



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

**Análise de Sistemas de Aterramento Submetidos a Correntes
Impulsivas**

João Marcelo Costa Leal da Silva

Campina Grande – PB
Dezembro – 2017

João Marcelo Costa Leal da Silva

**Análise de Sistemas de Aterramento Submetidos a Correntes
Impulsivas**

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.
Orientador

Campina Grande – PB
Dezembro – 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586a Silva, João Marcelo Costa Leal da.
Análise de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas / João Marcelo Costa Leal da Silva. – Campina Grande, 2017.
88 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.
"Orientação: Prof. D. Sc. Edson Guedes da Costa."
Referências.

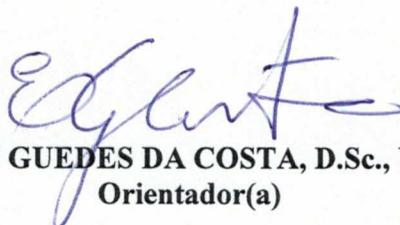
1. Sistema de Aterramento. 2. Correntes Impulsivas. 3. Ensaio em Campo. 4. Equação Genérica. 5. Efeitos Reativos e Transitórios. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.316.9(043)

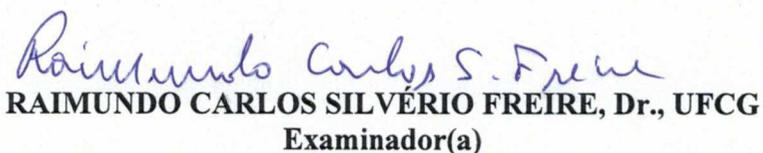
**"ANÁLISE DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO SUBMETIDOS A CORRENTES
IMPULSIVAS"**

JOÃO MARCELO COSTA LEAL DA SILVA

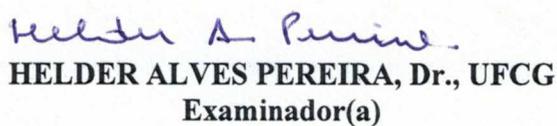
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 20/12/2017



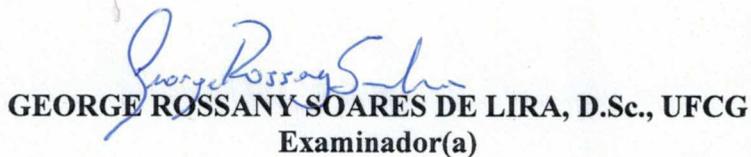
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



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



HELDER ALVES PEREIRA, Dr., UFCG
Examinador(a)



GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

Dedico este trabalho à minha mãe, Vera Lúcia, ao meu Pai, Marcelino José, ao meu irmão Juliano Leal e à minha esposa Dayane Caldas.

AGRADECIMENTOS

Gratidão à Suprema Luz Divina, por ter me ajudado a compreender que o belo e maravilhoso fluxo da vida, deve ser vivido com leveza, alegria e amor no coração!

Gratidão à minha mãe, por todo o amor que dedicou ao meu ser, desde o momento da concepção!

Gratidão ao meu pai, por toda força, coragem e hombridade, nas quais me espelho!

Gratidão ao meu irmão, por toda responsabilidade, confiança e paciência, nas quais me inspiro!

Gratidão à minha esposa, por toda fé, dedicação e positividade, nas quais me fortaleço!

Gratidão ao Professor Edson, por toda orientação, compreensão, compromisso e exemplo, nos quais eu me guio!

Gratidão a todos os amigos da vida e aos colegas, técnicos e funcionários do Laboratório de Alta Tensão, em especial à Marconni Freitas, por toda partilha, apoio, préstimo e alegria, nas quais eu renovo as energias e supero os desafios!

Gratidão a todos os professores do Laboratório de Alta Tensão, por todo empenho, no qual eu mantenho a esperança e a alegria, em saber que os que virão serão servidos de grandes exemplos.

Gratidão ao CNPQ, à COPELE e a todos do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG (afinal isso tudo começou em 2006, quando iniciei a graduação), por terem viabilizado, financeiramente, intelectualmente e emocionalmente, a concretização dessa grande meta!

João Marcelo Costa Leal da Silva

“Vida começa onde termina o medo.”

(Osho)

RESUMO

Um sistema de aterramento consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico ao solo. Sua principal característica é de tornar o solo um caminho de baixa impedância, preferencial às correntes provenientes de curto-circuito, desbalanceamento de fases, chaveamentos de manobra ou descargas atmosféricas. Portanto, os sistemas de aterramento podem atuar para correntes em diferentes níveis de intensidade e frequência. O comportamento dos sistemas de aterramento frente a corrente de baixas frequências, é amplamente conhecido. Entretanto, o comportamento frente a corrente de elevada intensidade e frequência, sofre a influência de efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, individualmente ou simultaneamente. Como exemplo de corrente de elevada intensidade e frequência, tem-se a corrente impulsiva proveniente de uma descarga atmosférica. Desta forma, o presente trabalho se propôs a analisar o comportamento de sistemas de aterramento frente a correntes impulsivas. Para tanto, foram realizados ensaios experimentais em campo (com injeção de impulsos de corrente) em 4 sistemas distintos de aterramento, instalados em solos de resistividades também distintas. Dos ensaios em campo, foram obtidos os parâmetros, ou variáveis: estratificação do solo; resistência de aterramento; curva da corrente impulsiva; curva da resposta em tensão; curva característica da relação entre tensão medida e corrente aplicada (curva $V \times I$); impedância transitória; impedância impulsiva; coeficiente impulsivo; tempos de frente e de meia cauda dos sinais de corrente e de tensão. A partir daí o comportamento transitório dos sistemas de aterramento foram analisados, e os efeitos transitórios (ionizantes, indutivos ou capacitivos) presentes foram identificados. Foi verificado 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, foi identificada uma equação genérica de coeficientes não definidos que representa a contribuição dos efeitos transitórios, dependentes da frequência, para a resposta em tensão dos sistemas analisados.

Palavras-chave: Correntes Impulsivas, Ensaio em Campo, Equação Genérica, Efeitos Reativos, Efeitos Transitórios, Frequência, Ionização do Solo, Sistema de Aterramento.

ABSTRACT

A grounding system consists of a purposeful electrical connection of a physical system to the ground. Its main characteristic is to make the ground a path of low impedance, preferential to currents coming from short circuit, phase unbalance, switching surge or lightning surge. Therefore, grounding systems can act for currents at different levels of intensity and frequency. The behavior of ground systems against low frequency current is widely known. However, the high current and frequency current behavior is influenced by ionizing, inductive or capacitive effects, individually or simultaneously. As an example of a current of high intensity and frequency, one has the impulsive current coming from an atmospheric discharge (lightning surge). In this way, the present work has proposed to analyze the behavior of grounding systems against impulsive currents. For this, field experiments (with impulsive current injection) were carried out in four different grounding systems, installed in different resistivity soils. From the field trials, the parameters, or variables were obtained: soil stratification; ground resistance; impulse current curve; voltage response curve; characteristic curve of the relation between measured voltage and applied current (curve $V \times I$); transient impedance; impulsive impedance; impulse coefficient; forward and half-stroke times of the current and voltage signals. From then on, the transient behavior of the grounding systems was analyzed, and the transient effects (ionization, inductive or capacitive) present were identified. It was verified that the inductive effect is influenced by the number of ground rods, independent of soil resistivity, however, the higher the resistivity, the more the capacitive effect exerts influence. The opposite occurs with the inductive effect that increases with decreasing soil resistivity. Finally, a generic equation of undefined coefficients was identified that represents the contribution of the frequency dependent transient effects to the voltage response of the analyzed systems.

Key words: Field Tests, Frequency, Generic Equation, Grounding System, Impulsive Currents, Reactive Effects, Soil Ionization, Transient Effects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sinal representativo de um impulso atmosférico.	19
Figura 2.2 – Correntes elétricas estabelecidas em um eletrodo de aterramento.....	21
Figura 2.3 – Variação da impedância harmônica do aterramento em relação à frequência	24
Figura 2.4 – Representação da zona de ionização do solo	26
Figura 4.1 – Representação do sistema de aterramento para realização de ensaios do LAT-UFCG	45
Figura 4.2 – Representação da configuração do sistema de aterramento A1	46
Figura 4.3 – Representação da configuração do sistema de aterramento A2: (a) vista superior; (b) vista frontal.	46
Figura 4.4 – Representação da configuração do sistema de aterramento A3: (a) vista superior; (b) vista frontal.	47
Figura 4.5 – Fluxograma da metodologia utilizada nos estudos desenvolvidos no presente trabalho.	48
Figura 4.6 – Esquemático do arranjo experimental do método de Wenner.	52
Figura 4.7 – Esquemático do arranjo experimental do método da queda de potencial. .	53
Figura 4.8 – Fotografias: (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.	54
Figura 4.9 – Circuito elétrico do gerador de impulsos do LGIC.	55
Figura 4.10 – Esquemático simplificado do arranjo experimental utilizado.	57
Figura 5.1 – Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento do LAT, para os níveis de carregamento de 20 kV, 25 kV e 30 kV. (a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente	60
Figura 5.2 – Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento A1, para os níveis de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV. (a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente	61
Figura 5.3 – Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento A2, para os níveis de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV. (a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente	62

Figura 5.4 – Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento A3, para os níveis de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV. (a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente	63
Figura 5.5 – Representação do procedimento proposto Grcev [1, 2].	67
Figura 5.6 – Resposta linear dos sistemas de aterramentos. (a) Aterramento LAT-UFCG. (b) Aterramento A1. (c) Aterramento A2. (d) Aterramento A3	68
Figura 5.7 – Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento do LAT-UFCG	69
Figura 5.8 – Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento A1. (a) Contribuição não linear. (b) Detalhe ampliado, da região destacada pela elipse vermelha, no item (a).....	69
Figura 5.9 – Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento A2. (a) Contribuição não linear. (b) Detalhe ampliado, da região destacada por uma elipse vermelha, no item (a).....	69
Figura 5.10 – Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento A3. (a) Contribuição não linear. (b) Detalhe ampliado, da região destacada por uma elipse vermelha, no item (a).....	70
Figura 5.11 – Instante inicial de propagação das correntes injetadas no sistema de aterramento A3	72
Figura 5.12 – Instantes de início das não linearidades no comportamento transitório do sistema de aterramento A1. (a) Tensão (Figura 5.2 (a)). (b) Corrente (Figura 5.2 (b)) ..	74
Figura 5.13 – Instantes de início das não linearidades no comportamento transitório do sistema de aterramento A2. (a) Tensão (Figura 5.3 (a)). (b) Corrente (Figura 5.3 (b)) ..	74
Figura 5.14 – Instantes de início das não linearidades no comportamento transitório do sistema de aterramento A3. (a) Tensão (Figura 5.4 (a)). (b) Corrente (Figura 5.4 (b)) ..	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Comparativo entre a revisão bibliográfica e o presente trabalho.....	41
Tabela 4.1 – Resistividades por camadas dos solos nos entornos dos sistemas de aterramento ensaiados.....	44
Tabela 4.2 – Principais características dos sistemas de aterramento ensaiados	47
Tabela 5.1 – Resistências de aterramento em baixa frequência dos sistemas de aterramento ensaiados.....	59
Tabela 5.2 – Valores de I_p , V_p , Z_p e A_{imp} , encontrados com a análise dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.4	64
Tabela 5.3 – Valores T_f e T_{mc} , das correntes e tensões, encontradas por meio da análise dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.4.....	65
Tabela 5.4 – Identificação dos intervalos de tempo de ocorrência predominantes dos efeitos lineares e não lineares identificados para os sistemas de aterramento A1, A2 e A3	73
Tabela 5.5 – Coeficientes da Equação (5.1), que representa a contribuição do comportamento não linear à forma de onda da tensão medida em campo, do sistema de aterramento A1 para as tensões de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV.	78

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
1.1	Contextualização do Assunto.....	12
1.2	Motivação	13
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Metodologia	16
1.5	Organização do Trabalho	16
2	Fundamentação Teórica.....	18
2.1	Descargas Atmosféricas.....	18
2.2	Sistemas de Aterramento	19
2.2.1	Características Elétricas do Solo	20
2.2.2	Resposta de Sistemas de Aterramento Frente a Correntes Impulsivas	21
2.2.3	Dependência dos Parâmetros do Solo com a Frequência	22
2.3	Grandezas Utilizadas para Avaliação de Sistemas de Aterramento	23
2.3.1	Impedância Transitória.....	24
2.3.2	Impedância harmônica	24
2.3.3	Impedância Impulsiva	25
2.3.4	Coefficiente Impulsivo	26
2.4	Ionização do Solo.....	26
2.5	Modelos para Sistemas de Aterramento.....	27
3	Revisão Bibliográfica	28
3.1	Sistemas de Aterramento Submetidos a Correntes Impulsivas	28
3.2	Análises de Sistemas de Aterramento Considerando os Efeitos da Frequência	34
3.3	Contribuições do Trabalho.....	39
4	Material e Métodos.....	42
4.1	Visão Geral	42
4.2	Material.....	43
4.2.1	Caracterização dos Sistemas de Aterramento.....	45
4.3	Métodos	48
4.3.1	Ensaio em Campo	50
4.3.1.1	Métodos de Wenner e da Queda de Potencial: aspectos gerais	51
4.3.1.2	Gerador de Impulso de Corrente do LAT-UFCG.....	54
4.3.1.3	Gerador Móvel de Impulso de Corrente.....	56
5	Resultados	58
5.1	Ensaio Realizado em Campo	58
5.1.1	Resultados das Medições e Ensaio em Campo	59
5.1.1.1	Análise Preliminar dos Resultados Obtidos por Meio de Ensaio em Campo	65
5.2	Identificação dos Efeitos Transitórios (ionizantes, capacitivos, indutivos)	67

5.2.1	Identificação dos Transitórios Relacionados à Alta Frequência.....	67
5.2.2	Equação Genérica da Contribuição Relativa às Altas Frequências	77
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	79
6.1	Trabalhos Futuros	81
	Referências Bibliográficas.....	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ASSUNTO

O sistema elétrico de potência é complexo e está sujeito a operar, momentaneamente, em situações de falhas (curto-circuito, desbalanceamento de fases) ou distúrbios provocados por chaveamento de manobra e surtos atmosféricos. Nesses casos, podem surgir níveis de corrente perigosos aos equipamentos e seres vivos. Essas correntes devem ser conduzidas ao solo com segurança, garantindo a continuidade dos serviços e operação do sistema [3].

Neste contexto, são projetados os sistemas de aterramento, cujo objetivo principal é de tornar o solo um caminho de baixa impedância, preferencial às correntes de fuga. Além disso, o aterramento viabiliza a equalização dos potenciais que surgem no solo quando da passagem de corrente elétrica [4].

Essencialmente, um sistema de aterramento é uma ligação elétrica proposital de um sistema físico ao solo, sendo constituído de três componentes básicos: eletrodos de aterramento, conexões elétricas, que interligam um ponto do sistema aos eletrodos, e a terra, que envolve os eletrodos [5].

Os fenômenos elétricos decorrentes de curto-circuito, ou desbalanceamento de fases, possuem características diferentes dos fenômenos decorrentes de chaveamento de manobra ou surtos atmosféricos. Os primeiros ocorrem em frequências industriais (50 Hz ou 60 Hz) e os últimos são fenômenos de frequência elevada (0,5 MHz a 500 MHz) [3].

A maioria das malhas de aterramento são dimensionadas para atender solicitações em baixa frequência, como correntes provenientes de curto-circuito. Nesses casos, a análise do sistema de aterramento é simplificada e o parâmetro da impedância de aterramento pode ser aproximada ao parâmetro resistência de aterramento, entendida como a resistência da terra ao redor dos eletrodos [3]. Entretanto, quando o sistema de aterramento é percorrido por sinais de alta frequência, começam a surgir efeitos transitórios que influenciam diretamente no desempenho do sistema, alterando seu comportamento em baixa frequência. Efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, são efeitos transitórios que surgem individualmente, ou simultaneamente, de acordo com a

intensidade e frequência do sinal conduzido pelo sistema de aterramento. Dessa forma, para se analisar adequadamente o comportamento de um sistema de aterramento, é imprescindível avaliar como o mesmo responde frente a sinais de alta intensidade e frequência.

1.2 MOTIVAÇÃO

O Brasil possui uma das maiores incidências de raios do mundo e pelo menos um terço dos desligamentos das redes de distribuição é causado por descargas atmosféricas [6]. Quando se trata das linhas de transmissão, esse cenário se torna ainda mais grave, pois cerca de 70% dos desligamentos são provocados por descargas atmosféricas [7].

As principais medidas preventivas, que visam evitar, ou minimizar, os danos provocados pela incidência de descargas atmosféricas no sistema elétrico, consistem na redução da resistência de aterramento [5]. Entretanto, o comportamento dos sistemas de aterramento, frente a descargas atmosféricas, apresenta características que dependem de sua geometria, solo, onde o mesmo está instalado, e intensidade e frequência da descarga atmosférica [3].

Como as descargas atmosféricas são fenômenos aleatórios, de elevadas intensidade e frequência, muitas pesquisas vêm sendo conduzidas para se compreender o fenômeno, seu impacto nos sistemas elétricos e a influência no dimensionamento dos sistemas de aterramento. Os principais trabalhos envolvem: avaliação experimental [8, 9] e modelagem [10 - 14].

As avaliações experimentais utilizam gerador de impulso de corrente para reproduzir as descargas atmosféricas. Com a aplicação direta de impulsos de alta intensidade e frequência nos sistemas de aterramento, é possível avaliar de forma consistente os efeitos envolvidos, pois são obtidas respostas mais próximas aos reais. Entretanto, as pesquisas experimentais são limitadas pelos custos envolvidos na aquisição do gerador e pelo espaço físico pois, normalmente, os sistemas de aterramento, a serem ensaiados, devem ser construídos próximos ao gerador [15]. Alguns trabalhos superam a limitação do espaço físico por meio da construção de modelos reduzidos [16, 17]. Entretanto, os modelos reduzidos não garantem a reprodução das condições reais dos sistemas de aterramento, apresentando incertezas relacionadas, principalmente, às características do solo e propagação de onda no sistema.

Já os estudos envolvendo simulações computacionais dos sistemas de aterramento, são atrativos por oferecer custo reduzido, em relação aos estudos experimentais, e possibilitar o estudo dos efeitos envolvidos no comportamento transitório de sistemas de aterramento.

Entretanto, a maior parte dos estudos experimentais, ou baseada em simulações, avaliam os efeitos transitórios isoladamente. Em alguns trabalhos, disponíveis na literatura, foram realizados estudos das diferentes características do processo de ionização do solo e propostos modelos de ionização para aplicação em sistemas de aterramento [18 - 20]. Entretanto, estes estudos, não avaliaram a influência da frequência do sinal. Já os trabalhos [14, 21, 22], avaliaram a influência da frequência nos parâmetros elétricos (resistividade e permissividade) do solo. Entretanto, não consideraram a influência da ionização. Por fim, os estudos que consideraram os efeitos da ionização e da frequência do sinal, no comportamento transitório de sistemas de aterramento [11, 22, 23], realizaram experimentos em ambiente controlado de laboratório e não avaliaram geometrias complexas de aterramento.

Dessa forma, o presente trabalho, vem contribuir com os estudos de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente, por meio da análise conjunta dos efeitos presentes no comportamento transitório de sistemas de aterramento, e identificação dos parâmetros, ou variáveis, que exercem influência predominante durante o transitório. Para isso, foram realizados experimentos em campo, utilizando um gerador de impulsos de corrente fixo e um móvel, o que permitiu a avaliação de quatro sistemas de aterramento com configurações distintas, instaladas em solos com características também distintas. Dessa forma, as limitações verificadas nos estudos experimentais foram superadas, o que permitiu uma melhor avaliação dos fatores que influenciam no comportamento transitório do aterramento. Foram realizados ensaios em um sistema de aterramento, composto por apenas um eletrodo, fincado no solo verticalmente e em três sistemas típicos de aterramento de linhas de distribuição e subtransmissão.

Por fim, o presente trabalho também visa contribuir com as pesquisas na área de modelagem de sistemas de aterramento, visto que foi identificado uma equação matemática genérica, representativa da contribuição dos efeitos transitórios (ionizantes, indutivos e capacitivos), na resposta em baixa frequência do sistema de aterramento.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Identificar os efeitos transitórios que afetam o comportamento de sistemas de aterramento quando os mesmos são submetidos a impulsos de corrente.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a partir de ensaios experimentais 4 configurações distintas de sistemas de aterramento instalados em solos com características também distintas;
- Realizar experimentos em campo, em sistemas de aterramentos de dimensões reais;
- Identificar os efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, a partir da curva característica da relação entre a tensão e a corrente;
- Identificar os efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, a partir da comparação entre o comportamento em baixa frequência e o comportamento em alta frequência, de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente;
- Verificar a influência da geometria do aterramento, em seu comportamento transitório;
- Verificar a influência da resistividade do solo, no comportamento transitório de um sistema de aterramento;
- Verificar a influência dos tempos de frente e amplitude da corrente, no comportamento transitório de um sistema de aterramento;
- Propor uma equação matemática genérica que represente a contribuição dos efeitos transitórios na resposta em baixa frequência de um sistema de aterramento.

1.4 METODOLOGIA

No presente trabalho são analisados sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente, por meio da identificação dos efeitos transitórios que afetam o comportamento em baixa frequência desses sistemas. Para isso, foram comparadas as respostas em alta e baixa frequência dos sistemas de aterramento. Tanto as respostas em alta frequência, como as respostas em baixa frequência, foram obtidas por meio de ensaios realizados em campo. Os ensaios em campo, consistiam na aplicação de impulsos de corrente em sistemas de aterramento. As respostas em alta frequência foram obtidas diretamente da medição da tensão, nos terminais dos sistemas de aterramento, onde foram injetados os impulsos de corrente. Já as respostas em baixa frequência, foram estimadas através das medições dos sinais de corrente, injetadas nos sistemas de aterramento, e das medições da resistência de aterramento em baixa frequência, dos sistemas ensaiados.

