



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

TESE DE DOUTORADO

MARCONNI FREITAS BARROSO RIBEIRO GONÇALVES

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO
SUBMETIDOS A IMPULSOS DE CORRENTE ELÉTRICA**

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Junho de 2019

**METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO
SUBMETIDOS A IMPULSOS DE CORRENTE ELÉTRICA**

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Marconni Freitas Barroso Ribeiro Gonçalves, M. Sc.

Orientando

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Junho de 2019

G635m Gonçalves, Marconni Freitas Barroso Ribeiro.
Metodologia de avaliação de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica / Marconni Freitas Barroso Ribeiro Gonçalves. – Campina Grande, 2019.
102 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa".
Referências.

1. Impulsos de Corrente. 2. Sistema de Aterramento. 3. Ensaios em Campo. 4. Simulação Computacional. 5. Procedimento Metodológico.
I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.316.9(043)

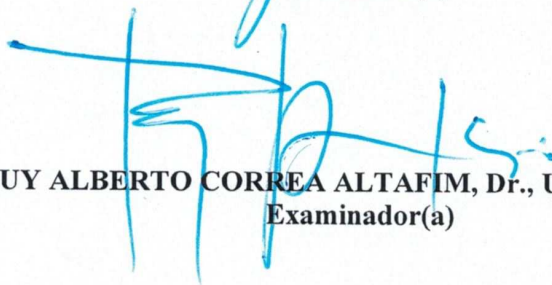
"METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO SUBMETIDOS
A IMPULSOS DE CORRENTE ELÉTRICA"

MARCONNI FREITAS BARROSO RIBEIRO GONÇALVES

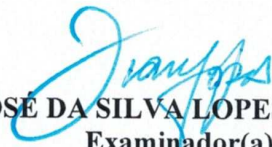
TESE APROVADA EM 22/04/2019



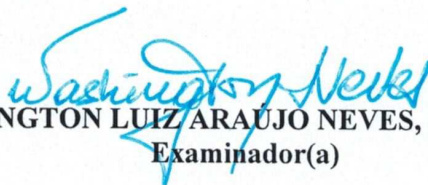
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



RUY ALBERTO CORREA ALTAFIM, Dr., USP-São Carlos
Examinador(a)



IVAN JOSÉ DA SILVA LOPES, Ph.D., UFMG
Examinador(a)



WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, Ph.D., UFCG
Examinador(a)



RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*Dedico este trabalho ao meu pai,
Demosthenes Filho, à minha mãe, Eleonora, e
à minha esposa, Camila.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar forças, sabedoria e ajuda, sobretudo, nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço ao meu pai e mestre por estar sempre presente em minha vida, guiando-me e auxiliando-me com sua grande sabedoria. Agradeço, também, à minha querida mãe por me amparar nos momentos de fraqueza e por me ensinar o verdadeiro valor da família.

Agradeço à minha esposa, Camila, pelas horas empregadas comigo para o desenvolvimento deste trabalho, também por se mostrar uma grande pessoa e excelente companheira, sempre comigo mesmo nos momentos de dificuldade.

Agradeço à minha irmã, Lia, e ao seu marido, Dante, por se fazerem pessoas presentes e generosas.

Agradeço a todos os meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, aconselhando-me para o bem, em especial minha tia Maria Augusta (*In Memoriam*) que não me deixou fraquejar.

Agradeço ao professor Edson Guedes pela orientação, compreensão, compromisso, paciência e exemplo, nos quais eu me inspiro.

Agradeço a todos os amigos da vida e aos colegas, técnicos e funcionários do Laboratório de Alta Tensão (LAT), em especial João Marcelo e Arthur Francisco por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores do Laboratório de Alta Tensão.

Agradeço à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (COPELE) e a todo o Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFCG, ao CNPq e à Eletrobrás Distribuição Piauí (EDPI).

Agradeço à Light Energia S.A pelo apoio financeiro e tecnológico por meio do P&D ANEEL 13/18 intitulado “Monitoramento *in loco* da resistência e impedância do aterramento elétrico de subestações de alta tensão energizadas” em parceira com a UFCG e a Fundação Parque Tecnológico da Paraíba (PaqTcPB). Agradeço ao engenheiro e gerente do P&D Rômulo Teixeira pela valorosa contribuição quanto a facilidade de oferta de dados técnicos fundamentais para esta tese.

“O homem insubstituível jamais poderá ser promovido”

(Autor desconhecido)

RESUMO

Neste trabalho, uma metodologia de avaliação de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente é proposta com base na amplitude e frequência do impulso, na configuração do sistema de aterramento e na resistividade do solo que envolve o sistema de aterramento. Ensaios experimentais em campo e simulações computacionais foram realizados em sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas com amplitudes entre 1 kA e 2,5 kA e tempos de frente de onda entre 10 μ s e 30 μ s. Os ensaios em campo foram realizados para duas configurações distintas de sistemas de aterramento e diferentes características elétricas do solo. Os resultados em campo foram utilizados para proposição de dois modelos que representassem o sistema de aterramento a partir da curva característica da relação entre tensão medida e corrente aplicada ($V \times I$). Em comparação a um modelo de referência da literatura, os modelos propostos apresentaram maior facilidade de cálculo dos seus parâmetros e implementação apenas com elementos lineares. Por se apresentarem como uma configuração simples e confiável, os modelos propostos podem ser acoplados, com maior facilidade e flexibilidade, a programas de análises de transitórios eletromagnéticos e em estudos de coordenação de isolamento. Os resultados obtidos dos ensaios em campo também foram utilizados para comprovação de simulações computacionais realizadas no *software* XGSLab®. A simulação do aterramento foi generalizada, considerando a variação dos parâmetros de entrada e os efeitos indutivos e capacitivos. Como prova de conceito, um procedimento metodológico foi proposto para avaliação de sistemas de aterramento capaz de identificar os efeitos provocados por fenômenos de alta intensidade e frequência elevada. O procedimento metodológico permite a representação do desempenho de sistemas de aterramento, pelo uso de modelos obtidos de ensaios, como também, de simulações computacionais, em programas tradicionais de análises de transitórios eletromagnéticos.

Palavras-chave: Impulsos de corrente, ensaios em campo, simulação computacional, sistemas de aterramento, modelos, procedimento metodológico.

ABSTRACT

In this work, a methodology of evaluation of grounding systems subjected to current impulses is proposed based on the amplitude and frequency of the impulse, the configuration of the grounding system and the resistivity of the soil that surrounds the grounding system. Experimental field tests and computational simulations were performed on grounding systems subjected to impulse currents with amplitudes between 1 kA and 2.5 kA and front time between 10 μ s and 30 μ s. Field tests were performed for two different configurations of grounding systems and different electrical characteristics of the soil. The results in the field were used to propose two models that represent the grounding system from the characteristic curve of the relation between measured voltage and applied current ($V \times I$). In comparison to a reference model in the literature, the proposed models presented greater ease of calculation of their parameters and implementation with only linear elements. By presenting themselves as a simple and reliable configuration, the proposed models can be coupled, with greater ease and flexibility, to programs of electromagnetic transient analysis and in insulation coordination studies. The results obtained from the field tests were also used to prove computational simulations performed in XGSLab® software. The simulation of the grounding system was generalized considering the variation of the input parameters and the inductive and capacitive effects. As proof of concept, a methodological procedure was proposed for the grounding systems evaluation capable of identifying the effects caused by high intensity and high frequency phenomena. The methodological procedure allows the representation of the performance of grounding systems, through the use of models obtained from tests, as well as of computational simulations, in traditional programs of electromagnetic transient analysis.

Key words: Current impulses, field tests, computational simulation, grounding systems, models, methodological procedure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação de uma descarga atmosférica.....	23
Figura 2.2 – Sinal representativo de uma descarga atmosférica.	23
Figura 2.3 – (a) Diagrama esquemático de um sistema de aterramento (b) componentes fundamentais de um aterramento. Componentes fundamentais de um aterramento.	25
Figura 2.4 – Componentes de corrente elétrica em um segmento de eletrodo.....	28
Figura 2.5 – Representação da zona de ionização do solo.....	30
Figura 2.6 – Gráfico da variação da impedância complexa em relação à frequência.....	32
Figura 2.7 – Representação da atenuação dos sinais impulsivos ao longo do eletrodo	34
Figura 4.1 – Representação da configuração de aterramento G ₁ : (a) vista lateral e (b) vista superior.....	52
Figura 4.2 – Representação da configuração de aterramento G ₂ : (a) vista lateral e (b) vista superior.....	53
Figura 4.3 – Circuito elétrico do gerador de impulsos de corrente	54
Figura 4.4 – Diagrama esquemático do arranjo experimental.....	55
Figura 5.1 – Curvas medidas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G ₁	60
Figura 5.2 – Curvas medidas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G ₂	60
Figura 5.3 – Curvas ajustadas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G ₁	62
Figura 5.4 – Curvas ajustadas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G ₂	62
Figura 5.5 – Curvas $V \times I$ da resposta do aterramento G ₁ para os carregamento de 20 kV e 25 kV	63
Figura 5.6 – Curvas $V \times I$ da resposta do aterramento G ₂ para os carregamento de 20 kV e 25 kV	64
Figura 5.7 – Curvas de corrente normalizadas da resposta do aterramento G ₁ para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.....	65
Figura 5.8 – Curvas de tensão normalizadas da resposta do aterramento G ₁ para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.....	66
Figura 5.9 – Curvas de corrente normalizadas da resposta do aterramento G ₂ para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.....	67
Figura 5.10 – Curvas de tensão normalizadas da resposta do aterramento G ₂ para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.....	67
Figura 5.11 – Circuito proposto para os modelos elétricos: (a) capacitivo e (b) indutivo.....	68
Figura 5.12 – Circuito de teste experimental e modelo em escala usado por Altafim <i>et al.</i> (2016).....	71
Figura 5.13 – Representação esquemática do circuito proposto por Altafim <i>et al.</i> (2016).....	72
Figura 5.14 – Tensão simulada aplicando os métodos para a configuração de aterramento G ₁	74
Figura 5.15 – Coeficiente R^2 ao longo do tempo para as simulações da configuração de aterramento G ₁ . ..	74
Figura 5.16 – RMSE determinado para a resposta simulada da configuração de aterramento G ₁	75
Figura 5.17 – Tensão simulada aplicando os métodos para a configuração de aterramento G ₂	77
Figura 5.18 – Coeficiente R^2 ao longo do tempo para as simulações da configuração de aterramento G ₂ ..	77

Figura 5.19 – RMSE determinado para a resposta simulada da configuração de aterramento G_2	78
Figura 5.20 – Tensão simulada aplicando os métodos para a configuração de aterramento de Altafim <i>et al.</i> (2016).	80
Figura 5.21 – Coeficiente R^2 ao longo do tempo para a configuração de aterramento de Altafim <i>et al.</i> (2016).	80
Figura 5.22 – RMSE determinado para a configuração de aterramento de Altafim <i>et al.</i> (2016).	81
Figura 5.23 – Representação geométrica da configuração de aterramento G_1 no XGSLab®.	82
Figura 5.24 – Gráfico das curvas de tensão resultante para a simulação e os ensaios experimentais considerando valor otimizado da resistividade.	83
Figura 5.25 – Representação geométrica da configuração de aterramento G_2 no XGSLab®.....	84
Figura 5.26 – Gráfico das curvas de tensão resultante para a simulação e os ensaios experimentais considerando valor otimizado da resistividade.	85
Figura 5.27 – Fluxograma geral de análises sistemáticas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Quadro sinóptico com a síntese da revisão bibliográfica e do presente trabalho	48
Tabela 4.1 – Caracterização da configuração de aterramento G_1	52
Tabela 4.2 – Caracterização da configuração de aterramento G_2	52
Tabela 5.1 – Parâmetros de impulso calculados para a configuração de aterramento G_1	61
Tabela 5.2 – Parâmetros de impulso calculados para a configuração de aterramento G_2	61
Tabela 5.3 – Valores dos elementos do circuito calculados para a configuração de aterramento G_1	73
Tabela 5.4 – Valores dos elementos do circuito calculados usando a metodologia de Altafim <i>et al.</i> (2016)	73
Tabela 5.5 – Métricas de erro obtidas para o Caso 1.....	75
Tabela 5.6 – Valores dos elementos do circuito calculados para a configuração de aterramento G_2	76
Tabela 5.7 – Valores dos elementos do circuito calculados usando a metodologia de Altafim <i>et al.</i> (2016)	76
Tabela 5.8 – Métricas de erro obtidas para o Caso 2.....	78
Tabela 5.9 – Valores dos elementos do circuito calculados para a configuração do sistema de aterramento de Altafim <i>et al.</i> (2016) usando o circuito indutivo proposto.....	79
Tabela 5.10 – Valores dos elementos do circuito calculados usando a metodologia de Altafim <i>et al.</i> (2016)	79
Tabela 5.11 – Métricas de erro obtidas para o Caso 3.....	81
Tabela 6.1 – Lista de publicações.....	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

BP – Bobina de Pearson.

CIGRÉ – *International Council on Large Electric Systems.*

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

DFDT – Diferenças Finitas no Domínio do Tempo.

ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica.

FEM – *Finite Element Method.*

IEC – *International Electrotechnical Commission.*

IEEE – *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

LAT – Laboratório de Alta Tensão.

MEF – Método dos Elementos Finitos.

MoM – Método dos Momentos.

NBR – Norma Brasileira de Regulamentação.

PML – *Perfectly Matched Layers.*

RMSE – *Root-Mean-Square Error.*

SEP – Sistema Elétrico de Potência.

SG – Espinterômetro do Gerador de Impulso de Corrente.

SI – Sistema Internacional de Medidas.

TLM – *Transmission Line Modeling.*

UFMG – Universidade Federal de Campina Grande.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Contextualização	16
1.2. Motivação	17
1.3. Objetivos	20
1.3.1. Objetivo geral.....	20
1.3.2. Objetivos específicos	20
1.4. Contribuições	20
1.5. Organização do trabalho	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1. Descargas atmosféricas	22
2.1.1. Sinais representativos de descargas atmosféricas	23
2.1.2. Efeitos das descargas atmosféricas em sistemas de potência	24
2.2. Sistemas de aterramento	25
2.2.1. Considerações iniciais	25
2.2.2. Características elétricas do solo.....	26
2.2.3. Comportamento de aterramentos frente a correntes impulsivas	27
2.2.4. Ionização do solo	29
2.2.5. Grandezas para avaliação de sistemas de aterramento	31
2.3. Considerações finais	35
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	36
3.1. Sistemas de aterramento sob impulsos de corrente	36
3.2. Métodos de modelagem de sistemas de aterramento	40
3.3. Avaliação computacional de aterramentos sob correntes impulsivas	42
3.4. Contribuições do trabalho	47
3.5. Considerações Finais	48
4. MATERIAL E MÉTODOS	50
4.1. Considerações iniciais	50
4.2. Material	51
4.2.1. Caracterização dos sistemas de aterramento G_1	51
4.2.2. Caracterização dos sistemas de aterramento G_2	52

4.3. Métodos.....	53
4.3.1. Etapa 1.....	53
4.3.2. Etapa 2.....	55
4.3.3. Etapa 3.....	55
4.3.4. Etapa 4.....	56
4.3.5. Etapa 5.....	57
4.3.6. Etapa 6.....	57
4.4. Considerações finais.....	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1. Etapa 1.....	59
5.2. Etapa 2.....	60
5.3. Etapa 3.....	63
5.3.1. Identificação dos efeitos indutivos ou capacitivos	63
5.3.2. Identificação dos efeitos ionizantes	64
5.4. Etapa 4.....	68
5.4.1. Modelos propostos.....	68
5.4.2. Análise da resposta dos modelos propostos	71
5.5. Etapa 5.....	82
5.5.1. Simulação do Aterramento G_1	82
5.5.2. Simulação do Aterramento G_2	84
5.5.3. Considerações sobre as Simulações	86
5.6. Etapa 6.....	86
5.7. Considerações finais.....	89
6. CONCLUSÃO.....	92
6.1. Trabalhos Futuros.....	93
6.2. Publicações	93
REFERÊNCIAS.....	95

INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é composto pelas instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O objetivo básico do SEP é atender a todas as cargas existentes em uma dada área de serviço, sendo projetado e operado de forma a cumprir requisitos básicos de qualidade e confiabilidade. Para tanto, no SEP são adotadas medidas protetivas visando a segurança de pessoas e equipamentos. Dentre essas medidas, tem-se o uso de sistemas de aterramento que, por sua vez, são projetados essencialmente para escoar correntes de defeito (curtos-circuitos ou descargas elétricas) para a terra, com a finalidade de manter os potenciais no solo em níveis seguros tanto às pessoas quanto ao próprio SEP.

Assim, com o objetivo de garantir que o solo e as instalações apresentem potenciais elétricos seguros, a análise e avaliação de sistemas de aterramento frente a defeitos é fundamental tanto para as companhias de energia elétrica, as quais desejam prover um sistema confiável e de qualidade, quanto para a segurança de pessoas e animais. Contudo, o desempenho de um sistema de aterramento em baixas frequências (50 ou 60 Hz) é diferente de quando ele está submetido aos impulsos atmosféricos e de manobra.

As altas frequências relacionadas aos transitórios impulsivos têm como origem as descargas atmosféricas e as de manobras (provenientes de chaveamentos no sistema elétrico). Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), as descargas atmosféricas são responsáveis por um grande número de desligamentos na transmissão (cerca de 70%) e distribuição (cerca de 40%), além da avaria de um número considerável de transformadores ligados à rede elétrica (cerca de 40%). Com relação às descargas atmosféricas, estas são caracterizadas por possuírem altas intensidades de corrente elétrica, na ordem de quiloampères, e curta duração, na ordem de microssegundos (UMAN, 1987).

Apesar de a incidência das descargas elétricas no sistema de potência ser frequente, em grande parte dos casos práticos de projetos de aterramento, os efeitos das descargas não são adequadamente analisados ou estudados.

Há, aproximadamente, 70 anos, Rudenberg, (1945) relatou sua preocupação com avaliação de projetos e com avaliação de um sistema de aterramento pelo uso de uma simplificação não conservativa, o parâmetro da impedância de aterramento que apresenta valor maior é aproximado para o parâmetro resistência de aterramento. A aproximação pode ser considerada consistente apenas para os sinais em baixas frequências, pois à medida que a frequência do sinal aumenta, os efeitos indutivos ou capacitivos começam a ser mais perceptíveis quando se avalia o desempenho do aterramento com mais cuidado.

As preocupações de Rudenberg suscitaram muitas pesquisas sobre os parâmetros associados à impedância de aterramento, entre elas é possível citar os trabalhos de Dvegan e Whitehead (1973), Sekioka *et al.* (1998), Portela (1999), Haddad *et al.* (2010), Grcev (2011), Visacro e Alípio (2013), Mokhtari, Abdul-Malek e Salam (2015), Altafim *et al.* (2016), Kherif *et al.* (2018). Em resumo, a literatura relata que para se obter uma resposta do aterramento com maior confiabilidade é desejável considerar os efeitos provocados pelas altas frequências e altas intensidades da corrente impulsiva.

1.2. MOTIVAÇÃO

No setor elétrico, a ocorrência das descargas atmosféricas pode gerar danos permanentes aos equipamentos do sistema e desligamentos das linhas de transmissão e distribuição, devido às sobretensões provocadas pelas correntes impulsivas, podendo gerar descargas entre as torres de transmissão e as linhas elétricas (*backflashover*) e diferenças de potencial em sistemas de aterramento de subestações. Segundo Rakov (2003), as falhas decorrentes de descargas atmosféricas são responsáveis por um terço das causas de interrupções no fornecimento de energia elétrica no mundo.

Portanto, devido aos efeitos das descargas atmosféricas no sistema elétrico e à incerteza propiciada por sua aleatoriedade, medidas preventivas devem ser adotadas com o objetivo de evitar ou minimizar possíveis danos. Uma dessas medidas é o uso de sistemas de aterramento eficientes, capazes de fornecer um caminho de baixa impedância às correntes advindas da descarga para a terra, promovendo, assim, maior segurança às pessoas e instalações.

Assim, entende-se que um aterramento adequado é fundamental para que o sistema elétrico seja minimamente afetado pelas descargas atmosféricas, assegurando a continuidade do serviço, o desempenho eficiente dos sistemas de proteção (relés, transformadores de corrente e transformadores de potencial) e mantendo os potenciais dentro de limites de segurança de pessoas e equipamentos estabelecidos em norma.

Com o intuito de garantir o nível de segurança exigido pelo sistema elétrico e pelas normas, diversos estudos vêm sendo realizados de modo a avaliar o desempenho dos sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente, dentre eles se destacam os desenvolvidos por Sunde (1940), Dvegan e Whitehead (1973), Sekioka *et al.* (1998), Haddad *et al.* (2010), Grcev (2011), Altafim *et al.* (2016) e Caetano *et al.* (2018). Alguns trabalhos utilizam geradores de impulso de corrente, que simulam uma descarga atmosférica em sistemas de aterramento e fazem as análises do fenômeno em frequência elevada por meio de avaliações experimentais, enquanto outros utilizam simulação computacional e modelagem para avaliar os efeitos provocados pela passagem de corrente elétrica no solo.

A experimentação em campo de malhas de aterramento utilizando gerador de impulso de corrente analisa o desempenho do solo com base no fenômeno físico, próximo ao que se tem na natureza. Dessa forma, a avaliação do desempenho do aterramento se torna mais próxima do real. Entretanto, as pesquisas que envolvem avaliações experimentais estão limitadas pelos altos custos (gerador de impulso, espaço físico, arranjos experimentais etc.). Alguns trabalhos tentam superar a limitação do espaço físico por meio da construção de modelos reduzidos (GERI *et al.*, 1992; ALTAFIM *et al.*, 2016; PAULINO *et al.*, 2017; CAETANO *et al.*, 2018). Contudo, o uso de modelos reduzidos não garante a reprodução das condições reais dos sistemas de aterramento, apresentando incertezas relacionadas, principalmente, às características elétricas do solo, do comprimento efetivo e da propagação e do tempo de trânsito das ondas eletromagnéticas no aterramento. Em adição, os estudos que envolvem avaliações experimentais e que consideraram os efeitos da ionização e do espectro de frequência do transitório de corrente, realizaram experimentos em ambiente controlado de laboratório ou não avaliaram geometrias complexas de um aterramento (MENTER e GRCEV, 1994; VISACRO e ALÍPIO, 2013; MOKHTARI, ABDUL-MALEK e SALAM, 2015; KHERIF *et al.*, 2018).

Por outro lado, a simulação computacional utiliza modelos que representam o fenômeno e, a partir da solução de equações que delimitam o problema, possibilita a

avaliação dos efeitos pertinentes ao que se é estudado. No caso de modelos que representem um sistema de aterramento quando submetido a impulsos de corrente, eles são úteis para avaliar o comportamento dinâmico do aterramento. Além disso, as simulações podem fornecer embasamento para o projeto e a construção de sistemas de aterramento mais confiáveis. Para tanto, o modelo deve ser bem delimitado e a física do fenômeno deve ser bem compreendida para que se possa obter equações que representem o problema.

Tanto a experimentação em campo quanto as simulações computacionais têm um objetivo comum, sendo a compreensão e a representação dos efeitos de uma descarga atmosférica, aparecerão nos sistemas de aterramento e no solo. Contudo, nos estudos de aterramentos mais profundos, a simultaneidade da ionização do solo e dos efeitos reativos (indutivos ou capacitivos) deve ser considerada.

Na literatura, pesquisadores que trabalham com aterramento e impulsos de corrente desconsideram os efeitos ionizantes do meio quando se tem sistemas de aterramento complexos ou aterramento de torres de linhas de transmissão (GRCEV, 2011; OTERO, CIDRAS e ALAMO, 1999; e VISACRO e ALÍPIO, 2012). Tal fato gera dúvidas sobre uma representação mais realista do problema, necessitando-se fazer uma avaliação da ionização e dos efeitos reativos ao mesmo tempo e se, de fato, um ou outro é predominante quando se altera a geometria do sistema de aterramento.

Diante do exposto, justifica-se o estudo de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica visando a sua representação em modelos e em ambiente computacional, capazes de representar os efeitos transitórios com relação à intensidade e frequência do impulso de corrente e às características dos sistemas de aterramento.

A principal motivação deste trabalho é analisar sistemas de aterramento de configurações distintas e, com isso, propor uma metodologia consistente de avaliação de sistemas de aterramento a partir dos parâmetros do impulso de corrente injetado no aterramento e do impulso de tensão desenvolvido no aterramento e, também, das próprias configurações e características das malhas. A sua concepção se baseia na análise da resposta da malha de aterramento a partir de experimentações em campo e simulações computacionais.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo desta tese é propor uma metodologia de avaliação de sistemas de aterramento submetido a impulsos de corrente com base na amplitude e frequência do impulso, na configuração do sistema de aterramento e na resistividade do solo que envolve o sistema de aterramento.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os efeitos provocados pela injeção de impulsos de corrente em sistemas de aterramento;
- Avaliar configurações distintas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente;
- Propor modelos de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas centrados nos efeitos transitórios;
- Propor, baseado na metodologia desenvolvida, um fluxograma metodológico geral para desenvolvimento e adequação de projetos de sistemas de aterramento centrados nos efeitos transitórios.

1.4. CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições deste trabalho são:

- Identificação dos efeitos transitórios em sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente;
- Proposição de modelos de aterramento baseados em circuitos elétricos contemplando os efeitos indutivos ou capacitivos;
- Simulação dos efeitos indutivos e capacitivos em ambiente computacional;
- Proposição de uma metodologia de avaliação da resposta de uma malha de aterramento, capaz de detectar os efeitos transitórios.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente texto está organizado em cinco capítulos, incluindo este capítulo introdutório.

No Capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica básica. Dentre os assuntos abordados, são discutidos os principais conceitos no que se refere a sistemas de aterramento e a descargas atmosféricas.

No Capítulo 3, é apresentada uma evolução histórica da pesquisa da resposta de sistemas de aterramento elétrico à incidência de descargas atmosféricas, com ênfase nos aspectos de modelagem e simulação computacional. No final do capítulo, é destacado o diferencial desta pesquisa com relação aos estudos que constam na literatura.

No Capítulo 4, são descritos material e métodos empregados nas medições em campo e nas simulações computacionais, com o objetivo de avaliar o desempenho de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados referentes aos ensaios experimentais em campo e às simulações computacionais, seguindo uma sequência metodológica de avaliação de sistemas de aterramento.

No Capítulo 6, são apresentadas as conclusões da pesquisa e as propostas para trabalhos futuros. Além disso, é apresentada uma lista dos trabalhos publicados e submetidos referentes ao tema de aterramentos elétricos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica sobre descargas atmosféricas e sistemas de aterramento é realizada neste capítulo. Na seção sobre sistemas de aterramento, são enfatizadas as definições das principais grandezas utilizadas na avaliação do desempenho de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica (sinais com tempos de ocorrência da ordem de microssegundos).

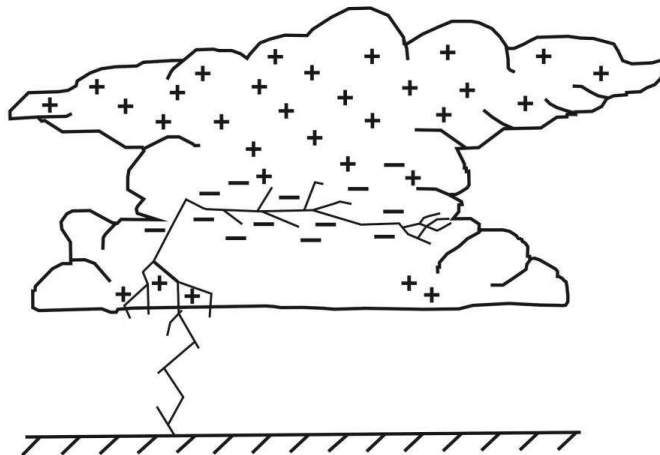
2.1. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

As descargas atmosféricas são fenômenos naturais cuja ocorrência depende de fatores meteorológicos, tais como: temperatura, pressão e umidade. A descarga é decorrente do excesso de cargas elétricas em regiões da atmosfera eletricamente carregadas com polaridades diferentes, podendo ocorrer entre nuvens ou entre nuvem e terra, provocando o rompimento do dielétrico (RAKOV e UMAN, 2003).

