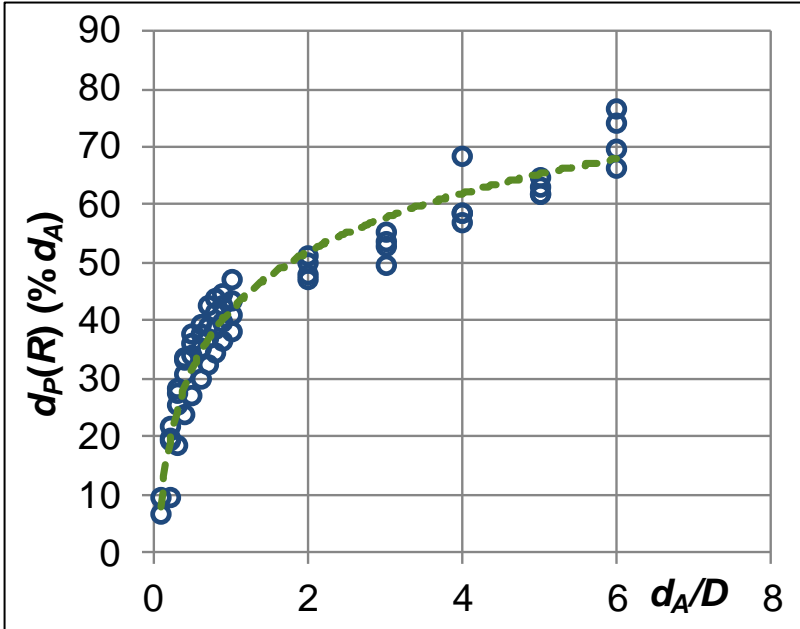
Fonte: Adaptado de EPSR 2017, figuras 5, 6, 7 e 8 [3].

Quando estes dados são analisados utilizando a relação  $dA/D$  para determinação de  $dP$ , surge a relação apresentada na Fig. 11. A descrição, por meio de uma aproximação matemática, dessa nova abordagem é determinada pela Equação (6) [3].

$$dP = 0,14 \ln\left(\frac{dA}{D}\right) + 0,41 \quad [\%dA] \quad (6)$$

O comportamento desta equação também é apresentado na Fig. 11, indicado pela linha tracejada.

Figura 11 – Comparação curvas de resistência em função de  $dA/D$  PRED.



Fonte: EPSR 2017, figura 9 [3].

Após o estabelecimento desta relação, foram avaliados os erros entre os métodos do Tagg Estendido, PRED e queda de potencial, tido como referência. Como resposta desta comparação, o erro relativo médio total do PRED ficou em torno de 10% [3].

Uma das grandes vantagens deste método é a determinação do ponto correto de medição do eletrodo tensão  $dP$ , em função de  $D$  e  $dA$ , antes mesmo de ser efetuada qualquer medida em campo. Contudo, se no ponto de medição  $dP$  indicado por este método houver uma descontinuidade do solo, causado por um solo arenoso ou pedregoso, por exemplo, o valor da resistência medido neste ponto fica prejudicado [3].

## 2.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo, procurou-se abordar conceitos básicos do tema aterramento elétrico, necessários para a elaboração deste trabalho. O foco da abordagem foi com relação as malhas de aterramento aplicadas a subestações. Foram elencados os pré-requisitos que um sistema de aterramento de uma subestação deve possuir, além dos fatores que contribuem para o aumento ou diminuição do desempenho de uma malha de aterramento.

Foram também abordadas as principais técnicas de medição de resistência e impedância de aterramento, iniciando pelas técnicas convencionais utilizando grandes distâncias para resistência e impedância, e apresentando também, os métodos para medição de resistência em locais com restrição de espaço.

Com a apresentação dos atuais métodos presentes na literatura, percebe-se a ausência de um método de medição de impedância de malhas de aterramento para locais com restrição de espaço. Com este estudo, portanto, pretende-se contribuir para preencher este ponto ainda em aberto nesta área de pesquisa.

No próximo capítulo, serão apresentadas as metodologias de medição empregadas para o levantamento dos dados de campo que embasam este estudo.

### 3 METODOLOGIA DAS MEDIÇÕES DE CAMPO

Neste capítulo é apresentada a metodologia de medição empregada neste estudo, aplicada nas medidas de campo para levantamento de dados. Com base nos dados de campo, será possível a análise e a contribuição para o desenvolvimento de um método de medição de impedância de impulso em locais com restrição de espaço.

Inicialmente são apresentadas as características das malhas de aterramento, a relação dos pontos e distâncias medidas, e a metodologia de medição empregada, com base na revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2.

São apresentados também os equipamentos utilizados para medição da resistência e impedância de aterramento, e as incertezas das medidas em função da exatidão dos equipamentos utilizados.

Por fim, em função das medições de impedância, houve a necessidade de medidas cautelares para evitar erros e acoplamentos durante as medições. Essas medidas cautelares são apresentadas, assim como a justificativa da adoção delas.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS DAS MALHAS DE ATERRAMENTO

O local da realização dos testes é a Fazenda Experimental da UFSC, situada sob as coordenadas 27°40'53"S e 48°32'12"W. A instalação das malhas neste local tem como principal razão a distância suficientemente grande de outros sistemas de aterramento, mitigando possíveis interferências nas medidas realizadas.

As malhas de aterramento utilizadas neste estudo possuem duas geometrias diferentes: 5 m x 5 m e 10 m x 10 m. O solo deste local é classificado como "SM" ou Solos Indiscriminados de Mangue, comum em áreas de mangue sob influência da maré [18].

Neste mesmo local, existem mais duas malhas de aterramento de diferentes dimensões: 10 m x 2,5 m e 10 m x 5 m. As medidas também foram realizadas nestas malhas de aterramento, porém em função da proximidade entre elas, foram obtidos dados de campo fora dos padrões esperados, e, portanto, os resultados destas malhas foram desconsiderados e não serão aqui apresentados.

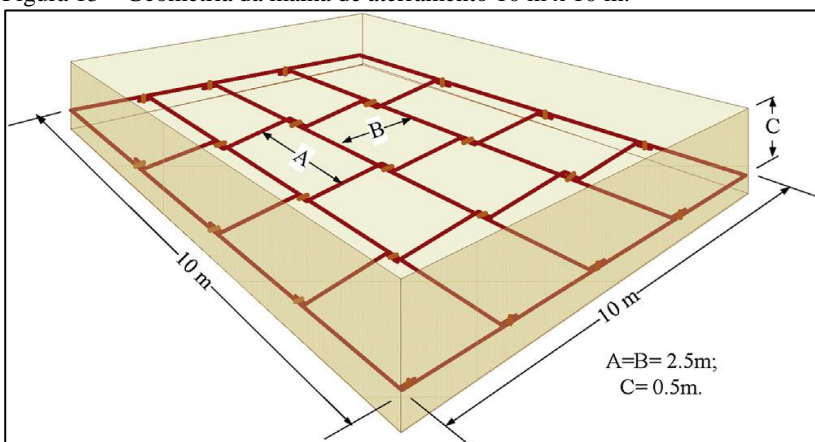
Figura 12 – Local de instalação das malhas de aterramento



Fonte: Do autor, 19/08/2018.

As geometrias das malhas seguem o “layout” apresentado na Fig. 13, mantendo o mesmo valor para o espaçamento de 2,5 metros (A e B), assim como 0,5 metros para a profundidade (C), e variando as dimensões externas conforme cada uma das malhas. Não existem hastes de aterramento nos vértices das malhas. Os condutores são cabos de cobre nu de 95 mm<sup>2</sup>, conectados por solda exotérmica.

Figura 13 – Geometria da malha de aterramento 10 m x 10 m.



Fonte: EPSR 2017, figura 3 [3].

Conforme abordado na revisão bibliográfica, a umidade é um dos fatores de influência na resistividade do solo. As medidas com eletrodos no mesmo sentido, realizadas nos dias 06 e 07 de janeiro de 2018, foram feitas com tempo firme, sol durante todo o período e temperatura entre 30 °C e 35 °C, em uma época de tempo úmido com trovoadas de final de tarde. Conforme INMET, a chuva acumulada no mês de janeiro, para a área onde as malhas estão instaladas, foi de 300 mm [19].

Além da influência da umidade pela chuva, a área em que as malhas de aterramento estão instaladas também possui influência da umidade em função do nível da maré, já que estão instaladas ao nível do mar. Para a realização das medidas com eletrodos no mesmo sentido, o nível da maré manteve-se estável, com mínimo de 0,4 metros e máximo de 1,1 metros [20].

Para as medidas com eletrodos em ortogonal, realizadas em 18 de agosto de 2018, o tempo era firme, com sol durante todo o dia e temperatura entre 20 °C e 25 °C, em uma época de tempo seco com poucas chuvas. Conforme INMET, a chuva acumulada no mês de agosto, para a área onde as malhas estão instaladas, foi de 70 mm [19]. Neste período, o nível da maré manteve-se estável, com mínimo de 0,3 metros e máximo de 1,0 metros [20].

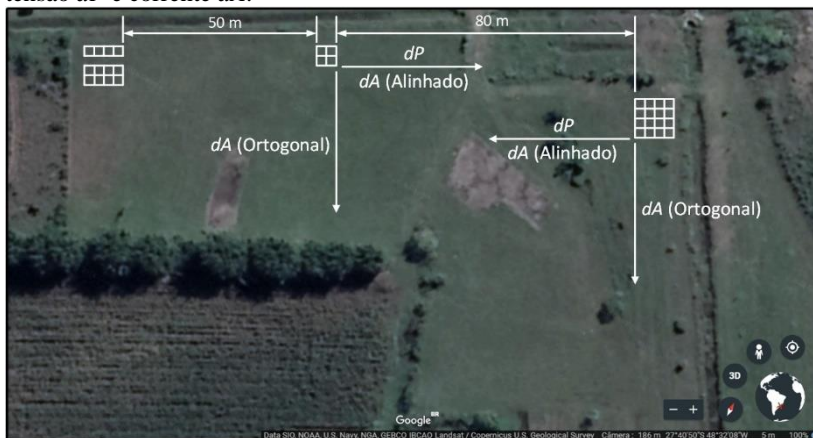
### 3.2 RELAÇÃO DE PONTOS A SEREM MEDIDOS

Para o levantamento de dados realizado durante os testes de campo, utilizou-se o método da queda de potencial como a base para a realização das medidas. Neste método, foram realizadas medições com o eletrodo auxiliar de corrente  $dA$  variando desde  $0,75D$  até  $5D$ , onde  $D$  representa a maior diagonal da malha. O eletrodo auxiliar de tensão  $dP$  foi utilizado em passos de 10% num intervalo de 10% a 90% de  $dA$ , tanto para medidas de resistência quanto de impedância. Os eletrodos auxiliares de tensão  $dP$  e corrente  $dA$  foram dispostos em duas condições: alinhados e em ortogonal. O ponto de conexão dos equipamentos e realização das medidas foi o vértice das malhas. A relação total dos pontos de medidas em metros está informada no anexo A deste trabalho.

A Fig. 14 apresenta a disposição dos eletrodos  $dP$  e  $dA$ , conforme acima mencionado, assim como a disposição de instalação das malhas de aterramento no campo de provas.



Figura 14 – Disposição das malhas de aterramento e dos eletrodos auxiliares de tensão  $dP$  e corrente  $dA$ .



Fonte: Adaptado de Google Earth [21].

Seguindo esta metodologia, em cada uma das malhas foram feitas 108 medidas para impedância, e 108 medidas para a resistência de aterramento. Considerando as duas malhas, foram realizadas um total de 432 medidas, gerando um valioso volume de dados para a análise e fundamentação deste estudo.

### 3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a determinação da resistência de aterramento, o equipamento utilizado foi o terrômetro marca MEGABRAS modelo MTD-20KWe. Este equipamento opera na frequência de 1470 Hz, que elimina possíveis interferências geradas pelo sistema de 60 Hz [22].

Figura 15 – Terrômetro MTD-20KWe.



Fonte: Site Megabras [22].

Para a determinação da impedância de aterramento, foi utilizado um gerador de surtos portátil em conjunto com um osciloscópio, equipado com as ponteiras de tensão e corrente adequadas à amplitude e frequência do surto injetado. Este conjunto permite a captura adequada dos dados de tensão  $v(t)$  e corrente  $i(t)$ .

O gerador de surtos portátil utilizado segue os padrões estabelecidos pela IEC 61000-4-5, gerando à vazio uma frente de onda de tensão de  $1,2 \mu\text{s}$ , e de  $50 \mu\text{s}$  para o tempo de meia onda de tensão. Este mesmo gerador, tendo sua saída curto circuitada, gera uma forma de onda de  $8 \mu\text{s}$  para frente de onda de corrente, e de  $20 \mu\text{s}$  para o tempo de meia onda de corrente [11].

Figura 16 – Gerador de surtos portátil.



Fonte: Do autor, 02/02/2018.

Este gerador possui alimentação em 220 Vca, gerando uma tensão de impulso de saída a vazio de até 6 kV. Para as medidas realizadas, a tensão de impulso aplicada foi de 2 kV a vazio.

O osciloscópio utilizado foi o Tektronix DPO3014, com quatro canais não isolados, taxa de amostragem de 2,5 GS/s, largura de banda de 100 MHz, e tensão máxima de 300 V RMS [23].

Figura 17 – Osciloscópio Tektronix série 3000.



Fonte: Manual DPO3000 [23].

A ponteira de tensão utilizada foi a ponteira Tektronix P6015A. Esta é uma ponteira para alta tensão, podendo medir até 20 kV RMS, ou 40 kV pulsado. A frequência de resposta desta ponteira é de até 75 MHz. É uma ponteira passiva, com atenuação de 1000 vezes, impedância de 100 M $\Omega$  e capacitância menor ou igual que 3 pF. [24].

Figura 18 – Ponteira de alta tensão P6015A.



Fonte: Manual P6015A [24].

A ponteira de corrente utilizada foi a Tektronix TCP0020. É uma ponteira de corrente ativa com capacidade de medição de até 20 A RMS, ou até 100 A pulsado. A largura de banda para medição com esta ponteira vai desde corrente contínua até 50 MHz [25].

Figura 19 – Ponteira de corrente TCP0020.



Fonte: Manual TCP0020 [25].

### 3.3.1 Cálculo de incerteza das medidas de campo

O erro associado a uma medida é um parâmetro importante a ser avaliado durante uma pesquisa quantitativa, como é o caso deste estudo. Os dados experimentais devem ser acompanhados de um tratamento matemático, permitindo uma avaliação sobre sua confiabilidade. É através deste tratamento matemático que a qualidade dos dados pode ser determinada, ou seja, o quanto estes dados estão corretos, são aceitáveis ou mesmo infundados [26].

Neste trabalho, procurou-se avaliar as incertezas de cada medida, buscando verificar se os dados obtidos em campo estão dentro de uma margem de erro aceitável, seguindo a metodologia apresentada na ABNT ISO/IEC GUIA 98-3 [27].

Conforme define esta norma, a incerteza padrão combinada é definida pela raiz da soma quadrática do produto entre o coeficiente de sensibilidade e a incerteza de cada equipamento, conforme Equação (7) [27].

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 \cdot u(x_i)^2} \quad (7)$$

Onde:

$u_c$  = Incerteza padrão combinada

$C_i$  = Coeficiente de sensibilidade de cada equipamento

$u(x_i)$  = Incerteza padrão de cada equipamento

A determinação da incerteza expandida é definida pela Equação (8) [27].

$$U_p = k_p \cdot u_c \quad (8)$$

Onde:

$U_p$  = Incerteza expandida

$k_p$  = Fator de abrangência

Para as medidas de resistência e impedância, o valor absoluto da incerteza expandida é definido pela Equação (9).

$$\pm \Delta Z_i = U_p \cdot Z_i \quad (9)$$

Onde:

$\Delta Z_i$  = Incerteza expandida em valor absoluto

$Z_i$  = Valor absoluto medido

No caso da medição da resistência de aterramento, o terrômetro possui uma exatidão de  $\pm 2\%$  do valor medido  $\pm 1\%$  do fundo de escala [22]. O cálculo da incerteza expandida do terrômetro, para um coeficiente de sensibilidade unitário, fator de abrangência  $k = 2$  e nível de confiança de 95,45%, resultou em um valor de  $\pm 2,582\%$  de incerteza expandida.

No caso da medição da impedância de aterramento, a ponteira de tensão, a ponteira de corrente e o próprio osciloscópio possuem cada um seu próprio valor de incerteza. Estas incertezas estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1 – Parâmetros de incerteza do osciloscópio e das ponteiras

<b>Equipamento</b>	<b>Exatidão</b>
Exatidão osciloscópio (tensão)	$\pm 3\%$
Precisão ponteira alta tensão P6015A	$\pm 3\%$
Exatidão osciloscópio (corrente)	$\pm 1,5\%$
Ponteira corrente TCP0020	$\pm 1\%$

Fonte: Tektronix [23] [24] [25].

O cálculo da incerteza expandida para o conjunto do osciloscópio com suas ponteiras de tensão e corrente, também para um coeficiente de sensibilidade unitário, fator de abrangência  $k = 2$  e nível de confiança de 95,45%, resultou em um valor de  $\pm 6,245\%$  de incerteza expandida.

Como resultado destas comparações e validações, o anexo B apresenta os valores de incerteza expandida, em valores absolutos, das medidas de resistência de aterramento, utilizando os dados levantados em campo tanto pelo terrômetro quanto pelo osciloscópio.

### 3.4 REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DE CAMPO

Após a revisão bibliográfica e estabelecimento da metodologia de medição em campo, ocorreu o levantamento dos dados de campo. A bancada montada com os equipamentos de medição é apresentada na Fig. 20.

Figura 20 – Bancada do “setup” de medição para resistência e impedância.



Fonte: Do autor, 07/01/2018.

Conforme já mencionado anteriormente, os eletrodos auxiliares de tensão e de corrente possuem suas posições determinadas conforme tabela do anexo A deste trabalho.

Os condutores de ligação, dos eletrodos auxiliares de tensão  $dP$  e corrente  $dA$  com os instrumentos de medição, são cabos de cobre  $2,5 \text{ mm}^2$  com isolamento de PVC 750V. Foi optado por utilizar cabos ao invés de fitas, de alumínio ou de cobre, em função do grande número de medidas de campo. O uso da fita praticamente inviabilizaria a realização deste estudo em função do tempo necessário para instalação da fita e da grande quantidade de medidas realizadas.

O eletrodo auxiliar de tensão é composto por uma haste de aterramento vertical de  $5/8''$ , cravada a uma profundidade de cinquenta centímetros. O eletrodo auxiliar de corrente é composto por três hastes de aterramento vertical de  $5/8''$ , cravadas a um metro de profundidade, e espaçadas a um metro e meio entre si formando um triângulo equilátero.

Figura 21 – Condutores da bancada de medição até os eletrodos auxiliares.



Fonte: Do autor, 04/02/2018.

Estes condutores foram instalados em suportes de madeira com isolador plástico, garantindo o espaçamento entre os condutores e o solo.

Figura 22 – Estacas para suporte dos condutores dos eletrodos auxiliares.



Fonte: Do autor, 17/12/2017.



Após a conexão dos eletrodos auxiliares, da ponteira de tensão e da ponteira de corrente, o osciloscópio para a captura de dados é ajustado com os parâmetros da Tab. 2.

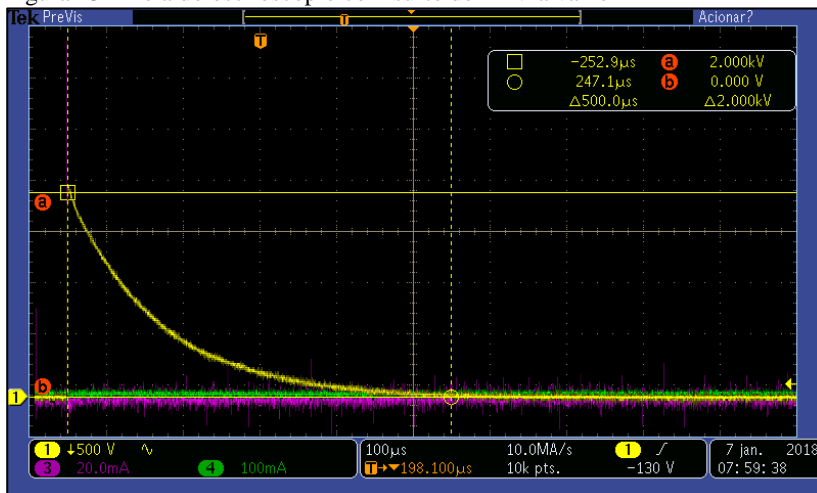
Tabela 2 – Parâmetros de ajuste do osciloscópio para “setup” montado

Variável	Valor ajuste
Waveform Type	ANALOG
Horizontal Units	Seconds
Horizontal Scale	0,0001
Sample Interval	1e-07
Record Length	10000
Gating	0,0% to 100,0%
Probe Atenuation	1000
Vertical Units	Volts
Vertical Offset	0
Vertical Scale	500
Vertical Position	-3,24

Fonte: Do autor.

Com os parâmetros da Tab. 2 aplicados, é possível realizar a captura da tensão de saída do gerador de surtos, no valor de 2 kV a vazio, no canal 1 do osciloscópio.

Figura 23 – Tela do osciloscópio com surto de 2 kV a vazio



Fonte: Do autor, 07/01/2018.

### 3.4.1 Cuidados para mitigação de interferências nas medições

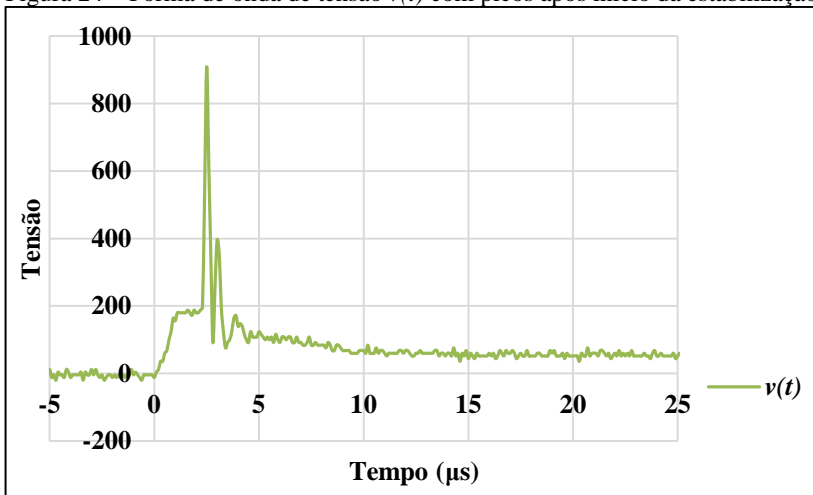
Durante a realização das medidas, foram encontradas três situações que geraram discrepâncias entre os valores esperados e os valores obtidos nas medições de campo: posicionamento da ponteira de tensão no circuito de teste, acoplamento entre os cabos de interligação dos eletrodos auxiliares, e fontes de alimentação e referência de terra remoto.

### 3.4.2 Posicionamento da ponteira de tensão

O primeiro problema encontrado foi no posicionamento da ponteira de tensão. Em função da facilidade de instalação, a primeira configuração da bancada de testes previa que a ponteira de tensão ficaria sobre a bancada, e seria feita uma conexão com condutor isolado da ponteira até a malha sob teste.

Porém, ao final das medidas, foi verificado que os valores de tensão capturados não condiziam com o valor esperado, apresentando picos após o início da estabilização da curva de tensão. A Fig. 24 apresenta a forma de onda de tensão  $v(t)$  onde este problema pôde ser constatado.

Figura 24 – Forma de onda de tensão  $v(t)$  com picos após início da estabilização



Fonte: Do autor, 01/09/2017.

Este problema foi solucionado com a conexão da ponteira de alta tensão diretamente nos condutores da malha de aterramento.

