



Universidade Federal De Campina Grande
Centro De Engenharia Elétrica e Informática
Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica

**ANÁLISE DA RESPOSTA DE UMA MALHA
DE ATERRAMENTO SUBMETIDA A
CORRENTES IMPULSIVAS POR MEIO DE
RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Felipe José Lucena de Araújo

Campina Grande - PB, Abril de 2016.



Universidade Federal De Campina Grande
Centro De Engenharia Elétrica e Informática
Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Elétrica

ANÁLISE DA RESPOSTA DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO SUBMETIDA A CORRENTES IMPULSIVAS POR MEIO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS

*Dissertação submetida à Coordenação do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande em cumprimento às exigências do Programa de
Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientadores:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc./ Helder Alves Pereira, D.Sc.

Campina Grande, Abril de 2016.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A663a Araújo, Felipe José Lucena de.
Análise da resposta de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas por meio de resultados experimentais / Felipe José Lucena de Araújo. – Campina Grande-PB, 2016.
70. il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.

"Orientação: Profa. Dra. Edson Guedes da Costa, Prof. Dr. Helder Alves Pereira".

Referências.

1. Malha de Aterramento. 2. Corrente Impulsiva. 3. Impedância Impulsiva. 4. Impedância Transitória. 5. Impedância Harmônica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Pereira, Helder Alves. III. Título.

CDU 620.316.9(043.3)

**"ANÁLISE DA RESPOSTA DE UMA MALHA DE ATERRAMENTO SUBMETIDA A
CORRENTES IMPULSIVAS POR MEIO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS"**

FELIPE JOSÉ LUCENA DE ARAÚJO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/03/2016



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



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



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



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

CAMPINA GRANDE - PB

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Motivação	14
1.2	Objetivos	16
1.1.1	Geral	16
1.1.2	Específicos	16
1.3	Organização do Trabalho	17
2	Fundamentação Teórica	18
2.1	Sinal Característico de Descargas Atmosféricas	18
2.2	Aterramento Elétrico	20
2.3	Comportamento de Aterramento Elétrico Submetido a Correntes impulsivas	21
2.3.1	Impedância Harmônica de Aterramento	23
2.3.2	Impedância Transitória de Aterramento	24
2.3.3	Impedância Impulsiva	26
2.3.4	Propagação das ondas eletromagnéticas no sistema de aterramento	26
2.3.5	Comprimento efetivo	27
2.3.6	Efeito da intensidade da corrente	27
2.3.7	Dependência dos parâmetros do solo com a frequência	27
3	Revisão Bibliográfica	29
4	Material e Métodos	37
4.1	Material	37
4.2	Métodos	38
4.2.1	Medição da Resistência de Aterramento	38
4.2.2	Ensaio Experimentais com Impulso de Corrente	39
5	Resultados e Análise de Resultados	43
5.1	Resistência em Baixa Frequência	43
5.2	Resposta da malha de aterramento no domínio do tempo	44
5.2.1	Configuração 1 do Gerador de Impulso	45
5.2.2	Configuração 2 do gerador de impulso	49
5.2.3	Configuração 3 do gerador de impulso	53
5.2.4	Configuração 4 do gerador de impulso	57
5.2.5	Análise dos Resultados no Domínio do Tempo	60
5.3	Resposta da malha de aterramento no domínio da frequência	61
5.3.1	Configuração 1 do gerador de impulso	62
5.3.2	Configuração 2 do gerador de impulso	63
5.3.3	Configuração 3 do gerador de impulso	65

5.3.4	Configuração 4 do gerador de impulso.....	66
5.3.5	Análise dos Resultados no Domínio da Frequência	68
6	Conclusão	69
6.1	trabalhos futuros	70
6.2	Publicações	70
	Referências Bibliográficas	72

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua imensa sabedoria em ter feito esse belo mundo e as coisas que o compõem.

A toda família Lucena e Araújo que amo tanto, especialmente aos meus pais Maria do Socorro e José Sales, aos irmãos Bruno e Rômulo, as cunhadas Samantha e Wanuza e aos sobrinhos Cauã e Ravi.

Aos amigos do João Pessoa, Campina Grande e São João do Cariri. Agradecimento especial a Marconi Gonçalves por ter me ajudado em todos os ensaios que foram realizados nessa dissertação.

Agradeço a todos os professores e funcionários, do maternal até o último período da pós-graduação, todos contribuíram nesse trabalho. Agradecimento especial aos professores Edson Guedes e Helder Pereira pela orientação nesse trabalho de dissertação.

A CAPES e COPELE pelo suporte financeiro concedido nessa pesquisa.