O fenômeno consiste em um fluxo de corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso é normalmente de alguns quilômetros. O tempo de duração de um raio, descarga elétrica quando atinge o solo, é normalmente de dezenas de microssegundos e o seu valor de pico típico é em torno de 30 kA (UMAN, 1987).

Os tipos de descargas atmosféricas mais frequentes são os intra nuvem. Isso ocorre devido à diminuição da capacidade isolante do ar com a altura em função da diminuição da sua densidade e, também, porque em algumas regiões dentro da nuvem as cargas de polaridades opostas estão mais próximas que em outros tipos de descargas. Porém, as descargas entre nuvem e solo são as mais estudadas devido aos prejuízos que causam (UMAN, 1987). Uma descarga típica entre nuvem e solo é ilustrada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Representação de uma descarga atmosférica.

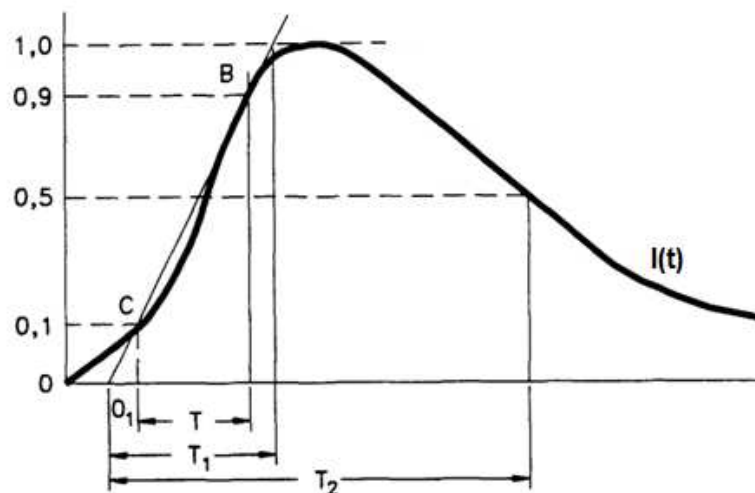


Fonte: Reproduzida de (RAKOV e UMAN, 2003).

2.1.1. SINAIS REPRESENTATIVOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Ao atingirem o solo, as descargas elétricas geram gradientes de potencial elétrico devido à sua propagação, oferecendo riscos a pessoas e animais que estão próximos ao ponto de descarga. Diante dessa situação, pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de se compreender as características elétricas de uma descarga (IEC 60-1, 1989). A partir de estudos foi definida a forma de onda típica de impulsos de corrente elétrica, como pode ser observada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Sinal representativo de uma descarga atmosférica.



Fonte: (IEC 60-1, 1989).

Em que:

- **$I(t)$** : Impulso de corrente elétrica representativa de uma descarga atmosférica;

- **O₁**: Origem virtual. É utilizado como a origem do sinal, com o objetivo de desconsiderar a presença de ruídos nos pontos iniciais da forma de onda;
- **T**: Intervalo de tempo entre os instantes nos quais o impulso está com 10% (ponto C) e 90% (ponto B) de sua amplitude máxima;
- **T₁ ou T_f**: Tempo de frente do sinal, $T_1 = 1,25 \times T$. Representa o intervalo de tempo entre a origem virtual e a amplitude máxima do impulso;
- **T₂ ou T_{mc}**: Tempo de meia cauda. É o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a cauda do impulso atinge 50% do seu valor de pico.

Alguns valores típicos de impulsos de corrente são: sinais 8/20 μ s (representativos de descargas atmosféricas); e sinais 4/10 μ s (representativos de impulsos rápidos). Então, o primeiro valor da forma de onda indica o tempo de frente do sinal (4 e 8 μ s) e o segundo valor o tempo de meia cauda (10 e 20 μ s).

2.1.2. EFEITOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Uma das causas de sobretensões em equipamentos de sistemas de potência são as descargas atmosféricas, devido à curta duração (da ordem de microssegundos) e amplitude do sinal incidente. A ocorrência desse fenômeno de natureza impulsiva nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica requer cuidado especial às companhias do setor elétrico, pois as descargas podem provocar danos aos equipamentos que estão ligados à rede, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia ou até mesmo causando sua interrupção.

No Brasil, é registrada uma elevada atividade atmosférica anual, devido à alta incidência de raios. Segundo relatório publicado no portal eletrônico do ELAT/INPE (Grupo de Eletricidade Atmosférica/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) há perdas financeiras anuais estimadas em R\$ 1 bilhão, ocasionadas por incêndios, avarias em equipamentos, desligamentos de sistemas de energia, dentre outras causas.

De modo a minimizar as perdas técnicas e financeiras provocadas por raios, diversas técnicas têm sido desenvolvidas, destacando-se entre elas o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento, para redução da impedância de aterramento, e o uso de para-raios. Tais técnicas podem ser aplicadas em áreas críticas, onde a incidência de descargas é maior, já que quando uma descarga é drenada para uma malha de aterramento, o sinal tende a percorrer a malha e, ao longo dela, dissipando-se no solo. Desta forma, os sinais

provenientes da descarga são atenuados a níveis seguros, para proteção de pessoas e equipamento.

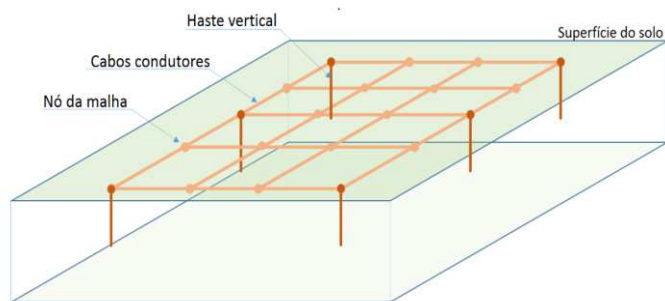
2.2. SISTEMAS DE ATERRAMENTO

2.2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Em qualquer edificação moderna, encontram-se as instalações elétricas que necessitam, de alguma forma, de um sistema de aterramento, seja para proteção em caso de eventual falha do sistema ou ainda proteção contra descargas atmosféricas.

O aterramento consiste, essencialmente, em uma conexão elétrica à terra, através de hastes de aterramento. O valor da resistência de aterramento é um dos parâmetros mais utilizados para representar a eficácia desta ligação, ou seja, quanto menor for a resistência, melhor será a resposta do aterramento quando solicitado (VISACRO, 2007). Na Figura 2.3 podem ser observados o diagrama esquemático de um sistema de aterramento e os seus componentes fundamentais de um aterramento.

Figura 2.3 – (a) Diagrama esquemático de um sistema de aterramento (b) componentes fundamentais de um aterramento.



(a)



(b)

Fonte: (BEZERRA, 2017).

Como pode ser observado na Figura 2.3, os três elementos fundamentais de um aterramento são: os eletrodos de aterramento constituídos, geralmente, de um corpo de aço revestido de cobre e que têm por finalidade dissipar a corrente elétrica no solo; as conexões elétricas, que ligam um ponto do sistema aos eletrodos; e ao solo que envolve os eletrodos.

Os três componentes fundamentais listados podem estar dispostos em diferentes configurações ou arranjos com a finalidade de facilitar o escoamento da corrente elétrica. Além disso, o material utilizado nas hastes e o solo em que se trabalha com o aterramento

tem influência na característica da corrente elétrica (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995).

Um sistema de aterramento deve ser projetado para garantir a segurança de pessoas (ou animais) bem como dos equipamentos e instalações conectados à rede. Além disso, são objetivos de um aterramento (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995; JOFFE e LOCK, 2010):

- Ser a referência comum em uma instalação, possibilitando a equalização de partes acidentalmente energizadas;
- Proporcionar um caminho de fácil escoamento de correntes de falta ou correntes impulsivas a terra;
- Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança de modo a não causar avarias nos seres vivos;
- Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas;
- Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Assim, é mediante o uso dos sistemas de aterramento que são escoadas correntes de defeito, como aquelas oriundas de descargas atmosféricas. Quando essas correntes atravessam o eletrodo de aterramento e propagam-se no solo são gerados gradientes de potencial que tendem a diminuir à medida que se afastam da haste que sofreu a descarga (MELIOPOULUS e MOHARAM, 1983; TAO *et al.*, 2008; ARAÚJO *et al.*, 2010; CASTRO, 2012; LIMA *et al.*, 2016).

Para o entendimento da distribuição de potenciais ao longo do solo e a resposta do sistema de aterramento aos impulsos de corrente, alguns conceitos são fundamentais, tais como a resistividade e a permissividade elétrica.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO

Como qualquer outro meio, o solo tem propriedades elétricas e magnéticas. Estas propriedades variam de acordo com a composição química, física e geométrica dos componentes do solo. Os parâmetros elétricos que caracterizam um sistema de aterramento são a resistividade, permissividade e a permeabilidade magnética do meio em que os eletrodos se encontram enterrados.

A resistividade elétrica (ou resistência elétrica específica) é uma característica específica de cada material que define o quanto ele se opõe à passagem de uma corrente

elétrica. De acordo com Chaker (1981), a resistividade do solo (ρ) é definida como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (em metros) preenchido com este solo. Na Equação (2.1) é mostrada a definição matemática para a resistividade e sua unidade de medida no Sistema Internacional de medidas (SI) é Ωm (ohm metro):

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}, \quad (2.1)$$

em que:

ρ : resistividade elétrica média do solo (Ωm);

R : resistência elétrica do solo (Ω);

l : representa a dimensão da aresta do cubo (1 m);

A : representa a área de uma face do cubo (1 m²).

Já a permissividade (ϵ), expressa em F/m (farad por metro), corresponde à habilidade de um material se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado. Assim como a resistividade, a permissividade varia para cada tipo de terreno, influenciando no efeito capacitivo dos eletrodos e na velocidade de propagação da corrente elétrica na terra. Logo, ela assume papel relevante quando existem impulsos de corrente, podendo alterar a impedância de aterramento do sistema (TELLÓ *et al.*, 2007).

Já a permeabilidade magnética é uma constante de proporcionalidade que depende do material de que é feito o meio e também do campo magnético existente. Para o caso de o meio ser o solo, a permeabilidade pode ser considerada igual a permeabilidade do vácuo, pois, em geral, no solo não deve haver a presença de materiais magnéticos ($\mu_{\text{solo}} = \mu_{\text{vácuo}} = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$) (PORTELA, 1999).

2.2.3. COMPORTAMENTO DE ATERRAMENTOS FRENTE A CORRENTES IMPULSIVAS

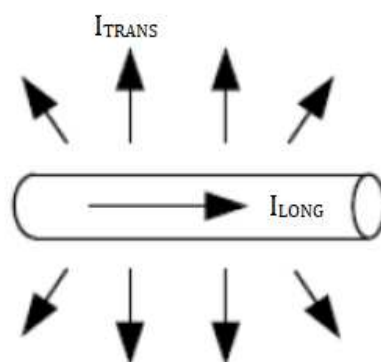
A impedância de aterramento é definida como a oposição oferecida pelo solo à injeção de uma corrente elétrica no mesmo, através dos eletrodos, e se expressa quantitativamente por meio da relação entre a tensão aplicada ao aterramento e a corrente resultante (TELLÓ *et al.*, 2007).

Para avaliação do desempenho do aterramento no contexto de um sistema elétrico, é necessário entender que a conexão à terra apresenta resistências, indutâncias e capacitâncias (além do efeito não linear provocado pelos campos gerados devido à passagem de corrente elétrica), com efeitos próprios e mútuos, constituindo em uma rede

de elementos básicos que afetam a capacidade de condução de corrente e distribuição de potencial no solo circunvizinho aos eletrodos (HADDAD e WARNE, 2004).

Quando são submetidos a correntes impulsivas, os eletrodos de aterramento podem ser decompostos em partes elementares que compreendem um pequeno trecho do eletrodo e o solo vizinho. Tal elemento é caracterizado pela presença de duas correntes fundamentais: uma parcela de corrente transversal, que deixa o eletrodo e é dissipada no solo, e uma parcela de corrente longitudinal, que é transferida ao elemento de eletrodo seguinte (VISACRO, 2007). A representação em termos de componentes de circuitos resultante desta caracterização é mostrada na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Componentes de corrente elétrica em um segmento de eletrodo.



Fonte: Reproduzida de (VISACRO, 2007).

- **Componente da corrente longitudinal:** formada pelas componentes de resistência e indutância. Ela é responsável pelas perdas internas no condutor e pela geração de campo magnético em volta dos caminhos de corrente. Essa componente é mostrada na Equação (2.2):

$$I_{long.} = I_R - jI_L, \quad (2.2)$$

em que:

$I_{long.}$: componente de corrente longitudinal;

I_R : componente de corrente resistiva;

I_L : componente de corrente indutiva.

- **Componente da corrente transversal:** formada pelas componentes de corrente de natureza condutiva e capacitiva. Ela é responsável pelo escoamento de corrente elétrica para o solo e pela geração de campo elétrico no solo. Essa componente é mostrada na Equação (2.3):

$$I_{trans.} = I_G + jI_C, \quad (2.3)$$

em que:

$I_{trans.}$: componente de corrente transversal;

I_G : componente de corrente condutiva;

I_C : componente de corrente capacitiva.

Os campos eletromagnéticos gerados devido às componentes transversal e longitudinal determinam o fluxo de correntes capacitivas e indutivas no solo. Portanto, a influência de indutâncias e capacitâncias no meio depende das características elétricas do solo e da frequência do sinal injetado (VISACRO, 2007). Para ocorrências de fenômenos lentos, quando a frequência do sinal tem valor reduzido, ou seja, no caso de ocorrências próximas às condições de regime (valores próximos à frequência industrial), o aterramento pode ser tratado apenas por uma resistência e não mais pela impedância. Isto ocorre porque, nesta condição, os efeitos reativos são bastante reduzidos, podendo ser desprezados.

Os efeitos de uma descarga atmosférica fazem com que a análise de um sistema de aterramento seja mais complexa, pois os efeitos indutivo e capacitivo do solo devem ser considerados. A análise do desempenho do aterramento deve levar em conta os acoplamentos existentes, sejam de natureza capacitiva, indutiva ou resistiva. Este tipo de análise dá origem a uma rede de elementos cuja solução no domínio da frequência corresponde à impedância do aterramento vista do ponto de injeção de corrente para cada frequência específica (PORTELA,1999).

Além disso, devem ser considerados os acoplamentos eletromagnéticos próprios e mútuos (capacitivo, condutivo e indutivo) entre os diversos elementos dos eletrodos de aterramento (GRCEV e TOSEVA, 2003) e, ainda, o efeito proveniente da passagem de correntes impulsivas de alta intensidade, que é o fenômeno de ionização do solo, abordado com mais detalhes na subseção seguinte.

2.2.4. IONIZAÇÃO DO SOLO

Na maior parte dos casos práticos, a resposta de um aterramento elétrico assume comportamento linear, apresentando relação de proporcionalidade constante entre correntes e tensões. Porém, para eletrodos concentrados e correntes intensas, a densidade de corrente nas extremidades do eletrodo pode alcançar valores elevados, devido a dissipação de corrente nesses pontos. Com isso, o campo elétrico gerado nesta

região pode exceder o limiar crítico. Então, quando estes limites são ultrapassados, inicia-se o processo de ionização do solo, com o estabelecimento de descargas elétricas neste meio.

De fato, um impulso de corrente, ao ser injetado no solo, gera campos elétricos. Quando o campo elétrico gerado supera o valor de campo elétrico crítico do solo é iniciado o processo de ionização do ar contido no solo (na vizinhança do eletrodo), alterando a impedância do aterramento e, conseqüentemente, proporcionando maior escoamento de correntes impulsivas (HADDAD e WARNE, 2004; VISACRO, 2007). Tal fenômeno está representado esquematicamente na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Representação da zona de ionização do solo.



Fonte: Reproduzida de (COELHO e ALMAGUER, 2014).

Quando um impulso de corrente é injetado no eletrodo de aterramento, a distribuição espacial do campo elétrico no solo ocorre de acordo com:

$$\vec{E} = \rho \vec{J}, \quad (2.4)$$

em que \vec{E} é o vetor de campo elétrico total; ρ indica a resistividade do solo; e \vec{J} é o vetor de densidade de corrente no ponto de injeção de corrente.

A maioria dos solos são compostos por partículas não condutoras, envoltas de água, com sais dissolvidos e espaços preenchidos com ar. A água e a quantidade de sais dissolvidos nela, determinam o valor da resistividade do solo. Como o tamanho das partículas não condutoras, em uma amostra do solo, varia bastante, o tamanho e a forma dos espaços preenchidos de ar também variam. Dessa forma, quando a intensidade de campo elétrico se torna suficiente para ionizar o ar, presente no solo, os espaços ocupados pelo ar ionizado se tornam um novo caminho para passagem de corrente (MOUSA, 1994).

Ou seja, quando o campo elétrico de qualquer porção do solo satisfizer a condição $E > E_C$, sendo E_C o campo elétrico crítico, o processo de ionização se inicia e ocorre uma redução substancial da resistividade na região ionizada (LIEW e DARVENIZA, 1974).

Em seguida, quando o impulso de corrente começa a diminuir, a intensidade do campo elétrico também diminui e a ionização começa a cessar. Esse processo dura até os valores estacionários da resistividade do solo serem restaurados. Além disso, quando o campo elétrico gerado não é maior que o campo elétrico crítico, dado pela condição $E < E_C$, não ocorre o processo de ionização do meio (LIEW e DARVENIZA, 1974).

Alguns estudos foram realizados acerca da influência da ionização do solo no desempenho dos sistemas de aterramento. Espel *et al.* (2004) consideram que a ionização do solo exerce grande influência sobre o desempenho de aterramentos submetidos a impulsos de corrente. Por outro lado, Pedrosa *et al.* (2011) e Alípio e Visacro (2013) consideram que o efeito da ionização é superestimado.

2.2.5. GRANDEZAS PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Para que se possa fazer um dimensionamento adequado da malha de aterramento, de forma a garantir que a mesma ofereça proteção necessária, é importante quantificar as diferenças entre o seu desempenho em baixa frequência e em frequência elevada (GRCEV, 2009).

Nesse sentido, o desempenho do sistema de aterramento em baixa frequência é utilizado como referência para análise do mesmo sistema submetido a correntes impulsivas (HADDAD *et al.*, 2010). A resistência em baixa frequência é uma grandeza representativa do desempenho de um sistema de aterramento submetido a sinais de frequências iguais, ou próximas, à frequência industrial (60 Hz) e corresponde à razão V/I , em que V e I são a tensão e a corrente aplicadas à malha de aterramento, respectivamente (GRCEV, 2009).

No caso de impulsos de corrente, as investigações experimentais têm revelado que a alta magnitude da corrente, bem como os mecanismos não lineares de condução do solo, tem influência no desempenho transitório do eletrodo. Os mecanismos não lineares de condução do solo são influenciados predominantemente por dois processos físicos a saber: o processo de ionização do solo e a propagação do impulso ao longo do eletrodo (GRCEV, 2009).

Dessa forma, para caracterizar o desempenho transitório de eletrodos de aterramento, são utilizadas diferentes aproximações e muitos parâmetros distintos foram

propostos. Segundo Grcev (2011) as principais grandezas representativas da resposta do aterramento ao impulso de corrente são: impedância transitória, impedância harmônica, impedância impulsiva, coeficiente impulsivo e comprimento efetivo do eletrodo.

a) Impedância transitória

No domínio do tempo, a relação entre a tensão ($v(t)$) e a corrente ($i(t)$) define a impedância transitória do aterramento ($z(t)$), ou seja, ela é dada pela razão entre a tensão e a corrente elétrica (ao longo do tempo) no ponto de injeção, como pode ser observado na Equação (2.5):

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)}. \quad (2.5)$$

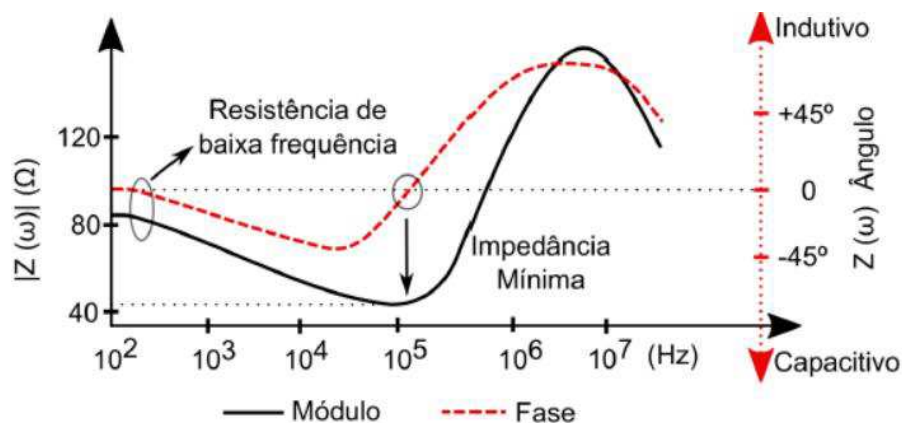
b) Impedância harmônica

No domínio da frequência, a relação entre o sinal de tensão ($V(j\omega)$) e de corrente ($I(j\omega)$) aplicados define a impedância harmônica ($Z(j\omega)$), ou complexa, do aterramento. A relação é mostrada na Equação (2.6):

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)}. \quad (2.6)$$

Com o intuito de observar o comportamento da impedância de aterramento com relação à variação da frequência, tem-se o resultado de simulação de um eletrodo horizontal de 50 m de comprimento (raio 0,7 cm e profundidade 50cm) inserido em um solo de resistividade 2500 Ωm e permissividade relativa 15 mostrado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Gráfico da variação da impedância complexa em relação à frequência.



Fonte: Reproduzida de (VISACRO, 2007).

Da Figura 2.6, pode-se inferir que para frequências mais baixas, menores que alguns kHz, o efeito reativo do aterramento pode ser desprezado e a impedância comporta-se aproximadamente como uma resistência. Já à medida que a frequência do sinal aumenta, os efeitos reativos no solo começam a se tornar expressivos, afetando tanto o módulo quanto o ângulo da impedância no ponto de injeção de corrente (VISACRO, 2007).

c) Impedância impulsiva

Quando se considera o aterramento submetido a correntes impulsivas associadas a descargas atmosféricas, é muito comum se fazer referência à impedância impulsiva do aterramento (Z_p). Enquanto a impedância harmônica descreve o desempenho do aterramento no domínio da frequência, a impedância impulsiva é uma grandeza escalar, conceituada no domínio do tempo, que relaciona o valor de pico da tensão aplicada (V_p) e o valor de pico de corrente elétrica (I_p) desenvolvidos no ponto de injeção, como pode ser observado na Equação (2.7) (GUPTA e THAPAR, 1980):

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}. \quad (2.7)$$

Meliopoulus e Moharam (1983) alertam para o fato que a definição de impedância impulsiva contém uma incerteza, já que os valores de pico de tensão e corrente elétrica não necessariamente ocorrem no mesmo tempo, em decorrência da defasagem entre estes sinais, causada pela influência das características capacitivas ou indutivas do solo.

d) Coeficiente impulsivo

O coeficiente impulsivo (A_{imp}) é definido como a relação entre a impedância impulsiva (Z_p) e a resistência de aterramento em baixa frequência (R_{LF}), como pode ser observado na Equação (2.8):

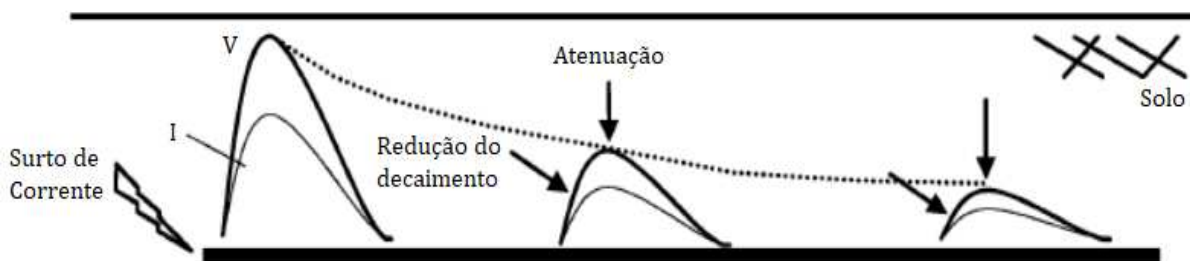
$$A_{imp} = \frac{Z_p}{R_{LF}}. \quad (2.8)$$

Ele denota o desempenho transitório do aterramento, ou seja, quanto menor for seu valor, mais satisfatório é o desempenho transitório do aterramento (PEDROSA *et al.*, 2011).

e) Comprimento efetivo do eletrodo

No momento em que ondas de tensão e corrente impulsivas são aplicadas no condutor longo enterrado no solo, as ondas eletromagnéticas correspondentes se propagam ao longo deste. Ao se propagarem, as ondas de tensão e corrente perdem energia, o que promove atenuação da sua amplitude e distorções naturais, devido às propriedades elétricas do solo. Conseqüentemente, a corrente drenada para o solo ao longo do eletrodo apresenta distribuição não uniforme e, assim, a densidade linear de corrente em cada ponto diminui ao longo da extensão do eletrodo, como ilustrado na Figura 2.7. O conceito de comprimento efetivo (L_{ef}) do eletrodo (ou raio efetivo para malhas), introduzido por Gupta e Thapar (1980), é derivado de tais considerações.

Figura 2.7 – Representação da atenuação dos sinais impulsivos ao longo do eletrodo.



Fonte: Reproduzida de (VISACRO, 2007).

O comprimento efetivo é o máximo comprimento do eletrodo de aterramento para o qual o seu aumento não implica em redução significativa da impedância de aterramento. Em outras palavras, desde que um eletrodo seja projetado em seu comprimento efetivo, um aumento adicional em seu comprimento não contribuirá para redução significativa da impedância impulsiva de aterramento (GUPTA e THAPAR, 1980).

Este comportamento ocorre, pois, uma vez que os condutores das malhas de aterramento são constituídos de cobre nu, à medida em que as ondas de tensão e corrente propagam nestes condutores, há uma redução progressiva das amplitudes destas ondas. Essa atenuação ocorre de maneira distinta para as diferentes frequências que compõem as ondas, reduzindo, de forma mais intensa, a amplitude das frequências mais elevadas. Isso ocorre de tal modo que a partir de uma determinada distância, praticamente toda a energia associada às altas frequências já foi dissipada (LIMA *et al.*, 2016). Esta distância é denominada comprimento efetivo, ou seja, o aumento do comprimento dos eletrodos de aterramento além do comprimento efetivo, apesar de diminuir o valor da resistência de baixa frequência, não é efetivo quando se trata de descargas atmosféricas.

Segundo Visacro (2007), o L_{ef} diminui com a redução da resistividade do solo e com o aumento da frequência. No domínio da frequência, o valor do L_{ef} é definido claramente para cada frequência, o que não ocorre para correntes impulsivas, as quais envolvem amplo espectro de componentes. Neste caso, o L_{ef} é usualmente assumido como o comprimento de eletrodo que corresponde à mínima impedância impulsiva de aterramento.