Figura 25 – Ponteira de alta tensão conectada diretamente na malha de aterramento



Fonte: Do autor, 15/10/2017.

### **3.4.3 Acoplamento indutivo entre os condutores dos eletrodos auxiliares de tensão e corrente**

Um dos fatores que precisam ser levados em consideração durante as medições de campo é o efeito do acoplamento indutivo entre os condutores de ligação dos eletrodos auxiliares  $dP$  e  $dA$ .

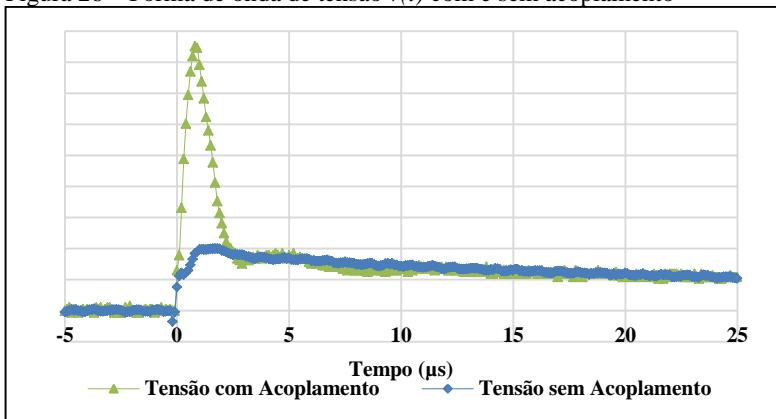
Para pequenos sistemas com altos valores de resistência de aterramento, o acoplamento indutivo pode não ser significativo o suficiente para influenciar nos resultados das medições de campo. No entanto, quando o sistema de aterramento é extenso, o mesmo não pode ser afirmado. Isso porque grandes sistemas de aterramento requerem grandes distâncias entre os eletrodos auxiliares e o sistema sob medição, além de geralmente possuírem pequenos valores de resistência de aterramento [28].

O comportamento deste efeito foi avaliado em 2001, por Dawalibi e Ma [28], onde, por meio de simulações, foi verificada a influência do acoplamento indutivo em função: da distância entre os condutores dos eletrodos auxiliares, e da frequência da fonte que excita o sistema durante as medições de campo.

Durante a realização deste estudo, nas medidas iniciais de campo, acreditou-se que uma distância de 40 cm entre os condutores e 30 cm para o solo seria suficiente para mitigar o acoplamento indutivo. No entanto, os resultados mostraram que este procedimento era insuficiente para as medidas de impedância com os eletrodos alinhados.

Após análise dos dados levantados em campo, percebeu-se a existência do acoplamento indutivo entre os condutores de interligação dos eletrodos auxiliares. Este acoplamento foi identificado pela deformação na forma de onda de tensão, apresentando um pico rápido e intenso no momento da aplicação do surto. A Fig. 26 apresenta a forma de onda de tensão com e sem acoplamento.

Figura 26 – Forma de onda de tensão  $v(t)$  com e sem acoplamento



Fonte: Do autor.

Após a constatação deste efeito, concluiu-se pela utilização dos eletrodos de tensão  $dP$  e de corrente  $dA$  posicionados ortogonalmente, ou seja, a 90 graus entre si, para mitigar o efeito do acoplamento indutivo entre os condutores.

### 3.4.4 Fontes de alimentação e referência de terra remoto

O terceiro problema encontrado foi com relação as fontes de alimentação dos equipamentos e referência de terra remoto.

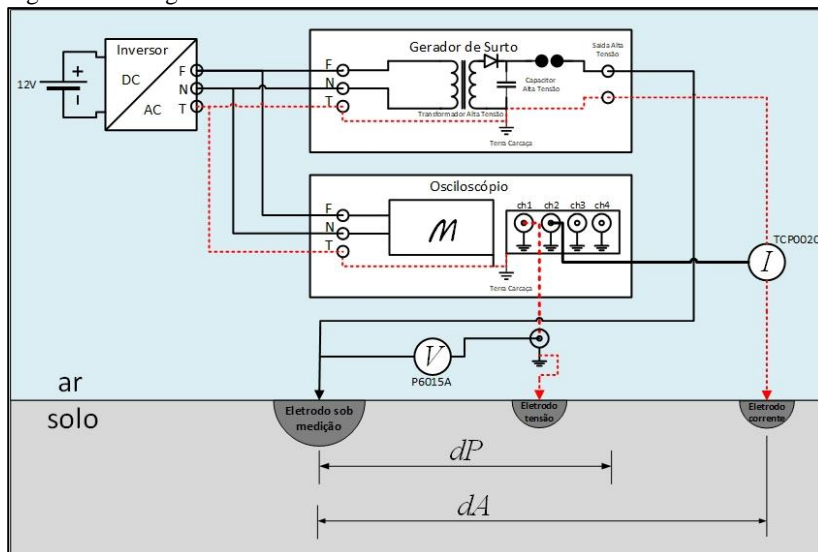
Como as malhas de aterramento estão instaladas em uma região longe de outras construções, justamente para evitar interferência de meios externos, a disponibilidade de alimentação comercial se tornava difícil por causa dessa distância. Como solução, foi utilizado um

inversor DC 12V para AC 220V, para alimentar tanto o gerador de surtos quanto o osciloscópio.

Como todos os equipamentos possuem pino de terra, ao ligar o gerador de surtos e o osciloscópio em uma única fonte, foi gerado um curto circuito entre o eletrodo auxiliar de corrente e o eletrodo auxiliar de tensão pelos pinos de terra do osciloscópio e do gerador de surtos. Este curto circuito entre os eletrodos auxiliares fez com que, do ponto de vista do gerador de surtos, estes dois eletrodos estivessem ligados em paralelo. Isso resultou em erros nas medidas do osciloscópio, pois ao invés de medir a tensão diferencial entre a malha e eletrodo auxiliar de tensão, foi mensurado a tensão total de saída do gerador de surtos.

A Fig. 27 apresenta o diagrama do curto circuito entre os eletrodos auxiliares, indicado pela linha tracejada. Após nova análise da teoria da IEEE 81 para a medição de impedância, e estudo do layout de ligação dos equipamentos, concluiu-se que seria possível a alimentação do gerador de surtos de uma fonte não-isolada se a alimentação do instrumento de medição fosse isolada.

Figura 27 – Diagrama do curto circuito entre eletrodos de tensão e corrente



Fonte: Do autor.

Assim, o gerador de surtos passou a ser alimentado pela rede de distribuição da concessionária local, com auxílio de uma extensão de 100 metros de comprimento sem o condutor de aterramento, e o inversor

de baterias passou a alimentar exclusivamente o osciloscópio. Acredita-se também que a utilização de um osciloscópio com canais isolados seria uma solução para este problema.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo, foi apresentada a metodologia das medições e os equipamentos utilizados nas medidas de campo. Foram apresentados também aspectos práticos relacionados às medidas de campo, necessários para evitar erros e acoplamentos, gerando dados confiáveis para análise e embasamento deste estudo.

De posse destes dados, o próximo capítulo é dedicado a apresentação e análise dos resultados de campo para resistência de aterramento e impedância de impulso.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo dedica-se a apresentação dos resultados das medidas de campo das malhas de aterramento, e de uma análise que visa a contribuição para o desenvolvimento de um método de determinação da impedância de impulso em locais com restrição de espaço.

Os resultados das medições no campo de testes, realizados com os eletrodos auxiliares posicionados no mesmo sentido para resistência e impedância, são apresentados no item 4.1.

Em função da constatação do acoplamento entre os condutores dos eletrodos auxiliares dispostos no mesmo sentido, foram realizadas novas medidas de campo com os eletrodos auxiliares em ortogonal. Os resultados das novas medidas são apresentados no item 4.2.

Utilizando-se dos dados medidos com o osciloscópio, é apresentada a proposta de um método para determinação da resistência de aterramento em regime permanente, a partir da análise da curva de corrente  $i(t)$  (item 4.3).

Por fim, em função dos resultados não satisfatórios da aplicação direta do PRED e do Tagg Estendido para as medidas com eletrodos em ortogonal, o item 4.4 é dedicado a uma análise do comportamento dos dados de campo em função da relação entre  $dP$ ,  $dA$  e a maior diagonal  $D$  da malha. O resultado desta análise é a constatação de que o comportamento das medidas varia também em função das dimensões da malha de aterramento, onde é apresentada uma proposta de uma equação geral para correção de valores medidos em locais com restrição de espaço, aplicáveis tanto para impedância de impulso quanto para resistência de aterramento.

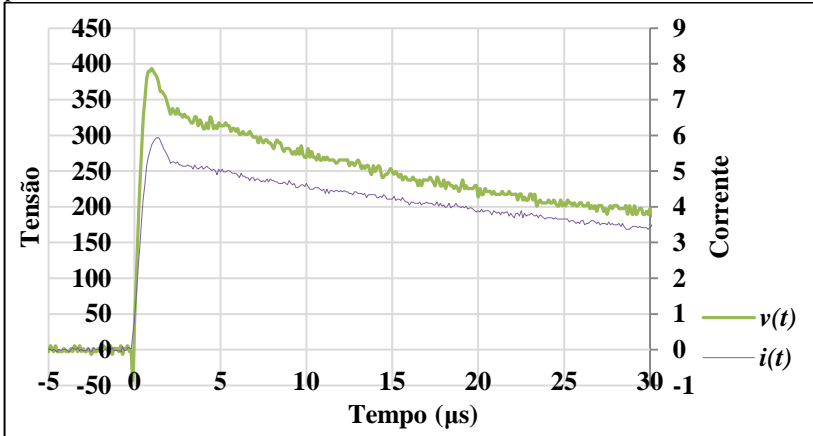
### 4.1 RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO PARA MEDIÇÕES COM ELETRODOS AUXILIARES NO MESMO SENTIDO

Neste tópico serão apresentados os resultados das medidas de campo das duas malhas de aterramento utilizadas neste estudo, com os eletrodos auxiliares de tensão e corrente no mesmo sentido.

Considerando o elevado número de medições, na apresentação dos resultados de impedância de impulso, será apresentada, a título de ilustração, uma forma de onda da tensão  $v(t)$  e corrente  $i(t)$  para cada uma das malhas de aterramento, na condição em que  $dA = 5D$  e  $dP = 0,6 dA$ .

#### 4.1.1 Impedância de impulso e impedância de surto na malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

Figura 28 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido,  $dA = 5D$ ,  $dP = 0,6 dA$



Fonte: Do autor.

Onde:

$$V_{max} = 393,52 \text{ V}$$

$$V_{Imax} = 381,52 \text{ V}$$

$$I_{max} = 5,9352 \text{ A}$$

$$\text{Resistência eletrodo auxiliar de corrente} = 304 \text{ } \Omega$$

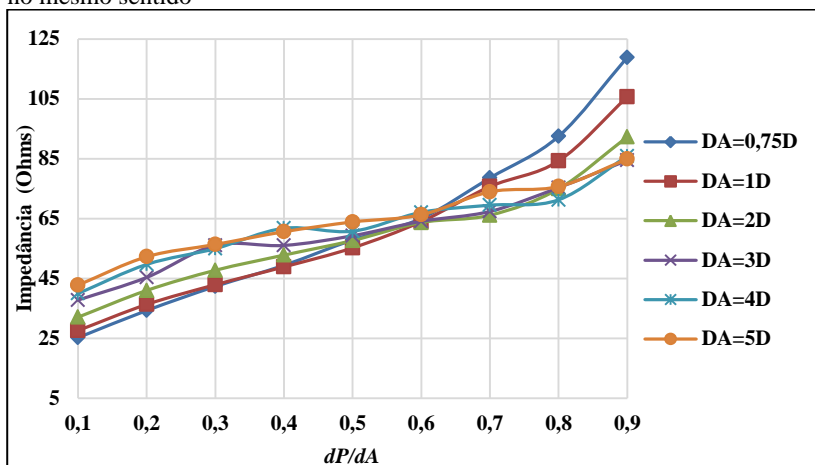
Tabela 3 – Impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	25,28	27,66	32,12	37,84	40,01	42,82
20%	34,34	36,37	41,04	45,40	49,73	52,29
30%	42,38	42,96	47,77	56,11	55,02	56,39
40%	49,44	48,91	52,84	56,07	61,81	60,65
50%	57,91	55,26	57,71	59,31	60,83	63,92
60%	65,09	64,01	63,72	64,14	67,13	66,30
70%	78,60	75,72	66,16	67,42	69,51	73,98
80%	92,49	84,27	74,97	75,36	71,31	75,73
90%	118,83	105,62	92,28	84,47	85,89	84,92

Fonte: Do autor.



Figura 29 – Curvas de impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido



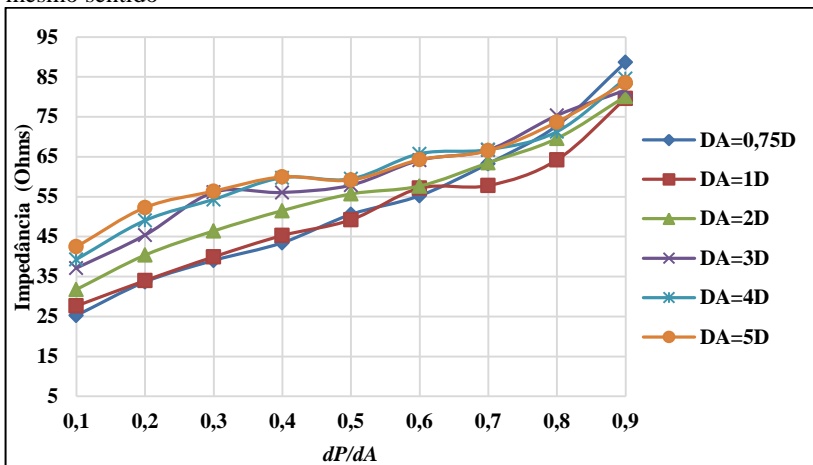
Fonte: Do autor.

Tabela 4 – Impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	25,28	27,66	31,78	37,14	39,32	42,48
20%	33,68	34,00	40,39	45,40	49,05	52,29
30%	39,06	39,95	46,44	56,11	54,33	56,39
40%	43,49	45,29	51,52	56,07	59,78	59,97
50%	50,58	49,22	55,70	57,90	59,47	59,18
60%	55,25	57,15	57,69	64,14	65,78	64,28
70%	63,29	57,80	63,52	66,72	66,79	66,52
80%	72,82	64,23	69,61	75,36	71,31	73,73
90%	88,69	79,59	80,14	81,70	84,56	83,56

Fonte: Do autor.

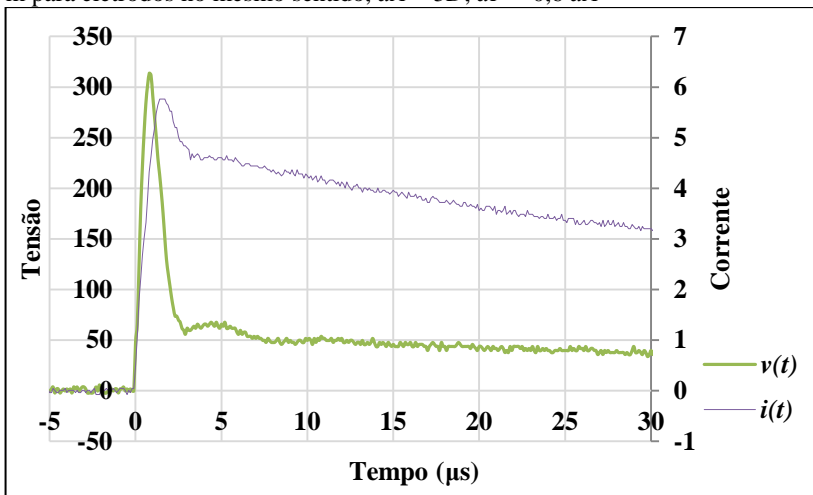
Figura 30 – Curvas de impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido



Fonte: Do autor.

#### 4.1.2 Impedância de impulso e impedância de surto na malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

Figura 31 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido,  $dA = 5D$ ,  $dP = 0,6 dA$



Fonte: Do autor.

Onde:

$$V_{max} = 313,64 \text{ V}$$

$$V_{I_{max}} = 213,64 \text{ V}$$

$$I_{max} = 5,7624 \text{ A}$$

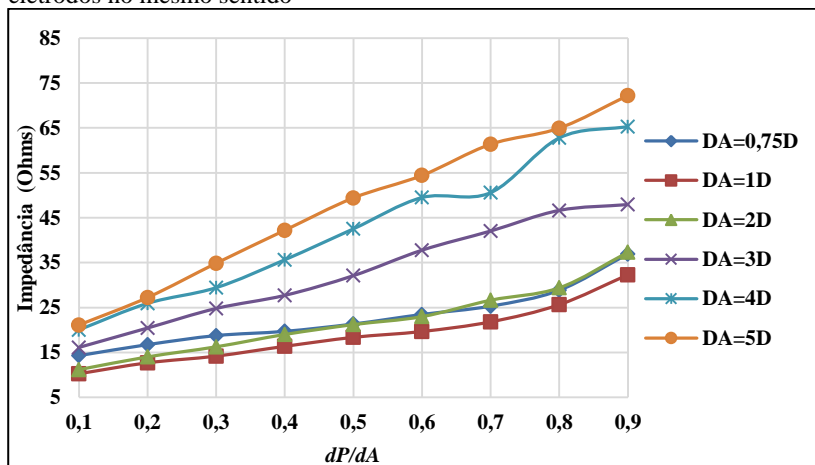
Resistência eletrodo auxiliar de corrente = 378  $\Omega$

Tabela 5 – Impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	14,31	10,29	11,20	16,14	20,06	21,13
20%	16,76	12,71	14,03	20,46	25,95	27,25
30%	18,77	14,20	16,28	24,81	29,44	34,88
40%	19,72	16,38	19,02	27,73	35,65	42,22
50%	21,35	18,38	21,22	32,11	42,53	49,42
60%	23,48	19,68	22,99	37,79	49,50	54,43
70%	25,33	21,83	26,65	42,05	50,59	61,36
80%	28,86	25,65	29,40	46,64	62,77	64,95
90%	36,94	32,30	37,31	47,94	65,30	72,21

Fonte: Do autor.

Figura 32 – Curvas de impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido



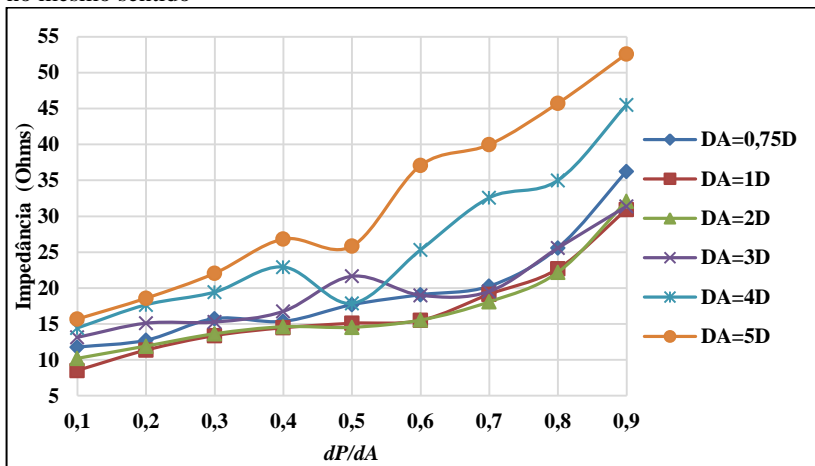
Fonte: Do autor.

Tabela 6 – Impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	11,78	8,54	10,22	13,14	14,44	15,69
20%	12,74	11,36	11,92	15,11	17,67	18,59
30%	15,76	13,38	13,64	15,27	19,44	22,06
40%	15,36	14,47	14,62	16,76	22,93	26,83
50%	17,68	15,10	14,54	21,64	17,87	25,84
60%	19,07	15,50	15,55	19,00	25,33	37,07
70%	20,27	19,14	18,09	19,54	32,58	39,98
80%	25,61	22,69	22,21	25,58	35,01	45,74
90%	36,25	30,93	32,08	31,39	45,51	52,61

Fonte: Do autor.

Figura 33 – Curvas de impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido



Fonte: Do autor.

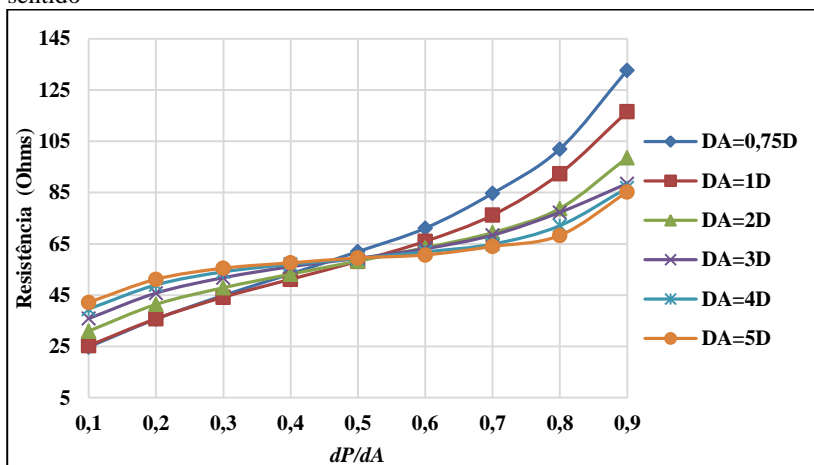
### 4.1.3 Resistência de aterramento na malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

Tabela 7 – Resistência de aterramento: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	24,8	25,3	31,0	35,9	39,6	42,2
20%	35,7	35,8	41,4	45,8	49,0	51,2
30%	44,9	44,2	47,9	51,8	54,1	55,5
40%	53,3	51,2	53,2	56,1	57,0	57,6
50%	62,0	58,2	58,3	59,4	59,3	59,5
60%	71,1	66	63,5	63,1	61,9	60,7
70%	84,7	76,2	69,4	68,4	64,9	64,0
80%	102	92,4	78,8	77,3	72,1	68,3
90%	132,7	116,5	98,6	88,5	86,8	85,2

Fonte: Do autor.

Figura 34 – Curvas de resistência: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido



Fonte: Do autor.

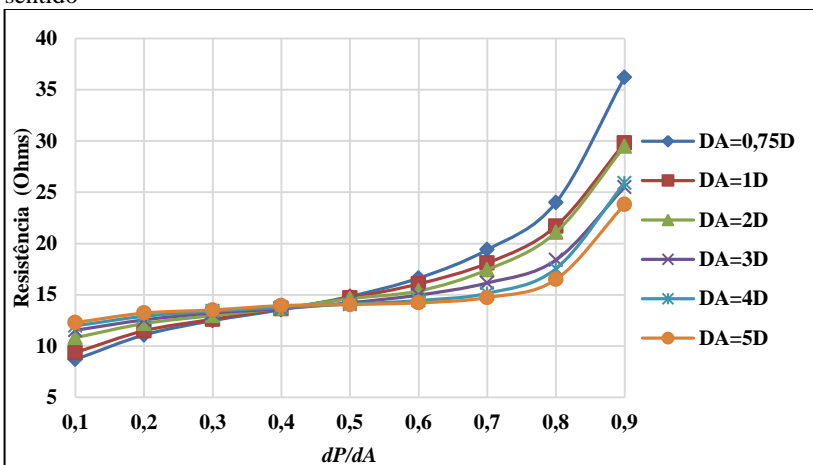
#### 4.1.4 Resistência de aterramento na malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

Tabela 8 – Resistência de aterramento: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	8,7	9,4	10,8	11,6	12,0	12,3
20%	11,1	11,5	12,2	12,6	12,9	13,2
30%	12,5	12,6	13,0	13,2	13,4	13,5
40%	13,6	13,7	13,7	13,7	13,8	14,0
50%	14,9	14,7	14,6	14,2	14,1	14,1
60%	16,6	16,1	15,4	15,0	14,5	14,2
70%	19,4	18,1	17,5	16,2	15,2	14,7
80%	24,0	21,7	21,1	18,4	17,6	16,5
90%	36,2	29,8	29,5	25,5	25,9	23,8

Fonte: Do autor.