Enfim, a todos os componentes da natureza que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desse trabalho.

*“É obrigação de todo homem devolver ao mundo
pelo menos o equivalente do que dele retirou”*

(Albert Einstein)

Resumo

Nesse trabalho foi realizado uma avaliação do comportamento transitório de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas, no domínio do tempo e frequência, analisando a impedância transitória e impedância impulsiva (domínio do tempo), e impedância harmônica (domínio da frequência) em relação a forma de onda e amplitude da corrente injetada na malha de aterramento sob teste, no intuito de verificar a qualidade da malha de aterramento sob solicitações de alta frequência, como também, verificar os efeitos da ionização do solo e redução da resistividade do solo com o aumento da frequência, na resposta transitória de uma malha de aterramento. Para isso, foram utilizadas 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 impulsivo injetado, a impedância impulsiva e impedância transitória não teve variação significativa. Também foi mostrado que quando a variável de análise foi o tempo de frente do sinal de corrente impulsivo injetado, a impedância impulsiva variou inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente aplicado e a impedância transitória estabiliza-se em torno da resistência em baixa frequência. O módulo da impedância harmônica não teve alterações significativas quando comparada a amplitude da corrente injetada, para as formas de onda de corrente com o mesmo tempo de frente, atingindo seu máximo em torno de 1 MHz, para todos os casos estudados. A fase da impedância harmônica não teve alterações significativas quando comparada 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 tem comportamento predominantemente indutivo.

Palavras-Chave – Corrente impulsiva, Impedância Impulsiva, Impedância transitória, Impedância Harmônica, Malha de aterramento.

Abstract

In this work, an experimental assessment of a ground grid behavior when subjected to impulsive currents was performed, both in the time and in the frequency domain, analyzing transient impedance and pulse impedance (time domain), and harmonic impedance (frequency domain) relative to the front time, fall time and amplitude of the current injected into the ground grid under test, in order to evaluate its quality under high frequency applications, and also validate the obtained results by using computer models in the time and frequency domain. For this purpose, four different pulse generator settings were used, resulting in four distinct impulsive current wave forms, wherein each wave form was injected into 3 different amplitudes.

The results showed that when the analysis variable was the injected current amplitude, the impulsive impedance had no significant variation. It was also shown that when the analysis variable was the front time of the applied current signal, the impulsive impedance varied inversely proportional to the front time of the applied current signal. When the harmonic impedance module related to the three impulsive current amplitudes injected was analyzed, it was concluded that: the harmonic impedance module had no significant changes compared to the injected current amplitude, to the current waveforms with the same front time. When the harmonic impedance module related to the four waveforms was analyzed, it was observed that: for all studied cases, the harmonic impedance module is constant for frequencies below 100 kHz and, above this frequency, the module had its value increased, reaching its highest value at around 1 MHz. The phase of the harmonic impedance had no significant changes compared the amplitude of the injected current. When we analyzed the phase of the harmonic impedance with respect to the waveforms observed that electric grounding is predominantly inductive behavior.

Keywords - Current impulse, Ground grid, Harmonic impedance, Impedance impulsive, Transient impedance.

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Resumo da pesquisa realizada sobre sistemas de aterramento.	34
Tabela 3.2 – Continuação: Resumo da pesquisa realizada sobre sistemas de aterramento.	35
Tabela 5.1 – Resistência em função da distância.....	43
Tabela 5.2 – Configuração 1 do gerador de impulso.	45
Tabela 5.3 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 1 – 15 kV).	46
Tabela 5.4 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 1 – 20 kV).	47
Tabela 5.5 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 1 – 25 kV).	47
Tabela 5.6 - Impedância impulsiva em relação a tensão de carregamento dos capacitores (Configuração 1).	48
Tabela 5.7 - Configuração 2 do gerador de impulso de corrente.	49
Tabela 5.8 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 2 – 15 kV).	50
Tabela 5.9 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 2 – 20 kV).	51
Tabela 5.10 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 2 – 25 kV).	51
Tabela 5.11 - Impedância impulsiva (Configuração 2).....	52
Tabela 5.12 - Configuração 3 do gerador de impulso de corrente.....	53
Tabela 5.13 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 3 – 15 kV).	54
Tabela 5.14 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 3 – 20 kV).	55
Tabela 5.15 - Tempo de frente e cauda da $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 3 – 25 kV).	55
Tabela 5.16 - Impedância impulsiva (Configuração 3).....	56
Tabela 5.17 – Configuração 4 do gerador de impulso de corrente.	57
Tabela 5.18 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 4 – 15 kV).	58