O comportamento explicado acima é ainda mais preocupante para o caso de sistemas de aterramento de linhas de transmissão, pois, em grande parte das situações, a impedância do aterramento é estimada a partir da resistência em baixa frequência. Sabendo-se que o acréscimo no comprimento do condutor contribui para reduzir a resistência do aterramento elétrico medida em baixa frequência, isto pode levar a erro na análise da qualidade do aterramento. Por esta razão, algumas vezes o valor reduzido de resistência de aterramento não garante o valor proporcional para a impedância correspondente.

2.3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, os conceitos fundamentais para o entendimento do tema do trabalho foram tratados. Apresentou-se a função e a classificação dos sistemas de aterramento. Apresentou-se o conceito do fenômeno de ionização do solo. Por fim, as grandezas de interesse ao estudo de aterramentos submetidos a impulsos de corrente foram definidas.

No próximo capítulo, os trabalhos da revisão bibliográfica que compõem o estado da arte serão apresentados. São descritos trabalhos principalmente sobre sistemas de aterramento e simulações computacionais. Ao término, são tecidas considerações acerca do estado da arte em relação às contribuições do presente trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, a revisão bibliográfica do tema em estudo é apresentada. Para tanto, discorre-se sobre os principais trabalhos relativos ao desenvolvimento desta pesquisa. Para se obter melhor organização textual, o capítulo foi dividido em 4 seções. Na Seção 3.1, são apresentados os principais trabalhos referentes a sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas. Na Seção 3.2, é realizada uma introdução sobre os principais métodos de modelagem. Na Seção 3.3, são apresentados os principais trabalhos desenvolvidos no âmbito de simulações computacionais referentes a sistemas de aterramento submetidos a corrente impulsivas. Na Seção 3.4, são apresentadas as contribuições da pesquisa.

3.1. SISTEMAS DE ATERRAMENTO SOB IMPULSOS DE CORRENTE

Bellaschi (1935) foi um dos pioneiros em estudos de descargas atmosféricas e realizou um trabalho mostrando os efeitos e magnitudes de correntes provenientes de descargas, complementado por experiências realizadas em laboratório. No trabalho, são simuladas correntes entre 150 e 200 A com tempos de duração entre 40 e 100 μ s. A partir da injeção de correntes simuladas em cabos foi mostrado o efeito destrutivo neles devido à repetição dos ensaios.

Ainda na primeira metade do século passado, outros trabalhos tiveram contribuições significativas para pesquisas sobre aterramento, dentre os quais podem ser citados: Dwight (1936) e Sunde (1940). Dwight (1936) apresentou expressões para o cálculo da resistência de terra em baixas frequências, considerando diferentes arranjos de eletrodos. Muito embora o trabalho tivesse foco na frequência industrial, influenciou diversas pesquisas abordando o desempenho da malha de aterramento submetida a impulsos de corrente, a partir de uma adaptação do desempenho em baixa frequência. Sunde (1940) modelou o desempenho dinâmico do aterramento a partir da teoria de ondas viajantes e observou os efeitos da ionização do solo no aterramento.

Dvegan e Whitehead (1973) se utilizaram de formulações matemáticas para mostrar que a impedância transitória de um sistema de aterramento tem resposta

distinta, ao longo do tempo, variando de acordo com a resistividade elétrica do solo e a dimensão dos eletrodos. No trabalho também são mostradas diversas curvas de impedância transitória para solos com diferentes resistividades. Foi observado que, para solos com resistividade elevada (valores maiores que $1000 \Omega\text{m}$), a impedância transitória tende a se elevar ao longo do tempo. Já para solos com resistividades mais baixas (valores menores que $700 \Omega\text{m}$) a impedância transitória tende a decair ao longo do tempo.

A partir de equações empíricas e realizações experimentais, Gupta e Thapar (1980) apresentaram um método de determinação da indutância em um sistema de aterramento. Em seu trabalho, são introduzidos alguns parâmetros, como o comprimento efetivo do eletrodo e o coeficiente impulsivo. Pela realização de ensaios experimentais, foi constatada que a impedância impulsiva para correntes injetadas nas extremidades da malha de aterramento é maior que aquela obtida quando a corrente é injetada no centro da mesma malha. Foi observado, também, que para malhas grandes o efeito da ionização do solo pode ser considerado desprezível.

Meliopoulus e Moharam (1983) realizaram um trabalho abordando as dificuldades em se determinar o aumento de potencial no solo quando submetido a correntes impulsivas. Eles atentaram para o fato de que como os valores de pico de tensão e corrente não ocorrem, necessariamente, no mesmo instante de tempo, por conta da influência das características capacitivas e indutivas do solo, a determinação da impedância impulsiva contém uma incerteza.

Kosztaluk, Loboda e Mukehedkar (1981) utilizaram resultados experimentais de investigações acerca do desempenho de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas de alta intensidade para gerar circuitos equivalentes. Já Loboda e Pochanke (1992), seguindo a mesma linha de pesquisa, apresentaram a evolução de tal estudo, fazendo considerações sobre o comprimento efetivo do eletrodo.

Haddad *et al.* (2010) realizaram testes experimentais sobre distribuições de corrente e tensão ao longo de um eletrodo horizontal enterrado e submetido a impulsos de corrente. Eles mostraram que a dependência da impedância impulsiva em relação ao tempo de duração do impulso e a intensidade da corrente elétrica injetada são parâmetros fundamentais para modelar o desempenho de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica.

Em Pedrosa *et al.* (2011), estudos foram realizados para investigar a dependência dos parâmetros elétricos do solo em relação à frequência na resposta transitória de

eletrodos de aterramento submetidos a descargas atmosféricas. Eles concordam com Visacro (2007) acerca de que se superestimar o efeito da ionização, compensa, em parte, a não consideração da dependência da frequência. No entanto, em Alípio e Visacro (2013) conclui-se que em virtude da grande variedade de tipos de solo, composição do solo e condições ambientais, é difícil se obter uma formulação geral que expresse a influência da frequência nos parâmetros do solo.

Visacro e Rosado (2009) pesquisaram a influência do comprimento do eletrodo de aterramento no coeficiente impulsivo. A partir de resultados experimentais, eles mostraram que para eletrodos curtos (menores que o comprimento efetivo), a impedância impulsiva é menor que a resistência em baixa frequência e, portanto, o coeficiente impulsivo é menor que 1. Para eletrodos maiores que o comprimento efetivo, o coeficiente impulsivo é maior que 1, pois a impedância impulsiva é menor que a resistência em baixa frequência.

Ahmeda *et al.* (2011) investigaram a elevação do potencial e as respectivas tensões de passo e de toque na vizinhança da torre de transmissão, devido a correntes impulsivas e em baixa frequência. Os resultados obtidos são semelhantes àqueles obtidos por outros pesquisadores, ou seja, existe influência das características do solo no desempenho do aterramento.

Alípio e Visacro (2013) apresentaram um trabalho experimental para determinar a dependência dos parâmetros elétricos do solo também em relação à frequência. Durante as medições, foram considerados solos com características bem distintas, com o valor da resistividade variando na faixa de 50 a 9100 Ωm . Os resultados indicaram a existência da dependência dos parâmetros resistividade e permissividade em relação à frequência. Ao final, os autores propõem expressões para se quantificar a associação.

Castro *et al.* (2014) realizaram uma avaliação experimental do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica em relação à amplitude da corrente injetada no solo, bem como da frequência do sinal aplicado. Foi observado que a impedância impulsiva apresenta variação desprezível quando se mantém a forma de onda do sinal de corrente aplicado no solo e varia-se a sua amplitude. Eles observaram também que a impedância impulsiva varia quando o tempo de frente do sinal aplicado no solo é modificado.

Harid *et al.* (2015) fizeram uma análise experimental do desempenho de algumas configurações de aterramento sob influência de impulsos de corrente (hastes e eletrodos horizontais, malha de terra e pés de torre) com o intuito de revisar os principais parâmetros utilizados nas análises de transitórios eletromagnéticos (resistência de aterramento, impedâncias impulsiva, harmônica, transitória e coeficiente impulsivo). Os autores introduziram um índice generalizado de impulso para comparar as diferenças entre os diferentes parâmetros utilizados para analisar a resposta transiente dos sistemas de aterramento. Os resultados constataram que os diferentes parâmetros utilizados em análises de transientes podem influenciar na avaliação do desempenho do sistema de aterramento frente a impulsos de corrente. Os resultados também mostraram que os parâmetros do impulso, utilizados nas análises dos resultados, também podem ser influenciados por outros fatores tais como: comprimento do eletrodo, tempo de subida do impulso e configuração experimental. Os autores analisaram ainda os resultados de testes em diferentes frequências (faixa de frequência entre 0 a 100 kHz), adicionando um coeficiente harmônico que visava estabelecer as diferenças entre o parâmetro da impedância harmônica e o parâmetro da resistência de aterramento (em baixa frequência). Foram encontradas variações significantes do coeficiente harmônico com a frequência, ressaltando a importância de se analisar as propriedades do solo dependentes da frequência para modelagem de impulsos e desempenho em altas frequências de sistemas de aterramento.

Em pesquisas preliminares desta tese, Gonçalves *et al.* (2015) realizaram análise experimental da impedância impulsiva e impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a correntes impulsivas. No trabalho, foi avaliada a variação da impedância de aterramento com a forma de onda do sinal aplicado, a partir da tensão de carregamento do gerador de impulsos. Os autores observaram que há variação da impedância tanto com a amplitude do sinal aplicado, quanto com o tempo de frente. Neste trabalho, não foram realizadas análises a respeito dos efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, no desempenho transitório do sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente.

Gazzana *et al.* (2016) apresentaram o desenvolvimento de uma formulação analítica para estimar o potencial na superfície do solo, causado por corrente elétrica calculada em um condutor de aterramento. O estudo proposto enfoca nos impulsos de descargas levando em consideração a dependência de frequência das propriedades do

solo. Inicialmente, o assunto é apresentado enfatizando aspectos relacionados à análise e representação de sistemas de aterramento sob impulsos. Posteriormente, a formulação analítica proposta é introduzida com foco na implementação computacional do método de modelagem de linhas de transmissão. Simulações foram realizadas considerando um eletrodo horizontal usado como aterramento no sistema elétrico de potência. A formulação foi comprovada a partir da comparação dos resultados com a solução baseada no modelo eletromagnético, que é considerado o mais rigoroso para a solução de equações de Maxwell. Os resultados demonstraram que a formulação generalizada apresenta boa confiabilidade, contribuindo para uma melhor representação dos sistemas de aterramento baseados em técnicas numéricas.

Silva (2017) analisou o desempenho de sistemas de aterramento frente a correntes impulsivas. Ele constatou que o efeito indutivo é influenciado pela quantidade de hastes de aterramento, independente da resistividade do solo, no entanto, quanto mais elevada é a resistividade, mais o efeito capacitivo exerce influência. O oposto ocorre com o efeito indutivo, que aumenta com a diminuição da resistividade do solo. Por fim, Silva (2017) propôs uma equação genérica de coeficientes não definidos que representa a contribuição dos efeitos transitórios, dependentes da frequência, para a resposta em tensão dos sistemas de aterramento analisados na sua pesquisa.

Karami e Sheshyekani (2018) avaliaram o efeito do aterramento estratificado em multicamadas na impedância harmônica dos sistemas de aterramento. Segundo os autores, o método proposto não tem limitação em termos da frequência, além disso, o método permite levar em consideração a estrutura estratificada do solo com qualquer número de camadas e eletrodos de aterramento com formas arbitrárias. A confiabilidade da abordagem proposta é comprovada pelos resultados obtidos por métodos numéricos independentes. Eles observaram que para eletrodos de aterramento horizontal, as camadas de solo têm o efeito mais significativo sobre a impedância harmônica, enquanto que para eletrodos de aterramento verticais, todas as camadas de solo contribuem significativamente para a determinação da impedância harmônica.

3.2. MÉTODOS DE MODELAGEM DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Problemas envolvendo a análise de sistemas de aterramento podem ser solucionados utilizando abordagens numéricas ou analíticas. Os principais métodos de modelagem baseiam-se em circuitos elétricos, linhas de transmissão, modelo

eletromagnético e modelagem híbrida. Estas abordagens são empregadas tanto nos estudos relacionados à operação em baixa frequência como em frequências elevadas.

A teoria do modelo de circuito consiste em modelar o aterramento por uma associação de elementos resistivos, capacitivos e indutivos, utilizando os conceitos de circuitos elétricos. A modelagem por circuito consiste basicamente de três passos: 1) divisão dos eletrodos em segmentos suficientemente pequenos de forma que se possa considerar que as correntes transversais e longitudinais sejam constantes ao longo de cada segmento; 2) solução de equações nodais do circuito equivalente utilizando as leis de Kirchhoff; 3) obtenção de um circuito equivalente para cada segmento e cálculo dos parâmetros próprios e mútuos.

Ao longo dos anos, diversos aprimoramentos nessa teoria foram feitos por Ramamoorthy (1989), Otero, Cidras e Alamo (1999) e Gazzana *et al.* (2009). A metodologia de Otero, Cidras e Alamo (1999) foi, provavelmente, a primeira solução de análise transitória em sistemas de aterramento no domínio da frequência utilizando modelagem por circuitos.

A modelagem por circuitos é fácil de ser compreendida, sendo o desempenho transitório do aterramento simulado pela solução de circuitos equivalentes. A ionização do solo pode ser incorporada ao modelo, mas essa modelagem tem o inconveniente que não pode prever o atraso de propagação do impulso (LIU, 2004).

A teoria de linhas de transmissão para modelagem de sistemas de aterramento foi introduzida por Sunde (1968), em que o conceito de linhas de transmissão com parâmetros distribuídos dependentes da frequência foi empregado. O objetivo era avaliar o desempenho transitório de um condutor horizontal na superfície do solo devido a uma descarga atmosférica direta. No modelo, os eletrodos do aterramento são tratados pela teoria de ondas viajantes. Este método permite a avaliação em altas frequências, o que é bastante apropriado para estudos de descargas atmosféricas.

A teoria do modelo eletromagnético é baseada na solução das equações de Maxwell aplicadas aos elementos do aterramento com mínimas aproximações. Este método é o mais rigoroso para modelar o desempenho transitório em sistemas de aterramento e, por isso, apresenta maior precisão. No entanto, pela complexidade em se determinar a solução das equações, geralmente exige a aplicação de métodos numéricos. Os dois principais métodos utilizados são o Método dos Momentos (MoM) e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

3.3. AVALIAÇÃO COMPUTACIONAL DE ATERRAMENTOS SOB CORRENTES IMPULSIVAS

Na literatura, são relatadas diversas pesquisas com viés de trabalhos práticos e de simulação, quando se analisa o desempenho do solo submetido a descargas atmosféricas.

Liew e Darveniza (1974) propuseram um modelo dinâmico para ionização do solo descrito por equações em função do tempo e da densidade de corrente. Os autores consideraram que, dada uma haste nua fincada no solo, o solo se ioniza gradativamente em regiões elementares as quais são coaxiais em relação à haste de aterramento. Pelo modelo, as camadas elementares mais próximas ao eletrodo entram em ionização primeiro, seguindo-se às camadas mais externas. Entretanto, a forma com que a modelagem da ionização é apresentada pelos autores restringe-se a um aterramento composto por uma única haste nua. Assim, o modelo apresentado pelos autores não é capaz, por si só, de modelar a ionização em aterramentos com mais de uma haste ou, até mesmo, para aterramentos envolvidos por aditivos.

No trabalho desenvolvido por Otero, Cidras e Alamo (1999), é apresentada uma nova abordagem desta metodologia considerando a dependência dos parâmetros com a frequência, a representação aproximada do efeito de propagação e os acoplamentos resistivos, capacitivos e indutivos entre segmentos. O sistema de aterramento é analisado no domínio da frequência por meio de um sistema de equações nodais, sendo a resposta no domínio do tempo obtida pela transformada inversa de Fourier. Os autores não consideraram a modelagem da ionização do solo e, também, não consideraram a variação das dimensões da malha de aterramento simulada.

Gao *et al.* (2002) propõem um modelo de circuito com parâmetro variável no tempo para calcular a característica transitória de um sistema de aterramento sob impulso de corrente. Os fenômenos de ionização ao redor dos condutores de terra no solo são simulados por meio de parâmetros variáveis no tempo. Os campos eletromagnéticos gerados na subestação são analisados usando a teoria do dipolo elétrico e a teoria da imagem quando o impulso de corrente flui para o sistema de aterramento. A partir do modelo desenvolvido e dos testes realizados, eles concluíram que se a ionização do solo for considerada, a sua influência no campo elétrico é significativa, entretanto, considerando o domínio magnético, a influência pode ser considerada desprezível.

Toseva e Grcev (2003) simularam um condutor horizontal de 100 m enterrado no solo submetido a correntes impulsivas. Os autores verificaram que o perfil de distribuição

de corrente ao longo do eletrodo tem dependência significativa com o coeficiente de reflexão das camadas e a profundidade da camada do solo. Os resultados mostraram que, para frequências abaixo de 1 kHz, o perfil da distribuição de corrente tem comportamento quase estático. No intervalo de frequências entre 10 kHz a 100 kHz, foi observado que quanto maior a frequência da corrente injetada no eletrodo de aterramento, menor é o comprimento efetivo desse eletrodo.

Ala *et al.* (2004) aplicaram o método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (DFDT) no modelo dinâmico proposto por Liew e Darveniza (1974), com o objetivo de aprimorar a estimativa da região ionizada do solo. O método das DFDT permite uma solução numérica para as equações parciais de Maxwell. Com o método das DFDT aplicado ao modelo dinâmico, é possível definir áreas de ionização não uniformes, apresentando maior proximidade com o fenômeno de ionização real. Contudo, o método exige grande esforço computacional quando aplicado em sistemas de aterramento com eletrodos maiores que 0,60 m.

Habjanic e Trlep (2006) simularam transitórios eletromagnéticos em aterramentos elétricos contemplando o fenômeno da ionização do solo. O campo elétrico crítico do solo, considerado nas simulações, foi de 350 kV/m. Eles realizaram simulações em uma haste vertical enterrada e numa malha de terra horizontalmente enterrada. As amplitudes das correntes injetadas variaram de 5,2 kA a 30,8 kA. Como era esperado, os potenciais, na superfície do solo, diminuíram significativamente quando ocorria a ionização do solo.

Sekioka *et al.* (2006) consideram a ionização do solo, provocada por impulso de corrente, como sendo um processo similar ao da formação de um arco elétrico. Dessa forma, a ionização é representada de acordo com o balanço de energia, no qual a entrada de energia no sistema é associada à variação de resistividade. O modelo do balanço de energia depende da dimensão do eletrodo, corrente impulsiva injetada no sistema de aterramento e da energia armazenada na zona de ionização. Nele se considera que o momento no qual a tensão é máxima não coincide com o momento no qual a corrente impulsiva é máxima. Isto se deve ao efeito da histerese na ionização do solo. O modelo foi comparado com ensaios experimentais e mostrou-se efetivo na representação das características não lineares do solo frente a impulsos de corrente.

Fraga (2008) expôs a utilidade das simulações computacionais para estimar resultados quando não se dispõe de espaço físico e de equipamentos apropriados para

realização de ensaios experimentais. Dessa forma, o autor propôs o desenvolvimento de uma metodologia capaz de simular sistemas de aterramento frente a fenômenos de frequência elevada. Ele usou o método conhecido como Modelo de Linhas de Transmissão (TLM - *Transmission Line Modeling*) tridimensional. Apesar da simulação ter apresentado resultados, os mesmos precisam ser comprovados por meio de experimentos em campo.

Gazzana *et al.* (2009) realizaram uma revisão do estado da arte sobre as principais técnicas utilizadas para solucionar problemas relativos à análise de transitórios em sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica. Foram apresentadas modelagens de sistemas de aterramento por circuitos, linha de transmissão, modelo eletromagnético e híbrido. Além disso, foram revisados métodos numéricos com aplicabilidade para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética, tais como: o método das DFDT, o MoM, o MEF e o método de modelagem por linhas de transmissão.

Li *et al.* (2011) analisaram computacionalmente a resposta de um sistema de aterramento frente a impulsos de corrente de amplitude elevada (6 kA a 30 kA). Eles utilizaram o MEF para resolver o problema do domínio da frequência e consideraram o efeito de ionização do solo ao redor do local de aplicação do impulso de corrente. Os resultados se mostraram satisfatórios quando comparados com resultados experimentais encontrados na literatura. Os autores concluíram que o MEF pode ser utilizado para analisar malhas de aterramento de vários tipos e tamanhos bem como simular estruturas de solo reais.

Guimarães *et al.* (2012) realizaram estudos de uma malha de aterramento submetidas a correntes impulsivas, enterrada num solo homogêneo de resistividade de $160 \Omega\text{m}$. A corrente impulsiva foi injetada em diferentes pontos da malha de aterramento, verificando valores distintos para a impedância impulsiva. Os autores observaram que a impedância impulsiva varia de acordo com o local da injeção de corrente. No mesmo estudo, os resultados experimentais foram comparados com os resultados simulados, verificando que a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência não tem influência significativa na amplitude e forma de onda da elevação de potencial em relação ao referencial de terra remoto, devido à baixa resistividade do solo. Também foi observado que o pico do módulo e fase da impedância harmônica acontece, aproximadamente, em 2 MHz.

Visacro e Alípio (2012) realizaram estudos sobre a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência em aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas. Os autores concluíram que a hipótese de os parâmetros elétricos do solo serem constantes com a frequência conduz a erros significativos quando se compara os resultados obtidos em simulações com os experimentais. Em relação aos valores de tais parâmetros, a variação da resistividade no domínio da frequência mostrou-se muito dependente do valor de resistividade do solo em baixas frequências. Os resultados experimentais obtidos pelos autores indicam a ocorrência de uma redução na resistividade com o aumento da frequência do sinal. Os autores também observaram uma redução nos valores da permissividade com o aumento da frequência do sinal.

Akbari, Sheshyekani e Alemi (2013) enfatizam que, para a modelagem de sistemas de aterramento, tanto a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência como o fenômeno de ionização são duas fontes de complexidade para análise, quer sejam tratados separadamente ou de forma conjunta. Em seu trabalho, eles apresentam um método para análise de sistemas de aterramento por meio de simulação. Para este fim, uma abordagem baseada no MEF foi aplicada às equações de Maxwell. Fórmulas analíticas propostas por Visacro e Alípio (2012) são utilizadas para a modelagem da condutividade e permissividade do solo em função da frequência. As simulações indicam que a dependência com a frequência é mais pronunciada em solos de baixa condutividade. Ela também deve ser considerada para a análise de correntes com componentes de frequência acima de 2 MHz.

Cavka, Mora e Rachidi (2014) apresentaram uma avaliação dos diferentes modelos que representam a dependência dos parâmetros elétricos do solo com o espectro de frequência do sinal solicitante. Estes modelos são expressões para a condutividade do solo e permissividade relativa, que são baseados em dados experimentais. Foi mostrado que os modelos de solo de Scott, Smith-Longmire, Messier, e Visacro-Alípio obtiveram resultados globais semelhantes, que estão em acordo com os resultados experimentais. As diferenças entre os modelos são encontradas para altas frequências e para solos de baixa resistividade.

Coelho e Almaguer (2014) realizaram uma simulação da aplicação de um impulso de corrente na ferragem, utilizada como aterramento, de uma estrutura de concreto similar aos postes de distribuição. Para a simulação foi utilizado o *software* COMSOL Multiphysics® e aplicado o modelo dinâmico, bem como o balanço de energia para avaliar

os efeitos não lineares do sistema frente a impulsos de corrente. Os resultados mostraram a importância de se avaliar os efeitos não-lineares no local onde está inserido o sistema de aterramento. Os resultados também mostraram que tanto o modelo dinâmico quanto o modelo de balanço de energia são satisfatórios na representação do desempenho transitório do sistema de aterramento. Apesar da relevância do estudo, faltou a realização de um estudo experimental para comprovar os resultados, bem como a análise dos efeitos térmicos no local de passagem da corrente impulsiva.

Em pesquisas preliminares a esta tese, Gonçalves *et al.* (2016) realizaram uma simulação computacional de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente utilizando o *software* COMSOL Multiphysics®. Foram utilizados quatro comprimentos distintos de hastes de aterramento, caracterizando quatro sistemas de aterramento distintos. Foi analisado o potencial elétrico que surgiu em cada domínio (haste, ar e solo) em virtude da corrente impulsiva injetada no sistema. A partir das simulações, foi constatado que o aumento da profundidade das hastes tem um limite na influência da redução da resistência de aterramento. Os autores também constataram a relevância da utilização de ferramentas computacionais para o estudo de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente. O sistema pode ser melhorado tornando-o mais próximo dos sistemas reais (solo estratificado em camadas e consideração dos efeitos transitórios não lineares).

Altafim *et al.* (2016) apresentaram um modelo de representação de um sistema de aterramento a partir de circuitos elétricos. O modelo de circuito apresentado tem como base as equações de Loboda e Pochanke (1992), que descrevem comportamentos não-lineares dos fenômenos de ionização do solo. O circuito tem como principal característica a possibilidade de simular ambas as regiões de ionização (linear e não-linear) como um sistema de aterramento completo. Com o intuito de comparar as simulações do modelo proposto com resultados experimentais, os autores elaboraram arranjos experimentais em escala reduzida. No trabalho, Altafim *et al.* (2016) não realizaram testes com modelos em campo e não consideraram sistemas de aterramento complexos.

Bezerra (2017) realizou uma avaliação da resposta impulsiva de aterramento com haste concretada, considerando o efeito da ionização do solo. O aterramento estudado foi representado e simulado utilizando uma ferramenta computacional de simulação que utiliza o MEF. O fenômeno da ionização do solo foi implementado ponto a ponto, utilizando o equacionamento do modelo dinâmico de ionização do solo, possibilitando

que aterramentos com diferentes formatos geométricos fossem avaliados. O autor não considerou uma representação eletromagnética que considere campos magnéticos e o efeito indutivo ou capacitivo do aterramento. Além disso, seu trabalho se limitou a estudar uma estrutura de aterramento simples, desconsiderando os sistemas de aterramento mais complexos e utilizados em subestações e torres de linhas de transmissão.

Chen e Du (2018) apresentaram um método de circuito equivalente com elementos parciais para estimar o desempenho transitório de uma malha de aterramento. Os parâmetros dependentes da frequência foram obtidos a partir do método das imagens. O efeito de ionização do solo foi modelado empregando uma resistência não linear. Os resultados calculados por meio do método proposto foram comparados com dados experimentais apresentados na literatura. Posteriormente, transitórios causados por descargas atmosféricas foram simulados. Os autores apontam que o efeito de ionização determina o desempenho do aterramento durante a descarga inicial (*first stroke*), sendo os efeitos de propagação determinantes para a resposta à descarga subsequente.

3.4. CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

A fim de contextualizar a pesquisa proposta e desenvolvida, no tempo e nos temas correlatos, a seguir é apresentado, na Tabela 3.1, um quadro sinóptico com as principais referências e contribuições abordadas nesta revisão bibliográfica. Adicionalmente, no quadro sinóptico também são destacadas as contribuições desta pesquisa.

Tabela 3.1 – Quadro sinóptico com a síntese da revisão bibliográfica e do presente trabalho.

Pesquisadores	Contribuições						
	1	2	3	4	5	6	7
Liew e Darveniza (1974)	•			•			
Loboda e Pochanke (1992)	•			•			
Otero, Cidras e Alamo (1999)	•	•	•	•			
Ala <i>et al.</i> (2004)	•		•				
Sekioka <i>et al.</i> (2006)	•		•				
Fraga (2008)			•				
Haddad <i>et al.</i> (2010)	•	•	•				
Li <i>et al.</i> (2011)	•		•				
Guimarães <i>et al.</i> (2012)	•						
Akbari, Sheshyekani e Alemi (2013)	•		•				
Harid <i>et al.</i> (2015)	•	•	•			•	
Altafim <i>et al.</i> (2016)	•		•	•			
Bezerra (2017)			•				
Caetano <i>et al.</i> (2018)	•	•	•		•		
Gonçalves (Pesquisa atual)	•	•	•	•	•	•	•
<ol style="list-style-type: none"> 1. Análise experimental do aterramento submetido a impulsos de corrente; 2. Experimentos em campo em sistemas de aterramentos de dimensões reais; 3. Análise em ambiente computacional do aterramento submetido a impulsos de corrente; 4. Proposição de modelos que podem representar o sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente; 5. Procedimento para identificação dos efeitos transitórios dos sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente; 6. Avaliação de configurações distintas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente; 7. Desenvolvimento de uma metodologia de avaliação de sistemas de aterramento centrados nos efeitos transitórios. 							

