



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
DE MINAS GERAIS – CEFET-MG
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI – UFSJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO – DPPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA – PPGEL

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA PARA ARRANJOS TÍPICOS DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Mestrando: Fellipe Marcell da Silva Borges

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

Belo Horizonte – 2018



METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA PARA ARRANJOS TÍPICOS DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Fellipe Marcell da Silva Borges

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em Associação Ampla entre o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais e a Universidade Federal de São João Del Rei, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência
Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado
Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

Borges, Fellipe Marcell da Silva
B732m Metodologia para determinação da impedância impulsiva para
arranjos típicos de aterramentos elétricos. / Fellipe Marcell da Silva
Borges. -- Belo Horizonte, 2018.
71 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica em associação ampla com a Universidade
Federal de São João Del Rei, 2017.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Silva Alípio

Bibliografia

1. Proteção de Sistemas Elétricos - Aterramento. 2. Transitórios
(Eletricidade). 3. Descarga Atmosférica. I. Alípio, Rafael Silva. II.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.317



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Fellipe Marcell Da Silva Borges

“Metodologia para a Determinação da Impedância Impulsiva de Arranjos Típicos de Aterramentos Elétricos”

Dissertação nº 134 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 04 de Agosto de 2017 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Rafael Silva Alípio (Orientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof.ª. Dr.ª. Úrsula do Carmo Resende
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Silvério Visacro Filho
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Fernando Henrique Silveira
Universidade Federal de Minas Gerais

*A Deus, pela sua Excelência e
Majestade, por ter me criado à
sua imagem e semelhança e
me proporcionar o dom da
inteligência.*

***"Amém! Louvor e glória,
sabedoria, ação de graças,
honra, poder e força sejam
ao nosso Deus para todo o
sempre. Amém! "
(Apocalipse 7:12).***

*Aos meus pais, Carlos e Deise,
à minha amada Ariadne
e à Pipoca (in memoriam), meu
anjinho amarelinho*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida e pela sua mão sempre presente a conduzir os meus passos.

Aos meus pais, Carlos e Deise, pelo amor, amparo e investimento na minha educação.

Ao meu irmão, Matheus, pelo companheirismo.

À minha amada Ariadne, por ter me acompanhado nessa caminhada de forma tão amorosa, carinhosa, solidária e compreensiva, sem a qual não poderia prosseguir. Pela alegria vibrante dos momentos de comemoração e pelas palavras de apoio e incentivo nos momentos difíceis.

À minha sogra Lúcia, por ter me acolhido como um filho durante o mestrado.

Ao Prof.º Gláucio Ramos, da UFSJ, por ter sido o primeiro incentivador nessa jornada.

Ao meu orientador, Prof.º Rafael Alípio, por ter acreditado em mim mesmo quando eu mesmo não tinha tanta fé, pelo empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Ao Prof.º Márcio Matias, pelo apoio e confiança a mim depositado.

Aos meus colegas do mestrado: Pedro, Guilherme, Fernanda, Gustavo, Daiane, Isabel, Deishe, Fabiano, Bruno, Diego, Rafael pela parceira e pelos momentos de convívio.

Ao aluno de iniciação científica, Gabriel Matoso, pela valiosa ajuda nos passos iniciais desta pesquisa.

À minha amiga, Viviane Branco, por ter me auxiliado de forma brilhante na análise dos resultados.

Aos meus amigos, Jairo e Cléssia, Pedro, Jackson, tio Manoel e tia Fátima, tio Idemar, tia Aparecida e a família PIBBH pelo apoio e orações.

Agradeço ao CEFET, pelo auxílio financeiro, mas principalmente pelo ensino de qualidade.

Enfim, meus agradecimentos a todos aqueles que acreditaram e torceram por mim.

Resumo

Esta dissertação é dedicada à avaliação do comportamento impulsivo de aterramentos elétricos, em particular a determinação da impedância impulsiva de aterramento. Propõe-se uma metodologia inovadora para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. Os parâmetros de entrada da metodologia são determinados utilizando-se basicamente fórmulas práticas, o que permite a sua ampla aplicação não somente na área acadêmica, mas também industrial. A metodologia é aplicada a arranjos típicos de aterramento, tais como eletrodos horizontais, cabos contrapeso e malhas de aterramento, considerando diferentes dimensões e solos de baixa, moderada e elevada resistividade. Em todos os casos é considerada a aplicação de ondas representativas de primeiras descargas e descargas subsequentes. Tendo como referência os resultados obtidos utilizando um modelo eletromagnético rigoroso, mostra-se que a metodologia proposta fornece excelentes estimativas da impedância impulsiva de aterramento de arranjos diversos.

Palavras-chave: aterramentos elétricos, resposta impulsiva, impedância impulsiva, descargas atmosféricas

Abstract

This master thesis is dedicated to the evaluation of the impulse behavior of grounding systems, in particular the determination of the grounding impulse impedance. A new methodology for estimating the impulse impedance of typical grounding arrangements is proposed. The input parameters of the methodology are basically determined using practical formulas, which allows its wide application not only in academic but also industrial area. The methodology is applied to typical grounding arrangements, such as horizontal electrodes, counterpoise wires and grounding meshes, considering different dimensions and low, moderate and high resistivity soils. In all cases, it is considered the application of representative current waves of first and subsequent strokes. Based on the results obtained using a rigorous electromagnetic model, it is shown that the proposed methodology provides excellent estimates of the impulse impedance of several configurations.

Key-words: grounding, impulse response, impulse impedance, lightning

Lista de Ilustrações

Figura 2.1: Representação de uma pequena porção de um eletrodo por meio de parâmetros concentrados, indicando as correntes e tensões envolvidas. Adaptado de ¹	21
Figura 2.2: Impedância de aterramento ao longo do espectro de frequência característico de uma descarga atmosférica. Adaptado de ¹	23
Figura 2.3: Efeitos de propagação sofridos num eletrodo de aterramento: atenuação e distorção. Adaptado de ¹	24
Figura 2.4: Módulo (a) e a fase (b) da impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 60 m, enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo de resistividade de baixa frequência de 1000 Ωm	27
Figura 2.5: GPR desenvolvido por um eletrodo de 60m em resposta à injeção de uma onda do tipo dupla exponencial de 1 kA, 1,2/50 μs	28
Figura 2.6: Impedância impulsiva de um eletrodo horizontal, enterrado em um solo de 1000 Ωm , em função do seu comprimento.	30
Figura 2.7: Coeficiente de impulso de um eletrodo horizontal, enterrado em um solo de 1000 Ωm , em função de seu comprimento.	31
Figura 3.1 – Impedância impulsiva de aterramento (a) e coeficiente de impulso (b) em função do comprimento para um eletrodo horizontal de aterramento, raio de 7mm, enterrado a 0,5m de profundidade em um solo de 1000 Ωm . Considera-se a variação dos parâmetros elétricos do solo de acordo com [5] e, por simplicidade, a injeção de uma onda de corrente 1,2/50 μs do tipo dupla exponencial.	35
Figura 3.2 – Eletrodo horizontal submetido a uma corrente impulsiva: (a) Arranjo Original e (b) Arranjo Equivalente.	36
Figura 3.3 – Metodologia para determinação da impedância impulsiva a partir da resistividade do solo, sistema de aterramento original e tipo de descarga atmosférica.	37
Figura 3.4 – Arranjos de aterramento típicos submetidos a correntes impulsivas e os arranjos equivalente associados: (a) haste, (b) eletrodos horizontais e (c) cabos contrapeso.	38
Figura 3.5 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no centro da malha, de acordo com a primeira abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente com área total igual à área efetiva.	39
Figura 3.6 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no canto da malha, de acordo com a primeira abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação	

da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente com área total igual à área efetiva.	39
Figura 3.7 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no centro da malha, de acordo com a segunda abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente com área total igual à área efetiva.	40
Figura 3.8 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no canto da malha, de acordo com a segunda abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente com área total igual à área efetiva.	41
Figura 3.9 – Coeficiente de impulso em função do comprimento do lado da malha para uma malha quadrada com reticulados de 5 m × 5 m e enterrada a 0,8 m de profundidade em um solo de 1000Ω.m. Considera-se a variação dos parâmetros elétricos do solo de acordo com [5] e, por simplicidade, a injeção de uma onda de corrente 1,2/50-μs do tipo dupla exponencial no centro da malha.	42
Figura 4.1: Dimensões para cada arranjo típico: (a) Eletrodo Horizontal, (b) Cabo Contrapeso e (c) Malha de Aterramento	45
Figura 4.2 – Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para os eletrodos horizontais.	49
Figura 4.3 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para eletrodos horizontais	50
Figura 4.4 – Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para os cabos contrapesos.	52
Figura 4.5 – Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para cabos contrapesos.	52
Figura 4.6 - Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para malhas de aterramento.	55
Figura 4.7 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para malhas de aterramento	56
Figura 4.8 - Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para malhas de aterramento.	58
Figura 4.9 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para malhas de aterramento	59
Figura 4.10 - Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para malhas de aterramento.	61
Figura 4.11 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para malhas de aterramento	63

Figura 4.12 – Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para as diferentes topologias de sistemas de aterramento	64
Figura 4.13– Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para sistemas de aterramento.....	65

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Comprimentos efetivos utilizados para arranjos típicos em cada resistividade do solo..	46
Tabela 4.2 – Coeficientes de impulso utilizados em cada resistividade específica.....	47

Lista de Abreviaturas e Siglas

ATP	<i>Alternative Transients Program</i> (Programa Alternativo de Transitórios)
DA	Descarga Atmosférica
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i> (Programa de Transitórios Eletromagnéticos)
GPR	<i>Grounding Potential Rise</i> (Elevação de Potencial de Aterramento)
HEM	<i>Hybrid Electromagnetic Model</i> (Modelo Híbrido Eletromagnético)
LT	Linha de Transmissão
NBR	Normas Brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
SEP	Sistemas Elétricos de Potência

Lista de Símbolos

I_L	Corrente Longitudinal (A)
I_T	Corrente Transversal (A)
I_G	Corrente Condutiva (A)
I_C	Corrente Capacitiva (A)
ΔV_R	Diferença de Potencial relativa às perdas internas do condutor (V)
ΔV_L	Diferença de Potencial relativa às perdas internas do condutor (V)
R	Resistência (Ω)
L	Indutância (H)
G	Condutância (S)
C	Capacitância (F)
R_T	Resistência de Aterramento (Ω)
V_T	Elevação de Potencial no ponto de injeção de corrente (V)
I_J	Corrente injetada no Eletrodo (A)
$Z(\omega)$	Impedância Harmônica (Ω)
$V(\omega)$	Tensão Harmônica (V)
$I(\omega)$	Corrente Harmônica (A)
MHz	Megahertz (Unidade de Frequência)
kHz	Kilohertz (Unidade de Frequência)

cm	Centímetro (Unidade de Comprimento)
m	Metro (Unidade de Comprimento)
J_T	Densidade de Corrente Total (A/m^2)
J_C	Densidade de Corrente Condutiva (A/m^2)
J_D	Densidade de Corrente Capacitiva (A/m^2)
D	Fluxo Elétrico ($V \cdot m$)
t	Tempo (s)
H	Campo Magnético (F/m)
σ_0	Condutividade Elétrica (independente da frequência) (S/m)
E	Campo Elétrico (V/m)
j	Número Complexo ($\sqrt{-1}$)
ω	Frequência Angular (rad/m)
ε_*	Permissividade Elétrica Total (F/m)
ε'	Permissividade Elétrica de Polarização e de Armazenamento de Energia (F/m)
ε''	Permissividade Elétrica das Perdas de Polarização (F/m)
σ	Condutividade Elétrica Total (dependente da frequência)
μs	Microssegundos (Unidade de Tempo)
ρ	Resistividade do solo (Ωm)
Z_p	Impedância Impulsiva (Ω)
V_p	Tensão de Pico (V)
I_p	Corrente de Pico (A)
I_C	Coeficiente de Impulso (-)

μm	Micrômetro (Unidade de Comprimento)
R_{EQ}	Resistência de Aterramento do Arranjo Equivalente (Ω)
L	Comprimento do Eletrodo (m)
ρ_0	Resistividade do Solo para a frequência de 100Hz (Ωm)
L_{EF}	Comprimento Efetivo (m)
α	Coeficiente Linear para Determinação do Comprimento Efetivo (-)
β	Coeficiente Linear para Determinação do Comprimento Efetivo (-)
k	Fator de Arranjo (-)
α_{1st}	Coeficiente Linear α para Primeira Descarga (-)
α_{sub}	Coeficiente Linear α para Descarga Subsequente (-)
β_{1st}	Coeficiente Linear β para Primeira Descarga (-)
β_{sub}	Coeficiente Linear β para Descarga Subsequente (-)
I_{C0}	Coeficiente de Impulso Calculado (-)
E_{PA}	Erro Percentual Absoluto (%)
E_{PR}	Erro Percentual Relativo (%)
θ	Valor Exato da Impedância impulsiva (Ω)
$\hat{\theta}$	Valor Estimado da Impedância impulsiva (Ω)

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	17
1.1. Relevância	17
1.2. Objetivos	19
1.3. Organização do texto	19
Capítulo 2 – Comportamento de Aterramentos Elétricos Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas	20
2.1. Introdução	20
2.2. Impedância de Aterramento	20
2.3. Efeitos de Propagação	23
2.4. Caracterização do solo.....	24
2.4.1. Dependência da Frequência dos Parâmetros Elétricos do solo	24
2.4.2. Ionização do Solo	25
2.5. Parâmetros para Caracterização do Comportamento Impulsivo do Aterramento	26
2.5.1. Impedância Harmônica	26
2.5.2. Elevação de Potencial no Aterramento (GPR)	27
2.5.3. Impedância Impulsiva e Comprimento Efetivo	29
2.5.4. Coeficiente de Impulso	30
2.6. Considerações Finais.....	32
Capítulo 3 – Nova Metodologia para Estimativa da Impedância Impulsiva de Arranjos Típicos de Aterramento	33
3.1. Introdução	33
3.2. Fundamentos da Metodologia	34
3.3. Extensão da Metodologia Proposta para Outros Arranjos Típicos de Aterramento Compostos por Eletrodos ou Conjuntos de Eletrodos	37
3.4. Extensão da Metodologia Proposta para Malhas de Aterramento	38
3.5. Comentários Adicionais.....	41
3.5.1. Determinação do Coeficiente de Impulso e Comprimento Efetivo.....	41
3.5.2. Redução do Coeficiente de Impulso para Arranjos Complexos.....	42
3.6. Considerações Finais.....	43
Capítulo 4 – Resultados e Discussão.....	44
4.1. Introdução	44

4.2. Desenvolvimentos	44
4.3. Eletrodos Horizontais	47
4.3.1. Análise Gráfica	47
4.3.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais	49
4.4. Cabos Contrapeso	50
4.4.1. Análise Gráfica	50
4.4.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais	52
4.5. Malhas de Aterramento	53
4.5.1. Primeira Abordagem.....	53
4.5.1.1. Análise Gráfica.....	53
4.5.1.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais.....	56
4.5.2. Segunda Abordagem.....	56
4.5.2.1. Análise Gráfica.....	57
4.5.2.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais.....	59
4.5.3. Análise Comparativa entre as Abordagens Diferentes.....	59
4.5.3.1. Análise Comparativa entre os Arranjos de Aterramento Analisados: Análise Gráfica	60
4.5.3.2. Análise Comparativa entre os Arranjos de Aterramento Analisados: Análise de Distribuição de Erros Percentuais	62
4.6. Análise Comparativa entre os Arranjos de Aterramento Analisados.....	63
4.7. Considerações Finais.....	65
Capítulo 5 – Conclusão	67
Referências Bibliográficas	69

Capítulo 1

Introdução

1.1. Relevância

Quando submetido a correntes advindas da incidência de descargas atmosféricas (DAs), o aterramento apresenta comportamento singular e, na maior parte das situações, bastante distinto daquele observado frente a correntes de baixa frequência^{de 1 a 3}. A corrente associada às descargas atmosféricas apresenta formato impulsivo, com um rápido crescimento em seus instantes iniciais seguido de uma variação mais lenta após ter atingido o seu valor de pico (usualmente na faixa de dezenas de kA)⁴. Em função desse formato impulsivo, tal corrente apresenta um espectro representativo de frequências que vai desde 0 Hz até alguns MHz. Ao longo desse espectro, o aterramento normalmente apresenta comportamento variável tendo-se em conta diferentes intervalos de frequência. Em estudos rigorosos do comportamento impulsivo de aterramentos elétricos, o seu comportamento dependente da frequência deve ser adequadamente levado em consideração⁵.

A resposta em frequência do aterramento, normalmente expressa na forma de uma impedância harmônica (único ponto de injeção de corrente) ou de uma matriz de admitância nodal (múltiplos pontos de injeção de corrente), é determinada com elevada exatidão empregando-se modelos matemáticos baseados na teoria de campos eletromagnéticos. Apesar da evolução no desenvolvimento de modelos rigorosos para avaliação do comportamento transitório de aterramento nos últimos anos, o tema encerra certa complexidade e modelos simplificados são normalmente adotados. É bastante comum em estudos de transitórios atmosféricos em sistemas elétricos, sobretudo aqueles que utilizam plataformas do tipo ATP/EMTP, representar o aterramento por meio de sua resistência de baixa frequência, como por exemplo em^{6,7}. Segundo Alipio & Borges, a representação simplificada do aterramento por meio da resistência de baixa frequência, desconsiderando o comportamento dependente da frequência, pode levar a desvios significativos⁸. Tais erros podem ser mais ou menos expressivos, dependendo do sinal de corrente injetado e da localização do ponto de injeção de corrente⁸.

Na avaliação do comportamento impulsivo de aterramentos elétricos é comum a utilização do conceito de impedância impulsiva, que corresponde à razão entre o valor de pico

da elevação de potencial desenvolvida no ponto de injeção de corrente e o valor de pico da corrente injetada. Como a impedância impulsiva é definida no domínio do tempo, conclui-se que é um número real puro. Embora a impedância impulsiva não contemple de forma rigorosa o comportamento dependente da frequência do aterramento, tal como a impedância harmônica, ela encerra algumas características interessantes, dentre as quais merece destaque:

- i. Depende do sinal de corrente injetado, principalmente de seu tempo de subida; isto é, a impedância impulsiva sofre influência do conteúdo de frequência do sinal de corrente injetado e, conseqüentemente, da impedância harmônica de aterramento;
- ii. Depende do ponto de injeção de corrente; portanto, contempla de forma aproximada o efeito de propagação nos eletrodos de aterramento, que leva ao conceito de comprimento efetivo;
- iii. Permite estimar o valor de pico da elevação de potencial desenvolvida no ponto de injeção de corrente (basta multiplicar a impedância impulsiva pelo valor de pico da corrente injetada).

Em uma contribuição fundamental, Visacro & Silveira mostraram que a representação do aterramento de linhas de alta tensão por meio de sua impedância impulsiva, leva a resultados de desempenho frente a DAs aproximadamente idênticos àqueles que seriam obtidos considerando-se uma representação rigorosa do aterramento⁹. Os autores mostram que a qualidade dos resultados obtidos representando-se o aterramento por sua impedância impulsiva é muito superior àqueles obtidos quando se representa o aterramento por sua resistência de baixa frequência⁹.

Tendo como inspiração a contribuição de Visacro & Silveira e, adicionalmente, as características mencionadas da impedância impulsiva, entende-se que em estudos de transitórios atmosféricos em sistemas elétricos, notadamente aqueles que envolvam a avaliação de falha de isolamento e a determinação da elevação transitória de potencial nas terminações de aterramento, a sua representação por meio de uma impedância impulsiva leva a resultados mais representativos do que aqueles que seriam obtidos considerando-se a resistência de baixa frequência.

Nesse contexto, este trabalho pretende gerar uma contribuição no tema **resposta impulsiva de aterramentos elétricos**, em particular a proposição de uma metodologia inovadora para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é o estudo do comportamento transitório de sistemas de aterramento elétrico – em especial a impedância impulsiva – quando solicitados por descargas atmosféricas.

Levando-se em consideração o contexto e o objetivo principal deste trabalho, os objetivos secundários definidos são:

- Desenvolvimento de uma metodologia para obtenção de estimativas expeditas da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento;
- Aplicação extensiva da metodologia a diferentes tipos de arranjos de aterramento, considerando-se diferentes resistividades e sinais de corrente representativos de primeiras descargas e descargas subsequentes;
- Avaliação da qualidade dos resultados fornecidos pela metodologia proposta, tendo como referência os resultados obtidos pela aplicação de um modelo eletromagnético rigoroso.

1.3. Organização do texto

O presente texto está organizado em cinco capítulos, incluindo este **Capítulo 1 – Introdução**.

O **Capítulo 2 – Comportamento de Aterramentos Elétricos Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas** – apresenta conceitos básicos relativos ao comportamento transitório de aterramentos elétricos, bem como a definição de parâmetros que caracterizam o desempenho impulsivo de aterramentos.

O **Capítulo 3 – Nova Metodologia para Estimativa da Impedância Impulsiva de Arranjos Típicos de Aterramento** – apresenta os fundamentos de uma nova metodologia para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento e corresponde à principal contribuição deste trabalho.

No **Capítulo 4 – Resultados e Discussão** – a metodologia proposta é aplicada para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. Para avaliação da qualidade das estimativas, elas são comparadas com resultados obtidos pela aplicação de um modelo eletromagnético rigoroso.