Tabela 5.19 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 4 – 20 kV). 59

Tabela 5.20 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 4 – 25 kV). 59

Tabela 5.21 - Impedância impulsiva (Configuração 4)..... 60

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Sinal de corrente típico de uma descarga atmosférica.	18
Figura 2.2 - Forma de onda de corrente impulsiva representativa de descarga atmosférica.	19
Figura 2.3 - Módulo da corrente impulsiva.....	20
Figura 2.4 - Componentes de um aterramento elétrico (RODRIGUES (2012))......	21
Figura 2.5 - Correntes elétricas estabelecidas em um eletrodo de aterramento [CASTRO, 2012]......	22
Figura 2.6 - Circuito equivalente de um eletrodo enterrado no solo.....	23
Figura 2.7 - Variação da impedância complexa em relação à frequência.....	24
Figura 2.8 - Impedância transitória.	25
Figura 2.9- Atenuação e distorção da tensão e da corrente ao longo do eletrodo. (Adaptado de Visacro (2007a))......	26
Figura 4.1- Malha de aterramento sob teste.	37
Figura 4.2 - Esquema para medição da resistência de aterramento.	39
Figura 4.3 – Fotografias: (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.	40
Figura 4.4 – Circuito elétrico do gerador de impulso [Modrusan].	40
Figura 4.5 – Circuito elétrico do gerador de impulso.	41
Figura 5.1 – Resistência em função da distância.	44
Figura 5.2 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 1 – 15 kV).	45
Figura 5.3 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 1 – 15 kV).	46
Figura 5.4 - Sinais de corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 1 – 25 kV).	47
Figura 5.5 - Impedância transitória $z(t)$ em relação a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 1).	48
Figura 5.6 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 2 – 15 kV).	49
Figura 5.7 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 2 – 20 kV).	50
Figura 5.8 - Sinais de corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 2 – 25 kV).	51
Figura 5.9 - Impedância transitória $z(t)$ em função da tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 2).	52
Figura 5.10 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 3 – 15 kV).	53
Figura 5.11 - - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 3 – 20 kV).	54
Figura 5.12 - Corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 3 – 25 kV).	55

Figura 5.13 - Impedância transitória (Configuração 3 – 25 kV).....	56
Figura 5.14 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 4 – 15 kV).	57
Figura 5.15 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 4 – 20 kV).	58
Figura 5.16 - Sinais de corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 4 – 25 kV).	59
Figura 5.17 - Impedância transitória (Configuração 4 – 25 kV).....	60
Figura 5.18 - - Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 1).	62
Figura 5.19 – Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 1).	63
Figura 5.20 – Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 2).	64
Figura 5.21 - - Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 2).	64
Figura 5.22 – Módulos das impedância harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 3).	65
Figura 5.23 – Fases das impedância harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 3).	66
Figura 5.24 – Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 4).	67
Figura 5.25 – Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 4).	67

1 INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico é planejado no intuito de otimizar a operação e promover sua máxima confiabilidade, assegurando o fornecimento da energia de forma ininterrupta e com qualidade. Nesse contexto, as malhas de aterramento são de extrema importância no que concerne à segurança de pessoas e equipamentos instalados no sistema elétrico.

Uma malha de aterramento é constituída de hastes de aço cobreada, conectadas via soldas exotérmicas a cabos de cobre, geralmente dispostos de forma retangular. A utilização dessa configuração de aterramento objetiva a mitigação dos efeitos causados pelas sobretensões oriundas de descargas atmosféricas e correntes de curto-circuito. Dentro desse contexto, o principal objetivo de uma malha de aterramento é fornecer um caminho de baixa impedância para essas correntes, mantendo os potenciais elétricos dentro de limites de segurança de modo a não causar fibrilação ventricular ou que possam causar danos a equipamentos instalados ou localizados nas proximidades da falta.

A faixa de frequência que uma malha de aterramento opera é dividida em frequência industrial, usualmente de 50 Hz e 60 Hz, e frequências devido a impulsos de corrente, como descargas atmosféricas (0,5 MHz a 500 MHz) (TELLÓ, 2007). Na maioria dos projetos, o dimensionamento da malha de aterramento é realizado para atender solicitações de baixa frequência, como as correntes de curto-circuito. No entanto, o comportamento dos eletrodos de aterramento para altas frequências é distinto em relação à resposta dos eletrodos para baixas frequências. Segundo VISACRO (2007a), a diferença de comportamento deve-se, principalmente, a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, o efeito da ionização do solo e a resposta do aterramento frente a correntes impulsivas.