Figura 35 – Curvas de resistência: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido



Fonte: Do autor.

#### 4.1.5 Estabelecimento dos valores teóricos e de patamar, e aplicação dos métodos PRED e Tagg estendido

Nos itens 4.1.1 a 4.1.4 deste estudo, foram apresentados os resultados das medições de campo com eletrodos auxiliares no mesmo sentido, tanto para impedância de impulso quanto para resistência de aterramento das malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m.

Adicionalmente, durante as medições de campo, foram realizadas também as medidas de resistividade e estratificação do solo pelo método de Wenner. A estratificação do solo indicou que a resistividade da camada superior do solo ( $\rho_1$ ) é de 1096,6  $\Omega$ .m. com uma profundidade ( $p$ ) de 15,3 metros, e a resistividade da camada inferior do solo ( $\rho_2$ ) é de 23,8  $\Omega$ .m. Esta estratificação é válida para ambas as malhas, e é apresentada no anexo C deste estudo.

Definida a estratificação do solo, são obtidos os valores teóricos por meio da fórmula de Sverak. Utilizando-se também da ferramenta computacional ANSYS Maxwell 3D, são obtidos os valores simulados das resistências de aterramento de ambas as malhas.

Com base nas medidas de campo, são estabelecidos os valores de patamar das malhas de aterramento, na condição do eletrodo auxiliar de corrente  $dA = 5D$ , e  $dP = 62\% dA$ , conforme determina a IEEE 81 para o valor de patamar. Estes valores são apresentados na Tab. 9.

Tabela 9 – Valores de patamar para resistência e impedância de impulso com eletrodos no mesmo sentido

Malha de aterramento	Fórmula de Sverak	Ansys Maxwell 3D	Resistência Aterramento (IEEE 81)	Impedância Impulso (IEEE 81)
5 m x 5 m	119,01 $\Omega$	81,47 $\Omega$	61,36 $\Omega$	68,22 $\Omega$
10 m x 10 m	53,94 $\Omega$	41,94 $\Omega$	14,32 $\Omega$	56,03 $\Omega$

Fonte: Do autor.

Percebe-se uma diferença significativa nos resultados da aplicação da fórmula de Sverak e da simulação pelo Ansys Maxwell 3D para obtenção da resistência de aterramento, quando comparados aos dados medidos em campo, para ambas as malhas de aterramento. A causa deste erro não está relacionada à fórmula de Sverak ou a aplicação da ferramenta computacional, mas sim em limitações físicas na medição de campo para estratificação do solo. Em função disso, os resultados teóricos e simulados não serão considerados para as comparações deste

estudo, e os valores de patamar medidos em campo serão os valores de referência.

A aplicação dos métodos Tagg Estendido e PRED ocorre para a condição em que  $dA = 0,75D$ , e são apresentados na Tab. 10.

Tabela 10 – Aplicação dos métodos PRED e Tagg Estendido para  $dA = 0,75D$

Malha de aterramento	Resistência de Aterramento			Impedância de Impulso		
	PRED	Tagg Est.	IEEE 81	PRED	Tagg Est.	IEEE 81
5 m x 5 m	50,92 $\Omega$	64,44 $\Omega$	61,36 $\Omega$	47,54 $\Omega$	59,39 $\Omega$	68,22 $\Omega$
10 m x 10 m	13,45 $\Omega$	14,11 $\Omega$	14,32 $\Omega$	19,68 $\Omega$	20,77 $\Omega$	56,03 $\Omega$

Fonte: Do autor.

A aplicação do método Tagg Estendido para a resistência de aterramento trouxe bons resultados para ambas as malhas de aterramento. O erro relativo da malha 5 m x 5 m foi de 5%, e para a malha 10 m x 10 m foi de 1,5%.

O método PRED apresentou bom resultado para a medida de resistência da malha 10 m x 10 m, mas um resultado nem tão preciso para a malha 5 m x 5 m. O erro relativo da malha 5 m x 5 m foi de 17%, e para a malha 10 m x 10 m foi de 6%.

Esse elevado erro relativo na malha 5 m x 5 m está possivelmente relacionado as medidas em distâncias extremamente próximas, da ordem de cinco metros de distância entre o eletrodo auxiliar de corrente e a malha de aterramento. Esse efeito já havia sido apontado no estudo que estabeleceu o PRED, em função da resistência mútua dos eletrodos pela proximidade entre eles [3].

Para a aplicação destes métodos para as medidas de impedância de impulso, percebe-se uma resposta insatisfatória, com elevadas discrepâncias entre os valores de patamar e os valores obtidos pelos métodos. Essas discrepâncias não estão relacionadas aos métodos PRED ou Tagg Estendido, mas sim possuem relação com o acoplamento indutivo entre os condutores dos eletrodos auxiliares de tensão e de corrente.

#### 4.1.6 Avaliação do acoplamento indutivo entre os condutores dos eletrodos auxiliares de tensão e corrente

Conforme abordado no item 3.4.3 deste estudo, as medidas com os eletrodos auxiliares de tensão e corrente no mesmo sentido



apresentaram um acoplamento indutivo entre seus condutores, gerando uma deformação na forma de onda da tensão  $v(t)$ . Como resultado, os valores de impedância de impulso, de ambas as malhas, não apresentaram o comportamento típico de uma curva de impedância para uma medição pelo método da queda de potencial. Isso é constatado principalmente nas curvas de impedância em medidas com  $dA = 5D$ , pois não houve formação de patamar, ao contrário do que foi obtido para as medidas de resistência de aterramento nesta mesma condição. O efeito do acoplamento é mais evidente nas medidas com maiores distâncias envolvidas, logo, a maior influência deste efeito é constatada nas medidas da malha 10 m x 10 m.

Esta constatação sobre os resultados faz concluir que não é possível a realização de medidas de campo para impedância com os eletrodos auxiliares de tensão e corrente no mesmo sentido. Em função disso, optou-se pela utilização dos eletrodos de tensão  $dP$  e de corrente  $dA$  posicionados ortogonalmente, ou seja, a 90 graus entre si, para mitigar o efeito do acoplamento indutivo entre os condutores dos eletrodos auxiliares. Novas medidas de campo foram realizadas, e os resultados são apresentados no item 4.2 deste estudo.

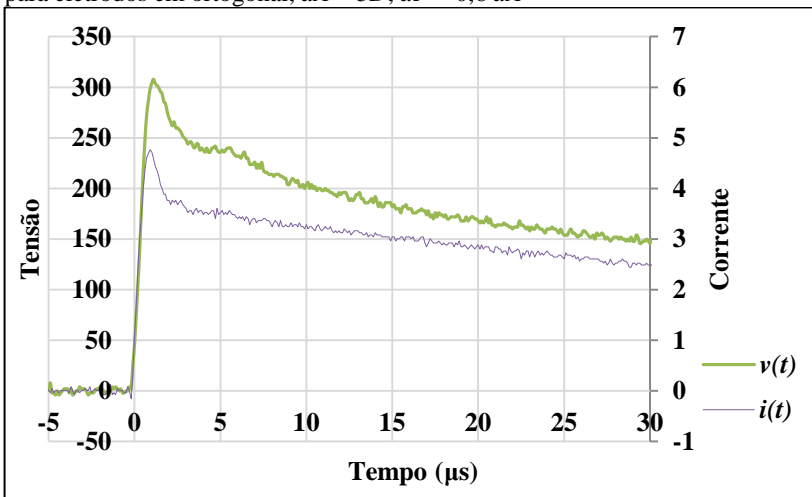
## 4.2 RESULTADOS DOS TESTES DE CAMPO PARA MEDIÇÕES COM ELETRODOS AUXILIARES EM ORTOGONAL

Neste tópico serão apresentados os resultados das medidas de campo das duas malhas de aterramento utilizadas neste estudo, com os eletrodos auxiliares de tensão e corrente posicionados em ortogonal.

Considerando o elevado número de medições, novamente será apresentada, a título de ilustração, uma forma de onda da tensão  $v(t)$  e corrente  $i(t)$  para cada uma das malhas de aterramento, na condição em que  $dA = 5D$  e  $dP = 0,6 dA$ .

### 4.2.1 Impedância de impulso e de surto na malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

Figura 36 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal,  $dA = 5D$ ,  $dP = 0,6 dA$



Fonte: Do autor.

Onde:

$$V_{max} = 307,88 \text{ V}$$

$$V_{Imax} = 297,88 \text{ V}$$

$$I_{max} = 4,7632 \text{ A}$$

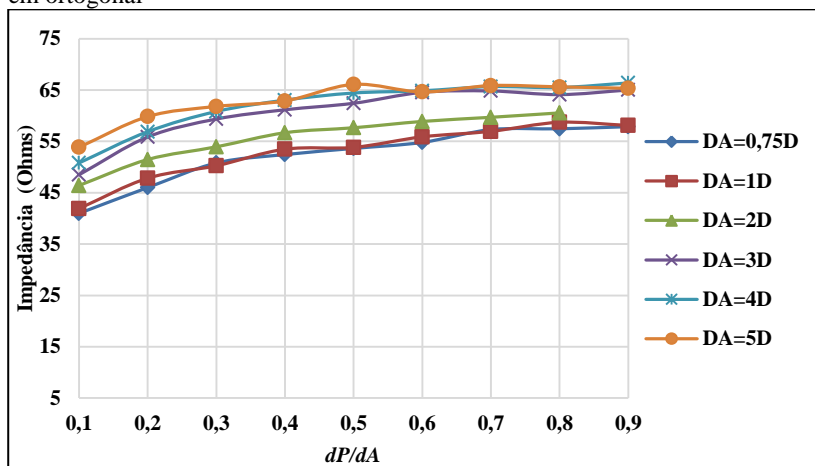
$$\text{Resistência eletrodo auxiliar de corrente} = 470 \text{ } \Omega$$

Tabela 11 – Impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	40,98	41,92	46,41	48,50	50,80	53,85
20%	46,00	47,83	51,47	55,86	56,89	59,83
30%	50,80	50,26	53,94	59,35	60,83	61,81
40%	52,44	53,49	56,69	61,16	63,04	62,88
50%	53,63	53,84	57,66	62,43	64,42	66,11
60%	54,81	55,89	58,89	64,55	64,86	64,64
70%	57,30	56,96	59,69	64,82	65,67	65,87
80%	57,46	58,72	60,55	64,12	65,50	65,62
90%	57,87	58,11	-	65,01	66,39	65,34

Fonte: Do autor.

Figura 37 – Curvas de impedância de impulso: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal



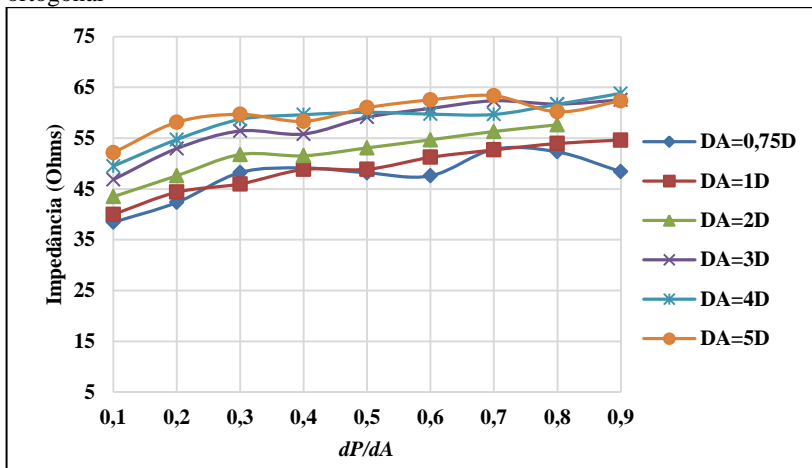
Fonte: Do autor.

Tabela 12 – Impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	38,44	40,00	43,48	46,85	49,51	52,14
20%	42,35	44,36	47,60	52,96	54,73	58,13
30%	48,24	45,99	51,78	56,42	58,70	59,69
40%	49,13	48,83	51,54	55,82	59,61	58,32
50%	48,18	48,87	53,09	59,12	60,10	61,00
60%	47,58	51,22	54,68	60,85	59,73	62,54
70%	52,80	52,69	56,32	62,36	59,67	63,35
80%	52,30	53,95	57,63	61,71	61,67	60,18
90%	48,40	54,62	-	62,52	63,81	62,37

Fonte: Do autor.

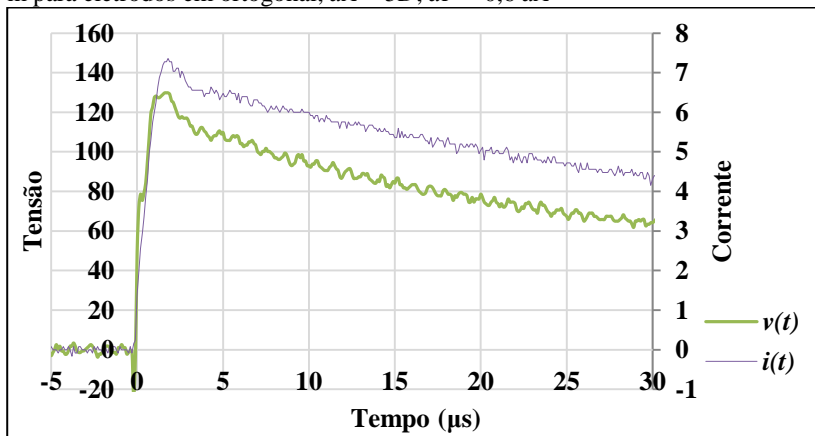
Figura 38 – Curvas de impedância de surto: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal



Fonte: Do autor.

## 4.2.2 Impedância de impulso e de surto na malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

Figura 39 – Curvas de tensão e corrente em função do tempo: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal,  $dA = 5D$ ,  $dP = 0,6 dA$



Fonte: Do autor.

Onde:

$$V_{max} = 137,82 \text{ V}$$

$$V_{Imax} = 130,64 \text{ V}$$

$$I_{max} = 7,5296 \text{ A}$$

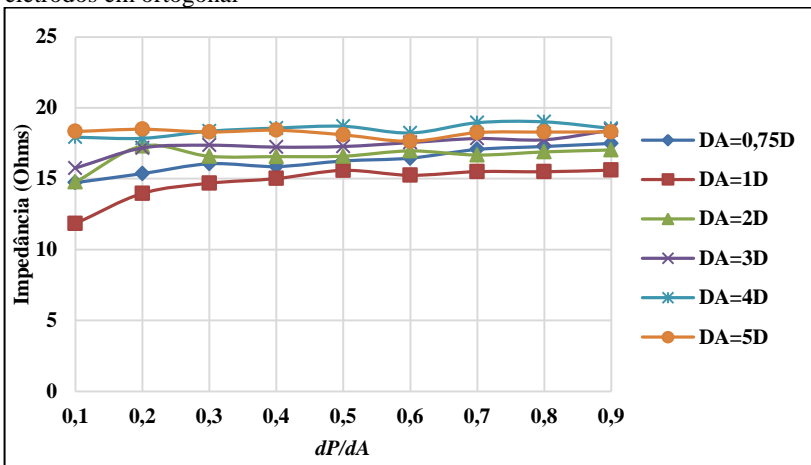
$$\text{Resistência eletrodo auxiliar de corrente} = 274 \text{ } \Omega$$

Tabela 13 – Impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	14,72	11,83	14,76	15,75	17,93	18,33
20%	15,36	13,96	17,31	17,17	17,85	18,49
30%	16,05	14,68	16,58	17,36	18,35	18,30
40%	15,86	15,01	16,56	17,23	18,57	18,42
50%	16,26	15,59	16,59	17,27	18,70	18,10
60%	16,45	15,24	16,96	17,55	18,23	17,64
70%	17,07	15,50	16,67	17,83	18,95	18,25
80%	17,27	15,49	16,89	17,75	19,01	18,29
90%	17,49	15,61	17,03	18,43	18,55	18,30

Fonte: Do autor.

Figura 40 – Curvas de impedância de impulso: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal



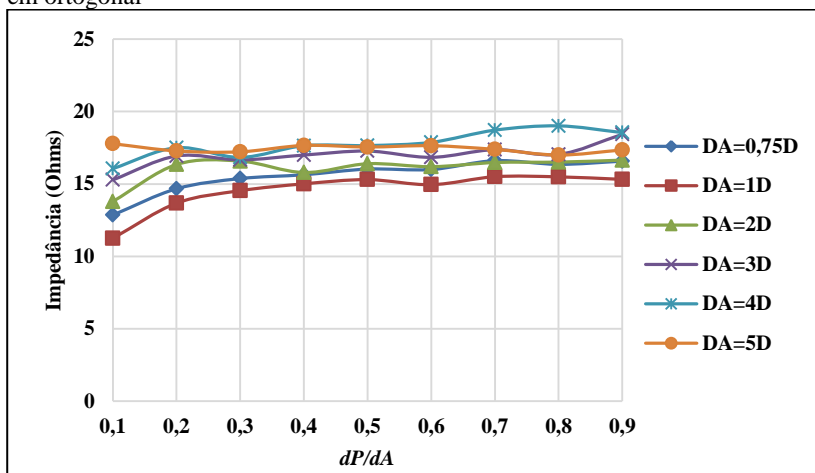
Fonte: Do autor.

Tabela 14 – Impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	12,86	11,25	13,79	15,28	16,06	17,78
20%	14,67	13,67	16,34	16,93	17,50	17,28
30%	15,37	14,54	16,58	16,66	16,84	17,22
40%	15,64	15,01	15,79	17,00	17,64	17,66
50%	16,03	15,30	16,40	17,27	17,65	17,55
60%	16,00	14,95	16,19	16,84	17,87	17,64
70%	16,61	15,50	16,48	17,37	18,72	17,39
80%	16,36	15,49	16,51	17,04	19,01	17,00
90%	16,58	15,32	16,65	18,43	18,55	17,35

Fonte: Do autor.

Figura 41 – Curvas de impedância de surto: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal



Fonte: Do autor.

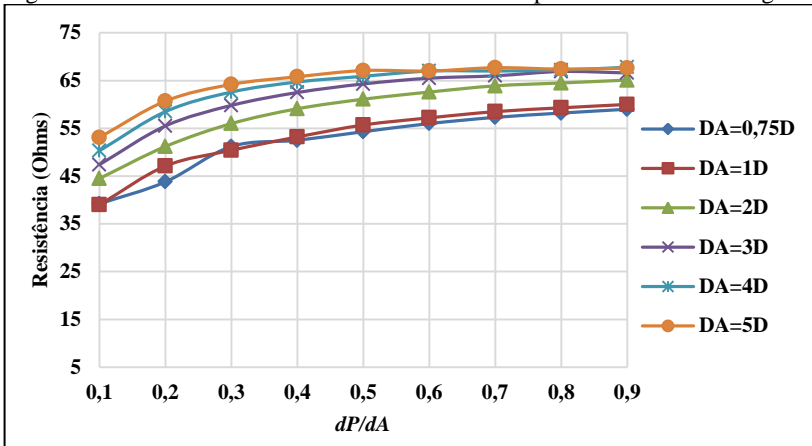
### 4.2.3 Resistência de aterramento na malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

Tabela 15 – Resistência de aterramento: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	39,2	39	44,5	47,4	50,3	53,1
20%	43,8	47,1	51,2	55,5	58,5	60,7
30%	51,2	50,4	56	59,8	62,6	64,2
40%	52,5	53,2	59,1	62,5	64,7	65,8
50%	54,3	55,7	61,1	64,3	65,9	67,1
60%	56	57,2	62,6	65,5	67	67
70%	57,3	58,5	63,9	66	67	67,7
80%	58,2	59,3	64,5	66,9	67,2	67,4
90%	59	60	65,1	66,6	67,8	67,6

Fonte: Do autor.

Figura 42 – Curvas de resistência: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal



Fonte: Do autor.

#### 4.2.4 Resistência de aterramento na malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

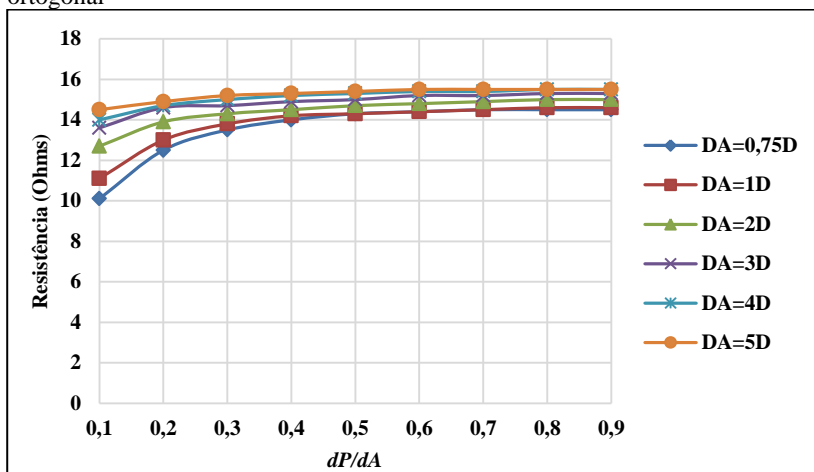
Tabela 16 – Resistência de aterramento: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	10,1	11,1	12,7	13,6	14	14,5
20%	12,5	13	13,9	14,6	14,7	14,9
30%	13,5	13,8	14,3	14,7	15	15,2
40%	14	14,2	14,5	14,9	15,2	15,3
50%	14,3	14,3	14,7	15	15,3	15,4
60%	14,4	14,4	14,8	15,2	15,4	15,5
70%	14,5	14,5	14,9	15,2	15,4	15,5
80%	14,5	14,6	15	15,3	15,5	15,5
90%	14,5	14,6	15	15,3	15,5	15,5

Fonte: Do autor.



Figura 43 – Curvas de resistência: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal



Fonte: Do autor.

#### 4.2.5 Estabelecimento dos valores teóricos e de patamar, e aplicação dos métodos PRED e Tagg estendido

Nos itens 4.2.1 a 4.2.4, foram apresentados os resultados das medições de campo com eletrodos auxiliares em ortogonal, tanto para impedância de impulso quanto para resistência de aterramento das malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m.

Adicionalmente, durante as medições de campo, foram realizadas também as medidas de resistividade do solo pelo método de Wenner. A estratificação do solo indicou que a resistividade da camada superior do solo ( $\rho_1$ ) é de 608,4  $\Omega \cdot m$ . com uma profundidade ( $p$ ) de 5,6 metros, e a resistividade da camada inferior do solo ( $\rho_2$ ) é de 15,8  $\Omega \cdot m$ . Esta estratificação é válida para ambas as malhas, e também é apresentada no anexo C deste estudo.

Definida a estratificação do solo, são obtidos os valores teóricos por meio da fórmula de Sverak. Utilizando-se também da ferramenta computacional ANSYS Maxwell 3D, são obtidos os valores simulados das resistências de aterramento de ambas as malhas.

Com base nas medidas de campo, são estabelecidos os valores de patamar das malhas de aterramento, na condição do eletrodo auxiliar de corrente  $dA = 5D$ , e  $dP = 62\% dA$ , conforme determina a IEEE 81 para o valor de patamar. Estes valores são apresentados na Tab. 17.

Tabela 17 – Valores de patamar para resistência e impedância para eletrodos em ortogonal

Malha de aterramento	Fórmula de Sverak	Ansys Maxwell 3D	Resistência Aterramento (IEEE 81)	Impedância Impulso (IEEE 81)
5 m x 5 m	61,97 $\Omega$	41,08 $\Omega$	67,34 $\Omega$	65,48 $\Omega$
10 m x 10 m	21,35 $\Omega$	18,04 $\Omega$	15,48 $\Omega$	18,03 $\Omega$

Fonte: Do autor.