Fonte: Produzida pelo autor.

3.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na revisão bibliográfica, observou-se que as publicações abordam o tema de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente. A maioria das pesquisas analisaram os efeitos das correntes impulsivas no desempenho do aterramento, constatando, principalmente, os efeitos indutivos, capacitivos e ionizantes. Além disso, os pesquisadores buscaram formas de representação dos sistemas de aterramentos a partir de simulações computacionais, tomando como base, na maioria dos casos, resultados de ensaios em campo. Entretanto, a bibliografia atual deixa a desejar de procedimentos consistentes de análise de sistemas de aterramento, considerando a resposta para sinais em baixa frequência e frequência elevada. Além disso, muitos pesquisadores não

trabalham com sistemas de aterramento complexos ou, até mesmo, com ensaios experimentais em campo. Com isso, esta pesquisa vem a contribuir com o fortalecimento do estado da arte atual, buscando solucionar os problemas relatados acima. Em seguida, o Capítulo 4 trata do material e os métodos empregados na realização da pesquisa.

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados o material e os métodos utilizados no desenvolvimento dos estudos e análises do presente trabalho. Inicialmente, é apresentada uma visão geral, relacionada às etapas desenvolvidas, bem como os aspectos relevantes para a obtenção dos resultados. Em seguida, são descritos e caracterizados o material, neste caso, os sistemas de aterramento e seus elementos constituintes. Na sequência, são apresentados os métodos utilizados para identificar, avaliar e simular as características transitórias presentes nos sistemas de aterramento, quando submetidos a impulsos de corrente.

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Considerando que os principais aspectos para análise do desempenho de sistemas de aterramento necessitam ser melhor avaliados, o presente trabalho se propõe a desenvolver uma metodologia para avaliar experimentalmente e computacionalmente a resposta de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica.

Tanto nos ensaios experimentais como nas simulações computacionais, o desempenho do sistema de aterramento foi avaliado tendo como parâmetros ou variáveis a resistividade do solo, os efeitos transitórios do solo, a geometria do sistema de aterramento e os impulsos de corrente. Além disso, foi realizada a comprovação das simulações a partir da comparação com os resultados obtidos em campo. Para tanto, os métodos aplicados encontram-se divididos em seis etapas.

A primeira etapa consistiu na realização de ensaios em campo, nos quais foram coletados os sinais de corrente e tensão impulsivas para as diferentes configurações de malhas de aterramento.

A segunda etapa consistiu em filtrar e tratar os dados obtidos em campo (primeira etapa) visando a utilização dos sinais tratados nas etapas seguintes.

A terceira etapa consistiu no desenvolvimento de um procedimento para identificação e distinção dos efeitos transitórios dos sistemas de aterramento ensaiados.

A quarta etapa consistiu na proposição e comprovação de modelos elétricos que representassem os sistemas de aterramento ensaiados, visando o possível acoplamento desses modelos a outros que representam os supressores de surtos e, com isso, possibilitar estudos de coordenação de isolamento.

A quinta etapa consistiu na implementação de simulações computacionais considerando a representação dos efeitos indutivos e capacitivos. Para a implementação das simulações, foi utilizado o *software* comercial XGSLab®. Na sequência, as simulações foram comprovadas a partir dos resultados obtidos dos ensaios experimentais.

A sexta e última etapa consistiu na sintetização dos métodos utilizados neste trabalho e, a partir disso, na proposição de uma metodologia de avaliação de sistemas de aterramento capaz de detectar os efeitos transitórios provenientes das altas intensidades e elevadas frequências dos impulsos de corrente.

4.2. MATERIAL

Dois sistemas de aterramento com configurações distintas foram utilizados nos ensaios experimentais e encontravam-se implantados em solos com características também distintas. A caracterização dos solos, a partir de suas resistividades no entorno das regiões dos aterramentos ensaiados, foram realizadas utilizando o método de Wenner em concordância com a ABNT NBR 7117 (2012).

Por motivo de organização, os sistemas de aterramento foram denominados de configuração de aterramento G_1 e configuração de aterramento G_2 e eles são detalhados nas subseções seguintes.

4.2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO G_1

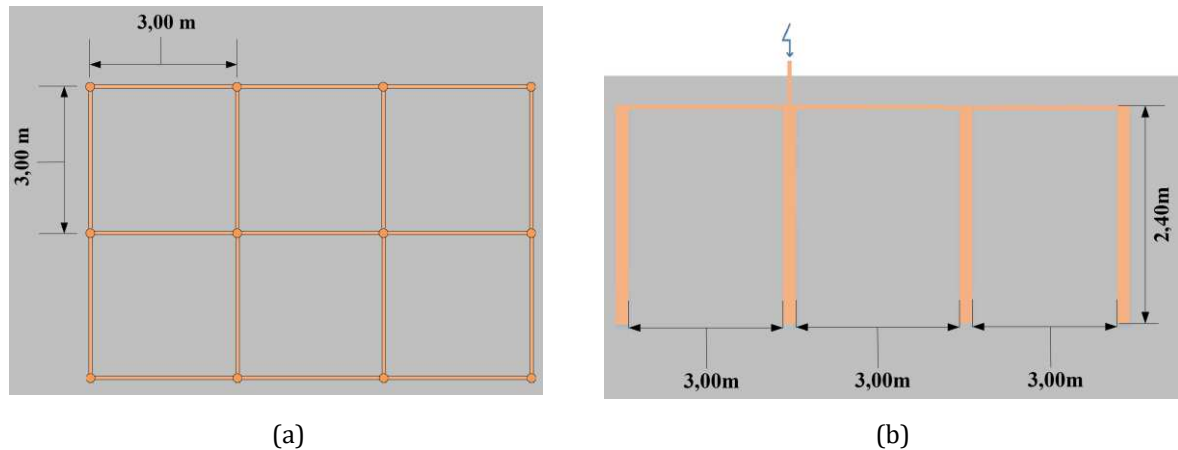
A primeira configuração de aterramento, G_1 , correspondia a uma malha típica de subestações, composta por 12 hastes de cobre fincadas em solo com valores de resistividade e profundidade das camadas mostrados na Tabela 4.1. As hastes da configuração G_1 tinham diâmetro de 20 mm e comprimento de 2,40 m interligadas por cabos de cobre nu com uma área de seção transversal de 35 mm² e enterradas a uma profundidade de 0,30 m no solo. Na Figura 4.1 é apresentada a ilustração da configuração de aterramento G_1 utilizada nos ensaios experimentais.

Tabela 4.1 – Caracterização da configuração de aterramento G₁.

Caracterização do aterramento		
Camada	Profundidade (m)	Resistividade (Ωm)
H ₁	0 - 1,03	$\rho_1 = 68,18$
H ₂	> 1,03	$\rho_2 = 44,21$

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.1 – Representação da configuração de aterramento G₁: (a) vista lateral e (b) vista superior.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO G₂

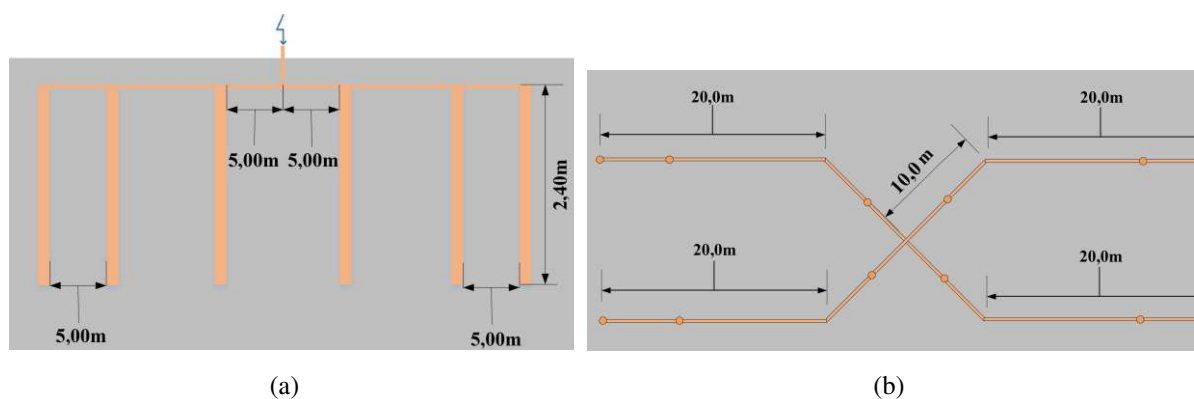
A segunda configuração de aterramento, G₂, correspondia a uma malha típica de pés de torres de linhas de transmissão, composta por 12 hastes de cobre fincadas em solo com valores de resistividade e profundidade das camadas mostrados na Tabela 4.2. As hastes da configuração G₂ tinham diâmetro de 20 mm e comprimento de 2,40 m interligadas por cabos de cobre nu com uma área de seção transversal de 50 mm² e enterradas a uma profundidade de 0,30 m no solo. Na Figura 4.2 é apresentada a ilustração da configuração de aterramento G₂ utilizada nos ensaios experimentais.

Tabela 4.2 – Caracterização da configuração de aterramento G₂.

Caracterização do aterramento		
Camada	Profundidade (m)	Resistividade (Ωm)
H ₁	0 - 2,83	$\rho_1 = 39,62$
H ₂	> 2,83	$\rho_2 = 196,57$

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.2 – Representação da configuração de aterramento G_2 : (a) vista lateral e (b) vista superior.



Fonte: Produzida pelo autor.

4.3. MÉTODOS

Com o intuito de atender aos objetivos geral e específicos, os métodos adotados visaram analisar e simular sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica, considerando os efeitos transitórios.

Nesse sentido, os métodos aplicados neste trabalho são fundamentados, essencialmente, na comparação entre os resultados obtidos por meio de ensaios em campo e resultados obtidos por meio de modelos e simulações computacionais.

Nas subseções a seguir, é apresentado o detalhamento dos métodos aplicados na pesquisa, que foi dividido em seis etapas: ensaios em campo (Etapa 1); tratamento dos dados obtidos em campo (Etapa 2); identificação dos efeitos transitórios (Etapa 3); proposição e comprovação de modelos elétricos (Etapa 4); simulações computacionais do aterramento (Etapa 5) e sintetização dos métodos aplicados na pesquisa (Etapa 6).

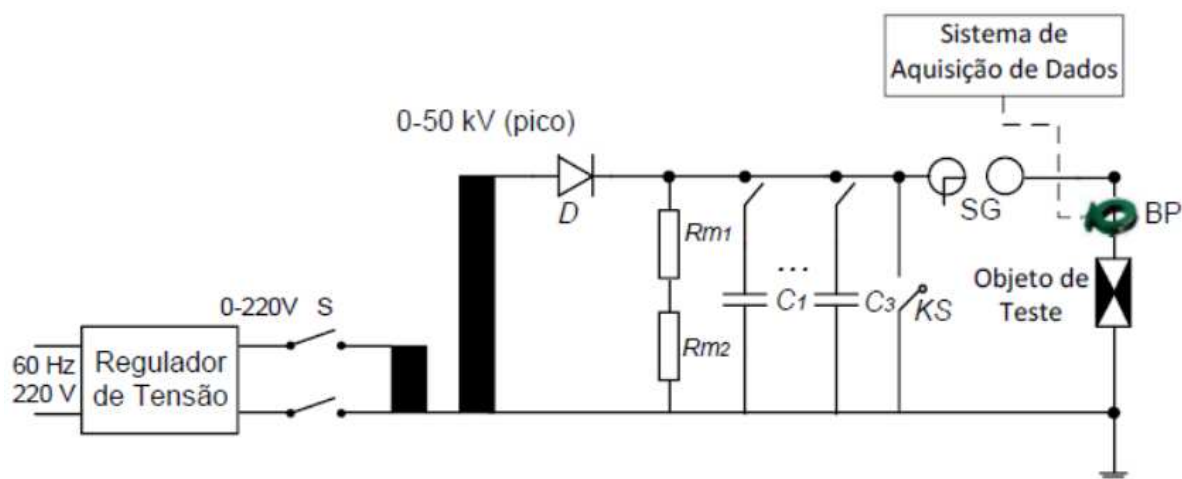
4.3.1. ETAPA 1

A primeira etapa consistiu na realização de ensaios em campo. Para tanto, um gerador de impulsos de corrente foi utilizado para injetar os impulsos nas malhas de aterramento. Os capacitores do gerador de impulsos foram carregados com tensões de 20 kV e 25 kV. Para cada nível de tensão, foram aplicados 3 impulsos consecutivos, com intervalo de 15 minutos entre uma aplicação e outra e a média dos sinais foi usada para obter os impulsos de corrente e tensão.

Na Figura 4.3 é apresentado o circuito elétrico equivalente do gerador de impulsos. Assim, para injetar os impulsos nas malhas de aterramento, torna-se necessário carregar os capacitores do gerador de impulsos, os quais possuem seu carregamento de tensão controlado. Desse modo, para que o carregamento ocorra de forma segura, sem que haja

descargas não programadas, as esferas do centelhador, representado por SG na Figura 4.3, são afastadas. Na sequência, inicia-se o carregamento dos capacitores até o nível de tensão desejado. Com os capacitores carregados, inicia-se o processo de ruptura do dielétrico a partir de um sistema de gatilho, o qual provoca um arco elétrico dando início à disrupção e, assim, provocando a descarga de corrente no objeto de teste, nesse caso, no sistema de aterramento sob ensaio.

Figura 4.3 – Circuito elétrico do gerador de impulsos de corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

em que:

R_{m1} e R_{m2} : resistores do divisor de tensão;

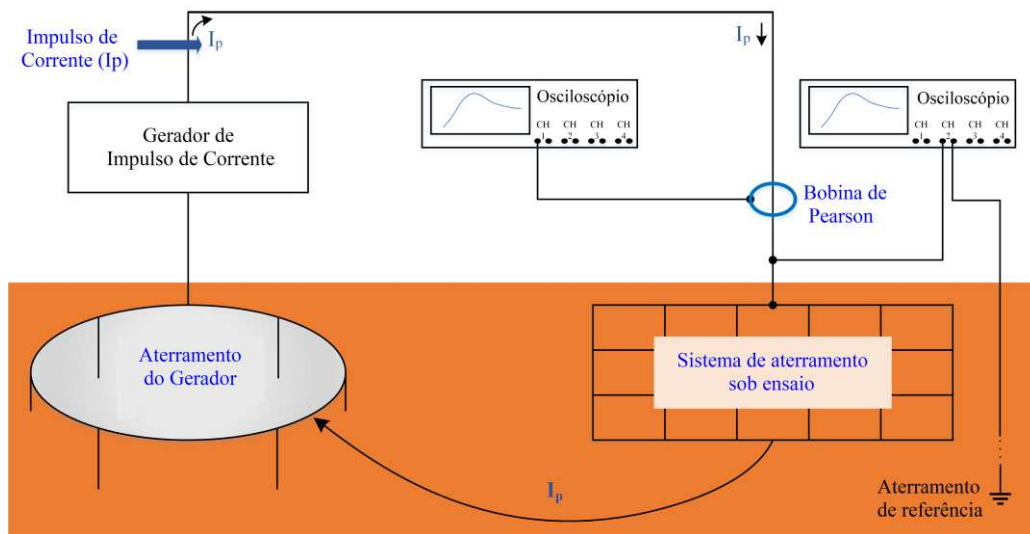
C_1 a C_3 : capacitores utilizados para descarga elétrica;

SG : Semiesferas utilizadas como centelhadores;

BP : Bobina de Pearson para aquisição do impulso de corrente.

O diagrama esquemático geral do arranjo experimental é apresentado na Figura 4.4. Para a aquisição dos sinais de impulsos de corrente injetados no aterramento, foi utilizada uma bobina de Pearson, com sensibilidade de 0,01 V/A $\pm 1\%$. A bobina de Pearson foi conectada ao osciloscópio digital. A forma de onda da tensão no sistema de aterramento foi adquirida a partir do osciloscópio digital (Tektronix TDS 2014) usando pontas de prova de alta tensão (Tektronix P6015A). As sondas de tensão e corrente estavam próximas ao ponto de injeção do impulso.

Figura 4.4 – Diagrama esquemático do arranjo experimental.



Fonte: Produzida pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 4.4, além do sistema de aterramento sob ensaio, havia outros dois aterramentos. Um foi utilizado para proteção do gerador de impulsos e, também, para retorno de corrente. O outro foi utilizado como aterramento de referência para os sistemas de medição e aquisição dos dados. O sistema de aterramento do gerador de impulsos estava a, aproximadamente, 100 m do sistema de aterramento sob teste, enquanto este estava a, aproximadamente, 100 m do aterramento remoto, formando um ângulo de 90 graus entre os três.

4.3.2. ETAPA 2

A segunda etapa consistiu no tratamento dos dados obtidos em campo. Nesta etapa, os dados de impulsos de tensão e corrente foram importados para o ambiente computacional do *software* comercial MATLAB®, onde foram tratados e analisados. As saídas proporcionadas pelo MATLAB® foram:

- Curva de corrente, ao longo do tempo, injetada no aterramento;
- Curva de tensão, ao longo do tempo, medida no ponto de injeção de corrente;
- Curva característica da relação entre tensão medida e corrente injetada (curva $V \times I$) no sistema de aterramento.

4.3.3. ETAPA 3

A terceira etapa consistiu no desenvolvimento do procedimento para identificação dos efeitos transitórios (ionizantes, indutivos e capacitivos). A partir das saídas do MATLAB®, os efeitos transitórios nos sistemas de aterramento ensaiados puderam ser identificados. Inicialmente, os efeitos indutivos e capacitivos foram identificados a partir

das curvas $V \times I$ e comprovados a partir do comparativo entre as curvas de tensão e corrente ao longo do tempo. Em seguida, o possível efeito de ionização foi identificado a partir da normalização das curvas de corrente e tensão, considerando os valores de pico da corrente (como base para normalização) para cada nível de carregamento utilizado no gerador de impulsos. Então, as diferenças nos picos das curvas de tensão normalizadas eram indicativas de não linearidade.

4.3.4. ETAPA 4

A quarta etapa consistiu na proposição de modelos elétricos que representassem os sistemas de aterramento ensaiados. Os modelos foram desenvolvidos a partir das respostas experimentais, tomando as curvas $V \times I$, as curvas de corrente e as curvas de tensão obtidas na segunda etapa. Os modelos propostos tiveram como base modelos de aterramentos e de supressores de surto (TOMINAGA *et al.*, 1979), (LOBODA e POCHANKE, 1992) e (ALTAFIM *et al.*, 2016) e buscou-se a simplicidade nos modelos e na determinação dos seus parâmetros.

A quarta etapa foi idealizada para proporcionar a análise e comprovação dos modelos propostos. A avaliação dos modelos foi feita utilizando os resultados das duas configurações dos sistemas de aterramento ensaiados, G_1 e G_2 , e da configuração do sistema de aterramento de Altafim *et al.* (2016). Além disso, os modelos propostos e o modelo apresentado em Altafim *et al.* (2016) foram comparados entre si.

Tanto os modelos propostos quanto o modelo apresentado em Altafim *et al.* (2016) foram simulados no *software* comercial PSIM[®], tendo como entrada o impulso de corrente. As saídas das simulações foram as formas de onda da tensão ao longo do tempo. Para a avaliação da confiabilidade dos modelos propostos, a forma de onda da tensão resultante das simulações foi comparada com as tensões medidas em campo por meio das métricas de desempenho R^2 e RMSE (*Root-Mean-Square Error*). O coeficiente de determinação, também chamado R^2 , é uma medida de ajuste do modelo estatístico linear generalizado e varia entre 0 e 1 (GARCIA, 2008). Quanto mais próximo de 1 for o R^2 , melhor será o ajuste entre as variáveis de referência e estimadas. O RMSE avalia o ajuste entre um estimador e os valores observados (GARCIA, 2008). Quanto menor o valor do RMSE, melhor é o ajuste entre os valores estimados e observados.

4.3.5. ETAPA 5

A quinta etapa consistiu na implementação de simulações computacionais considerando a representação dos efeitos indutivos ou capacitivos. Em razão disso, o *software* comercial XGSLab® foi utilizado nas simulações. O XGSLab® é um *software* especializado em análises de sistemas de aterramento tanto para correntes em baixa frequência quanto para correntes impulsivas. O XGSLab® apresenta de forma gráfica o comportamento do sistema de aterramento frente a correntes injetadas.

Para a realização adequada da simulação no XGSLab®, foi necessária a representação completa do sistema de aterramento das configurações de aterramento G₁ e G₂. Para tanto, as simulações tiveram como base a geometria e os parâmetros apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 e nas Tabelas 4.1 e 4.2. Assim, os dados e parâmetros medidos experimentalmente que serviram de entrada para o *software* foram:

- **Solo:** composto por resistividades distintas para cada caso simulado e permissividade;
- **Hastes de aterramento:** com dimensões descritas na seção Material;
- Sinal da corrente impulsiva injetada no sistema de aterramento.

Inicialmente, as representações gráficas das malhas de aterramento foram reproduzidas no ambiente de simulações do XGSLab® tomando como base as Figuras 4.1 e 4.2. Em seguida, foi feita a caracterização dos materiais, tais como o solo, as hastes de aterramento e as conexões entre as hastes, cada qual com suas propriedades elétricas definidas na plataforma. Além disso, o impulso de corrente foi caracterizado no XGSLab® indicando, também, o seu ponto de injeção nas malhas simuladas.

Por fim, as simulações no XGSLab® foram avaliadas e os resultados foram exportados para o MATLAB® com o objetivo de comparar e comprovar as simulações computacionais. As formas de onda da tensão resultante, em função do tempo, foram comparadas com as tensões medidas em campo por meio da métrica de desempenho R². Além disso, quando a métrica de desempenho R² não foi satisfatória, foram realizados ajustes nos parâmetros de entrada das simulações.

4.3.6. ETAPA 6

A sexta e última etapa consistiu na sintetização dos métodos aplicados na pesquisa e proposição de uma metodologia de avaliação de sistemas de aterramento. Para tanto, os procedimentos realizados nas cinco etapas deste capítulo foram apresentados em um

fluxograma geral de análises sistemáticas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica.

4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram tratados do material e dos métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente, foi apresentado o material de estudo e, em seguida, foram apresentadas as etapas dos métodos utilizados para identificar, avaliar e simular as características transitórias presentes nos sistemas de aterramento, quando submetidos a impulsos de corrente.

O material e os métodos apresentados neste capítulo foram empregados, fornecendo resultados para a pesquisa desenvolvida. Com isso, os resultados obtidos, seguido das análises e discussões, estão apresentados no capítulo a seguir.

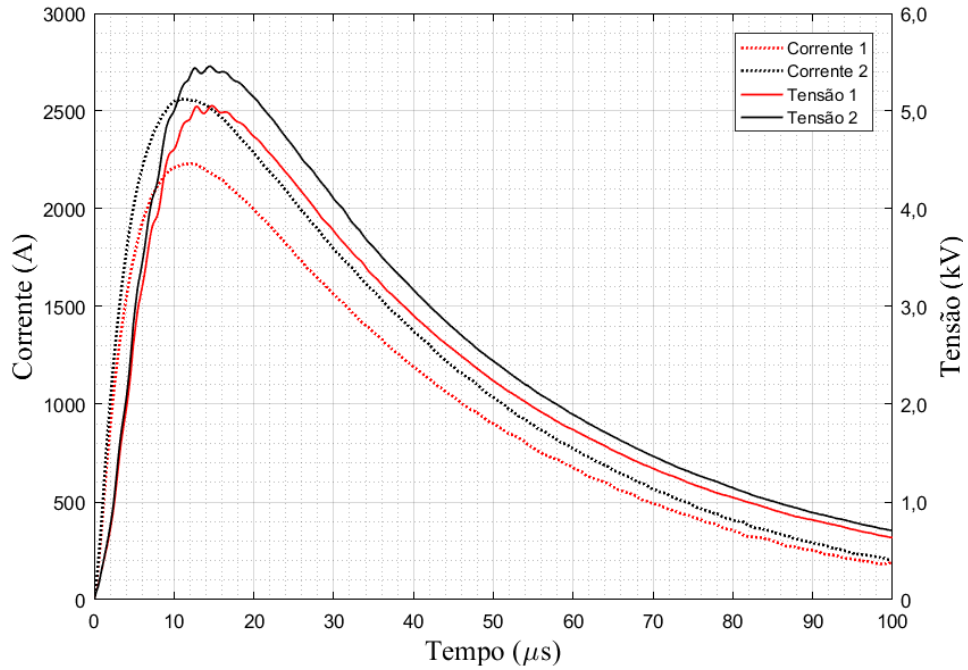
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de cumprir os Objetivos Geral e Específicos, neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da utilização das etapas descritas na seção 4.3 do capítulo Material e Métodos. De forma análoga ao capítulo anterior, os resultados e discussões também foram divididos em seis etapas: ensaios em campo (Etapa 1); tratamento dos dados obtidos (Etapa 2); identificação dos efeitos transitório (Etapa 3); proposição e comprovação de modelos elétricos (Etapa 4); simulações em ambiente computacional (Etapa 5) e sintetização dos métodos aplicados na pesquisa e proposição de metodologia geral (Etapa 6).

5.1. ETAPA 1

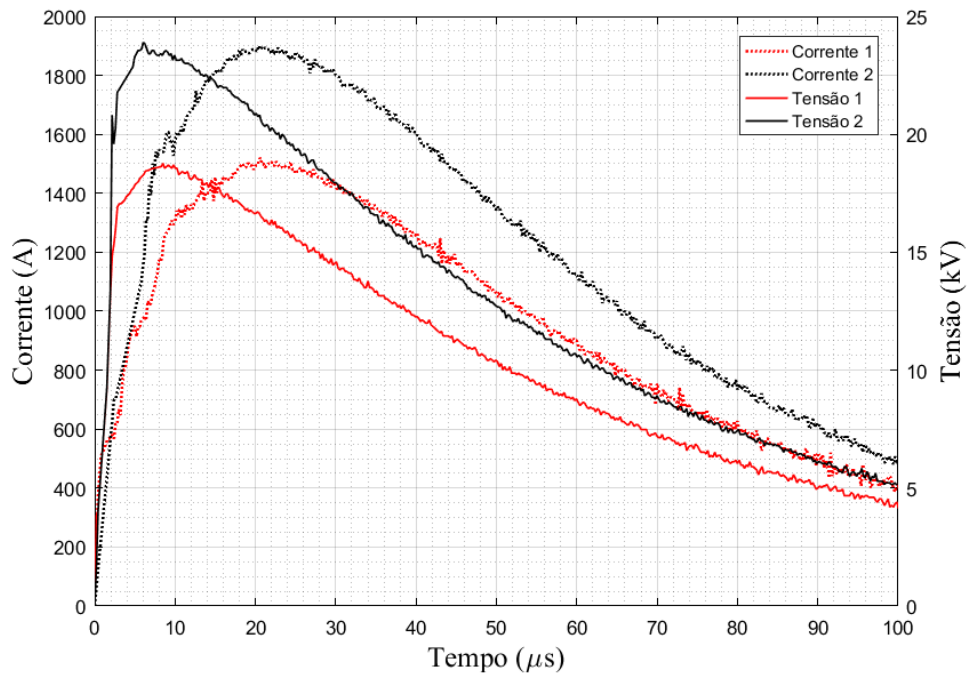
Os sistemas de aterramento foram ensaiados por meio da injeção de impulsos de corrente conforme descrito na subseção 4.3.1. Para cada um dos dois sistemas de aterramento ensaiados, os capacitores do gerador de impulsos foram carregados com tensões de 20 kV e 25 kV. Para cada um dos níveis de carregamento, foram realizados três ensaios consecutivos, nos quais foram capturados os sinais de tensão e de corrente. Os sinais de tensão e corrente obtidos foram importados para o *software* MATLAB® e foram feitas as médias dos três sinais, de modo a se determinar os sinais de tensão e corrente aplicados no aterramento. Com os sinais de tensão e corrente obtidos em campo no *software* MATLAB®, foram aplicadas técnicas de supressão de ruído tal como a função denominada “*smooth*”. Nas Figuras 5.1 e 5.2, pode-se observar as curvas medidas para os carregamentos de 20 kV e 25 kV, referentes às configurações de aterramento G₁ e G₂, respectivamente.