1.1 MOTIVAÇÃO

Quando descargas atmosféricas incidem sobre os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, podem gerar vários problemas, dentre eles, danos aos

equipamentos que estão ligados à rede elétrica, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia, podendo até mesmo interrompê-los.

O Brasil é um país que possui alta incidência de raios, registrando elevada atividade atmosférica anual. A falta de proteção adequada e o desconhecimento das pessoas sobre os riscos originados pelas descargas provocam vítimas fatais e dezenas de feridos. Além disso, segundo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2016), ocorrem perdas financeiras anuais estimadas em R\$ 1 bilhão, ocasionadas por incêndios, queima de equipamentos e desligamento de sistemas de energia, resultando em cerca de 70% de desligamentos das linhas de transmissão e 40% dos sistemas de distribuição. Um método preventivo, que poderia minimizar os desligamentos provocados por descargas atmosféricas é a drenagem eficiente das correntes por meio de malhas de aterramento.

Para solicitações de baixa frequência, como de curto-circuito, é suficiente representar aterramentos elétricos como uma resistência pura, no entanto, para uma solicitação de alta frequência, como de uma descarga atmosférica, a parcela capacitiva e indutiva do aterramento elétrico deve ser considerada. Dentro desse contexto, para uma correta avaliação da qualidade de um aterramento elétrico, as duas solicitações devem ser analisadas (TELLÓ, 2007).

Na grande maioria das vezes, a verificação da qualidade do aterramento elétrico é feita apenas pela medição de sua resistência em baixa frequência, utilizando vários equipamentos disponíveis no mercado. Contudo, o cenário descrito acima, justifica o conhecimento da resposta de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas de alta intensidade, utilizando medições e ensaios.

Estudos experimentais relacionados a aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas, se limitam, na maior parte dos casos, a configurações que contém 1 haste cilíndrica ou cabos horizontais enterradas no solo, como os resultados mostrados por CASTRO *et al* (2014) e GONÇALVES (2015). Além disso, é comum que os pesquisadores avaliem a resposta do aterramento elétrico em relação a correntes impulsivas de baixa intensidade, como os resultados mostrados por ROSADO (2008) e GUIMARÃES (2012).

Assim, este trabalho de dissertação se propõe em avaliar uma malha de aterramento típica de subestações de distribuição, submetida a correntes impulsivas de alta intensidade com tempos de frente distintos, analisando o comportamento de grandezas relativas ao domínio do tempo (impedância transitória e impulsiva) e

relativas ao domínio da frequência (impedância harmônica), no intuito de verificar a qualidade da malha de aterramento sob solicitações de alta frequência (descarga atmosférica), como também, verificar os efeitos da ionização do solo e a redução da resistividade do solo com o aumento da frequência, na resposta transitória de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GERAL

O objetivo principal desse trabalho consiste em avaliar o comportamento de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas de alta intensidade, representativas de descargas atmosféricas, analisando a impedância transitória, impedância impulsiva e impedância harmônica em relação ao tempo de frente e amplitude da corrente impulsiva injetada na malha de aterramento sob teste.

1.2.2 ESPECÍFICOS

Objetivando-se avaliar uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas, serão realizadas as seguintes atividades:

- Avaliar o comportamento da impedância transitória e impedância impulsiva em relação a três amplitudes da corrente impulsiva injetada;
- Avaliar o comportamento da impedância transitória e impedância impulsiva em relação ao tempo de frente da corrente impulsiva injetada;
- Avaliar o módulo da impedância harmônica em relação a três amplitudes da corrente impulsiva injetada;
- Avaliar o módulo da impedância harmônica em relação ao tempo de frente da corrente impulsiva injetada.
- Avaliar a fase da impedância harmônica em relação a três amplitudes da corrente impulsiva injetada;
- Avaliar a fase da impedância harmônica em relação ao tempo de frente da corrente impulsiva injetada.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 apresenta-se uma fundamentação teórica necessária para uma correta avaliação de aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas.

No Capítulo 3 é descrita a revisão bibliográfica, comentando as pesquisas mais relevantes, no que concerne o estudo de aterramentos elétricos.