Os ensaios em campo, foram realizados em quatro sistemas de aterramento com configurações distintas, implantados em solos também distintos. Os impulsos de corrente foram gerados por meio de dois geradores de impulso de corrente, um fixo e um móvel. Para aquisição dos sinais da corrente injetada e tensão medida no terminal de aplicação do impulso, foram utilizados dois osciloscópios digitais, pontas de prova de alta tensão, bobina de Pearson e cabos coaxiais blindados. As medições das resistências de aterramento em baixa frequência, dos sistemas de aterramento ensaiados, foram realizadas em concordância com a norma [24], que trata do método de Wenner.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica. Dentre os assuntos abordados, são discutidos os conceitos no que se refere a sistemas de aterramento, descargas atmosféricas e as principais grandezas utilizadas para avaliação de sistemas de aterramento. No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica que aborda a evolução histórica da pesquisa da resposta de sistemas de aterramento elétrico submetidos a impulsos de corrente. Neste capítulo é dado ênfase aos aspectos experimentais e estudos dos efeitos transitórios que influenciam no comportamento transitório do sistema de aterramento. No Capítulo 4 são descritos os materiais e métodos empregados nas medições em campo, nas análises dos dados, com o objetivo de identificar a contribuição

dos efeitos transitórios que afetam o comportamento de sistemas de aterramento, quando os mesmos são submetidos a impulsos de corrente. No Capítulos 5 são apresentados os resultados. No Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais e as propostas de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Na seção 2.1, são descritas as características gerais das descargas atmosféricas. Na seção 2.2, é apresentado o sistema de aterramento e seus componentes, bem como as características elétricas do solo, da resposta de sistemas de aterramento, frente a correntes impulsivas, e as dependências dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. Em seguida, na seção 2.3, são definidas as principais grandezas utilizadas na avaliação de sistemas de aterramento: impedância transitória, impedância harmônica, impedância impulsiva e coeficiente impulsivo. Já na seção 2.4, é apresentado o efeito da ionização do solo e sua principal característica. Por fim, na seção 2.5, são citados os principais modelos utilizados para representar sistemas de aterramento.

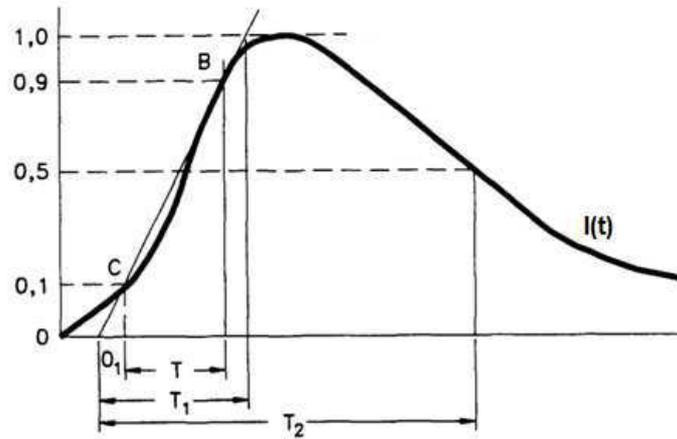
2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

São fenômenos naturais e aleatórios que ocorrem decorrente do acúmulo de cargas elétricas em certas regiões da atmosfera. O fenômeno consiste em um fluxo de corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração. 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 [25].

Segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais [26], incêndios, queima de equipamentos e desligamentos de sistemas de energia (70% de desligamento das linhas de transmissão e 40% dos sistemas de distribuição), provocados por descargas atmosféricas, são responsáveis por perdas financeiras anuais estimadas em R\$ 1 bilhão [26].

Devido aos riscos que as descargas atmosféricas oferecem às pessoas, animais e equipamentos próximos ao ponto de descarga, pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de se compreender as características elétricas de uma descarga [27]. A partir da avaliação de descargas elétricas em para-raios, foi definida a forma de onda típica de impulsos de corrente elétrica, como pode ser observado na Figura 2.1 [27].

Figura 2.1: Sinal representativo de um impulso atmosférico.



Fonte: [27].

Em que:

- $I(t)$: Impulso de corrente elétrica representativa de uma descarga atmosférica;
- O_1 : Origem virtual. É utilizada 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;
- T_1 ou T_f : Tempo de frente do sinal. É definido como sendo $1,25 \times T$. Representa o intervalo de tempo entre a origem virtual e a amplitude máxima do impulso; e
- T_2 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.

O sinal impulsivo de corrente, representativo de descargas atmosféricas, possui o valor típico de $8/20 \mu\text{s}$ (onde T_1 , ou T_f , é $8 \mu\text{s}$ e T_2 , ou T_{mc} , é $20 \mu\text{s}$) [27].

2.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O arranjo mais simples de um sistema de aterramento é composto por um único eletrodo fincado no solo e os sistemas mais complexos são as malhas de aterramento, compostas por eletrodos e cabos conectados e enterrados no solo [28].

O arranjo e a construção de uma malha de terra definem o nível de proteção que se deseja para uma determinada instalação, pois quando correntes provenientes de curto-

circuito, ou oriundas de descargas atmosféricas, atravessam um sistema de aterramento, essas correntes se propagam no solo gerando gradientes de potencial que tendem a diminuir à medida que se afastam do ponto de ocorrência da descarga [29, 30].

Portanto, como o solo também é parte do sistema de aterramento, o tipo de solo e suas características elétricas são determinantes para o entendimento da distribuição de potencial no solo e a resposta do sistema de aterramento aos impulsos de corrente. Os parâmetros elétricos do solo que mais influenciam na eficiência de um sistema de aterramento são sua resistividade e permissividade elétrica [28].

2.2.1 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO

A permissividade e a resistividade elétrica são parâmetros dependentes da composição química, física e geométrica dos elementos do solo, bem como de fatores externos, como as condições climáticas [31]. Portanto, suas características podem sofrer alterações ao longo do tempo e apresentar sazonalidade [28].

A resistividade elétrica do solo (ρ) caracteriza o quanto ele se opõe à passagem de corrente elétrica, sendo definida como a medida da resistência entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias preenchido com solo [32]. Matematicamente, a resistividade é definida pela Equação (2.1) e sua unidade de medida no Sistema Internacional (SI) é $\Omega.m$ [4].

$$\rho = \frac{RA}{l}, \quad (2.1)$$

em que:

ρ : representa a resistividade elétrica média do solo ($\Omega.m$);

R : representa a resistência elétrica do solo (Ω);

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

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

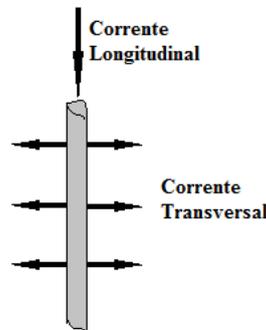
Já a permissividade elétrica (ϵ), expressa em F/m, fornece a medida da capacidade de um material de se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado e da energia associada ao processo de polarização [3]. Entende-se, por polarização, um deslocamento reversível dos centros de cargas positivas e negativas na direção do campo elétrico externo aplicado. Por ser reversível, essa direção acompanha, ou pelo menos tende a acompanhar, a própria orientação do campo elétrico aplicado [3].

2.2.2 RESPOSTA DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO FRENTE A CORRENTES IMPULSIVAS

Um impulso de corrente elétrica, introduzido no solo a partir de um eletrodo em forma de haste, é parcialmente dissipado para o solo (corrente transversal) e parcialmente transferido para o comprimento restante do eletrodo (corrente longitudinal) [33].

A componente longitudinal é responsável por perdas internas ao longo do eletrodo e estabelece um campo magnético. Já a componente transversal é responsável pelo escoamento da corrente no solo e estabelece um campo elétrico [28]. Na Figura 2.2 estão ilustradas as duas componentes da corrente em um segmento do eletrodo [30].

Figura 2.2: Correntes elétricas estabelecidas em um eletrodo de aterramento.



Fonte: [30].

O campo elétrico, devido à parcela transversal, é formado por componentes de natureza condutiva e capacitiva. A parcela transversal da corrente é dada por [34]:

$$I_{trans.} = I_G + j I_C, \quad (2.2)$$

em que

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

I_G : representa a componente de corrente condutiva; e

I_C : representa a componente de corrente capacitiva.

O campo magnético, devido à parcela longitudinal, é formado por componentes de natureza resistiva e indutiva. A parcela longitudinal da corrente é dada por [34]:

$$I_{long.} = I_R + j I_L, \quad (2.3)$$

em que

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

I_R : representa a componente de corrente resistiva; e

I : representa a componente de corrente indutiva.

O campo elétrico, devido à $I_{trans.}$, determina o fluxo de correntes capacitivas e indutivas no solo. A relação entre as correntes capacitivas e indutivas depende da razão $\sigma/\omega\epsilon$, em que: σ é a condutividade do solo, ω é a frequência angular e ϵ é a permissividade do meio [28, 34].

Na ocasião de correntes oriundas de distúrbios elétricos, com características próximas das condições de regime, os efeitos reativos podem ser desprezados, por serem bastante reduzidos, e o sistema de aterramento pode ser avaliado como uma resistência [35]. Em solicitações da malha de aterramento para situações de impulsos de corrente, o sistema de aterramento deve ser avaliado levando-se em conta os efeitos indutivos e capacitivos do solo, pois esses parâmetros tornam-se maiores com a elevação da frequência do sinal de corrente [34]. Nestes casos, o sistema de aterramento é avaliado como uma impedância de aterramento.

2.2.3 DEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA

Quando o solo é submetido a campos eletromagnéticos variantes no tempo, a relação entre o rotacional do campo magnético e o campo elétrico se relacionam segundo os parâmetros condutividade e permissividade do meio, conforme expressa a quarta equação de Maxwell, apresentada na Equação (2.4) [36]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \epsilon \mathbf{E}, \quad (2.4)$$

em que:

$\nabla \times \mathbf{H}$: rotacional do campo magnético;

\mathbf{E} : campo elétrico;

Enquanto a condutividade é um número real, a permissividade é um número complexo, dada por [36]:

$$\epsilon = \epsilon_{real} - j\epsilon_{imag}. \quad (3.5)$$

A componente real da permissividade (ϵ_{real}) fornece uma medida do grau de polarização do material. Enquanto que a componente imaginária (ϵ_{imag}) fornece uma medida

das perdas que ocorrem durante o processo de polarização. Substituindo a Equação (3.5) na Equação (2.4), tem-se que [22]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = [(\sigma + w\varepsilon_{imag}) + jw\varepsilon_{real}] \mathbf{E}. \quad (4.6)$$

A Equação (4.6) mostra que a condutividade efetiva do solo ($\sigma_e = \sigma + w\varepsilon_{imag}$) é constituída da condutividade do meio e de uma parcela dependente da frequência, relacionada à parte imaginária de sua permissividade. Essa segunda parcela é responsável pelo aumento da condutividade efetiva com o aumento da frequência [37].

2.3 GRANDEZAS UTILIZADAS 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 [38].

Nesse sentido, o comportamento do sistema de aterramento em baixa frequência é utilizado como referência para análise do mesmo sistema submetido a correntes impulsivas [15]. A resistência em baixa frequência é uma grandeza representativa do comportamento 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 [38].

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 comportamento transitório do eletrodo [39]. 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 [38].

Dessa forma, para caracterizar o comportamento transitório de eletrodos de aterramento, são utilizadas diferentes aproximações e muitos parâmetros distintos foram propostos [15]. As principais grandezas representativas da resposta do aterramento ao impulso de corrente são: impedância transitória, impedância harmônica, impedância impulsiva e coeficiente impulsivo [15, 34].

2.3.1 IMPEDÂNCIA TRANSITÓRIA

A impedância transitória do aterramento ($Z(t)$) é representada, no domínio do tempo, por [15]:

$$Z(t) = \frac{V(t)}{I(t)}, \quad (5.7)$$

em que: $V(t)$ representa a tensão, ao longo do tempo, estabelecida no eletrodo de injeção de corrente; e $I(t)$ a corrente injetada no eletrodo.

2.3.2 IMPEDÂNCIA HARMÔNICA

No domínio da frequência, o comportamento da impedância harmônica ($Z(\omega)$) é dado por [34]:

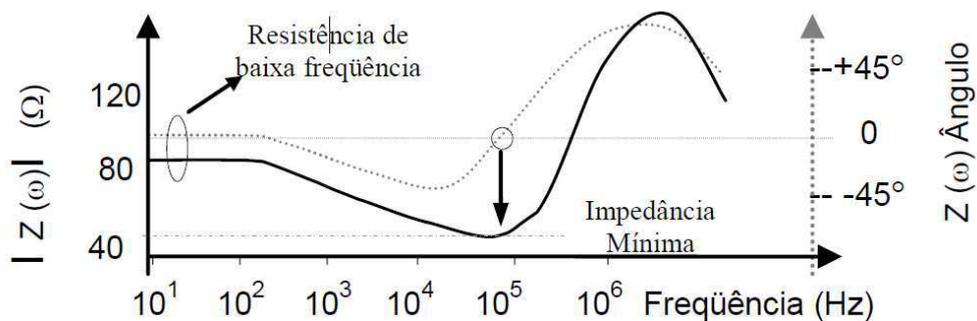
$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}, \quad (6.8)$$

em que $V(\omega)$ representa a elevação de potencial desenvolvida no eletrodo (referenciada ao infinito); e $I(\omega)$ representa a corrente aplicada ao aterramento para cada frequência específica.

Considerando solos heterogêneos, a impedância harmônica do aterramento depende da configuração dos eletrodos, da onda de corrente injetada e das características eletromagnéticas do solo (condutividade, permissividade e permeabilidade) [34].

Na Figura 2.3 é mostrado o comportamento esperado para a impedância harmônica do aterramento, no domínio da frequência, para um eletrodo longo enterrado no solo [34].

Figura 2.3: Variação da impedância harmônica do aterramento em relação à frequência.



Fonte: adaptado de [34].

De acordo com a Figura 2.3, quando a frequência é reduzida ($f < 1$ kHz) os efeitos reativos são desprezíveis e a impedância harmônica do aterramento pode ser aproximada por um número real e o aterramento pode ser representado por uma resistência [21, 34]. Contudo, para valores elevados de frequência, observa-se que, inicialmente, a impedância harmônica do aterramento tem seu valor reduzido, em relação ao valor da resistência em baixa frequência, devido ao efeito capacitivo do solo [40]. Com o aumento da frequência, o efeito indutivo dos eletrodos começa a exercer influência e a impedância continua decrescendo até o instante em que esta atinge seu valor mínimo, em torno de uma frequência na qual os efeitos capacitivos e indutivos se compensam [34]. Depois do valor da frequência em que a impedância de aterramento tem seu valor mínimo, o efeito indutivo dos eletrodos se torna predominante e a impedância de aterramento começa a crescer [34].

2.3.3 IMPEDÂNCIA IMPULSIVA

A impedância impulsiva (Z_p) é uma grandeza escalar conceituada no domínio do tempo [41]. Em estudos que consideram correntes impulsivas, típicas de descargas atmosféricas e de manobra, é comum representar o comportamento do sistema de aterramento utilizando-se da impedância impulsiva de aterramento, dada por [42]:

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}, \quad (7.9)$$

em que V_p representa o valor de pico da onda de tensão desenvolvida no ponto de injeção de corrente; e I_p representa o valor de pico da corrente elétrica aplicada no ponto de injeção de corrente.

Tendo em vista que os valores de pico de tensão e de corrente elétrica não necessariamente ocorrem ao mesmo tempo, em decorrência da defasagem entre esses sinais, causada pela influência das características capacitivas ou indutivas do solo, o parâmetro da impedância impulsiva pode não coincidir com o pico da impedância transitória do sistema de aterramento [39, 43].

2.3.4 COEFICIENTE IMPULSIVO

O coeficiente impulsivo (A_{imp}) é um parâmetro utilizado para denotar o comportamento transitório do aterramento e é definido por [41]:

$$A_{imp} = \frac{Z_p}{R_{bf}}, \quad (8.10)$$

em que R_{bf} representa a resistência de aterramento em baixa frequência.

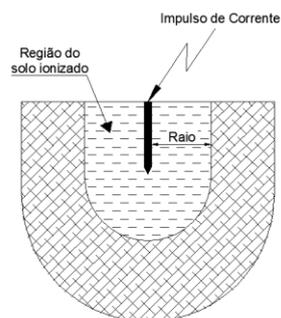
Pela Equação (8.10), verifica-se que, se $A_{imp} < 1$, o desempenho transitório do aterramento é melhor do que o desempenho, do mesmo, em baixa frequência. Em contrapartida, $A_{imp} > 1$, indica que o comportamento transitório do aterramento é pior em relação ao desempenho, do mesmo, em baixa frequência [44].

2.4 IONIZAÇÃO DO SOLO

Quando um sistema de aterramento é submetido a um impulso de corrente, o campo elétrico, devido à componente transversal da corrente, pode provocar a ionização do solo nas proximidades do local de injeção da corrente [30]. Esse fenômeno provoca uma redução do potencial elétrico na área de ionização do solo, reduzindo assim o valor da impedância do aterramento [4].

Os efeitos da ionização do solo são verificados como se houvesse um aumento no comprimento efetivo do raio do eletrodo [4]. A Figura 2.4 apresenta a região de ionização do solo (zona circunvizinha ao eletrodo de aterramento, submetido ao impulso de corrente), onde há uma redução transitória na resistividade do solo, representando o efeito da ionização do solo [39].

Figura 2.4: Representação da zona de ionização do solo.



Fonte: [39]; reproduzida de [4].

Quando um impulso de corrente é injetado no eletrodo de aterramento, a distribuição espacial do campo elétrico no solo ocorre de acordo com [45 - 47]:

$$\vec{E} = \rho \vec{j}, \quad (2.11)$$

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 quantidade de sais dissolvidos nela determinam o valor da resistividade estacionária do solo. Como o tamanho das partículas não condutoras, em uma amostra do solo, varia bastante, o tamanho e 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 [48].

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 dos parâmetros do solo serem restaurados. A alteração da forma do eletrodo e das características do solo influenciam na região ionizada. Entretanto, não alteram o processo físico da ionização [48].

2.5 MODELOS PARA SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Na literatura são propostos diversos modelos. Entretanto, os mais difundidos e utilizados são:

- Modelo baseado na teoria de circuitos [10, 17, 49];
- Modelo de linhas de transmissão [10, 12];
- Modelo de circuitos eletromagnéticos [36, 50];

No próximo capítulo, será feita a revisão bibliográfica sobre sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente, com destaque aos trabalhos com foco em análises experimentais e influência da frequência no comportamento transitório de sistemas de aterramento. Neste último, são tratados de trabalhos que realizaram modelagem bem como avaliações experimentais.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na seção 3.1 são apresentados os trabalhos, disponíveis na literatura específica, referentes a sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas. Já na seção 3.2 são apresentados trabalhos que abordam os efeitos da frequência nos sistemas elétricos submetidos a impulso de corrente. Por fim, na seção 3.3, é apresentado um quadro sinóptico com o resumo das principais contribuições dos trabalhos estudados.

3.1 SISTEMAS DE ATERRAMENTO SUBMETIDOS A CORRENTES IMPULSIVAS

As correntes impulsivas possuem uma elevada intensidade e elevada frequência, características similares às descargas atmosféricas [3]. A natureza elétrica das descargas atmosféricas foi demonstrada por volta de 1751, através de experimentos, quase simultâneos, realizados por Benjamin Fraklin, nos Estados Unidos, e Dalibard e Delor, na França [51]. Em sistemas elétricos, um dos primeiros pesquisadores a estudar as descargas atmosféricas foi Creighton [52], em 1924. A partir da análise das avarias, provocadas por uma descarga atmosférica, em um poste de madeira de uma linha de distribuição, Creighton estimou a corrente (1,5 MA) e a frequência (50 kHz), da corrente impulsiva [52]. Os resultados encontrados, continham muitos erros devido às diversas considerações e aproximações feitas (valor da condutância de vapores aquosos e campo elétrico da terra), entretanto, a partir deste trabalho, muitas outras pesquisas, voltadas ao estudo de descargas atmosféricas no sistema elétrico, começaram a ser desenvolvidas.

Em 1935, Bellaschi [53] foi um dos pioneiros em estudos experimentais com aplicação de corrente impulsiva. Além de experimentos em campo, ele realizou simulações utilizando correntes de 25, 50 e 100 kA e tempos de duração entre 40 e 100 μ s em condutores de alta tensão, cujo objetivo era verificar os efeitos destrutivos de impulsos de corrente nos condutores. O método experimental utilizado é descrito brevemente mas a técnica utilizada não é explicada claramente. Ainda na primeira metade do século passado, em 1936 e 1940, Dwight [49] e Sunde [33], respectivamente, apresentaram modelos matemáticos de sistemas de aterramento que, mesmo com restrições devido às

simplificações feitas, são amplamente referenciados até os dias atuais. Dwight apresentou expressões para o cálculo da resistência de aterramento em baixas frequências, considerando diferentes arranjos de eletrodos. Por sua vez, Sunde, utilizou a teoria de ondas viajantes para modelar o comportamento dinâmico de sistemas de aterramento. Em seus trabalhos, ele observou a presença do efeito da ionização no entorno do solo, onde seu arranjo experimental foi montado. As principais contribuições de seu trabalho foram as expressões para a capacitância e indutância distribuídas para algumas configurações de sistemas de aterramento.

Em 1973, Dvegan e Whitehead [54] estudaram matematicamente a impedância transitória de um sistema de aterramento. Verificaram que ele apresentava uma resposta distinta e variante no tempo de acordo com a dimensão dos eletrodos e a resistividade do solo. No trabalho também foram apresentadas diversas curvas de impedância transitória para solos com diferentes resistividades. Neste trabalho, também foi verificado que, em solos com resistividades maiores que $1000 \Omega\text{m}$, a impedância transitória tendia a aumentar, enquanto que em solos com resistividades menores que $700 \Omega\text{m}$, a impedância transitória tendia a decair. Entretanto, as análises realizadas pelos autores não levaram em consideração a variação da resistividade do solo com a frequência. Portanto os parâmetros de 700 e $1000 \Omega\text{m}$, para indicar a tendência de decaimento, ou subida, no comportamento da impedância transitória, não se apresenta em todas as situações experimentais. Portanto, essa verificação não pode ser generalizada.

A partir de 1980, os trabalhos começaram a apresentar uma preocupação pronunciada com os efeitos provocados pela frequência elevada dos impulsos de corrente. A revisão bibliográfica, com foco nos trabalhos que avaliam a influência da frequência na análise do comportamento transitório dos sistemas de aterramento, é apresentada na seção 3.2. Já as pesquisas realizadas na década de 90 são marcadas por trabalhos que utilizaram análises computacionais. A partir daí, surgem uma série de modelos e análises computacionais que tentam identificar, ou explicar, os parâmetros envolvidos nos efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, no comportamento transitório de sistemas elétricos.