Percebe-se novamente uma discrepância significativa nos resultados da aplicação da fórmula de Sverak e da simulação pelo Ansys Maxwell 3D para obtenção da resistência de aterramento, quando comparados aos dados medidos em campo, para ambas as malhas de aterramento.

A causa desta discrepância novamente não está relacionada a fórmula de Sverak ou a aplicação da ferramenta computacional, mas sim em limitações físicas na medição de campo para estratificação do solo. Em função disso, os resultados teóricos e simulados novamente não serão considerados para as comparações deste estudo, e os valores de patamar medidos em campo serão os valores de referência.

A aplicação dos métodos Tagg Estendido e PRED ocorre para a condição em que  $dA = 0,75D$ . Os resultados desta comparação são apresentados na Tab. 18.

Tabela 18 – Aplicação dos métodos PRED e Tagg Estendido para  $dA = 0,75D$ 

Malha de aterramento	Resistência de Aterramento			Impedância de Impulso		
	PRED	Tagg Est.	IEEE 81	PRED	Tagg Est.	IEEE 81
5 m x 5 m	51,92 $\Omega$	56,61 $\Omega$	67,34 $\Omega$	51,82 $\Omega$	55,98 $\Omega$	65,48 $\Omega$
10 m x 10 m	13,99 $\Omega$	14,40 $\Omega$	15,48 $\Omega$	15,98 $\Omega$	16,34 $\Omega$	18,03 $\Omega$

Fonte: Do autor.

Como pode ser constatado, a aplicação direta destes métodos para distâncias reduzidas nos dados levantados em campo traz uma discrepância considerável para a resistência e impedância de impulso de patamar das malhas de aterramento.

A causa provável desta discrepância está relacionada com o desenvolvimento destes métodos. Eles foram concebidos para correção de medição com eletrodos no mesmo sentido e, com isso, verifica-se que a aplicação direta destes métodos para medidas com eletrodos em ortogonal não apresenta resultados satisfatórios.

### 4.3 PROPOSTA DE MÉTODO PARA DETERMINAR A RESISTÊNCIA EM REGIME PERMANENTE NA CURVA DE IMPEDÂNCIA TRANSITÓRIA: MÉTODO DA DERIVADA DE CORRENTE

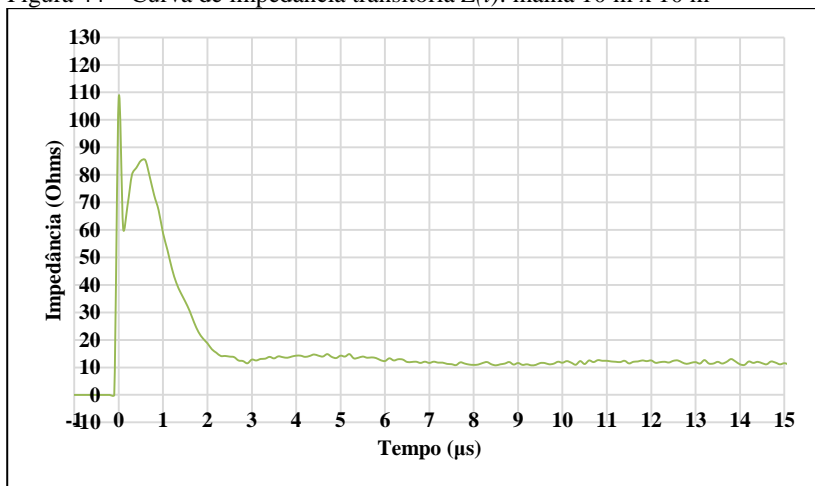
A relação entre tensão e corrente ao longo do tempo, durante a injeção de um surto num sistema de aterramento, resulta na curva de impedância transitória  $Z(t)$ .

Como exemplo, a Fig. 31 apresentou, a título de ilustração, as curvas de tensão e corrente aplicadas na malha 10 m x 10 m,  $dA = 5D$ ,  $dP = 0,6 dA$ , medidas com os eletrodos de tensão e de corrente no mesmo sentido. A Fig. 44 apresenta a impedância transitória  $Z(t)$  desta medida de campo.

Segundo a IEEE 81, no instante de tempo em que corrente  $i(t)$  possuir sua derivada igual a zero ( $di/dt = 0$ ), a razão da tensão  $v(t)$  e da corrente  $i(t)$  é denominada como impedância de surto. Sobre o momento em que a impedância transitória apresenta o valor da resistência de aterramento em regime permanente, esta especificação não está presente na IEEE 81, e nem em nenhuma outra referência pesquisada.

Em função disso, a primeira investigação feita neste estudo é sobre o momento em que a resistência em regime permanente pode ser obtida dentro da curva de impedância transitória  $Z(t)$ .

Figura 44 – Curva de impedância transitória  $Z(t)$ : malha 10 m x 10 m



Fonte: Do autor.

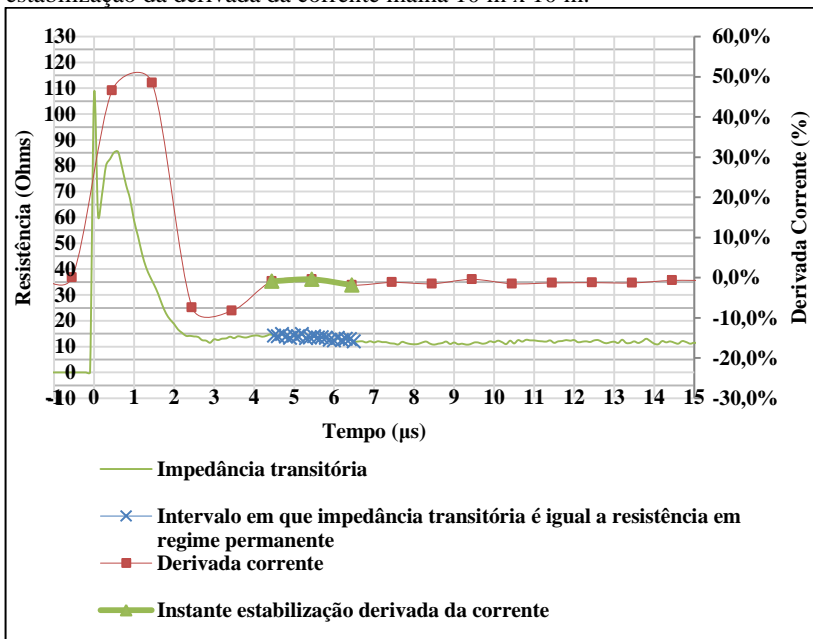
As primeiras análises foram focadas no estudo dos valores de cauda do surto, considerando que esta seria a resposta em regime permanente. Da teoria de circuitos elétricos, o tempo de estabilização de um impulso em um circuito é igual a  $5\tau$  (tau), onde  $\tau$  corresponde ao tempo em que o circuito decai até aproximadamente 37% do valor máximo do surto aplicado. A aplicação deste conceito para determinar a resistência de aterramento em regime permanente, neste caso, não apresentou resultados satisfatórios, por isso essa abordagem deixou de ser utilizada.

Na segunda abordagem, foi calculada a taxa de variação instantânea percentual da curva de corrente  $i(t)$  (em passos de  $1 \mu\text{s}$ ), dado pela Equação (10).

$$i'(t) = \frac{i(t+1) - i(t)}{I_{max}} \quad [\%] \quad (10)$$

Aplicando esta equação na curva de corrente  $i(t)$  da Fig. 31, foi obtida a curva da derivada de corrente, apresentada na Fig. 45.

Figura 45 – Curva de impedância transitória  $Z(t)$  indicando momento de estabilização da derivada da corrente malha 10 m x 10 m.



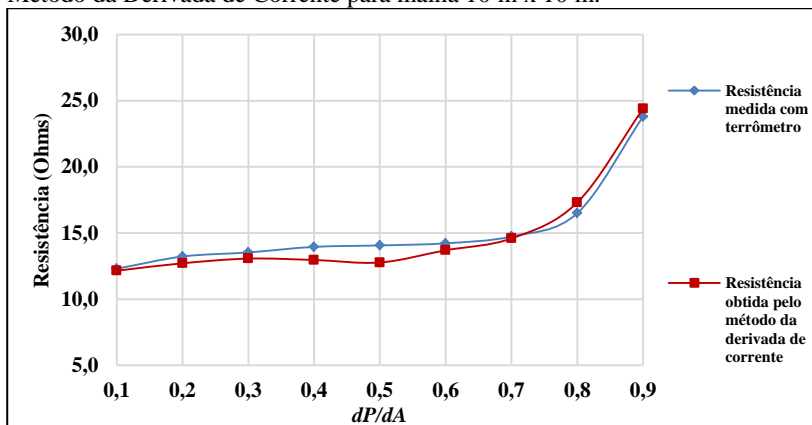
Fonte: Do autor.

As maiores taxas de variação da corrente, tanto positiva quanto negativa, estão próximas do momento em que ocorre a corrente de pico do surto injetado. Após estes altos valores, a taxa de variação tende a decair linearmente, com taxa negativa próxima de -1%.

As análises da curva da impedância transitória e da curva da derivada da corrente, permitem determinar que o valor de regime permanente ocorre no primeiro instante de tempo em que a derivada da corrente se estabiliza, e passa a decair em uma tendência linear. Este instante de tempo também está destacado nas curvas da Fig. 45, tanto na curva da derivada de corrente, como na curva da impedância transitória  $Z(t)$ .

A Fig. 46 apresenta os valores obtidos por este método para a malha 10 m x 10 m, aplicada com  $dA = 5D$ , com eletrodos de tensão e corrente no mesmo sentido.

Figura 46 – Curvas de resistência de aterramento obtidas pelo terrômetro e pelo Método da Derivada de Corrente para malha 10 m x 10 m.



Fonte: Do autor.

Vale ressaltar que este método não tem como objetivo a determinação do valor da resistência de aterramento de patamar do sistema sob medição. Este método visa a determinação do valor da resistência em regime permanente da medida em questão.

A grande vantagem da utilização deste método está no fato de não ser necessário a utilização do terrômetro para determinação da resistência de aterramento, visto que agora este valor pode ser extraído diretamente da curva de impedância transitória  $Z(t)$ . Enquanto que, uma medida de campo com o uso do terrômetro retorna como resultado a

resistência de aterramento, o uso do gerador de surtos possibilita a obtenção dos valores de resistência de aterramento (com a aplicação deste método proposto) e impedância transitória  $Z(t)$ , assim como a possibilidade de medições das tensões de toque e tensões de passo, parâmetros necessários para avaliar o desempenho e a segurança de uma malha de aterramento ao longo de sua vida útil.

Além disso, a resistência em regime permanente é obtida num instante de tempo em que está circulando pelo sistema em torno de 70% do valor máximo da corrente injetada durante o surto. Essa característica faz com que o valor da medição possua uma maior fidelidade com a real situação do sistema sob medição, sendo excitado por altos valores de corrente.

Após esta apresentação, os próximos itens apresentam os resultados da aplicação deste método em todas as medidas com eletrodos no mesmo sentido (item 4.3.1) e com eletrodos em ortogonal (item 4.3.2).

### 4.3.1 Resultados da aplicação método derivada da corrente para eletrodos no mesmo sentido

#### 4.3.1.1 Resultados da aplicação do Método da Derivada de Corrente na malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

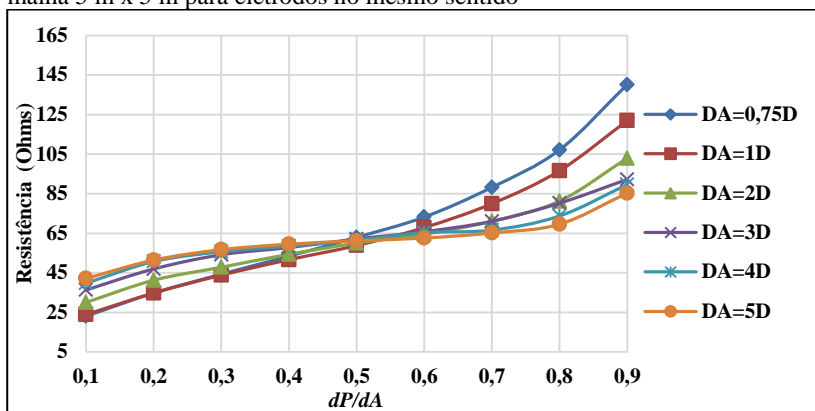
As curvas de resistência para a malha 5 m x 5 m, obtidas pelo Método da Derivada de Corrente, apresentam-se conforme Tab. 19.

Tabela 19 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	23,07	23,89	30,04	36,32	39,73	42,10
20%	34,77	34,75	41,25	46,94	50,69	51,43
30%	44,31	43,80	47,81	54,13	55,65	56,70
40%	53,40	51,62	54,37	57,75	58,51	59,47
50%	62,92	58,79	59,99	62,12	61,51	61,19
60%	73,18	67,86	64,54	65,78	65,33	62,56
70%	88,21	79,94	71,06	71,04	66,58	65,13
80%	107,15	96,62	81,25	80,21	73,73	69,56
90%	140,18	121,93	102,95	92,20	89,59	85,30

Fonte: Do autor.

Figura 47 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos no mesmo sentido



Fonte: Do autor.

Tendo-se como referência os valores apresentados na Tab. 7, a média dos erros relativos é de 2,88%, enquanto que o erro máximo obtido é de 6,99%, o que representa um valor absoluto de 1,73  $\Omega$ .

#### 4.3.1.2 Resultados da aplicação do Método da Derivada de Corrente na malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

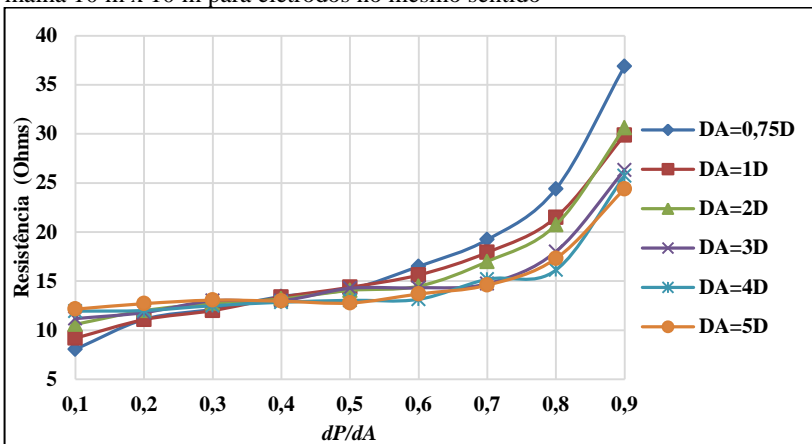
As curvas de resistência para a malha 10 m x 10 m, obtidas pelo Método da Derivada de Corrente, apresentaram-se conforme Tab. 20.

Tabela 20 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	8,06	9,19	10,60	11,19	11,94	12,15
20%	11,10	11,08	11,99	11,80	12,01	12,71
30%	12,14	12,00	12,74	13,00	12,50	13,06
40%	13,43	13,37	13,19	13,01	12,85	12,96
50%	14,18	14,38	14,06	14,27	13,05	12,77
60%	16,51	15,63	14,49	14,32	13,15	13,69
70%	19,23	17,92	17,00	14,73	15,19	14,59
80%	24,40	21,50	20,73	18,01	16,13	17,31
90%	36,88	29,87	30,63	26,30	25,71	24,40

Fonte: Do autor.

Figura 48 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos no mesmo sentido



Fonte: Do autor.

Tendo-se como referência os valores apresentados na Tab. 8, a média dos erros relativos é de 2,78%, enquanto que o erro máximo obtido é de 9,17%. Esse erro de 9,17%, no valor da resistência de aterramento da malha 10 m x 10 m, representa o valor absoluto de 1,3  $\Omega$ .

Com a apresentação dos resultados para as malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m para os eletrodos auxiliares no mesmo sentido, fica comprovada a eficácia deste método para a determinação da resistência em regime permanente dentro da curva de impedância transitória  $Z(t)$ .

### 4.3.2 Resultados da aplicação método derivada da corrente para eletrodos em ortogonal

#### 4.3.2.1 Resultados da aplicação do Método da Derivada De Corrente na malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

As curvas de resistência para a malha 5 m x 5 m, obtidas pelo Método da Derivada de Corrente, apresentam-se conforme Tab. 21.

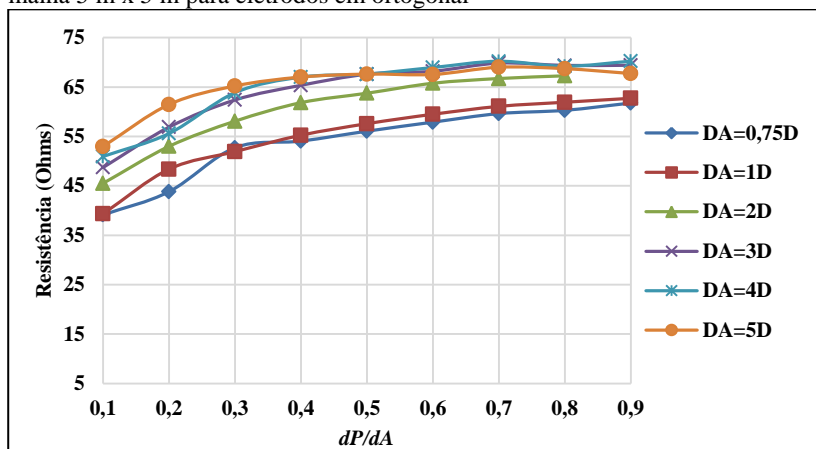


Tabela 21 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	39,13	39,34	45,51	48,72	50,95	52,97
20%	43,82	48,38	53,00	56,88	55,60	61,46
30%	52,73	51,93	58,09	62,38	63,86	65,22
40%	54,06	55,25	61,84	65,35	67,01	67,01
50%	56,06	57,58	63,75	67,58	67,63	67,61
60%	57,89	59,49	65,77	68,20	68,95	67,54
70%	59,62	61,09	66,72	69,84	70,22	69,01
80%	60,29	61,92	67,27	69,37	69,21	68,72
90%	61,76	62,72	-	69,41	70,23	67,74

Fonte: Do autor.

Figura 49 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 5 m x 5 m para eletrodos em ortogonal



Fonte: Do autor.

Tendo-se como referência os valores apresentados na Tab. 15, a média dos erros relativos é de 3,11%, enquanto que o erro máximo obtido é de 5,82%. Esse erro de 5,82% no valor da resistência de aterramento da malha 5 m x 5 m representa um valor absoluto de 3,84  $\Omega$ .

4.3.2.2 Resultados da aplicação do Método da Derivada De Corrente na malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

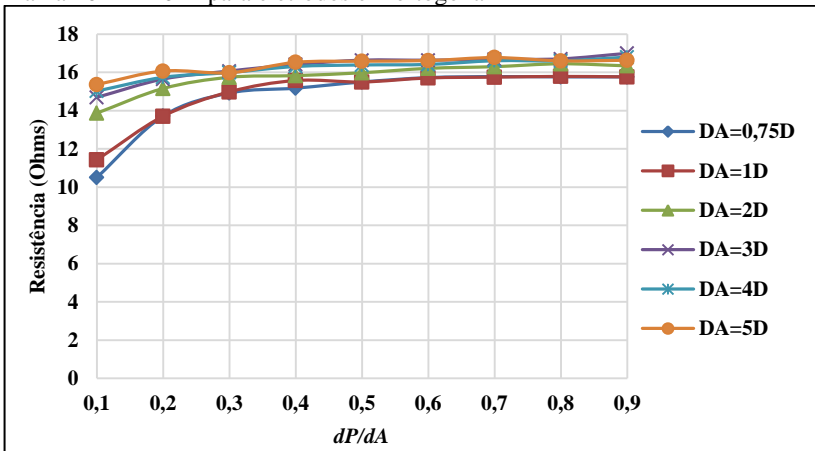
As curvas de resistência para a malha 10 m x 10 m, obtidas pelo Método da Derivada de Corrente, apresentaram-se conforme Tab. 22.

Tabela 22 – Resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	10,50	11,43	13,87	14,70	15,03	15,37
20%	13,72	13,71	15,16	15,65	15,74	16,07
30%	14,92	14,99	15,75	16,07	15,99	15,98
40%	15,18	15,58	15,83	16,42	16,31	16,53
50%	15,50	15,50	15,98	16,64	16,39	16,59
60%	15,73	15,71	16,21	16,64	16,42	16,62
70%	15,78	15,75	16,30	16,69	16,61	16,78
80%	15,77	15,79	16,45	16,71	16,61	16,61
90%	15,77	15,77	16,34	17,00	16,80	16,64

Fonte: Do autor.

Figura 50 – Curvas de resistência de aterramento pela Derivada de Corrente: malha 10 m x 10 m para eletrodos em ortogonal



Fonte: Do autor.

Tendo-se como referência os valores apresentados na Tab. 16, a média dos erros relativos é de 8,24%, enquanto que o erro máximo obtido é de 11,11%. Esse erro de 11,11%, no valor da resistência de aterramento da malha 10 m x 10 m, representa o valor absoluto de 1,7  $\Omega$ .

Com a apresentação dos resultados para as malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m para os eletrodos auxiliares em ortogonal, fica também comprovada a eficácia deste método para a determinação da resistência em regime permanente dentro da curva de impedância transitória  $Z(t)$ , com um erro médio máximo em torno dos 8%.

Os resultados comprovam a eficácia deste método para aplicações em medidas tanto com eletrodos no mesmo sentido quanto eletrodos em ortogonal. Para as medidas de impedância com eletrodos no mesmo sentido, a obtenção dos valores de impedância não é possível em função do acoplamento entre os condutores dos eletrodos auxiliares, mas a obtenção dos valores de resistência pelo Método da Derivada de Corrente, neste caso, foi possível.

No anexo B deste estudo, são apresentados todos os resultados da aplicação deste método, assim como o valor da incerteza associado a cada medida, validando a compatibilidade das medidas obtidas pelo Método da Derivada de Corrente com as medidas obtidas pelo terrômetro.

#### 4.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS MALHAS DE ATERRAMENTO E PROPOSTA DE METODOLOGIA PARA UM FATOR DE CORREÇÃO PARA MEDIDAS COM ELETRODOS EM ORTOGONAL

Como a aplicação direta dos métodos PRED e Tagg Estendido para os eletrodos em ortogonal não obtiveram um resultado satisfatório, passou-se a estudar o comportamento das medições das malhas de aterramento na busca por uma metodologia adequada, que contribuísse para o desenvolvimento de um método de medição de impedância de impulso em locais com restrição de espaço.

Durante a análise do comportamento das curvas de impedância e resistência de aterramento, foi empregada uma técnica de normalização, que permitiu a análise das diferentes malhas com diferentes valores absolutos, conhecida como p.u. A Equação (11) indica como foi calculada o valor em p.u. de cada uma das medidas de campo.

$$Z_m(p. u.) = \frac{Z_m(\Omega)}{Z_{ref}} \quad (11)$$

Onde:

$Z_m(p. u.)$  = Impedância em p.u.