No Capítulo 4 são apresentados os materiais e métodos utilizados na realização das medições, essenciais ao desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e análises obtidas nos ensaios experimentais referentes à malha de aterramento sob teste.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais do trabalho, decorrente dos experimentos práticos realizados, assim como, as propostas de continuidade.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

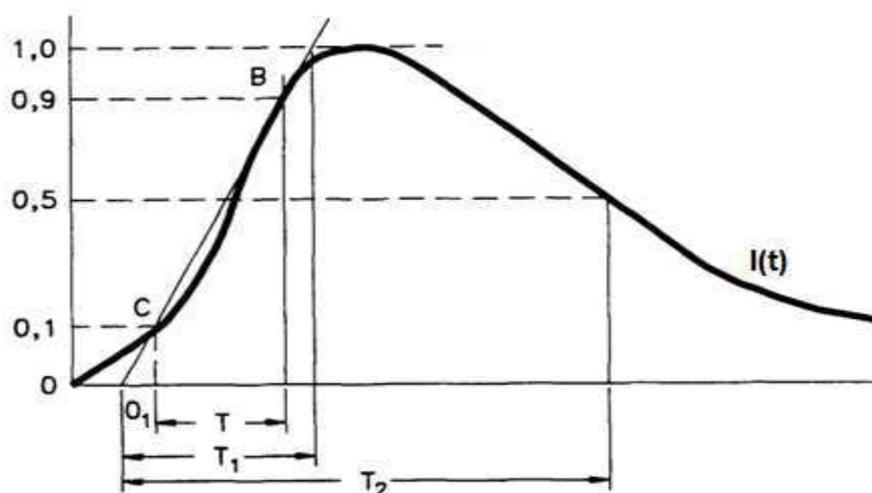
Nesse capítulo estão descritas a fundamentação teórica sobre descargas atmosféricas e aterramentos elétricos, necessárias para avaliar uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas.

2.1 SINAL CARACTERÍSTICO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Uma descarga de corrente atmosférica injetada em um sistema elétrico pode acarretar danos a seus equipamentos. Também pode ocasionar sobretensões e levar à ruptura de isolamentos dos equipamentos do sistema elétrico, causando sua falha. Para a avaliação da suportabilidade de equipamentos e componentes do sistema elétrico frente a esses tipos de solicitações, é necessário conhecer as formas de onda de impulsos de correntes característicos de descargas atmosféricas.

A forma de onda típica de impulsos de corrente elétrica esta ilustrada na Figura 2.1 (IEC 60-1, 1989).

Figura 2.1 - Sinal de corrente típico de uma descarga atmosférica.



sendo:

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

O₁: Origem virtual. É utilizado como a origem do sinal, com o objetivo de desconsiderar a presença de ruídos nos pontos iniciais da forma de onda;

T: Intervalo de tempo entre os instantes nos quais o impulso está com 10% (ponto C) e 90% (ponto B) de sua amplitude máxima;

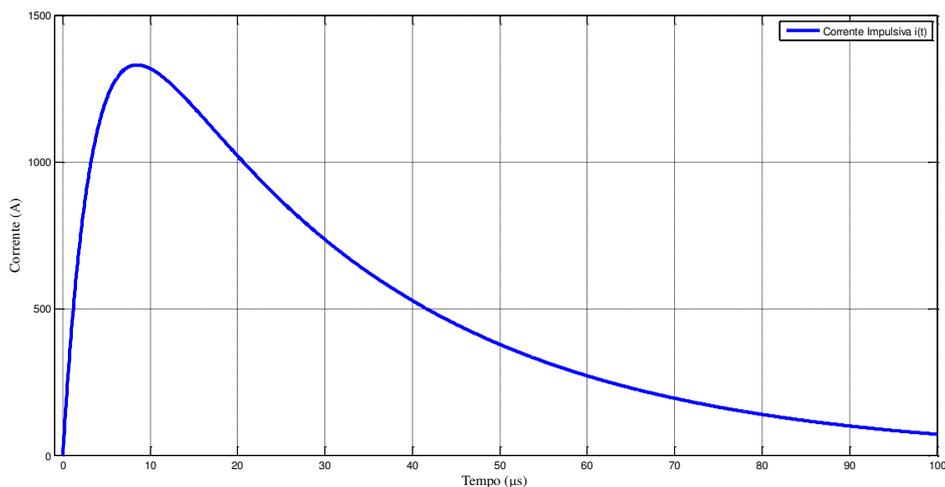
T₁: Tempo de frente do sinal. É definido como sendo $1,25 \times T$. Representa o intervalo de tempo entre a origem virtual e a amplitude máxima do impulso;

T₂: Tempo de cauda do sinal. 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.

De forma geral, sinais de corrente e tensão são medidos por meio de instrumentos que representam esses sinais por conjuntos finitos de valores discretos no domínio do tempo.

A Figura 2.2 ilustra uma forma de onda de corrente impulsiva $i_p(t)$ representativa de uma descarga atmosférica. Esse sinal de corrente possui $n = 2500$ amostras em uma frequência de amostragem $f_s = 25$ MHz.