O próximo trabalho de maior relevância, que considerou apenas estudos experimentais de sistemas de aterramento submetidos a impulso de corrente, veio em 1998, com Sekioka et al. [55], que realizaram experimentos com injeção de impulsos de corrente em um sistema de aterramento composto por uma haste vertical concretada. O solo, onde estava o aterramento, possuía uma resistividade de $200 \Omega\text{m}$. O pico da corrente injetada chegou a 40 kA e o tempo de frente da corrente tinha poucos microssegundos (o

tempo de frente exato não é informado pelos autores). Com esse trabalho, os autores identificaram experimentalmente, a presença da ionização do solo. Eles também verificaram que a ionização do solo reduzia a resistência de aterramento e sua característica era similar ao efeito da histerese. Para atingir esse nível de corrente, nos ensaios em campo, eles precisaram desmontar um gerador de impulsos (da companhia elétrica Kansai – Japão) em 3 componentes, que foram transportados individualmente em caminhões com capacidade para 10 t. Um dos pontos deficientes da pesquisa foi o arranjo experimental, pois, devido às dimensões do gerador de impulso, o mesmo ficou localizado 20 m distante de uma subestação de 77 kV e o aterramento ensaiado ficou em um ponto intermediário entre a subestação e o gerador. Devido a esse arranjo, as formas de onda capturadas apresentaram distorções significativas, comprometendo parte das análises.

Em 2003, He et al. [56] estudaram métodos para reduzir a impedância de aterramento de linhas de transmissão de forma a se obter uma melhor resposta do aterramento, quando solicitado por impulsos de corrente. Para tanto, eles montaram 6 geometrias diferentes de sistemas de aterramento, em escala reduzida, com o intuito de possibilitar ensaios em ambiente laboratorial. Além disso, eles alteraram o solo de modo que foram obtidas resistividades que variavam de 100 a 5103 Ωm . Assim, eles avaliaram a relação entre a geometria do aterramento e a resistividade do solo com base nos parâmetros da impedância impulsiva e do coeficiente impulsivo. Dessa forma, eles identificaram que o coeficiente impulsivo de linhas de transmissão: 1) diminui de acordo com o valor de pico da corrente; 2) diminui para geometrias pequenas; 3) aumenta para geometrias maiores e que: a impedância impulsiva aumenta com o aumento da resistividade do solo. Neste trabalho, o coeficiente impulsivo denota a relação entre a resistência de aterramento do sistema real e a do sistema reduzido, portanto, não significa o mesmo coeficiente indicado na subseção 2.3.4. Uma das deficiências encontradas neste trabalho, está no fato da resposta transitória do sistema de aterramento real ter sido estimada a partir dos resultados encontrados para o modelo reduzido, ou seja, não foram feitas medições em campo no sistema real. Dessa forma, os erros nas medições em laboratório também foram propagados para as estimativas do sistema real. Além disso, o solo, na sua condição real, possui heterogeneidades que não são reproduzidas em laboratório.

Em 2009, Visacro e Rosado [8] realizaram estudos experimentais para avaliar a impedância impulsiva e a relação entre a impedância impulsiva e a resistência em baixa

frequência, representado pelo coeficiente impulsivo (subseção 2.3.4), em sistemas de aterramento simples, com apenas 1 eletrodo. A contribuição dada por esse trabalho foi o fato dos autores terem utilizado eletrodos de diferentes comprimentos (3 a 30 m). A partir de resultados experimentais, eles mostraram que para eletrodos curtos (menores que o comprimento efetivo) a impedância impulsiva era menor que a resistência em baixa frequência e, portanto, o coeficiente impulsivo era menor que 1. Para eletrodos maiores que o comprimento efetivo, o coeficiente impulsivo era maior que 1, pois a impedância impulsiva era menor que a resistência em baixa frequência. Um dos aspectos que não foram avaliados nesta pesquisa foi a influência da intensidade do impulso de corrente. Ao longo do texto, não foram indicados os valores máximos da corrente aplicada. Entretanto, pela análise dos gráficos é possível perceber que o maior valor de pico da corrente aplicada registrado foi de aproximadamente 2,0 A.

Em 2010, Haddad et al. [15] realizaram testes experimentais sobre distribuições de corrente e de 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 à intensidade da corrente elétrica injetada, envolve parâmetros fundamentais para modelar o comportamento de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica. Ao longo do texto, Haddad não faz comparações com a impedância transitória do sistema sob ensaio, adotando, como único parâmetro de referência, a impedância impulsiva.

Em 2010, Araújo et al. [29] realizaram ensaios de impulso de corrente em sistemas de aterramento compostos por uma haste e por quatro hastes interconectadas formando um quadrado. Eles mostraram que, devido à heterogeneidade do solo, pontos distintos de medição apresentaram diferentes níveis de tensão, apesar de as distâncias de captação do sinal serem as mesmas, porém em direções distintas. Neste trabalho, foi explicado o método de ensaio, porém, os detalhes e as especificações dos cabos e instrumentos utilizados nos ensaios careceram de informações. No escopo do trabalho, essas informações possuem relevância para uma correta avaliação dos resultados, visto que a impedância dos cabos, osciloscópios, posição entre as hastes de medição e o aterramento remoto influenciam diretamente na qualidade dos resultados obtidos.

Em 2014, Castro et al. [9] realizaram uma avaliação experimental do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de um sistema de aterramento composto por uma haste, 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 apresentava variação desprezível quando se mantinha a forma de onda do sinal de corrente aplicada no solo e variava-se a sua amplitude. Eles observaram também que a impedância impulsiva variava quando o tempo de frente do sinal aplicado no solo era modificado. Neste trabalho não foram feitas considerações a respeito da influência dos efeitos ionizantes, capacitivos, ou indutivos, presentes nas medições realizadas. Outro ponto que merece destaque é o fato de não terem sido avaliados sistemas de aterramento com outras configurações.

Em 2015, Gonçalves [39] realizou análises experimentais da impedância impulsiva e impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a correntes impulsivas. 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. Ele observou que havia variação da impedância impulsiva tanto com a amplitude do sinal aplicado quanto com o tempo de frente e comparou com a impedância transitória. Dessa forma, ele percebeu que a impedância impulsiva não era um parâmetro confiável para avaliar o comportamento transitório de sistemas de aterramento. Neste trabalho, também não foram realizadas análises a respeito dos efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, no comportamento transitório do sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente. Outra questão está nas formas de onda da corrente apresentadas no texto. Em algumas delas ocorre um efeito similar dos provocados por reflexões de onda. Entretanto, não foi discutido sobre as reflexões de onda nos resultados, permitindo assim, que outros estudos ainda pudessem ser desenvolvidos com os resultados apresentados.

Em 2015, Harid et al. [41] fizeram uma análise experimental do comportamento 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 transientes 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 comportamento em altas frequências de sistemas de aterramento.

Em 2016, Araújo [57] realizou uma avaliação experimental do comportamento transitório de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas, no domínio do tempo e frequência, analisando as impedâncias transitória, impulsiva e harmônica em relação à forma de onda e à amplitude da corrente injetada na malha de aterramento sob teste. Para isso, utilizou 4 configurações do gerador de impulso, resultando em 4 formas de sinais de correntes impulsivas distintas, em que cada sinal foi injetado com 3 amplitudes diferentes. Os resultados mostraram que quando a variável de análise foi a amplitude do sinal de corrente impulsiva injetada, as impedâncias impulsiva e transitória não tiveram variação significativa. Também foi mostrado que quando a variável de análise foi o tempo de frente do sinal de corrente injetada, a impedância impulsiva variou inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente aplicado e a impedância transitória se estabilizou em torno da resistência em baixa frequência. O módulo da impedância harmônica não teve alterações significativas quando comparada com a amplitude da corrente injetada. Quando se analisou a fase da impedância harmônica com relação às formas de onda, observou-se que a malha de aterramento sob teste teve comportamento predominantemente indutivo. Neste trabalho, os parâmetros do gerador de impulso de corrente não foram avaliados, além disso, a malha sob ensaio estava muito próxima de uma subestação e haviam outras duas edificações no entorno da mesma, o que pôde ter influenciado nos resultados.

3.2 ANÁLISES DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

CONSIDERANDO OS EFEITOS DA FREQUÊNCIA

Como citado na seção 3.1, os efeitos da frequência no comportamento transitório de sistemas de aterramento, submetidos a impulsos de corrente, começaram a ser estudados a partir de 1980. Os primeiros estudos se focaram em desenvolver modelagens que representassem a influência da alta frequência, típica de descargas atmosféricas. As modelagens foram desenvolvidas na forma de circuitos elétricos [11, 42], aproximação por parâmetros representativos de linhas de transmissão [43, 58], teoria de campo [59, 60], ou expressões matemáticas que visavam analisar não apenas o aterramento como um todo [38] mas também aspectos particulares tais como: a variação dos parâmetros do solo com a frequência [14, 22], o comprimento efetivo do eletrodo de aterramento [42, 61] e o fenômeno de ionização do solo [19, 20].

Em 1980, Gupta e Thapar [42] introduziram os parâmetros do comprimento efetivo do eletrodo e do coeficiente impulsivo para avaliações de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente. Seus estudos se basearam em equações empíricas e experimentos, cujo objetivo era a modelagem do eletrodo como indutâncias e admitâncias distribuídas. Na realização dos ensaios, eles constataram que a impedância impulsiva para correntes injetadas nas extremidades da malha de aterramento era maior que aquela obtida quando a corrente era injetada no centro da mesma malha. Outro destaque na pesquisa foi a constatação que, em malhas grandes, o efeito da ionização do solo poderia ser desprezível. Apesar do trabalho inovador, a pesquisa ainda não respondia como a frequência alterava o comportamento transitório dos sistemas de aterramento.

Em 1981, Takashima et al. [59] utilizaram o método das imagens para investigar a característica em alta frequência do aterramento e para saber a distribuição do campo na região em torno dos eletrodos. Para isto, foram feitas considerações em relação à corrente de deslocamento e aos parâmetros: resistividade, permissividade e permeabilidade do solo. Na pesquisa, foram feitas aproximações da impedância de aterramento para sistemas de um eletrodo horizontal, um eletrodo vertical e três eletrodos conectados e espaçados de forma triangular. Computacionalmente, foi verificado que a impedância, fornecida pelo modelo, variava com a frequência. Entretanto, o estudo não apresentou comparações com dados experimentais.

Ainda em 1981, Kosztaluk, Loboda e Mukehedkar [61] utilizaram resultados experimentais acerca do comportamento de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas de alta intensidade para gerar circuitos equivalentes. A principal análise realizada, para encontrar os circuitos equivalentes, foi a relação entre a tensão e a corrente. A partir das curvas características da relação entre a tensão e a corrente, os pesquisadores realizaram aproximações, considerando 3 principais regiões, sendo duas delas lineares associadas à resistência em baixa frequência e outra associada à região não-linear. Com essas análises, eles também identificaram o fenômeno da ionização e aproximaram esse processo pela resposta de uma impedância não-linear, calculada a partir de derivações da curva da relação entre tensão e corrente. No escopo da pesquisa, também foram realizados ensaios experimentais. Os resultados mostraram que as considerações feitas foram eficientes na análise das não linearidades apresentadas no comportamento transitório de um sistema de aterramento. Entretanto, os autores não fizeram estudos em sistemas de aterramento maiores, como mais de quatro eletrodos. A evolução desta pesquisa se deu por Loboda e Pochanke [11], em 1990, onde foram feitas também considerações a respeito do comprimento efetivo do eletrodo.

Em 1983, Meliopoulos e Moharam [43] utilizaram o método dos elementos finitos para modelar eletrodos de aterramento como linhas de transmissão. Neste estudo, eles também abordaram as dificuldades em se determinar o aumento de potencial no solo, quando submetido a impulsos de corrente. Identificaram que as diferenças entre os tempos de frente, dos sinais de tensão em relação aos sinais de corrente, foram provocadas por efeitos indutivos e capacitivos do solo. Os estudos desenvolvidos ajudaram a elucidar os erros que as análises apenas pelo parâmetro da impedância impulsiva, podiam provocar. Esta pesquisa não envolveu os efeitos da ionização do solo, nem nas verificações experimentais, nem nas modelagens por linha de transmissão e a aplicação do método dos elementos finitos se restringia ao regime estacionário de escoamento de correntes elétricas.

Em 1987, Papalexopoulos e Meliopoulos [58] deram prosseguimento ao trabalho anterior, utilizando aproximação por linhas de transmissão com o método dos elementos finitos. Entretanto, neste trabalho, os parâmetros dos elementos finitos dependentes da frequência foram incorporados. Desta forma, eles conseguiram realizar uma modelagem dinâmica para os sistemas de aterramento que poderia ser utilizada para sistema de qualquer dimensão ou geometria. O método foi validado através de experimentos com sistemas de aterramento de vários tamanhos e em solos de diferentes resistividades.

Através dos ensaios e simulações, eles verificaram que a impedância de aterramento era influenciada pelas suas dimensões, resistividade do solo e permissividade do solo. A parte experimental do trabalho utilizou um gerador de pulso de tensão e a corrente máxima medida de 1 A. Portanto, a parte experimental não avaliou a influência da intensidade de corrente, nem o impulso com a forma de onda estabelecida por norma (seção 2.1).

Em 1990, Grcev e Dawalibi [62] propuseram uma aproximação unificada para o cálculo em baixa, alta frequência e comportamento transitório de sistemas de aterramento. A primeira etapa do estudo consistiu em análises no domínio da frequência, por meio da transformada rápida de Fourier, onde a corrente injetada foi representada como resposta do sistema de aterramento. Depois, foram utilizadas uma série de aproximações numéricas para se calcular a dispersão da corrente no solo. Por fim, foi realizada a transformada inversa de Fourier e, a partir dos potenciais provocados pela corrente no solo, foi calculada a impedância. Este trabalho não contemplou experimentos e foram utilizadas muitas considerações e aproximações ao longo de seu desenvolvimento, tornando difícil o entendimento integral da técnica utilizada. Em 1996, Grcev [60] publicou outro trabalho referente à modelagem de sistema de aterramento. Desta vez, foi apresentado o modelo de uma malha de aterramento com as dimensões de 60 m por 60 m, baseado na teoria de campos eletromagnéticos e o método das imagens modificado. Novamente, os cálculos foram realizados no domínio da frequência e, ao final, foram invertidos pela transformada de Fourier para o domínio do tempo. Neste trabalho foram desenvolvidos experimentos e os resultados apresentados se mostraram satisfatórios. Tanto nos experimentos como nas simulações foram avaliados a influência, do local (bordas, proximidades das bordas e centro da malha de aterramento) de injeção da corrente, a dispersão de corrente e o surgimento de potenciais no solo. Para esta pesquisa, o efeito da ionização do solo não foi considerado.

Em 2006, Sekioka et al. [19] consideraram a ionização do solo, provocado por impulso de corrente, como sendo um processo similar ao da formação de um arco elétrico. Dessa forma, a ionização foi representada de acordo com o balanço de energia, onde a entrada de energia no sistema era associada à variação de resistividade. O modelo do balanço de energia dependia da dimensão do eletrodo, da corrente impulsiva injetada no sistema de aterramento e da energia armazenada na zona de ionização. Nele, considerou-se que o momento onde a tensão era máxima não coincidia com o momento onde a corrente impulsiva era máxima. Isto se devia ao efeito da histerese na ionização do solo.

O modelo foi comparado com ensaios experimentais e se mostrou efetivo na representação das características não lineares do solo frente a impulsos de corrente.

Em 2008, Ala et al. [20] aplicaram o método das diferenças finitas no domínio do tempo (DFDT) no modelo dinâmico proposto por Liew e Darveniza [18] com o objetivo de aprimorar a estimativa da região ionizada do solo. O método da DFDT traz uma solução numérica para as equações parciais de Maxwell. Com o método DFDT aplicado ao modelo dinâmico foi possível definir áreas de ionização não uniformes, apresentando maior proximidade com fenômeno de ionização real. Contudo, o método exigia grande esforço computacional quando aplicado em sistemas de aterramento com eletrodos maiores que 0,60 m.

Em 2009, Gazzana et al. [13] 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, linhas 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 da DFDT, o método dos momentos magnéticos (MoM), o método dos elementos finitos (MEF) e o método de modelagem por linhas de transmissão (MLT).

Em 2009, Grcev [1, 38] apresentou uma maneira simples para avaliar os efeitos transitórios originados pela frequência no comportamento transitório de sistemas de aterramento. Com o método proposto, ele mostrou ser possível identificar e parametrizar os comportamentos indutivos, capacitivos, ou ionizantes, que pudessem surgir durante o transitório de corrente. O método consistia em aproximar a resposta transitória do sistema de aterramento como sendo igual à soma de duas componentes, uma componente linear e independente da frequência e outra componente desconhecida não linear dependente da frequência. Dessa forma, a componente linear era encontrada pela multiplicação entre a resistência em baixa frequência e a corrente impulsiva injetada no sistema de aterramento. Assim, conhecendo-se a resposta transitória do sistema de aterramento, encontrava-se a componente responsável pela contribuição de alta frequência na resposta transitória do aterramento. Como Grcev não realizou experimentos em campo para validar sua proposta, ele se baseou em dados encontrados na literatura e em respostas transitórias calculadas a partir de modelos amplamente difundidos na literatura: teoria de circuitos, aproximação por linhas de transmissão, teoria de campos eletromagnéticos e modelos híbridos. Este trabalho apresentou resultados satisfatórios, indicando que a aproximação

proposta poderia ser utilizada para todos os casos de sistemas de aterramento. Entretanto, em sistemas de aterramento grandes, como em malhas de subestações, deveria ser analisado o seu caráter indutivo. Outro ponto que ficou pendente nos estudos de Grcev foi o estudo experimental, já que suas análises são fundamentadas, principalmente, em simulações.

Em 2011, Li et al. [45] analisaram computacionalmente a resposta de um sistema de aterramento frente a impulso de corrente de amplitude elevada (6 kA a 30 kA). Eles utilizaram o método dos elementos finitos para resolver o problema no 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 método dos elementos finitos poderia ser utilizado para analisar malhas de aterramento de vários tipos e tamanhos, bem como simular estruturas de solo reais.

Em 2013, Alípio e Visacro [22] 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 da resistividade e da permissividade em relação à frequência. Ao final, os autores propuseram expressões para se quantificar a associação. Este trabalho apresentou grande relevância para a comunidade científica, que atua na área de aterramentos elétricos, sendo amplamente referenciado desde a sua publicação. Entretanto, os estudos foram realizados em ambiente controlado de laboratório, utilizando modelos em escalas reduzidas e em arranjos que careceram de detalhes.

Em 2014, Cavka, Mora e Rachidi [14] apresentaram uma avaliação dos diferentes modelos que representavam a dependência dos parâmetros elétricos do solo com o espectro de frequência do sinal solicitante. Estes modelos eram expressões para a condutividade do solo e permissividade relativa baseados em dados experimentais. Foi mostrado que os modelos de solo de Scott, Smith-Longmire, Messier e Visacro-Alípio obtiveram resultados globais semelhantes, que estavam em acordo com os resultados experimentais. As diferenças entre os modelos foram encontradas para altas frequências e para solos de baixa resistividade.

Em 2014, Coelho e Almaguer [63] 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 programa 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 estava inserido o sistema de aterramento. Os resultados também mostraram que tanto o modelo dinâmico quanto o modelo de balanço de energia eram satisfatórios na representação do comportamento transitório do sistema de aterramento. Apesar da relevância do estudo, faltou a realização de um estudo experimental para validar os resultados, bem como a análise dos efeitos térmicos no local de passagem da corrente impulsiva.

Em 2016, Gonçalves et al. [64] realizaram uma simulação computacional de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente utilizando o programa COMSOL Multiphysics®. Foram utilizados quatro comprimentos distintos de hastes de aterramento, caracterizando quatro sistemas de aterramento distintos. Os autores analisaram 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 tinha 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 poderia ser melhorado tornando-o mais próximo dos sistemas reais (solo estratificado em camadas e consideração dos efeitos transitórios não lineares).

3.3 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Através da revisão bibliográfica apresentada, ficaram evidentes as dificuldades enfrentadas nas pesquisas envolvendo experimentos em campo. Portanto, existe uma carência na área de pesquisas que realizem avaliações abrangentes, envolvendo diferentes geometrias de sistemas de aterramento com proporções reais e em diferentes tipos de solo. Algumas pesquisas também apresentaram deficiências relacionadas à geração de impulsos de corrente de alta intensidade. Nas pesquisas que envolvem estudos relacionados à frequência, foi identificado que a maioria delas abordam um, ou outro aspecto, relacionado aos efeitos provocados pelo elevado nível de frequência. Como exemplo, têm-se as pesquisas que estudaram os efeitos indutivos, ou capacitivos, mas

desconsideram a ionização e vice-versa. Além disso, boa parte das pesquisas, não realizaram estudos experimentais em sistemas reais e em diferentes geometrias de aterramento.

Sendo assim, o presente trabalho se propõe a superar essas deficiências e contribuir, através de análises experimentais, na identificação dos efeitos transitórios que influenciam no comportamento de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente.

A fim de sintetizar as contribuições dos trabalhos citados nas seções 3.1 e 3.2, apresenta-se na Tabela 3.1 as principais referências e contribuições abordadas nesta revisão bibliográfica. Adicionalmente, também são destacadas as contribuições desta pesquisa.

Tabela 3.1: Comparativo entre a revisão bibliográfica e o presente trabalho.

Pesquisadores	Contribuições							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Loboda e Pochanke (1990)	•		•		•	•	•	
HE (2003)	•				•	•	•	
Sekioka (2006)	•			•		•		
Visacro e Rosado (2009)	•				•	•	•	
Grcev (2009)				•	•	•		
Haddad (2010)	•				•	•	•	
Li (2011)	•			•	•			
Alípio e Visacro (2013)	•		•			•		
Castro (2014)	•					•	•	
Cavka, Mora e Rachidi (2014)	•					•		
Coelho e Almaguer (2014)					•	•		
Gonçalves (2015)	•				•	•	•	
Harid (2015)	•	•			•	•	•	
Altafim								
Araújo (2016)	•				•	•	•	
SILVA (Pesquisa atual)	•	•	•	•	•	•	•	•

1. **Análise experimental do aterramento submetido a correntes impulsivas;**
2. **Experimentos em campo, em sistemas de aterramentos de dimensões reais;**
3. **Identificação dos efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, a partir da curva característica da relação entre a tensão e a corrente;**
4. **Identificação dos efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, a partir da comparação entre o comportamento em baixa frequência e o comportamento em alta frequência, de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente;**
5. **Verificação da influência da geometria do aterramento, em seu comportamento transitório;**
6. **Verificação da influência da resistividade do solo, no comportamento transitório de um sistema de aterramento;**
7. **Verificação da influência dos tempos de frente e amplitude da corrente, no comportamento transitório de um sistema de aterramento;**
8. **Proposição de uma equação matemática genérica para representação da contribuição dos efeitos transitórios na resposta em baixa frequência de um sistema de aterramento.**

Fonte: Produzida pelo autor.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais e os métodos utilizados no desenvolvimento dos estudos e análises do presente trabalho. Inicialmente é apresentado uma visão geral, relacionada às etapas desenvolvidas no âmbito deste trabalho, bem como os aspectos relevantes para a obtenção dos resultados esperados. Em seguida, são descritos e caracterizados os materiais, objetos do estudo. Neste caso, os sistemas de aterramento e seus elementos constituintes. Na sequência, são apresentados os métodos utilizados para avaliar as características transitórias presentes nos sistemas de aterramento, quando submetidos a correntes impulsivas.