Figura 5.1 – Curvas medidas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G₁.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.2 – Curvas medidas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G₂.



Fonte: Produzida pelo autor.

5.2. ETAPA 2

Após a aplicação das técnicas de supressão de ruído, os sinais foram modelados por meio de ajuste de curvas aplicando o modelo de dupla exponencial, tomando como

base as Equações (5.1) e (5.2). Para obtenção dos parâmetros representativos das curvas dos sinais foi utilizado o *toolbox "cftool"* do MATLAB®. Nas Tabelas 5.1 e 5.2 são apresentados os parâmetros obtidos do ajuste de curvas a partir das Equações (5.1) e (5.2) para as configurações de aterramento G₁ e G₂, respectivamente.

$$i(t) = I(e^{-at} - e^{-bt}) \quad (5.1)$$

$$v(t) = V(e^{-ct} - e^{-dt}). \quad (5.2)$$

Tabela 5.1 – Parâmetros de impulso calculados para a configuração de aterramento G₁.

Tensão de Carregamento do Gerador (kV)	Parâmetros calculados para o impulso de corrente			Parâmetros calculados para o impulso de tensão		
	I	a (s ⁻¹)	b (s ⁻¹)	V	c (s ⁻¹)	d (s ⁻¹)
20	3465	25700	200700	8189	26520	144400
25	3967	25520	201800	9450	26430	141800

Fonte: Produzida pelo autor.

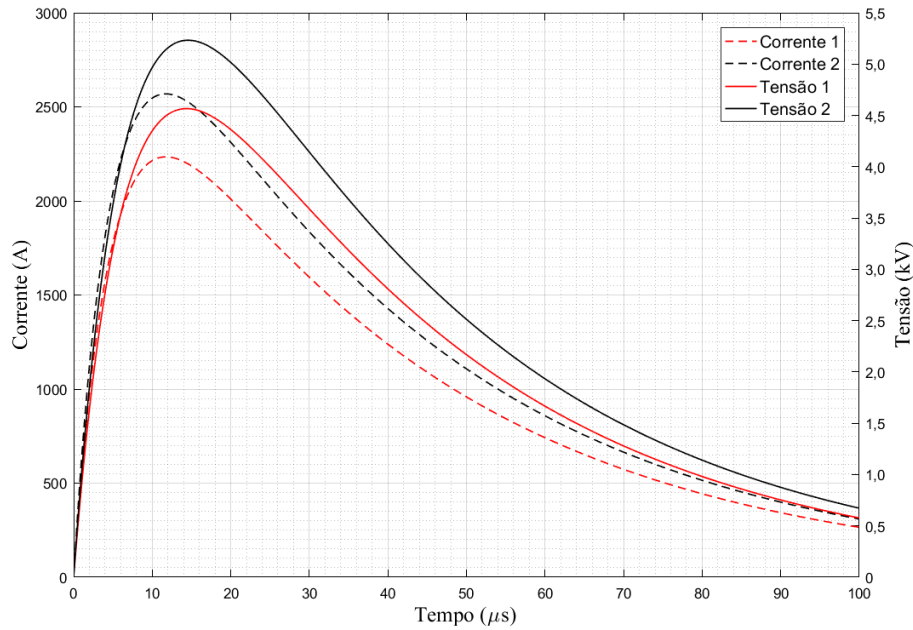
Tabela 5.2 – Parâmetros de impulso calculados para a configuração de aterramento G₂.

Tensão de Carregamento do Gerador (kV)	Parâmetros calculados para o impulso de corrente			Parâmetros calculados para o impulso de tensão		
	I	a (s ⁻¹)	b (s ⁻¹)	V	c (s ⁻¹)	d (s ⁻¹)
20	2949	19190	86500	23580	18230	332400
25	4220	21280	77350	29850	18610	318600

Fonte: Produzida pelo autor.

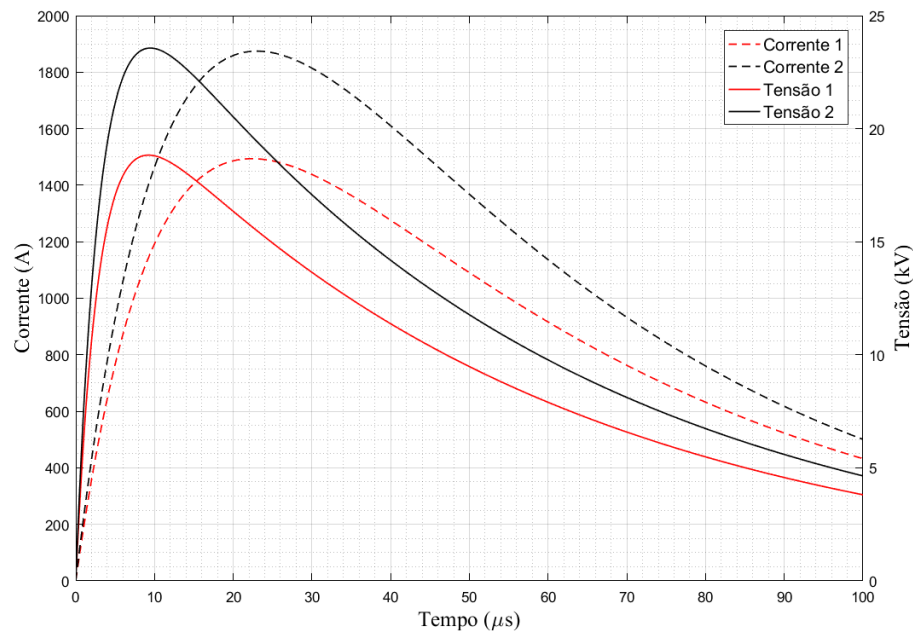
Para a obtenção das curvas de tensão e corrente utilizando os parâmetros obtidos e mostrados nas Tabelas 5.1 e 5.2, uma rotina computacional foi desenvolvida no MATLAB®. Nas Figuras 5.3 e 5.4, pode-se observar as curvas ajustadas para os carregamentos de 20 kV e 25 kV, referentes às configurações de aterramento G₁ e G₂, respectivamente.

Figura 5.3 – Curvas ajustadas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G₁.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.4 – Curvas ajustadas de tensão e corrente em função do tempo para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV referente a configuração de aterramento G₂.



Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4, observa-se as diferenças entre as respostas de cada configuração de aterramento ensaiados. A configuração de aterramento G₁ apresentou resposta predominantemente capacitiva podendo-se observar, pelo gráfico, que a curva de corrente se encontra levemente adiantada em relação a curva de tensão. A configuração de aterramento G₂ apresentou

resposta predominantemente indutiva podendo-se observar, pelo gráfico, que a curva de corrente se encontra levemente atrasada em relação a curva de tensão.

Apesar de terem sido adotadas condições semelhantes durante os ensaios experimentais como, por exemplo, o nível de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos de corrente, as duas configurações de aterramento apresentaram respostas distintas. Com isso, tem-se que a resistividade do solo e o próprio arranjo físico do aterramento influenciam diretamente na resposta das malhas.

Por fim, as constatações visuais destacadas nessa seção são comprovadas na seção seguinte.

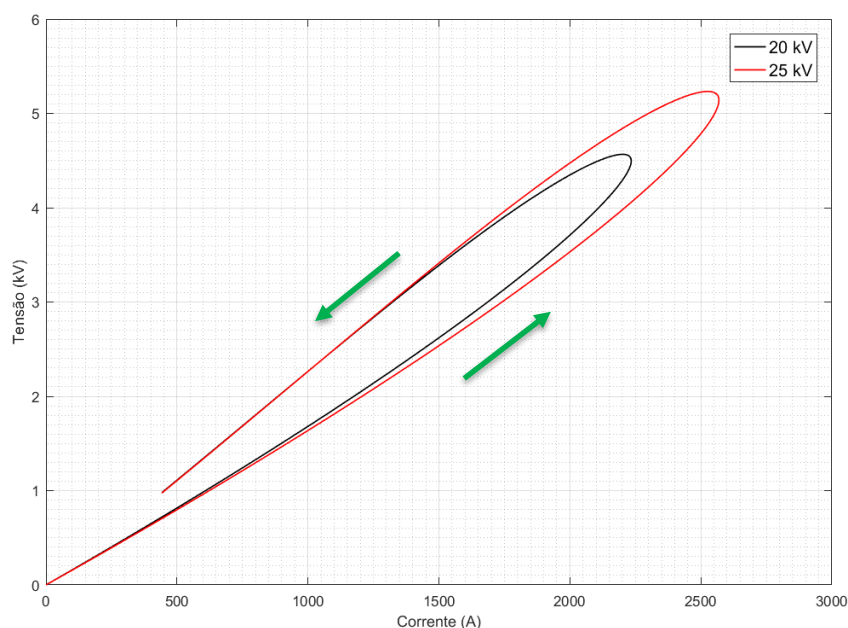
5.3. ETAPA 3

Esta etapa consistiu no desenvolvimento do procedimento para identificação dos efeitos transitórios. Inicialmente, os efeitos indutivos ou capacitivos foram identificados. Em seguida, os efeitos ionizantes foram identificados.

5.3.1. IDENTIFICAÇÃO DOS EFEITOS INDUTIVOS OU CAPACITIVOS

Com o objetivo de identificar a predominância de efeito indutivo ou capacitivo para as configurações de aterramento G_1 e G_2 , foram utilizadas as curvas de tensão *versus* corrente ($V \times I$) a partir dos dados obtidos em campo. Com isso, nas Figuras 5.5 e 5.6 são mostradas as curvas $V \times I$ para os níveis de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos referente às configurações de aterramento G_1 e G_2 , respectivamente.

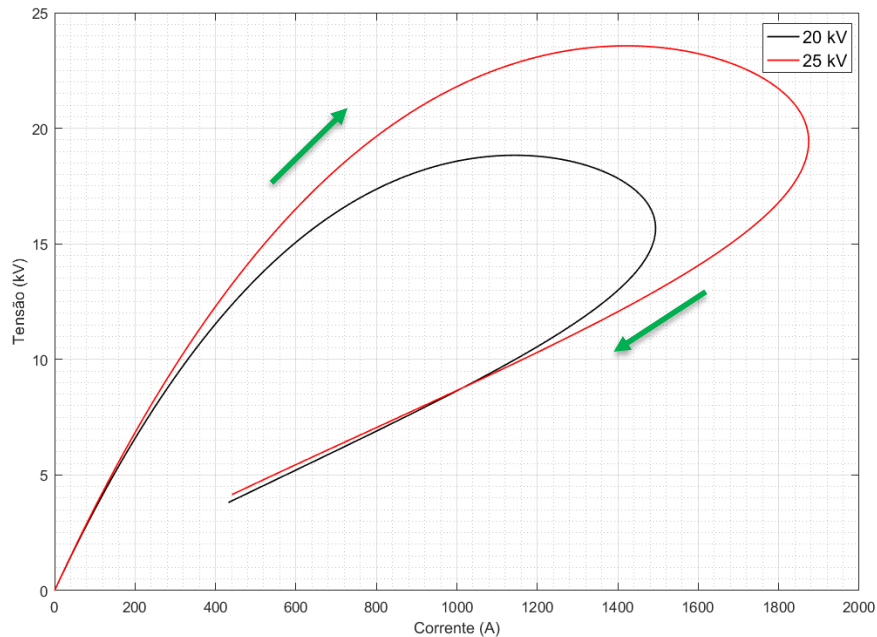
Figura 5.5 – Curvas $V \times I$ da resposta do aterramento G_1 para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.



Fonte: Produzida pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 5.5, as setas verdes indicam o sentido de início e fim das curvas $V \times I$, podendo-se observar que o valor máximo de corrente ocorreu primeiro que o valor máximo de tensão, indicando que o sistema de aterramento apresentou efeito capacitivo. Como visto anteriormente, pela análise da Figura 5.3 também se constatou o efeito capacitivo na resposta desse aterramento.

Figura 5.6 – Curvas $V \times I$ da resposta do aterramento G_2 para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.



Fonte: Produzida pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 5.6, as setas verdes mostram o sentido de início e fim das curvas de $V \times I$, podendo-se observar que o valor máximo da tensão ocorreu primeiro que o valor máximo de corrente, indicando que o sistema de aterramento apresentou efeito indutivo. Como visto anteriormente, pela análise da Figura 5.4 também se constatou o efeito indutivo na resposta desse aterramento.

5.3.2. IDENTIFICAÇÃO DOS EFEITOS IONIZANTES

Com o objetivo de identificar um possível efeito ionizante para as configurações de aterramento G_1 e G_2 , as curvas de corrente para as configurações de aterramento foram normalizadas, tomando-se o valor de pico da corrente como base para a normalização. De forma análoga, o procedimento descrito foi realizado para as curvas de tensão. O procedimento pode ser melhor entendido a partir da Equação (5.3) mostrada a seguir:

$$\frac{v(t)}{i_{max}} = Z(t) \frac{i(t)}{i_{max}} \quad (5.3)$$

em que:

$v(t)$: tensão em função do tempo (V);

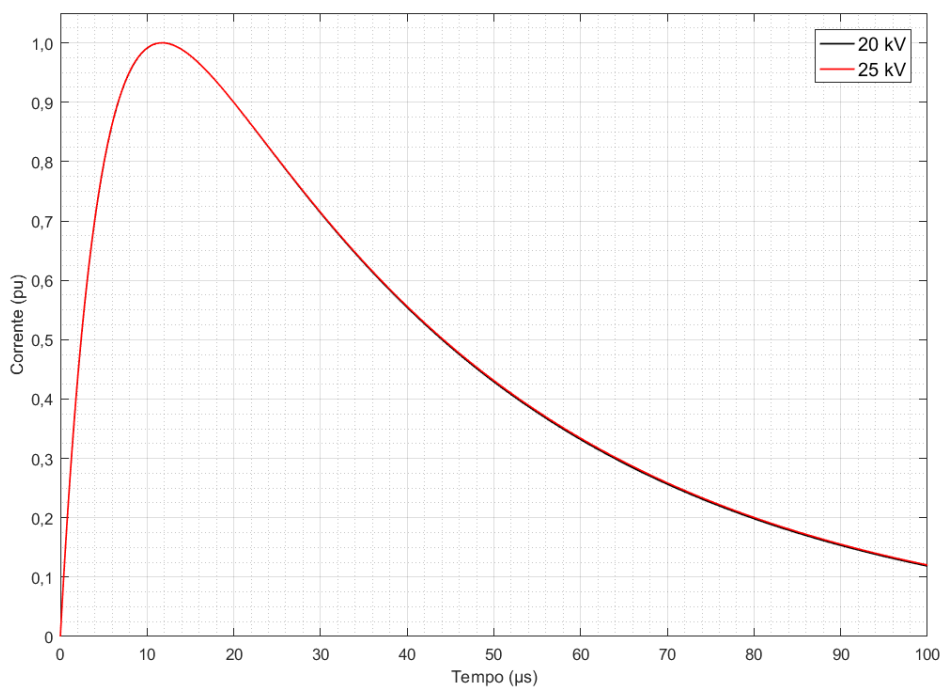
$Z(t)$: impedância do aterramento (Ω);

$i(t)$: corrente em função do tempo (A);

i_{max} : valor de pico da corrente elétrica (A).

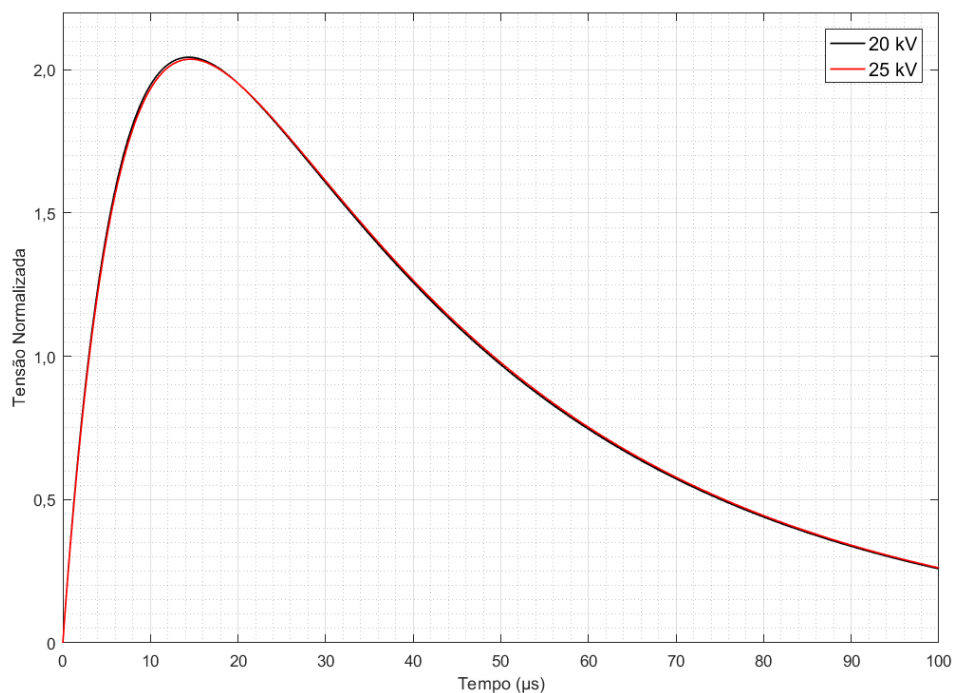
Dessa forma, a presença de fenômenos não lineares, caracterizados pela ionização do solo, pôde ser identificada pela comparação entre as curvas de tensão normalizadas referentes às tensões de carregamento de 20 kV e 25 kV. Nas Figuras 5.7 e 5.8 podem ser observadas, respectivamente, as curvas de corrente e tensão normalizadas para a configuração de aterramento G_1 . Nas Figuras 5.9 e 5.10 podem ser observadas, respectivamente, as curvas de corrente e tensão normalizadas para a configuração de aterramento G_2 .

Figura 5.7 – Curvas de corrente normalizadas da resposta do aterramento G_1 para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.



Fonte: Produzida pelo autor.

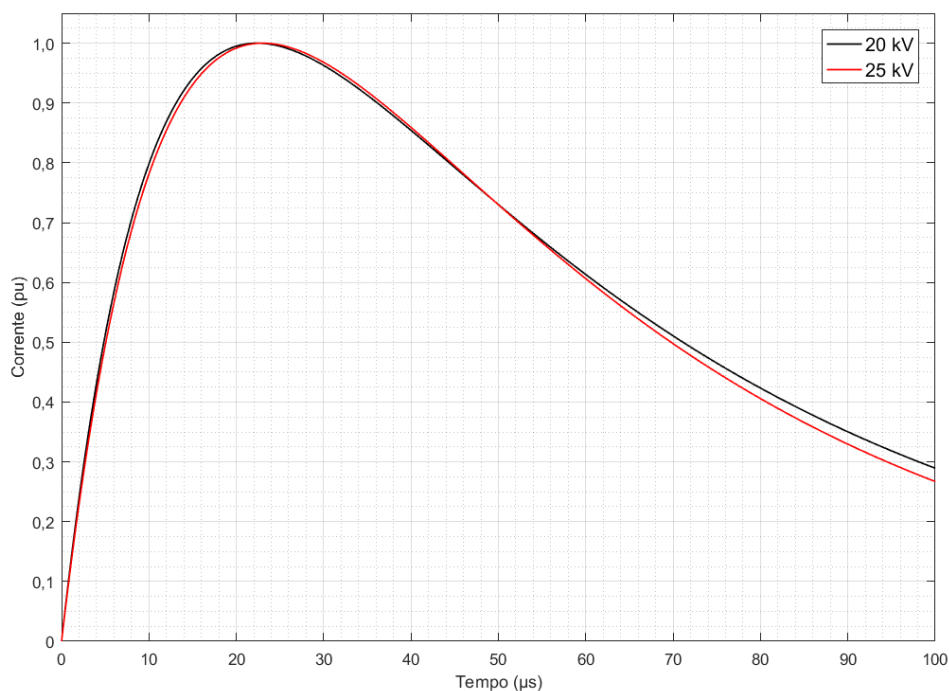
Figura 5.8 – Curvas de tensão normalizadas da resposta do aterramento G_1 para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.



Fonte: Produzida pelo autor.

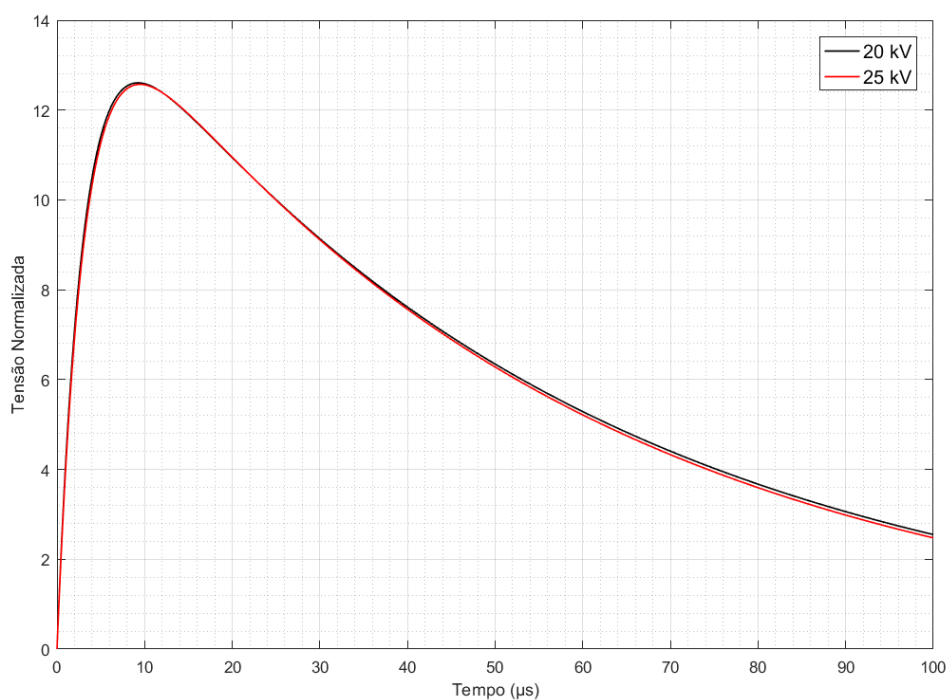
A partir da análise das Figuras 5.7 e 5.8, observa-se um comportamento semelhante tanto para as curvas de tensão quanto para as curvas de corrente para os carregamentos de 20 kV e 25 kV. Dessa forma, a tendência equivalente entre as curvas normalizadas indica que não há ionização do solo. Tal fato é destacado em alguns trabalhos da literatura que expõem que sistemas de aterramento complexos geralmente não apresentam ionização por conta da redução da densidade de corrente nas hastes de aterramento (PEDROSA *et al.*, 2011; e ALÍPIO e VISACRO, 2013).

Figura 5.9 – Curvas de corrente normalizadas da resposta do aterramento G_2 para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.10 – Curvas de tensão normalizadas da resposta do aterramento G_2 para os carregamentos de 20 kV e 25 kV.



Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da análise das Figuras 5.9 e 5.10, observa-se um comportamento semelhante tanto para as curvas de tensão quanto para as curvas de corrente para os

carregamentos de 20 kV e 25 kV. Então, de forma análoga ao caso anterior, a tendência equivalente entre as curvas normalizadas indica que não há ionização do solo.

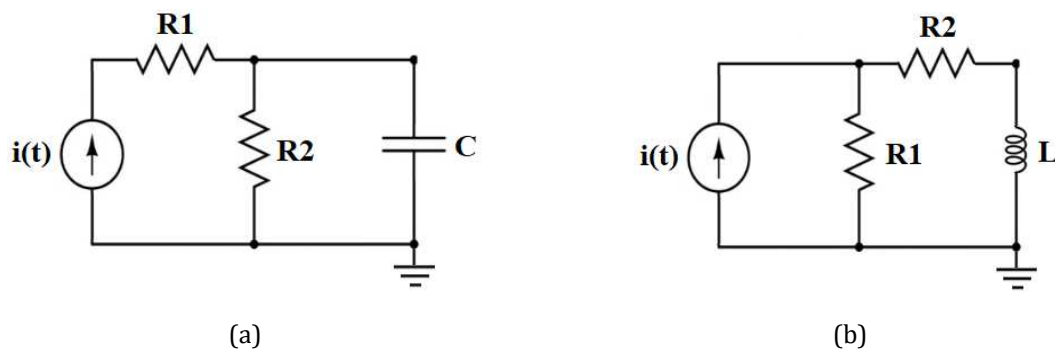
5.4. ETAPA 4

Esta etapa consistiu na proposição de modelos elétricos que representassem os sistemas de aterramento ensaiados e que apresentaram respostas indutiva ou capacitiva. Dessa forma, a modelagem do desempenho do sistema de aterramento por circuito elétrico viabiliza o acoplamento desses modelos a modelos que representem os supressores de surtos e, com isso, possibilita estudos de coordenação de isolamento.

5.4.1. MODELOS PROPOSTOS

Os modelos elétricos propostos para a representação de aterramentos são baseados nas respostas experimentais apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.6. Para representar os efeitos indutivos e capacitivos, dois circuitos elétricos foram propostos, conforme apresentados na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Circuito proposto para os modelos elétricos: (a) capacitivo e (b) indutivo.



Fonte: Produzida pelo autor.

5.4.1.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA R_1

Para o circuito capacitivo, mostrado na Figura 5.11 (a), considera-se que, no instante inicial ($t=0$) de um surto, o capacitor C encontra-se descarregado. Assim, o ramo RC inicialmente se comporta como um curto-circuito, dado que $v_{R2}(t=0) = 0$ e a dinâmica inicial do aterramento é definida pelo resistor R_1 . Assim, tem-se que:

$$R_1 = \frac{dv}{di}(0). \quad (5.4)$$

No caso de usar o modelo de representação de dupla exponencial, apresentado nas Equações (5.1) e (5.2), para modelar as formas de onda impulsivas, a Equação (5.4) pode ser reescrita como:

$$R_1 = \frac{V(d - c)}{I(b - a)}. \quad (5.5)$$

em que:

a: parâmetro calculado para o impulso de corrente (Tabelas 5.1 e 5.2);

b: parâmetro calculado para o impulso de corrente (Tabelas 5.1 e 5.2);

c: parâmetro calculado para o impulso de tensão (Tabelas 5.1 e 5.2);

d: parâmetro calculado para o impulso de tensão (Tabelas 5.1 e 5.2).

Para o circuito indutivo, mostrado na Figura 5.11 (b), considera-se que, no instante inicial ($t=0$) de um surto, o indutor L encontra-se descarregado, ou seja, não há corrente circulando por ele. Com isso, o ramo R_2L pode ser considerado aberto, permanecendo apenas o resistor R_1 do circuito. Assim, o valor da resistência de R_1 do circuito indutivo é estimado de modo análogo ao caso capacitivo, utilizando as Equações (5.4) e (5.5).