No **Capítulo 5 – Conclusão** – são destacadas as principais realizações deste trabalho e apresentadas as propostas de continuidade.

Capítulo 2

Comportamento de Aterramentos Elétricos Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas

2.1. Introdução

Quando submetidos a corrente de descargas atmosféricas, os eletrodos de um sistema de aterramento apresentam comportamento bastante particular e, na maior parte das vezes, distinto daquele apresentado frente a fenômenos de baixa frequência (curtos-circuitos). Segundo Visacro¹, aparentemente, há certa confusão de conceitos básicos em relação ao comportamento impulsivo de aterramentos no meio técnico-científico. Esses conceitos são fundamentais para a avaliação dos desafios que envolvem a resposta de aterramentos elétricos frente a descargas atmosféricas. Este capítulo insere-se neste cenário e tem como objetivo apresentar de forma sucinta os conceitos considerados mais relevantes para compreensão da resposta de aterramento frente a correntes de descargas atmosféricas.

2.2. Impedância de Aterramento

Um sistema de aterramento é constituído basicamente por três componentes¹: i) os condutores metálicos que ligam o sistema elétrico ou eletrônico aos eletrodos de aterramentos; ii) os eletrodos de aterramento; iii) a terra que envolve os eletrodos.

Os condutores metálicos podem ser de natureza variada e têm o objetivo de servir como um caminho para escoar cargas ou correntes de impulso do sistema elétrico para os eletrodos de aterramento. Já os eletrodos de aterramento podem apresentar várias tipologias diferentes e são constituídos por qualquer material metálico inserido no solo¹⁰. Finalmente, a terra que envolve os eletrodos é o meio de dispersão das cargas ou correntes de surto.

Com o objetivo de representar um elemento infinitesimal do eletrodo do sistema de aterramento utiliza-se um modelo conceitual simplificado baseado na teoria de circuitos que representa os efeitos resistivo, condutivo, capacitivo e indutivo, conforme a Figura 2.1.

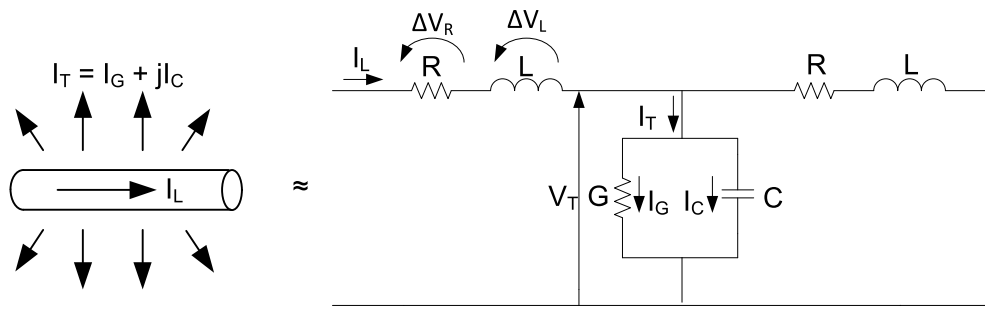


Figura 2.1: Representação de uma pequena porção de um eletrodo por meio de parâmetros concentrados, indicando as correntes e tensões envolvidas. Adaptado de¹.

De acordo com a Figura 2.1, a corrente total injetada em um eletrodo é parcialmente distribuída por um elemento infinitesimal do eletrodo (corrente longitudinal, I_L). Essa corrente longitudinal produz uma queda de tensão relativa às perdas internas (ΔV_R) e aos efeitos do campo magnético interno e externo gerado no condutor e no solo (ΔV_L); tais efeitos são representados pelos parâmetros R e L em série, respectivamente.

Outra parte da corrente total injetada no eletrodo é dissipada para o solo (corrente transversal, I_T). A corrente transversal é composta por correntes de natureza condutiva e capacitiva, sendo que os efeitos dessas correntes são representados, respectivamente, por uma condutância (G) e uma capacitância (C), conectadas em paralelo no circuito da Fig. 2.1. A corrente condutiva (I_G) está relacionada à resistividade ρ do meio, enquanto a corrente capacitiva (I_C) está relacionada à permissividade elétrica ε do meio. Ambas as correntes estão associadas ao campo elétrico estabelecido no solo e a razão entre elas depende das características elétricas do meio (condutividade e permissividade) e da frequência característica do fenômeno solicitante.

A representação simplificada por parâmetros concentrados é válida apenas para um elemento infinitesimal do eletrodo; para análise completa de um eletrodo é necessário considerar os efeitos próprios e mútuos (resistivo, capacitivo, condutivo e indutivo) entre os diversos elementos do eletrodo. Assim, o circuito geral pode ser representado por uma série de circuitos similares ao da Figura 2.1, conectados entre si de acordo com a geometria do arranjo de aterramento, e tendo-se em conta os efeitos mútuos². Portanto, a forma como o sistema elétrico enxerga o aterramento pode ser expressa através da sua impedância complexa e este circuito representativo do sistema de aterramento permite determinar a impedância vista do ponto de injeção da corrente.

A impedância de aterramento é definida como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica através do eletrodo e corresponde à razão entre a elevação de potencial no ponto de injeção em relação ao terra remoto e a corrente injetada, para cada frequência².

Em baixas frequências, os efeitos reativos, representados pelos parâmetros L e C do circuito ilustrado na Figura 2.1 podem ser desprezados, assim como as perdas internas representadas por R , e pode-se aproximar o circuito equivalente por uma série de condutâncias acopladas. Nesse caso, o sistema de aterramento pode ser modelado como uma resistência de aterramento R_T (impedância de aterramento puramente real), definida como a razão entre a elevação de potencial em relação ao infinito V_T desenvolvida no ponto de injeção de corrente e a corrente injetada no aterramento I_J :

$$R_T = \frac{V_T}{I_J} \quad (2.1)$$

Quando a corrente de surto injetada no aterramento possui um amplo espectro de frequências associado, o aterramento deve ser representado por uma impedância complexa $Z(\omega)$, também denominada de impedância harmônica, para cada frequência específica, ou seja:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.2)$$

em que $V(\omega)$ e $I(\omega)$ são, respectivamente, os fasores da elevação de potencial e da corrente injetada no aterramento para uma dada frequência angular ω .

A Figura 2.2 apresenta o módulo e a fase da impedância de aterramento em função da frequência em uma faixa entre 100 Hz e 1 MHz, para um eletrodo horizontal de 30 m de comprimento com raio de 0,7 cm, enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo de resistividade de 2400 Ωm e permissividade elétrica relativa igual a 15 (ambos parâmetros considerados constantes).

De acordo com a Figura 2.2, em baixas frequências a impedância é um número real puro aproximadamente constante, que corresponde à resistência de aterramento e à medida que a frequência aumenta, para valores próximos ou maiores que 10 kHz, o efeito capacitivo torna-se relevante e o módulo da impedância diminui. Porém, para frequências em torno de ou superiores a 200 kHz, o efeito indutivo começa a exercer influência na impedância, o que pode ser observado pelo aumento do ângulo da impedância como representado no gráfico, embora o efeito capacitivo ainda seja predominante. A impedância atinge um valor mínimo próximo a 500 kHz, na qual os efeitos capacitivo e indutivo se compensam e a fase da impedância se torna nula novamente. Finalmente, para frequências superiores ao valor mínimo de impedância, o efeito indutivo predomina no comportamento da impedância de aterramento.

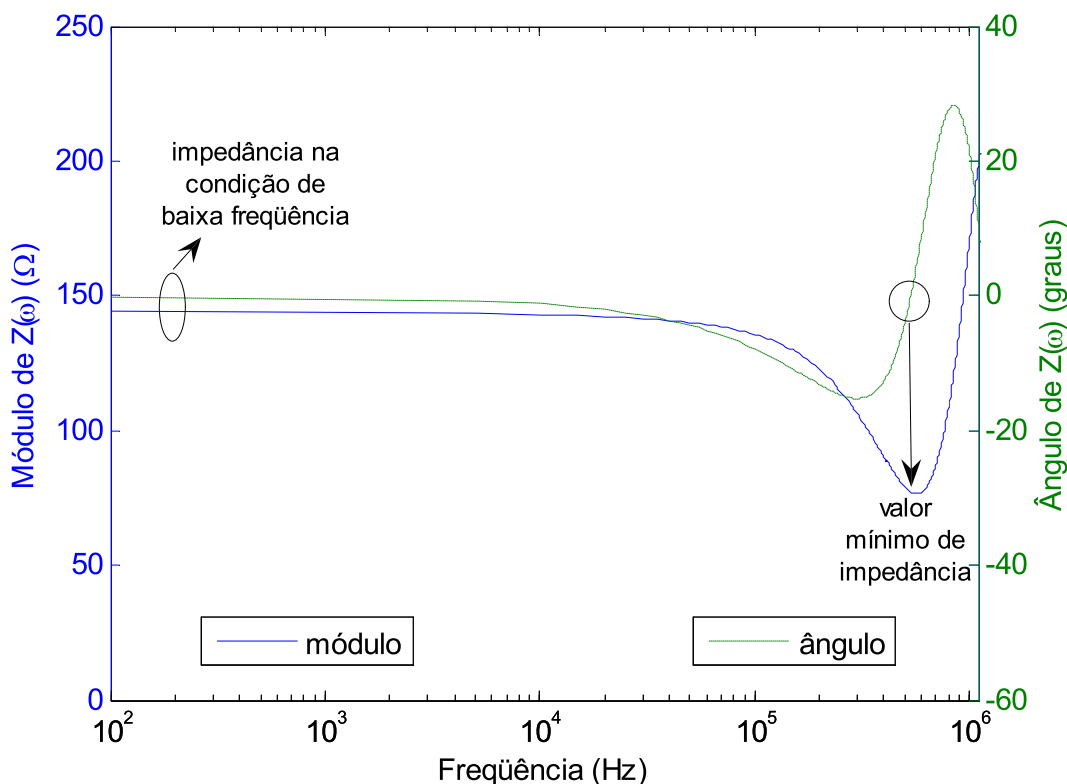


Figura 2.2: Impedância de aterramento ao longo do espectro de frequência característico de uma descarga atmosférica. Adaptado de¹.

A Figura 2.2 evidencia que a representação do aterramento por uma resistência pura é fisicamente consistente apenas para fenômenos em baixas frequências (até poucos kHz). Portanto, na avaliação de transitórios, como por exemplo, os associados a descargas atmosféricas, tal representação deve ser evitada, pois não contempla os fenômenos dependentes da frequência do aterramento.

2.3. Efeitos de Propagação

Quando uma corrente impulsiva é injetada em um sistema de aterramento ela é submetida a dois fenômenos, relativos às perdas no meio, relacionados à propagação da onda eletromagnética: a atenuação e a distorção.

A atenuação se refere à diminuição gradual da amplitude da onda da corrente injetada à medida que ela se propaga ao longo dos eletrodos de aterramento e está diretamente relacionada com a frequência, a condutividade do solo e as perdas ôhmicas no condutor.

Já a distorção corresponde à deformação da onda à medida que ela se propaga ao longo dos eletrodos de aterramento e se deve às diferentes velocidades associadas a cada componente espectral presente no sinal, principalmente na frente de onda.

Os fenômenos de atenuação e de distorção estão ilustrados na Figura 2.3, de modo que, a onda transmitida entre os elementos de um eletrodo é atenuada e distorcida simultaneamente, isto é, a amplitude do sinal diminui e o tempo de frente da onda aumenta à medida que ela se propaga.

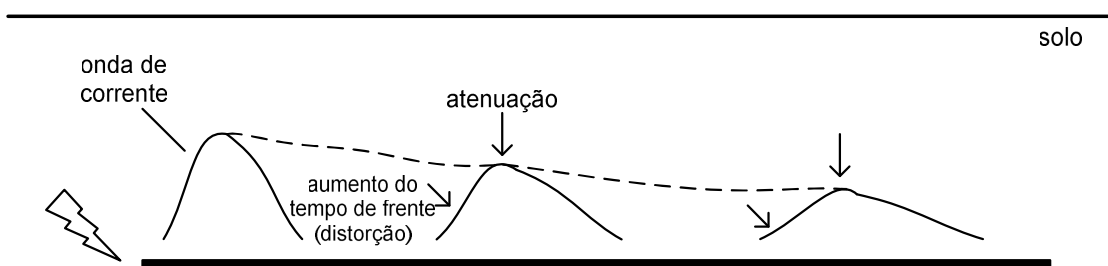


Figura 2.3: Atenuação e distorção da onda de corrente ao longo do eletrodo. Adaptado de¹.

Um aspecto importante decorrente da atenuação é que a corrente que dispersa para a terra possui uma distribuição não uniforme. Nesta perspectiva, surge o importante conceito de comprimento efetivo (L_{EF}), que representa um comprimento limite de eletrodo de aterramento. Eletrodos com comprimentos superiores a este valor limite não implicam redução da impedância impulsiva de aterramento e tal comportamento fica explícito quando se verifica, por exemplo, que o aumento superior ao comprimento efetivo do cabo contrapeso ligado à torre de uma linha de transmissão não afeta o desempenho da mesma frente às descargas atmosféricas. Isso ocorre porque a atenuação do campo para o comprimento efetivo torna-se bastante acentuada, de modo que a corrente que dispersa para o solo a partir deste ponto é considerada desprezível. Nesse sentido, a existência de eletrodo a partir deste ponto é pouco relevante para a dispersão de componentes de alta frequência de corrente e não afeta o valor da impedância de aterramento.

2.4. Caracterização do solo

2.4.1. Dependência da Frequência dos Parâmetros Elétricos do solo

De acordo com trabalhos laboratoriais clássicos e medições de campo recentes realizadas por Alipio & Visacro, embora a permeabilidade do solo possa ser considerada constante e igual à do vácuo, os parâmetros elétricos do solo, resistividade e permissividade, apresentam forte variação na faixa de frequência típica de correntes de descargas atmosféricas¹¹.

Com base em uma metodologia de medição originalmente proposta em¹¹ e extensivamente aplicada em⁵, Alipio & Visacro avaliaram, diretamente em condições de campo, a variação da resistividade e da permissividade de um grande número de solos com características distintas. De acordo com os resultados obtidos, observa-se uma variação significativa de tais parâmetros entre 100 Hz e alguns MHz, com redução da resistividade e da permissividade elétricas. Em particular, vale mencionar que a permissividade relativa apresenta valores elevados da ordem de aproximadamente 1000 em frequências próximas de 1 kHz, diminuindo para cerca de 20 na faixa de 4 MHz. Com base nos resultados obtidos para um grande número de solos foram propostas expressões empíricas e, posteriormente, um modelo físico causal para determinação da variação da resistividade e permissividade do solo com a frequência^{5, 12}.

Considerando as expressões propostas para determinação da variação da resistividade e permissividade do solo com a frequência, Alipio & Visacro avaliaram sistematicamente o impacto de tal variação no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos¹³⁻¹⁵. A principal conclusão desses trabalhos é que o fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros do solo leva a uma redução da impedância impulsiva de aterramento, sendo tal redução mais expressiva para solos de maior resistividade. Segundo os autores, desprezar este fenômeno para solos de resistividade moderada e, sobretudo, solos de resistividade elevada pode levar a erros significativos na resposta impulsiva do aterramento.

2.4.2. Ionização do Solo

Quando eletrodos de aterramentos são solicitados por correntes impulsivas, a densidade de corrente no solo nas adjacências da superfície do eletrodo pode atingir valores elevados, sendo que neste caso o solo pode apresentar um comportamento não linear.

Em função do elevado valor da corrente, o campo elétrico na região ao redor do eletrodo, pode ultrapassar a rigidez dielétrica do meio, dando origem ao processo conhecido como ionização do solo. Desta forma descargas disruptivas no solo são estabelecidas. De acordo com trabalhos que avaliam o impacto da ionização do solo no comportamento impulsivo de aterramentos^{1,16} em termos práticos, a ocorrência do fenômeno leva a uma

redução da impedância impulsiva. Adicionalmente, o processo de ionização é mais intenso para eletrodos de aterramentos de pequenas dimensões (aterramentos concentrados).

2.5. Parâmetros para Caracterização do Comportamento Impulsivo do Aterramento

A definição de parâmetros que permitem caracterizar o comportamento transitório do aterramento é essencial para avaliação de seu desempenho frente a correntes impulsivas. Neste trabalho utilizam-se parâmetros e definições usualmente empregados e já consolidados em trabalhos rigorosos da área^{1,17}. Entende-se, ainda, que um dos principais objetivos na definição de parâmetros que caracterizam o comportamento transitório do aterramento é a distinção entre o desempenho impulsivo e em baixas frequências².

O objetivo desta seção é definir os parâmetros que caracterizam o comportamento impulsivo de aterramentos elétricos. Porém, para uma análise mais completa de sensibilidade desses parâmetros com relação às características do solo e sinais de corrente injetados pode ser encontrada em^{2,3,13,18}.

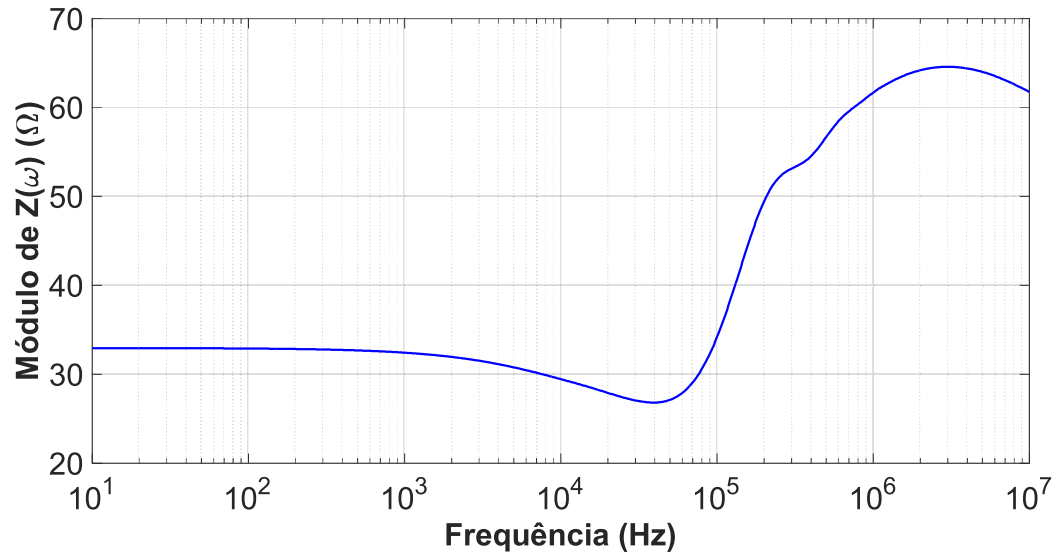
2.5.1. Impedância Harmônica

Como já mencionado, no domínio da frequência o aterramento é rigorosamente representado por uma impedância complexa, também chamada de impedância harmônica. Ela é definida com a relação entre os fasores da elevação da potencial elétrico $V(\omega)$ e da corrente injetada $I(\omega)$, de acordo com a Eq. 2.2, e é calculada em uma faixa de frequências de interesse para cada caso. A impedância harmônica é uma grandeza complexa e depende especificamente da geometria do aterramento e das características eletromagnéticas do eletrodo e do solo em que este se encontra imerso.

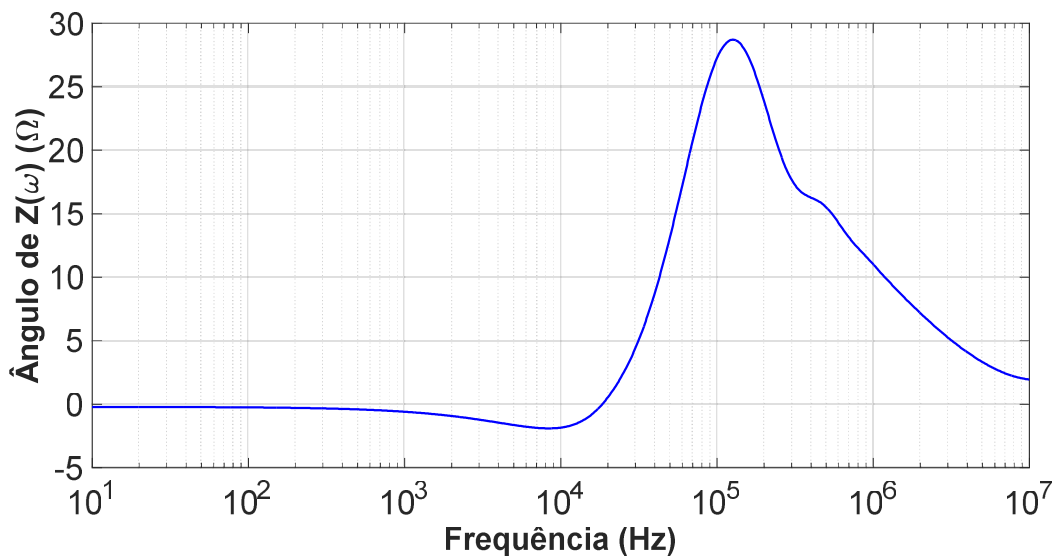
A análise da impedância no domínio da frequência é de fundamental importância uma vez que, além de ser o domínio original de sua definição, permite visualizar as características condutivas, capacitivas e indutivas do aterramento bem como dos efeitos de propagação. A partir da impedância harmônica também é possível determinar a Elevação de Potencial no Aterramento no ponto de injeção de corrente.