4.1 VISÃO GERAL

Visto que, o comportamento transitório dos sistemas de aterramento, quando submetido a impulsos de corrente, apresenta características, particulares e distintas, dependentes de fatores como: geometria do aterramento, resistividade do solo, intensidade e o tempo de frente do impulso de corrente, torna-se necessário, identificar e avaliar essas características para se compreender a relação entre elas e o comportamento transitório dos sistemas de aterramento [41]. Assim, o presente trabalho desenvolveu um método de análise para identificar os efeitos lineares e não lineares, presentes no comportamento transitório de sistemas de aterramento, bem como verificar a contribuição desses efeitos no comportamento em baixa frequência do sistema de aterramento. Os efeitos transitórios analisados foram: ionização, capacitivo e indutivo.

Diante do exposto, a metodologia desenvolvida, envolveu ensaios em campo e avaliações de parâmetros, ou variáveis, para analisar a resposta transitória do sistema de aterramento submetido a corrente impulsiva. Os parâmetros, ou variáveis, analisados foram: estratificação do solo; resistência de aterramento; curva da corrente impulsiva; curva da resposta em tensão; curva característica da relação entre tensão medida e corrente aplicada (curva $V \times I$); impedância transitória; impedância impulsiva; coeficiente impulsivo; tempos de frente e de meia cauda dos sinais de corrente e de tensão.

Sendo assim, a primeira etapa realizada envolveu os ensaios em campo. Na sequência, foi utilizada a metodologia de análises de transitórios eletromagnéticos em

sistemas de aterramento proposta por [2], que considera a resposta de tensão em alta frequência do sistema de aterramento como sendo a soma da resposta em baixa frequência, com uma componente variável no tempo referente à contribuição dos efeitos transitórios dependentes da frequência. Portanto, fez parte desta etapa, a estimativa do comportamento em baixa frequência do sistema de aterramento. Para tanto, considerou-se a atuação do aterramento como uma resistência elétrica linear, com valor igual ao valor da resistência de aterramento em baixa frequência medido em campo. Dessa forma, o comportamento em baixa frequência do sistema de aterramento (resposta de tensão), foi estimado pela multiplicação do impulso de corrente, injetado em campo no aterramento, pela resistência de aterramento, também medida em campo. Comparando-se a resposta em baixa frequência e a resposta em alta frequência (tensão medida em campo) dos sistemas de aterramento analisados, identificou-se os efeitos transitórios relacionados à frequência que alteram o comportamento em baixa frequência destes sistemas.

A comparação entre a resposta em baixa frequência e a tensão medida em campo dos sistemas ensaiados foram a base das análises desenvolvidas. Os parâmetros, ou variáveis, avaliados para verificar a contribuição dos efeitos ionizantes, indutivos, ou capacitivos, presentes no comportamento transitório dos sistemas de aterramento foram: relação entre tensão e corrente, geometria do aterramento, resistividade do solo, coeficiente impulsivo e intensidade da corrente impulsiva. Por fim, foi proposta uma equação matemática genérica para representar a contribuição dos efeitos relativos à frequência, no comportamento transitório dos sistemas de aterramento.

4.2 MATERIAL

Os ensaios foram realizados na cidade de Campina Grande, Paraíba, em período seco e em locais distintos: nas proximidades do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande (LAT-UFCG) e em outras três malhas de aterramento, localizadas em diferentes regiões da cidade de Campina Grande.

O solo da região do entorno do LAT-UFCG possui um sistema de aterramento (Por motivo de organização, este sistema foi nomeado: LAT-UFCG) composto por um eletrodo de aço revestido em cobre que é utilizado em ensaios com impulsos de corrente. O sistema de aterramento está instalado em um solo que apresenta estrutura geológica dura e rochosa. Os outros sistemas de aterramento foram construídos com três

configurações distintas (Por motivos de organização, estes sistemas foram nomeados: A1, A2, A3) e implantados em solos com características também distintas. Nenhum dos solos, onde foram implantados os sistemas de aterramento, receberam tratamento prévio.

O solo na região do entorno de cada aterramento, foi caracterizado individualmente com base na estratificação do solo em camadas com diferentes resistividades. As medições de resistividade do solo foram realizadas de acordo com o método de Wenner [28], em concordância com a norma NBR 7117:2012 [24]. A estratificação do solo foi realizada por meio do programa TecAt Plus 5.2 ® [30, 39, 65]. O programa TecAt é utilizado para o dimensionamento, em baixa frequência (50 ou 60 Hz), de sistemas de aterramento de: subestações elétricas, redes de distribuição primária, secundária e telecomunicações. Para a estratificação do solo, este programa resolve, por meio de métodos numéricos, as formulações definidas por Wenner [24]. O método de medição da resistividade empregado neste trabalho é detalhado na subseção 4.3.1.1. Os resultados das medições e da estratificação do solo estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Resistividades por camadas dos solos nos entornos dos sistemas de aterramento ensaiados.

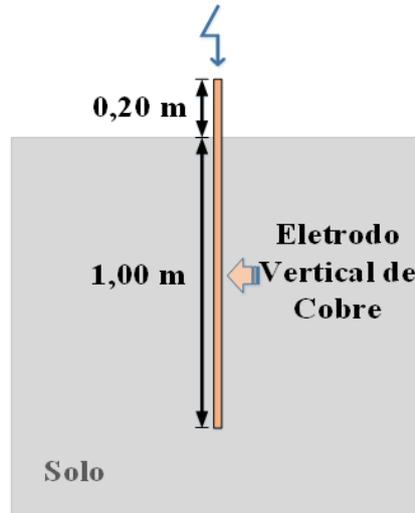
Sistema de aterramento	Camada	Profundidade (m)	Resistividade (Ωm)
LAT-UFCG	h1	0,55	33,65
	h2	> 0,55 -	66,25
A1	h1	0 – 2,61	123,09
	h2	>2,61 -	259,04
A2	h1	0 – 2,83	39,62
	h2	>2,83	196,57
A3	h1	0 – 0,55	71,62
	h2	>0,55	34,94

Fonte: Produzida pelo autor.

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O sistema de aterramento para realização de ensaios, presente nas proximidades do LAT-UFCG, é composto por um eletrodo de aço, revestido em cobre, que mede 1,20 m de comprimento, 13 mm de diâmetro e está enterrado a uma profundidade de 1,00 m no solo. A Figura 4.1 ilustra o sistema de aterramento.

Figura 4.1: Representação do sistema de aterramento para realização de ensaios do LAT-UFCG.



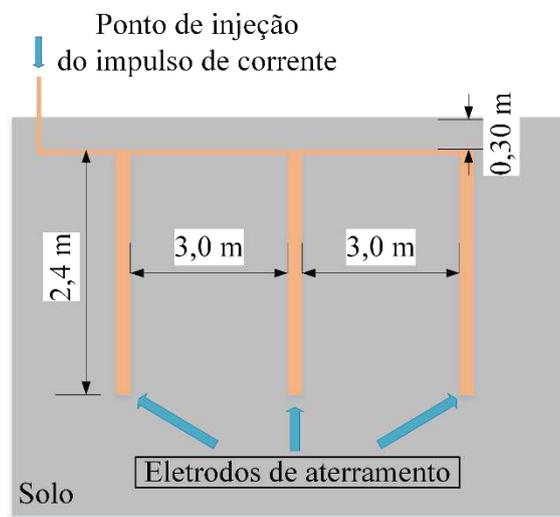
Fonte: Produzida pelo autor.

Os outros três sistemas de aterramento, nomeados aqui de A1, A2 e A3, foram construídos com três configurações e dimensões típicas das utilizadas em aterramento de linhas de distribuição e subtransmissão reais. Conforme apresentado na seção 1.2, no Brasil, um terço dos desligamentos das redes de distribuição é causado por impulsos de corrente provenientes de descargas atmosféricas [6]. Apesar destas redes possuírem dispositivos de proteção (como os cabos para-raios) que intencionam evitar a incidência direta da descarga sobre os cabos energizados, o sistema de aterramento deve garantir que esta descarga seja escoada para terra sem provocar elevados níveis de sobretensão, os quais podem ser suficientemente elevados para romper o isolamento da linha através do evento denominado *backflashover*. Sendo assim, os ensaios em sistemas de aterramento reais, além de contribuir para a análise da eficiência dos sistemas de aterramento de redes de distribuição e subtransmissão, quando submetidos a impulsos de corrente, supera deficiências identificadas nos trabalhos experimentais, conforme apresentado no Capítulo 3.

Portanto, os sistemas de aterramento A1, A2 e A3, foram construídos com eletrodos de aço revestidos em cobre com diâmetro de 15,88 mm e comprimento de 2,40 m, interconectadas por cabos de cobre nu de 50 mm² (área da seção transversal) e enterradas a uma profundidade de 0,30 m no solo. Os sistemas de aterramento estavam isolados de outros sistemas e nos seus entornos não haviam fundações ou outras estruturas metálicas enterradas.

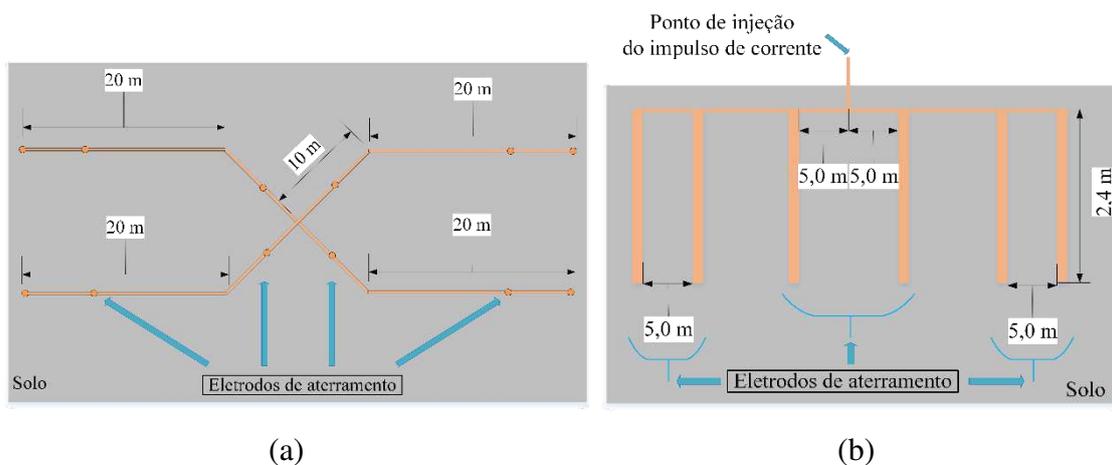
As Figuras 4.2 a 4.4 apresentam as configurações dos sistemas de aterramento A1, A2 e A3, respectivamente.

Figura 4.2: Representação da configuração do sistema de aterramento A1.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.3: Representação da configuração do sistema de aterramento A2: (a) vista superior; (b) vista frontal.

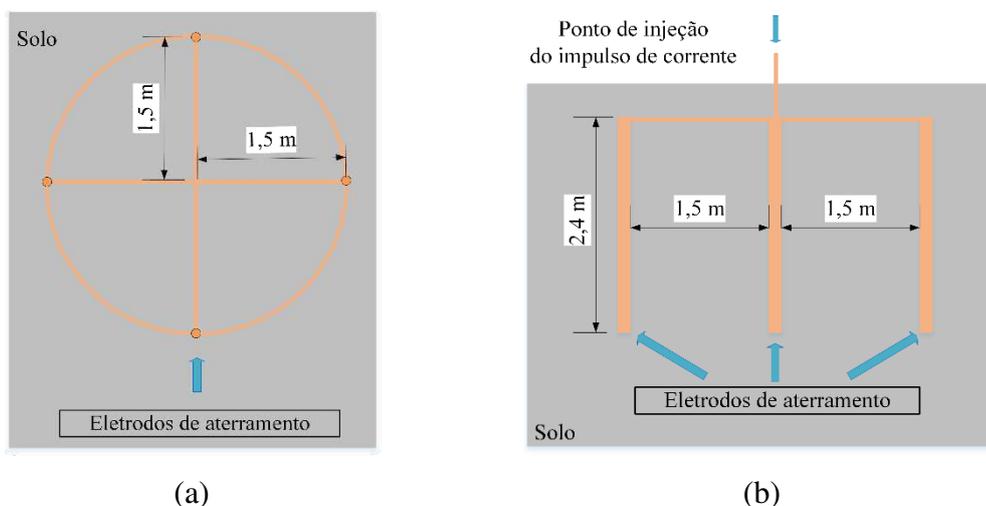


(a)

(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 4.4: Representação da configuração do sistema de aterramento A3: (a) vista superior; (b) vista frontal.



Fonte: Produzida pelo autor.

A Tabela 4.2 apresenta as principais características dos sistemas de aterramento ensaiados.

Tabela 4.2: Principais características dos sistemas de aterramento ensaiados.

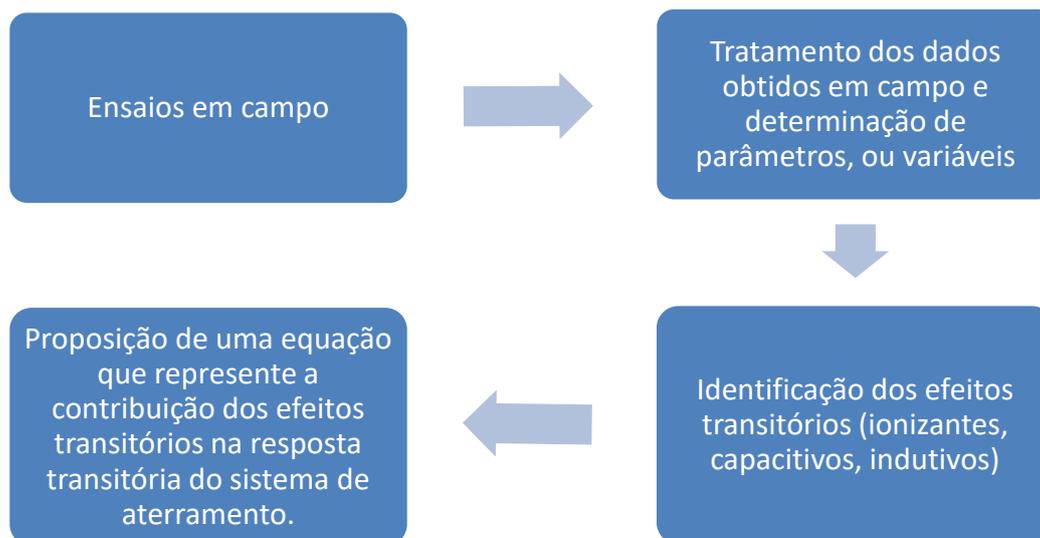
Sistema de aterramento						
			(LAT)	(A1)	(A2)	(A3)
Principais características	Eletrodo de aço revestido em cobre	Comprimento (m)	1,20	2,40	2,40	2,40
		Diâmetro (mm)	13	15,88	15,88	15,88
		Quantidade	1	3	12	4
	Interligação entre as hastes		-	Cabo de cobre nu de 50 mm ²		
	Profundidade do aterramento no solo (m)		-	0,30	0,30	0,30

Fonte: Produzida pelo autor.

4.3 MÉTODOS

A metodologia aplicada na pesquisa é fundamentada, essencialmente, na análise resultados obtidos por meio de ensaios em campo. A Figura 4.5 apresenta um fluxograma das etapas desenvolvidas no presente trabalho.

Figura 4.5: Fluxograma da metodologia utilizada nos estudos desenvolvidos no presente trabalho.



Fonte: Produzida pelo autor.

A seguir é apresentado o detalhamento das etapas ilustradas na Figura 4.5:

Etapa 1 (Ensaio em campo): Nesta etapa são utilizados o gerador de impulso de corrente do LAT (subseção 4.3.1.2) e o gerador móvel de impulso de corrente (subseção 0), confeccionado pelo próprio Laboratório, com a participação do autor, no período de desenvolvimento do presente trabalho, para aplicação de impulsos de corrente nos sistemas sob ensaio.

A partir dos ensaios em campo, são obtidas as curvas de corrente e tensão no ponto de injeção de corrente do sistema de aterramento.

Também fazem parte dessa etapa as medições da resistividade do solo, pelo método de Wenner e as medições da resistência de aterramento em baixa frequência, pelo método da queda de potencial. Os métodos de Wenner e da queda de potencial, serão apresentados na subseção 4.3.1.1. As medições da resistividade do solo, foram utilizadas para realizar a estratificação do solo, cujos resultados foram apresentados na Tabela 4.1.

Etapa 2 (Tratamento dos dados obtidos em campo e determinação de parâmetros, ou variáveis): Nesta etapa, os dados de tensão e corrente, obtidos em campo, foram importados para o ambiente computacional do programa Matlab®, onde foram analisados.

Os parâmetros, ou variáveis, resultantes dessa etapa, foram:

- Curva da corrente injetada no aterramento;
- Curva da tensão (resposta transitória do sistema de aterramento) medida no ponto de injeção da corrente;
- Curva característica da relação entre tensão medida e corrente aplicada (curva $V \times I$) no sistema de aterramento;
- Impedância transitória;
- Impedância impulsiva;
- Coeficiente impulsivo;
- Tempos de frente e de meia cauda dos sinais de corrente; e
- Tempos de frente e de meia cauda dos sinais de tensão.

Nesta etapa, também foi estimada a resposta em baixa frequência dos sistemas de aterramento. A estimativa da resposta em baixa frequência dos sistemas de aterramento, foi motivada pelo método proposto por Grcev [1], apresentado na seção 3.2. Segundo este método, a resposta transitória de um sistema de aterramento é igual a, aproximadamente, a soma da resposta em baixa frequência (componente linear) e uma componente transitória, relacionada à contribuição dos efeitos que surgem com as elevadas frequências do sinal da corrente impulsiva. Matematicamente, esta aproximação é ilustrada pela Equação (4.9) [1]:

$$V(t) = RI(t) + x(t), \quad (4.9)$$

em que $V(t)$ representa a resposta, em tensão, do comportamento transitório do sistema de aterramento; $x(t)$ representa a componente relacionada aos efeitos provocados pelas elevadas frequências, presentes durante o transitório de corrente impulsiva no sistema de aterramento; e $RI(t)$ representa a resposta em baixa frequência (componente linear) do sistema de aterramento, onde R representa a resistência de aterramento em baixa frequência.

Como na etapa 1, foi medido R e na etapa 2, obtida a curva da corrente injetada ($I(t)$), a resposta em baixa frequência ($RI(t)$) para cada sistema de aterramento analisado,

foi calculada. Na sequência, $RI(t)$ foi subtraído de $V(t)$ (curva da resposta transitória, também obtida na etapa 2) e a curva representativa das contribuições das altas frequências ($x(t)$), foi obtida para todos os sistemas de aterramento estudados.

Etapa 3 (Identificação dos efeitos transitórios): Esta etapa, consistiu em analisar as curvas e parâmetros, ou variáveis, identificados e mensurados na etapa 2. Dessa forma, foi possível identificar os efeitos transitórios que influenciaram os sistemas de aterramento ensaiados. As curvas $V \times I$ e $x(t)$, se mostraram importantes e complementares para a identificação dos efeitos transitórios (ionizantes, capacitivos ou indutivos), dos sistemas de aterramento.

Nesta etapa, também foram verificadas as influências da geometria, resistividade do solo, intensidade e tempo de frente, do impulso de corrente, no comportamento dos sistemas analisados. A análise de $x(t)$ em conjunto com $V(t)$, possibilitou ainda, a identificação dos instantes de tempo e duração de ocorrência dos fenômenos transitórios.

Etapa 4 (Identificação da Equação Matemática): Após a identificação dos efeitos transitórios, foram identificadas as equações não lineares que representavam as contribuições dos efeitos transitórios (etapa 3) nas curvas de tensão medidas em campo. Nessa etapa, foi utilizado o programa Matlab® e o aplicativo *Curve Fit Toolbox*™, disponível no próprio Matlab. Este aplicativo possibilita o ajuste de curvas a partir dos dados inseridos pelo usuário. O ajuste de curvas é realizado por meio dos modelos de regressões lineares e não-lineares, disponíveis na biblioteca do aplicativo (polinomial, exponencial, racional, série de Fourier, etc), ou especificados pelo usuário (equação personalizada). Além disso, o *Toolbox* também suporta técnicas de modelagem não paramétrica, tais como: interpolação e suavização de curvas. No presente trabalho, foram inseridas as seguintes entradas no aplicativo *Curve Fit*: a curva da contribuição dos efeitos transitórios ($x(t)$) e uma equação empírica de coeficientes desconhecidos. Os coeficientes foram calculados pelo aplicativo, por meio do método de regressão não-linear dos mínimos quadrados, solucionado pelo algoritmo *trust-region-reflective*.

Nas próximas subseções, serão detalhados os métodos utilizados nos ensaios em campo.

4.3.1 ENSAIOS EM CAMPO

Nesta seção, detalha-se o método utilizado nos ensaios em campo. Inicialmente são feitos comentários sobre os métodos de Wenner, para medição da resistividade do

solo, e o da queda de potencial, para medição da resistência de aterramento em baixa frequência. Na sequência, são apresentados os geradores de impulso de corrente e as configurações de medições utilizadas.

A sequência de apresentação dos métodos foi a mesma sequência utilizada nas medições em campo, ou seja, primeiro foram realizadas as medições de resistividade, depois as medições da resistência de aterramento em baixa frequência e, por último, os ensaios com os geradores de impulso de corrente.