5.4.1.2. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA R_2

Para o circuito capacitivo, o valor da resistência de R_2 é estimado pelo ponto da curva $V \times I$ que possui a derivada $\frac{di}{dv}$ igual à inclinação inicial da curva. A inclinação inicial é dada por:

$$\frac{dv}{di} = R_1. \quad (5.6)$$

Além disso, para o circuito da Figura 5.11 (a), a tensão sobre a fonte de corrente pode ser expressa como:

$$v = R_1 i + v_{R_2}. \quad (5.7)$$

Derivando a Equação (5.7) no tempo e usando a Equação (5.6), tem-se que, no instante de tempo t_2 , quando a inclinação da curva $V \times I$ é igual à inclinação inicial, $\frac{dv_{R_2}}{dt} = 0$. Portanto, neste instante, a corrente no capacitor é zero e:

$$v(t_2) = (R_1 + R_2)i(t_2). \quad (5.8)$$

Assim, o valor da resistência de R_2 do circuito capacitivo é determinado como:

$$R_2 = \frac{v(t_2)}{i(t_2)} - R_1. \quad (5.9)$$

Para o circuito indutivo, tem-se a mesma constatação mostrada na Equação (5.6). Dessa forma, analisando o circuito da Figura 5.11 (b), tem-se:

$$i = \frac{v}{R_1} + i_2. \quad (5.10)$$

Ao derivar a Equação (5.10) e, novamente, usar a Equação (5.6), tem-se que, no instante de tempo t_2 , quando a inclinação da curva $V \times I$ é igual à inclinação inicial, $\frac{di_2}{dt} = 0$. Logo, a tensão v está aplicada totalmente no resistor R_2 e, nesse instante:

$$i(t_2) = v(t_2) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (5.11)$$

Portanto, o valor da resistência de R_2 do circuito indutivo é determinado como:

$$R_2 = 1 / \left[\frac{i(t_2)}{v(t_2)} - \frac{1}{R_1} \right]. \quad (5.12)$$

5.4.1.3. DETERMINAÇÃO DA CAPACITÂNCIA C

O valor da capacitância C pode ser determinado a partir do instante de pico da corrente, denotado por t_1 , ou seja, quando $t = t_1$, $\frac{di}{dt} = 0$. Portanto, ao derivar a Equação (5.7) no tempo, tem-se que:

$$\frac{dv_{R_2}}{dt}(t_1) = \frac{dv}{dt}(t_1). \quad (5.13)$$

Além disso, a relação entre a tensão total v e a tensão v_{R_2} no ramo R_2C é dada por:

$$v_{R_2} = v - R_1 i. \quad (5.14)$$

Assim, ao substituir as Equações (5.13) e (5.14) na Equação (5.15) para a corrente no ramo R_2C :

$$i = \frac{v_2}{R_2} + C \frac{dv_2}{dt}, \quad (5.15)$$

o valor da capacitância C pode ser calculado como:

$$C = \left[\left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) i(t_1) - \frac{v(t_1)}{R_2} \right] / \frac{dv}{dt}(t_1). \quad (5.16)$$

5.4.1.4. DETERMINAÇÃO DA INDUTÂNCIA L

A indutância L pode ser determinada considerando-se diferentes instantes de tempo. Durante uma descarga atmosférica, o valor do pico de sobretensão é geralmente considerado como um parâmetro crítico. Assim, o modelo proposto considera o tempo de

pico de tensão t_1 para o cálculo de indutância, ou seja, quando $t = t_1, \frac{dv}{dt} = 0$. Portanto, ao derivar a Equação (5.10) no tempo, tem-se que:

$$\frac{di_2}{dt}(t_1) = \frac{di}{dt}(t_1). \quad (5.17)$$

Além disso, a relação entre a corrente total i e a corrente i_{R2} no ramo RL é dada por:

$$i_{R2} = i - \frac{v}{R_1}. \quad (5.18)$$

Assim, ao substituir as Equações (5.17) e (5.18) na Equação (5.19) para a tensão no ramo RL :

$$v = R_2 i_{R2} + L \frac{di_2}{dt}, \quad (5.19)$$

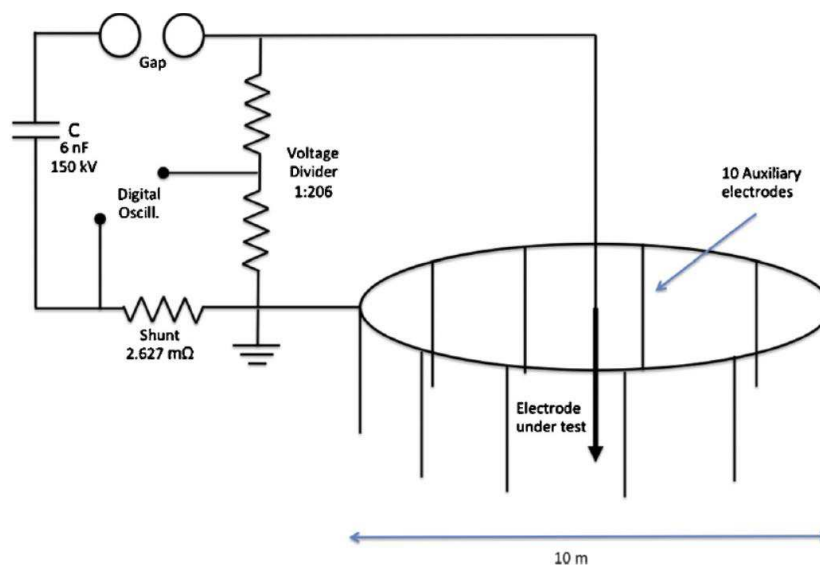
o valor da indutância L pode ser calculado como:

$$L = \left[\left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) v(t_1) - R_2 i(t_1) \right] / \frac{di}{dt}(t_1). \quad (5.20)$$

5.4.2. MODELO DE ALTAFIM ET AL. (2016)

No trabalho desenvolvido por Altafim *et al.* (2016), os autores propuseram um modelo baseado em circuitos elétricos capaz de representar os efeitos transitórios de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente. Eles realizaram testes experimentais em um sistema de aterramento do modelo em escala, como mostrado na Figura 5.12.

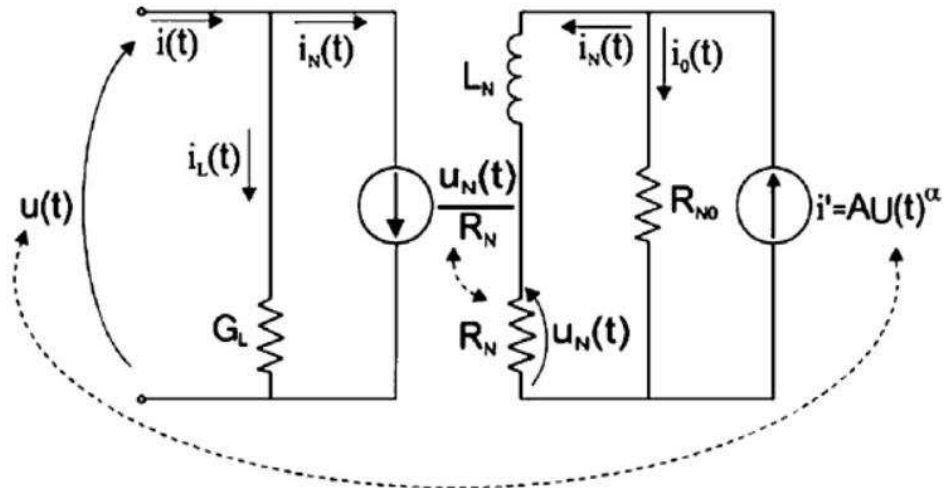
Figura 5.12 – Circuito de teste experimental e modelo em escala usado por Altafim *et al.* (2016).



Fonte: (ALTAFIM *et al.*, 2016).

Os autores propuseram o circuito apresentado na Figura 5.13 para representar a resposta ao impulso do sistema de aterramento, bem como os métodos para calcular os parâmetros do circuito através dos dados obtidos nos testes.

Figura 5.13 – Representação esquemática do circuito proposto por Altafim *et al.* (2016).



Fonte: (ALTAFIM *et al.*, 2016).

O desenvolvimento das equações e a definição dos parâmetros do circuito proposto são detalhados em Altafim *et al.* (2016).

5.4.3. ANÁLISE DA RESPOSTA DOS MODELOS PROPOSTOS

A análise da resposta dos modelos foi feita utilizando: duas configurações dos sistemas de aterramento ensaiados, G_1 e G_2 ; a configuração do sistema de aterramento de Altafim *et al.* (2016); os modelos propostos (indutivo e capacitivo) e o modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016). A configuração do sistema de aterramento de Altafim *et al.* (2016) consiste em uma única haste de aterramento reproduzida em modelo reduzido.

Os circuitos propostos da Figura 5.11 e o circuito apresentado por Altafim *et al.* (2016) foram simulados no *software* PSIM®. Como entradas de circuito, foram considerados o impulso de corrente, de acordo com a Equação (5.1), e os parâmetros calculados para os níveis de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV. As simulações tiveram como saída as formas de onda de tensão ao longo do tempo. Para avaliar a confiabilidade do modelo proposto, a forma de onda da tensão simulada foi comparada com as tensões medidas por meio das métricas de desempenho R^2 e RMSE. A análise da resposta dos modelos resultou em três casos diferentes, descritos nas subseções a seguir.

5.4.3.1. CASO 1

O Caso 1 consistiu na modelagem da resposta impulsiva da configuração de aterramento G_1 utilizando o modelo proposto em sua forma capacitiva, mostrado na Figura 13(a), e o modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016).

O modelo capacitivo proposto foi escolhido após a caracterização da configuração de aterramento G_1 por meio da sua curva $V \times I$ mostrada na Figura 5.5. Em seguida, as Equações (5.5), (5.9) e (5.16) foram aplicadas para determinar os valores dos elementos R_1 , R_2 e C por meio de uma rotina computacional tendo como entrada as formas de onda da tensão e da corrente, mostradas na Figura 5.5. Na Tabela 5.3 são apresentados os valores dos elementos de circuito determinados.

Tabela 5.3 – Valores dos elementos do circuito calculados para a configuração de aterramento G_1 .

R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	C (μF)
1,558	0,618	10,600

Fonte: Produzida pelo autor.

Em seguida, a metodologia utilizada por Altafim *et al.* (2016) foi implementada em uma rotina computacional para determinação dos valores dos elementos de circuito apresentados por Altafim *et al.* (2016), tendo como entrada as formas de onda da tensão e da corrente, mostradas na Figura 5.5. Na Tabela 5.4 são apresentados os valores dos elementos de circuito determinados.

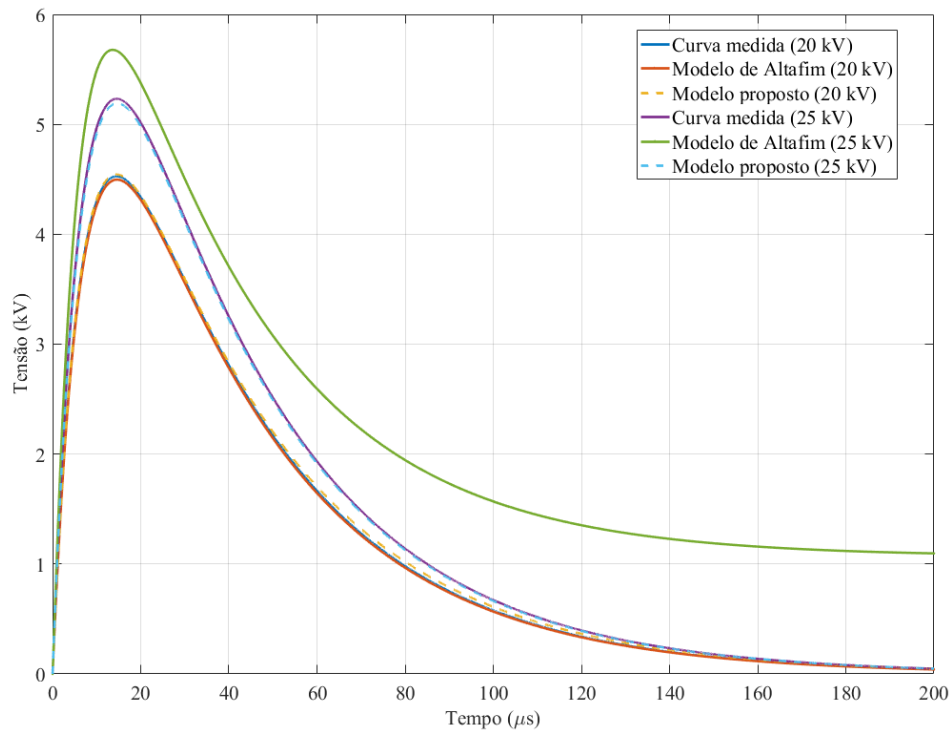
Tabela 5.4 – Valores dos elementos do circuito calculados usando a metodologia de Altafim *et al.* (2016).

R_L (Ω)	R_{No} (Ω)	R_N ($\text{m}\Omega$)	L_N (μH)	A	α
1,558	20,580	20,580	100	-0,087	1,088

Fonte: Produzida pelo autor.

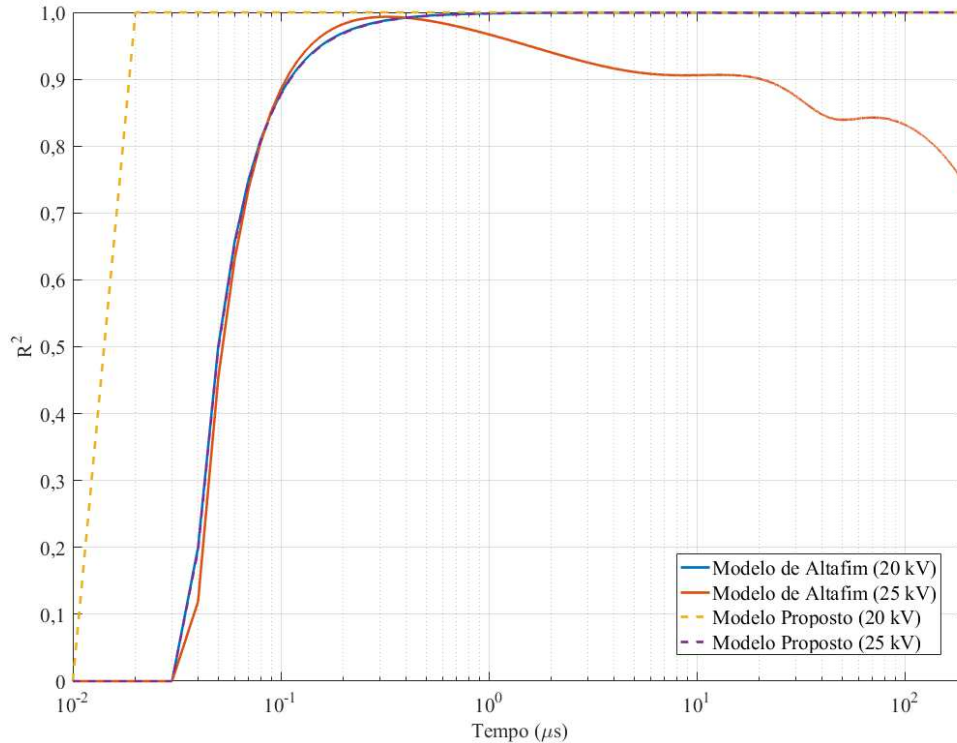
Na Figura 5.14, as formas de onda da tensão obtidas das simulações são mostradas no domínio do tempo. Nas Figuras 5.15 e 5.16 são mostrados os valores de R^2 e RMSE determinados ao longo do tempo referentes aos valores medidos e simulados das curvas de tensão, respectivamente.

Figura 5.14 – Tensão simulada aplicando os métodos para a configuração de aterramento G_1 .



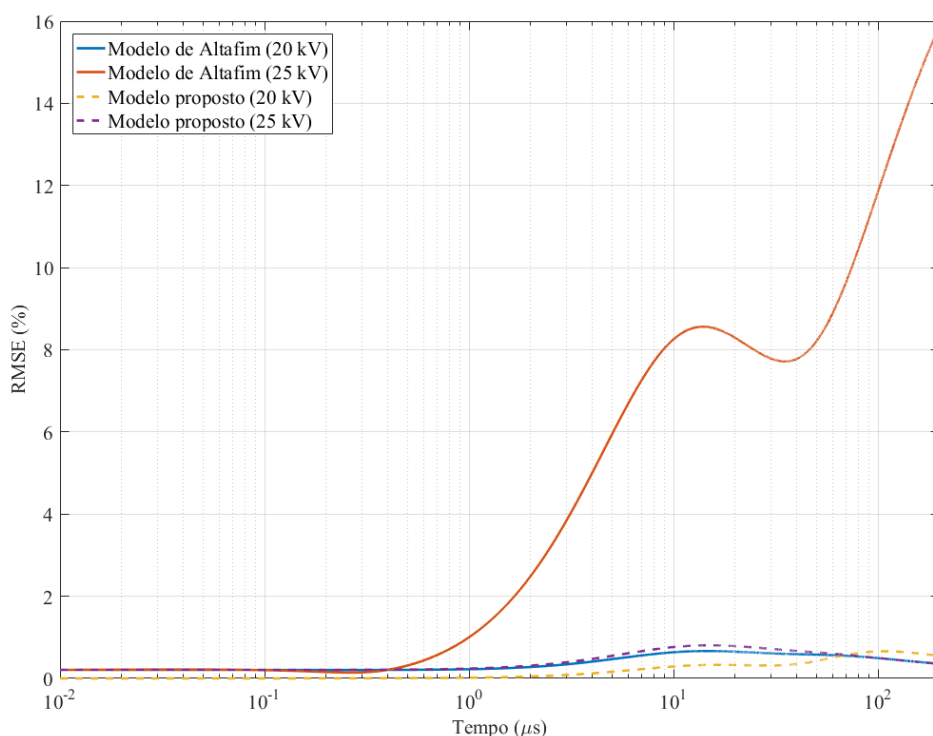
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.15 – Coeficiente R^2 ao longo do tempo para as simulações da configuração de aterramento G_1 .



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.16 – RMSE determinado para a resposta simulada da configuração de aterramento G₁.



Fonte: Produzida pelo autor.

As métricas de erro obtidas para a avaliação do circuito capacitivo proposto e do circuito apresentado por Altafim *et al.* (2016) são mostradas na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Métricas de erro obtidas para o Caso 1.

	Tensão de carregamento do Gerador (kV)	R ²	Máximo RMSE (%)	Erro no pico de tensão (%)
Circuito Capacitivo	20	0,999	0,7	0,4
	25	0,999	1,0	0,9
Circuito apresentado por Altafim <i>et al.</i> (2016)	20	0,999	0,7	0,7
	25	0,737	15,9	8,5

Fonte: Produzida pelo autor.

Ao se comparar os resultados a partir das Figuras 5.14, 5.15 e 5.16, constata-se que o circuito capacitivo proposto foi mais eficiente em representar a resposta do sistema de aterramento G₁. Sua aplicação resultou em erros menores e em valores de pico de sobretensão mais próximos do valor medido. Ambos os modelos apresentaram melhores resultados para o impulso com carregamento de 20 kV.

Uma possível explicação para os maiores erros observados na resposta do modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016) pode estar associada à concepção do modelo, uma vez que foi desenvolvido com foco em sistemas de aterramento com resposta indutiva.

5.4.3.2. CASO 2

O Caso 2 consistiu na modelagem da resposta impulsiva da configuração de aterramento G_2 utilizando o modelo proposto em sua forma indutiva, mostrado na Figura 13(b), e o modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016).

O modelo indutivo proposto foi escolhido após a caracterização da configuração de aterramento G_2 por meio da sua curva $V \times I$ mostrada na Figura 5.6. Em seguida, as Equações (5.5), (5.12) e (5.20) foram aplicadas para determinar os valores dos elementos R_1 , R_2 e L por meio de uma rotina computacional tendo como entrada as formas de onda da tensão e da corrente, mostradas na Figura 5.6. Na Tabela 5.6 são apresentados os valores dos elementos de circuito determinados.

Tabela 5.6 – Valores dos elementos do circuito calculados para a configuração de aterramento G_2 .

R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	C (μF)
37,58	13,41	153,01

Fonte: Produzida pelo autor.

Em seguida, a metodologia utilizada por Altafim *et al.* (2016) foi implementada em uma rotina computacional para determinação dos valores dos elementos de circuito apresentados por Altafim *et al.* (2016), tendo como entrada as formas de onda da tensão e da corrente, mostradas na Figura 5.6. Na Tabela 5.7 são apresentados os valores dos elementos de circuito determinados.

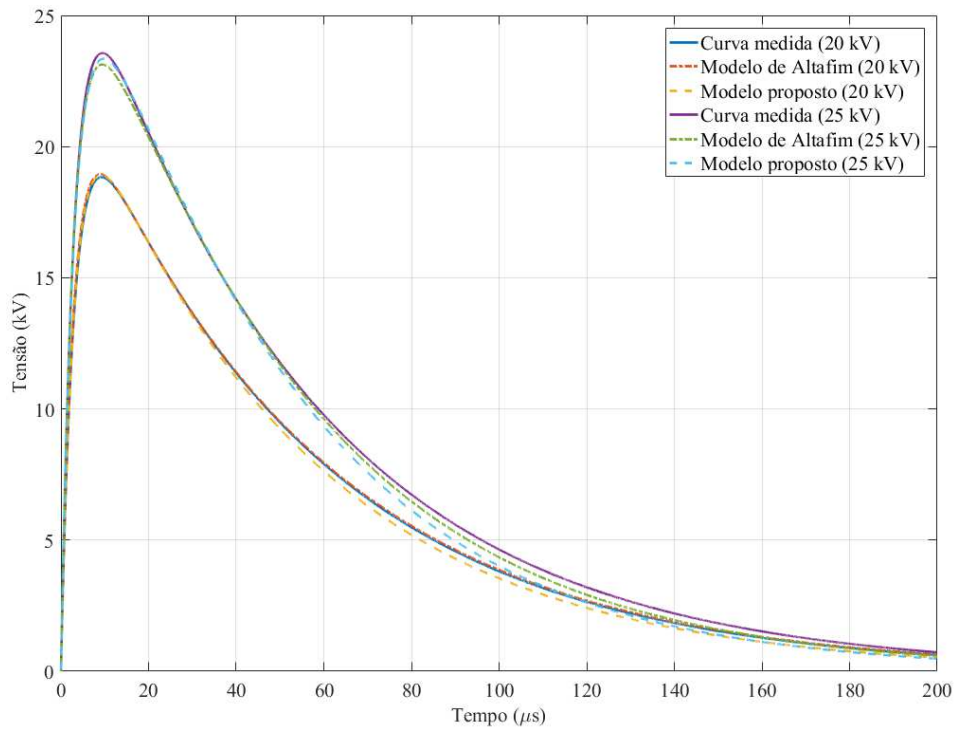
Tabela 5.7 – Valores dos elementos do circuito calculados usando a metodologia de Altafim *et al.* (2016).

R_L (Ω)	R_{No} (Ω)	R_N ($m\Omega$)	L_N (μH)	A	α
37,491	8,631	8,631	100	0,0329	1,0842

Fonte: Produzida pelo autor.

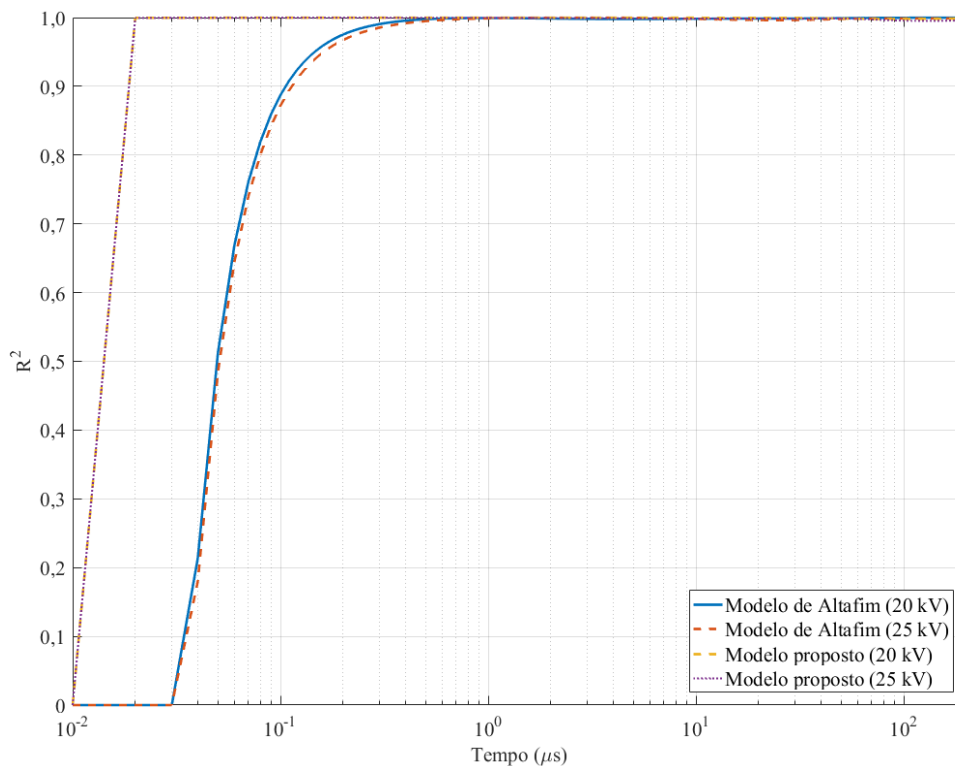
Na Figura 5.17, as formas de onda da tensão obtidas das simulações são mostradas no domínio do tempo. Nas Figuras 5.18 e 5.19 são mostrados os valores de R^2 e RMSE determinados ao longo do tempo referentes aos valores medidos e simulados das curvas de tensão, respectivamente.

Figura 5.17 – Tensão simulada aplicando os métodos para a configuração de aterramento G_2 .



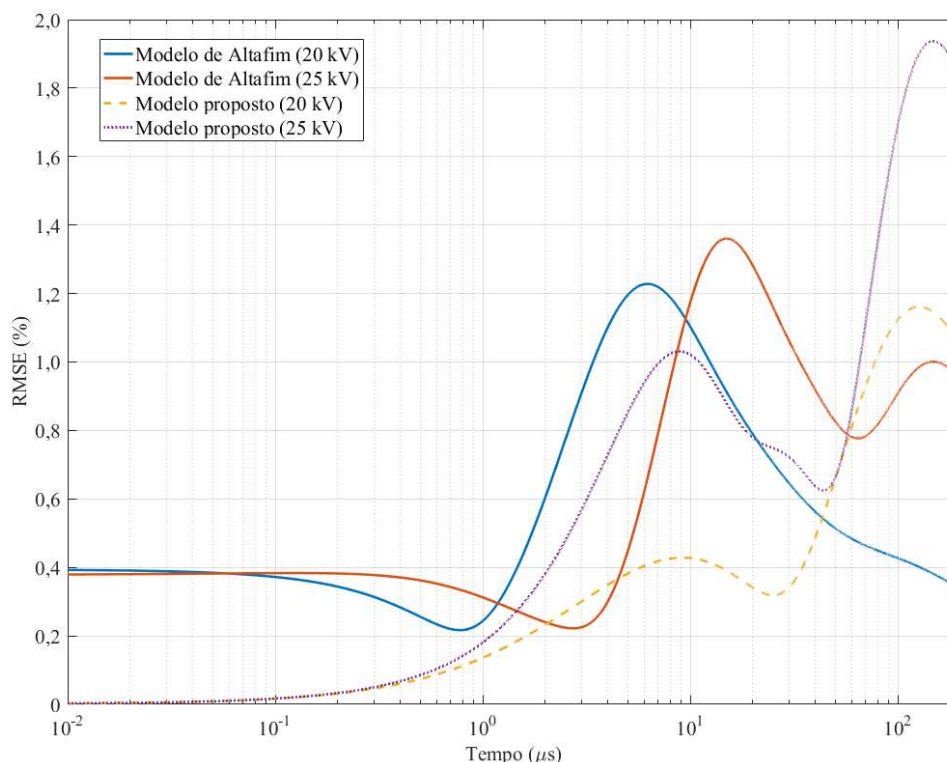
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.18 – Coeficiente R^2 ao longo do tempo para as simulações da configuração de aterramento G_2 .