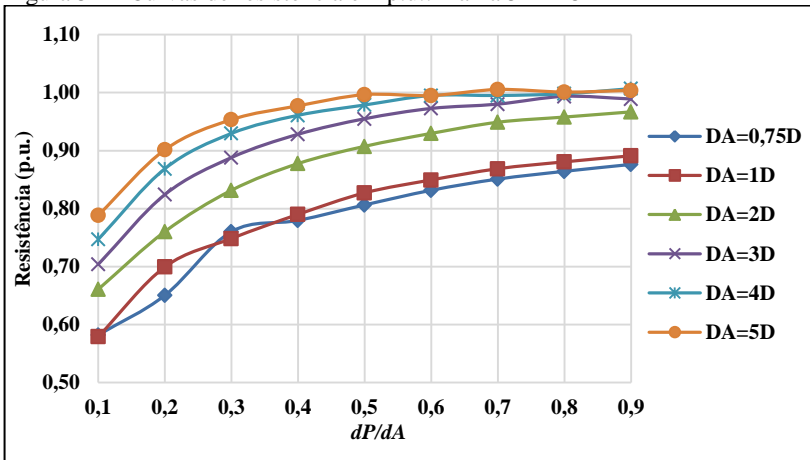
$Z_m$  = Valor absoluto da impedância medida

$Z_{ref}$  = Valor de referência (patamar) da impedância

Nessa técnica, os valores são apresentados de maneira relativa, sempre comparados a um valor de referência. Desta forma, é possível comparar o comportamento da malha 5 m x 5 m e 10 m x 10 m, mesmo com valores absolutos completamente distintos. Os valores de referência foram estabelecidos no item 4.2.5 deste estudo, para ambas as malhas. Os valores relativos obtidos estão apresentados no anexo D deste estudo.

Na Fig. 51, são apresentados os comportamentos das curvas de resistência para a malha 5 m x 5 m, com  $dA$  variando de  $0,75D$  até  $5D$ .

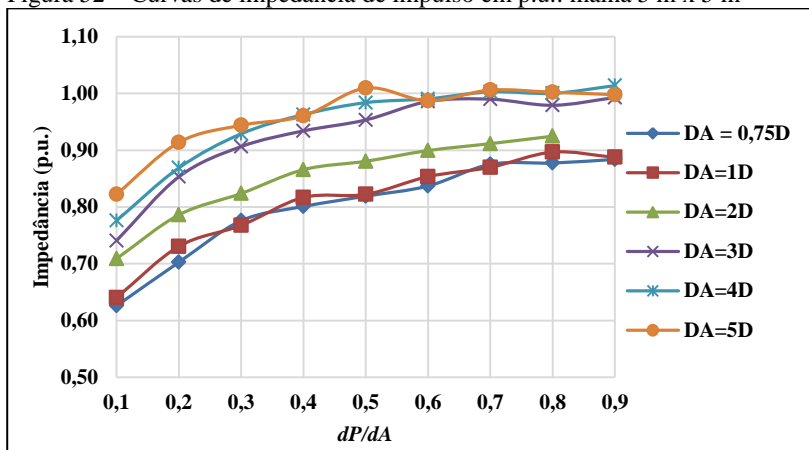
Figura 51 – Curvas de resistência em p.u.: malha 5 m x 5 m



Fonte: Do autor.

Na Fig. 52, são apresentados os comportamentos das curvas de impedância de impulso para a malha 5 m x 5 m, com  $dA$  variando de  $0,75D$  até  $5D$ .

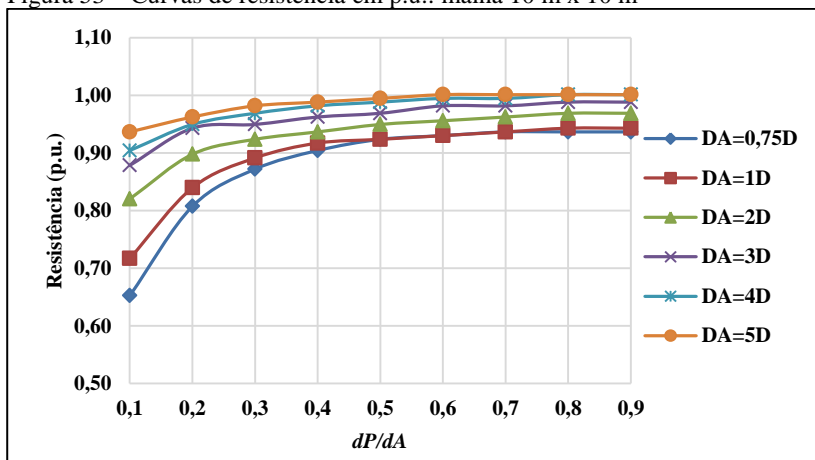
Figura 52 – Curvas de impedância de impulso em p.u.: malha 5 m x 5 m



Fonte: Do autor.

Na Fig. 53, são apresentados os comportamentos das curvas de resistência para a malha 10 m x 10 m, com  $dA$  variando de  $0,75D$  até  $5D$ .

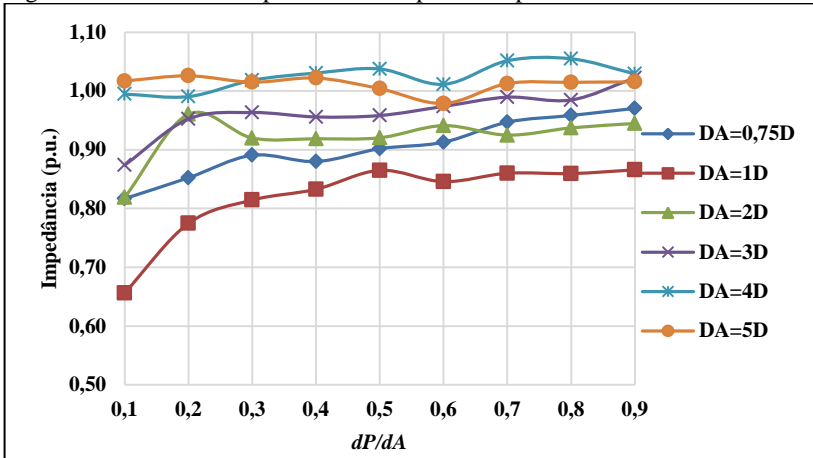
Figura 53 – Curvas de resistência em p.u.: malha 10 m x 10 m



Fonte: Do autor.

Na Fig. 54, são apresentados os comportamentos das curvas de impedância de impulso para a malha 10 m x 10 m, com  $dA$  variando de  $0,75D$  até  $5D$ .

Figura 54 – Curvas de impedância de impulso em p.u.: malha 10 m x 10 m

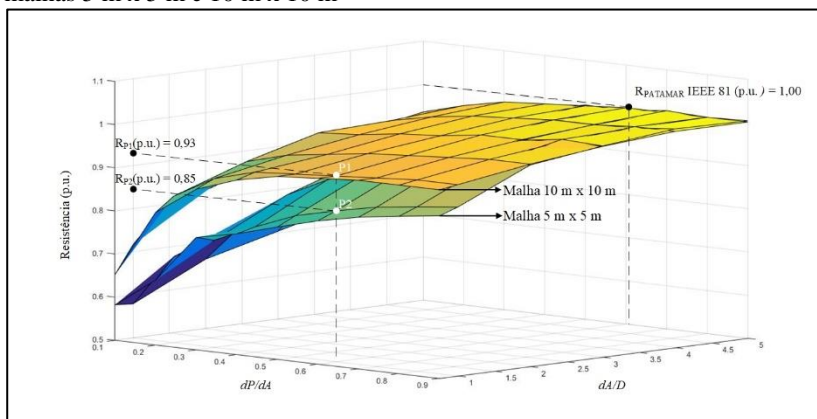


Fonte: Do autor.

Analisando os comportamentos das Fig. 51 a Fig. 54, percebe-se que as curvas, de impedância de impulso e de resistência de aterramento em uma mesma malha, possuem uma mesma tendência entre si, mas em função de representarem grandezas físicas diferentes, as análises destas curvas serão feitas de maneira distinta.

Nestas mesmas curvas, percebe-se também que o comportamento nas duas diferentes malhas de aterramento não é o mesmo, tanto para resistência quanto para impedância de impulso. Para evidenciar este comportamento, a Fig. 55 reinterpreta as curvas da Fig. 51 e Fig. 53 para resistência de aterramento, plotadas em uma mesma figura e evidenciando este comportamento.

Figura 55 – Comportamento das curvas de resistência de aterramento em p.u.: malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m



Fonte: Do autor.

As curvas da Fig. 55 representam os valores em p.u. da malha 10 m x 10 m, na curva superior, e da malha 5 m x 5 m, na curva inferior. É apresentado também o ponto de patamar de ambas as malhas, definido pela IEEE 81 na condição em que  $dP = 62\% dA$  e  $DA = 5D$ , assim como dois pontos plotados (P1 e P2), a título de ilustração, na condição em que  $dP = 60\% dA$  e  $DA = 1D$ .

Percebe-se que ambas as curvas possuem o mesmo comportamento, aproximando-se do valor de patamar conforme o aumento dos valores de  $dP$  e  $dA$ . Mas a medida que estes valores diminuem, como é o caso das medidas em locais com restrição de espaço, o comportamento das curvas deixa de ser o mesmo. Isso é exemplificado pelos pontos P1 para a malha 10 m x 10 m, e P2 para a malha 5 m x 5 m. Nestes pontos, o valor de resistência medido na malha 10 m x 10 m é de 93% do valor de patamar, enquanto que para a malha 5 m x 5 m, o valor medido nesta mesma condição é de 85% do valor de patamar. Fazendo-se esta mesma avaliação para os demais valores de  $dP$  e  $dA$  reduzidos, esta tendência de comportamento também é observada.

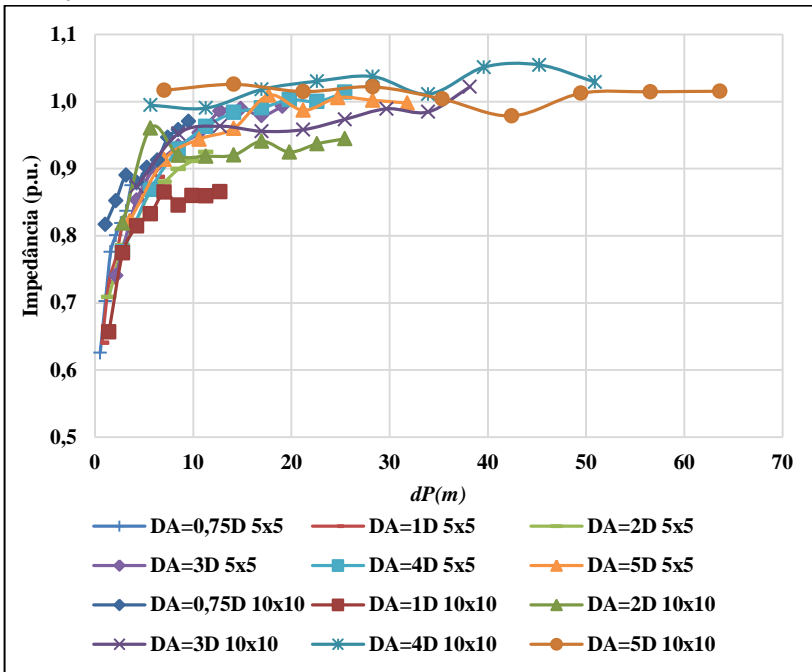
Portanto, a análise das curvas em p.u. na Fig. 55 indica que o comportamento das curvas não varia apenas em função da relação entre  $dP/dA$  e  $dA/D$ , mas também em função das dimensões da malha de aterramento, representada pela maior diagonal  $D$  da malha. Esta relação, obtida com base na análise dos dados das medições de campo, aparenta um comportamento inversamente proporcional as dimensões da malha: quanto menor a malha de aterramento, maior deve ser o valor de  $dA/D$

para obtenção do valor de patamar, e quanto maior a malha de aterramento, o valor de  $dA/D$  pode ser reduzido para obtenção deste valor.

Com base nesta constatação, a análise dos dados foi realizada com uma abordagem diferente. Como as grandezas  $dP/dA$  e  $dA/D$  são relativas a  $D$ , ao analisar os valores  $dP$  e  $dA$  em metros, a terceira variável  $D$  já é ponderada nestas duas variáveis, simplificando a análise.

Dessa forma, rerepresentando os dados em p.u. para impedância de impulso de ambas as malhas, com  $dP$  em metros, é obtida a Fig. 56.

Figura 56 – Curvas de impedância de impulso em p.u.: malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m

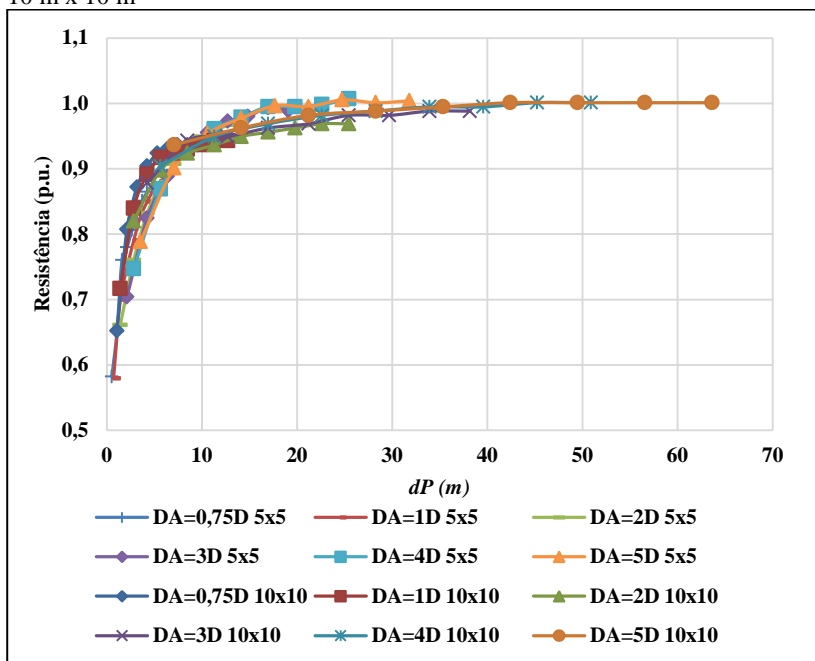


Fonte: Do autor.

Da mesma forma, os dados em p.u. para resistência de aterramento de ambas as malhas se apresentam conforme Fig. 57.



Figura 57 – Curvas de resistência de aterramento em p.u.: malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m



Fonte: Do autor.

A plotagem dos dados nas Fig. 56 e Fig. 57 evidencia que, na análise dos dados em p.u. com  $dP$  em metros, as medidas seguem uma mesma tendência de comportamento. Com base nestes dados e nestas curvas, foi iniciado o estudo de uma equação geral, buscando um fator que seria capaz de corrigir o valor medido, em função de  $dP$  e  $dA$ . A metodologia deste fator, aqui chamado de Fator de Correção, inicia-se com o rearranjo da Equação (11):

$$Z_{ref} = \frac{1}{Z_m(PU)} * Z_m(\Omega) \quad (12)$$

$$Z_{ref} = FC * Z_m(\Omega), \text{ onde: } FC = \frac{1}{Z_m(PU)} \quad (13)$$

A Equação (13) apresenta a definição do Fator de Correção ( $FC$ ). Seguindo esta proposta de metodologia, seria possível estabelecer um fator de correção  $FC$  para cada um dos valores medidos em cada uma

das malhas, em função de  $dP$  e  $dA$ , de forma que o  $FC$  do valor medido  $Z_m$  seja a relação de correção necessária para obtenção do valor de patamar  $Z_{ref}$ . Ou seja, ao multiplicar-se determinado valor medido em campo  $Z_m$  por determinado  $FC$ , espera-se obter o valor da impedância de patamar  $Z_{ref}$ .

Aplicando a Equação (13) nos valores das medições de campo para impedância de impulso, os valores de  $FC$  medidos são apresentados nas Tab. 23 e Tab. 24.

Tabela 23 – Valor de  $FC$  medido para impedância de impulso 5 m x 5 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	1,5979	1,5620	1,4108	1,3503	1,2889	1,2159
20%	1,4234	1,3690	1,2722	1,1723	1,1510	1,0944
30%	1,2891	1,3030	1,2139	1,1033	1,0765	1,0594
40%	1,2487	1,2243	1,1551	1,0706	1,0387	1,0414
50%	1,2209	1,2162	1,1356	1,0490	1,0164	0,9905
60%	1,1948	1,1716	1,1119	1,0144	1,0096	1,0131
70%	1,1428	1,1496	1,0970	1,0102	0,9971	0,9940
80%	1,1397	1,1152	1,0814	1,0213	0,9997	0,9979
90%	1,1315	1,1268	1,0562	1,0073	0,9864	1,0022

Fonte: Do autor.

Tabela 24 – Valor de  $FC$  medido para impedância de impulso 10 m x 10 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	1,2242	1,5232	1,2210	1,1444	1,0053	0,9833
20%	1,1733	1,2909	1,0412	1,0500	1,0096	0,9749
30%	1,1228	1,2278	1,0870	1,0380	0,9821	0,9852
40%	1,1364	1,2008	1,0885	1,0462	0,9704	0,9785
50%	1,1089	1,1561	1,0865	1,0436	0,9639	0,9960
60%	1,0955	1,1824	1,0626	1,0270	0,9888	1,0217
70%	1,0561	1,1628	1,0812	1,0107	0,9511	0,9876
80%	1,0435	1,1635	1,0670	1,0155	0,9481	0,9855
90%	1,0305	1,1550	1,0585	0,9782	0,9717	0,9848

Fonte: Do autor.

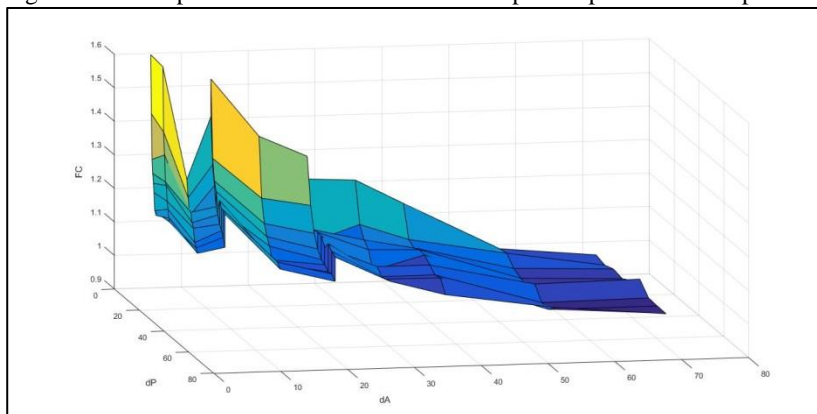
A plotagem destes valores é apresentada na Fig. 58, onde:

Eixo x =  $dP$

Eixo y =  $dA$

Eixo z = Valor medido para  $FC$

Figura 58 – Comportamento da curva  $FC$  medido para impedância de impulso



Fonte: Do autor.

Seguindo a mesma lógica, aplicando a Equação (13) nos valores das medições de campo para resistência de aterramento, os valores de  $FC$  medidos são apresentados nas Tab. 25 e Tab. 26.

Tabela 25 – Valor de  $FC$  medido para resistência de aterramento 5 m x 5 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	1,7177	1,7266	1,5132	1,4206	1,3387	1,2681
20%	1,5373	1,4296	1,3152	1,2133	1,1510	1,1093
30%	1,3152	1,3360	1,2024	1,1260	1,0757	1,0488
40%	1,2826	1,2657	1,1394	1,0774	1,0407	1,0233
50%	1,2401	1,2089	1,1021	1,0472	1,0218	1,0035
60%	1,2024	1,1772	1,0757	1,0280	1,0050	1,0050
70%	1,1751	1,1510	1,0538	1,0202	1,0050	0,9946
80%	1,1570	1,1355	1,0440	1,0065	1,0020	0,9990
90%	1,1413	1,1223	1,0343	1,0110	0,9932	0,9961

Fonte: Do autor.

Tabela 26 – Valor de  $FC$  medido para resistência de aterramento 10 m x 10 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	1,5330	1,3949	1,2191	1,1385	1,1059	1,0678
20%	1,2386	1,1910	1,1139	1,0605	1,0533	1,0391
30%	1,1469	1,1220	1,0827	1,0533	1,0322	1,0186
40%	1,1059	1,0904	1,0678	1,0391	1,0186	1,0120
50%	1,0827	1,0827	1,0533	1,0322	1,0120	1,0054
60%	1,0752	1,0752	1,0461	1,0186	1,0054	0,9989
70%	1,0678	1,0678	1,0391	1,0186	1,0054	0,9989
80%	1,0678	1,0605	1,0322	1,0120	0,9989	0,9989
90%	1,0678	1,0605	1,0322	1,0120	0,9989	0,9989

Fonte: Do autor.

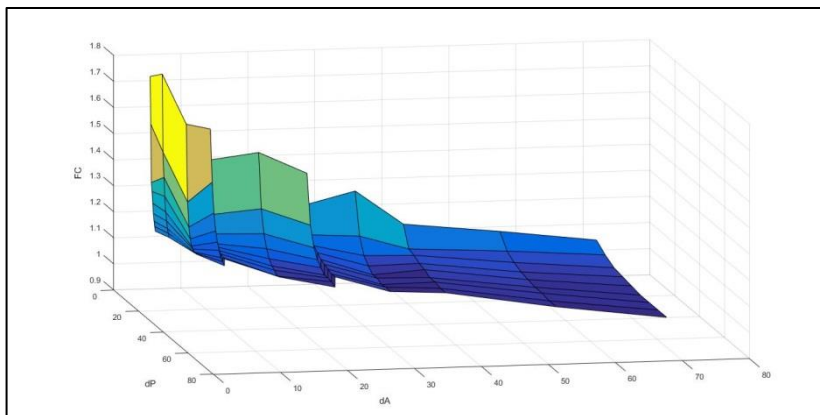
A plotagem destes valores é apresentada na Fig. 59, onde:

Eixo x =  $dP$

Eixo y =  $dA$

Eixo z = Valor medido para  $FC$

Figura 59 – Comportamento da curva  $FC$  medido para resistência de aterramento



Fonte: Do autor.

Todos os valores dos  $FC$  medidos, obtidos com as medidas de campo, estão também informados no anexo D deste estudo. Aplicando uma interpolação polinomial de terceira ordem em função das duas variáveis  $dP$  e  $dA$  em metros, são obtidas as equações 14 e 15 para o

Fator de Correção da impedância de impulso e resistência de aterramento, respectivamente.

$$\begin{aligned}
 FC(\text{Imp. Impulso}) = & (2,0662E - 09)dP^3dA^3 - (3,6349E - 08)dP^2dA^3 - (3,6007E - 07)dPdA^3 + (4,5275E - 06)dA^3 - \\
 & (3,9047E - 07)dP^3dA^2 + (9,0540E - 06)dP^2dA^2 + (8,7863E - 06)dPdA^2 - (5,4333E - 04)dA^2 + (2,4428E - 05)dP^3dA - \\
 & (7,0705E - 04)dP^2dA + (3,5152E - 03)dPdA + (8,1278E - 03)dA - (5,0624E - 04)dP^3 + 0,0176dP^2 - 0,1657dP + \\
 & 1,5132 \qquad \qquad \qquad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 FC(\text{Res. Aterramento}) = & (2,9483E - 09)dP^3dA^3 - (7,4110E - 08)dP^2dA^3 + (2,8602E - 08)dPdA^3 + (2,2404E - 06)dA^3 - \\
 & (5,3870E - 07)dP^3dA^2 + (1,5321E - 05)dP^2dA^2 - (5,5157E - 05)dPdA^2 - (2,2302E - 04)dA^2 + (3,2677E - 05)dP^3dA - \\
 & (1,0563E - 03)dP^2dA + (7,1120E - 03)dPdA - (4,6888E - 03)dA - (6,5998E - 04)dP^3 + 0,0244dP^2 - \\
 & 0,2416dP + 1,7383 \qquad \qquad \qquad (15)
 \end{aligned}$$

A Equação (14) e Equação (15) foram interpoladas polinomialmente com o uso da função “polyFit2D”, aplicada a ferramenta computacional Matlab [29].

As curvas geradas pela interpolação polinomial da Equação (14) estão apresentadas nas Tab. 27, Tab. 28 e Fig. 60 para impedância de impulso.