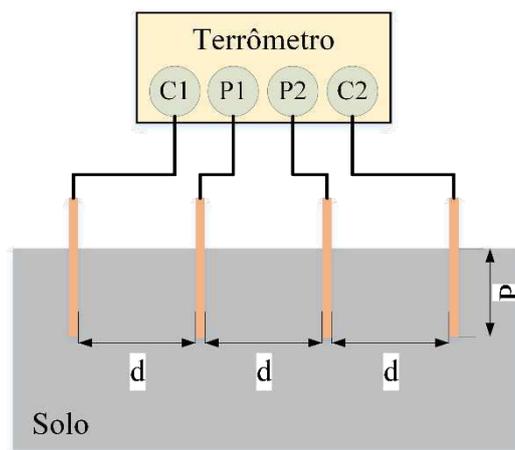
As medições em baixa frequência são importantes para mensurar a diferença entre o comportamento transitório dos sistemas de aterramento, quando submetidos a sinais de alta frequência, e o comportamento dos mesmos em baixa frequência. Além disso, esses parâmetros são a base para as modelagens computacionais dos aterramentos [3].

4.3.1.1 MÉTODOS DE WENNER E DA QUEDA DE POTENCIAL: ASPECTOS GERAIS

O método de Wenner foi utilizado na medição da resistividade do solo no entorno dos sistemas de aterramento ensaiados, conforme citado na seção 4.2. Já o método da queda de potencial foi utilizado na medição da resistência de aterramento em baixa frequência. Tanto nas medições de resistividade do solo, como nas medições de resistência de aterramento, foram utilizados: terrômetro digital (modelo 6472, fabricado pela AEMC *Instruments*, número de série 207928FLDV, com Certificado de Calibração nº 11086/2016, calibrado em 21/07/2016), cabos isolados (com comprimentos distintos e seção nominal de 2,5 mm²), eletrodos de aço revestidos por cobre, trena e marreta para fincar os eletrodos no solo.

Para a aplicação do método de Wenner, foram fincados no solo 4 eletrodos, dispostos em linha reta, e espaçados uniformemente entre si. Este método, consiste na injeção de corrente elétrica nos dois eletrodos das extremidades do arranjo, e a medição da queda de potencial produzida no solo devido à passagem da corrente no mesmo. A injeção de corrente e a medição da queda de potencial (realizada através dos dois eletrodos dispostos no meio do arranjo), foram realizadas por meio do terrômetro. Como foi utilizado um terrômetro digital e o mesmo foi ajustado para o método de Wenner, os valores das resistividades medidas, eram visualizados diretamente no aparelho. A disposição das hastes, os eletrodos de injeção de corrente e de medição da queda de potencial e o terrômetro, são visualizados no esquemático do arranjo experimental do método de Wenner, apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6: Esquemático do arranjo experimental do método de Wenner.



Fonte: Produzida pelo autor.

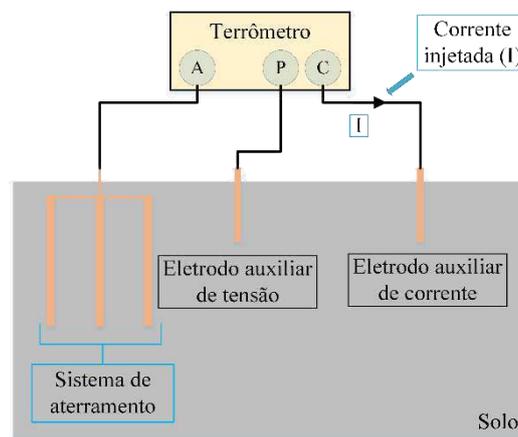
Como o objetivo das medições de resistividade é estratificar o solo em camadas, com profundidades e resistividades distintas, variam-se as distâncias entre os eletrodos (representada pela letra “d”, na Figura 4.6), mantendo-os equidistantes e alinhados entre si [5]. Dessa forma, a corrente injetada no solo, pelo terrômetro, (na Figura 4.6, C1 e C2 representam os terminais de injeção de corrente, e P1 e P2 os terminais de medição da tensão) percorrem camadas cada vez mais profundas do solo, permitindo assim, a verificação de como ocorre a dispersão de corrente no solo e possibilitando a estratificação do mesmo [5].

Nas medições feitas no escopo do presente trabalho, a distância entre as hastes (d, na Figura 4.6), foi variada em: 1 m, 2 m, 4 m e 8 m. Como estas distâncias compreendem o conjunto de medições em apenas 1 região (linear) do solo, foram realizadas medições em outras 5 regiões (lineares) do solo, totalizando 6 regiões distintas do solo, medidas. Como em cada região, foram feitas 4 medições de resistividade, no total, foram realizadas 24 medições de resistividade para cada sistema de aterramento ensaiado. Conforme apresentado na seção 4.2, a estratificação do solo foi realizada por meio da inserção dos valores da resistividade (medidos em campo) no programa TecAt Plus 5.2®, que adotou o seguinte procedimento estatístico: para cada distância entre as hastes, foram calculadas as médias dos valores de resistividade medida, bem como o desvio de cada medida em relação à média calculada. Caso houvessem valores de resistividade com desvio superior a 50% em relação à média calculada, esses valores seriam desprezados. Quando o programa identifica estatisticamente que o número de valores de resistividade com desvio superior a 50% em relação à média calculada, é grande o suficiente para comprometer o intervalo de confiança, é indicado que sejam efetuadas novas medições. Já no caso da não

convergência ao resultado, o programa indica que a área do solo em medição não é compatível com o método de Wenner.

Diferentemente do método de Wenner, no método da queda de potencial são utilizados apenas três terminais do terrômetro, sendo 1 deles conectado diretamente no sistema de aterramento, cuja resistência está sendo medida, e os outros dois conectados em eletrodos fincados no solo para a medição. O método consiste em fazer circular uma corrente através da malha de aterramento sob ensaio, por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente, e medir a elevação do potencial da malha de aterramento em relação ao eletrodo de terra remoto, por meio de um eletrodo auxiliar de potencial [5]. O esquemático do arranjo experimental utilizado do método da queda de potencial, é visualizado na Figura 4.7.

Figura 4.7: Esquemático do arranjo experimental do método da queda de potencial.



Fonte: Produzida pelo autor.

Tanto o método de Wenner quanto o método da queda de potencial são amplamente difundidos e utilizados como base de referência para projetos e estudos de maneira geral. Portanto, não é objetivo deste trabalho aprofundar nos aspectos teóricos destes métodos. Entretanto, como a qualidade dos resultados obtidos está diretamente relacionada com a qualidade do arranjo montado para as medições, são destacados os seguintes aspectos:

- Todos os eletrodos foram fincados a aproximadamente 50 cm de profundidade no solo, de forma a garantir um bom contato entre o eletrodo e o solo;
- Os eletrodos foram mantidos sempre alinhados; e

- Ao ser identificada inconsistência na medição, a mesma era refeita, ou o arranjo experimental era avaliado e readequado.

Todas as medições realizadas no âmbito deste trabalho estão em concordância com as normas NBR 7117:2012 [24] e NBR 15749:2009 [66], que tratam do método de Wenner e método da queda de potencial, respectivamente.

Após as medições de resistividade do solo e resistência de aterramento em baixa frequência, foram injetados impulsos de corrente nas malhas de aterramento. Os impulsos de corrente foram produzidos por meio de geradores de impulso de corrente. Para aplicação de impulsos de corrente nas malhas de aterramento, foram utilizados dois geradores distintos, sendo um deles fixo, disponível apenas no Laboratório de Geração de Impulsos de Corrente (LGIC), pertencente ao LAT-UFCG, e outro móvel, o que possibilita seu deslocamento. Nas próximas seções serão feitas as descrições dos geradores de impulso, bem como o arranjo dos experimentos realizados.

4.3.1.2 GERADOR DE IMPULSO DE CORRENTE DO LAT-UFCG

Para os ensaios do sistema de aterramento simples, composto por uma haste fincada verticalmente no solo, representado na Figura 4.1, foi utilizado o gerador de impulsos de corrente (Haefely, 80 kJ/100 kV) do LGIC. As Figuras 4.8 (a) e (b), apresentam as fotografias do gerador de impulso e da mesa de controle do gerador respectivamente [30].

Figura 4.8: Fotografias: (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.



(a)

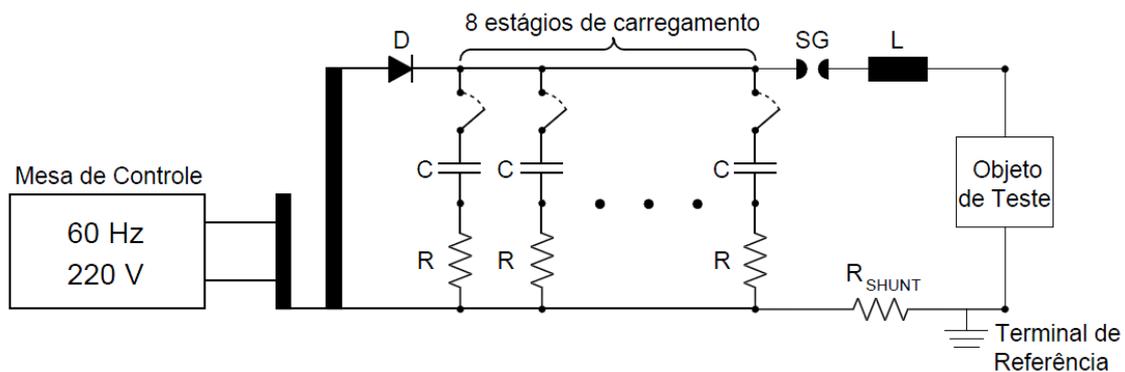
(b)

Fonte: [30].

O gerador é formado por 08 (oito) estágios de carregamento em paralelo, sendo que cada estágio é composto por 01 (um) capacitor (C) de $2 \mu\text{F}$ e 01 (uma) resistência (R) variável. A partir do número de estágios interligados, chega-se à tensão de carregamento, que será transferida parcialmente à malha de aterramento. Além da mesa de controle e dos estágios de carregamento, o gerador é composto por: diodo (D); centelhador (SG, também conhecido como *spark gap*), composto por duas esferas, sendo 1 delas fixa e a outra controlada por meio da mesa de controle; indutor (L); resistência *shunt* (R_{shunt}); objeto de teste.

O gerador do LGIC pode atingir uma tensão máxima de carregamento de 100 kV. Na Figura 4.9 é apresentado o circuito elétrico do gerador de impulsos [39].

Figura 4.9: Circuito elétrico do gerador de impulsos do LGIC.



Fonte: [39].

A partir da mesa de controle, a tensão do primário do transformador é ajustada e, conseqüentemente, a tensão no secundário também é ajustada. O diodo converte a tensão alternada, fornecida pelo transformador, em tensão contínua, que permite o carregamento dos capacitores. O centelhador atua como uma chave, que permite, ou impede, o descarregamento dos capacitores sob o objeto de teste. O processo de descarregamento dos capacitores ocorre por meio da ruptura do dielétrico. Neste caso o ar entre as esferas do centelhador. Essa ruptura pode ser provocada através do sistema de gatilho da mesa de controle ou por meio da redução da rigidez dielétrica, com a aproximação entre as esferas. Dessa forma, antes de iniciar o carregamento dos capacitores, a distância entre as esferas do centelhador são verificadas e mantidas em uma posição segura, de forma a evitar uma descarga não programada no objeto de teste.

Conforme a Figura 4.9, o objeto de teste atua como componente do circuito do gerador de impulso. Assim, o objeto de teste influencia na forma de onda configurada no gerador e os parâmetros do gerador influenciam nos sinais medidos no objeto de teste.

A medição do impulso de corrente, injetado na malha, foi feita de forma indireta, por meio da medição da queda de potencial nos terminais do resistor *shunt* ($R_{shunt} = 5,488 \text{ m}\Omega$) de alta precisão. Para isto, foi utilizado um osciloscópio.

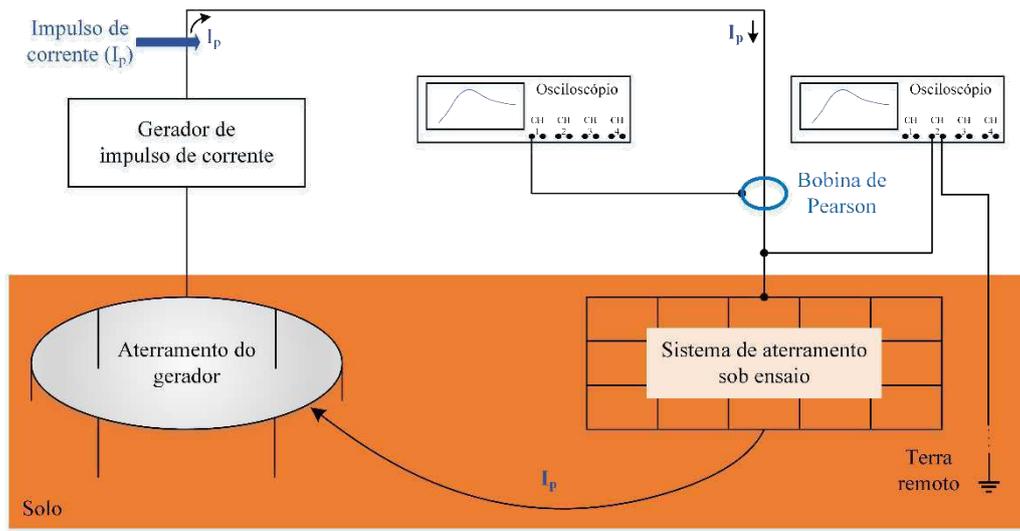
Além da determinação da corrente de descarga sob o objeto de teste, foi medida a tensão originada nos terminais do sistema de aterramento, quando o mesmo foi atingido pelo impulso de corrente. Esta tensão corresponde à resposta transitória do sistema de aterramento e foi medida por meio de uma ponta de prova de alta tensão (que suporta uma tensão máxima de pico de até 40 kV), conectada a outro osciloscópio. Para minimizar os efeitos de capacitâncias parasitas, foram utilizados cabos coaxiais blindados na conexão entre os osciloscópios e as pontas de prova.

4.3.1.3 GERADOR MÓVEL DE IMPULSO DE CORRENTE

Os ensaios dos sistemas de aterramento, apresentados nas Figuras 4.2 a 4.4, foram viabilizados devido ao gerador móvel de impulsos de corrente, que possibilita a realização de ensaios fora das dependências do LAT-UFCG. O princípio de funcionamento do gerador móvel é o mesmo do gerador do LGIC. Entretanto, ele não possui a indutância nem o resistor *shunt*. Seu nível máximo de carregamento é de 50 kV e é composto por 3 estágios fixos de carregamento com capacitância de 2 μF . A medição do impulso de corrente é feita por meio de uma bobina de Pearson que é colocada diretamente no cabo de injeção do impulso de corrente. Sendo assim, a Figura 4.9 também pode representar o circuito do gerador móvel. Para isto, basta que sejam retirados do circuito o indutor e que sejam considerados apenas três estágios fixos de carregamento.

Por fim, a Figura 4.10 apresenta um esquema simplificado do arranjo experimental utilizado tanto para o gerador de impulsos de corrente do LAT, como para o gerador móvel de impulsos de corrente. A única diferença entre os dois arranjos, está no fato da aquisição do sinal de corrente, no gerador do LAT, ser feita de forma indireta, por meio do resistor *shunt*.

Figura 4.10: Esquemático simplificado do arranjo experimental utilizado.



Fonte: Produzida pelo autor.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia descrita no capítulo 4. A apresentação dos resultados está dividida em duas seções. Na primeira seção são apresentados os resultados de ensaios em campo enquanto que, na segunda seção, apresenta-se a identificação dos efeitos transitórios (ionizantes, capacitivos, ou indutivos) presentes no comportamento transitório dos sistemas de aterramento.

5.1 ENSAIOS REALIZADOS EM CAMPO

Os ensaios em campo foram realizados em 4 configurações distintas de malhas de aterramento, localizadas em diferentes regiões da cidade de Campina Grande. Os primeiros ensaios foram realizados nas proximidades do LAT-UFCG, onde foi utilizado o gerador de impulso de corrente do LGIC. Para tanto, os capacitores do gerador de impulso foram carregados em tensão contínua, com níveis de tensão de 20 kV, 25 kV e 30 kV. Nesta primeira etapa de ensaios, foi utilizado um sistema de aterramento simples, composto de uma haste de aterramento fincada verticalmente no solo (Figura 4.1).

Na segunda etapa de ensaios, foi utilizado o gerador móvel de impulso de corrente. Devido à sua mobilidade, foram ensaiados 3 sistemas de aterramento, implantados em solos com características distintas entre si. As configurações dos aterramentos ensaiados (Figuras 4.2 a 4.4) são típicas de aterramentos de linhas de distribuição e subtransmissão. Para esta etapa de ensaios, os capacitores do gerador de impulsos foram carregados em tensão contínua, com níveis de tensão de 15 kV, 20 kV e 25 kV.

Nas duas etapas dos ensaios, para cada nível de carregamento, foram injetados, na malha de aterramento sob ensaio, três impulsos de corrente consecutivos. Para cada impulso injetado, foram capturados os sinais de tensão e de corrente aplicados nos terminais dos respectivos sistemas de aterramento. Entre as etapas dos ensaios e a análise dos dados obtidos em campo, os sinais capturados nas medições foram importados para o programa Matlab®, onde foram tratados. Também foram calculadas as médias entre os sinais capturados para o mesmo nível de carregamento dos capacitores do gerador de impulso. Dessa forma, foi possível eliminar sinais espúrios provenientes da aquisição.

5.1.1 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES E ENSAIOS EM CAMPO

Os resultados apresentados nesta subseção, referem-se às etapas 1 e 2 do fluxograma apresentado na Figura 4.5. Os sistemas de aterramento foram ensaiados por meio da injeção de impulsos de corrente conforme descrito na subseção 4.2.1. As configurações dos sistemas de aterramento ensaiados estão apresentadas nas Figuras 4.1 a 4.4. As resistividades, por camadas de solo, referentes ao entorno de cada um dos aterramentos ensaiados, foram apresentadas na Tabela 4.1. As resistências de aterramento em baixa frequência são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resistências de aterramento em baixa frequência dos sistemas de aterramento ensaiados.

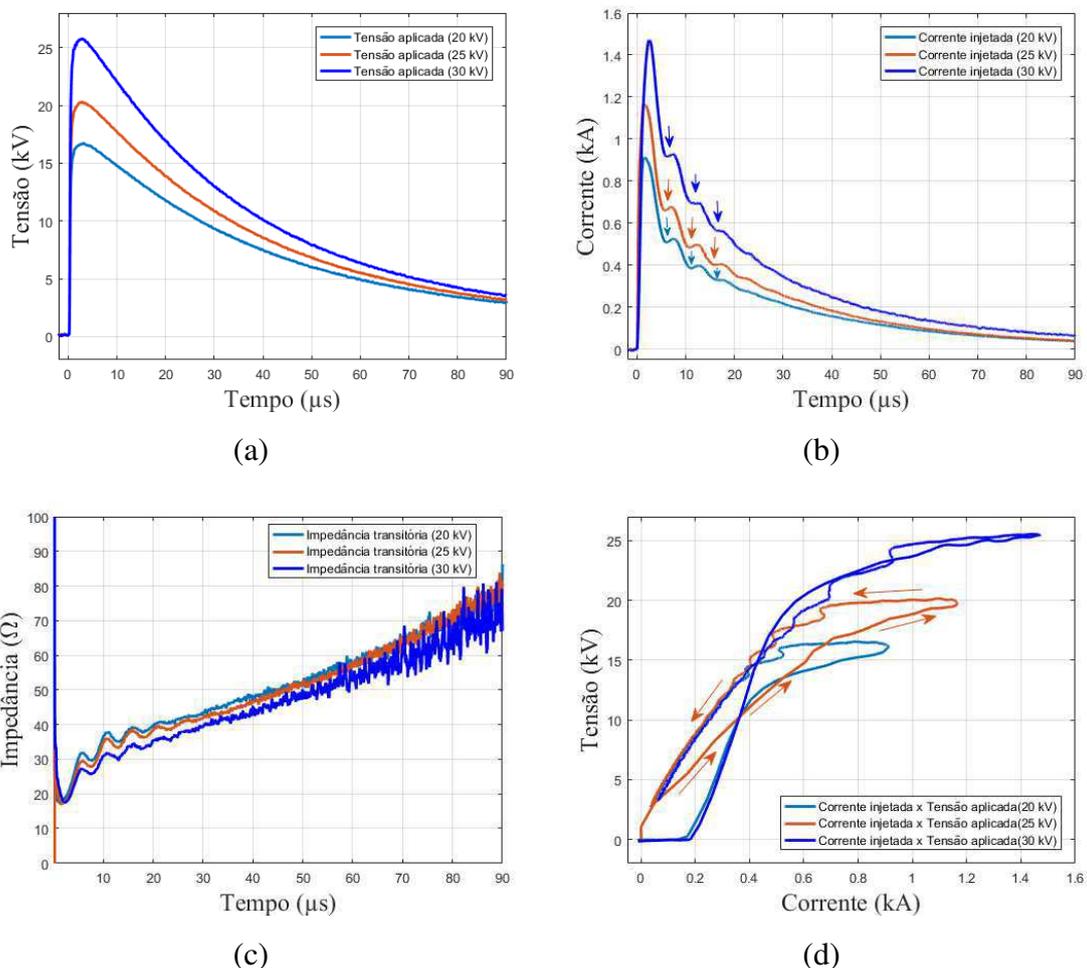
Sistema de aterramento	Resistência (Ω)
LAT-UFCG	25,9
Aterramento (A1)	22,6
Aterramento (A2)	5,12
Aterramento (A3)	9,07

Fonte: Produzida pelo autor.

Os gráficos dos sinais de tensão, corrente, impedância transitória e relação tensão x corrente, obtidos a partir das medições em campo, são apresentados nas Figuras 5.1 a 5.4.

Figura 5.1: Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento do LAT, para os níveis de carregamento de 20 kV, 25 kV e 30 kV.

(a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente.