A Figura 2.4 apresenta o módulo (a) e a fase (b) da impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 60 m, enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo de resistividade igual a 1000 Ωm . De acordo com as curvas, é observado um efeito capacitivo entre valores

próximos de 1 kHz a 20 kHz, embora o comportamento do arranjo em questão seja predominantemente indutivo.



(a)



(b)

Figura 2.4: Módulo (a) e a fase (b) da impedância harmônica de um eletrodo horizontal de 60 m, enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo de resistividade de baixa frequência de 1000 Ωm .

2.5.2. Elevação de Potencial no Aterramento (GPR)

Um parâmetro básico que avalia a resposta do aterramento frente a descargas atmosféricas é a elevação de potencial no ponto de injeção de corrente, em relação ao infinito, usualmente designado por GPR (*Grounding Potential Rise*). A avaliação da elevação de

potencial transitória desenvolvida no aterramento é de fundamental importância, uma vez que permite, por exemplo, determinar as tensões máximas a que o aterramento e os dispositivos aterrados ficam submetidos. Também possibilita avaliar o intervalo de tempo a que ficam submetidos a essa elevação, o que é importante na determinação de falha de isolamento e energia dissipada.

Considerando uma abordagem de cálculo do domínio da frequência, o GPR desenvolvido pelo aterramento devido à injeção de uma corrente $i(t)$ pode ser determinado de acordo com:

$$GPR = F^{-1} \left\{ Z(\omega) \cdot F[i(t)] \right\} \quad (2.3)$$

em que F e F^{-1} denotam, respectivamente, transformada direta e inversa de Fourier. De (2.3) fica claro que o comportamento da impedância harmônica de aterramento impacta diretamente o cálculo da elevação de potencial desenvolvida pelo aterramento.

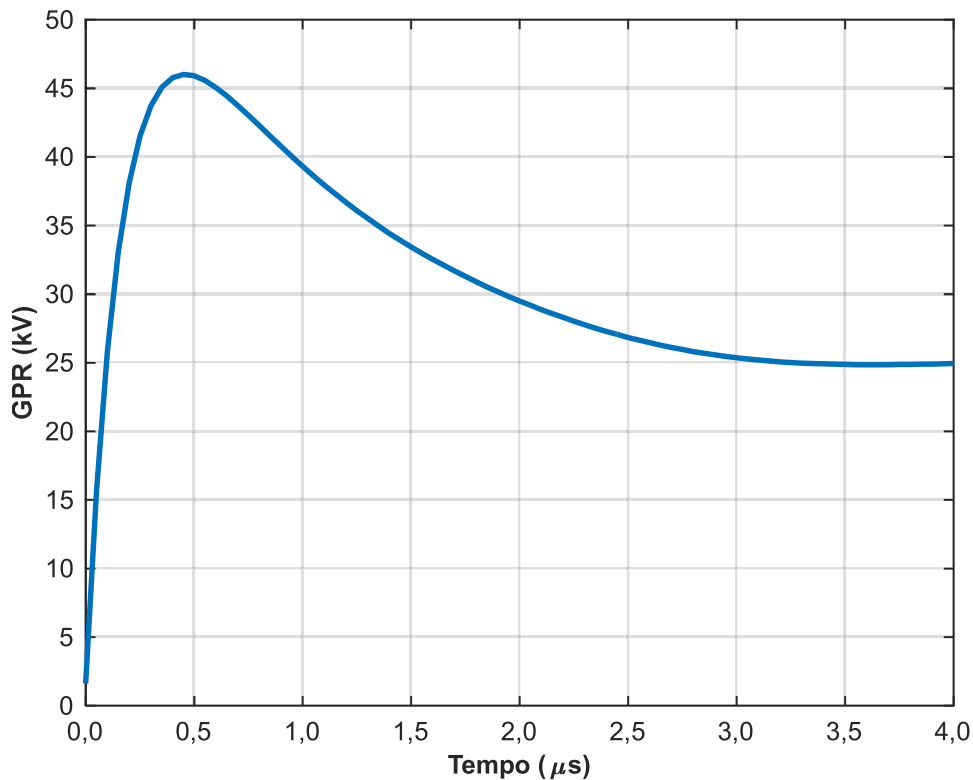


Figura 2.5: GPR desenvolvido por um eletrodo de 60m em resposta à injeção de uma onda do tipo dupla exponencial de 1 kA, 1,2/50 μs

A Figura 2.5 ilustra a elevação de potencial desenvolvida pelo eletrodo de 60 m, cuja impedância harmônica está ilustrada na Figura 2.4, em resposta à injeção de uma onda do tipo dupla exponencial de 1 kA, 1,2/50 μ s. Percebe-se que o valor máximo da elevação de potencial ocorre antes e até valores próximos a 0,5 μ s, ou seja, antes da ocorrência do valor máximo de corrente (1,2 μ s) indicando um comportamento indutivo do aterramento.

2.5.3. Impedância Impulsiva e Comprimento Efetivo

No domínio do tempo, ao considerar transitórios, é comum utilizar o conceito de impedância impulsiva de aterramento Z_p , que é definida como a relação entre o valor de pico do GPR (V_p) e o valor de pico da onda de corrente injetada (I_p)^{1,3}:

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (2.4)$$

Esse parâmetro permite estimar de forma rápida o valor máximo da elevação de potencial no aterramento, por meio do produto do valor de pico da corrente pela impedância impulsiva, o que o torna atrativo do ponto de vista prático. É importante enfatizar que, além de depender da geometria do aterramento e das características eletromagnéticas do solo, a impedância impulsiva também depende da corrente injetada, diferentemente da impedância harmônica.

Vale mencionar também que Visacro & Silveira⁹ propuseram em 2016, uma representação por meio da sua impedância impulsiva para estudos relativos ao desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Essa representação do aterramento leva a resultados aproximadamente idênticos, em termos do desempenho de LTs frente a descargas atmosféricas, em comparação àqueles que seriam obtidos com uma representação completa do aterramento por meio de sua impedância harmônica. Segundo os autores, essa representação compacta, produz resultados com exatidão superior àqueles determinados empregando-se uma representação do aterramento por meio da sua resistência de baixa frequência⁹.

A Figura 2.6 ilustra a variação da impedância impulsiva de um eletrodo horizontal, enterrado em um solo de 1000 Ω m, em função do seu comprimento (L). Considera-se a injeção de uma onda do tipo dupla exponencial de 1 kA, 1,2/50 μ s e, além disso, inclui-se no mesmo gráfico uma curva da variação da resistência de baixa frequência (R_{LF}) em função do comprimento.

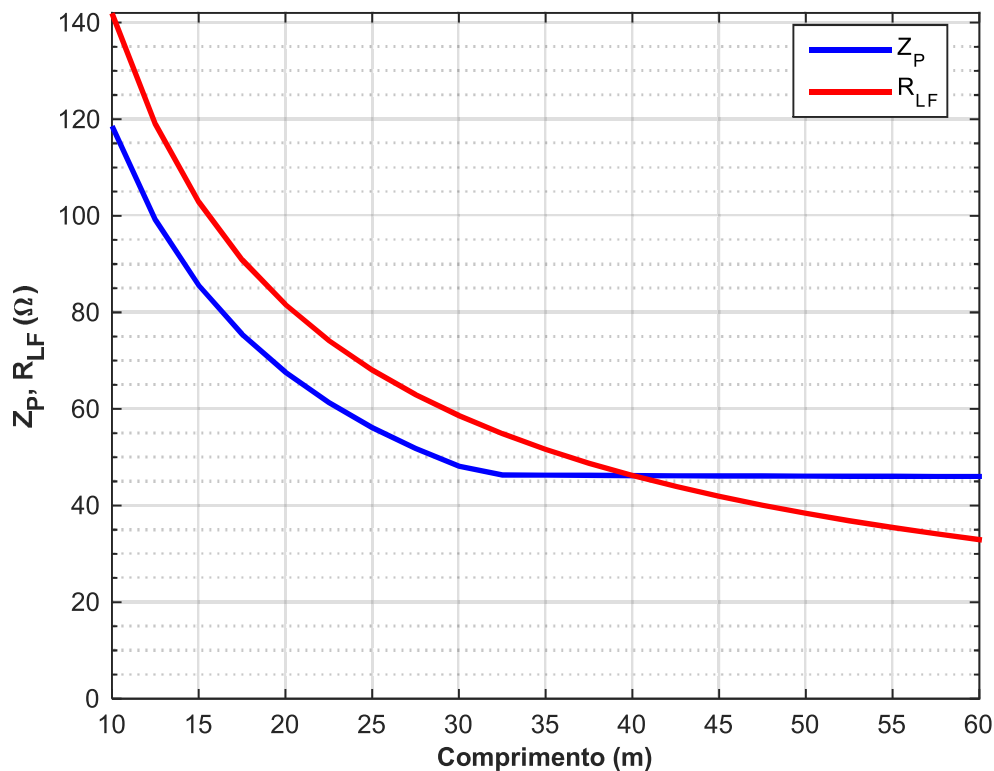


Figura 2.6: Impedância impulsiva de um eletrodo horizontal, enterrado em um solo de 1000 Ωm , em função do seu comprimento, considerando a injeção de uma onda do tipo dupla exponencial de 1kA, 1,2/50 μs .

Conforme a Figura 2.6, observa-se que a curva indica um decrescimento inicial de Z_p com o aumento do comprimento do eletrodo até que o comprimento efetivo L_{EF} seja atingido. A partir deste ponto, Z_p permanece aproximadamente constante para incrementos no comprimento. Desta forma, até o comprimento efetivo, o valor de Z_p é inferior ao de R_{LF} , sendo tal efeito atribuído ao fenômeno de dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo¹³. A partir do L_{EF} , a resistência de aterramento continua a diminuir à medida que o comprimento do eletrodo aumenta, até se tornar inferior à impedância impulsiva.

2.5.4. Coeficiente de Impulso

Com base nas curvas da Figura 2.6, é possível calcular outro importante parâmetro para aplicações de proteção contra descargas atmosféricas, que corresponde ao coeficiente de impulso I_C , dado pela razão entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento. Verifica-se que a medição ou o cálculo da impedância impulsiva não são elementares e

exigem técnicas e métodos especiais^{2,19}. Por outro lado, a medição ou o cálculo da resistência de aterramento podem ser realizados empregando-se métodos já consagrados na literatura. Isso denota a importância prática do coeficiente de impulso, $I_C = Z_p/R_{LF}$, uma vez que conhecendo-se o seu valor para um dado arranjo de aterramento é possível estimar a resposta do aterramento frente a descargas atmosféricas, expressa por Z_p , a partir da resistência de aterramento medida ou calculada.

A Figura 2.7 apresenta a curva do coeficiente de impulso de um eletrodo horizontal em função de seu comprimento, determinada a partir das curvas de Z_p e R_{LF} da Figura 2.6. Conforme observa-se, o valor de I_C é aproximadamente constante e menor do que a unidade para comprimentos inferiores ao efetivo (ponto de inflexão da curva), indicando que a resistência de aterramento é superior à impedância impulsiva nessa faixa de comprimento. Uma vez atingido o comprimento efetivo, I_C cresce continuamente já que Z_p permanece constante enquanto que R_{LF} decresce com o aumento do comprimento.

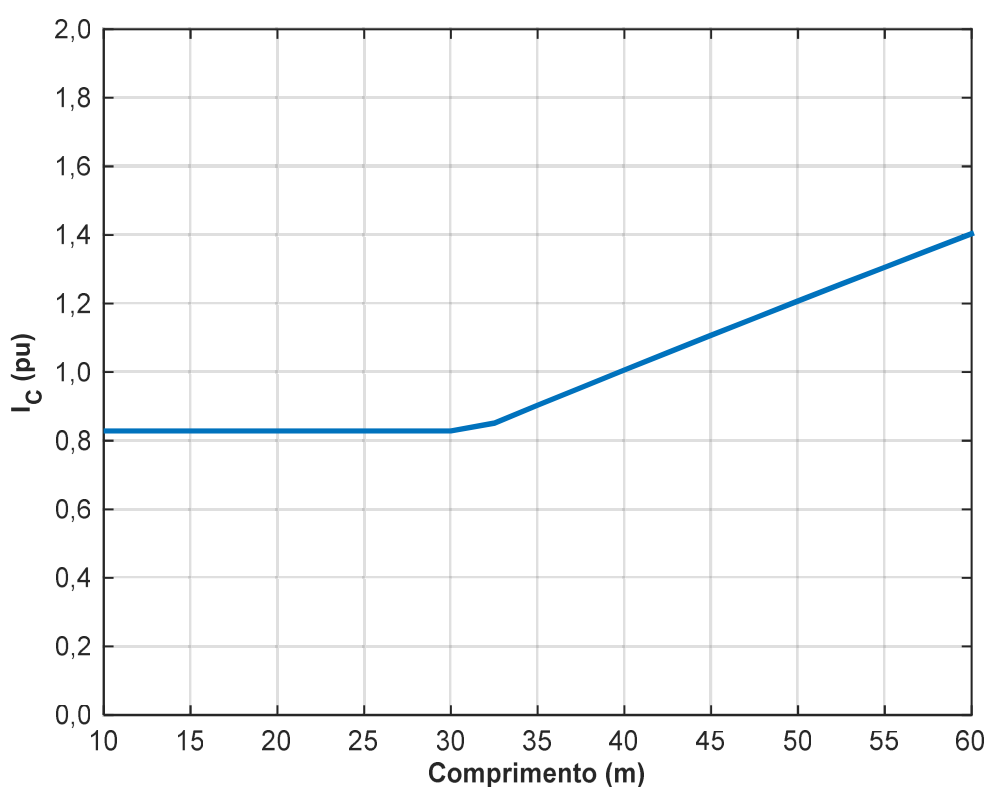


Figura 2.7: Coeficiente de impulso de um eletrodo horizontal, enterrado em um solo de $1000 \Omega\text{m}$, em função de seu comprimento, considerando a injeção de uma onda do tipo dupla exponencial de 1kA, 1,2/50 μs .

2.6. Considerações Finais

Apresentou-se neste capítulo aspectos básicos relativos ao comportamento do aterramento frente a correntes de descargas atmosféricas e diferenciou-se esse comportamento daquele apresentado frente a fenômenos de baixa frequência. Também, foram apresentados parâmetros para caracterização do comportamento impulsivo de aterramentos. Em particular, destacou-se a impedância impulsiva como uma possível representação compacta, e consistente, do aterramento para estudos de transitórios atmosféricos. Especificamente considerando a impedância impulsiva, mostrou-se que ela decresce com aumento do comprimento do eletrodo de aterramento até um limiar, chamado comprimento efetivo L_{EF} , a partir do qual ela permanece basicamente constante. Diferentemente, a resistência de aterramento de baixa frequência continua a diminuir continuamente com o aumento do comprimento do eletrodo. Ora, tal comportamento parece indicar que o comportamento impulsivo do aterramento elétrico é ditado apenas pelas dimensões do mesmo até o comprimento efetivo. Essa ideia é mais bem explorada no Capítulo 3, que propõe uma nova metodologia para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento.

Capítulo 3

Nova Metodologia para Estimativa da Impedância Impulsiva de Arranjos Típicos de Aterramento

3.1. Introdução

Os primeiros esforços no sentido de definir parâmetros para caracterização do comportamento impulsivo de aterramentos elétricos e diferenciação desse comportamento com relação ao apresentado para fenômenos lentos, é apresentado por Guptar & Thapar no fim da década de 1970 e início da década de 1980^{20,21}. Nesses trabalhos, os autores definem importantes parâmetros como comprimento e área efetivos, impedância impulsiva e coeficiente de impulso. A partir de simulações utilizando modelos simplificados para o aterramento e aplicando sinais de corrente de frente rápida, são propostas fórmulas práticas para a determinação do comprimento efetivo (ou da área efetiva) e do coeficiente de impulso para eletrodos e malhas de aterramento. É importante enfatizar que estes trabalhos representam um esforço pioneiro de caracterização do comportamento do aterramento frente a descargas atmosféricas por meio de sua impedância impulsiva. Também merece destaque a proposição de fórmulas para determinação de I_C possibilitando, assim, a determinação da impedância impulsiva a partir da resistência de aterramento.

Posteriormente, Grcev apresentou alguns trabalhos na mesma direção, que visam a obtenção de fórmulas práticas para cálculo do comprimento efetivo (ou da área efetiva) e da impedância impulsiva a partir da resistência de aterramento, considerando-se eletrodos e malhas de aterramento^{17,22}. A principal contribuição dos trabalhos de Grcev aos trabalhos realizados anteriormente por Gupta e Thapar é a utilização de um modelo eletromagnético rigoroso para simulação do aterramento e a aplicação de ondas de corrente que contemplam a natureza côncava observada em correntes reais de descargas medidas em torres instrumentadas.

Recentemente, Alípio e Visacro obtiveram fórmulas similares, a partir de simulações utilizando um modelo eletromagnético rigoroso, incluindo duas contribuições essenciais: i) a consideração da dependência da frequência dos parâmetros elétricos do solo, e ii) a aplicação de ondas de corrente mais realistas do que as apresentadas anteriormente, contemplando os principais parâmetros medianos de descargas reais medidas em torres instrumentadas^{de 23 a}

²⁸. Foram obtidas fórmulas práticas para estimativa do comprimento efetivo (ou da área efetiva) e do coeficiente de impulso de arranjos simples de eletrodos¹⁴, malhas de aterramento¹⁵. Vale destacar que em⁹, Visacro e Silveira, além de proporem fórmulas práticas para determinação de L_{EF} e Z_P de cabos contrapeso, também apresentam uma aplicação concreta de representação compacta do aterramento de linhas de transmissão por meio de sua impedância impulsiva.

Os trabalhos anteriormente citados representam contribuições importantes, pois fornecem uma maneira prática e rápida de se estimar a impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. Uma vez estimada a impedância impulsiva do arranjo, ela pode ser utilizada no estudo de transitórios atmosféricos em sistemas elétricos, que envolvam sistemas de aterramento, empregando programas do tipo ATP/EMTP⁶. Entende-se que, em estudos de transitórios, a representação do aterramento por meio de sua impedância impulsiva fornece resultados de maior qualidade do que aqueles obtidos considerando uma representação por meio da resistência de baixa frequência.

Por outro lado, as fórmulas mencionadas anteriormente são restritas aos arranjos de aterramento específicos para os quais foram concebidas. Tendo em conta esse contexto, este capítulo tem o objetivo de apresentar uma contribuição adicional ao tema, em particular a proposição de uma metodologia geral para determinação da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. Esta metodologia se baseia em alguns aspectos dos trabalhos citados anteriormente e em outros originais deste trabalho, conforme descrito neste capítulo.

3.2. Fundamentos da Metodologia

No Capítulo 2 foi apresentado de forma sucinta e objetiva o conceito de comprimento efetivo, que corresponde a um valor limite a partir do qual acréscimos adicionais no comprimento do eletrodo não implicam redução da impedância impulsiva de aterramento.

Com o intuito de justificar a metodologia proposta para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento, o conceito de comprimento efetivo é explorado de forma mais profunda nesta seção.

Como já descrito, quando uma corrente impulsiva é injetada em um sistema de aterramento, a onda eletromagnética associada ao surto se propaga ao longo dos eletrodos e é submetida ao fenômeno de atenuação. Como consequência direta deste fenômeno, a corrente que dispersa do eletrodo de aterramento apresenta uma distribuição não uniforme ao longo do mesmo. A densidade de corrente de dispersão (A/m) diminui ao longo do eletrodo. Dessas considerações deriva-se o conceito de comprimento efetivo, que conforme mencionado, é um comprimento limite de eletrodo a partir do qual não se observa redução da

impedância impulsiva. Essa redução ocorre justamente porque a atenuação do campo para o comprimento efetivo é tão acentuada, que os componentes de corrente de alta frequência associados à corrente de descarga que dispersam para o solo a partir deste ponto é desprezível. Portanto, a existência de eletrodo a partir desse ponto é inócua e não afeta o valor da impedância de aterramento.

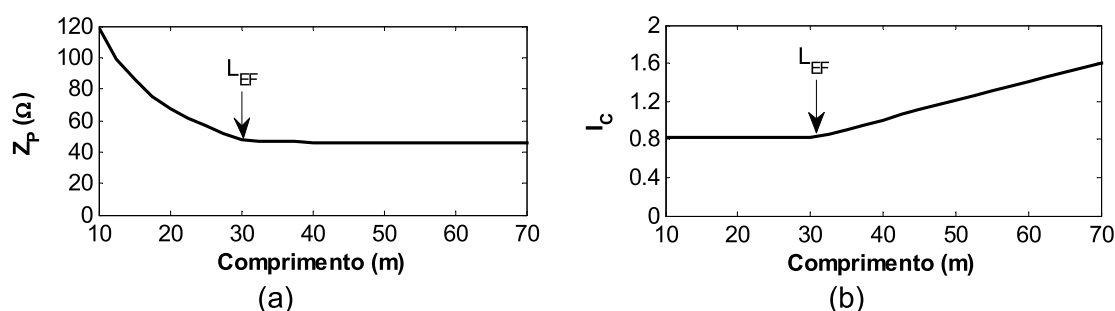


Figura 3.1 – Impedância impulsiva de aterramento (a) e coeficiente de impulso (b) em função do comprimento para um eletrodo horizontal de aterramento, raio de 7mm, enterrado a 0,5m de profundidade em um solo de 1000 Ωm . Considera-se a variação dos parâmetros elétricos do solo de acordo com (5) e, por simplicidade, a injeção de uma onda de corrente 1,2/50 μs do tipo dupla exponencial.