Tabela 27 – Valor de *FC* interpolado para impedância de impulso 5 m x 5 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	1,4677	1,4521	1,3873	1,3194	1,2509	1,1853
20%	1,4014	1,3715	1,2758	1,2035	1,1449	1,0974
30%	1,3423	1,3025	1,1938	1,1284	1,0820	1,0475
40%	1,2901	1,2443	1,1373	1,0859	1,0510	1,0251
50%	1,2445	1,1962	1,1024	1,0677	1,0411	1,0197
60%	1,2051	1,1574	1,0851	1,0656	1,0412	1,0209
70%	1,1715	1,1272	1,0814	1,0712	1,0404	1,0183
80%	1,1435	1,1049	1,0875	1,0764	1,0276	1,0014
90%	1,1207	1,0897	1,0993	1,0730	0,9918	0,9598

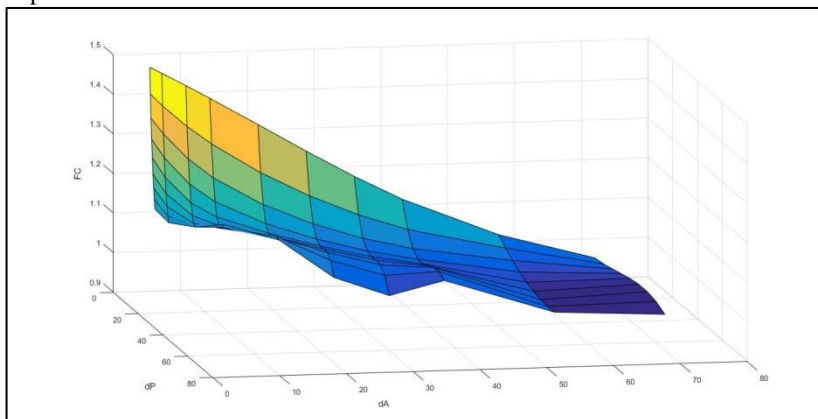
Fonte: Do autor.

Tabela 28 – Valor de  $FC$  interpolado para impedância de impulso 10 m x 10 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	1,4202	1,3873	1,2509	1,1257	1,0329	0,9712
20%	1,3197	1,2758	1,1449	1,0607	1,0142	0,9748
30%	1,2401	1,1938	1,0820	1,0239	0,9981	0,9811
40%	1,1793	1,1373	1,0510	1,0084	0,9844	0,9885
50%	1,1352	1,1024	1,0411	1,0074	0,9735	0,9952
60%	1,1058	1,0851	1,0412	1,0140	0,9653	0,9994
70%	1,0890	1,0814	1,0404	1,0215	0,9601	0,9994
80%	1,0827	1,0875	1,0276	1,0230	0,9578	0,9936
90%	1,0850	1,0993	0,9918	1,0116	0,9586	0,9802

Fonte: Do autor.

Figura 60 – Comportamento da curva  $FC$  interpolado para impedância de impulso



Fonte: Do autor.

As curvas geradas pela interpolação polinomial da Equação (15) estão apresentadas nas Tab. 29, Tab. 30 e Fig. 61 para resistência de aterramento.

Tabela 29 – Valor de *FC* interpolado para resistência de aterramento 5 m x 5 m

<b>%dP</b>	<b>dA=0,75D</b>	<b>dA=1D</b>	<b>dA=2D</b>	<b>dA=3D</b>	<b>dA=4D</b>	<b>dA=5D</b>
<b>10%</b>	1,6039	1,5662	1,4425	1,3502	1,2788	1,2223
<b>20%</b>	1,5106	1,4543	1,2954	1,2035	1,1473	1,1116
<b>30%</b>	1,4272	1,3581	1,1873	1,1094	1,0697	1,0481
<b>40%</b>	1,3532	1,2767	1,1132	1,0575	1,0326	1,0192
<b>50%</b>	1,2883	1,2090	1,0681	1,0375	1,0224	1,0120
<b>60%</b>	1,2319	1,1541	1,0469	1,0390	1,0255	1,0140
<b>70%</b>	1,1835	1,1111	1,0446	1,0516	1,0283	1,0126
<b>80%</b>	1,1429	1,0790	1,0561	1,0650	1,0172	0,9950
<b>90%</b>	1,1094	1,0568	1,0765	1,0687	0,9787	0,9487

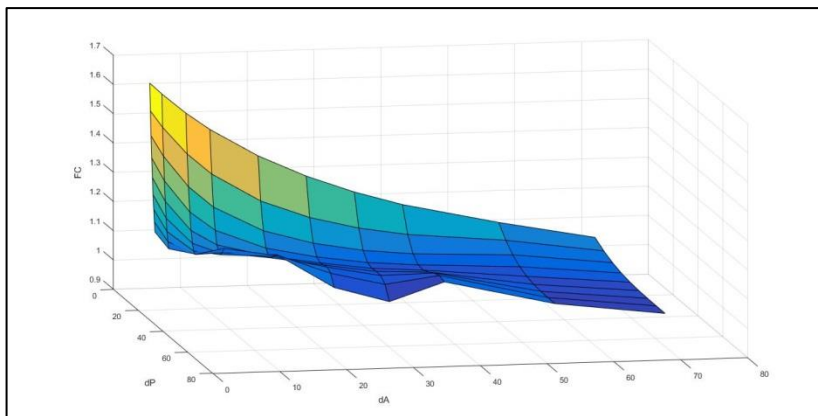
Fonte: Do autor.

Tabela 30 – Valor de *FC* interpolado para resistência de aterramento 10 m x 10 m

<b>%dP</b>	<b>dA=0,75D</b>	<b>dA=1D</b>	<b>dA=2D</b>	<b>dA=3D</b>	<b>dA=4D</b>	<b>dA=5D</b>
<b>10%</b>	1,4995	1,4425	1,2788	1,1772	1,1117	1,0563
<b>20%</b>	1,3636	1,2954	1,1473	1,0900	1,0711	1,0356
<b>30%</b>	1,2556	1,1873	1,0697	1,0392	1,0415	1,0207
<b>40%</b>	1,1730	1,1132	1,0326	1,0165	1,0211	1,0107
<b>50%</b>	1,1131	1,0681	1,0224	1,0137	1,0082	1,0045
<b>60%</b>	1,0732	1,0469	1,0255	1,0223	1,0010	1,0012
<b>70%</b>	1,0507	1,0446	1,0283	1,0341	0,9978	0,9998
<b>80%</b>	1,0429	1,0561	1,0172	1,0409	0,9968	0,9993
<b>90%</b>	1,0472	1,0765	0,9787	1,0343	0,9962	0,9988

Fonte: Do autor.

Figura 61 – Comportamento da curva  $FC$  interpolado para resistência de aterramento



Fonte: Do autor.

Estabelecidas as equações do Fator de Correção em função  $dP$  e  $dA$  em metros, os próximos dois subitens apresentam a aplicação das equações de interpolação nos dados levantados em campo, tanto para impedância de impulso quanto para resistência de aterramento, sendo possível avaliar o desempenho desta proposta de metodologia.

Os resultados obtidos dos  $FC$  interpolados com o uso das equações de interpolação, os valores de referência, e os erros relativos das medidas estão informados no anexo E deste estudo.

#### 4.4.1 Resultados da aplicação da equação do Fator de Correção para impedância de impulso

As aplicações da Equação (14) do Fator de Correção nos dados obtidos em campo para a impedância de impulso são apresentadas nas Tab. 31 e Fig. 62 para a malha 5 m x 5 m, e Tab. 32 e Fig. 63 para a malha 10 m x 10 m.



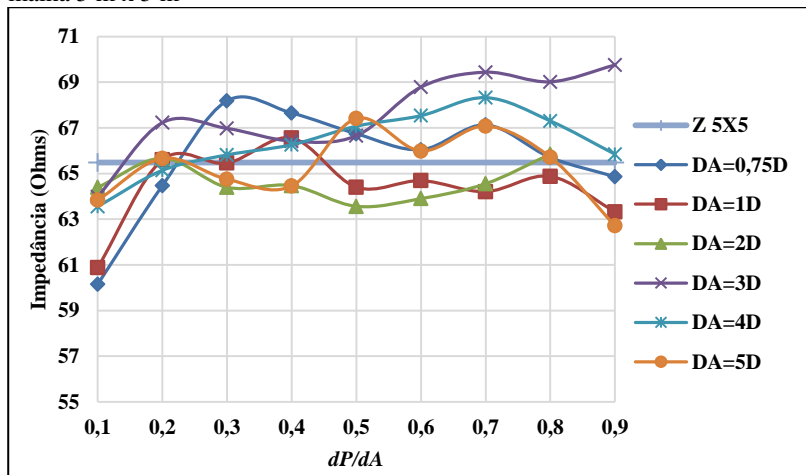
Tabela 31 – Valor da impedância de impulso corrigida pela equação *FC*: malha 5 m x 5 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	60,15	60,88	64,39	63,98	63,55	63,83
20%	64,47	65,60	65,67	67,23	65,14	65,66
30%	68,18	65,46	64,40	66,97	65,81	64,75
40%	67,65	66,55	64,47	66,42	66,26	64,45
50%	66,74	64,40	63,56	66,65	67,07	67,41
60%	66,04	64,69	63,90	68,79	67,53	65,99
70%	67,13	64,21	64,55	69,44	68,32	67,08
80%	65,70	64,88	65,85	69,02	67,30	65,71
90%	64,86	63,32	-	69,75	65,84	62,71

Fonte: Do autor.

Onde  $Z_{\text{patamar}}$ , definido na Tab. 17, possui o valor de 65,48  $\Omega$ .

Figura 62 – Curvas de impedância de impulso corrigidas pela equação *FC*: malha 5 m x 5 m



Fonte: Do autor.

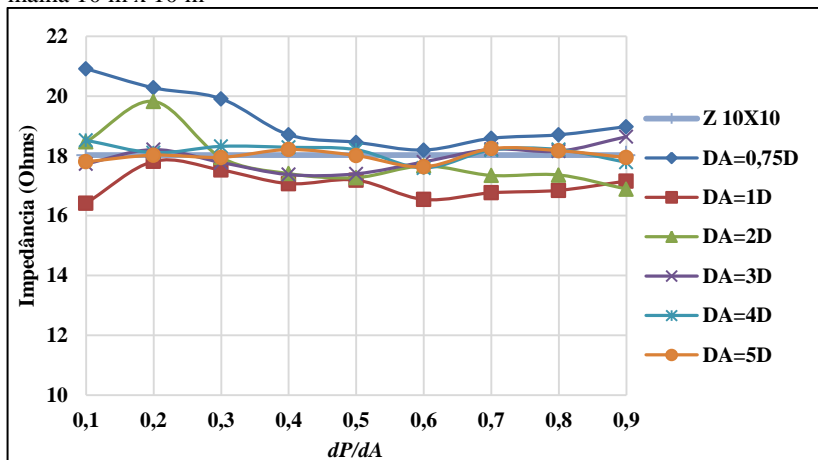
Tabela 32 – Valor da impedância de impulso corrigida pela equação  $FC$ : malha 10 m x 10 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	20,91	16,42	18,47	17,73	18,52	17,80
20%	20,27	17,82	19,82	18,21	18,11	18,02
30%	19,91	17,53	17,94	17,78	18,32	17,95
40%	18,70	17,07	17,41	17,37	18,29	18,21
50%	18,45	17,19	17,27	17,40	18,20	18,01
60%	18,19	16,54	17,66	17,80	17,60	17,63
70%	18,59	16,76	17,34	18,22	18,20	18,24
80%	18,70	16,85	17,36	18,16	18,21	18,17
90%	18,98	17,16	16,89	18,64	17,78	17,94

Fonte: Do autor.

Onde  $Z_{\text{patamar}}$ , definido na Tab. 17, possui o valor de 18,03  $\Omega$ .

Figura 63 – Curvas de impedância de impulso corrigidas pela equação  $FC$ : malha 10 m x 10 m



Fonte: Do autor.

A média de erros relativos, para impedância de impulso em relação ao valor de patamar, é de 2,02%, enquanto que o erro máximo obtido, em uma condição crítica de  $dP = 10\%$   $dA$  e  $dA = 0,75D$ , foi de 16,01%. Para a aplicação com  $dA=0,75D$ , o erro médio relativo apresentado é de 3,21%.

#### 4.4.2 Resultados da aplicação da equação do Fator de Correção para resistência de aterramento

As aplicações da Equação (15) do Fator de Correção nos dados obtidos em campo para a resistência de aterramento são apresentadas nas Tab. 33 e Fig. 64 para a malha 5 m x 5 m, e Tab. 34 e Fig. 65 para a malha 10 m x 10 m.

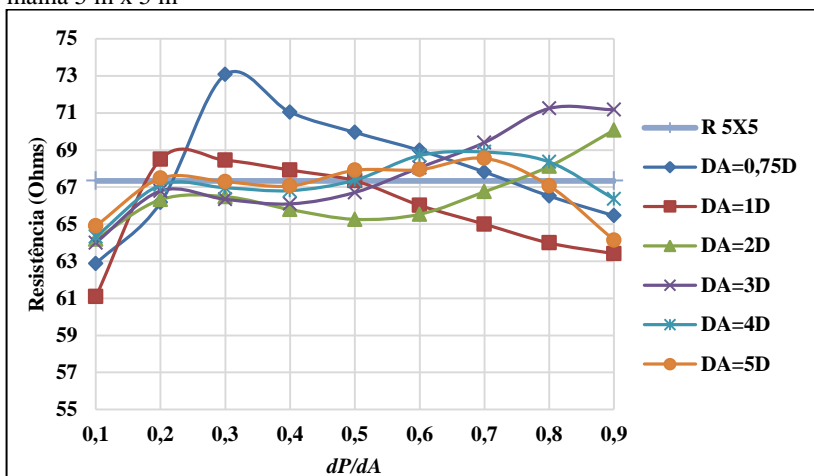
Tabela 33 – Valor da resistência de aterramento corrigida pela equação  $FC$ : malha 5 m x 5 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	62,87	61,08	64,19	64,00	64,33	64,90
20%	66,16	68,50	66,32	66,79	67,12	67,48
30%	73,07	68,45	66,49	66,34	66,96	67,29
40%	71,04	67,92	65,79	66,09	66,81	67,06
50%	69,95	67,34	65,26	66,71	67,38	67,91
60%	68,98	66,02	65,54	68,05	68,71	67,94
70%	67,82	65,00	66,75	69,41	68,89	68,55
80%	66,52	63,99	68,12	71,25	68,36	67,07
90%	65,46	63,41	70,08	71,17	66,36	64,13

Fonte: Do autor.

Onde  $R_{\text{patamar}}$ , definido na Tab. 17, possui o valor de 67,34  $\Omega$ .

Figura 64 – Curvas de resistência de aterramento corrigidas pela equação *FC*: malha 5 m x 5 m



Fonte: Do autor.

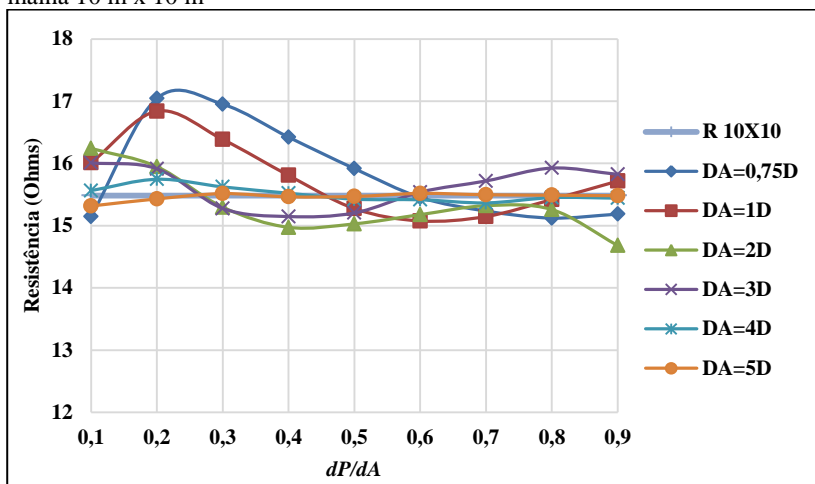
Tabela 34 – Valor da resistência de aterramento corrigida pela equação *FC*: malha 10 m x 10 m

%dP	dA=0,75D	dA=1D	dA=2D	dA=3D	dA=4D	dA=5D
10%	15,15	16,01	16,24	16,01	15,56	15,32
20%	17,04	16,84	15,95	15,91	15,75	15,43
30%	16,95	16,38	15,30	15,28	15,62	15,51
40%	16,42	15,81	14,97	15,15	15,52	15,46
50%	15,92	15,27	15,03	15,20	15,43	15,47
60%	15,45	15,08	15,18	15,54	15,42	15,52
70%	15,23	15,15	15,32	15,72	15,37	15,50
80%	15,12	15,42	15,26	15,93	15,45	15,49
90%	15,18	15,72	14,68	15,82	15,44	15,48

Fonte: Do autor.

Onde  $R_{\text{patamar}}$ , definido na Tab. 17, possui o valor de 15,48  $\Omega$ .

Figura 65 – Curvas de resistência de aterramento corrigidas pela equação  $FC$ : malha 10 m x 10 m



Fonte: Do autor.

A média de erros relativos, para resistência de aterramento em relação ao valor de patamar, é de 1,71%, enquanto que o erro máximo obtido, em uma condição crítica de  $dP = 10\% dA$  e  $DA = 0,75D$ , foi de 10,09%. Para a aplicação com  $DA=0,75D$ , o erro médio relativo apresentado é de 2,62%.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES PARCIAIS

Neste capítulo, foram apresentados os resultados obtidos com as medições de campo realizados em duas diferentes topologias de malhas de aterramento.

Com base nos dados de campo para resistência de aterramento, é constatada que há possibilidade de obtenção dos valores de patamar tanto para medições com eletrodos auxiliares no mesmo sentido quanto em ortogonal. Também é constatado a impossibilidade de medidas de impedância com eletrodos no mesmo sentido em função do acoplamento indutivo entre os eletrodos auxiliares de tensão e corrente.

Com base na análise dos dados obtidos em campo, o primeiro resultado apresentado foi o Método da Derivada de Corrente. Com a aplicação deste método, é possível determinar o ponto em que a impedância transitória  $Z(t)$  apresenta o valor da resistência de aterramento em regime permanente. Com os resultados satisfatórios da

aplicação deste método para medidas com eletrodos no mesmo sentido e em ortogonal, é possível constatar que este método pode ser utilizado para ambas as aplicações.

O segundo resultado obtido é a constatação de que o comportamento dos valores medidos em campo, da impedância de impulso e resistência de aterramento, varia não apenas em função da relação  $dP/dA$  e  $dA/D$ , mas também em função das dimensões da malha de aterramento, representada pela maior diagonal  $D$  da malha. Ponderando está variável  $D$  nas duas variáveis  $dP$  e  $dA$ , é apresentado uma proposta de uma equação geral, denominada Fator de Correção, que calcula a correção dos valores medidos nas duas malhas avaliadas neste estudo, tanto para impedância de impulso quanto para resistência de aterramento. A aplicação das equações do Fator de Correção para as malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m, retornou ótimos resultados, possibilitando inclusive a correção de valores medidos quando  $dA = 0,75D$ , com valor médio de erro relativo na casa dos 3%.

Com a realização de futuras pesquisas, e levantamentos do comportamento das medições de campo em malhas de aterramento de maiores dimensões, a metodologia do Fator de Correção pode ser aprimorada para responder adequadamente também nestas situações.

Após a apresentação dos resultados, o próximo capítulo é dedicado a apresentação das conclusões deste estudo, assim como sugestões e possibilidade de estudos futuros.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 CONFIABILIDADE DOS DADOS OBTIDOS NOS TESTES DE CAMPO

A busca pela qualidade dos dados levantados em campo foi um dos pré-requisitos deste trabalho. Durante todos os levantamentos de campo, a preocupação em seguir a metodologia apresentada e normalizada foi uma das premissas para a obtenção de dados confiáveis, e de extrema importância na contribuição para o tema deste estudo. Em função da obtenção de dados com elevado índice de confiabilidade, foi possível a análise e contribuição para medições de impedância de impulso e resistência de aterramento em locais com restrição de espaço.

### 5.2 ESTUDO DA BIBLIOGRAFIA

Referente à bibliografia, este estudo priorizou artigos e publicações em guias nacionais e internacionais, como a IEEE, ABNT, EPSR e SIPDA. Além disso, livros e teses também serviram como referências para o tema principal deste estudo: aterramento elétrico.

### 5.3 MÉTODO DA DERIVADA DE CORRENTE

Um dos resultados deste estudo é o Método da Derivada de Corrente, útil para a determinação do ponto em que a impedância transitória  $Z(t)$  corresponde ao valor da resistência de aterramento em regime permanente.

O erro médio máximo obtido com a utilização deste método ficou na casa dos 8%, o que é bastante aceitável do ponto de vista dos processos de engenharia, validando este método como uma contribuição e possibilidade de aplicação nas demais pesquisas desta área.

### 5.4 COMPORTAMENTO DAS MEDIDAS DE CAMPO EM FUNÇÃO DAS DIMENSÕES DAS MALHAS DE ATERRAMENTO E PROPOSTA DA METODOLOGIA DO FATOR DE CORREÇÃO

O item 4.4 deste estudo fez uma análise sobre o comportamento das medidas de campo em função das relações conforme norma IEEE 81:  $dP/dA$  e  $dA/D$ .

O resultado desta análise é de que o comportamento das medidas de campo varia em função de uma terceira variável: a maior dimensão  $D$  da malha de aterramento. Com base nos dados de campo, esse comportamento aparenta ser inversamente proporcional: quando maior a dimensão da malha, menor poderá ser o valor de  $dA/D$  para obtenção do valor de patamar da malha de aterramento.

Adicionalmente, por meio dos dados levantados em campo, estabeleceu-se a proposta de uma metodologia do Fator de Correção para impedância de impulso e resistência de aterramento, onde por meio de interpolação polinomial de terceira ordem, foi possível obter equações que determinam o comportamento das malhas de aterramento deste estudo. A aplicação das equações do Fator de Correção possibilitou a correção de valores medidos, inclusive quando  $dA = 0,75D$  para ambas as malhas, com erro médio relativo máximo de 3%.

Em próximos estudos, com a possibilidade de novas medições e coleta de mais dados de campo em diferentes topologias de malhas de aterramento, seria possível o aprimoramento das interpolações polinomiais do Fator de Correção, fazendo com que essas equações corrigissem também as medidas de malhas de maiores dimensões.

## 5.5 SUGESTÕES PARA NOVOS ESTUDOS

Como sugestão para futuros estudos e pesquisas, foram percebidas algumas possibilidades de continuação deste estudo. Elas estão elencadas a seguir, juntamente com sua justificativa.

- Características das correntes de falta: frequência e intensidade. No item 2.3.3.2 deste estudo, foram brevemente apresentadas as características da influência da frequência e intensidade do surto na resistividade do solo. Visto a importância destes fatores no desempenho dos sistemas de aterramento, a continuidade e realização de novos estudos será fonte de importantes contribuições nesta área.
- Estudo de comparação entre formas de onda de tensão com e sem acoplamento: A Fig. 26 apresenta as formas de onda de tensão  $v(t)$  com e sem acoplamento entre os condutores dos eletrodos auxiliares, onde é perceptível que a resposta após os primeiros 10  $\mu$ s tende a ser a mesma. Seria possível uma análise para verificar se o pico causado pelo acoplamento indutivo poderia ser desconsiderado ou corrigido para medidas com acoplamento dos condutores dos eletrodos auxiliares.