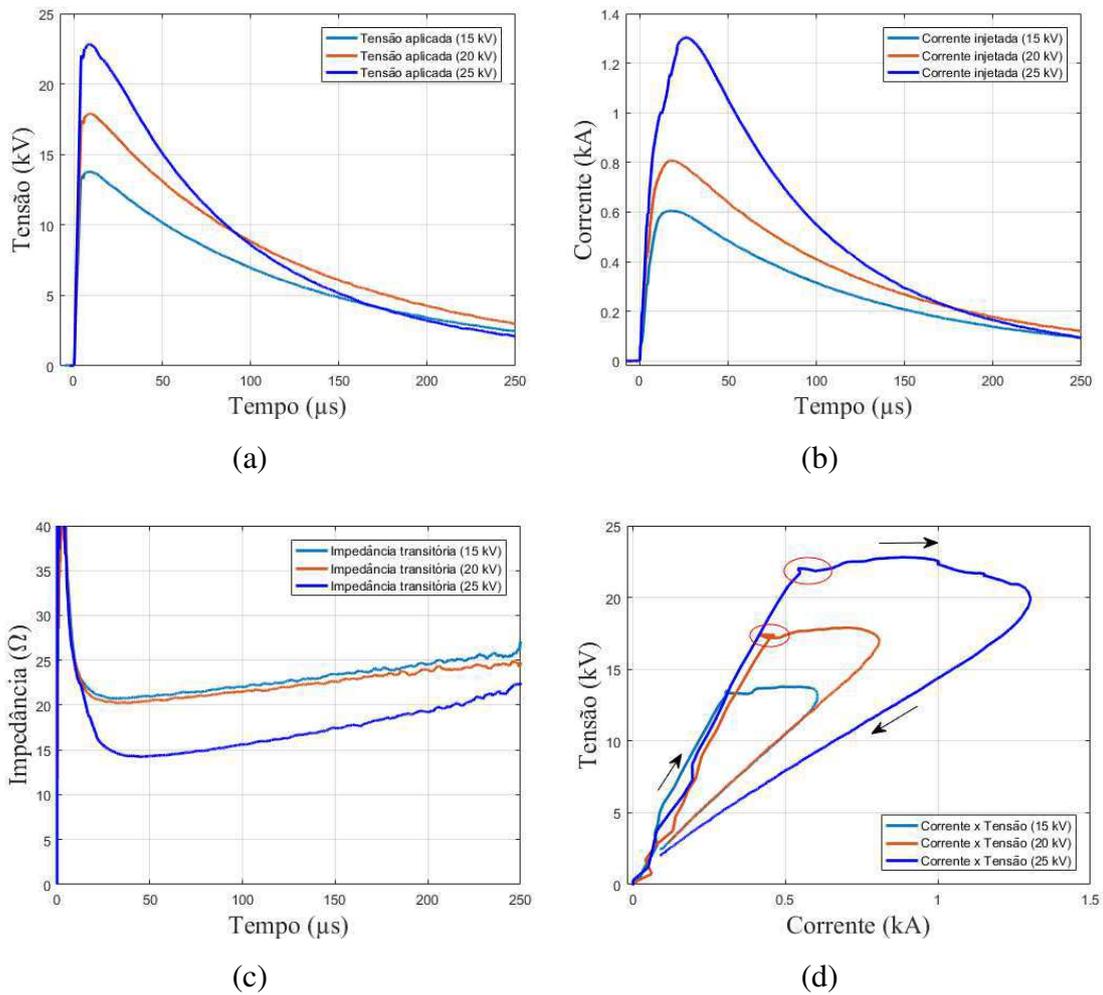


Fonte: Produzida pelo autor.

Em [40], foi constatado que sistemas de aterramento compostos por apenas 1 haste de aterramento, enterrada a poucos metros do solo, (no caso 1,0 m), sofrem interferência por reflexões de onda. Estas interferências, podem ser verificadas na Figura 5.1 (b), onde as setas indicam regiões da curva de corrente medida afetadas por reflexão de onda. Entretanto, as características geológicas e as estruturas construídas no entorno do aterramento podem ter influenciado, ou intensificado, o surgimento dessas reflexões.

Figura 5.2: Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento A1, para os níveis de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV.

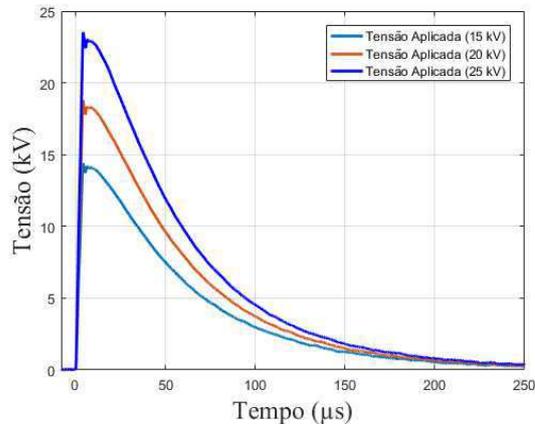
(a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente.



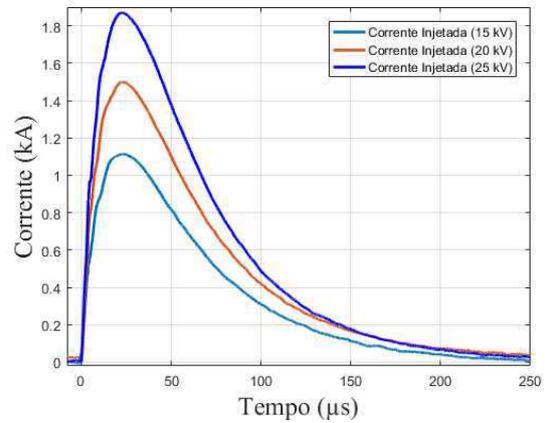
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.3: Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento A2, para os níveis de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV.

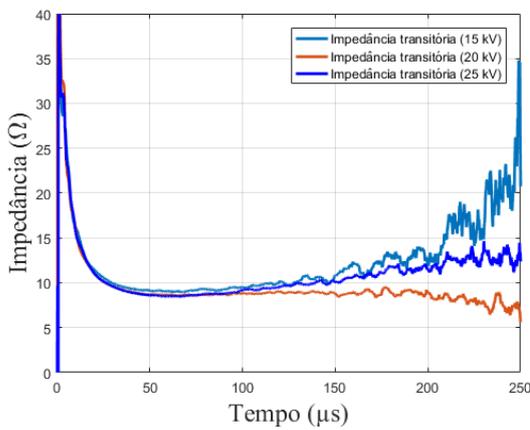
(a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente.



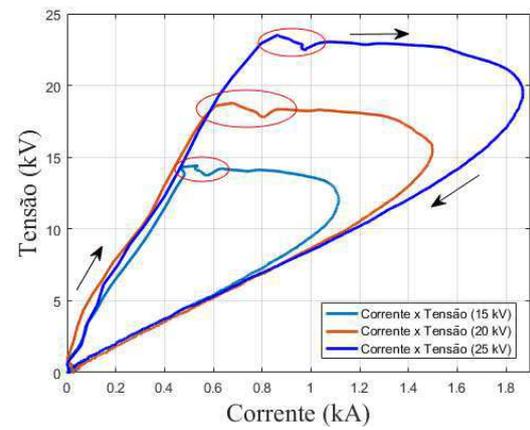
(a)



(b)



(c)

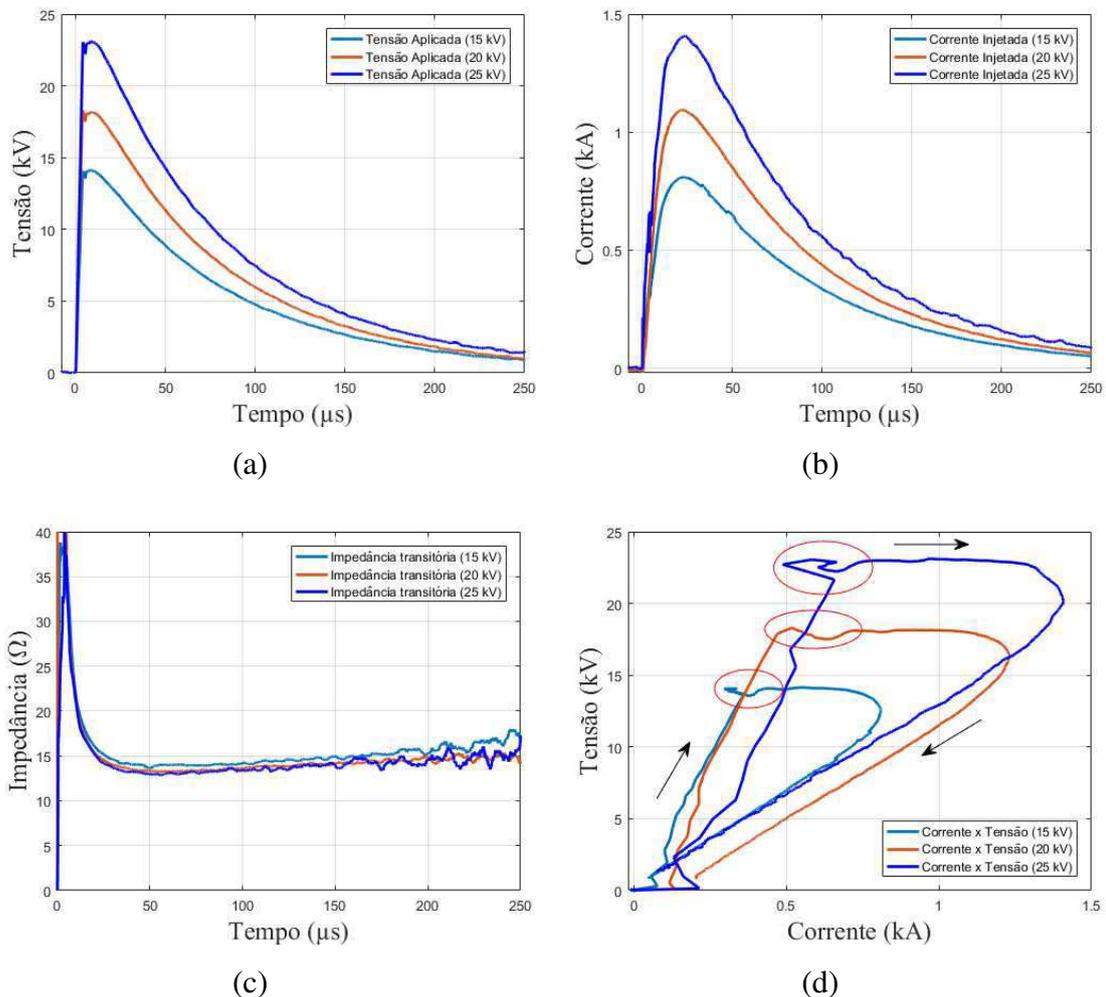


(d)

Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.4: Gráficos correspondentes aos ensaios no aterramento A3, para os níveis de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV.

(a) Tensões; (b) Correntes injetadas; (c) Impedância transitória; e (d) Curva Tensão x Corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Nas Figuras 5.1 (d) a 5.4 (d), referentes à relação entre tensão e corrente, as setas indicam o sentido de subida e de descida das curvas e as elipses vermelhas destacam os pontos onde houve mudança no comportamento transitório do sistema de aterramento.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.1 (a) a 5.4 (a) forneceram informações sobre: valores de pico das tensões (V_p); e tempos de frente (T_f) e de meia cauda (T_{mc}) dos sinais de tensão.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.1 (b) a 5.4 (b) forneceram informações sobre: valores de pico das correntes (I_p); e tempos de frente (T_f) e de meia cauda (T_{mc}) dos impulsos de corrente.

Já os gráficos apresentados nas Figuras 5.1 (c) a 5.4 (c) apresentam a variação da impedância de aterramento durante a condução do impulso de corrente.

A relação entre V_p e I_p , conforme apresentado na subseção 2.3.3, representa a impedância impulsiva (Z_p). Já a relação entre Z_p e a resistência em baixa frequência, conforme apresentado na subseção 2.3.4, representa o coeficiente impulsivo (A_{imp}). Os valores de I_p , V_p , Z_p e A_{imp} são apresentados na Tabela 5.2. Enquanto T_f e T_{mc} , das correntes e tensões, estão apresentados na Tabela 5.3. Os valores foram encontrados para todos os níveis de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos.

Tabela 5.2: Valores de I_p , V_p , Z_p e A_{imp} , encontrados com a análise dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.4.

Sistema de aterramento	Nível de carregamento	I_p (kA)	V_p (kV)	Z_p (Ω)	A_{imp}
LAT-UFCG	20 kV	0,92	16,73	18,18	0,70
	25 kV	1,17	20,32	17,36	0,67
	30 kV	1,47	25,77	17,53	0,68
A1	15 kV	0,61	13,78	22,76	1,1
	20 kV	0,81	17,89	22,16	0,98
	25 kV	1,30	22,80	17,50	0,77
A2	15 kV	1,11	14,20	12,79	2,50
	20 kV	1,50	18,34	12,23	2,39
	25 kV	1,87	23,04	12,32	2,41
A3	15 kV	0,81	14,14	17,47	1,93
	20 kV	1,10	18,14	16,58	1,83
	25 kV	1,41	23,12	16,42	1,81

Fonte: Produzida pelo autor.

Tabela 5.3: Valores T_f e T_{mc} , das correntes e tensões, encontradas por meio da análise dos gráficos das Figuras 5.1 a 5.4.

Sistema de aterramento	Nível de carregamento	Impulso de corrente		Sinal de tensão	
		T_f (μs)	T_{mc} (μs)	T_f (μs)	T_{mc} (μs)
LAT-UFCG	20 kV	1,4	9,1	3,0	34,08
	25 kV	1,5	8,7	2,5	32,14
	30 kV	2,3	9,8	2,5	29,7
A1	15 kV	17,0	103,4	7,8	100,8
	20 kV	17,6	101,8	8,2	98,2
	25 kV	25,8	86,8	8,0	67,2
A2	15 kV	22,0	69,5	5,7	49,9
	20 kV	22,6	69,2	5,8	51,0
	25 kV	21,8	68,3	5,9	51,3
A3	15 kV	22,9	84,9	7,7	67,1
	20 kV	19,8	82,0	7,8	66,4
	25 kV	23,6	81,6	7,8	64,6

Fonte: Produzida pelo autor.

5.1.1.1 ANÁLISE PRELIMINAR DOS RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DE ENSAIOS EM CAMPO

As curvas apresentadas nas Figuras 5.1 (d), 5.2 (d), 5.3 (d) e 5.4 (d), mostram a relação entre a corrente e a tensão em cada sistema de aterramento. Essas curvas apresentam uma grande importância na avaliação do comportamento não linear de sistemas de aterramento pois proporcionam a identificação dos efeitos capacitivos, indutivos e da ionização no sistema de aterramento [11].

Enquanto o efeito indutivo tem a característica de atrasar o sinal de corrente em relação à tensão, o efeito capacitivo é responsável por atrasar o sinal de tensão em relação ao de corrente [67]. Dessa forma, as características indutivas e capacitivas podem ser observadas analisando os tempos de frente da tensão e da corrente. Quando o tempo de frente da tensão é maior que o da corrente, está presente, predominantemente, o efeito capacitivo. No caso contrário, é predominante o efeito indutivo (tempo de frente da corrente, maior que o tempo de frente da tensão) [40].

O efeito da ionização, conforme visto no capítulo 2, seção 2.4, é responsável por aumentar a área de dissipação de corrente do eletrodo de aterramento, provocando um aumento na condutividade elétrica do solo no entorno do eletrodo e, conseqüentemente, influenciando na relação entre a tensão e a corrente [19]. Dessa forma, a proporção entre a tensão e a corrente não é linear e varia ao longo do tempo, de acordo com a densidade de corrente nas regiões próximas ao aterramento [11, 34, 38].

Diante do exposto e observando os tempos de frente da corrente e da tensão, apresentados na Tabela 5.3, identifica-se que o sistema de aterramento do LAT possui característica predominantemente capacitiva, enquanto que os sistemas de aterramento: A1, A2, A3 e A4, possuem características predominantemente indutivas, quando submetidos a impulsos de corrente. As características das subidas e descidas das curvas de relação entre tensão e corrente, apresentadas nas Figuras 5.1 (d), 5.2 (d), 5.3 (d) e 5.4 (d), corroboram com a indicação dos efeitos indutivos e capacitivos identificados, daí a diferença nas características de subida e descida visualizadas na Figura 5.1 (d), em relação às Figuras 5.2 (d), 5.3 (d) e 5.4 (d).

Outro aspecto importante, relacionado aos efeitos indutivos e capacitivos, está relacionada à impedância transitória do sistema de aterramento. O efeito capacitivo, provoca uma redução na impedância do sistema de aterramento. Já o efeito indutivo, provoca o aumento na impedância transitória do sistema [34, 35]. Neste ponto, deve ser feita uma consideração importante a respeito do parâmetro do coeficiente impulsivo, pois uma análise descuidada deste parâmetro pode levar a erros na interpretação do comportamento transitório de um sistema de aterramento. O coeficiente impulsivo relaciona impedância impulsiva e resistência em baixa frequência do sistema de aterramento. A impedância impulsiva, por sua vez, é a relação entre a tensão de pico e corrente de pico dos sinais medidos no sistema de aterramento, quando o mesmo é submetido a um impulso de corrente. Portanto, conforme comentado anteriormente nesta mesma subseção, os efeitos transitórios podem afetar os tempos de frente dos sinais de tensão e corrente (Tabela 5.3). Assim, os valores do coeficiente impulsivo podem indicar um efeito transitório, capacitivo ($A_{imp} < 1$), ou indutivo ($A_{imp} > 1$), predominante, em determinado instante de tempo, mas não necessariamente representará a característica transitória geral do sistema de aterramento. Ao se verificar o coeficiente impulsivo, indicado na Tabela 5.2, identifica-se que o aterramento do LAT-UFCG possui coeficiente impulsivo menor que zero e também possui característica transitória predominantemente capacitiva. Entretanto, o sistema de aterramento A1 também possui coeficiente impulsivo

menor que zero, para os níveis de 20 kV e 25 kV de carregamento do gerador de impulso. Entretanto, a característica indutiva é predominante no comportamento transitório deste aterramento.

As análises dos dados obtidos em campo serão aprofundadas com os resultados obtidos na etapa 3, do fluxograma apresentado na Figura 4.5, e detalhados na seção 5.2.

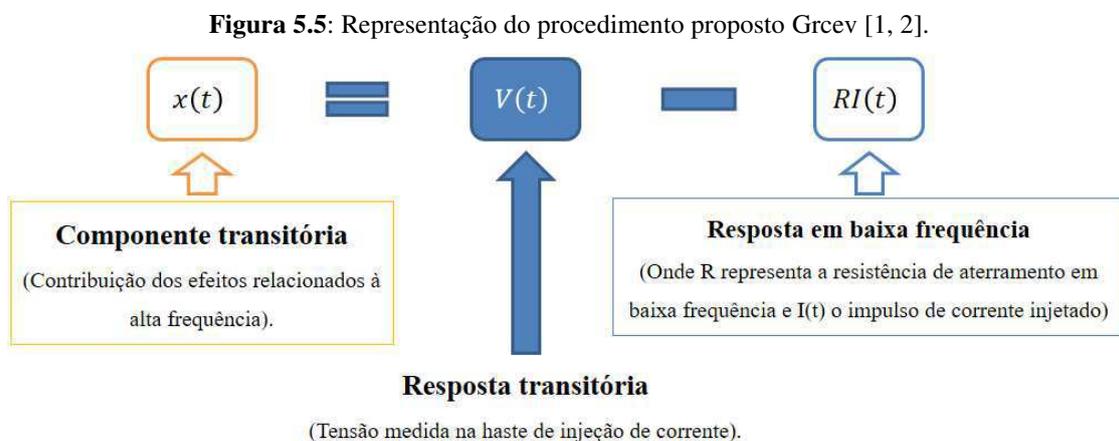
5.2 IDENTIFICAÇÃO DOS EFEITOS TRANSITÓRIOS (IONIZANTES, CAPACITIVOS, INDUTIVOS)

Nesta seção, são apresentados os aprofundamentos nas análises dos sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente. Essas análises correspondem às etapas 3 e 4 apresentadas na seção 4.2. Para tanto, é utilizado o programa Matlab®. Os sistemas de aterramento foram avaliados individualmente seguindo os seguintes passos:

- Identificação dos efeitos transitórios presentes nas medições em campo;
- Proposição de uma equação que represente a contribuição dos efeitos transitórios na resposta transitória do sistema de aterramento.

5.2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS TRANSITÓRIOS RELACIONADOS À ALTA FREQUÊNCIA

Para a identificação dos fenômenos transitórios presentes nos sistemas de aterramento ensaiados, foi utilizado o procedimento proposto em [1] e [2], apresentado na seção 4.3 e representado na Figura 5.5.



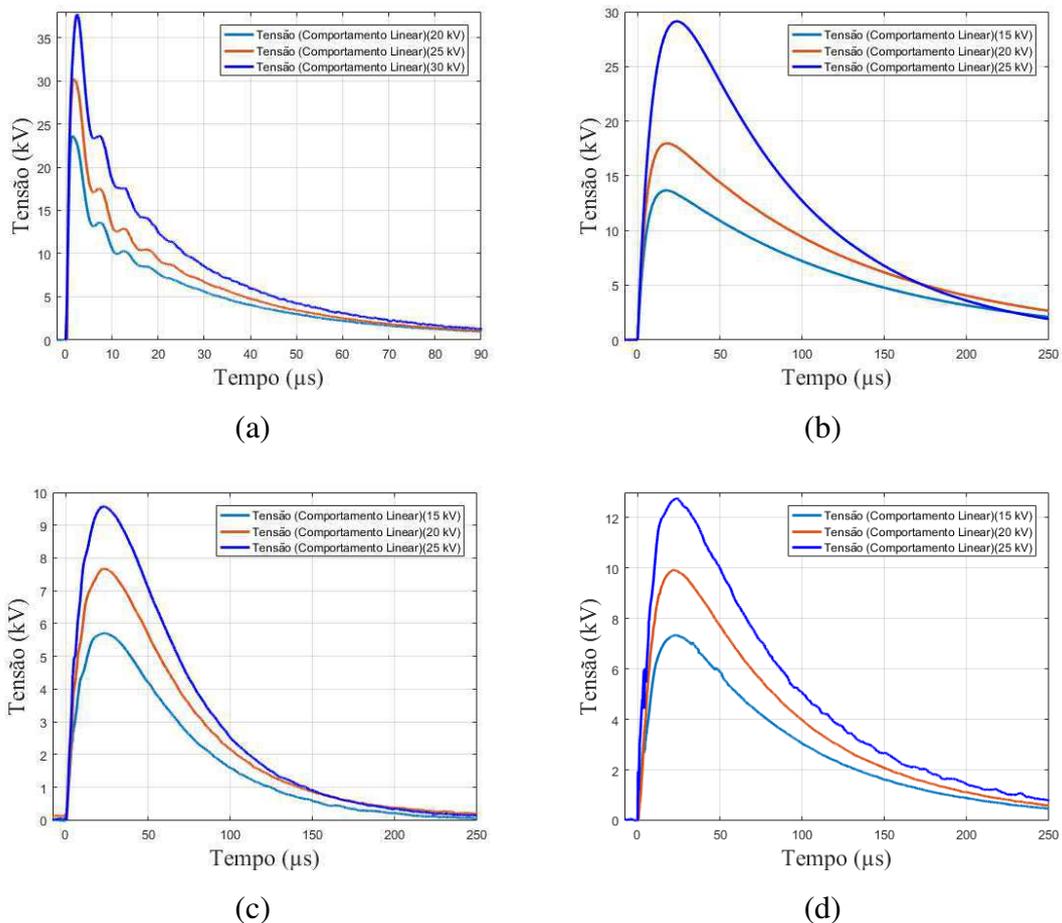
Fonte: Produzida pelo autor.