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.19 – RMSE determinado para a resposta simulada da configuração de aterramento G₂.



Fonte: Produzida pelo autor.

As métricas de erro obtidas para a avaliação do circuito indutivo proposto e do circuito apresentado por Altafim *et al.* (2016) são mostradas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Métricas de erro obtidas para o Caso 2.

	Tensão de carregamento do Gerador (kV)	R ²	Máximo RMSE (%)	Erro no pico de tensão (%)
Circuito Indutivo	20	0,999	1,2	0,4
	25	0,996	1,9	0,9
Circuito apresentado por Altafim <i>et al.</i> (2016)	20	0,999	1,2	0,6
	25	0,999	1,4	1,9

Fonte: Produzida pelo autor.

Ao se comparar os resultados a partir das Figuras 5.17, 5.18 e 5.19, constata-se que ambos os modelos analisados apresentaram erros relativamente pequenos. O modelo de Altafim *et al.* (2016) apresenta erros menores quando o tempo total do impulso é considerado. No entanto, o modelo indutivo proposto apresenta erros menores durante o tempo de subida e para o pico de tensão. Em resumo, o melhor desempenho do modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016) para o Caso 2, quando comparado ao Caso 1, era esperado devido à essência indutiva do modelo.

5.4.3.3. CASO 3

O Caso 3 consistiu na modelagem da resposta impulsiva da configuração de aterramento de Altafim *et al.* (2016) utilizando o modelo proposto em sua forma indutiva, mostrado na Figura 13(b), e o modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016).

Como entradas de circuito, foram considerados os impulsos de corrente medidos nos ensaios experimentais de Altafim *et al.* (2016) para dois níveis diferentes de carregamento do gerador chamados de (a) e (b), conforme descrito por Altafim *et al.* (2016).

A determinação dos valores dos elementos do circuito indutivo proposto e do circuito apresentado por Altafim *et al.* (2016) foi feita de forma análoga ao Caso 2 e os valores são apresentados nas Tabelas 5.9 e 5.10, respectivamente.

Tabela 5.9 – Valores dos elementos do circuito calculados para a configuração do sistema de aterramento de Altafim *et al.* (2016) usando o circuito indutivo proposto.

$R_1 (\Omega)$	$R_2 (\Omega)$	$C (\mu F)$
385,6	455,1	697,3

Fonte: Produzida pelo autor.

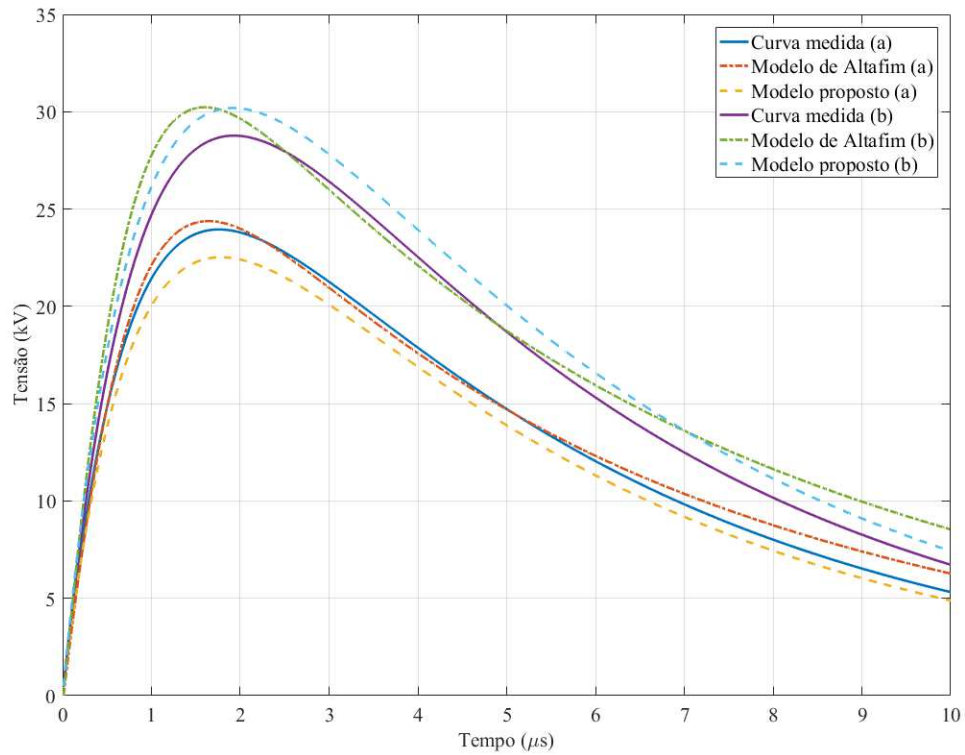
Tabela 5.10 – Valores dos elementos do circuito calculados usando a metodologia de Altafim *et al.* (2016).

$R_L (\Omega)$	$R_{No}(\Omega)$	$R_N (m\Omega)$	$L_N (\mu H)$	A	α
385,0	39,2	39,2	100	$6,08 \cdot 10^{-8}$	2,06

Fonte: Produzida pelo autor.

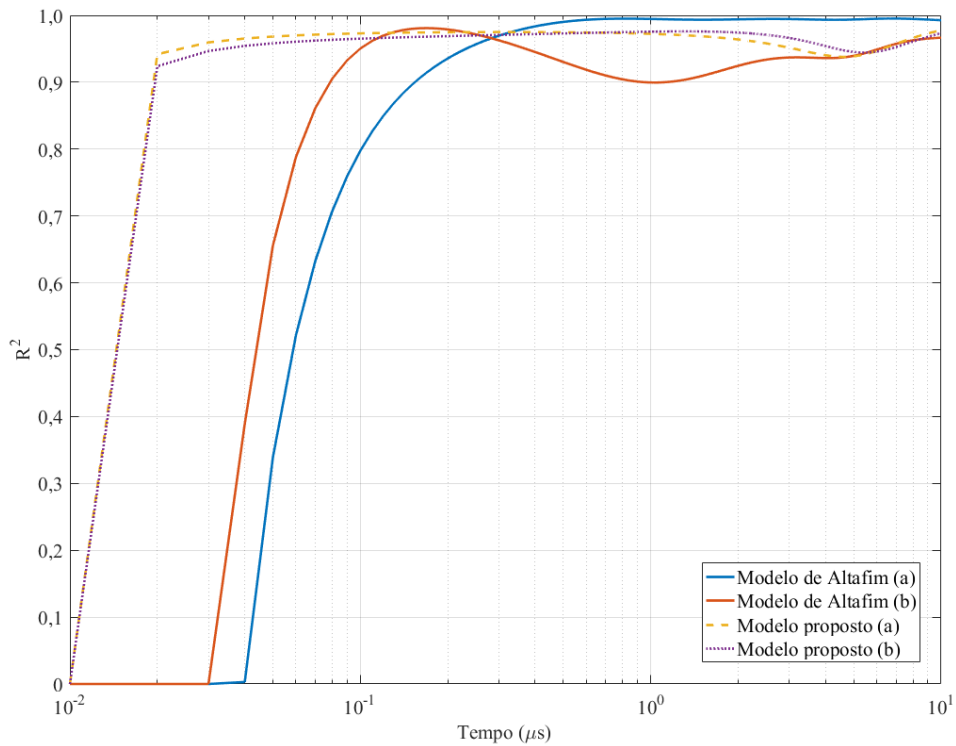
Na Figura 5.20, as formas de onda da tensão obtidas das simulações são mostradas no domínio do tempo. Nas Figuras 5.21 e 5.22 são mostrados os valores de R^2 e RMSE determinados ao longo do tempo referentes aos valores medidos e simulados das curvas de tensão, respectivamente.

Figura 5.20 – Tensão simulada aplicando os métodos para a configuração de aterramento de Altafim *et al.* (2016).



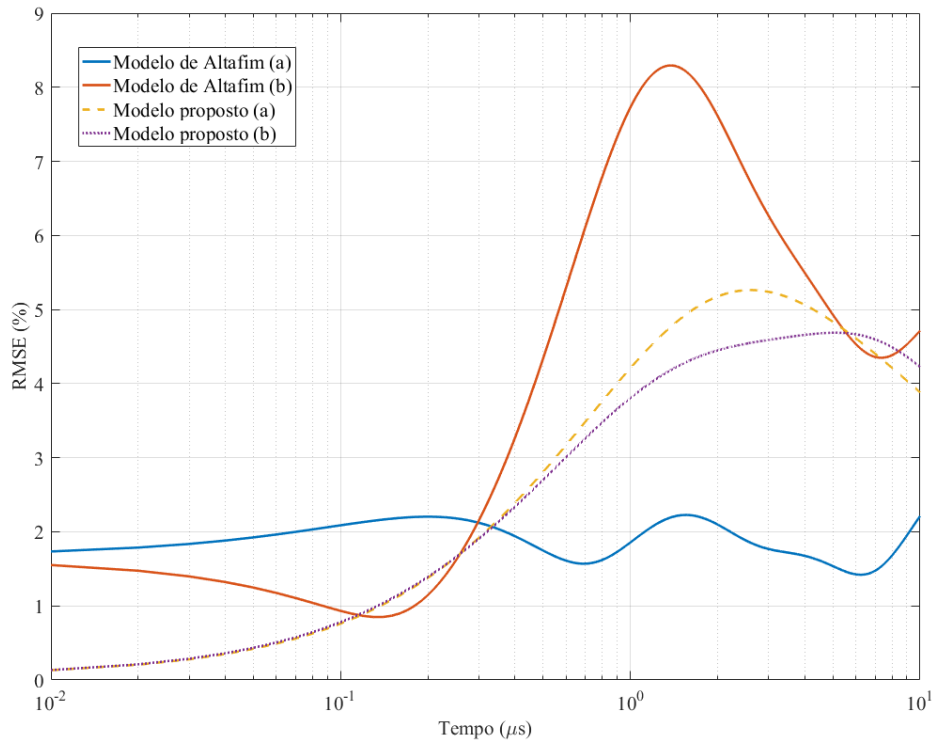
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.21 – Coeficiente R^2 ao longo do tempo para a configuração de aterramento de Altafim *et al.* (2016).



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.22 – RMSE determinado para a configuração de aterramento de Altafim *et al.* (2016).



Fonte: Produzida pelo autor.

As métricas de erro obtidas para a avaliação do circuito indutivo proposto e do circuito apresentado por Altafim *et al.* (2016) são mostradas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Métricas de erro obtidas para o Caso 3.

	Ensaio experimental de Altafim <i>et al.</i> (2016)	R ²	Máximo RMSE (%)	Erro no pico de tensão (%)
Circuito Indutivo	(a)	0,98	5,3	6,0
	(b)	0,97	4,7	4,9
Circuito apresentado por Altafim <i>et al.</i> (2016)	(a)	0,99	2,2	1,8
	(b)	0,97	8,3	5,1

Fonte: Produzida pelo autor.

Ao se comparar os resultados a partir das Figuras 5.20, 5.21 e 5.22, tem-se que ambos os modelos analisados apresentaram erros relativamente pequenos e valores do coeficiente R² maiores ou iguais a 0,97. Além disso, para maiores níveis de tensão do ensaio, o modelo indutivo proposto apresentou, em geral, erros menores quando comparado ao modelo apresentado por Altafim *et al.* (2016). Este fato pode indicar uma característica conservadora do modelo indutivo proposto, representando uma característica atrativa para a aplicação em programas de análise de transitórios.

5.5. ETAPA 5

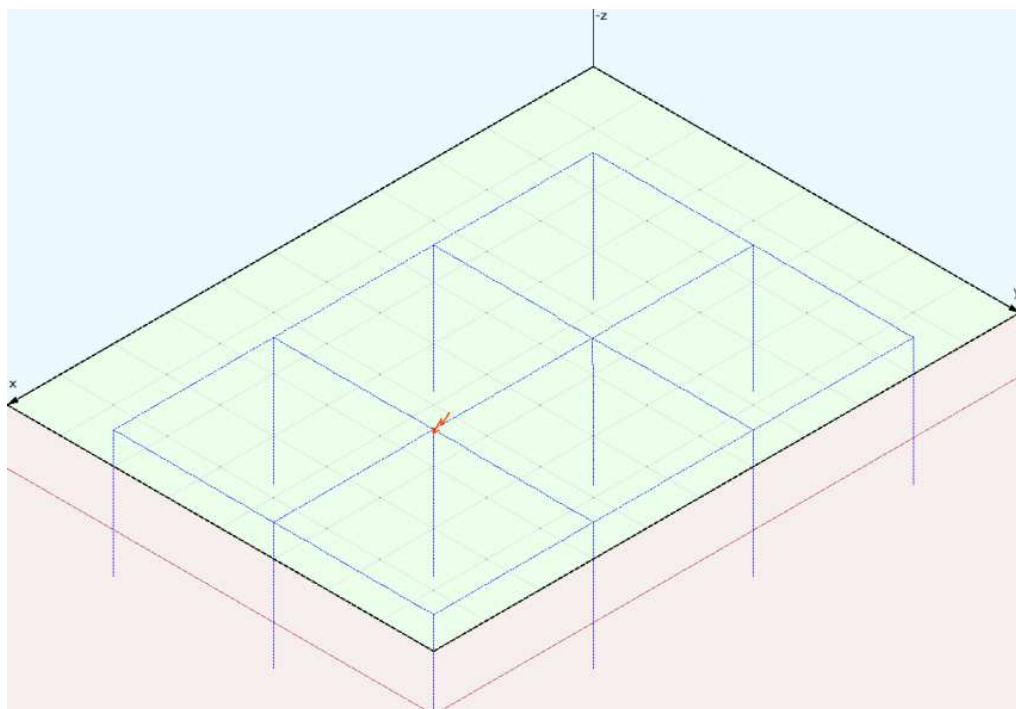
A quinta etapa consistiu na implementação de simulações computacionais considerando a representação dos efeitos indutivos ou capacitivos. Em razão disso, o *software* comercial XGSLab® foi utilizado nas simulações. Os resultados e discussões das simulações foram divididos em 2 casos e estão apresentados nas subseções seguintes.

5.5.1. SIMULAÇÃO DO ATERRAMENTO G_1

O primeiro caso consistiu na implementação de simulações computacionais considerando a representação dos efeitos indutivos ou capacitivos, para a configuração de aterramento G_1 .

Inicialmente, o solo foi caracterizado no XGSLab® a partir dos dados da Tabela 4.1. Em seguida, a geometria do sistema de aterramento foi representada no *software* com a inserção das hastes de aterramento, dos cabos de cobre que interligam as hastes e das conexões entre hastes e cabos em conformidade com a Figura 4.1. A representação da geometria no XGSLab® é mostrada na Figura 5.23.

Figura 5.23 – Representação geométrica da configuração de aterramento G_1 no XGSLab®.



Fonte: Produzida pelo autor.

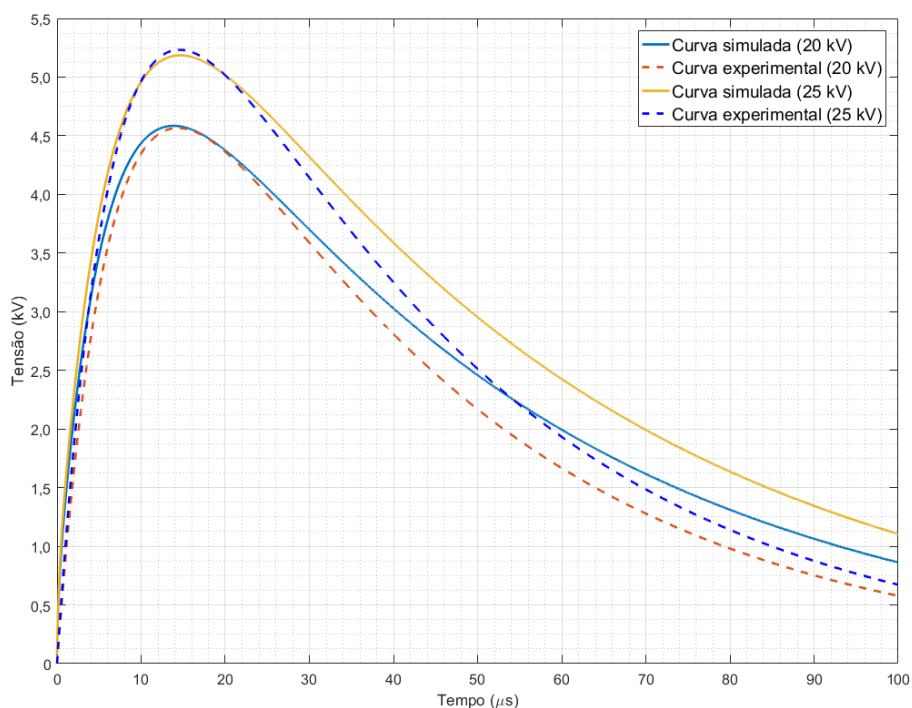
Após a definição das características físicas do aterramento, a representação do impulso de corrente injetado foi realizada conforme a Equação (5.1) e os parâmetros da Tabela 5.1 para as tensões de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV. O ponto de injeção do impulso na simulação está indicado por uma seta vermelha na Figura 5.23.

Por fim, a simulação foi compilada, com isso, os resultados obtidos da simulação são apresentados a partir de gráficos da tensão resultante no topo da haste de injeção do impulso de corrente. Os resultados foram exportados para o MATLAB® e comparados com os resultados obtidos em campo para as tensões de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV.

Inicialmente, as curvas simulada e medida para as tensões de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV apresentaram um baixo grau de similaridade, com defasagem acentuada entre os seus picos de tensão. Com isso, foi realizado ajustes do parâmetro resistividade da primeira camada do solo na simulação, com o objetivo de aproximar as curvas medidas e simuladas e, assim, comprovar a confiabilidade das simulações.

A variação da resistividade apenas para a primeira camada do solo foi realizada por conta da maior influência que essa camada sofre ao longo do ano. O ajuste foi realizado no próprio XGSLab® apenas para a tensão de carregamento de 20 kV e o valor otimizado da resistividade da primeira camada do solo foi 40 Ωm . Com isso, o novo valor de resistividade foi utilizado para simular o aterramento utilizando a tensão de carregamento de 25 kV e, assim, verificar a segurança da otimização. Os resultados das simulações utilizando o valor otimizado da resistividade da primeira camada são mostrados na Figura 5.24.

Figura 5.24 – Gráfico das curvas de tensão resultante para a simulação e os ensaios experimentais considerando valor otimizado da resistividade.



Fonte: Produzida pelo autor.

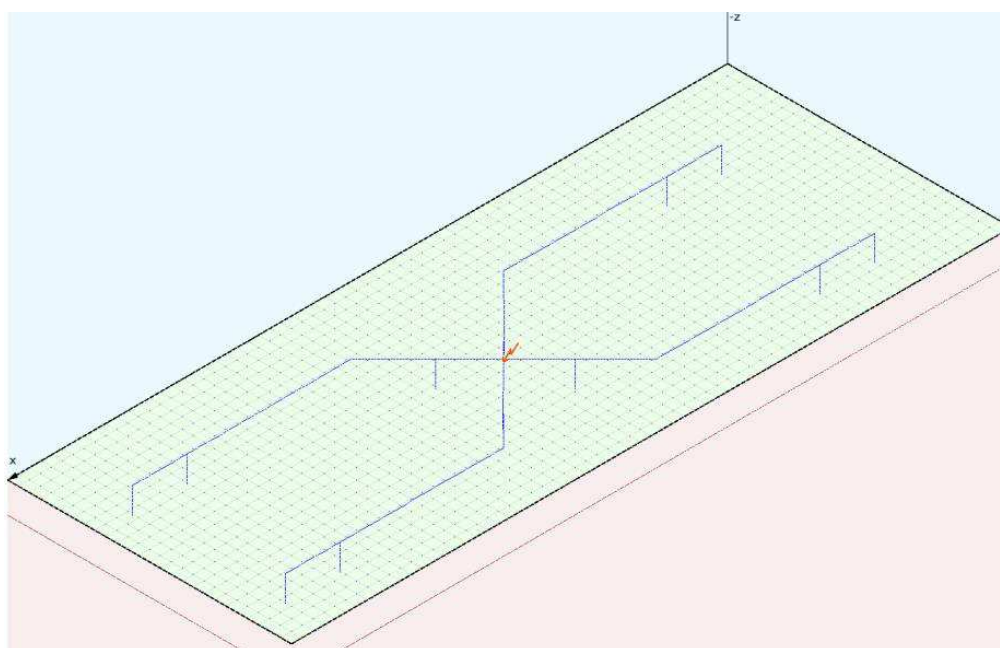
Após o ajuste no valor da resistividade da primeira camada do solo, as curvas de tensão medidas e simuladas apresentaram valor de R^2 de 0,96 para as tensões de carregamento de 20 kV e 25 kV, respectivamente. Com isso, as simulações foram comprovadas devido à proximidade dos valores de R^2 com o valor unitário.

5.5.2. SIMULAÇÃO DO ATERRAMENTO G_2

O segundo caso consistiu na implementação de simulações computacionais considerando a representação dos efeitos indutivos ou capacitivos, para a configuração de aterramento G_2 .

Inicialmente, o solo foi caracterizado no XGSLab® a partir dos dados da Tabela 4.2. Em seguida, a geometria do sistema de aterramento foi representada no *software* com a inserção das hastes de aterramento, dos cabos de cobre que interligam as hastes e das conexões entre hastes e cabos em conformidade com a Figura 4.2. A representação da geometria no XGSLab® é mostrada na Figura 5.25.

Figura 5.25 – Representação geométrica da configuração de aterramento G_2 no XGSLab®.



Fonte: Produzida pelo autor.

Após a definição das características físicas do aterramento, a representação do impulso de corrente injetado foi realizada conforme a Equação (5.1) e os parâmetros da Tabela 5.2 para as tensões de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV. O ponto de injeção do impulso na simulação está indicado por uma seta vermelha na Figura 5.25.

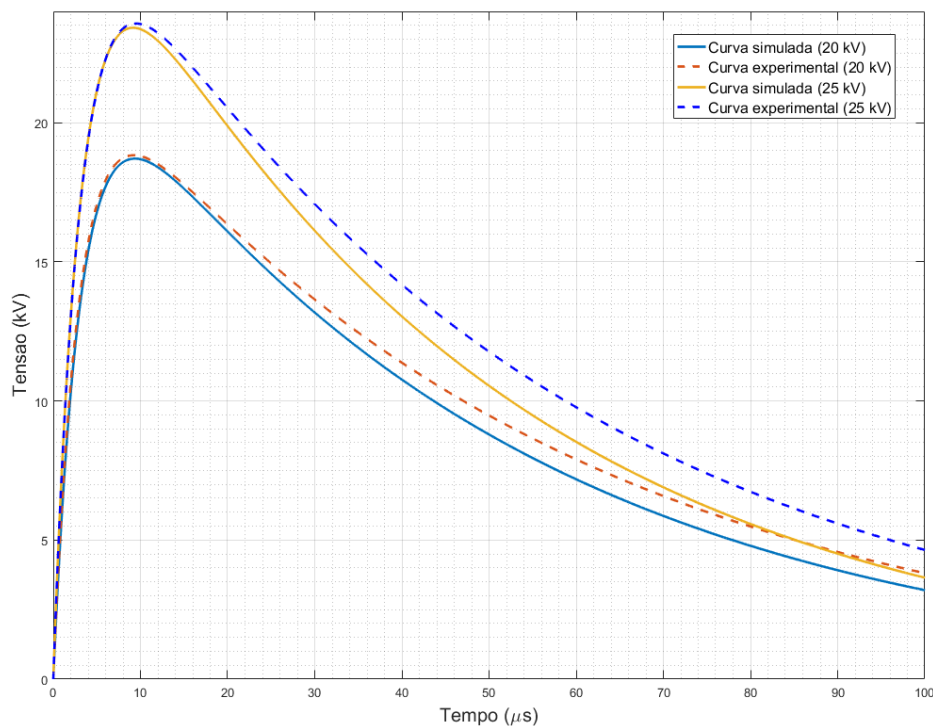
Por fim, a simulação foi compilada, com isso, os resultados obtidos da simulação são apresentados a partir de gráficos da tensão resultante no topo da haste de injeção do

impulso de corrente. Os resultados foram exportados para o MATLAB® e comparados com os resultados obtidos em campo para as tensões de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV.

De forma similar ao caso apresentado na subseção anterior, as curvas simulada e medida para as tensões de carregamento do gerador de 20 kV e 25 kV apresentaram um baixo grau de similaridade, com defasagem acentuada entre os seus picos de tensão. Com isso, foi realizado ajustes do parâmetro resistividade do solo na simulação, com o objetivo de aproximar as curvas medidas e simuladas e, assim, comprovar a confiabilidade das simulações.

Tomando como base a referência de Kindermann e Campagnolo (1995), que indica que para solos secos (baixa umidade) o valor típico de resistividade para esses solos é de, aproximadamente, $500 \Omega\text{m}$, foi determinado o valor otimizado da resistividade do solo, sendo $460 \Omega\text{m}$. Com isso, o novo valor de resistividade foi utilizado para simular o aterramento utilizando a tensão de carregamento de 20 kV e, assim, verificar a segurança da otimização. Os resultados das simulações utilizando o valor otimizado da resistividade da primeira camada são mostrados na Figura 5.26.

Figura 5.26 – Gráfico das curvas de tensão resultante para a simulação e os ensaios experimentais considerando valor otimizado da resistividade.



Fonte: Produzida pelo autor.

Após o ajuste no valor da resistividade do solo, as curvas de tensão medidas e simuladas apresentaram valores de R^2 de 0,99 e 0,98 para as tensões de carregamento de 20 kV e 25 kV, respectivamente. Com isso, as simulações foram comprovadas devido à proximidade dos valores de R^2 com o valor unitário.

5.5.3. CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SIMULAÇÕES

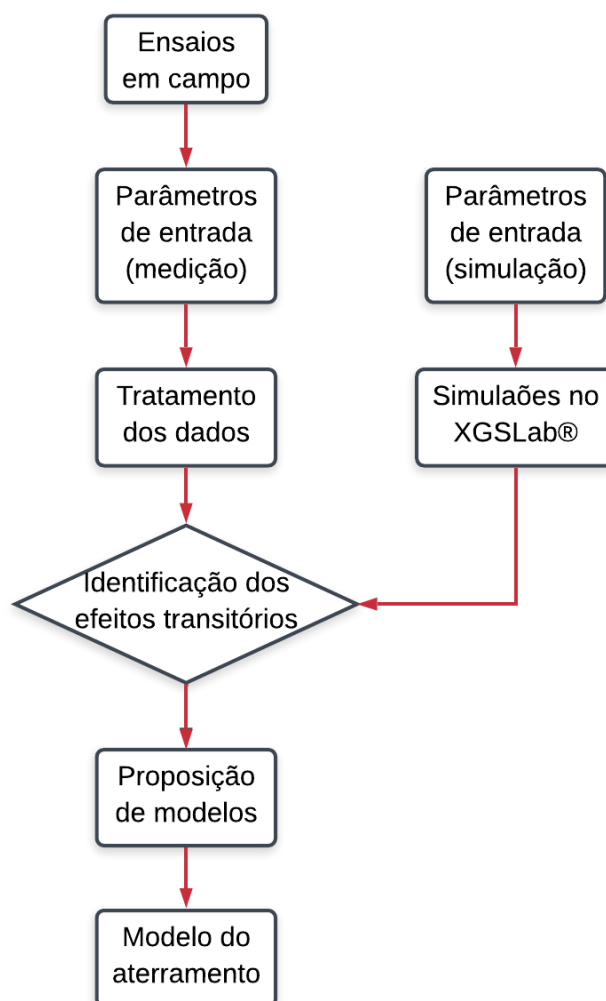
Em resumo, tanto a simulação da configuração de aterramento G_1 quanto da G_2 utilizam modelos que possibilitam a avaliação dos efeitos pertinentes à pesquisa. No caso de modelos que podem representar um sistema de aterramento quando submetido a impulsos de corrente, eles são úteis para simular o desempenho dinâmico da malha. Com isso, as simulações podem fornecer embasamento para o projeto e a construção de sistemas de aterramento mais confiáveis, além de possibilitar a análise de aterramentos já em operação no sistema.