- Estudo com medidas de resistência e impedância de aterramento com  $dP \geq 1dA$ : Neste estudo, todas as medições foram realizadas com  $dP$  variando de 0,1  $dA$  até 0,9  $dA$ . Como o comportamento da resistência ou impedância com eletrodos em ortogonal tende a se aproximar do valor do patamar conforme o aumento do valor de  $dP$ , a realização de medidas com esta característica poderia gerar novos métodos de medição.
- Possibilidade de estabelecimento de um método por ponto de inflexão para medidas com eletrodos auxiliares no mesmo sentido: Na Fig. 34 e Fig. 35 deste estudo, são apresentadas as curvas das medidas de campo de resistência de aterramento das malhas 5 m x 5 m e 10 m x 10 m, respectivamente. Percebe-se que as curvas plotadas em função de  $dA$  se cruzam em um mesmo ponto ( $dP/dA \approx 0,5$  para a malha 5 m x 5 m, e  $dP/dA \approx 0,45$  para a malha 10 m x 10 m), e que este ponto se aproxima do valor de patamar. Com a realização de medidas de campo adicionais em diferentes topologias de malhas, poderia se estabelecer uma metodologia em função dos pontos de inflexão das curvas de resistência de aterramento.
- Estudo do comportamento de malhas de aterramento de diferentes topologias e maiores dimensões: No item 4.4, é realizada a análise das medidas de campo de duas malhas de aterramento. Nesta análise, percebe-se que o comportamento das malhas de aterramento pode ser descrito pela relação entre duas variáveis:  $dP$  e  $dA$  em metros. As equações do  $FC$  para as malhas deste estudo foram apresentadas, por meio de uma interpolação polinomial, para impedância de impulso e resistência de aterramento. Porém, para malhas de maiores dimensões, são necessárias medidas de campo adicionais, permitindo o aprimoramento das equações do  $FC$  e uma resposta adequada em malhas de aterramento de maiores dimensões.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados, análises e contribuições apresentadas, conclui-se que o objetivo deste estudo foi atingido, contribuindo para o desenvolvimento de um novo método de medição de impedância de impulso em malhas de aterramento instaladas em locais com restrição de espaço.



## REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Power and Energy Society, “ANSI/IEEE Std 80-2013 - IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding,” Nova York, 2013.
- [2] IEEE Power and Energy Society, “ANSI/IEEE Std 81-2012 - IEEE Guide for Measurement Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System,” Nova York, 2012.
- [3] A. Raizer, W. Valente Jr. e V. L. Coelho, “Development of a new methodology for measurements of earth resistance, touch and step voltages within urban substations,” *EPSR*, pp. 111-118, Dezembro 2017.
- [4] G. F. Tagg, “Measurement of the Resistance of Physically Large Earth-Electrode Systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 117, pp. 2185-2190, Novembro 1970.
- [5] A. Raizer, W. Valente Jr., V. L. Coelho e C. Cardoso, “Contribution to Tagg’s methodology in the resistance measurement of earth-electrode systems at reduced distances,” *XIII SIPDA*, p. 109–115, 2015.
- [6] S. Visacro Filho, *Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento*, São Paulo: Artliber Editora, 2012.
- [7] M. Telló, G. A. D. Dias, A. Raizer, H. D. Almaguer, T. I. Mustafa e V. L. Coelho, *Aterramento elétrico impulsivo, em baixa e alta frequências: com apresentação de casos*, Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017.
- [8] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão,” Rio de Janeiro, 2008.
- [9] G. Kindermann e J. M. Campagnolo, *Aterramento Elétrico*, Florianópolis: 6ª Edição do Autor, 2011.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 15751: Sistemas de aterramento de subestações — Requisitos,” Rio de Janeiro, 2009.
- [11] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, “IEC 61000-4-5. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test,”

Genebra, 2014.

- [12] S. Visacro, R. Alípio, M. Vale e C. Pereira, “The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity,” *IEEE Transactions On Electromagnetic Compatibility*, vol. 53, pp. 401-406, Maio 2011.
- [13] S. Visacro e R. Alípio, “Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 927-934, Abril 2012.
- [14] R. S. Alípio, “Dependência da frequência dos parâmetros do solo: Efeito no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos,” Belo Horizonte, 2013.
- [15] E. E. Oettle, “A new general estimation curve for predicting the impulse impedance of concentrated earth electrodes,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 2020 - 2029, 1988.
- [16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 15749 - Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento,” Rio de Janeiro, 2009.
- [17] E. B. Curdts, “Some of the fundamental aspects of ground resistance measurements,” *AIEE Transactions*, vol. 77, p. 760, 1958.
- [18] EMBRAPA, “Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 46 – Solos do Estado de Santa Catarina,” Rio de Janeiro, 2004.
- [19] INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, “Mapas de Precipitação: Precipitação Acumulada,” 2018. [Online]. Available: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=tempo2/mapasPrecipitacao>. [Acesso em 01 Junho 2018].
- [20] T. d. Marés, “TÁBUA DE MARÉS E SOLUNARES,” 2018. [Online]. Available: <https://tabuademares.com/br/santa-catarina/florianopolis>. [Acesso em 01 Junho 2018].
- [21] Google, “Google Earth,” [Online]. Available: <https://earth.app.goo.gl/?apn=com.google.earth&ibi=com.google.b612&isi=293622097&ius=googleearth&link=https%3a%2f%2fearth.google.com%2fweb%2f%40-27.68155879,-48.53638437,4.99473372a,154.03897432d,35y,332.18311643h,0t>

- Or. [Acesso em 19 12 2018].
- [22] MEGABRAS, “Folheto Técnico MTD-20KWe,” 2018. [Online]. Available: <https://www.megabras.com/pt-br/get.php?file=MTD20KWe.pdf>. [Acesso em 27 Julho 2018].
- [23] Tektronix, “MSO3000 and DPO3000 Series Manual,” [Online]. Available: [download.tek.com/manual/071265602web.pdf](http://download.tek.com/manual/071265602web.pdf). [Acesso em 04 Maio 2018].
- [24] Tektronix, “P6015A Manual,” [Online]. Available: [download.tek.com/manual/070822305.pdf](http://download.tek.com/manual/070822305.pdf). [Acesso em 04 Maio 2018].
- [25] Tektronix, “TCP0020 & TCP2020 Manual,” [Online]. Available: [download.tek.com/manual/071300200\\_web\\_RevA\\_0.pdf](http://download.tek.com/manual/071300200_web_RevA_0.pdf). [Acesso em 04 Maio 2018].
- [26] J. J. Piacentini, B. C. S. Grandi, M. P. Hofmann, F. R. R. d. Lima e É. Zimmermann, em *Introdução ao Laboratório de Física*, Florianópolis, UFSC, 2005.
- [27] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “ABNT ISO/IEC GUIA 98-3 Incerteza de medição Parte 3: Guia para expressão de incerteza de medição (GUM:1995),” Rio de Janeiro, 2014.
- [28] J. Ma e F. P. Dawalibi, “Influence of Inductive Coupling Between Leads on Ground Impedance Measurements Using the Fall-of-Potential Method,” *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, pp. 739-743, Outubro 2001.
- [29] The MathWorks, Inc., “polyVal2D and polyFit2D,” The MathWorks, Inc., 18 04 2013. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41097-polyval2d-and-polyfit2d>. [Acesso em 09 11 2018].
- [30] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 7117: Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo,” Rio de Janeiro, 2012.
- [31] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 5419: Proteção Contra Descargas Atmosféricas,” Rio de Janeiro, 2015.
- [32] B. Gupta e B. Thapar, “Impulse impedance of grounding grids,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Dezembro 1980.

### ANEXO A – Relação de pontos medidos

dP/dA (%)		Dimensional das Malhas (m)	
		10x10	5x5
		Diagonal D = 14,14	Diagonal D = 7,07
dA= 0,75D	10%	1,06	0,53
	20%	2,12	1,06
	30%	3,18	1,59
	40%	4,24	2,12
	50%	5,30	2,65
	60%	6,36	3,18
	70%	7,42	3,71
	80%	8,49	4,24
dA=1D	90%	9,55	4,77
	10%	1,41	0,71
	20%	2,83	1,41
	30%	4,24	2,12
	40%	5,66	2,83
	50%	7,07	3,54
	60%	8,49	4,24
	70%	9,90	4,95
	80%	11,31	5,66
dA=2D	90%	12,73	6,36
	10%	2,83	1,41
	20%	5,66	2,83
	30%	8,49	4,24
	40%	11,31	5,66
	50%	14,14	7,07
	60%	16,97	8,49
	70%	19,80	9,90
	80%	22,63	11,31
90%	25,46	12,73	

dP/dA (%)		Dimensional das Malhas (m)	
		10x10	5x5
		Diagonal D = 14,14	Diagonal D = 7,07
dA=3D	10%	4,24	2,12
	20%	8,49	4,24
	30%	12,73	6,36
	40%	16,97	8,49
	50%	21,21	10,61
	60%	25,46	12,73
	70%	29,70	14,85
	80%	33,94	16,97
dA=4D	90%	38,18	19,09
	10%	5,66	2,83
	20%	11,31	5,66
	30%	16,97	8,49
	40%	22,63	11,31
	50%	28,28	14,14
	60%	33,94	16,97
	70%	39,60	19,80
	80%	45,25	22,63
dA=5D	90%	50,91	25,46
	10%	7,07	3,54
	20%	14,14	7,07
	30%	21,21	10,61
	40%	28,28	14,14
	50%	35,36	17,68
	60%	42,43	21,21
	70%	49,50	24,75
	80%	56,57	28,28
90%	63,64	31,82	

## ANEXO B – Incerteza expandida e erros relativos das medidas de resistência de aterramento obtidas pelo terrômetro e pelo Método da Derivada de Corrente

### Eletrodos no mesmo sentido:

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
5x5 m 0,75D	10%	24,8	0,64	23,07	1,44	7,00%
	20%	35,7	0,92	34,77	2,17	2,59%
	30%	44,9	1,16	44,31	2,77	1,31%
	40%	53,3	1,38	53,40	3,33	0,18%
	50%	62,0	1,60	62,92	3,93	1,49%
	60%	71,1	1,84	73,18	4,57	2,93%
	70%	84,7	2,19	88,21	5,51	4,15%
	80%	102,0	2,63	107,15	6,69	5,05%
5x5 m 1D	10%	25,3	0,65	23,89	1,49	5,56%
	20%	35,8	0,92	34,75	2,17	2,93%
	30%	44,2	1,14	43,80	2,74	0,90%
	40%	51,2	1,32	51,62	3,22	0,82%
	50%	58,2	1,50	58,79	3,67	1,01%
	60%	66,0	1,70	67,86	4,24	2,81%
	70%	76,2	1,97	79,94	4,99	4,91%
	80%	92,4	2,39	96,62	6,03	4,56%
5x5 m 2D	10%	31,0	0,80	30,04	1,88	3,10%
	20%	41,4	1,07	41,25	2,58	0,36%
	30%	47,9	1,24	47,81	2,99	0,19%
	40%	53,2	1,37	54,37	3,40	2,20%
	50%	58,3	1,51	59,99	3,75	2,90%
	60%	63,5	1,64	64,54	4,03	1,63%
	70%	69,4	1,79	71,06	4,44	2,40%
	80%	78,8	2,03	81,25	5,07	3,11%
90%	98,6	2,55	102,95	6,43	4,41%	



malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
5x5 m 3D	10%	35,9	0,93	36,32	2,27	1,16%
	20%	45,8	1,18	46,94	2,93	2,50%
	30%	51,8	1,34	54,13	3,38	4,50%
	40%	56,1	1,45	57,75	3,61	2,94%
	50%	59,4	1,53	62,12	3,88	4,58%
	60%	63,1	1,63	65,78	4,11	4,25%
	70%	68,4	1,77	71,04	4,44	3,86%
	80%	77,3	2,00	80,21	5,01	3,76%
	90%	88,5	2,29	92,20	5,76	4,18%
5x5 m 4D	10%	39,6	1,02	39,73	2,48	0,33%
	20%	49,0	1,27	50,69	3,17	3,45%
	30%	54,1	1,40	55,65	3,48	2,86%
	40%	57,0	1,47	58,51	3,65	2,64%
	50%	59,3	1,53	61,51	3,84	3,72%
	60%	61,9	1,60	65,33	4,08	5,54%
	70%	64,9	1,68	66,58	4,16	2,59%
	80%	72,1	1,86	73,73	4,60	2,26%
	90%	86,8	2,24	89,59	5,59	3,22%
5x5 m 5D	10%	42,2	1,09	42,10	2,63	0,23%
	20%	51,2	1,32	51,43	3,21	0,45%
	30%	55,5	1,43	56,70	3,54	2,15%
	40%	57,6	1,49	59,47	3,71	3,25%
	50%	59,5	1,54	61,19	3,82	2,83%
	60%	60,7	1,57	62,56	3,91	3,07%
	70%	64,0	1,65	65,13	4,07	1,77%
	80%	68,3	1,76	69,56	4,34	1,84%
	90%	85,2	2,20	85,30	5,33	0,12%

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
10x10 m 0,75D	10%	8,7	0,22	8,06	0,50	7,32%
	20%	11,1	0,29	11,10	0,69	0,12%
	30%	12,5	0,32	12,14	0,76	2,82%
	40%	13,6	0,35	13,43	0,84	0,94%
	50%	14,9	0,38	14,18	0,89	4,51%
	60%	16,6	0,43	16,51	1,03	0,73%
	70%	19,4	0,50	19,23	1,20	0,89%
	80%	24,0	0,62	24,40	1,52	1,67%
	90%	36,2	0,93	36,88	2,30	1,89%
10x10 m 1D	10%	9,4	0,24	9,19	0,57	2,00%
	20%	11,5	0,30	11,08	0,69	3,66%
	30%	12,6	0,33	12,00	0,75	4,88%
	40%	13,7	0,35	13,37	0,83	2,07%
	50%	14,7	0,38	14,38	0,90	2,26%
	60%	16,1	0,41	15,63	0,98	2,75%
	70%	18,1	0,47	17,92	1,12	0,93%
	80%	21,7	0,56	21,50	1,34	0,93%
	90%	29,8	0,77	29,87	1,87	0,24%
10x10 m 2D	10%	10,8	0,28	10,60	0,66	2,09%
	20%	12,2	0,32	11,99	0,75	1,71%
	30%	13,0	0,34	12,74	0,80	1,82%
	40%	13,7	0,35	13,19	0,82	3,72%
	50%	14,6	0,38	14,06	0,88	3,92%
	60%	15,4	0,40	14,49	0,90	5,80%
	70%	17,5	0,45	17,00	1,06	2,58%
	80%	21,1	0,54	20,73	1,29	1,74%
	90%	29,5	0,76	30,63	1,91	3,83%

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
10x10 m 3D	10%	11,6	0,30	11,19	0,70	3,15%
	20%	12,6	0,32	11,80	0,74	6,05%
	30%	13,2	0,34	13,00	0,81	1,81%
	40%	13,7	0,35	13,01	0,81	4,67%
	50%	14,2	0,37	14,27	0,89	0,27%
	60%	15,0	0,39	14,32	0,89	4,43%
	70%	16,2	0,42	14,73	0,92	8,82%
	80%	18,4	0,48	18,01	1,12	2,11%
	90%	25,5	0,66	26,30	1,64	3,14%
10x10 m 4D	10%	12,0	0,31	11,94	0,75	0,30%
	20%	12,9	0,33	12,01	0,75	6,99%
	30%	13,4	0,35	12,50	0,78	6,81%
	40%	13,8	0,36	12,85	0,80	6,60%
	50%	14,1	0,36	13,05	0,81	7,39%
	60%	14,5	0,37	13,15	0,82	8,99%
	70%	15,2	0,39	15,19	0,95	0,30%
	80%	17,6	0,45	16,13	1,01	8,07%
	90%	25,9	0,67	25,71	1,61	0,74%
10x10 m 5D	10%	12,3	0,32	12,15	0,76	1,25%
	20%	13,2	0,34	12,71	0,79	3,86%
	30%	13,5	0,35	13,06	0,82	3,44%
	40%	14,0	0,36	12,96	0,81	7,09%
	50%	14,1	0,36	12,77	0,80	9,17%
	60%	14,2	0,37	13,69	0,86	3,70%
	70%	14,7	0,38	14,59	0,91	1,01%
	80%	16,5	0,43	17,31	1,08	4,88%
	90%	23,8	0,61	24,40	1,52	2,51%

**Eletrodos em Ortogonal:**

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
5x5 m 0,75D	10%	39,2	1,01	39,13	2,44	0,18%
	20%	43,8	1,13	43,82	2,74	0,06%
	30%	51,2	1,32	52,73	3,29	2,98%
	40%	52,5	1,35	54,06	3,38	2,97%
	50%	54,3	1,40	56,06	3,50	3,25%
	60%	56	1,44	57,89	3,62	3,38%
	70%	57,3	1,48	59,62	3,72	4,05%
	80%	58,2	1,50	60,29	3,76	3,59%
	90%	59	1,52	61,76	3,86	4,68%
5x5 m 1D	10%	39	1,01	39,34	2,46	0,87%
	20%	47,1	1,22	48,38	3,02	2,72%
	30%	50,4	1,30	51,93	3,24	3,03%
	40%	53,2	1,37	55,25	3,45	3,85%
	50%	55,7	1,44	57,58	3,60	3,38%
	60%	57,2	1,48	59,49	3,72	4,00%
	70%	58,5	1,51	61,09	3,81	4,42%
	80%	59,3	1,53	61,92	3,87	4,42%
	90%	60	1,55	62,72	3,92	4,53%
5x5 m 2D	10%	44,5	1,15	45,51	2,84	2,27%
	20%	51,2	1,32	53,00	3,31	3,51%
	30%	56	1,44	58,09	3,63	3,72%
	40%	59,1	1,52	61,84	3,86	4,63%
	50%	61,1	1,58	63,75	3,98	4,34%
	60%	62,6	1,62	65,77	4,11	5,06%
	70%	63,9	1,65	66,72	4,17	4,41%
	80%	64,5	1,66	67,27	4,20	4,30%
	90%	65,1	1,68	-	-	-

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
5x5 m 3D	10%	47,4	1,22	48,72	3,04	2,78%
	20%	55,5	1,43	56,88	3,55	2,50%
	30%	59,8	1,54	62,38	3,90	4,32%
	40%	62,5	1,61	65,35	4,08	4,56%
	50%	64,3	1,66	67,58	4,22	5,11%
	60%	65,5	1,69	68,20	4,26	4,12%
	70%	66	1,70	69,84	4,36	5,82%
	80%	66,9	1,73	69,37	4,33	3,70%
	90%	66,6	1,72	69,41	4,33	4,22%
5x5 m 4D	10%	50,3	1,30	50,95	3,18	1,29%
	20%	58,5	1,51	55,60	3,47	4,96%
	30%	62,6	1,62	63,86	3,99	2,01%
	40%	64,7	1,67	67,01	4,18	3,57%
	50%	65,9	1,70	67,63	4,22	2,62%
	60%	67	1,73	68,95	4,31	2,91%
	70%	67	1,73	70,22	4,39	4,80%
	80%	67,2	1,73	69,21	4,32	2,98%
	90%	67,8	1,75	70,23	4,39	3,59%
5x5 m 5D	10%	53,1	1,37	52,97	3,31	0,24%
	20%	60,7	1,57	61,46	3,84	1,25%
	30%	64,2	1,66	65,22	4,07	1,59%
	40%	65,8	1,70	67,01	4,18	1,84%
	50%	67,1	1,73	67,61	4,22	0,76%
	60%	67	1,73	67,54	4,22	0,81%
	70%	67,7	1,75	69,01	4,31	1,93%
	80%	67,4	1,74	68,72	4,29	1,96%
	90%	67,6	1,74	67,74	4,23	0,20%

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
10x10 m 0,75D	10%	10,1	0,26	10,50	0,66	3,98%
	20%	12,5	0,32	13,72	0,86	9,74%
	30%	13,5	0,35	14,92	0,93	10,55%
	40%	14	0,36	15,18	0,95	8,42%
	50%	14,3	0,37	15,50	0,97	8,40%
	60%	14,4	0,37	15,73	0,98	9,24%
	70%	14,5	0,37	15,78	0,99	8,85%
	80%	14,5	0,37	15,77	0,98	8,74%
	90%	14,5	0,37	15,77	0,98	8,77%
10x10 m 1D	10%	11,1	0,29	11,43	0,71	2,93%
	20%	13	0,34	13,71	0,86	5,45%
	30%	13,8	0,36	14,99	0,94	8,59%
	40%	14,2	0,37	15,58	0,97	9,70%
	50%	14,3	0,37	15,50	0,97	8,40%
	60%	14,4	0,37	15,71	0,98	9,10%
	70%	14,5	0,37	15,75	0,98	8,65%
	80%	14,6	0,38	15,79	0,99	8,16%
	90%	14,6	0,38	15,77	0,98	8,00%
10x10 m 2D	10%	12,7	0,33	13,87	0,87	9,21%
	20%	13,9	0,36	15,16	0,95	9,07%
	30%	14,3	0,37	15,75	0,98	10,12%
	40%	14,5	0,37	15,83	0,99	9,20%
	50%	14,7	0,38	15,98	1,00	8,74%
	60%	14,8	0,38	16,21	1,01	9,56%
	70%	14,9	0,38	16,30	1,02	9,41%
	80%	15	0,39	16,45	1,03	9,68%
	90%	15	0,39	16,34	1,02	8,97%

malha (dA)	dP/dA (%)	Resistência Aterramento Terrômetro ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Terrômetro ( $\Omega$ )	Resistência Aterramento Derivada Corrente ( $\Omega$ )	$\pm$ Incerteza Método Derivada Corrente ( $\Omega$ )	Erro relativo (%)
10x10 m 3D	10%	13,6	0,35	14,70	0,92	8,06%
	20%	14,6	0,38	15,65	0,98	7,21%
	30%	14,7	0,38	16,07	1,00	9,35%
	40%	14,9	0,38	16,42	1,03	10,17%
	50%	15	0,39	16,64	1,04	10,95%
	60%	15,2	0,39	16,64	1,04	9,48%
	70%	15,2	0,39	16,69	1,04	9,78%
	80%	15,3	0,39	16,71	1,04	9,21%
10x10 m 4D	10%	14	0,36	15,03	0,94	7,33%
	20%	14,7	0,38	15,74	0,98	7,10%
	30%	15	0,39	15,99	1,00	6,62%
	40%	15,2	0,39	16,31	1,02	7,31%
	50%	15,3	0,39	16,39	1,02	7,13%
	60%	15,4	0,40	16,42	1,03	6,62%
	70%	15,4	0,40	16,61	1,04	7,87%
	80%	15,5	0,40	16,61	1,04	7,15%
10x10 m 5D	10%	14,5	0,37	15,37	0,96	5,99%
	20%	14,9	0,38	16,07	1,00	7,87%
	30%	15,2	0,39	15,98	1,00	5,16%
	40%	15,3	0,39	16,53	1,03	8,02%
	50%	15,4	0,40	16,59	1,04	7,72%
	60%	15,5	0,40	16,62	1,04	7,22%
	70%	15,5	0,40	16,78	1,05	8,25%
	80%	15,5	0,40	16,61	1,04	7,14%
90%	15,5	0,40	16,64	1,04	7,34%	

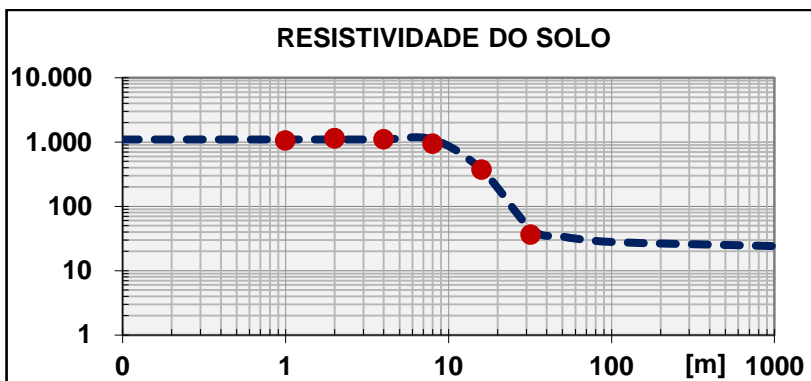
## ANEXO C – Estratificação do solo e cálculo da resistividade aparente

Estratificação do solo realizada em conjunto com as medidas de campo com eletrodos auxiliares alinhados: 06 de janeiro de 2018.