Conforme visualizado na Figura 5.5, as contribuições dos efeitos relacionados à alta frequência, provocados pela passagem do impulso de corrente nos sistemas de aterramento, podem ser identificadas pela subtração entre a tensão medida em campo (apresentadas nas Figuras 5.1 (a) a 5.4 (a)), da tensão calculada, considerando que o sistema de aterramento atua exatamente como uma resistência linear.

Os comportamentos lineares dos sistemas de aterramento foram estimados pelo produto direto entre a corrente impulsiva, medida em campo (Figuras 5.1 (b) a 5.4 (b)), e a resistência elétrica, em baixa frequência (Tabela 5.1), do sistema analisado. As Figuras 5.6 (a) a (d), apresentam as respostas lineares dos sistemas de aterramento do LAT-UFCG, A1, A2 e A3, respectivamente.

Figura 5.6: Resposta linear dos sistemas de aterramentos.

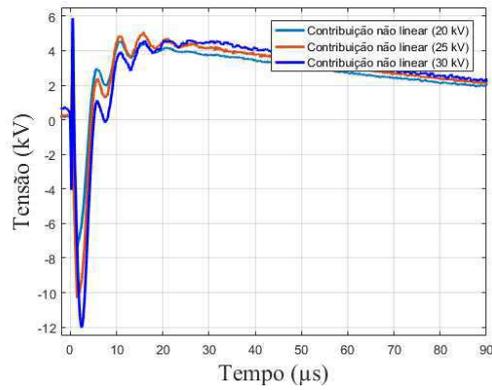
(a) Aterramento LAT-UFCG. (b) Aterramento A1. (c) Aterramento A2. (d) Aterramento A3.



Fonte: Produzida pelo autor.

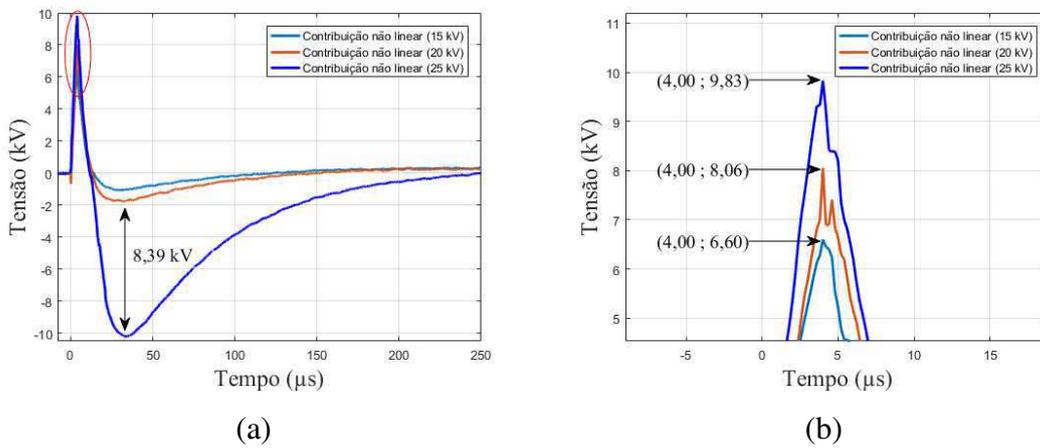
As Figuras 5.7 a 5.10 apresentam as contribuições dos efeitos relacionados à alta frequência ($x(t)$), para os aterramentos do LAT-UFCG, A1, A2 e A3 respectivamente.

Figura 5.7: Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento do LAT- UFCG.



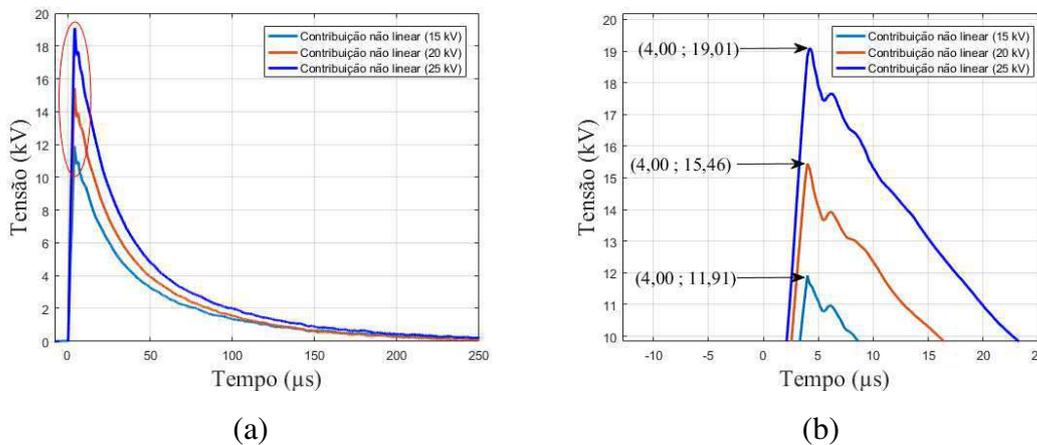
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.8: Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento A1. (a) Contribuição não linear. (b) Detalhe ampliado, da região destacada pela elipse vermelha, no item (a).



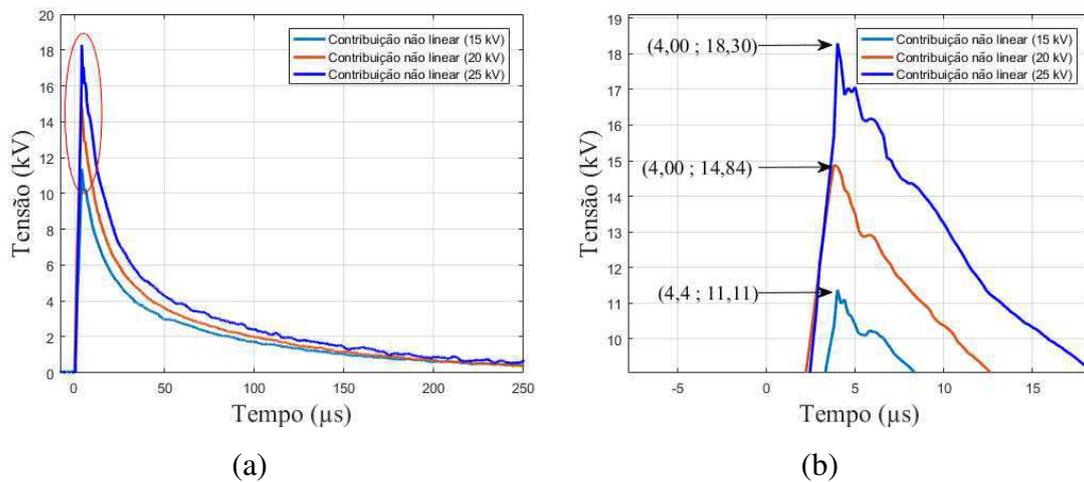
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.9: Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento A2. (a) Contribuição não linear. (b) Detalhe ampliado, da região destacada por uma elipse vermelha, no item (a).



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.10: Componente da contribuição não linear na resposta do aterramento A3. (a) Contribuição não linear. (b) Detalhe ampliado, da região destacada por uma elipse vermelha, no item (a).



Fonte: Produzida pelo autor.

Conforme verificado na Figura 5.1 (b), o impulso de corrente injetado no sistema de aterramento do LAT-UFCG, sofreu interferência de reflexões de onda. Estas reflexões de onda influenciaram na resposta em baixa frequência do sistema de aterramento (Figura 5.6 (a)) e, conseqüentemente, na componente representativa dos efeitos transitórios relacionados à frequência (Figura 5.7). Portanto, não foi possível identificar o instante de tempo onde as não linearidades começaram a se apresentar. Entretanto, na forma de onda da Figura 5.7, é possível identificar o efeito capacitivo presente no comportamento transitório deste aterramento, por meio da queda abrupta da tensão. Esta característica é responsável pela redução na impedância de aterramento e justifica os valores dos coeficientes impulsivos apresentados na Tabela 5.2.

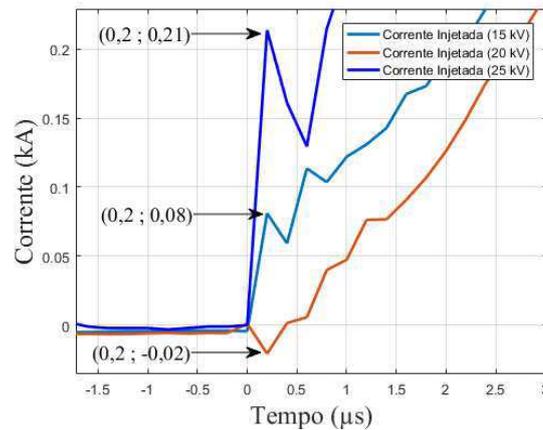
Na Figura 5.8 (a), referente ao aterramento A1, identifica-se que a diferença de 8,39 kV, entre o valor mínimo da curva em vermelho e o valor mínimo da curva em azul na tonalidade clara (contribuições relacionadas à frequência nas medições realizadas para os níveis de carregamento do gerador de impulso de 20 kV e 25 kV, respectivamente) representa um efeito similar ao identificado para o sistema de aterramento do LAT-UFCG. Portanto, houve um acréscimo substancial do efeito capacitivo entre as duas medições realizadas. Esse aumento no efeito capacitivo é responsável pela redução da impedância transitória de aterramento verificada na Figura 5.2 (c) [1, 33, 34].

Ainda em relação ao sistema de aterramento A1, foi identificado, pelos tempos de frente dos sinais de tensão e de corrente (Tabela 5.3), que este sistema tem característica transitória, predominantemente indutiva. Entretanto, as curvas apresentadas na

Figura 5.8 (a), apresentam características capacitivas para todos os níveis de carregamento do gerador de impulsos. Além disso, houve um aumento no tempo de frente e uma redução no tempo de meia cauda, da forma de onda da corrente (Tabela 5.3), enquanto, para a forma de onda da tensão, houve redução apenas no tempo de meia cauda. Segundo [22, 43, 47], a resistividade do solo varia com a frequência e quanto maior é a resistividade, maior é a influência da frequência sob o mesmo. Como o impulso de corrente é um fenômeno de alta frequência e o solo onde foi instalado A1 possui alta resistividade (Tabela 4.1), o efeito capacitivo é justificado. Já o efeito indutivo, é função das correntes longitudinais que atravessam os condutores (subseção 2.2.2), portanto, sua geometria (Figura 4.1) associada à alta resistividade do solo justifica a elevação dos efeitos indutivos, visto que a resistividade dificulta a condução das correntes transversais no solo, provocando um aumento nas componentes longitudinais e consequente aumento nas indutâncias mútuas e próprias do sistema em estudo.

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram que os sistemas de aterramento A2 e A3 possuem um comportamento transitório semelhante. Essa semelhança se dá devido às suas características indutivas, quando submetidos a impulsos de corrente. Pelas análises das Tabelas 5.2, 5.3 e Figuras 5.9 e 5.10, identifica-se que praticamente não ocorreram alterações nos parâmetros e formas de onda com a elevação na tensão de carregamento do gerador de impulsos. Entretanto, as curvas características da relação entre tensão e corrente (Figuras 5.3 (d) e 5.4 (d)), referentes aos sistemas de aterramento A2 e A3, mostram que o aterramento A3 apresentou características de subida distintas para cada um dos níveis de carregamento do gerador de impulsos, sendo a maior diferença encontrada para o nível de carregamento de 25 kV. O sistema de aterramento está em um solo de baixa resistividade (Tabela 4.1). Quando solos de baixa resistividade são submetidos a impulsos de corrente (fenômeno de alta frequência), os efeitos indutivos são acentuados [68]. Portanto, o instante de tempo inicial de propagação do impulso de corrente é atrasado em relação à tensão. Esta característica pode ser observada por meio de uma distorção no início da propagação do impulso de corrente e justifica as diferenças nas formas de onda apresentadas na Figura 5.4 (d), pois o efeito indutivo também aumenta com o aumento da intensidade da corrente impulsiva aplicada no sistema de aterramento [4]. A Figura 5.11 apresenta o instante inicial das curvas de corrente injetadas no sistema de aterramento A3.

Figura 5.11: Instante inicial de propagação das correntes injetadas no sistema de aterramento A3.



Fonte: Produzida pelo autor.

Nas Figuras 5.8 (a), 5.9 (a) e 5.10 (a), as regiões delimitadas pelas elipses, destacadas em vermelho, correspondem às regiões, também delimitada por elipses, nas Figuras 5.2 (d), 5.3 (d) e 5.4 (d). Essas regiões indicam a alteração no comportamento transitório dos aterramentos A1, A2 e A3, respectivamente. Nestes pontos, o comportamento transitório passa a ser não linear. As Figuras 5.8 (b), 5.9 (b) e 5.10 (b) apresentam locais destacados nas curvas representativas das contribuições não lineares e apresentam os pontos onde foi identificado uma mudança de comportamento (linear para não linear) nos respectivos sistemas de aterramento. Tanto o aterramento A1 como o A2 começaram a sofrer influência das não linearidades no instante de tempo de $4 \mu\text{s}$, para todos os níveis de carregamento do gerador de impulsos de corrente. O aterramento A3 também apresentou o início das não-linearidades no instante de tempo de $4 \mu\text{s}$ para os níveis de carregamento de 20 kV e 25 kV do gerador de impulsos. Para o nível de carregamento de 15 kV, o aterramento A3 começou a sofrer influência das não linearidades no instante de tempo de $4,4 \mu\text{s}$.

Diante do exposto e analisando as curvas de tensão, de corrente, bem como as subidas e descidas visualizadas nas curvas características da relação entre a tensão e a corrente apresentadas nas Figuras 5.2 a 5.4 (a), (b) e (d), respectivamente, foram definidas regiões que apresentam características majoritariamente lineares e não lineares dos sistemas de aterramento A1, A2 e A3. Conforme visto na Figura 5.1 (d), o sistema de aterramento do LAT-UFCG aparenta possuir comportamento não linear ao longo de toda passagem do impulso de corrente, entretanto, devido às interferências por reflexões de onda identificadas, não é possível, no escopo do presente trabalho, fazer relações entre os

instantes de tempo e o seu comportamento transitório, portanto, não está representado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Identificação dos intervalos de tempo de ocorrência predominantes dos efeitos lineares e não lineares identificados para os sistemas de aterramento A1, A2 e A3.

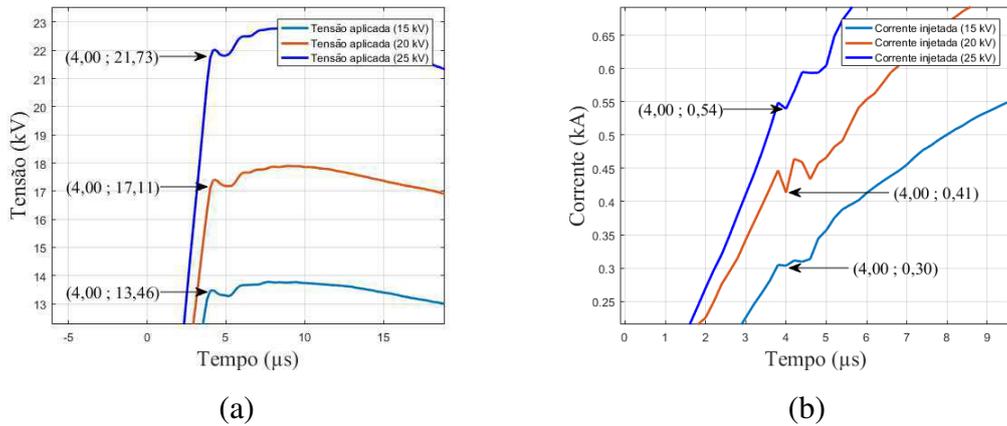
Aterramento/ Nível de carregamento	Região linear 1	Região não linear	Região linear 2
	Intervalo aproximado de tempo (μ s)		
A1/15 kV	0 - 3,9	4,0 – 17,0	17,1 – 250
A1/20 kV	0 - 3,9	4,0 – 17,6	17,7 – 250
A1/25 kV	0 - 3,9	4,0 – 25,8	25,9 – 250
A2/15 kV	0 - 3,9	4,0 – 22,0	22,1 – 250
A2/20 kV	0 - 3,9	4,0 – 22,6	22,7 – 250
A2/25 kV	0 - 3,9	4,0 – 21,8	21,9 – 250
A3/15 kV	0 - 3,9	4,0 – 22,9	23,0 – 250
A3/20 kV	0 - 3,9	4,0 – 19,8	19,9 – 250
A3/25 kV	0 - 3,9	4,4 – 23,6	23,7 – 250

Fonte: Produzida pelo autor.

As regiões de comportamento predominantemente linear, definidas como regiões lineares 1 e 2 na Tabela 5.4, relacionam-se às regiões lineares de subida e descida, respectivamente, das curvas apresentadas nas Figuras 5.2 (d), 5.3 (d) e 5.4 (d).

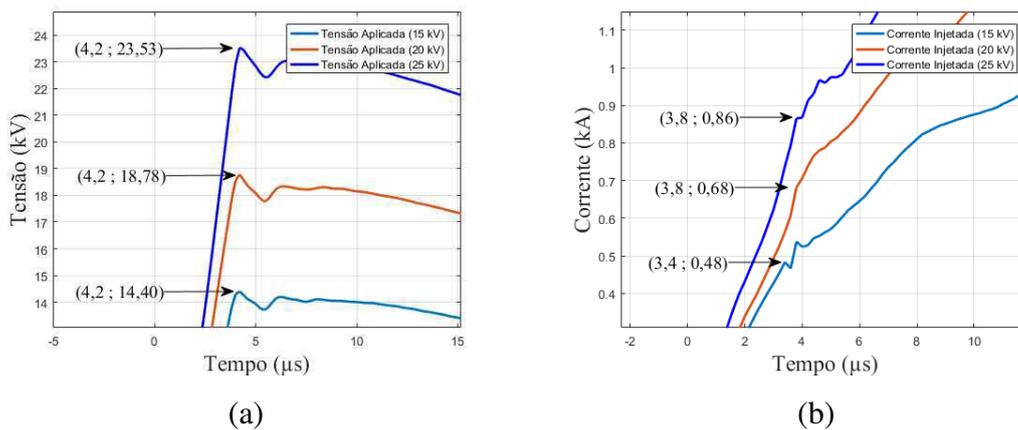
A partir dos instantes de tempo de início das não linearidades, foi verificado distorções nas formas de onda da tensão e da corrente impulsiva medidos em campo. O aterramento do LAT-UFCG não apresentou distorções significativas em nenhum instante de tempo nas curvas de tensão e corrente. As distorções na tensão e na corrente dos sistemas de aterramento A1, A2 e A3, bem como os respectivos pontos de início das não linearidades estão apresentadas nas Figuras 5.12 a 5.14.

Figura 5.12: Instantes de início das não linearidades no comportamento transitório do sistema de aterramento A1. (a) Tensão (Figura 5.2 (a)). (b) Corrente (Figura 5.2 (b)).



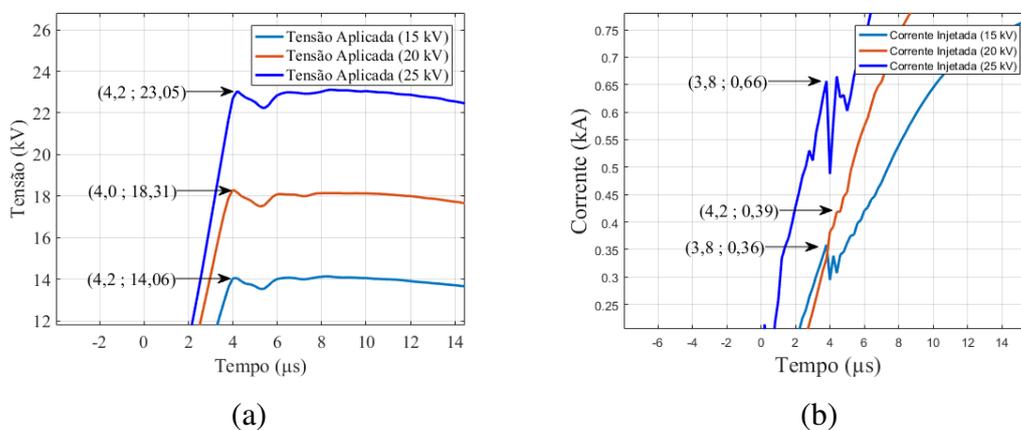
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.13: Instantes de início das não linearidades no comportamento transitório do sistema de aterramento A2. (a) Tensão (Figura 5.3 (a)). (b) Corrente (Figura 5.3 (b)).



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.14: Instantes de início das não linearidades no comportamento transitório do sistema de aterramento A3. (a) Tensão (Figura 5.4 (a)). (b) Corrente (Figura 5.4 (b)).



Fonte: Produzida pelo autor.

As Figuras 5.12 (a) e (b) indicam que as alterações no comportamento transitório do sistema de aterramento A1 ocorreram quando:

- As correntes injetadas atingiram aproximadamente 50% de I_p , para os níveis de 15 kV e 20 kV de carregamento do gerador de impulsos e aproximadamente 41% de I_p para o nível de carregamento de 25 kV;

Neste instante de tempo, as tensões produzidas nos terminais de aplicação do impulso atingiram aproximadamente 96 % de V_p , para todos os níveis de carregamento do gerador de impulso.