Figura 2.2 - Forma de onda de corrente impulsiva representativa de descarga atmosférica.



Devido ao fato que correntes de descargas atmosféricas possuem componentes em alta frequência, a análise desse sinal no domínio da frequência é essencial. Para isso, pode-se utilizar a Transformada discreta de Fourier, que realiza a transição de sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência.

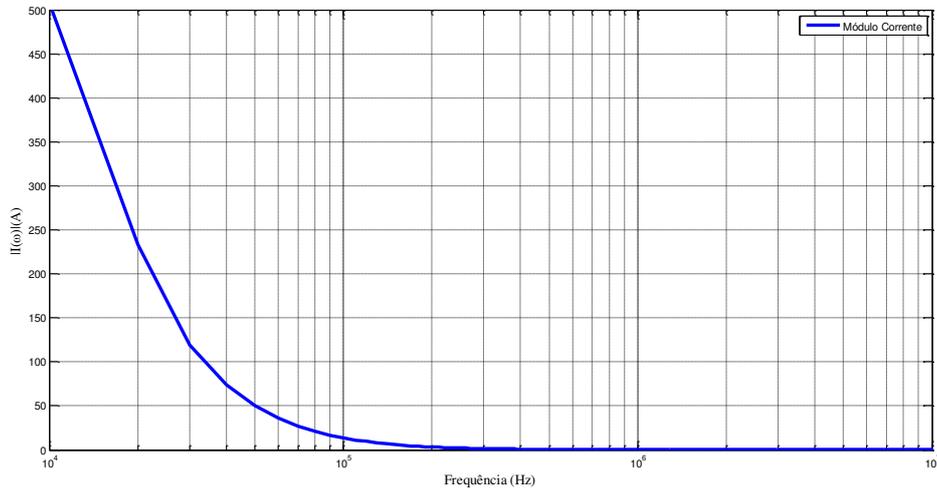
Para determinar a Transformada discreta de Fourier de um sinal arbitrário, pode-se utilizar a função nativa do Matlab `fft`. Uma representação simples da sintaxe dessa função é:

$$F(\omega) = \text{fft}(f(t)) \quad (2.1)$$

onde $F(\omega)$ é um vetor que contém a Transformada discreta de Fourier e $f(t)$ é um vetor que contém o sinal.

Aplicando a função `fft` do Matlab, no sinal de corrente $i_p(t)$ ilustrado na Figura 2.2, determina-se $I_p(\omega)$. O módulo de $I(\omega)$ está ilustrado na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Módulo da corrente impulsiva.



2.2 ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Um aterramento elétrico consiste numa ligação elétrica entre um componente físico e a terra. Basicamente, um aterramento elétrico é constituído pelas conexões dos componentes do sistema aos eletrodos de aterramento e a terra que envolve esses eletrodos.

Os eletrodos de aterramento são, basicamente, qualquer condutor elétrico enterrado no solo, como exemplo hastes verticais de aço cobreada. A disposição geométrica dos eletrodos de aterramento dependerá da aplicação do aterramento elétrico. Quando a maior preocupação é o controle do gradiente de potencial na superfície do solo, destacam-se as malhas de aterramento, que são um conjunto de hastes verticais interconectadas por fios de cobre ou por meio de soldas exotérmicas, enterradas usualmente na profundidade da ordem de 0,5 m. A Figura 2.4 ilustra os componentes de um aterramento elétrico (VISACRO, 2005).

Figura 2.4 - Componentes de um aterramento elétrico (RODRIGUES (2012)).



Os aterramentos elétricos desempenham um papel importante na proteção dos sistemas de potência. O principal objetivo deles é assegurar a segurança pessoal, prevenir danos a equipamentos instalados, estabelecer um ponto de tensão de referência para todo o sistema elétrico interligado, como também fornecer um caminho de baixa impedância para correntes oriundas de descargas atmosféricas, curtos-circuitos e cargas estáticas acumuladas nas carcaças dos equipamentos, além das correntes elétricas devido ao desbalanço de cargas alimentadas pela fonte de tensão (VISACRO, 2005).