- Estratificação do solo pelo Método de Wenner [9]:

Espaçamento $a$ (m)	Resistência medida ( $\Omega$ )	Resistividade $\rho$ ( $\Omega.m$ )
1	158	1058,2
2	88,8	1135,1
4	43,8	1105,6
8	18,6	936,0
16	3,69	371,1
32	0,18	36,2

Profundidade das estacas de medição: 20 centímetros.



Resistividade 1ª camada ( $\rho_1$ )	Profundidade 1ª camada (d)	Resistividade 2ª camada ( $\rho_2$ )
1096,6 $\Omega.m$	15,3 m	23,8 $\Omega.m$

- Cálculo da resistividade aparente pelo Método de Otimização de Hooke-Jeeves [7]:

Malha de aterramento	Resistividade aparente $\rho_a$
5 m x 5 m	1092,3 $\Omega.m$
10 m x 10 m	1065,3 $\Omega.m$



Estratificação do solo realizada em conjunto com as medidas de campo com eletrodos auxiliares em ortogonal: 18 de agosto de 2018.

- Estratificação do solo pelo Método de Wenner [9]:

Espaçamento $a$ (m)	Resistência medida ( $\Omega$ )	Resistividade $\rho$ ( $\Omega.m$ )
1	103,3	691
2	41,1	525
4	23,2	586
8	0,9	47
16	0,4	42
32	0,2	42

Profundidade das estacas de medição: 20 centímetros.



Resistividade 1ª camada ( $\rho_1$ )	Profundidade 1ª camada (d)	Resistividade 2ª camada ( $\rho_2$ )
608,4 $\Omega.m$	5,6 m	15,8 $\Omega.m$

- Cálculo da resistividade aparente pelo Método de Otimização de Hooke-Jeeves [7]:

Malha de aterramento	Resistividade aparente $\rho_a$
5 m x 5 m	568,7 $\Omega.m$
10 m x 10 m	421,7 $\Omega.m$

### ANEXO D – Valores do Fator de Correção *FC* para resistência e impedância de impulso em p.u.

malha (dA)	dP/dA (%)	dP (mts)	Rm (p.u.)	Zm (p.u.)	FC Medido Resistência Aterramento	FC Medido Impedância Impulso
5x5 m 0,75D	10%	0,53	0,5822	0,6258	1,7177	1,5979
	20%	1,06	0,6505	0,7025	1,5373	1,4234
	30%	1,59	0,7604	0,7758	1,3152	1,2891
	40%	2,12	0,7797	0,8008	1,2826	1,2487
	50%	2,65	0,8064	0,8191	1,2401	1,2209
	60%	3,18	0,8317	0,8370	1,2024	1,1948
	70%	3,71	0,8510	0,8751	1,1751	1,1428
	80%	4,24	0,8643	0,8774	1,1570	1,1397
	90%	4,77	0,8762	0,8838	1,1413	1,1315
5x5 m 1D	10%	0,71	0,5792	0,6402	1,7266	1,5620
	20%	1,41	0,6995	0,7304	1,4296	1,3690
	30%	2,12	0,7485	0,7675	1,3360	1,3030
	40%	2,83	0,7901	0,8168	1,2657	1,2243
	50%	3,54	0,8272	0,8222	1,2089	1,2162
	60%	4,24	0,8495	0,8535	1,1772	1,1716
	70%	4,95	0,8688	0,8699	1,1510	1,1496
	80%	5,66	0,8807	0,8967	1,1355	1,1152
	90%	6,36	0,8911	0,8875	1,1223	1,1268
5x5 m 2D	10%	1,41	0,6609	0,7088	1,5132	1,4108
	20%	2,83	0,7604	0,7860	1,3152	1,2722
	30%	4,24	0,8317	0,8238	1,2024	1,2139
	40%	5,66	0,8777	0,8657	1,1394	1,1551
	50%	7,07	0,9074	0,8806	1,1021	1,1356
	60%	8,49	0,9297	0,8994	1,0757	1,1119
	70%	9,90	0,9490	0,9116	1,0538	1,0970
	80%	11,31	0,9579	0,9247	1,0440	1,0814
	90%	12,73	0,9668	0,9468	1,0343	1,0562

malha (dA)	dP/dA (%)	dP (mts)	Rm (p.u.)	Zm (p.u.)	FC Medido Resistência Aterramento	FC Medido Impedância Impulso
5x5 m 3D	10%	2,12	0,7039	0,7406	1,4206	1,3503
	20%	4,24	0,8242	0,8530	1,2133	1,1723
	30%	6,36	0,8881	0,9064	1,1260	1,1033
	40%	8,49	0,9282	0,9340	1,0774	1,0706
	50%	10,61	0,9549	0,9533	1,0472	1,0490
	60%	12,73	0,9727	0,9858	1,0280	1,0144
	70%	14,85	0,9802	0,9899	1,0202	1,0102
	80%	16,97	0,9935	0,9791	1,0065	1,0213
	90%	19,09	0,9891	0,9928	1,0110	1,0073
5x5 m 4D	10%	2,83	0,7470	0,7759	1,3387	1,2889
	20%	5,66	0,8688	0,8688	1,1510	1,1510
	30%	8,49	0,9297	0,9289	1,0757	1,0765
	40%	11,31	0,9609	0,9628	1,0407	1,0387
	50%	14,14	0,9787	0,9839	1,0218	1,0164
	60%	16,97	0,9950	0,9905	1,0050	1,0096
	70%	19,80	0,9950	1,0029	1,0050	0,9971
	80%	22,63	0,9980	1,0003	1,0020	0,9997
	90%	25,46	1,0069	1,0138	0,9932	0,9864
5x5 m 5D	10%	3,54	0,7886	0,8224	1,2681	1,2159
	20%	7,07	0,9015	0,9137	1,1093	1,0944
	30%	10,61	0,9534	0,9439	1,0488	1,0594
	40%	14,14	0,9772	0,9602	1,0233	1,0414
	50%	17,68	0,9965	1,0096	1,0035	0,9905
	60%	21,21	0,9950	0,9871	1,0050	1,0131
	70%	24,75	1,0054	1,0060	0,9946	0,9940
	80%	28,28	1,0010	1,0021	0,9990	0,9979
	90%	31,82	1,0039	0,9979	0,9961	1,0022

malha (dA)	dP/dA (%)	dP (mts)	Rm (p.u.)	Zm (p.u.)	FC Medido Resistência Aterramento	FC Medido Impedância Impulso
10x10 m 0,75D	10%	1,06	0,6523	0,8168	1,5330	1,2242
	20%	2,12	0,8073	0,8523	1,2386	1,1733
	30%	3,18	0,8719	0,8907	1,1469	1,1228
	40%	4,24	0,9042	0,8799	1,1059	1,1364
	50%	5,30	0,9236	0,9018	1,0827	1,1089
	60%	6,36	0,9301	0,9128	1,0752	1,0955
	70%	7,42	0,9365	0,9469	1,0678	1,0561
	80%	8,49	0,9365	0,9583	1,0678	1,0435
	90%	9,55	0,9365	0,9704	1,0678	1,0305
10x10 m 1D	10%	1,41	0,7169	0,6565	1,3949	1,5232
	20%	2,83	0,8396	0,7747	1,1910	1,2909
	30%	4,24	0,8913	0,8145	1,1220	1,2278
	40%	5,66	0,9171	0,8328	1,0904	1,2008
	50%	7,07	0,9236	0,8650	1,0827	1,1561
	60%	8,49	0,9301	0,8457	1,0752	1,1824
	70%	9,90	0,9365	0,8600	1,0678	1,1628
	80%	11,31	0,9430	0,8595	1,0605	1,1635
	90%	12,73	0,9430	0,8658	1,0605	1,1550
10x10 m 2D	10%	2,83	0,8203	0,8190	1,2191	1,2210
	20%	5,66	0,8978	0,9604	1,1139	1,0412
	30%	8,49	0,9236	0,9199	1,0827	1,0870
	40%	11,31	0,9365	0,9187	1,0678	1,0885
	50%	14,14	0,9494	0,9204	1,0533	1,0865
	60%	16,97	0,9559	0,9411	1,0461	1,0626
	70%	19,80	0,9623	0,9249	1,0391	1,0812
	80%	22,63	0,9688	0,9372	1,0322	1,0670
	90%	25,46	0,9688	0,9447	1,0322	1,0585

malha (dA)	dP/dA (%)	dP (mts)	Rm (p.u.)	Zm (p.u.)	FC Medido Resistência Aterramento	FC Medido Impedância Impulso
10x10 m 3D	10%	4,24	0,8784	0,8738	1,1385	1,1444
	20%	8,49	0,9430	0,9523	1,0605	1,0500
	30%	12,73	0,9494	0,9633	1,0533	1,0380
	40%	16,97	0,9623	0,9558	1,0391	1,0462
	50%	21,21	0,9688	0,9582	1,0322	1,0436
	60%	25,46	0,9817	0,9737	1,0186	1,0270
	70%	29,70	0,9817	0,9894	1,0186	1,0107
	80%	33,94	0,9882	0,9847	1,0120	1,0155
	90%	38,18	0,9882	1,0223	1,0120	0,9782
10x10 m 4D	10%	5,66	0,9042	0,9947	1,1059	1,0053
	20%	11,31	0,9494	0,9905	1,0533	1,0096
	30%	16,97	0,9688	1,0182	1,0322	0,9821
	40%	22,63	0,9817	1,0305	1,0186	0,9704
	50%	28,28	0,9882	1,0374	1,0120	0,9639
	60%	33,94	0,9946	1,0113	1,0054	0,9888
	70%	39,60	0,9946	1,0514	1,0054	0,9511
	80%	45,25	1,0011	1,0547	0,9989	0,9481
	90%	50,91	1,0011	1,0291	0,9989	0,9717
10x10 m 5D	10%	7,07	0,9365	1,0170	1,0678	0,9833
	20%	14,14	0,9623	1,0257	1,0391	0,9749
	30%	21,21	0,9817	1,0150	1,0186	0,9852
	40%	28,28	0,9882	1,0220	1,0120	0,9785
	50%	35,36	0,9946	1,0040	1,0054	0,9960
	60%	42,43	1,0011	0,9788	0,9989	1,0217
	70%	49,50	1,0011	1,0126	0,9989	0,9876
	80%	56,57	1,0011	1,0147	0,9989	0,9855
	90%	63,64	1,0011	1,0155	0,9989	0,9848

### ANEXO E – Erros relativos de resistência de aterramento e impedância de impulso corrigidos pelo Fator de Correção FC

malha (dA)	dP/dA (%)	Zm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Impedância de Impulso	Zm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Impedância de Impulso de Patamar (Zref)	Erro relativo (%)
5x5 m 0,75D	10%	40,98	1,4677	60,15	65,48	8,15%
	20%	46,00	1,4014	64,47		1,55%
	30%	50,80	1,3423	68,18		4,13%
	40%	52,44	1,2901	67,65		3,31%
	50%	53,63	1,2445	66,74		1,93%
	60%	54,81	1,2051	66,04		0,86%
	70%	57,30	1,1715	67,13		2,52%
	80%	57,46	1,1435	65,70		0,34%
	90%	57,87	1,1207	64,86		0,95%
5x5 m 1D	10%	41,92	1,4521	60,88		7,03%
	20%	47,83	1,3715	65,60		0,18%
	30%	50,26	1,3025	65,46		0,04%
	40%	53,49	1,2443	66,55		1,64%
	50%	53,84	1,1962	64,40		1,65%
	60%	55,89	1,1574	64,69		1,21%
	70%	56,96	1,1272	64,21		1,95%
	80%	58,72	1,1049	64,88		0,92%
	90%	58,11	1,0897	63,32		3,29%
5x5 m 2D	10%	46,41	1,3873	64,39		1,66%
	20%	51,47	1,2758	65,67		0,28%
	30%	53,94	1,1938	64,40		1,66%
	40%	56,69	1,1373	64,47		1,54%
	50%	57,66	1,1024	63,56		2,93%
	60%	58,89	1,0851	63,90		2,41%
	70%	59,69	1,0814	64,55		1,42%
	80%	60,55	1,0875	65,85		0,56%
	90%	-	1,0993	-		-

malha (dA)	dP/dA (%)	Zm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Impedância de Impulso	Zm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Impedância de Impulso de Patamar (Zref)	Erro relativo (%)
5x5 m 3D	10%	48,50	1,3194	63,98	65,48	2,29%
	20%	55,86	1,2035	67,23		2,66%
	30%	59,35	1,1284	66,97		2,28%
	40%	61,16	1,0859	66,42		1,43%
	50%	62,43	1,0677	66,65		1,79%
	60%	64,55	1,0656	68,79		5,05%
	70%	64,82	1,0712	69,44		6,04%
	80%	64,12	1,0764	69,02		5,40%
	90%	65,01	1,0730	69,75		6,52%
5x5 m 4D	10%	50,80	1,2509	63,55		2,95%
	20%	56,89	1,1449	65,14		0,53%
	30%	60,83	1,0820	65,81		0,51%
	40%	63,04	1,0510	66,26		1,19%
	50%	64,42	1,0411	67,07		2,43%
	60%	64,86	1,0412	67,53		3,13%
	70%	65,67	1,0404	68,32		4,34%
	80%	65,50	1,0276	67,30		2,78%
	90%	66,39	0,9918	65,84		0,55%
5x5 m 5D	10%	53,85	1,1853	63,83		2,52%
	20%	59,83	1,0974	65,66		0,27%
	30%	61,81	1,0475	64,75		1,12%
	40%	62,88	1,0251	64,45		1,57%
	50%	66,11	1,0197	67,41		2,95%
	60%	64,64	1,0209	65,99		0,78%
	70%	65,87	1,0183	67,08		2,44%
	80%	65,62	1,0014	65,71		0,35%
	90%	65,34	0,9598	62,71		4,23%

malha (dA)	dP/dA (%)	Zm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Impedância de Impulso	Zm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Impedância de Impulso de Patamar (Zref)	Erro relativo (%)
10x10 m 0,75D	10%	14,72	1,4202	20,91	18,03	16,01%
	20%	15,36	1,3197	20,27		12,48%
	30%	16,05	1,2401	19,91		10,45%
	40%	15,86	1,1793	18,70		3,77%
	50%	16,26	1,1352	18,45		2,37%
	60%	16,45	1,1058	18,19		0,94%
	70%	17,07	1,0890	18,59		3,11%
	80%	17,27	1,0827	18,70		3,76%
	90%	17,49	1,0850	18,98		5,28%
10x10 m 1D	10%	11,83	1,3873	16,42		8,92%
	20%	13,96	1,2758	17,82		1,17%
	30%	14,68	1,1938	17,53		2,77%
	40%	15,01	1,1373	17,07		5,29%
	50%	15,59	1,1024	17,19		4,64%
	60%	15,24	1,0851	16,54		8,23%
	70%	15,50	1,0814	16,76		7,00%
	80%	15,49	1,0875	16,85		6,54%
	90%	15,61	1,0993	17,16		4,82%
10x10 m 2D	10%	14,76	1,2509	18,47		2,45%
	20%	17,31	1,1449	19,82		9,96%
	30%	16,58	1,0820	17,94		0,46%
	40%	16,56	1,0510	17,41		3,44%
	50%	16,59	1,0411	17,27		4,18%
	60%	16,96	1,0412	17,66		2,02%
	70%	16,67	1,0404	17,34		3,77%
	80%	16,89	1,0276	17,36		3,70%
	90%	17,03	0,9918	16,89		6,30%



malha (dA)	dP/dA (%)	Zm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Impedância de Impulso	Zm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Impedância de Impulso de Patamar (Zref)	Erro relativo (%)
10x10 m 3D	10%	15,75	1,1257	17,73	18,03	1,63%
	20%	17,17	1,0607	18,21		1,02%
	30%	17,36	1,0239	17,78		1,36%
	40%	17,23	1,0084	17,37		3,62%
	50%	17,27	1,0074	17,40		3,47%
	60%	17,55	1,0140	17,80		1,27%
	70%	17,83	1,0215	18,22		1,07%
	80%	17,75	1,0230	18,16		0,73%
	90%	18,43	1,0116	18,64		3,41%
10x10 m 4D	10%	17,93	1,0329	18,52		2,74%
	20%	17,85	1,0142	18,11		0,46%
	30%	18,35	0,9981	18,32		1,62%
	40%	18,57	0,9844	18,29		1,44%
	50%	18,70	0,9735	18,20		0,99%
	60%	18,23	0,9653	17,60		2,38%
	70%	18,95	0,9601	18,20		0,94%
	80%	19,01	0,9578	18,21		1,02%
	90%	18,55	0,9586	17,78		1,35%
10x10 m 5D	10%	18,33	0,9712	17,80		1,24%
	20%	18,49	0,9748	18,02		0,01%
	30%	18,30	0,9811	17,95		0,41%
	40%	18,42	0,9885	18,21		1,03%
	50%	18,10	0,9952	18,01		0,09%
	60%	17,64	0,9994	17,63		2,19%
	70%	18,25	0,9994	18,24		1,20%
	80%	18,29	0,9936	18,17		0,82%
	90%	18,30	0,9802	17,94		0,46%

malha (dA)	dP/dA (%)	Rm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Resistência de Aterramento	Rm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Resistência de Patamar (Rref)	Erro relativo (%)
5x5 m 0,75D	10%	39,2	1,6039	62,87	67,34	6,63%
	20%	43,8	1,5106	66,16		1,74%
	30%	51,2	1,4272	73,07		8,52%
	40%	52,5	1,3532	71,04		5,51%
	50%	54,3	1,2883	69,95		3,89%
	60%	56,0	1,2319	68,98		2,45%
	70%	57,3	1,1835	67,82		0,71%
	80%	58,2	1,1429	66,52		1,22%
	90%	59,0	1,1094	65,46		2,79%
5x5 m 1D	10%	39,0	1,5662	61,08		9,29%
	20%	47,1	1,4543	68,50		1,73%
	30%	50,4	1,3581	68,45		1,65%
	40%	53,2	1,2767	67,92		0,86%
	50%	55,7	1,2090	67,34		0,01%
	60%	57,2	1,1541	66,02		1,96%
	70%	58,5	1,1111	65,00		3,47%
	80%	59,3	1,0790	63,99		4,97%
	90%	60,0	1,0568	63,41		5,83%
5x5 m 2D	10%	44,5	1,4425	64,19		4,67%
	20%	51,2	1,2954	66,32		1,50%
	30%	56,0	1,1873	66,49		1,26%
	40%	59,1	1,1132	65,79		2,30%
	50%	61,1	1,0681	65,26		3,08%
	60%	62,6	1,0469	65,54		2,67%
	70%	63,9	1,0446	66,75		0,87%
	80%	64,5	1,0561	68,12		1,17%
	90%	65,1	1,0765	70,08		4,07%

malha (dA)	dP/dA (%)	Rm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Resistência de Aterramento	Rm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Resistência de Patamar (Rref)	Erro relativo (%)
5x5 m 3D	10%	47,4	1,3502	64,00	67,34	4,95%
	20%	55,5	1,2035	66,79		0,80%
	30%	59,8	1,1094	66,34		1,48%
	40%	62,5	1,0575	66,09		1,84%
	50%	64,3	1,0375	66,71		0,93%
	60%	65,5	1,0390	68,05		1,07%
	70%	66,0	1,0516	69,41		3,07%
	80%	66,9	1,0650	71,25		5,81%
	90%	66,6	1,0687	71,17		5,70%
5x5 m 4D	10%	50,3	1,2788	64,33		4,47%
	20%	58,5	1,1473	67,12		0,33%
	30%	62,6	1,0697	66,96		0,55%
	40%	64,7	1,0326	66,81		0,78%
	50%	65,9	1,0224	67,38		0,06%
	60%	67,0	1,0255	68,71		2,03%
	70%	67,0	1,0283	68,89		2,31%
	80%	67,2	1,0172	68,36		1,52%
	90%	67,8	0,9787	66,36		1,45%
5x5 m 5D	10%	53,1	1,2223	64,90		3,61%
	20%	60,7	1,1116	67,48		0,21%
	30%	64,2	1,0481	67,29		0,07%
	40%	65,8	1,0192	67,06		0,41%
	50%	67,1	1,0120	67,91		0,85%
	60%	67,0	1,0140	67,94		0,90%
	70%	67,7	1,0126	68,55		1,81%
	80%	67,4	0,9950	67,07		0,40%
	90%	67,6	0,9487	64,13		4,76%

malha (dA)	dP/dA (%)	Rm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Resistência de Aterramento	Rm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Resistência de Patamar (Rref)	Erro relativo (%)
10x10 m 0,75D	10%	10,1	1,4995	15,15	15,48	2,18%
	20%	12,5	1,3636	17,04		10,09%
	30%	13,5	1,2556	16,95		9,48%
	40%	14,0	1,1730	16,42		6,06%
	50%	14,3	1,1131	15,92		2,80%
	60%	14,4	1,0732	15,45		0,19%
	70%	14,5	1,0507	15,23		1,60%
	80%	14,5	1,0429	15,12		2,33%
	90%	14,5	1,0472	15,18		1,92%
10x10 m 1D	10%	11,1	1,4425	16,01		3,42%
	20%	13,0	1,2954	16,84		8,76%
	30%	13,8	1,1873	16,38		5,82%
	40%	14,2	1,1132	15,81		2,10%
	50%	14,3	1,0681	15,27		1,35%
	60%	14,4	1,0469	15,08		2,63%
	70%	14,5	1,0446	15,15		2,17%
	80%	14,6	1,0561	15,42		0,41%
	90%	14,6	1,0765	15,72		1,51%
10x10 m 2D	10%	12,7	1,2788	16,24		4,90%
	20%	13,9	1,1473	15,95		3,00%
	30%	14,3	1,0697	15,30		1,20%
	40%	14,5	1,0326	14,97		3,29%
	50%	14,7	1,0224	15,03		2,93%
	60%	14,8	1,0255	15,18		1,98%
	70%	14,9	1,0283	15,32		1,05%
	80%	15,0	1,0172	15,26		1,45%
	90%	15,0	0,9787	14,68		5,18%

malha (dA)	dP/dA (%)	Rm ( $\Omega$ )	FC Interpolado Resistência de Aterramento	Rm Corrigido pelo FC ( $\Omega$ )	Valor de Resistência de Patamar (Rref)	Erro relativo (%)
10x10 m 3D	10%	13,6	1,1772	16,01	15,48	3,40%
	20%	14,6	1,0900	15,91		2,78%
	30%	14,7	1,0392	15,28		1,33%
	40%	14,9	1,0165	15,15		2,17%
	50%	15,0	1,0137	15,20		1,80%
	60%	15,2	1,0223	15,54		0,36%
	70%	15,2	1,0341	15,72		1,52%
	80%	15,3	1,0409	15,93		2,86%
	90%	15,3	1,0343	15,82		2,20%
10x10 m 4D	10%	14,0	1,1117	15,56		0,52%
	20%	14,7	1,0711	15,75		1,70%
	30%	15,0	1,0415	15,62		0,90%
	40%	15,2	1,0211	15,52		0,25%
	50%	15,3	1,0082	15,43		0,37%
	60%	15,4	1,0010	15,42		0,43%
	70%	15,4	0,9978	15,37		0,76%
	80%	15,5	0,9968	15,45		0,21%
	90%	15,5	0,9962	15,44		0,27%
10x10 m 5D	10%	14,5	1,0563	15,32		1,08%
	20%	14,9	1,0356	15,43		0,34%
	30%	15,2	1,0207	15,51		0,20%
	40%	15,3	1,0107	15,46		0,13%
	50%	15,4	1,0045	15,47		0,09%
	60%	15,5	1,0012	15,52		0,23%
	70%	15,5	0,9998	15,50		0,09%
	80%	15,5	0,9993	15,49		0,04%
	90%	15,5	0,9988	15,48		0,01%