A Figura 3.1(a) apresenta o gráfico de impedância impulsiva em função do comprimento do eletrodo, para um arranjo composto por um eletrodo horizontal, raio 7 mm e enterrado a 0,5 m de profundidade em um solo de 1000 Ωm . De acordo com este gráfico percebe-se que, a partir de um dado comprimento, correspondente ao comprimento efetivo, não ocorre mais a diminuição da impedância impulsiva. A Figura 3.1(b) apresenta, para o mesmo arranjo, o gráfico de coeficiente de impulso em função do comprimento do eletrodo. Observa-se que, para comprimentos de eletrodo até o comprimento efetivo, a relação entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento é aproximadamente constante.

Dos comentários anteriores, estabelecem-se as premissas gerais para a metodologia proposta:

1. O segmento do arranjo de aterramento importante para a determinação da impedância impulsiva é aquele que possui uma extensão igual ao do comprimento efetivo, a partir do ponto de injeção de corrente. Com a finalidade de ilustrar a premissa, a Figura 3.2(a) apresenta um arranjo composto por um eletrodo horizontal. Já, a Figura 3.2(b) ilustra a parcela dessa configuração de aterramento que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva. O arranjo da Figura 3.2(b) é denominado **arranjo equivalente**.

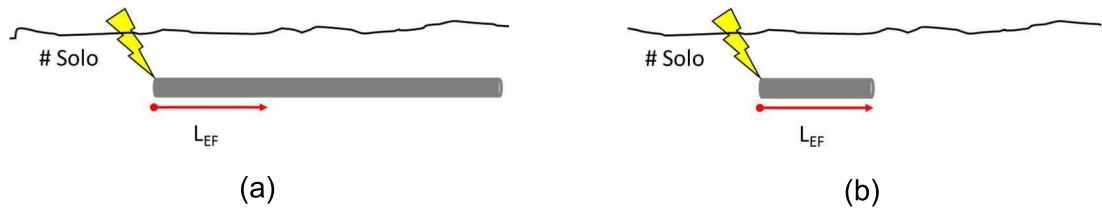


Figura 3.2 – Eletrodo horizontal submetido a uma corrente impulsiva: (a) Arranjo Original e (b) Arranjo Equivalente.

2. A partir da resistência de aterramento do arranjo equivalente R_{eq} , Figura 3.2(b), determina-se a impedância impulsiva do arranjo original, Figura 3.2(a), multiplicando R_{eq} pelo coeficiente de impulso correspondente a eletrodos com comprimento igual ou inferior ao efetivo. Isto decorre da constatação de que para comprimentos de eletrodo até o efetivo, a relação entre a impedância impulsiva e a resistência de aterramento é aproximadamente constante. Vale salientar que, para comprimentos iguais ou inferiores ao efetivo, o coeficiente de impulso depende da resistividade do solo e da onda de corrente injetada, entretanto, não depende do arranjo de aterramento.

De acordo com a segunda premissa, a impedância impulsiva pode ser determinada por meio da Equação 3.1:

$$R_{eq} \cdot I_C = Z_P \quad (3.1)$$

Com base nas duas premissas, têm-se as seguintes etapas básicas para a estimativa da impedância impulsiva de aterramento:

1. Calcula-se o comprimento efetivo do eletrodo de aterramento, dadas a resistividade do solo e a corrente impulsiva – neste caso, um tipo de descarga atmosférica (primeira descarga ou descarga subsequente típicas).
2. Considerando-se o arranjo de aterramento original, determina-se o arranjo equivalente, isto é, a parte do sistema de aterramento que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva, a partir do ponto de injeção de corrente e do comprimento efetivo.
3. Calcula-se a resistência de aterramento do arranjo equivalente.
4. Calcula-se o coeficiente de impulso, dados a resistividade do solo e o tipo de descarga atmosférica.

5. Determina-se a impedância impulsiva do sistema de aterramento original por meio do produto da resistência de aterramento do arranjo equivalente e do coeficiente de impulso, de acordo com a Equação 3.1.

A Figura 3.3 apresenta de forma esquemática um resumo da metodologia descrita para determinação da impedância impulsiva de um eletrodo de aterramento, considerando-se os parâmetros do solo, o tipo de descarga, o arranjo original e o ponto de injeção de corrente. Vale salientar que as premissas desta metodologia e as etapas básicas para determinação da impedância impulsiva de aterramento foram estabelecidos considerando um eletrodo horizontal por questões didáticas. No entanto, o esquema desta metodologia para determinação de Z_p apresentado na Figura 3.3 pode ser estendido para outros arranjos típicos de aterramento, conforme descrito nas seções a seguir.

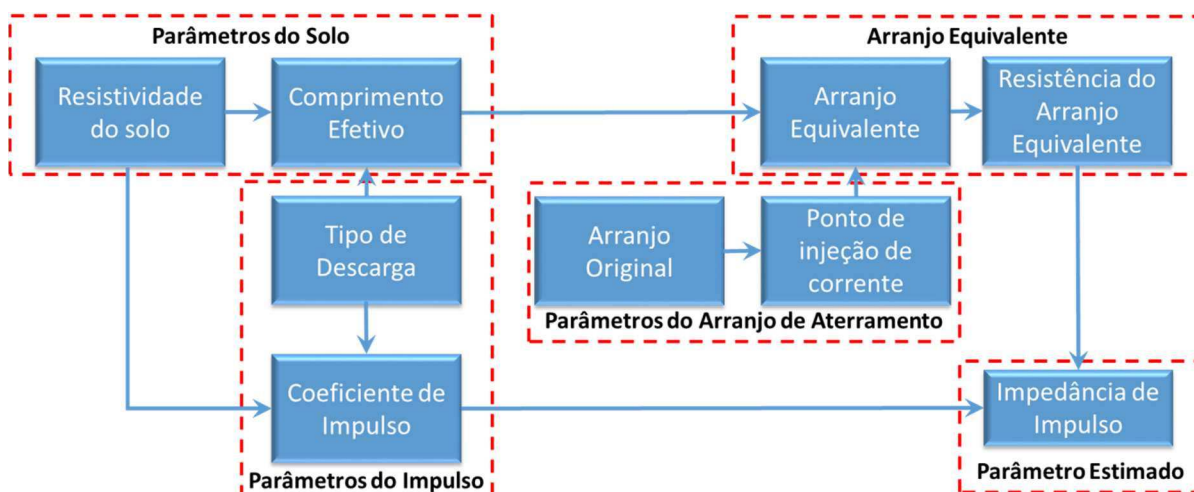


Figura 3.3 – Metodologia para determinação da impedância impulsiva a partir da resistividade do solo, sistema de aterramento original e tipo de descarga atmosférica.

3.3. Extensão da Metodologia Proposta para Outros Arranjos Típicos de Aterramento Compostos por Eletrodos ou Conjuntos de Eletrodos

O formato das curvas de Z_p e I_C em função do comprimento L para outros arranjos de aterramentos típicos não diferem daqueles da Figura 3.1. Nesse sentido, a metodologia descrita na seção anterior para um eletrodo horizontal pode ser estendida para outros arranjos de aterramento encontrados na prática.

A Figura 3.3 ilustra alguns arranjos de aterramento típicos e os correspondentes **arranjos equivalentes**. De modo similar ao descrito na Seção 3.2, a partir da resistência de

aterramento do arranjo equivalente é possível estimar a impedância impulsiva do arranjo original.

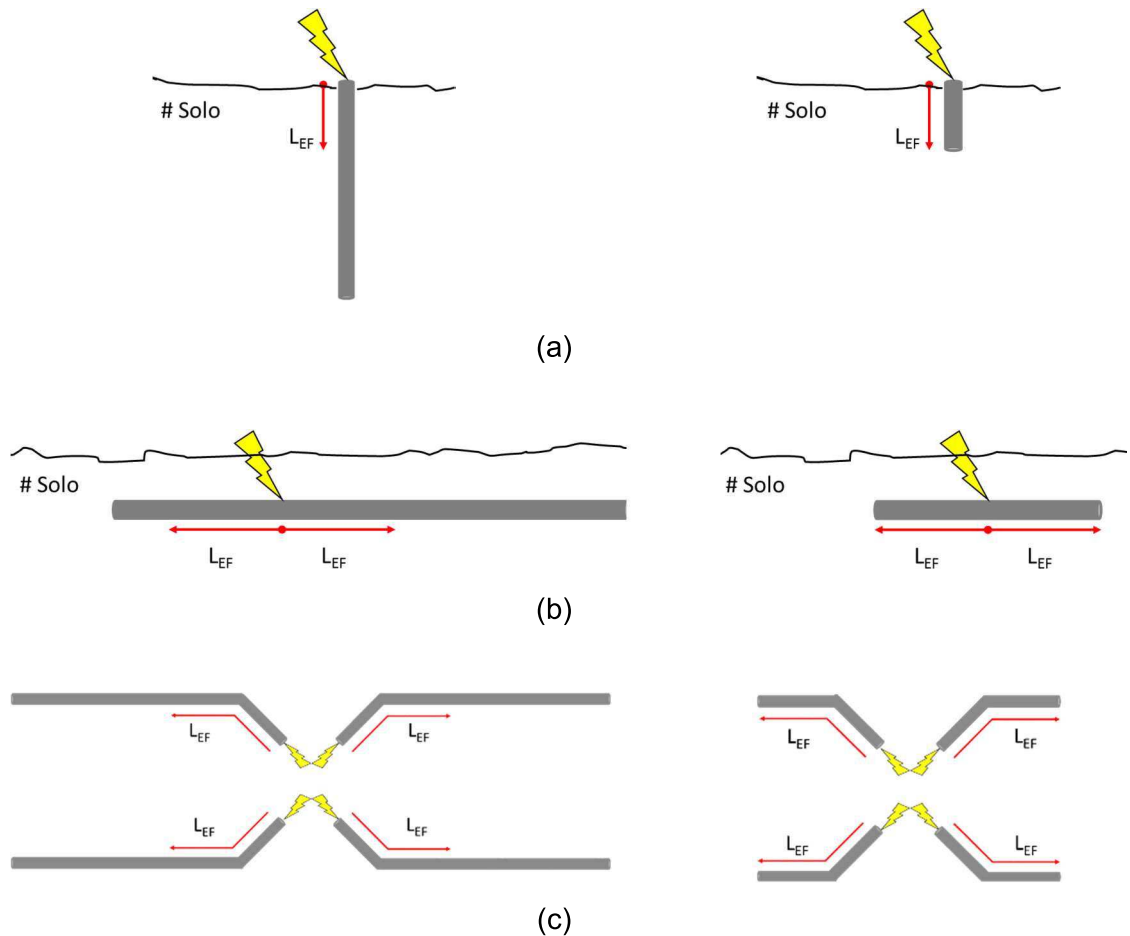


Figura 3.4 – Arranjos de aterramento típicos submetidos a correntes impulsivas e os arranjos equivalente associados: (a) haste, (b) eletrodo horizontal e (c) cabos contrapeso.

3.4. Extensão da Metodologia Proposta para Malhas de Aterramento

A metodologia descrita na Seção 3.2 também pode ser estendida para malhas de aterramento. No caso de malhas é comum a utilização do conceito de raio efetivo ou, alternativamente, de área efetiva, que é uma extensão do conceito de comprimento efetivo.

Para estimativa da impedância impulsiva de malhas de aterramento são propostas duas abordagens diferentes. Embora as duas abordagens levem a arranjos equivalentes distintos, ambos esses arranjos são obtidos a partir da consideração do comprimento efetivo segundo diferentes direções a partir do ponto de injeção de corrente.

A primeira abordagem proposta é mais intuitiva e, de certa forma, “mais física”. Para apresentação dessa abordagem, sejam as Figuras 3.5 e 3.6, que ilustram duas malhas de aterramento idênticas, porém com pontos de injeção de corrente distintos — centro da malha,

Figura 3.5, e canto da malha, Figura 3.6. Para determinação do arranjo equivalente em cada caso, considera-se o comprimento de eletrodo disponível na malha de acordo com o comprimento efetivo e segundo diferentes direções a partir do ponto de injeção de corrente. As Figuras 3.5(c) e 3.6(c) ilustram as malhas equivalente considerando a injeção de corrente no centro e no canto da malha, respectivamente. Note-se que os arranjos equivalentes são distintos, dependendo do ponto de injeção de corrente. Isso ocorre porque a área efetiva coberta pela injeção no centro é superior à mesma área no caso de injeção no canto da malha, conforme ilustram as Figuras 3.5(b) e 3.6(b). Finalmente, a partir da resistência de aterramento da malha equivalente R_{eq} , determina-se a impedância impulsiva da malha original multiplicando-se R_{eq} pelo coeficiente de impulso correspondente.

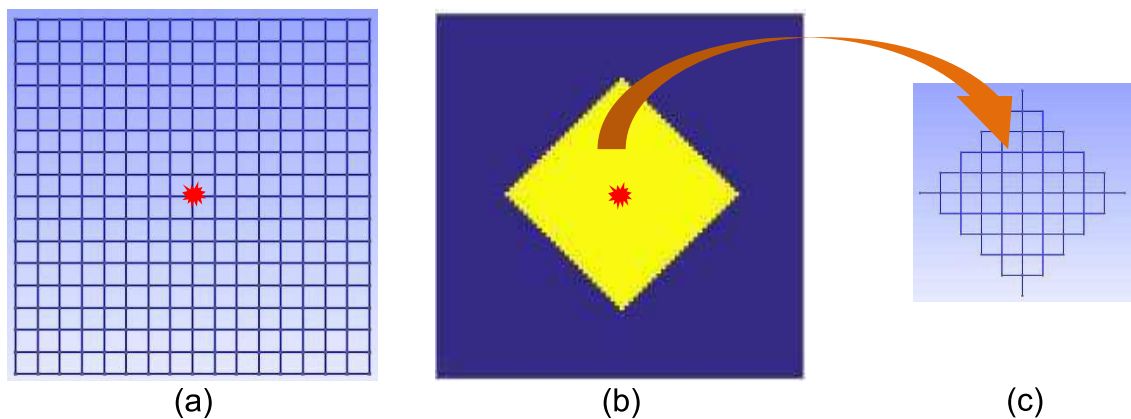


Figura 3.5 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no centro da malha, de acordo com a primeira abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente.

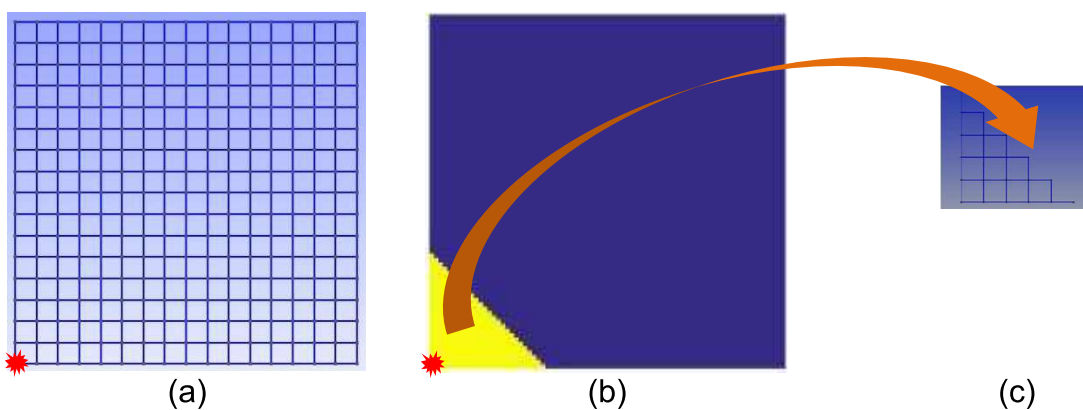


Figura 3.6 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no canto da malha, de acordo com a primeira abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente.

A segunda abordagem considera uma malha equivalente quadrada, com área igual à área efetiva da malha original, tendo-se em conta o comprimento efetivo e o ponto de injeção

de corrente. Para apresentação dessa abordagem, sejam as Figuras 3.7 e 3.8, que ilustram duas malhas de aterramento idênticas, porém com pontos de injeção de corrente distintos — centro da malha, Figura 3.7, e canto da malha, Figura 3.8. Para determinação do arranjo equivalente, determina-se primeiramente a área efetiva “vista” pela corrente injetada, que depende do comprimento efetivo e do ponto de injeção. De acordo com Gupta & Tapar (21), a área efetiva para injeção no canto da malha é dada pela área do triângulo, área amarela da Figura 3.8(b), ou seja, $\frac{1}{2}(L_{EF})^2$; para injeção no centro da malha é dada pela área do losango, área amarela da Figura 3.7(b), ou seja $2 \times (L_{EF})^2$. Note que a área efetiva vista pela corrente é maior no caso de injeção no centro da malha, em relação à injeção no canto da malha. Uma vez que a impedância impulsiva é determinada pela área efetivamente disponível para dispersão de corrente, as malhas equivalentes ilustradas nas Figuras 3.7(c) e 3.8(c) tem área igual à área efetiva associada às malhas originais (área amarela). Por simplicidade, considera-se a malha equivalente quadrada. A sintetização dessa malha equivalente quadrada e com área igual à área efetiva da malha original segue os seguintes passos principais. Primeiro, determina-se o comprimento total de eletrodo disponível da malha original para compor a malha equivalente. Isso pode ser feito com o auxílio do arranjo equivalente, segundo a primeira abordagem [Figuras 3.5(c) e 3.6(c)]. Em seguida, forma-se o perímetro da malha equivalente e, finalmente, o seu interior é preenchido com o comprimento de condutores restantes – estes devem ser igualmente espaçados e ortogonais entre si e, também, devem ter comprimento igual ao lado da malha equivalente. De modo similar à abordagem anterior, calcula-se a resistência de aterramento da malha equivalente R_{eq} e determina-se a impedância impulsiva da malha original multiplicando-se R_{eq} pelo coeficiente de impulso correspondente.

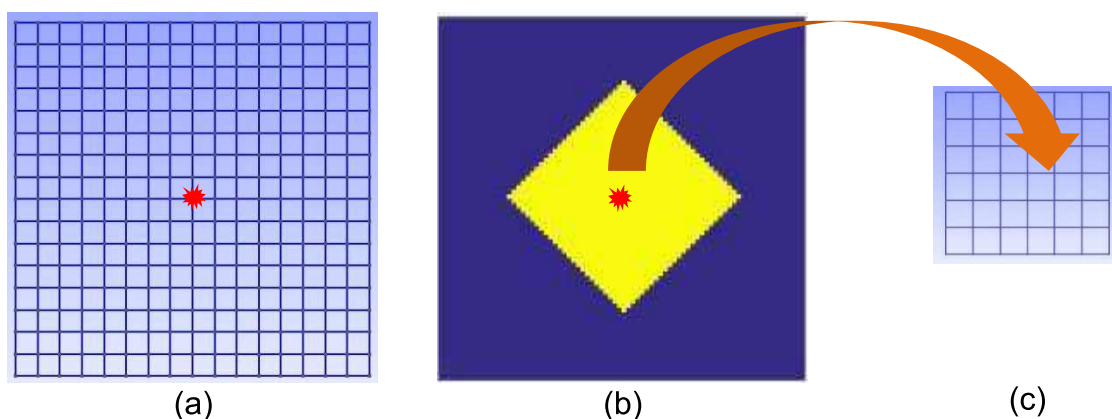


Figura 3.7 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no centro da malha, de acordo com a segunda abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente.

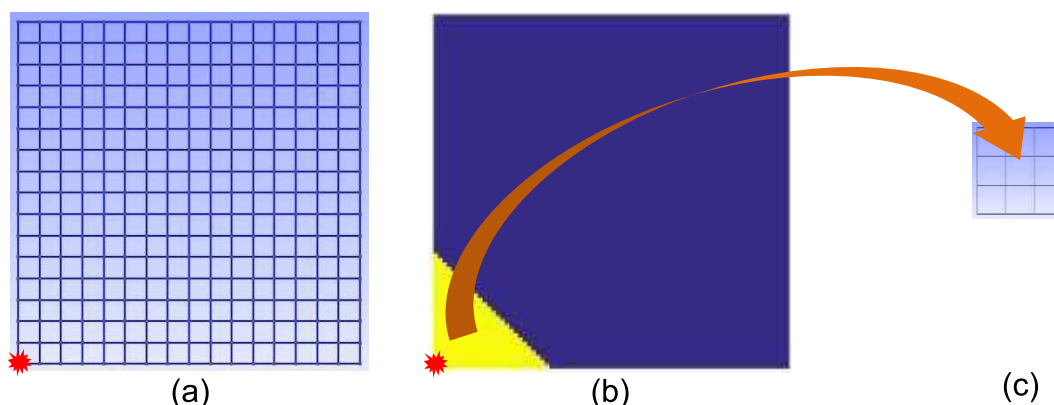


Figura 3.8 – Exemplo de malha de aterramento submetida a uma corrente impulsiva, com ponto de injeção localizado no canto da malha, de acordo com a segunda abordagem: (a) malha de aterramento original, (b) área da malha original que efetivamente contribui para a determinação da impedância impulsiva (área efetiva) e (c) malha equivalente.