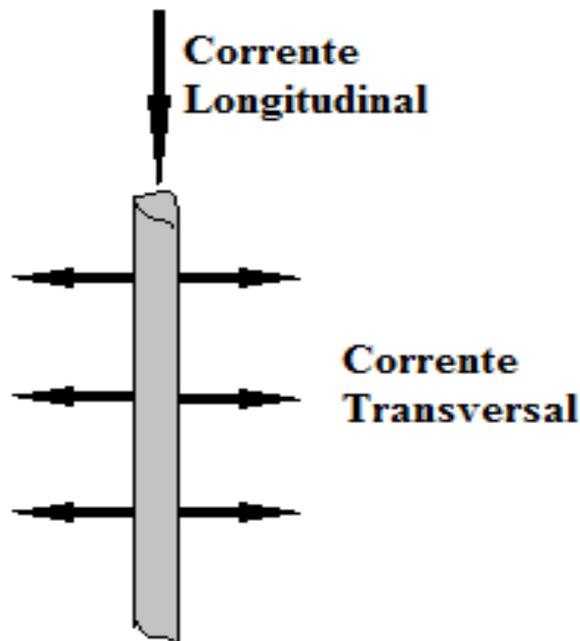
2.3 COMPORTAMENTO DE ATERRAMENTO ELÉTRICO

SUBMETIDO A CORRENTES IMPULSIVAS

Para se avaliar a resposta de um aterramento elétrico, quando submetido a um impulso de corrente, deve ser considerado que em geral, uma conexão a terra, apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para a terra (TELLÓ, 2007).

Segundo SUNDE (1949), a corrente que é injetada em um eletrodo de aterramento, é parcialmente dissipada para o solo e parcialmente transferida para o eletrodo, podendo ser dividida em duas parcelas: uma longitudinal e outra transversal, conforme ilustra a Figura 2.5.

Figura 2.5 - Correntes elétricas estabelecidas em um eletrodo de aterramento [CASTRO, 2012].



A parcela da corrente que é transferida para o eletrodo é denominada de corrente longitudinal, sendo a mesma responsável pelas perdas térmicas, devido à resistência do eletrodo, e pelos campos magnéticos estabelecidos no interior e no exterior desse eletrodo. Essas energias podem ser modeladas por meio de uma resistência e uma indutância em série. Tal fato leva à decomposição da corrente longitudinal em uma parcela real e outra imaginária (VISACRO 2007a).

A parcela da corrente que é dissipada para o solo é denominada de corrente transversal (VISACRO, 2007a). Essa corrente pode ser determinada a partir da segunda Equação de Maxwell, mostrada na Equação (2.2) (SADIKU, 2010).

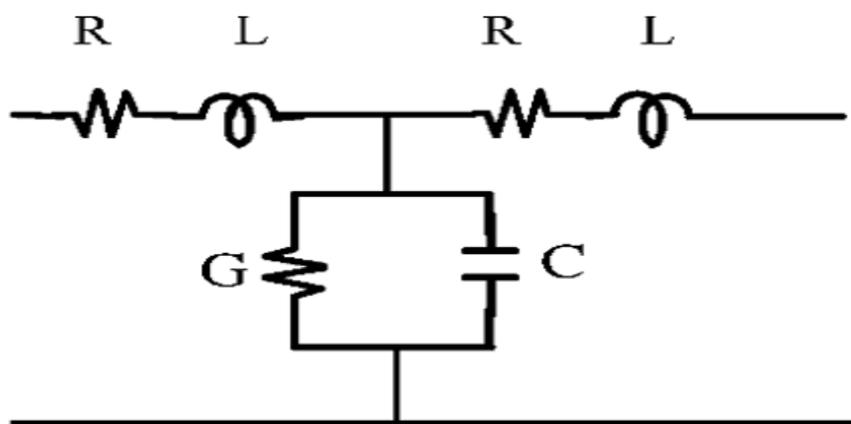
$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \varepsilon \mathbf{E}. \quad (2.2)$$

Analisando a Equação (2.2), a corrente que percorre o solo pode ser dividida em duas componentes: uma corrente de condução ($I_{\text{condução}} = \sigma \mathbf{E}$) e uma corrente de deslocamento ($I_{\text{deslocamento}} = j\omega \varepsilon \mathbf{E}$). A corrente de condução está relacionada com o campo elétrico externo \mathbf{E} aplicado e a condutividade σ do solo. A corrente de deslocamento está relacionada com o campo elétrico externo \mathbf{E} aplicado e a permissividade ε do solo, como também da frequência angular ω do campo elétrico externo \mathbf{E} aplicado. Dessa forma, a energia associada às duas parcelas da corrente transversal pode ser representada por uma condutância em paralelo com uma capacitância. Tal fato leva à decomposição da corrente transversal em uma parcela real

(corrente de condução) e outra imaginária (corrente de deslocamento) (VISACRO, 2007a).