As análises de sistemas de aterramento a partir de simulações possibilita a redução de ensaios em campo, visto que as simulações podem fornecer os parâmetros e variáveis de entrada para a modelagem apresentada na seção 5.4.

5.6. ETAPA 6

A sexta e última etapa consistiu na sintetização dos métodos aplicados na pesquisa e proposição de uma metodologia de avaliação de sistemas de aterramento. Para tanto, os procedimentos e análises realizados nos capítulos Material e Métodos e Resultados e Discussões foram apresentados em um fluxograma geral de análises sistemáticas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica. O fluxograma geral é mostrado na Figura 5.27.

Figura 5.27 – Fluxograma geral de análises sistemáticas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica.



Fonte: Produzida pelo autor.

Como pode ser observado no fluxograma, inicialmente, no passo “Ensaio em campo” deve-se realizar os ensaios no sistema de aterramento utilizando um gerador de impulsos de corrente com o objetivo de coletar os dados de corrente e tensão no aterramento.

Nos passos “Parâmetros de entrada (medição)” e “Tratamento dos dados” Os sinais de tensão e corrente obtidos dos ensaios devem ser importados para o *software* MATLAB®. Em seguida, os sinais devem ser tratados e filtrados para utilização nos passos seguintes. Com relação ao tratamento dos sinais, deve-se aplicar técnicas de supressão de ruídos, tal como a função no MATLAB® denominada “*smooth*”. Além disso, deve-se utilizar modelos que representem o impulso de corrente adquiridos em campo para utilização nos *softwares* específicos de análise de sistemas de aterramento.

No passo “Identificação dos efeitos transitórios” o aterramento ensaiado deve ser caracterizado e os efeitos transitórios que podem surgir quando o aterramento é percorrido por um impulso de corrente devem ser identificados.

Após caracterização e identificação dos efeitos transitórios no sistema de aterramento, quatro casos podem surgir dependendo da resposta do aterramento ensaiado:

- Caso 1: ausência de efeitos ionizantes e de efeitos indutivos ou capacitivos;
- Caso 2: ausência de efeitos ionizantes e presença de efeitos indutivos ou capacitivos;
- Caso 3: presença de efeitos ionizantes e ausência de efeitos indutivos ou capacitivos;
- Caso 4: presença de efeitos ionizantes e presença de efeitos indutivos ou capacitivos.

Com relação aos casos em que são identificados fenômenos de ionização e, também, quando não há nenhum dos efeitos, este trabalho não contempla a modelagem por circuitos elétricos. Com isso, apenas o Caso 2 pode ser analisado no passo seguinte do fluxograma.

Na sequência, utilizando o Caso 2 e o passo “Proposição de modelos”, deve-se identificar a predominância do efeito indutivo ou capacitivo a partir das curvas $V \times I$ obtidas no passo “Tratamento dos dados”. Dessa forma, pode-se escolher o circuito representativo do aterramento descrito na subseção 5.4.1 deste trabalho e, assim, chegar ao último passo “Modelo do aterramento”, que considera a modelagem por meio de um circuito representativo do seu efeito predominante.

Seguindo os passos descritos acima, tem-se como saída o modelo do aterramento e, conseqüentemente, curvas de tensão resultante do impulso de corrente aplicado ao modelo. A modelagem do desempenho do sistema de aterramento por circuito elétrico viabiliza o acoplamento desses modelos a outros que representem os supressores de surtos e, com isso, possibilita estudos de coordenação de isolamento.

A primeira coluna do fluxograma geral da metodologia deve ser aplicada aos casos em que se tem a possibilidade de realização de medições em campo com um gerador de impulsos de corrente. Ou seja, a proposição dos modelos é realizada a partir dos parâmetros das medições em campo.

Visando contornar as adversidades inerentes às medições em campo, é proposto, também, a utilização de simulações computacionais que servem como entrada para a proposição dos modelos. Na segunda coluna do fluxograma são mostrados esses passos.

Dessa forma, no passo “Parâmetros de entrada (simulação)” pode-se entrar com parâmetros que são facilmente medidos em campo ou estimados: a resistividade e a permissividade. Além disso, tem-se, também, como entrada para as simulações, a configuração do sistema de aterramento e o impulso de corrente modelado. Esses parâmetros devem ser compilados em *software* especializado, tal como o utilizado nessa pesquisa, para simulação do aterramento submetido a impulsos de corrente. A principal vantagem do procedimento descrito é a redução de medições em campo à medida que não é necessária a utilização de gerador de impulsos de corrente.

Na sequência, no passo “Identificação dos efeitos transitórios” o aterramento simulado deve ser caracterizado e os efeitos transitórios que podem surgir quando o aterramento é percorrido por um impulso de corrente devem ser identificados. A caracterização do aterramento e identificação dos efeitos transitórios tem como entrada o impulso de corrente modelado e a curva de tensão resultante da simulação computacional.

Por fim, os passos seguintes são análogos ao que foi descrito anteriormente e tem-se, também, um modelo de aterramento como saída.

5.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram discutidos dos resultados obtidos na pesquisa e suas análises e discussões. O capítulo foi dividido em seis etapas: ensaios em campo (Etapa 1); tratamento dos dados obtidos (Etapa 2); identificação dos efeitos transitório (Etapa 3); proposição e comprovação de modelos elétricos (Etapa 4); simulações em ambiente computacional (Etapa 5) e sintetização dos métodos aplicados na pesquisa e proposição de metodologia geral (Etapa 6).

Seguindo as etapas descritas nos métodos de avaliação de sistemas de aterramento, tem-se que na Etapa 1 foram realizados os ensaios em campo utilizando um gerador de impulsos de corrente em dois sistemas de aterramento distintos. Esta etapa demandou tempo e contou com adversidades. A primeira delas foi a construção de um gerador móvel, o qual possibilitou a realização dos ensaios para solos com características elétricas distintas. A logística do transporte do gerador também foi bem estudada, pois se

trata de um equipamento sensível. Além disso, a preparação do solo e construção da malha também demandaram bastante tempo e esforço.

A Etapa 2 consistiu no tratamento dos dados obtidos em campo e nesta etapa as curvas de tensão e corrente foram tratadas, filtradas e modeladas para dupla exponencial, com o objetivo de viabilizar o uso das curvas nos *softwares* específicos.

A Etapa 3 consistiu no desenvolvimento do procedimento para identificação dos efeitos transitórios. Dessa forma, a identificação dos efeitos indutivos e capacitivos foi feita a partir das curvas $V \times I$ de resposta dos sistemas de aterramento. Já a identificação dos efeitos de ionização foi feita a partir da normalização dos impulsos de corrente e tensão obtidos nos ensaios dos sistemas de aterramento. Com isso, os dois sistemas de aterramento ensaiados foram caracterizados como predominantemente indutivo ou capacitivo e, também, como sistemas de aterramento não ionizados durante a passagem do impulso de corrente.

A Etapa 4 consistiu na proposição de modelos elétricos que representassem os sistemas de aterramento ensaiados. Foram propostos dois modelos, um para representar o aterramento com predominância de efeito capacitivo e outro para representar o aterramento com predominância de efeito indutivo. Os modelos propostos foram capazes de representar a resposta impulsiva dos sistemas de aterramento aplicados em sua avaliação com valores de erro efetivo total menores que 6% em todos os casos analisados. Apesar de sua simplicidade, os modelos propostos apresentaram erros totais com valores equivalentes em relação ao modelo utilizado da literatura (Altafim *et al.* (2016)) e, em alguns casos, até menor.

A Etapa 5 consistiu na implementação de simulações computacionais considerando a representação dos efeitos indutivos e capacitivos, para as configurações de aterramento G_1 e G_2 . Nas simulações computacionais foram realizados ajustes dos parâmetros que caracterizam o sistema de aterramento simulado, com o intuito de comprovar a confiabilidade das simulações. Para tanto, foram utilizadas as formas de onda de tensão obtidas em campo. As simulações comprovadas servem de base para a proposição da metodologia geral.

Por fim, na Etapa 6 foi proposto um procedimento metodológico geral para avaliação de sistemas de aterramento capaz de identificar os efeitos provocados por fenômenos de alta intensidade e frequência elevada. Para tanto, foi proposto um

fluxograma geral de análises sistemáticas de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica.

CONCLUSÃO

Uma metodologia consistente de avaliação de sistemas de aterramento de dimensões reais submetidos a impulsos de corrente com amplitude variando aproximadamente entre 1 kA e 2,5 kA e tempos de frente de onda 10 μ s e 30 μ s segundos foi desenvolvida. A metodologia foi avaliada para as configurações de aterramento típico de uma subestação, com 12 hastes, e outro típico de pés de torres de linhas de transmissão, com 12 hastes. Também, a metodologia foi avaliada para solos com característica indutiva e capacitiva. As resistividades variaram entre 30 Ω m e 480 Ω m. A concepção da metodologia se baseou na análise da resposta de sistemas de aterramento a partir de experimentações em campo e simulações computacionais.

Os efeitos provocados pela injeção de impulsos de corrente foram avaliados para as duas configurações distintas de sistemas de aterramento, como resultados, constatou-se que os dois sistemas de aterramento ensaiados se caracterizaram como:

- Capacitiva e sem efeito ionizante, para a configuração de aterramento típica de subestações, com 12 hastes;
- Indutiva e sem efeito ionizante, para a configuração de aterramento típica de torres de linhas de transmissão, com 12 hastes.

Dois modelos baseados em circuitos simples, compostos por resistores, indutores, capacitores e a fonte de alimentação foram propostos. Os modelos propostos foram capazes de representar a resposta impulsiva dos sistemas de aterramento aplicados em sua avaliação com valores de RMSE total menor que 5%, erro de pico de tensão menor que 6% e de R^2 maior que 0,94 em todos os casos analisados. Apesar de sua simplicidade, os modelos propostos apresentaram erros totais com valores equivalentes em relação ao modelo da literatura (Altafim *et al.* (2016)) e, em alguns casos, ainda menores. Os modelos propostos apresentaram vantagens como maior facilidade de cálculo de parâmetros e implementação de circuitos, que apresenta apenas elementos lineares, diferentemente dos circuitos encontrados na literatura que utilizam elementos não lineares, reduzindo a complexidade do modelo. Além disso, erros menores foram observados para tensões de

ensaio mais elevadas, o que pode indicar uma característica conservadora dos modelos propostos quando aplicado a estudos de análise de transitório e coordenação de isolamento.

Como prova de conceito, pode-se concluir que um procedimento metodológico para avaliação de sistemas de aterramento capaz de identificar os efeitos provocados por fenômenos de alta intensidade e frequência elevada foi proposto. O procedimento metodológico permite a representação do desempenho de sistemas de aterramento, pelo uso de modelos obtidos de ensaios, como também, de simulações computacionais, em programas tradicionais de análises de transitórios eletromagnéticos.

6.1. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de continuidade da linha de pesquisa tratada nesta tese, a seguir são listadas algumas propostas para trabalhos futuros:

- Ampliar a representação de sistemas de aterramento por circuitos elétricos contemplando os efeitos de ionização;
- Avaliar, em ambiente computacional, os sistemas de aterramento estudados nesse trabalho, considerando alterações dos parâmetros e variáveis do problema;
- Acoplar os modelos desenvolvidos neste trabalho a outros que representam os supressores de surto e avaliar a coordenação de isolação no sistema elétrico de potência.

6.2. PUBLICAÇÕES

Até o presente momento e durante o desenvolvimento da pesquisa, alguns artigos foram publicados, submetidos e aceitos para publicação. Os artigos são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Lista de publicações.

Artigos	Autores	Título	Nome/sigla	Ano	
Publicados em anais de eventos	SILVA, J. M. C. L.; COSTA, E. G.; GONÇALVES, M. F. B. R.; SOUZA, R. T.; BRITO, V. S.; SOUSA, H. F. S.	Experimental Evaluation of the Transient Behavior of a 3-Rod Grounded System Under Current Impulse	VII SBSE	2018	
	GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; SILVA, J. M. C. L.; ARAÚJO, F. J. L.; OLIVEIRA FILHO, C. J. A.	Electric Model of Current Impulse Generator Applied to Ground	20 th ISH	2017	
	GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; SILVA, J. M. C. L.; ARAÚJO, F. J. L.; FILHO, J. R. L.	Simulação de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Utilizando o COMSOL Multiphysics	VI SBSE	2016	
	ARAÚJO, F. J. L.; COSTA, E. G.; PEREIRA, H. A.; GONÇALVES, M. F. B. R.; SILVA, J. M. C. L.; ALMEIDA, G. J. C.	Avaliação da Impedância Harmônica de uma Malha de Aterramento Submetida a Correntes Impulsivas	VI SBSE	2016	
	ARAÚJO, F. J. L.; PEREIRA, H. A.; COSTA, E. G.; GONÇALVES, M. F. B. R.; SILVA, J. M. C. L.; ALMEIDA, G. J. C.	Avaliação no Domínio do Tempo da Resposta Transitória de uma Malha de Aterramento Submetida a Correntes Impulsivas	VI SBSE	2016	
	CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; GONÇALVES, M. F. B. R.; FILHO, J. R. L.	Avaliação Experimental do Crescimento de Potencial no Solo Devido à Aplicação de Impulsos de Corrente em um Eletrodo de Aterramento	XVI ERIAC	2015	
	GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, M. S.; FILHO, J. R. L.	Experimental Evaluation of Impulsive Impedance in Grounding Grids Subjected to Current Impulses	19 th ISH	2015	
	CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; GONÇALVES, M. F. B. R.; FILHO, J. R. L.	Experimental Evaluation of Grounding Grids	19 th ISH	2015	
	Aceitos para publicação em anais de eventos	RODRIGUES, L. H. M.; SOUZA, R. T.; GONÇALVES, M. F. B. R.; ALVES, L. N. T.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; TEIXEIRA, R.	Estudo comparativo da resposta em frequência de malhas de aterramento empregando simulações computacionais	XVIII ERIAC	2019
		GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; ANDRADE, A. F.; BRITO, V. S.; LIRA, G. R. S.; XAVIER, G. V. R.	Grounding System Models for Electric Current Impulse	Electric Power Systems Research	2019
Submetidos em Periódicos (Sob revisão)					

REFERÊNCIAS

AHMEDA, M.; HARID, N.; GRIFFITHS, H.; HADDAD, A. Earth Surface Potential in the Vicinity of Transmission Tower under Low Frequency and Transient Currents. **The 17th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)**, Hannover, Alemanha, 2011.

AKBARI, M.; SHESHYEKANI, K.; ALEMI, M. R. The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 55, no. 4, pp. 739–746, 2013.

ALA, G.; BUCCHERI, P. L.; ROMANO, P.; VIOLA, F. Finite Difference Time Domain Simulation of Earth Electrodes Soil Ionisation Under Lightning Surge Condition. **IET Science, Measurement and Technology**, v. 2, pp. 134–145, 2004.

ALÍPIO, R.; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 55, no. 1, pp. 132-139, 2013.

ALTAFIM, R. A. C.; GONÇALVES, L., ALTAFIM, R. A. P.; CREPPEB, R. C.; PIANTINI, A. One-Port Nonlinear Electric Circuit for Simulating Grounding Systems under Impulse Current. **Electric Power Systems Research**, v. 130, pp. 259-265, 2016.

ARAÚJO, F. J. L.; SILVA, J. M. C. L.; ANDRADE, G. V. JR.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; NETO, S. A. G. N. Avaliação de Potenciais no Solo Devido a Impulsos de Corrente em Malhas de Aterramento. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos(SBSE)**, Belém, Brasil, 2010.

BELLASCHI, P. L. Lightning Currents in Field and in Laboratory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 54, no. 8, pp. 837-843, 1935.

BEZERRA, G. V. N.; PEREIRA, H. A.; COSTA, E. G.; DINIZ, L. Method for identifying the soil ionization curve due to application of impulse currents in grounding rods. **The 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)**, Buenos Aires, 2017.

BEZERRA, G. V. N. **Análise de Sistemas de Aterramento com Hastes Concretadas Submetidos a Correntes Impulsivas**. 110 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2017.

CASTRO, M. S. **Sistema de Aquisição de Dados para Avaliação de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Elétrica**. 60 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2012.

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; BRITO, V. S.; LIRA, G. R. S.; GONÇALVES, M. F. B. R. Avaliação Experimental da Impedância em um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, Foz do Iguaçu, Brasil, 2014.

CAETANO, C.; PAULINO, J.; BOAVENTURA, W.; LIMA, A.; LOPES, I.; CARDOSO, E. A conductor arrangement that overcomes the effective length issue in transmission line grounding: full-scale measurements. **34rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, Resóvia, Polônia, 2018.

CAVKA, D.; MORA, N.; RACHIDI, F. A Comparison of Frequency-Dependent Soil Models: Application to the Analysis of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 56, no. 1, pp. 177 - 187, 2014.

CHAKER, V. **Simplified Methods for the Electrical Soil Resistivity Measurement, Undergrounding corrosion**. ASTM STP 741, Edward Escalante, Ed., American Society for Testing and Materials, pp. 61-91, 1981.

CHEN, H.; DU, Y. Lightning Grounding Grid Model Considering Both the Frequency-Dependent Behavior and Ionization Phenomenon. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 61, no. 1, pp. 157 - 165, 2018.

COELHO, R. A.; ALMAGUER, H. A. D. Modeling of Grounding Systems Considering the Soil Ionization Effect Using COMSOL Multiphysics® Software. **Proceedings of the 2014 COMSOL Conference**, Curitiba, 2014.

DVEGAN, S. S.; WHITEHEAD, E. R. Analytical Models for Distributed Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-92, no. 5, pp. 1763-1770, 1973.

DWIGHT, H. B. Calculation of Resistances to Ground. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 55, no. 12, pp. 1319-1328, 1936.

ESPEL, P.; DIAZ, R. R.; BONAMY, A.; SILVA, J. N. Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soil. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, no. 3, pp. 1174-1182, 2004.

FRAGA, F. N., **Contribuições para o Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência Empregando TLM Tridimensional**. 94 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPE, Recife, 2008.

GARCIA, A. L. **Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering**. 3rd ed. Pearson Education, 2008.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLO, M. Metodologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo - Revisão do Estado da Arte. **11th Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering**, 2009.

GAZZANA, D. S.; DIAS, G. A. D.; LEBORGNEL, R. C.; BRETAS, A. S.; TELLO, M.; THOMAS, D. W. P.; CHRISTOPOULOS, C. Novel formulation to determine the potential on the soil surface generated by a lightning surge. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, no. 3, pp. 1-4, 2016.

GAO, Y.; HE, J.; CHEN, S.; ZOU, J.; ZENG, R.; LIANG, X. Lightning electromagnetic environments of substation considering soil ionization around grounding systems. **International Conference on Power System Technology**, v. 4, pp. 2096-2100, 2002.

GERI, A.; VECA, G. M.; GARBAGNATI, E.; SARTORIO, G. Non-linear Behaviour of Ground Electrodes Under Lightning Surge Currents: Computer Modelling and Comparison with Experimental Results. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 28, no. 2, pp. 1442-1445, 1992.

GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, M. S.; FILHO, J. R. L. Experimental Evaluation of Impulsive Impedance in Grounding Grids Subjected to Current Impulses. **The 19th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)**, Pilsen, 2015.

GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; SILVA, J. M. C. L.; ARAÚJO, F. J. L.; FILHO, J. R. L. Simulação de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Utilizando o COMSOL Multiphysics. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, Natal, Brasil, 2016.

GRCEV, L.; TOSEVA, V. A. Grounding systems modeling for high frequencies and transients: some fundamental considerations. **IEEE Bologna Power Tech Conference**, Itália, 2003.

GRCEV, L. Impulse Efficiency of Ground Electrode. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, no.1, pp.441-451, 2009.

GRCEV, L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, no.3, pp.1692-1699, 2011.

GUIMARÃES, M. N.; ARAUJO, L. R. V. C.; SANTOS, L. F. D.; VALE, M. H. M S.; VISACRO, S. Impulse Response of Grounding Grids: Experimental versus Simulated Results. **31stInternational Conference on Lightning Protection (ICLP)**, Austria, 2012.

GUPTA, B. R.; THAPAR, B. Impulse Impedance of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-99, no. 6, pp. 2357-2362, 1980.

HABJANIC, A.; TRLEP, M. The Simulation of the Soil Ionization Phenomenon Around the Grounding System by the Finite Element Method. **IEEE Transactions on Magnetism**, v. 42, no. 4, pp. 867-870, 2006.

HADDAD, A.; GRIFFITHS, H.; AHMEDA, M.; HARID, N. Experimental Investigation of the Impulse Characteristics of Practical Ground Electrodes Systems. **International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, New Orleans, LA, 2010.

HADDAD, A.; WARNE, D. F. **Advances in High Voltage Engineering – (IEE Power and Energy Series 40)**. Published by: The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004.

HARID, N.; GRIFFITHS, H.; MOUSA, S.; CLARK, D.; ROBSON, S.; HADDAD, A. On the Analysis of Impulse Test Results on Grounding Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, no. 6, 2015

IEC 60-1: **High-voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Test Requirements**. 2^a ed., 1989.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>>. Acesso em: 01/09/2017.

JOFFE, E. B.; LOCK, K.-S. **Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook**. Ed. Wiley-IEEE Press, 2010.

KARAMI, H.; SHESHYEKANI, K. Harmonic Impedance of Grounding Electrodes Buried in a Horizontally Stratified Multilayer Ground: A Full-Wave Approach. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 60, no. 4, pp. 899-906, 2018.

KHERIF, O.; CHIHEB, S.; TEGUAR, M.; MEKHALDI, A.; HARID, N. Time-Domain Modeling of Grounding Systems' Impulse Response Incorporating Nonlinear and Frequency-Dependent Aspects. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 60, no. 4, pp. 907-916, 2018.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3^a Edição. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995.

KOSZTALUK, R.; LOBODA, M.; MUKHEDKAR, D. Experimental study of Transient Ground Impedances. **IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, no. 11, pp. 4654-4660, 1981.

LI, J.; YUAN, T.; YANG, Q.; SIMA, W.; SUN, C.; ZAHN, M. Numerical and Experimental Investigation of Grounding Electrode Impulse-Current Dispersal Regularity Considering the Transient Ionization Phenomenon. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, no. 4, 2011.

LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 121, no. 2, pp. 123-135, 1974.

LIMA, A. B.; PAULINO, J. O. S.; BOAVENTURA, W. C.; CAETANO, C. E. F.; CARDOSO, E. N. Transmission line grounding arrangement that overcomes the effective length issue. **33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, Estoril, Portugal, 2016.

LIU, Y. **Transient response of grounding systems caused by lightning**. Modelling and experiments, comprehensive summaries of Uppsala dissertations from the Faculty of Science and Technology 1015, 2004.

LOBODA, M.; POCHANKE, Z. A Numerical Identification of Dynamic Model Parameters of Surge Soil Conduction Based on Experimental Data. **International Conference on Lightning Protection**, Berlin, 1992.

MELIOPOULUS, A. P.; MOHARAM, M. G. Transient Analysis of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-102, no. 2, pp.389-399, 1983.

MENTER, F.; GREEV, L. EMTP-based Model for Grounding System Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, no. 4, pp. 1838-1849, 1994.

MOKHTARI, M.; ABDUL-MALEK, Z.; SALAM, Z. An Improved Circuit-Based Model of a Grounding Electrode by Considering the Current Rate of Rise and Soil Ionization Factors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, no. 1, pp. 211-219, 2015.

MOUSA, M. The soil ionisation gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, no. 3, pp. 1669-1677, 1994.

NBR 7117. **Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2012.

OTERO, A. F.; CIDRAS, J.; DEL ALAMO, J. L. Frequency-dependent grounding system calculation by means of a conventional nodal analysis technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, no. 3, 1996.

PAULINO, J. O. S.; BOAVENTURA, W. C.; CARDOSO, E. N.; LIMA, A. B.; CAETANO, C. E. F.; MACHADO, J. R. S.; RENNÓ, M. A. Malhas de Aterramento de Baixo Valor de Impedância que Atenuam o Problema do Comprimento Efetivo: Análise Teórica e Estudo em Modelo Reduzido. **IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL)**, João Pessoa, 2017.

PEDROSA, G. A.; SCHOEDER, M. A. O.; AFONSO, M. M.; ALÍPIO, R. S.; ASSIS, S. C.; OLIVEIRA, T. A. S.; BRAGA, A. R. **Desempenho de Aterramento Elétrico diante de Descargas Atmosféricas**. O Setor Elétrico, pp.74-84, Nov, 2011.

- PORTELA, C. Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 2, pp 1004 – 1009, 1999.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning Physics and Effects**. Ed. Cambridge University Press, 2003.
- RAMAMOORTY, M.; NARAYANAN, M. M. B.; PARAMESWARAN, S.; MUKHEDKAR, D. Transient Performance of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v. 4, no. 4, pp. 2053-2059, 1989.
- R. RUDENBERG. Grounding Principles and Practice I—Fundamental Considerations on Ground Currents. **Electrical Engineering**, vol. 64, no. 1, pp. 1-13, 1945.
- SEKIOKA, S.; LORENTZOU, M. I.; PHILIPPAKOU, M. P.; PROUSALIDIS, J. M. Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, no. 1, pp. 194–201, 2006.
- SEKIOKA, S.; HAYASHIDA, H.; HARA, T.; AMETANI, A. Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 145, no. 6, pp. 693-699, 1998.
- SILVA, J. M. C. L. **Análise de Sistemas de Aterramento Submetidos a Correntes Impulsivas**. 91 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2017.
- SUNDE, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. 2^a Ed., New York: Dover Publications, 1968.
- SUNDE, E. D. Surge Characteristics of a Buried Bare Wire. **Electrical Engineering**, v. 59, no. 12, pp. 987-991, 1940.
- TAO, Y.; SIMA, W.; YANG, C.; YANG, Q. Experimental Investigation on the Impulse-Current Distribution of Grounding Electrodes with Various Structures. **International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, Chongqing, China, 2008.
- TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. G.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, L. V. **Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixas e Altas Frequências**. Ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2007.

TOMINAGA, S.; AZUMI, K.; SHIBUYA, Y.; IMATAKI, M.; FUJIWARA, Y.; NISHIDA, S. Protective Performance of Metal Oxide Surge Arrester Based on the Dynamic V-I Characteristics. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-98, no. 6, pp. 1860-1871, 1979.

TOSEVA, V. A.; GRCEV, L. High Frequency Current Distribution in Horizontal Grounding Systems in Two-layer Soil. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 1, no. 4, pp. 205–208, 2003.

UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**. Ed. Orlando: Academic Press, 1987.

VISACRO, S. A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, no. 1, pp. 381-386, 2007.

VISACRO, S.; ROSADO, G. Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 51, no. 1, pp. 161-164, 2009.

VISACRO, S.; ALIPIO, R. Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, no. 2, pp. 927–935, 2012.