3.5. Comentários Adicionais

3.5.1. Determinação do Coeficiente de Impulso e Comprimento Efetivo

Considerando que um dos objetivos da metodologia proposta é que ela possa ser aplicada de forma prática na engenharia, descreve-se a seguir, de forma sucinta, como determinar o coeficiente de impulso e o comprimento efetivo de eletrodos sem a necessidade de se utilizar um pacote computacional baseado na teoria de campo.

Como dito na Seção 3.2, o coeficiente de impulso para configurações com dimensões inferiores ao comprimento efetivo (ou à área efetiva) não depende do arranjo em si, mas da resistividade do solo em baixas frequências e do sinal de corrente injetado. Tal coeficiente pode ser estimado a partir de resultados obtidos de simulações aplicando-se um modelo eletromagnético rigoroso e disponíveis em:¹⁹, para eletrodos horizontais e hastes, ²² para malhas de aterramento e ⁹ para cabos contrapeso. Contudo considerando que o coeficiente de impulso independe do arranjo de aterramento para dimensões inferiores ao comprimento efetivo, pode-se utilizar as fórmulas práticas proposta por Alípio e Visacro em¹⁴ para estimar o coeficiente de impulso.

O comprimento efetivo ou a área efetiva depende, fundamentalmente, da resistividade do solo em baixas frequências e do sinal de corrente injetado. De maneira similar, os valores de L_{EF} ou A_{EF} podem ser estimados a partir de gráficos aplicando-se um modelo eletromagnético rigoroso e disponíveis em². Além disso, o comprimento efetivo de eletrodos horizontais pode ser estimado utilizando-se fórmulas práticas proposta por Alípio e Visacro em¹⁴. Do comprimento efetivo de eletrodos horizontais pode-se estimar a área efetiva de malhas de aterramento, conforme²¹. É importante salientar que para o caso de arranjos compostos por múltiplos eletrodos e pontos de injeção, como é o caso do aterramento de LTs

constituído por um conjunto de contrapesos, o comprimento efetivo é maior do que aquele de um eletrodo horizontal simples⁹. Nesse caso, o comprimento efetivo pode ser estimado por meio dos resultados apresentados por Visacro e Silveira em⁹ ou utilizando fórmulas práticas propostas nesta mesma referência.

3.5.2. Redução do Coeficiente de Impulso para Arranjos Complexos

O formato das curvas de I_C em função de L é mantido, independente do arranjo de aterramento. Entretanto, quando são utilizados arranjos complexos, tais como conjunto de contrapesos e malhas de aterramento, o coeficiente de impulso apresenta uma pequena redução (derivada negativa) até que o comprimento (ou raio) efetivo seja atingido, diferentemente do caso de eletrodos horizontais em que o valor de I_C é aproximadamente constante para comprimentos inferiores a L_{EF} ¹⁴. Para fins de ilustração, a Figura 3.7 apresenta um gráfico de I_C em função de L_M (coeficiente de impulso em função do lado da malha) para uma malha de aterramento quadrada, com reticulados de 5 m x 5 m e enterrada a 0,8 m de profundidade em um solo de 1000 Ω m. Além disso, na mesma figura é indicado o valor de I_C para eletrodos horizontais com comprimento inferior ao efetivo. Verifica-se que o valor de I_C não é constante no caso de arranjos complexos, e dimensões inferiores ao comprimento ou raio efetivo, podendo levar a maiores erros na aplicação da metodologia proposta para estimativa de Z_P .

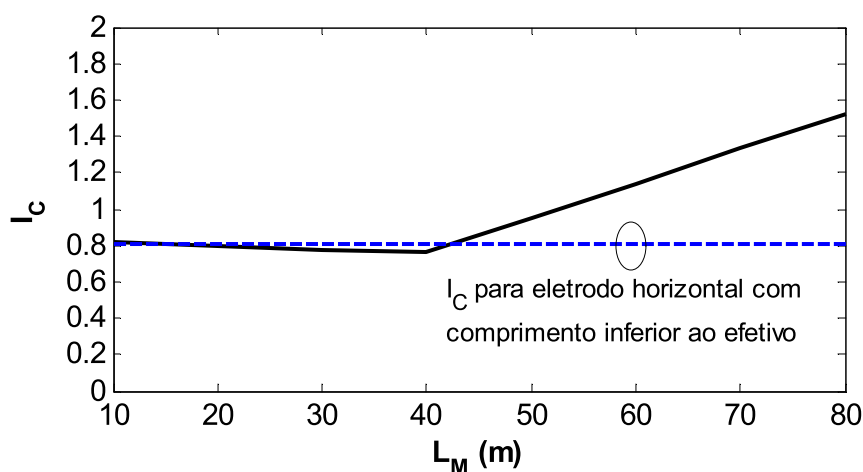


Figura 3.9 – Coeficiente de impulso em função do comprimento do lado da malha para uma malha quadrada com reticulados de 5 m x 5 m e enterrada a 0,8 m de profundidade em um solo de 1000 Ω .m. Considera-se a variação dos parâmetros elétricos do solo de acordo com (5) e, por simplicidade, a injeção de uma onda de corrente 1,2/50- μ s do tipo dupla exponencial no centro da malha.

3.6. Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado uma metodologia original para a determinação da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. Assim, como aspecto de destaque, esta metodologia pode ser aplicada diretamente a qualquer arranjo típico de aterramento, conhecendo-se o coeficiente de impulso e o comprimento efetivo (ou a área efetiva), ambos os parâmetros dependentes da resistividade do solo e da corrente injetada. Portanto, para aplicação desta metodologia é necessário calcular a resistência de aterramento do chamado arranjo equivalente, o que pode ser realizado utilizando-se programas comerciais de cálculo de aterramento em baixas frequências.

Vale destacar que um dos objetivos da metodologia proposta é que esta possa ser aplicada de forma simples por engenheiros que lidem com o desempenho impulsivo de aterramentos elétricos. Para isso, os parâmetros de entrada para aplicação desta metodologia (cálculo de resistência de aterramento, comprimento efetivo e coeficiente de impulso) podem ser determinados por meio de programas comerciais, fórmulas práticas disponíveis na literatura e resultados de simulação amplamente divulgados na literatura técnica. O Capítulo 4 ilustra a aplicação da metodologia proposta para estimativa da impedância impulsiva de alguns arranjos típicos de aterramento.

Capítulo 4

Resultados e Discussão

4.1. Introdução

Como já mencionado, a impedância impulsiva consiste em uma representação mais apropriada para o aterramento em estudos de transitórios atmosféricos, em relação à resistência de baixa frequência. Tradicionalmente, a determinação da impedância impulsiva de arranjos gerais de aterramento envolve a aplicação de modelos eletromagnéticos complexos e que, na maior parte das situações, demanda elevado esforço computacional. No Capítulo 3 desta dissertação é apresentada uma metodologia que permite a estimativa prática e expedita da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. O presente capítulo apresenta resultados de aplicação da metodologia proposta.

4.2. Desenvolvimentos

Na avaliação da qualidade dos resultados fornecidos pela metodologia proposta no Capítulo 3 para estimativa da impedância impulsiva de aterramento, são considerados neste capítulo três arranjos típicos: eletrodos horizontais, cabos contrapeso e malhas de aterramento. Para cada arranjo, são consideradas três “dimensões” (L) — 20 m, 40 m e 80 m — conforme Figura 4.1. No caso de eletrodos horizontais e malhas são avaliados pontos de injeção na extremidade e no centro e no caso de contrapesos considera-se a injeção de corrente na extremidade inclinada do eletrodo. Para cada arranjo e dimensão específicos, são considerados três valores de resistividade: 300, 1000 e 3000 Ωm . É importante mencionar que a gama de casos avaliados pretende contemplar solos de baixa, moderada e elevada resistividade e, também, arranjos com dimensões inferiores, próximas ou superiores ao comprimento efetivo.

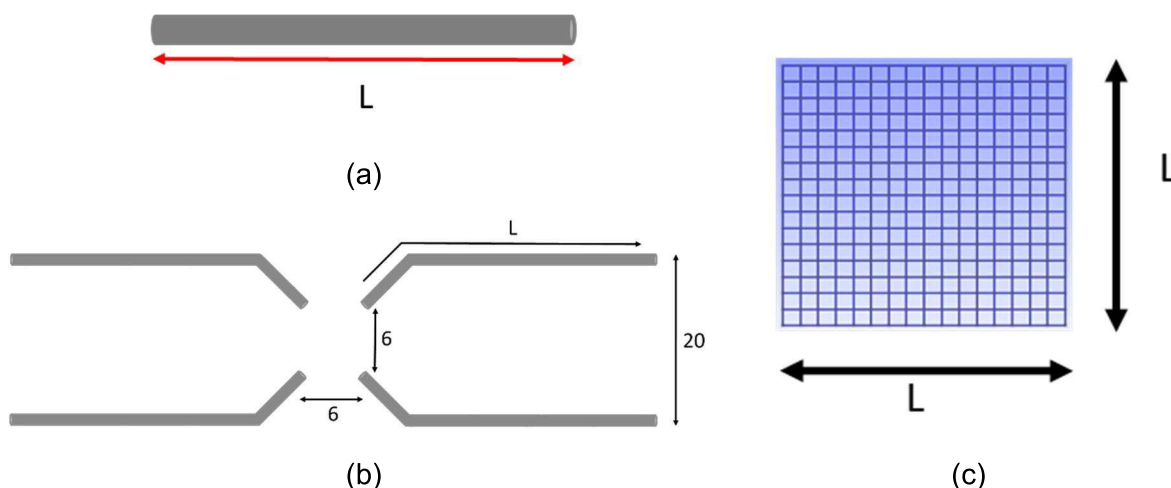


Figura 4.1: Dimensões para cada arranjo típico: (a) Eletrodo Horizontal, (b) Cabo Contrapeso e (c) Malha de Aterramento

Para aplicação desta metodologia são necessários os valores dos comprimentos efetivos e coeficientes de impulso, considerando as resistividades de interesse. Esses parâmetros podem ser estimados conforme descrito na Seção 3.5.1 do Capítulo 3 e estão apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2. Vale mencionar que o comprimento efetivo e o coeficiente de impulso também dependem do sinal de corrente aplicado ao aterramento. Os valores indicados nas Tabelas 4.1 e 4.2 foram estimados considerando-se ondas de corrente representativa de primeiras descargas e descargas subsequentes, que reproduzem os principais parâmetros medianos de ondas de corrente reais medidas na estação do Monte San Salvatore^{23,29}.

Para avaliação da qualidade das estimativas fornecidas pela aplicação da metodologia proposta, toma-se como referência os valores de impedância impulsiva calculados utilizando o modelo eletromagnético rigoroso *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM)³⁰. Os resultados obtidos via simulações empregando o HEM são chamados de valores “exatos”.

A análise dos resultados obtidos é realizada segundo duas perspectivas. Em uma dessas perspectivas, apresentam-se gráficos das impedâncias impulsiva estimada e exata. Tais gráficos permitem uma primeira avaliação da qualidade dos resultados obtidos, além de permitir avaliar a tendência de comportamento dos valores estimados e exato. Adicionalmente, são incluídas no mesmo gráfico as curvas de resistência de aterramento de baixa frequência com o intuito de compará-las com as estimativas de impedância impulsiva fornecidas pela metodologia proposta.

Em uma segunda perspectiva, com o intuito de avaliar de forma mais rigorosa a qualidade dos resultados fornecidos pela metodologia proposta, são avaliados os erros percentuais por meio do uso dos chamados “diagramas de caixa”. Os diagramas de caixa apresentam simultaneamente, por meio gráfico, várias características estatísticas de um

conjunto de dados: locação, dispersão, variabilidade, simetria ou assimetria e presença de observações discrepantes (também denominados “*outliers*”)^{31,32}.

O módulo da diferença entre o valor exato e o valor estimado dividido pelo valor exato é um dos erros percentuais utilizados, denominado neste trabalho como Erro Percentual Absoluto. Outro erro utilizado é o Erro Percentual Relativo, definido, neste trabalho, como a razão entre a diferença do valor exato pelo valor estimado e o valor exato. Estes erros fornecem as informações de localização dos erros, desvio de simetria e presença de *outliers*. Além disso, o Erro Percentual Relativo analisa o conservadorismo da distribuição e a variabilidade real dos erros.

Os estimadores estatísticos utilizados nas análises de distribuição de erros, apresentam as seguintes expressões:

$$E_{PA}(\%) = \left[\frac{|\hat{\theta} - \theta|}{\theta} \right] \times 100 \quad (4.1)$$

$$E_{PR}(\%) = \left[\frac{\hat{\theta} - \theta}{\theta} \right] \times 100 \quad (4.2)$$

sendo que:

E_{PA} : Erro Percentual Absoluto [%]

E_{PR} : Erro Percentual Relativo [%]

θ : Valor exato da impedância impulsiva [Ω]

$\hat{\theta}$: Valor estimado da impedância impulsiva [Ω]

Tabela 4.1 – Comprimentos efetivos de arranjos típicos, para cada resistividade do solo

Resistividades (Ωm)	Comprimentos efetivos [m]			
	Eletrodos horizontais		Cabos Contrapeso	
	Primeira Descarga	Descarga Subsequente	Primeira Descarga	Descarga Subsequente
300	23,75	11,25	30,00	15,00
1000	47,50	22,50	60,00	30,00
3000	> 80,00	45,00	> 80,00	60,00

Tabela 4.2 – Coeficientes de impulso para cada resistividade específica

Resistividades (Ωm)	Coeficiente de Impulso [-]	
	Primeira Descarga	Descarga Subsequente
300	0,9470	0,8316
1000	0,8918	0,7014
3000	0,7777	0,5231

Os valores para os comprimentos efetivos e os coeficientes de impulso apresentados nas Tabelas 4.1 e 4.2 foram obtidos a partir do modelo eletromagnético rigoroso *Hybrid Electromagnetic Model* (HEM)³⁰.

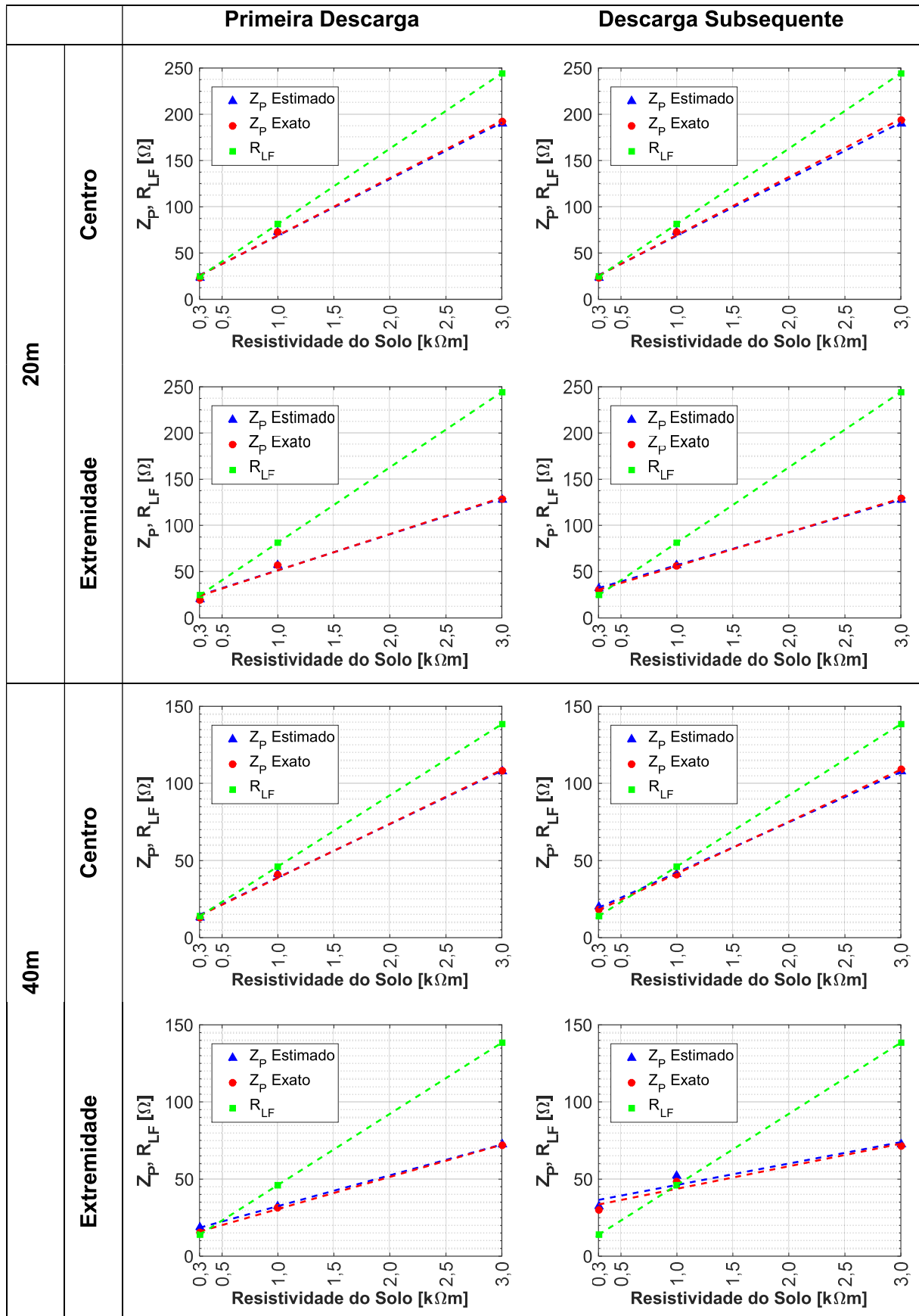
Os resultados obtidos para eletrodos horizontais, cabos contrapeso e malhas de aterramento estão apresentados a seguir, respectivamente nas Seções 4.3, 4.4 e 4.5.

4.3. Eletrodos Horizontais

4.3.1. Análise Gráfica

A Figura 4.2 apresenta os resultados de impedâncias impulsivas estimada e exata e de resistência de aterramento em baixas frequências. Os resultados são apresentados para as ondas de corrente representativas de primeiras descargas e subseqüentes, considerando-se dois pontos de injeção (centro e extremidade), resistividades de 300 Ωm , 1000 Ωm e 3000 Ωm , para diferentes comprimentos de eletrodos (20 m, 40 m e 80 m).

De acordo com os resultados, os valores de impedância impulsiva estimados pela metodologia proposta estão muito próximos dos valores exatos e, além disso, o comportamento de ambas as curvas de tendência é bastante similar. Ainda, é importante mencionar que os valores de impedância impulsiva são, de modo geral, bastante distintos dos valores de resistência de aterramento em baixas frequências; ademais, as curvas de tendência de impedância impulsiva e de resistência de aterramento são perceptivelmente diferentes.



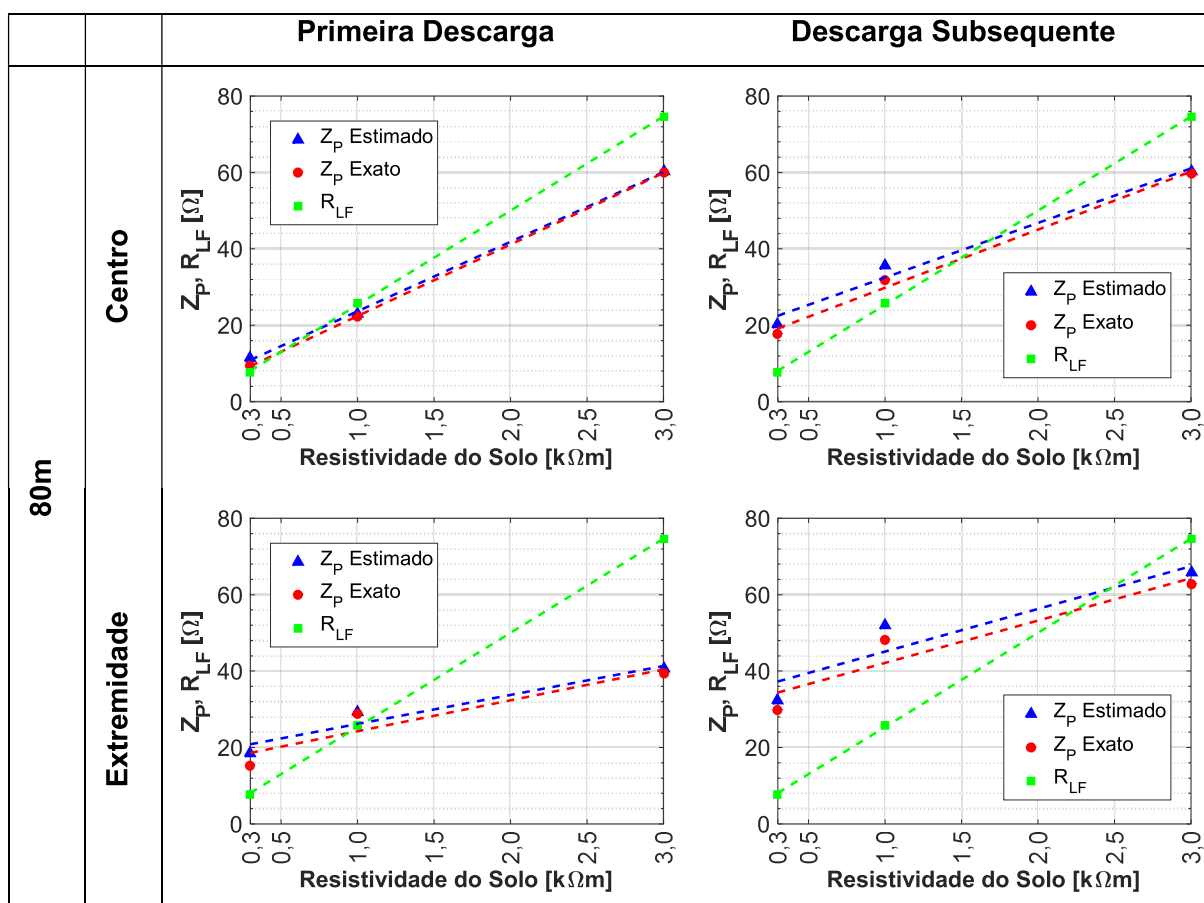


Figura 4.2 – Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para os eletrodos horizontais.