As Figuras 5.13 (a) e (b) indicam que as alterações no comportamento transitório do sistema de aterramento A2 ocorreram quando:

- As correntes injetadas atingiram aproximadamente 44% de I_p , para os níveis de 15 kV e 20 kV de carregamento do gerador de impulsos e aproximadamente 38% de I_p para o nível de carregamento de 25 kV;

Neste momento, as tensões produzidas nos terminais de aplicação do impulso atingiram valores superiores a V_p , para todos os níveis de carregamento do gerador de impulso.

As Figuras 5.14 (a) e (b) indicam que as alterações no comportamento transitório do sistema de aterramento A3 ocorreram quando:

- As correntes injetadas atingiram aproximadamente 44%, 35% e 47% de I_p , para os níveis de 15 kV e 20 kV e 25 kV de carregamento do gerador de impulsos, respectivamente.

Neste instante de tempo, as tensões produzidas nos terminais de aplicação do impulso atingiram aproximadamente 79 % de V_p , para todos os níveis de carregamento do gerador de impulsos.

Diante do que foi apresentado na subseção 5.2.1, conclui-se que os efeitos da ionização do solo e os efeitos capacitivos e indutivos influenciam diretamente na resposta transitória do sistema de aterramento. Os efeitos da ionização do solo, bem como os efeitos capacitivos, reduzem a impedância de aterramento, melhorando a resposta transitória do sistema de aterramento, quando submetido a impulsos de corrente. Os efeitos indutivos aumentam a impedância transitória do sistema de aterramento, tornando a resposta transitória do sistema de aterramento, quando submetido a impulsos de corrente, pior quando comparado com sua resposta em baixa frequência. Também foi verificado que, todas as configurações de aterramento ensaiadas, possuem uma característica transitória (capacitiva ou indutiva) predominante:

- Aterramento do LAT-UFCG: característica predominante capacitiva;
- Aterramento A1, A2 e A3: característica predominante indutiva.

A característica predominante pode ser identificada pelos tempos de frente das curvas de tensão e de corrente impulsiva ou pela curva característica da relação entre a tensão e a corrente. Entretanto, as análises mostraram que a resposta transitória dos sistemas de aterramento pode ser influenciada fortemente por outros efeitos transitórios que não são identificados diretamente da forma descrita. Também foi identificado que a resistividade do solo influencia diretamente na resposta transitória do sistema de aterramento quando o mesmo é submetido a um impulso de corrente (fenômeno de alta intensidade e alta frequência). Resistividades altas intensificam os efeitos capacitivos e favorecem a ocorrência da ionização e resistividade baixa favorece o aumento dos efeitos indutivos.

Por fim, foi identificado que os efeitos transitórios dos sistemas de aterramento podem ser separados em região linear e região não linear. Os instantes de tempo, do início das contribuições não lineares, na resposta do aterramento podem ser identificados diretamente nas curvas de tensão e de corrente obtidas em campo. Os comportamentos não lineares dos sistemas de aterramento estudados se iniciaram no mesmo instante de tempo para 8 dos nove ensaios apresentados, indicando que os comportamentos não lineares são mais dependentes da frequência do que da amplitude do sinal de corrente para os casos e condições estudados.

Conforme apresentado ao longo da presente subseção, a componente responsável pela contribuição relacionada às altas frequências (Figura 5.5), pode ser utilizada para representar o comportamento transitório, do sistema de aterramento. Portanto, ao se determinar a equação matemática que represente a componente não linear, pode-se analisar matematicamente o comportamento transitório do sistema de aterramento. Assim sendo, a seção 5.2.2 consistiu em apresentar a proposição de uma equação matemática genérica capaz de descrever a componente relativa às altas frequências dada pela Equação (4.9). Como o objetivo aqui não são as formulações matemáticas, foi utilizada a ferramenta de ajuste de curva, *Curve Fitting Toolbox*™, disponível no programa Matlab® para auxiliar na identificação da equação e seus parâmetros.

5.2.2 EQUAÇÃO GENÉRICA DA CONTRIBUIÇÃO RELATIVA ÀS ALTAS FREQUÊNCIAS

A determinação de uma equação genérica que represente a contribuição relativa às altas frequências ($x(t)$, na Figura 5.5), no comportamento transitório de um sistema de aterramento é importante para os estudos de modelagem de sistemas de aterramento. Apesar da modelagem não ser o objetivo deste trabalho, a equação genérica resultante deste estudo, traz grandes contribuições para esta área, visto que descreve a contribuição dos fenômenos transitórios (ionizantes, capacitivos ou indutivos) relacionados à frequência.

Para determinar a equação não linear que representa a variação de tensão no tempo, visualizada na Figura 5.6 (b), não foram utilizadas formulações avançadas de matemática, visto que este não é o foco do trabalho. Para tanto, partiu-se da análise de comparações entre as curvas características de equações conhecidas. Dessa forma, identificou-se que as curvas apresentadas na Figura 5.6 (b) são similares às curvas da dupla exponencial, comumente utilizada para representar a forma de onda de impulsos de corrente [69], somada à curva característica de uma função polinomial. Dessa forma, foi definida uma equação genérica conforme a Equação (5.1):

$$x(t) = (ae^{-bt} - ce^{-dt}) + (ft^g + ht) + j, \quad (5.10)$$

onde $x(t)$ representa a componente relacionada aos efeitos provocados pelas elevadas frequências, presentes durante o transitório de corrente impulsiva no sistema de aterramento; e a, b, c, d, f, g, h, j são os coeficientes da equação.

O método para determinar $x(t)$ (seção 5.2.1) e a Equação (5.10), desenvolvido ao longo deste trabalho, exigiu pouco esforço computacional, independente da geometria do sistema de aterramento, e conduziu a uma boa aproximação dos fenômenos reais, conforme verificado pelo coeficiente de determinação (R^2), apresentado na Tabela 5.5.

A Tabela 5.5 também apresenta os valores dos coeficientes a, b, c, d, f, g, h e j para as equações que representam as curvas apresentadas na Figura 5.6 (b).

Tabela 5.5: Coeficientes da Equação (5.1), que representa a contribuição do comportamento não linear à forma de onda da tensão medida em campo, do sistema de aterramento A1 para as tensões de carregamento de 15 kV, 20 kV e 25 kV.

Tensão	Coeficientes								
	a	b	c	d	f	g	h	j	R ²
15 kV	18,3	0,159	11,17	0,875	-34,44	-0,046	0,004	28,82	0,99
20 kV	24,88	0,158	16,14	0,784	13,29	0,094	0,008	-20	0,99
25 kV	52,43	0,097	29,2	0	26,3	0,176	0,041	-30	0,97
15 kV	14,18	0,035	14,18	0,580	10	0,078	-0,013	-12,13	0,99
20 kV	-14,56	0,672	-14,56	0,035	-1,03	-2,864	-0,007	1,798	0,98
25 kV	18,22	0,037	20	0,528	2	-0,30	-0,008	1,783	0,95

Fonte: Produzida pelo autor.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho foi realizada uma análise do comportamento transitório de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente. Através das análises dos sinais medidos em campo, foi possível identificar a contribuição dos efeitos transitórios que influenciaram no comportamento de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente.

Foram realizados ensaios experimentais em 4 configurações distintas de sistemas de aterramento, instalados em solos com características também distintas. A partir dos ensaios, foram obtidas as curvas da corrente aplicada e da resposta da tensão, medidas nos terminais onde foi injetado o impulso de corrente.

Com as medições em campo dos impulsos de corrente e da resistência em baixa frequência dos sistemas de aterramento ensaiados, foi possível estimar o comportamento em baixa frequência destes sistemas.

Com a comparação entre a resposta de tensão, em baixa frequência, e em alta frequência, foi possível verificar a influência da geometria e da resistividade do solo no comportamento transitório dos sistemas de aterramento.

Dessa forma, com os resultados obtidos em campo e as respostas em baixa frequência dos sistemas de aterramento, foi possível analisar as componentes que representam as contribuições da frequência no comportamento transitório dos sistemas de aterramento.

Foi identificado que a malha de aterramento, maior, com 12 eletrodos, e a malha de aterramento em formato circular, com 4 eletrodos, que possuem características essencialmente indutivas, e sofreram pouca variação nos valores do coeficiente impulsivo e impedância impulsiva, nos níveis de tensão de carregamento ensaiados, indicando que seus comportamentos transitórios são estáveis para a intensidade de corrente às quais foram submetidas.

Já os sistemas de aterramento, com 1 eletrodo vertical fincado no solo e com 3 eletrodos verticais dispostos em linha, que apresentaram efeito capacitivo, foram identificadas duas características diferentes. Quando se analisa o efeito do solo, observa-se que o aterramento de 1 eletrodo, que possuía característica essencialmente capacitiva, manteve um comportamento transitório estável, verificado pela pequena variação entre

os valores dos coeficientes impulsivos e impedância impulsiva, enquanto o aterramento com três eletrodos verticais dispostos em linha, que possuía características indutivas e capacitivas, apresentou uma redução de aproximadamente 21% em seus valores de coeficiente impulsivo e impedância impulsiva. É importante ressaltar que a malha de eletrodos em linha, estava instalado no solo com maior resistividade, portanto, o efeito capacitivo observado foi acentuado. Entretanto, ao serem observados os tempos de frente da tensão e corrente relativos a este aterramento, foi identificado que este sistema possui uma característica predominante, indutiva.

Isto evidencia que apenas a relação entre os tempos de frente dos sinais da corrente e tensão não é suficiente para caracterizar os efeitos presentes no comportamento transitório total do sistema de aterramento.

Os resultados também mostraram, que o instante de tempo de início dos efeitos transitórios, pode ser visualizado e identificado nas formas de onda da tensão e da corrente medidas em campo. Para os sistemas de aterramento ensaiados, foi verificado que os instantes de início dos efeitos transitórios foram os mesmo para as 8 dos 9 ensaios realizados nas três hastes, indicando que os efeitos transitórios estão diretamente relacionados à frequência e não à intensidade do impulso, para os níveis de corrente injetados. Entretanto, a intensidade do efeito transitório é diretamente influenciada pela intensidade do impulso, sendo esta influência ainda mais acentuada quando estão presentes efeitos capacitivos, conforme verificado nas análises do aterramento composto por 1 eletrodo e do sistema de aterramento composto por três eletrodos alinhados entre si. Também se pode concluir com as análises desses sistemas de aterramento, que a resistividade do solo influenciou diretamente na intensidade e do efeito capacitivo.

Os resultados apresentaram ainda que os comportamentos transitórios dos sistemas de aterramento possuem duas regiões aproximadamente lineares e uma região não-linear. As análises das regiões lineares, mostraram que a partir do instante de tempo referente ao tempo de frente da corrente, até o instante final, medido, os comportamentos transitórios dos sistemas de aterramento podem ser aproximados por uma impedância linear. O mesmo é válido para o instante de tempo que corresponde ao valor do instante inicial de aplicação do impulso, ao instante de tempo em que a tensão atingiu seu valor máximo. Já a região não-linear é influenciada pela contribuição transitória relativa à frequência do impulso injetado. Portanto, a equação genérica proposta, serviu para descrever a região não-linear.

A equação genérica se mostrou ser uma importante contribuição do presente trabalho, visto que possibilita determinar um modelo que represente o sistema de aterramento e suas não-linearidades, quando o mesmo é submetido à uma corrente impulsiva. Apesar da determinação de um modelo não ter se apresentado no escopo deste trabalho, o método aqui apresentado se mostrou eficaz e eficiente (no sentido do reduzido esforço computacional necessário para as análises), independente da geometria do sistema de aterramento em análise.

Por fim, concluiu-se que as análises do comportamento transitório de sistemas de aterramento, devem considerar em conjunto, os efeitos capacitivos, indutivos, ionizantes e a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência.

Assim, as investigações realizadas no presente trabalho abrem caminhos para trabalhos futuros no campo de estudo do comportamento transitório de sistema elétricos submetidos a impulsos de corrente. A seção 6.1 apresentam sugestões de trabalhos futuros.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, são sugeridos:

- Aprofundamento na avaliação da equação não linear apresentada. Com isso, pretende-se relacionar os coeficientes com grandezas que podem ser obtidas por meio de medições em campo. Dessa forma é possível encontrar uma nova forma de modelar sistemas de aterramento;
- Ainda com base na equação não linear proposta, verificar se as equações podem ser relacionadas a um circuito elétrico do tipo RLC.
- Aprofundar os estudos para encontrar a relação entre os parâmetros resistividade e permissividade do solo, intensidade da corrente e ionização do solo;
- Analisar as contribuições da geometria do aterramento, intensidade da corrente impulsiva, frequência e resistividade do solo para o efeito capacitivo.
- Avaliar as mesmas configurações dos sistemas de aterramento estudados, em outros tipos de solo;
- Avaliar configurações de aterramento de subestações;

- Modelar computacionalmente os sistemas de aterramento estudados no presente trabalho no domínio da frequência e do tempo;
- Desenvolver uma metodologia para dimensionamento de sistemas de aterramento que levem em consideração, resistividade do solo, geometria

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GRCEV, L. **Time and Frequency Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2186 - 2196, 2009.
- [2] GRCEV, L. **Lightning Surge Characteristics of Earthing Electrodes**. *29th International Conference of Lightning Protection*, Uppsala, Suécia, 2008.
- [3] 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**. Porto Alegre: PUCRS, 2007.
- [4] KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 3. ed. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995.
- [5] VISACRO, S. **Aterramentos Elétricos - Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.
- [6] CANNABRAVA, A. C. A.; FERREIRA, B. E. M.; PASQUA, L. P. **O Setor Elétrico**. Disponível em: <<https://www.osetoelettrico.com.br/aterramento-de-redes-de-distribuicao-com-utilizacao-de-postes-autoaterrados-desenvolvimento-e-implantacao/>> Acessado em 20/08/2017.
- [7] SILVA, S. P. ; PIANTINI, A.; FRANCO, J. L.; GONÇALVES, J. **Lightning Performance Studies for a 13.8kV Distribution Network**. *VII International Symposium on Lightning Protection*, Curitiba, Paraná, 2003.
- [8] VISACRO, S.; ROSADO, G. **Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation**. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 1, pp. 161-164, 2009.
- [9] 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**. *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Natal, Rio Grande do Norte, 2014.
- [10] SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. 2. ed. Nova York: Dover Publications, 1968.
- [11] LOBODA, M.; POCHANCK, Z. **A Numerical Identification of Dynamic Model Parameters of Surge Soil Conduction Based on Experimental Data**. *International Conference on Lightning Protection*, Berlim, Alemanha, 1992.

- [12] MENTER, F.; GREEV, L. **EMTP-based Model for Grounding System Analysis**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 4, pp. 1838-1849, 1994.
- [13] 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**. *XI Spanish-Portuguese Conference on Electrical Engineering*, Zaragoza, Espanha, 2009.
- [14] 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*, vol. 56, no. 1, pp. 177-187, 2014.
- [15] 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, L.A., Estados Unidos, 2010.
- [16] 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*, vol. 130, pp. 259-265, 2016.
- [17] MATA, C. T.; FERNANDES, M. I.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **EMTP Modeling of a Triggered-lightning Strike to the Phase Conductor of an Overhead Distribution Line**. *IEEE Transactions Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1175-1181, 2000.
- [18] LIEW A. C.; DARVENIZA, M. **Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths**. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 121, no. 2, pp. 123-135, 1974.
- [19] 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*, vol. 21, no. 1, pp. 194-201, 2006.
- [20] 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*, vol. 2, p. 134-145, 2008.
- [21] GRCEV, L. **Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no 3, pp. 1692-1699, 2011.
- [22] ALÍPIO, R.; VISACRO, S. **Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes**. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 1, pp. 132-139, 2013.
- [23] 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*, vol. 30, no. 1, pp. 211-219, 2015.
- [24] NBR 7117. **Medição da Resistividade do Solo e Determinação da Estratificação do Solo.** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2012.
- [25] UMAN, M. A. **The Lightning Discharge**, Orlando: Academic Press, 1987.
- [26] INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>> Acesso em: 23/10/2016.
- [27] IEC 60-1: **High-voltage Test Techniques – Part 1: General Definitions and Test.** 2^a ed., 1989.
- [28] VISACRO, S. **Aterramentos Elétricos**, São Paulo: Artliber Editora, 2005.
- [29] ARAÚJO, F. J. L. ; SILVA, J. M. C. L.; ANDRADE, G. V. J.; 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.** *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, Belém, Pará, 2010.
- [30] CASTRO, M. S. **Sistema de Aquisição de Dados para Avaliação de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Elétrica.** *Dissertação de Mestrado.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2012.
- [31] MOHAMAD, N.; HADDAD, A.; GRIFFITHS, H. **Performance of Earthing Systems of Low Resistivity Soils.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2039-2047, 2006.
- [32] CHAKER, V. **Simplified Methods for the Electrical Soil Resistivity Measurement.** *American Society for Testing and Materials (ASTM STP 741)*, pp. 61-91, 1981.
- [33] SUNDE, E. D. **Surge Characteristics of a Buried Bare Wire.** *AIEE Transactions*, vol. 59, pp. 987-991, 1940.
- [34] VISACRO, S. **A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 1, pp. 381-386, 2007.
- [35] GUIMARÃES, M. B. **Investigação da Resposta de Malhas de Aterramento Frente a Correntes de Descargas Atmosféricas.** *Dissertação de Mestrado.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.

- [36] GRCEV, L.; DAWALIBI, F. **An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, no. 4, pp. 1773-1781, 1990.
- [37] JÚNIOR, A. S. **Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas.** *Dissertação de Mestrado.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 1996.
- [38] GRCEV, L. **Impulse Efficiency of Ground Electrode.** *IEEE Transactions on Power*, vol. 24, no. 1, pp. 441-451, 2009.
- [39] GONÇALVES, F. B. R. G. **Avaliação da impedância impulsiva em um sistema de aterramento.** *Dissertação de Mestrado.* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2015.
- [40] SEKIOKA, S. **Discussion of Current Dependent Grounding Resistance using an Equivalent Circuit Considering Frequency-dependent Soil Parameters,** *33th International Conference on Lightning Protection*, Estoril, Portugal, 2016.
- [41] 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*, vol. 51, no. 6, pp. 5324-5334, 2015.
- [42] GUPTA, B. R.; THAPAR, B. **Impulse Impedance of Grounding Grids.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-99, no. 6, pp. 2357-2362, 1980.
- [43] MELIOPOULUS, A. P.; MOHARAM, M. G. **Transient Analysis of Grounding Systems.** *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 2, pp. 389-399, 1983.
- [44] 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.** Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/desempenho-de-aterramento-eletrico-diante-de-descargas-atmosfericas/>> Acessado em: 22/04/2017.
- [45] LI, J.; YUAN, T.; 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*, vol. 26, no 4, pp. 2647-2657, 2011.
- [46] HAN, X.; LU, Y.; XIA, C.; YU, J.; HUANG, Y.; ZHOU, W. **Simulation Research on Impulse Characteristics of Horizontal Grounding Conductor,** Wuham, China: IEEE, 2011.

- [47] ASIMAKOPOULOU, F.; GONOS, I. F., STATHOPOULOS, I. A. **Experimental Investigation on Soil Ionization**. *16th Internacional Symposium on High Voltage Engineering*, Joanesburgo, África do Sul, 2009.
- [48] MOUSA, M. **The soil ionisation gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no.3, p. 1669–1677, 1994.
- [49] DWIGHT, H. B. **Calculation of the Resistances to Ground**. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 55, no. 12, pp. 1319-1328, 1936.
- [50] HARRINGTON, R. F. **Field Computation by Moment Methods**, Nova York: Wiley-IEEE, 1993.
- [51] FILHO, S. V. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de engenharia**, São Paulo: Artliber, 2005.
- [52] CREIGHTON, E. E. F. **Lightning**. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XLIII, pp. 1197 - 1204, 1924.
- [53] BELLASCHI, P. L. **Lightning Currents in Field and in Laboratory**. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 54, no 8, pp. 837-843, 1935.
- [54] DVEGAN, S. S.; WHITEHEAD, E. R. **Analytical Models for Distributed Grounding Systems**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, no. 5, pp. 1763-1770, 1973.
- [55] SEKIOKA, A.; HAYASHIDA, H.; HARA, T.; AMETANI, A. **Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents**. *IEE Proceedings - Generation Transmission and Distribution* , vol. 145, no. 6, pp. 693 - 699, 1998.
- [56] HE, J.; Y. TU, Z. R.; ZOU, J.; CHEN, S.; GUAN, Z. **Laboratory Investigation of Impulse Characteristics of Transmission Tower Grounding Devices**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 994 - 1001, 2003.
- [57] ARAÚJO, F. J. L. **Análise da Resposta de uma Malha de Aterramento Submetida a Correntes Impulsivas por meio de Resultados Experimentais**, *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2016.
- [58] PAPALEXOPOULOS; A. D.; MELIOPOULOS, A. P. **Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, no. 4, pp. 1073 - 1081, 1987.
- [59] TAKASHIMA, T.; NAKAE, T.; ISHIBASHI, R. **High Frequency Characteristics of Impedances to Ground and Field Distributions of Ground Electrodes**. *IEEE*

Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, no. 4, pp. 1893 - 1900, 1981.

- [60] GRCEV, L. **Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no 2, pp. 815 - 823, 1996.
- [61] KOSKTALUK, R.; LOBODA, M.; MUKHEDKAR, D. **Experimental study of Transient Ground Impedances**. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, no. 11, pp. 4654-4660, 1981.
- [62] GRCEV, L.; DAWALIBI, F. **An Eletromagnetic Model For Transients in Grounding Systems**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, n. 4, pp. 1773 - 1781, 1990.
- [63] COELHO, R. A.; ALMAGUER, H. A. D. **Modeling of Grounding Systems Considering the Soil Ionization Effect Using COMSOL Multiphysics® Software**. *COMSOL Conference in Curitiba*, Brasil, 2014.
- [64] 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 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Natal, Rio Grande do Norte, 2016.
- [65] RODRIGUES, M. A. O. **Avaliação do Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento**. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2012.
- [66] NBR 15749, **Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento**. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 2009.
- [67] NILSON, J.; RIEDEL, **Circuitos Elétricos**, pp. 201-223, São Paulo: Pearson, 2008.
- [68] BARBERINI, S. J.; ARTUZI, W. A. **Análise Eletrodinâmica em Eletrodos de Aterramento Usando o Método FDTD**. *XVI Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica*, São Paulo, Brasil, 2004.
- [69] FRAGA, F. N. **Contribuições para o Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência Empregando TLM Tridimensional**. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, 2008