É importante ressaltar ainda que para eletrodos longos solicitados por descargas subsequentes, principalmente para pontos de injeção localizados na extremidade, a impedância impulsiva é maior do que a resistência de aterramento em baixas frequências para uma larga faixa de resistividade de solo.

4.3.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais

A Figura 4.3 apresenta o diagrama de caixa para os erros percentuais (absoluto e relativo) entre os resultados das impedâncias impulsiva estimada e exata.

O diagrama de caixa do erro percentual absoluto indica que os erros se localizam em torno de 2,47% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 0,8% e 7,63% (primeiro e terceiro quartis). Da mesma forma, o diagrama de caixa do erro percentual relativo indica que os erros se localizam em torno de 2,15% (mediana) e que os erros se encontram dispersos entre 0,41% e 7,63% (primeiro e terceiro quartis). Em suma, 75% dos erros

percentuais (absolutos e relativos) são menores do que 7,63%. Uma informação adicional que este último diagrama de caixa fornece é que 77% dos erros são conservadores.

Finalmente observa-se a presença de *outliers* que são consequência, basicamente, dos baixos valores de impedância impulsiva no caso de resistividades mais baixas e que, por isso, tendem a produzir erros percentuais mais elevados. Embora esses *outliers* não possam ser desprezados, vale mencionar que eles representam casos em que a impedância impulsiva já apresenta valor reduzido e, portanto, os erros não representam impacto significativo no desempenho do sistema aterrado.

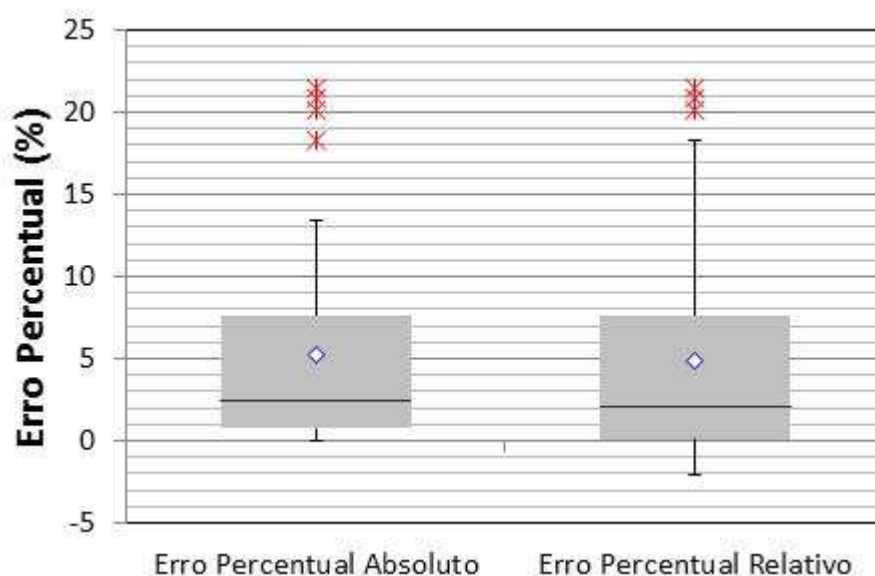


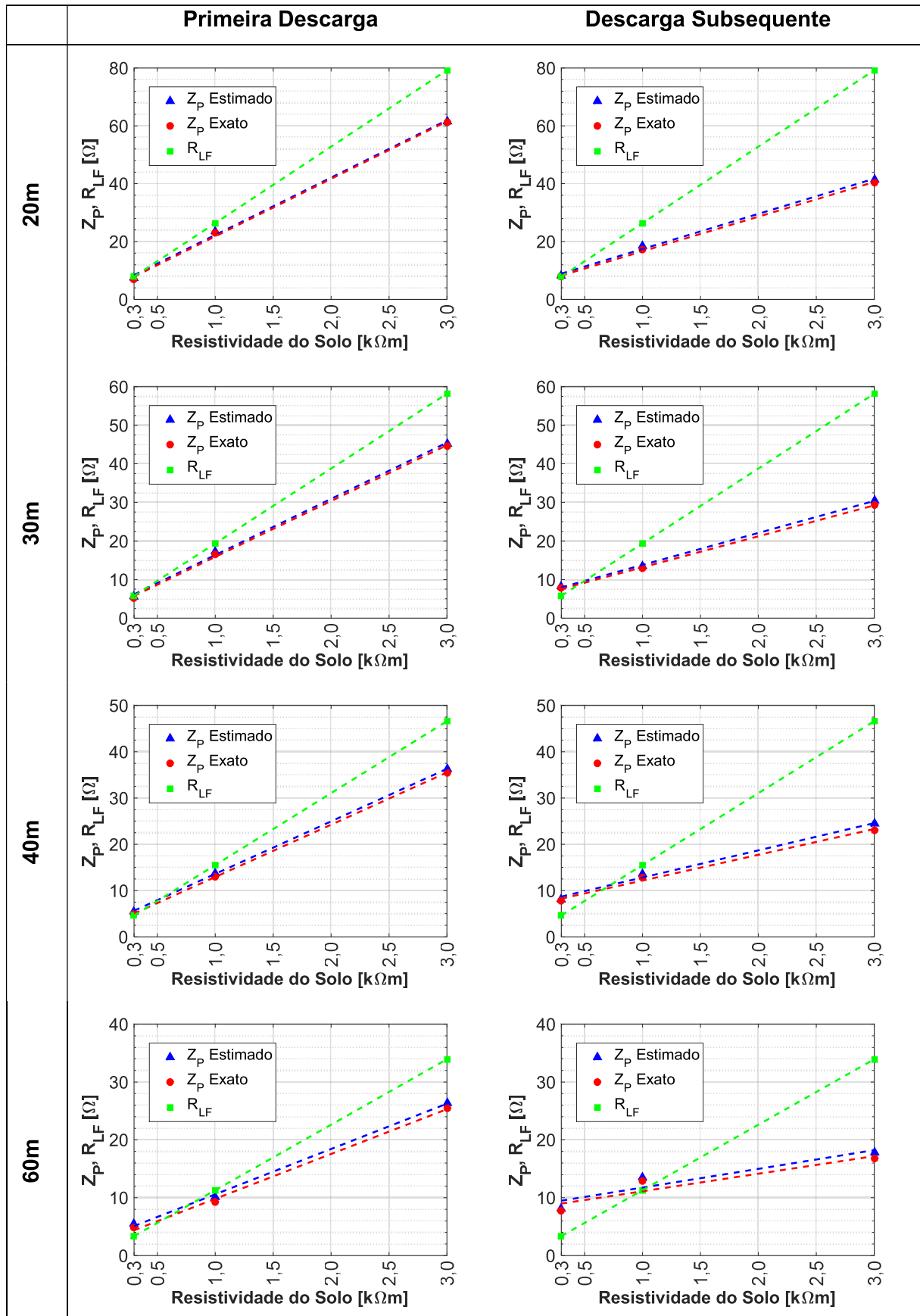
Figura 4.3 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para eletrodos horizontais

4.4. Cabos Contrapeso

4.4.1. Análise Gráfica

A Figura 4.3 apresenta os resultados de impedâncias impulsivas estimada e exata e de resistência de aterramento em baixas frequências para as ondas representativas de corrente de primeiras descargas e subsequentes, para solos de resistividade de 300, 1000 e 3000 Ωm para os diferentes comprimentos de cabos contrapeso (20 m, 30 m, 40 m, 60 m e 80 m). A impedância impulsiva estimada apresenta resultados muito satisfatórios quando comparados aos valores exatos e, além disso, o comportamento de ambas as curvas de tendência são muito similares. Novamente é possível verificar que, na maior parte dos casos,

as curvas de tendência da impedância impulsiva e a resistência de aterramento são perceptivelmente diferentes.



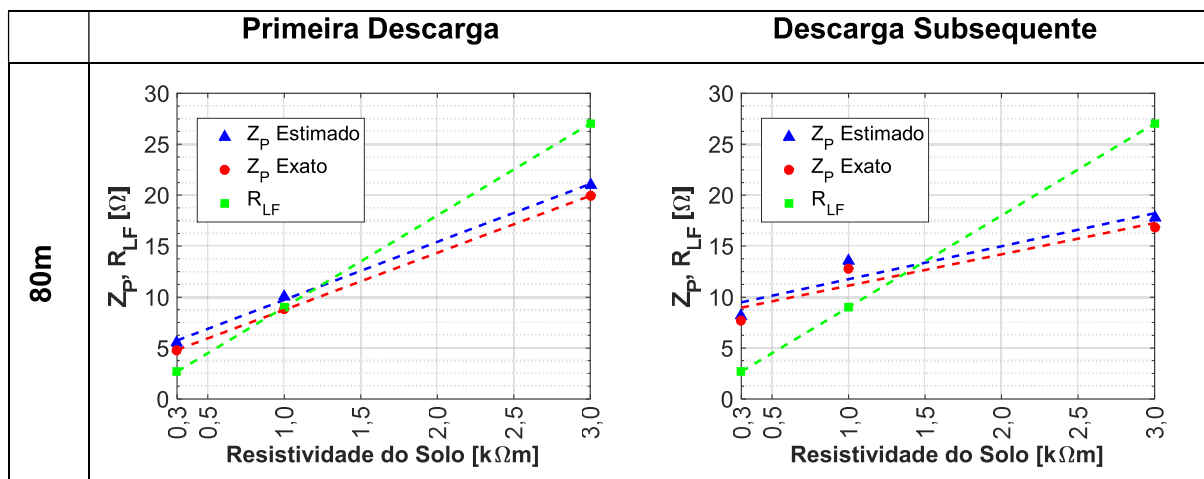


Figura 4.4 – Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para os cabos contrapesos.

4.4.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais

A Figura 4.5 apresenta o diagrama de caixa para os erros percentuais entre os resultados das impedâncias de impulso estimada e exata. Como não ocorrem erros percentuais relativos negativos para os casos analisados, isto é, todos os erros são conservadores, não houve a necessidade de apresentar diagrama de caixas para cada tipo de erro.

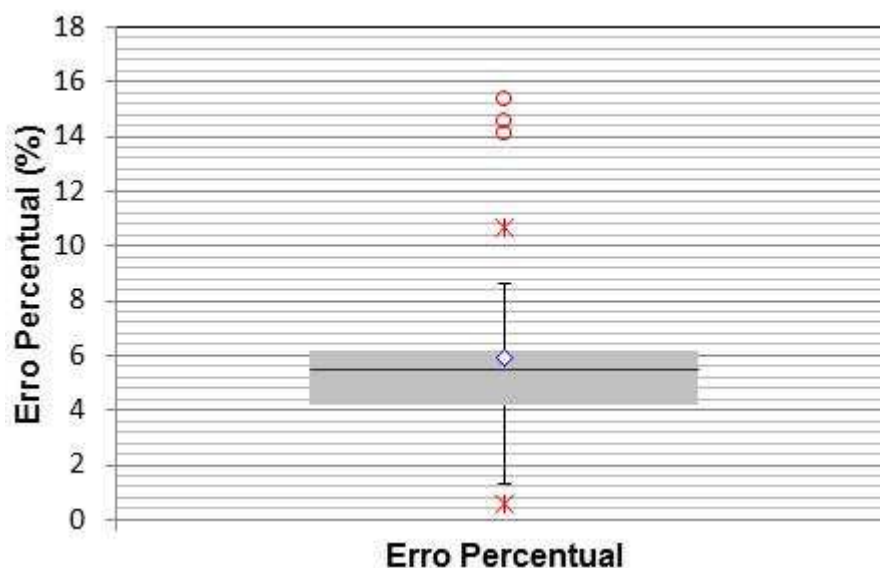


Figura 4.5 – Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para cabos contrapesos.

O diagrama de caixa do erro percentual indica que os erros se localizam em torno de 5,5% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 1,79% e 7,16% (primeiro e terceiro quartis), ou seja, 75% dos erros são menores do que 7,16%.

De modo similar ao caso de eletrodos horizontais, observa-se a presença de *outliers* que também são consequência dos baixos valores de impedância impulsiva no caso de resistividades mais baixas, e que tendem a produzir erros percentuais mais elevados. Embora esses *outliers* não possam ser desprezados, vale mencionar que eles representam casos em que a impedância impulsiva já apresenta valor reduzido e, portanto, os erros não representam impacto significativo, principalmente no caso específico de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. Nesse caso, o que de fato importa é o coeficiente de reflexão na base da torre e um pequeno erro na estimativa da impedância impulsiva de aterramento não impacta fortemente o valor desse coeficiente¹⁸.

4.5. Malhas de Aterramento

As duas abordagens para as malhas equivalentes são examinadas, por meio das análises gráficas e da utilização de diagramas de caixa. Finalmente os resultados obtidos por cada uma delas são comparados, com o intuito de verificar o arranjo equivalente que melhor atende as expectativas quanto aos parâmetros considerados.

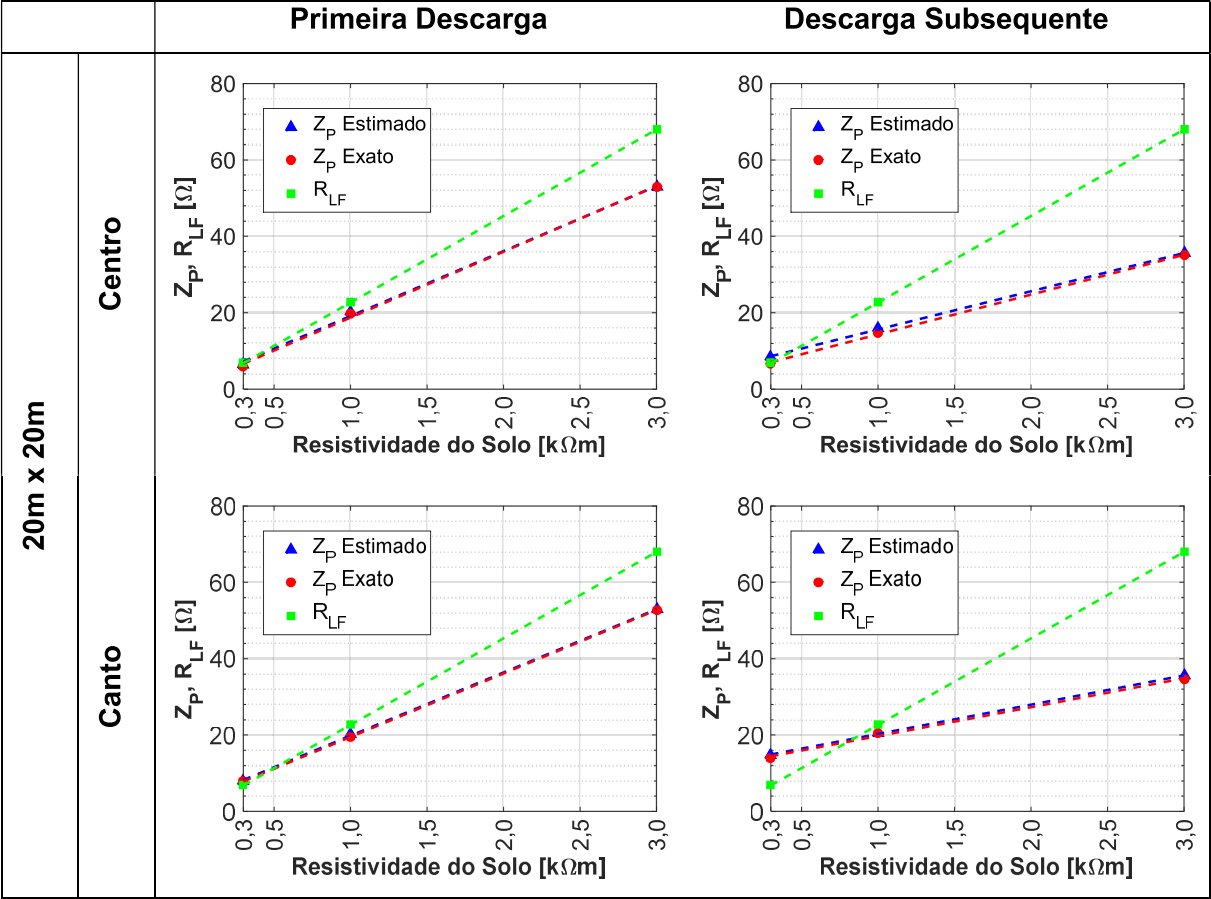
4.5.1. Primeira Abordagem

Na primeira abordagem a malha equivalente é representada apenas pelos condutores que se encontram na região da área efetiva, isto é, na região desde o ponto de injeção de corrente até o limite do comprimento efetivo em todas as direções, de acordo com as Figuras 3.5(c) e 3.6(c).

4.5.1.1. Análise Gráfica

A Figura 4.6 apresenta os resultados de impedâncias impulsivas estimada e exata e de resistência de aterramento em baixas frequências para as ondas representativas de corrente de primeiras descargas e subsequentes, com dois pontos de injeção (centro e canto), em solos de 300, 1000 e 3000 Ωm para as diferentes dimensões das malhas de aterramento (20 m x 20 m, 40 m x 40 m e 80 m x 80 m). A impedância impulsiva estimada apresenta

resultados satisfatórios quando comparados aos valores exatos e, além disso, o comportamento de ambas as curvas de tendência são muito similares. Por outro lado, os resultados de resistência de aterramento em baixas frequências e de impedância impulsiva e suas respectivas curvas de tendência são perceptivelmente diferentes.



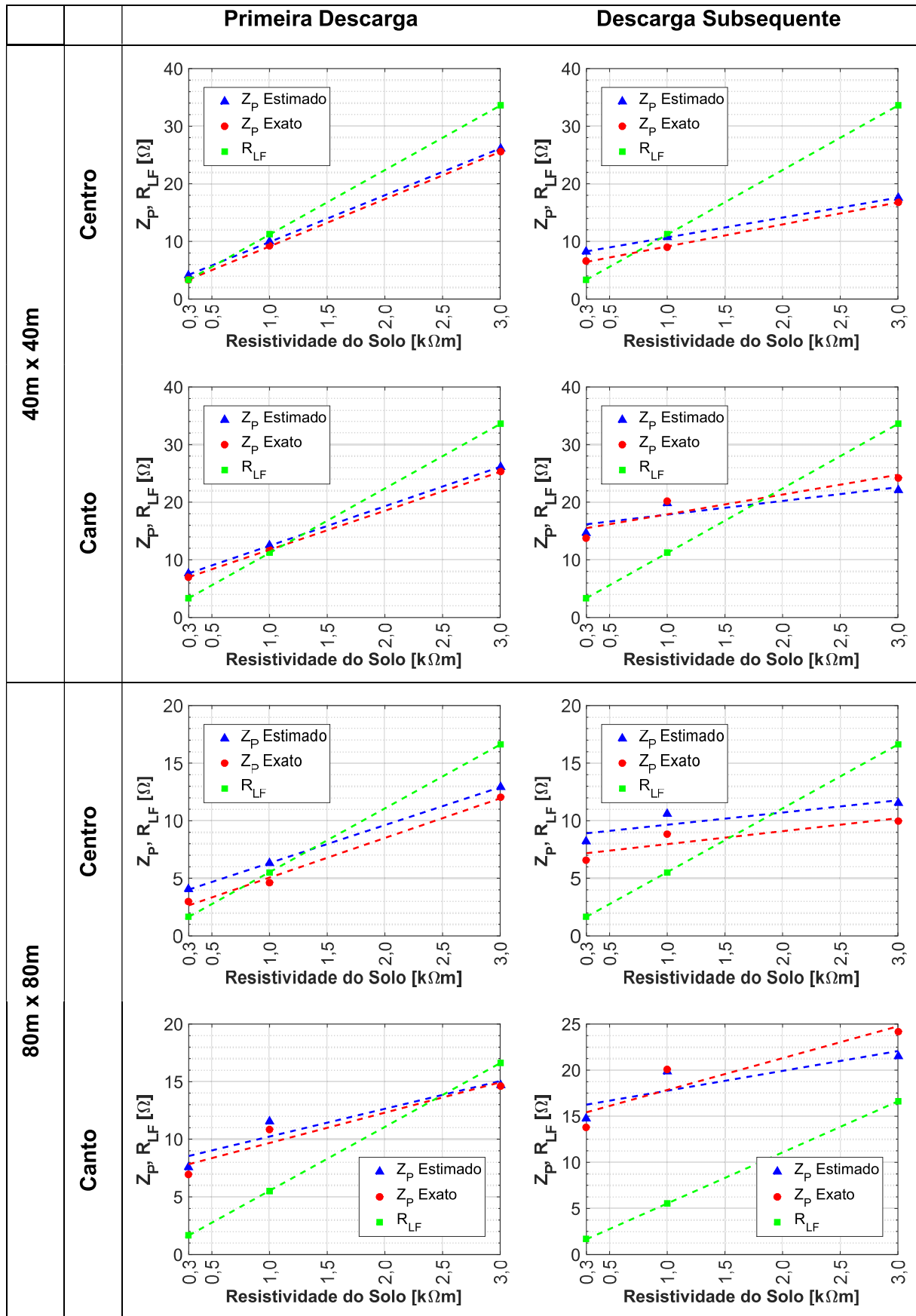


Figura 4.6 - Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para malhas de aterramento — Primeira Abordagem.

4.5.1.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de caixa para os erros percentuais entre os resultados das impedâncias de impulso estimada e exata.

O diagrama de caixa do erro percentual absoluto indica que os erros se localizam em torno de 6,97% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 2,46% e 12,02% (primeiro e terceiro quartis). Da mesma forma, o diagrama de caixa do erro percentual relativo indica que os erros se localizam em torno de 6,36% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 1,58% e 10,63% (primeiro e terceiro quartis). Em suma, 75% dos erros percentuais (absolutos e relativos) são menores do que 12,02% e 10,63%, respectivamente. Uma informação adicional que este último diagrama de caixa fornece é que mais de 87% dos erros são conservadores.

Finalmente observa-se a presença de *outliers* que são consequência do fato do valor da impedância impulsiva em baixas resistividades possuir uma ordem de grandeza menor do que aquelas observadas em médias e altas resistividades de forma a produzir altos valores percentuais, assim como ocorre no caso de eletrodos horizontais e dos cabos contrapeso.

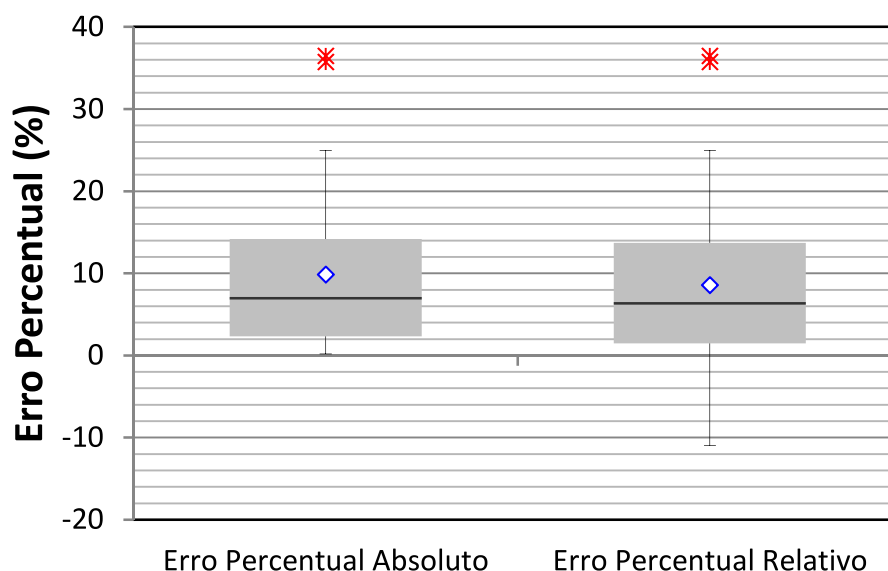


Figura 4.7 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para malhas de aterramento — Primeira Abordagem.

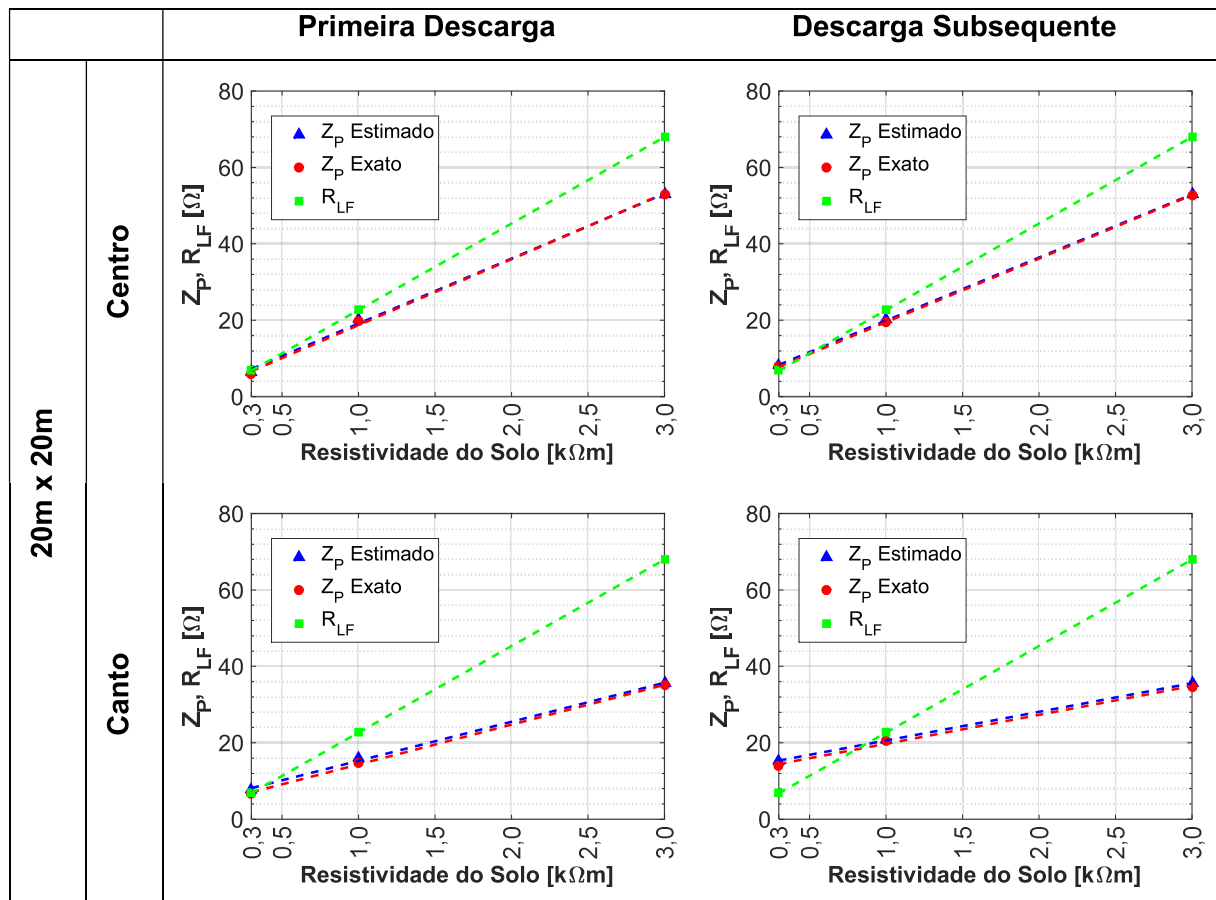
4.5.2. Segunda Abordagem

Na segunda abordagem a malha equivalente é representada por uma malha com área igual à efetiva e o comprimento total dos condutores presentes na área efetiva é computado e inserido no arranjo equivalente, iniciando-se pelo perímetro da área da malha equivalente e

depois preenchendo-se a área interna da mesma, de forma ortogonal e mais espaçada possível entre os condutores internos, de acordo com as Figuras 3.7(c) e 3.8(c).

4.5.2.1. Análise Gráfica

A Figura 4.8 apresenta os resultados de impedâncias impulsivas estimada e exata e de resistência de aterramento em baixas frequências para as ondas representativas de corrente de primeiras descargas e subsequentes, com dois pontos de injeção (centro e canto), em solos de 300 Ωm , 1000 Ωm e 3000 Ωm para as diferentes dimensões das malhas de aterramento (20 m x 20 m, 40 m x 40 m e 80 m x 80 m). A impedância impulsiva estimada apresenta resultados satisfatórios quando comparados aos valores exatos e, além disso, o comportamento de ambas as curvas de tendência são muito similares. Por outro lado, os resultados de resistência de aterramento em baixas frequências e de impedância impulsiva e suas respectivas curvas de tendência são perceptivelmente diferentes.



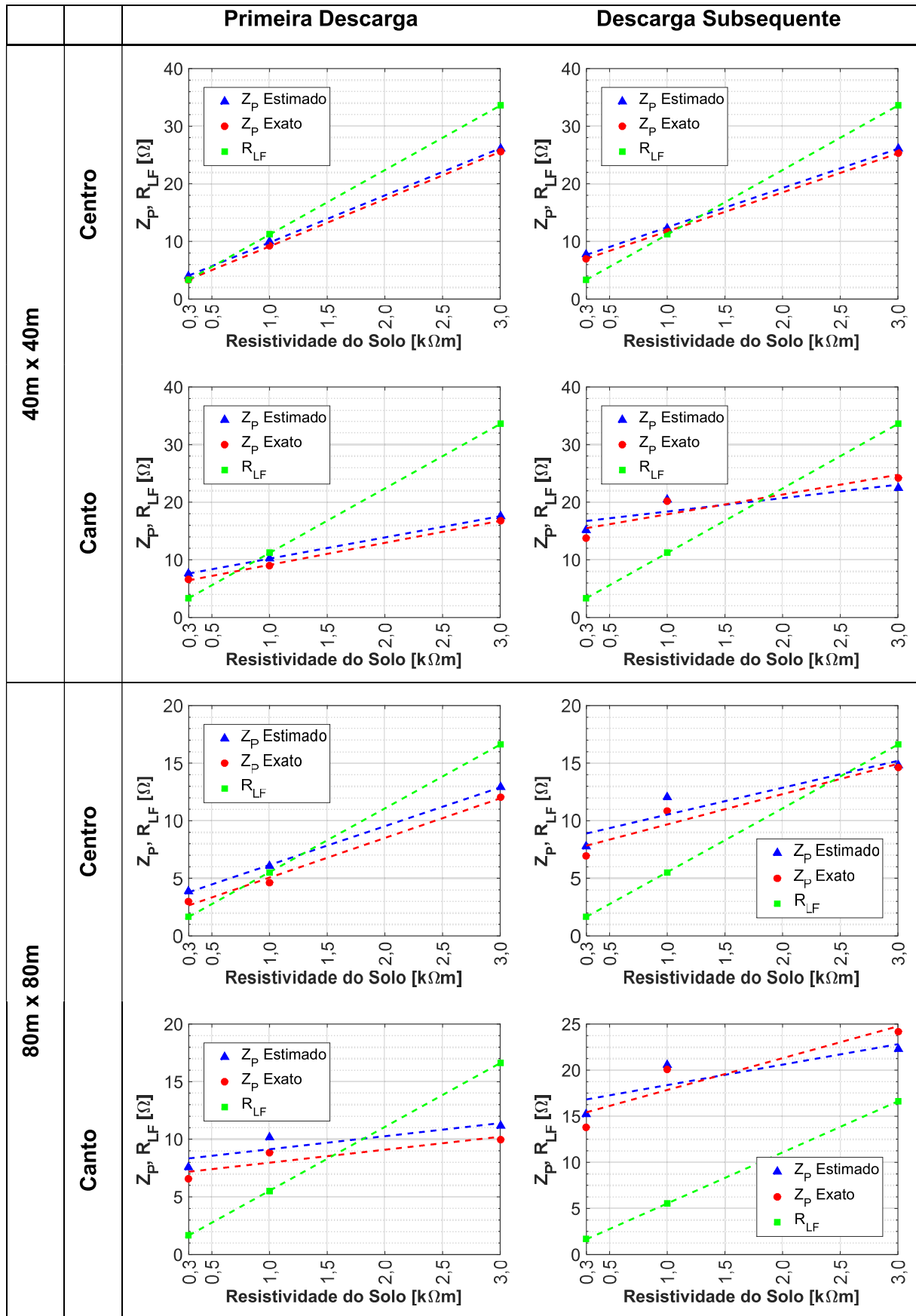


Figura 4.8 - Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para malhas de aterramento — Segunda Abordagem.

4.5.2.2. Análise da Distribuição de Erros Percentuais

A Figura 4.9 apresenta o diagrama de caixa para os erros percentuais entre os resultados das impedâncias de impulso estimada e exata.

O diagrama de caixa do erro percentual absoluto indica que os erros se localizam em torno de 7,53% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 2,76% e 11,59% (primeiro e terceiro quartis). Da mesma forma, o diagrama de caixa do erro percentual relativo indica que os erros se localizam em torno de 7,91% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 2,32% e 11,59% (primeiro e terceiro quartis). Em suma, 75% dos erros percentuais (absolutos e relativos) são menores do que 11,59%. Uma informação adicional que este último Diagrama de caixa fornece é que mais de 92,7% dos erros são conservadores. Pelas mesmas razões já mencionadas no caso de outros arranjos avaliados, observa-se a presença de alguns *outliers*.

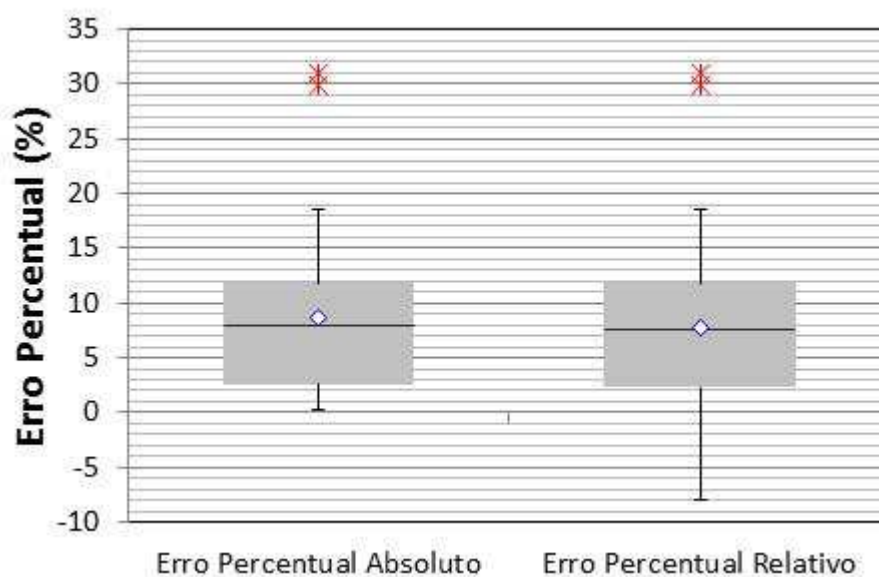


Figura 4.9 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para malhas de aterramento — Segunda Abordagem.

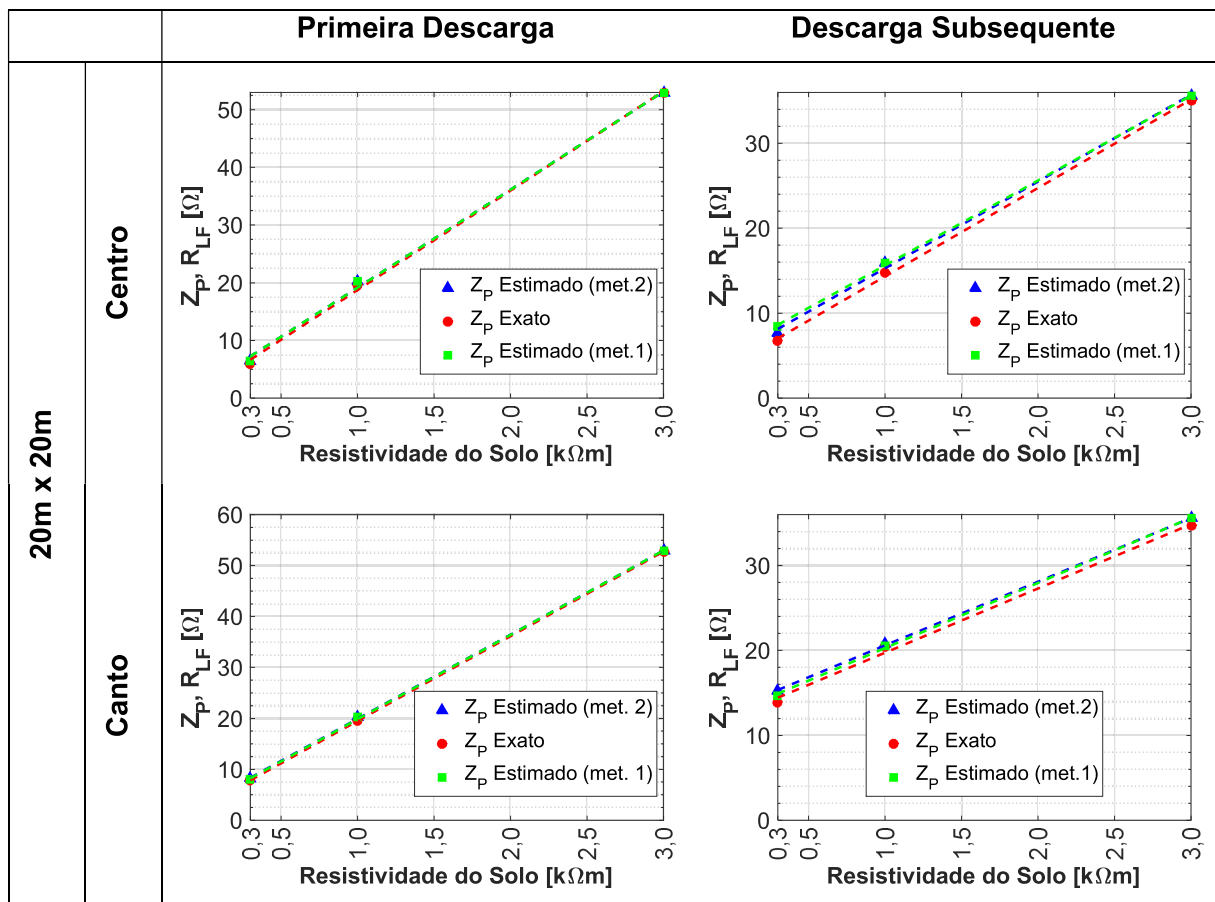
4.5.3. Análise Comparativa entre as Abordagens Diferentes

Como mencionado na Seção 3.4, a intenção de utilizar duas abordagens diferentes para as malhas equivalentes é verificar qual delas apresenta os melhores resultados de forma global. Sendo assim, os parâmetros avaliados são: análise gráfica para cada dimensão da malha, e injeção de correntes de descarga representativas, na faixa de 300 a 3000 Ωm , e

análise da distribuição de erros percentuais absolutos e relativos (locação, dispersão, variabilidade, conservadorismo e presença/localização dos *outliers*).

4.5.3.1. Análise Comparativa entre os Arranjos de Aterramento Analisados: Análise Gráfica

A análise gráfica apresentada tem o intuito de comparar as curvas de tendência das duas abordagens entre si e também com curva de tendência dos valores exatos, lembrando que a curva de tendência dos valores da resistência de aterramento em baixas frequências não está incluída nos gráficos.



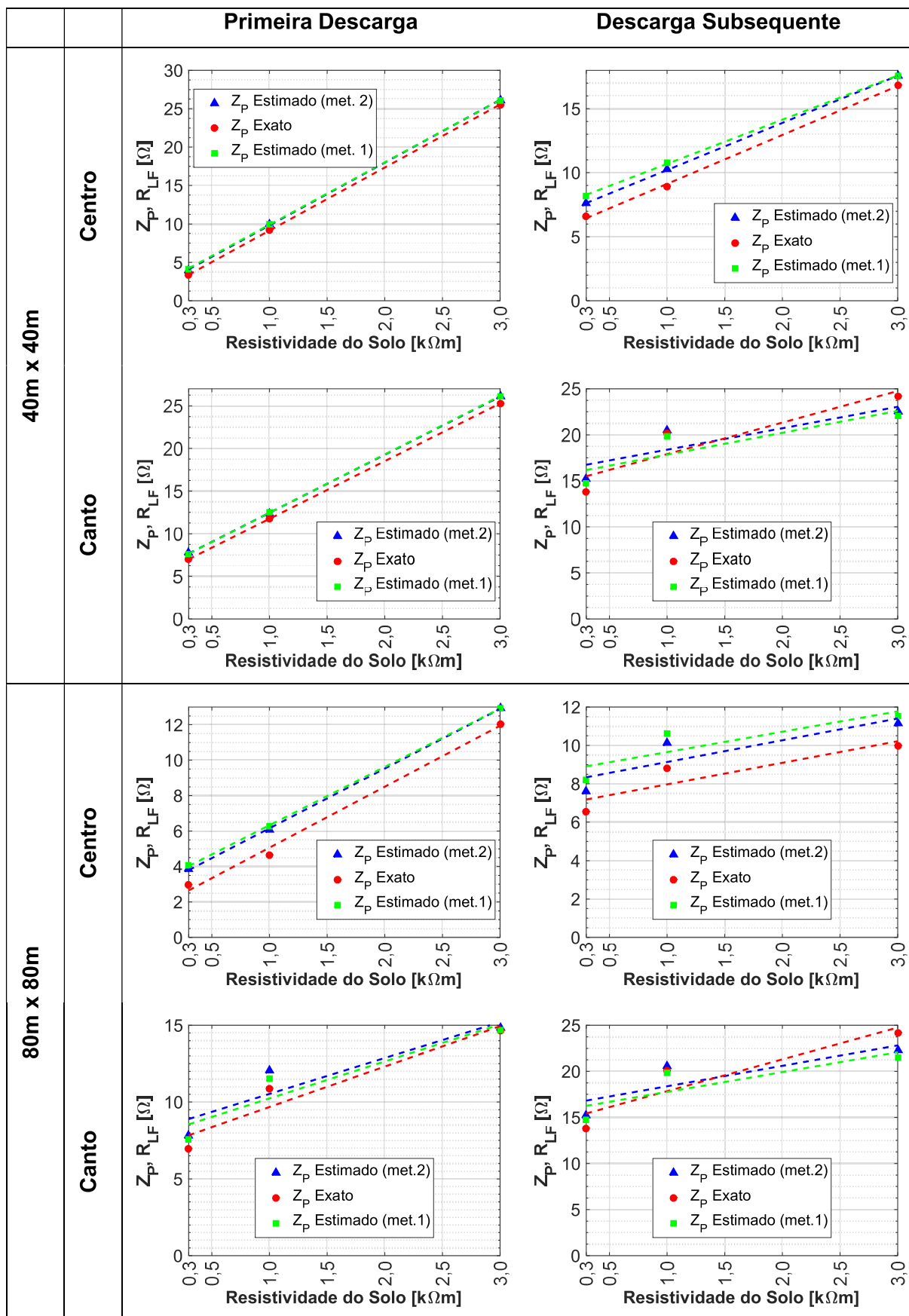


Figura 4.10 - Gráficos das impedâncias impulsivas estimada e exata e da resistência de aterramento em baixas frequências para malhas de aterramento — Comparação entre as duas abordagens.

De acordo com a Figura 4.10 verifica-se que as duas representações para as malhas equivalentes apresentam resultados muito satisfatórios quando comparadas com os valores de referência e muito próximos entre si, principalmente no caso de primeiras descargas e especialmente quando injetadas no centro da malha. No caso de descargas subsequentes, as diferenças entre as abordagens são mais significativas; ainda assim, os resultados são próximos entre si e também dos valores de referência.

4.5.3.2. Análise Comparativa entre os Arranjos de Aterramento Analisados: Análise de Distribuição de Erros Percentuais

De acordo com a Figura 4.11, pode-se verificar as diferenças entre as duas abordagens. A primeira abordagem apresenta menores valores para as medianas (6,97% e 6,36% para erros percentuais absolutos e relativos, respectivamente), enquanto a segunda abordagem apresenta as menores amplitudes de variação para erros percentuais absolutos e relativos (0,20% a 30,99% e -7,95% a 30,99%, respectivamente), as menores dispersões de erros percentuais absolutos e relativos (2,32% a 11,59% e 2,76% a 11,59%, respectivamente) e o maior conservadorismo (92,7%), conferindo dessa forma maior segurança à estimativa de impedância impulsiva. Nas duas abordagens são observados o mesmo número de *outliers*, porém, na segunda abordagem eles apresentam valores ligeiramente menores (o maior *outlier* possui um erro percentual de 30,99%). Além disso, a mediana é ligeiramente maior na segunda abordagem quando comparada com a primeira (aproximadamente 0,5% maior para erros percentuais absolutos e 1,5% maior para erros percentuais relativos). Os resultados expostos não invalidam a primeira abordagem, porém, a segunda apresenta os melhores parâmetros em sua totalidade.

Com relação à segunda abordagem, alguns comentários específicos merecem ser destacados, tendo-se em conta extensiva análise de sensibilidade realizada durante o trabalho.

Independente da dimensão dos reticulados, o arranjo equivalente pode apresentar um comprimento total de condutores diferente daquele comprimento total utilizado na área efetiva. Esse fato não compromete significativamente os resultados estimados. Entretanto, é importante ressaltar que o arranjo equivalente deve ter ao menos os eletrodos para compor o perímetro do mesmo, independentemente de ter ou não condutores internos no arranjo equivalente suficientes para satisfazer essa condição.

Esta metodologia também é válida para malhas retangulares e irregulares. Nestes casos, o arranjo equivalente é sempre quadrado e contém o comprimento de eletrodos o mais próximo possível daquele utilizado para dispersar a corrente impulsiva no arranjo original.

É interessante notar ainda que arranjos com menores valores de acoplamento – isto é, com reticulados maiores – apresentam, de forma geral, menores erros percentuais do que outros com mesma dimensão e reticulados menores, porém, apresentam as maiores diferenças entre os valores exatos e os estimados.

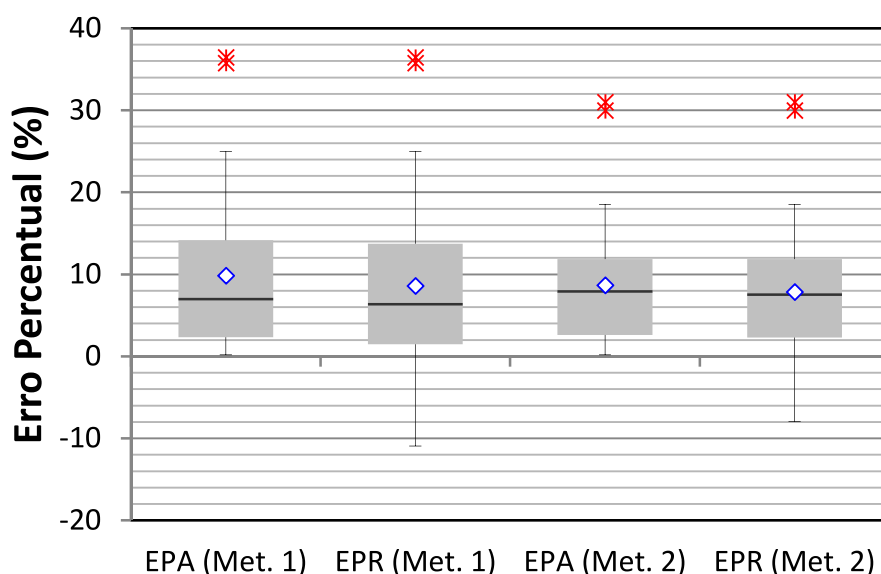


Figura 4.11 - Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para malhas de aterramento — Comparação entre as duas abordagens.

4.6. Análise Comparativa entre os Arranjos de Aterramento Analisados

A Figura 4.12 reúne os erros percentual absoluto e relativo obtidos para os arranjos avaliados. Ainda é importante destacar que se adotou a segunda abordagem para as malhas equivalentes. De acordo com a Figura 4.12, os seguintes comentários podem ser destacados:

- A distribuição dos erros é assimétrica à esquerda, com exceção dos eletrodos horizontais (assimétrica à direita), indicando uma não-normalidade da distribuição dos dados em todos os casos.

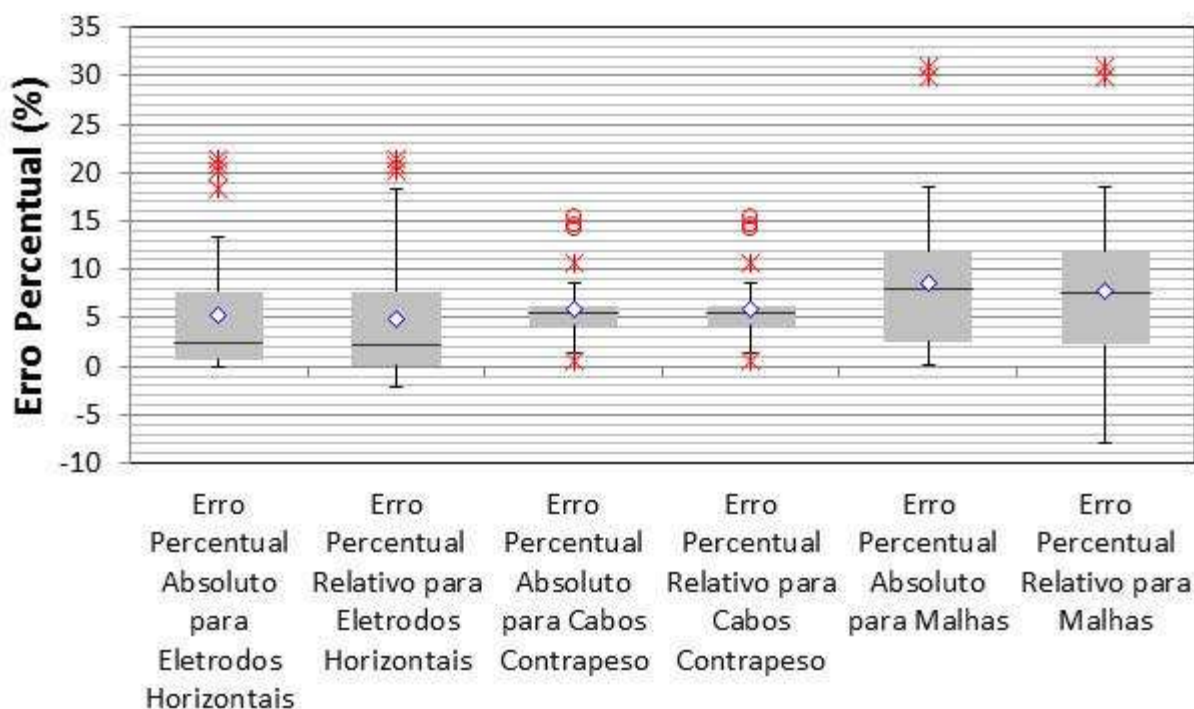


Figura 4.12 – Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para as diferentes topologias de sistemas de aterramento

- Os eletrodos horizontais possuem o menor valor para a mediana do erro percentual absoluto (2,46%), enquanto as malhas apresentam o maior valor para este parâmetro (7,91%).
- Os cabos contrapeso apresentam a menor amplitude de variação dos erros percentuais (0,58% a 15,35%) e os menores limites de erros percentuais (1,59% a 8,76%) ao contrário das malhas que apresentam a maior amplitude de variação de erros percentuais absolutos e relativos (0,20% a 30,99% e -7,95% a 30,99%, respectivamente) e também os maiores limites de erros percentuais absolutos e relativos (0,2% e 24,82% e 7,95% e 25,5%, respectivamente).
- Os cabos contrapeso apresentam a menor dispersão de dados (4,28% a 6,07%). Essa informação indica, através dos primeiro e terceiro quartis, que 50% dos erros percentuais encontram-se nesta faixa e que 75% dos erros percentuais são menores que 6,07%. As malhas de aterramento apresentam a maior dispersão de erros percentuais absolutos e relativos (2,32% a 11,59% e 2,76% a 11,59%, respectivamente). De modo similar, tais informações indicam que 50% dos erros percentuais encontram-se nas faixas mencionadas e que 75% dos erros percentuais são menores do que 11,59%.

- Os cabos contrapeso apresentam o menor erro percentual absoluto (0,58%), enquanto os eletrodos possuem o menor erro percentual relativo (-2,05%). Já o maior erro percentual pode ser encontrado nas malhas de aterramento (30,99%), considerado um *outlier*. Os *outliers* das malhas apresentam valores maiores do que os *outliers* dos eletrodos horizontais e cabos contrapesos, porque a ordem de grandeza da impedância impulsiva destes é maior do que das malhas de aterramento.
- Os cabos contrapeso apresentam os melhores resultados com relação ao conservadorismo (100% dos casos) enquanto os eletrodos horizontais apresentam os piores resultados (77% dos casos).
- Observa-se que quanto menor e mais simples for o arranjo, menor é a mediana dos erros percentuais entre os valores exato e estimado da impedância impulsiva.

4.7. Considerações Finais

A Figura 4.9 apresenta o diagrama de caixa para os erros percentuais entre os resultados das impedâncias de impulso estimada e exata, considerando todos os arranjos analisados neste capítulo.

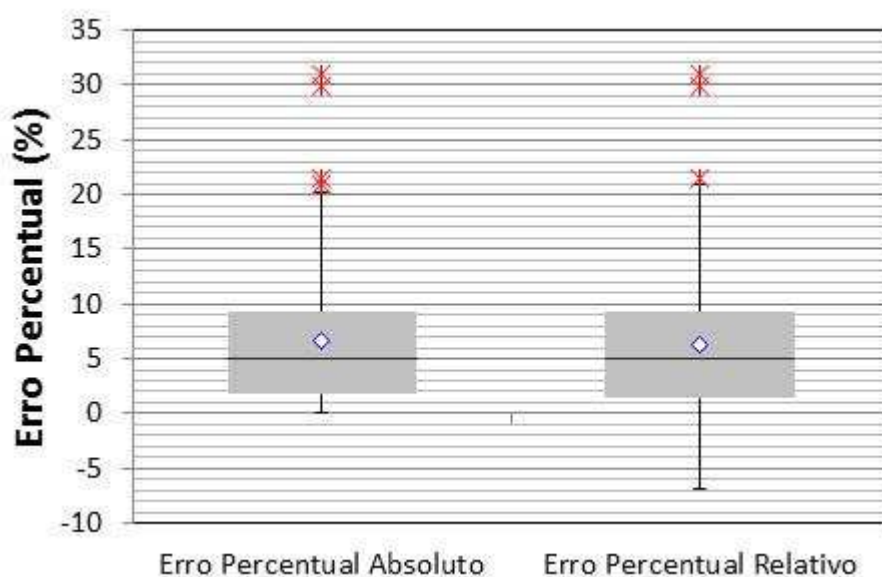


Figura 4.13– Gráfico da Distribuição de Erros Percentuais (Absoluto e Relativo) entre os valores exatos e estimados da impedância impulsiva para sistemas de aterramento

O diagrama de caixa do erro percentual absoluto indica que os erros se localizam em torno de 5,2% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 2,06% e 9,17% (primeiro

e terceiro quartis). Da mesma forma, o diagrama de caixa do erro percentual relativo indica que os erros se localizam em torno de 4,92% (mediana) e que 50% dos erros se encontram entre 1,47% e 9,17% (primeiro e terceiro quartis). Em suma, 75% dos erros percentuais (tanto absolutos quanto relativos) são menores do que 9,17%. Uma informação adicional que este último diagrama fornece é que mais de 89% dos erros são conservadores.

Considerando os comentários anteriores, pode-se afirmar que a metodologia proposta fornece excelentes estimativas da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramento. Adicionalmente, a metodologia é válida para qualquer arranjo de aterramento, típico ou não, e também é válida para qualquer tipo de corrente impulsiva, desde que o comprimento efetivo e o coeficiente de impulso sejam calculados adequadamente.

Capítulo 5

Conclusão

Esta dissertação apresentou os fundamentos de uma nova metodologia para estimativa da impedância impulsiva de arranjos típicos de aterramentos elétricos. Esta metodologia foi aplicada a arranjos, tais como eletrodos horizontais, cabos contrapeso e malhas de aterramento, numa faixa de resistividade compreendida entre 300 a 3000 Ωm , para sinais de corrente representativo de primeiras descargas e descargas subsequentes injetados em diferentes pontos destes arranjos.

Tomando como referência os resultados obtidos pela aplicação de um modelo eletromagnético rigoroso, mostrou-se que a metodologia proposta fornece excelentes estimativas de impedância impulsiva de aterramento. Ainda, é importante ressaltar que tais estimativas diferem, de modo geral, da resistência de aterramento de baixa frequência.

No caso de malhas de aterramento, duas abordagens diferentes para arranjos equivalentes foram desenvolvidas a fim de avaliar a validade de cada uma delas e também verificar qual dos arranjos equivalentes apresenta os resultados mais satisfatórios. De acordo com os parâmetros examinados, ambas as abordagens são válidas, porém, a segunda apresentou os melhores resultados.

A metodologia proposta mostrou-se válida para arranjos complexos retangulares e irregulares e também para arranjos não típicos de aterramento, além de sinais genéricos de corrente impulsivas, desde que devidamente calculados o comprimento efetivo e o coeficiente de impulso.

As análises realizadas para diversos valores de resistividade do solo e dimensões de arranjos típicos de aterramento evidenciam a versatilidade da metodologia proposta. Além disso, a relativa simplicidade de desenvolvimento e o baixo custo computacional tornam a metodologia proposta bastante atrativa do ponto de vista acadêmico e principalmente prático.

Finalmente, a partir da utilização de ferramentas estatísticas, mostrou-se que os erros das estimativas fornecidas pela metodologia proposta são suficientemente baixos e estão dentro da faixa de incertezas tipicamente encontradas em aterramentos elétricos.

As principais propostas de continuidade deste trabalho decorrem da aplicação da metodologia proposta, dentre as quais se destacam:

- Implementação de um pacote computacional que forneça estimativas de impedância impulsiva vista de um dado ponto qualquer, considerando arranjos de aterramento

genéricos e diferentes tipos de sinais de corrente. Note-se que tal funcionalidade pode, inclusive, ser implementada em *softwares* já existentes – comerciais ou não – capazes de calcular a resistência de aterramento em baixas frequências de um arranjo de aterramento.

- Disseminação do uso da impedância impulsiva em estudos que envolvam a resposta transitória de aterramentos elétricos, em oposição à resistência de baixa frequência.
- Aplicação extensiva da metodologia proposta para estimativa da impedância de diversos arranjos de aterramento encontrados na prática, regulares ou não.

Referências Bibliográficas

- 1 VISACRO, S. A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 381-386, Jan. 2007.
- 2 ALÍPIO, R. S. **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência**. Belo Horizonte. 2008.
- 3 ALÍPIO, R. S. et al. Resposta impulsiva de eletrodos de aterramento. **SBA Controle & Automação**, v. 23, n. 4, p. 476-488, 2012.
- 4 VISACRO FILHO, S. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber, 2005.
- 5 VISACRO, S.; ALÍPIO, R. Frequency dependence of soil parameters: experimental results, predicting formula and influence on the lightning response of grounding electrodes. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 27, n. 2, p. 927-935, Apr. 2012.
- 6 AMETANI, A.; KAWAMURA, T. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 867-875, Apr. 2005.
- 7 TAKAMI, J.; OKABE, S.; ZAIMA, E. Study of lightning surge overvoltages at substations due to direct lightning strokes to phase conductors. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 25, n. 1, p. 425-433, Jan. 2010.
- 8 ALÍPIO, R.; BORGES, F. M. S. Multiport wideband modeling of large substation grounding grids for transient analysis. **Proc. 10th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL 2017)**, Kraby-Thailand, p. 313-317, 2017.
- 9 VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. Lightning Performance of Transmission Lines: Requirements of Tower-Footing Electrodes Consisting of Long Counterpoise Wires. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 31, n. 4, p. 1524-1532, Aug. 2016.
- 10 VISACRO FILHO, S. **Aterramentos Elétricos**. São Paulo: Artliber, 2002.
- 11 VISACRO, S. et al. The response of grounding electrodes to lightning currents: the effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 53, n. 2, p. 401-406, May 2011.
- 12 ALÍPIO, R.; VISACRO, S. Modeling the frequency dependency of electrical parameters of soil. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 56, n. 5, p. 1163-1171, Oct. 2014.

- 13 ALIPIO, R.; VISACRO, S. Frequency dependence of soil parameters: effect on the lightning response of grounding electrodes. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 55, n. 1, p. 132-139, Feb. 2013.
- 14 ALIPIO, R.; VISACRO, S. Impulse efficienc of grounding electrodes: effect of frequency-dependent soil parameters. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 29, n. 2, p. 716-723, Apr. 2014.
- 15 VISACRO, S. et al. Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 57, n. 1, p. 121-127, Feb. 2015.
- 16 ZENG, R. et al. Lightning impulse performances of grounding grids for substations considering soil ionization. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 23, n. 2, p. 667-675, Apr. 2008.
- 17 GRCEV, L. Impulse Efficienc of Ground Electrodes. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 24, n. 1, p. 441-451, 2009.
- 18 SOARES JR., A. **Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas**. Belo Horizonte. 1996.
- 19 DAWALIBI, L.; GRCEV, L. An electromagnetic model for transients in grounding systems. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 5, n. 4, p. 1773-1781, Oct. 1990.
- 20 GUPTA, B. R.; THAPAR, B. Impulse impedance of grounding systems. **Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meeting**, p. 563-569, 1978.
- 21 GUPTAR, B. R.; THAPAR, B. Impulse impedance of grounding grids. **IEEE Trans. Power Apparatus and Systems**, v. 99, n. 6, p. 2357-2362, Nov./Dez. 1980.
- 22 GRCEV, L. Ligthning Surge Efficiency of Grounding Grids. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 26, n. 3, p. 223-237, Jul. 2011.
- 23 BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; H., K. Parameters of lightning flashes. **Electra**, n. 80, p. 223-237, 1975.
- 24 VISACRO, S. et al. Statistical analysis of lighthning current parameters at Morro do Cachimbo station. **Journal on Geophysical Research**, v. 109, n. D01105, p. 1-11, 2004.
- 25 VISACRO, S. et al. Updated statistics of lightning currents measured at Morro do Cachimbo Station. **Atmospheric Research**, v. 117, p. 55-63, 2012.
- 26 FILHO, V. S. Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performane of Lines. **Journal of Lightning Research**, 2007.
- 27 VISACRO, S. A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. L07112, Apr. 2004.

- 28 VISACRO, S.; CONTI, A. D. Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms. **IEEE Trans. Electromagn. Compat.**, v. 49, n. 2, p. 448-451, May 2007.
- 29 ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. "Lightning parameters for engineering application". **Electra**, v. 69, p. 65-102, 1980.
- 30 VISACRO, S.; SOARES JR., A. HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 1026-1208, Apr. 2005.
- 31 MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- 32 WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Cristiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995.