A Figura 2.6 ilustra o circuito equivalente de um eletrodo enterrado no solo, evidenciando as parcelas reativas presentes no aterramento elétrico submetido a correntes impulsivas.

Figura 2.6 - Circuito equivalente de um eletrodo enterrado no solo.



2.3.1 IMPEDÂNCIA HARMÔNICA DE ATERRAMENTO

No domínio da frequência, o comportamento do aterramento pode ser avaliado a partir da impedância harmônica ($Z(\omega)$) de aterramento, que é definido como a razão entre a elevação de potencial ($V(\omega)$) estabelecida no eletrodo (referenciada ao infinito) e a corrente $I(\omega)$ injetada ao aterramento para cada frequência específica, como mostrado na Equação (2.3).

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)}. \quad (2.3)$$

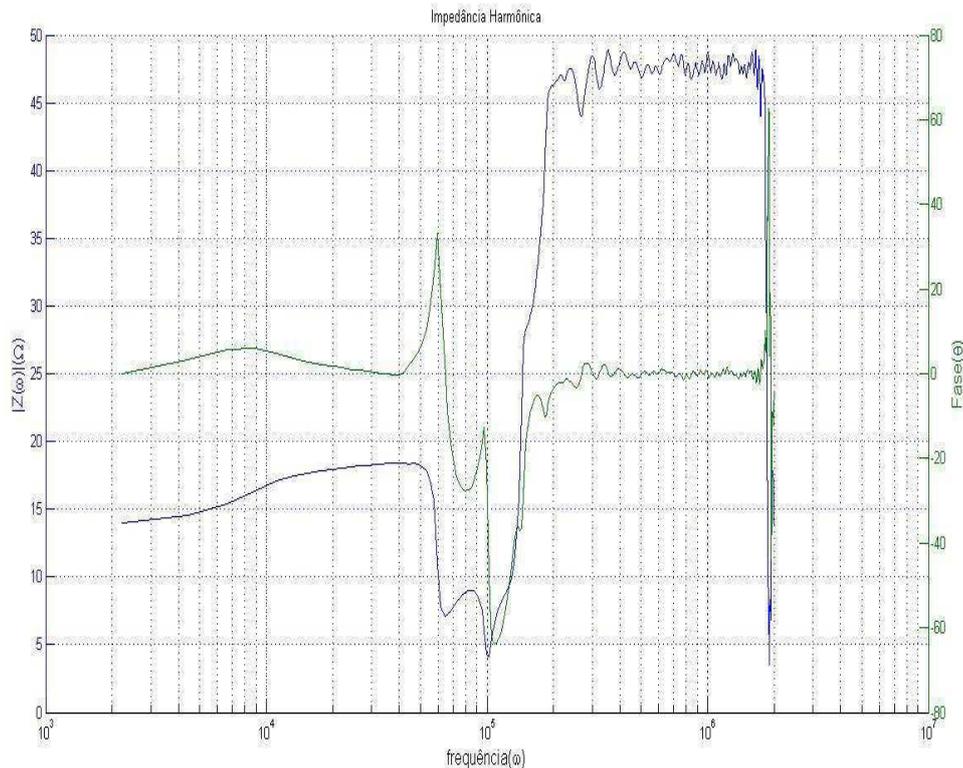
Considerando solos heterogêneos, a impedância harmônica depende da configuração dos eletrodos de aterramento, do sinal de corrente injetada e das características eletromagnéticas do solo (condutividade, permissividade e permeabilidade (VISACRO, 2007a).

Na análise de fenômenos de baixa frequência, como curto-circuito, os efeitos reativos podem ser desprezados e, para esse caso, o aterramento elétrico pode ser caracterizado por uma resistência de aterramento. Em tais situações, a resistência de aterramento pode ser definida como a condição limite da impedância harmônica de aterramento, sendo o valor da frequência tendendo a zero, como mostra a Equação (2.4) (VISACRO, 2007a).

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} = R_t. \quad (2.4)$$

Para ilustrar o comportamento de um aterramento elétrico em altas frequências, foi simulado no software *Comsol Multiphysics*, uma haste cilíndrica de 3 m de comprimento e 0,2 m de diâmetro enterrado em um solo com resistividade de $100 \Omega \cdot \text{m}$. A Figura 2.7 ilustra a impedância harmônica do aterramento elétrico simulada.

Figura 2.7 - Variação da impedância complexa em relação à frequência.



Observando-se a Figura 2.7, pode-se concluir que para baixas frequências, o efeito reativo do aterramento elétrico pode ser desprezado e o módulo da impedância harmônica se aproxima da resistência em baixa frequência (ARAÚJO, 2016b). Com o aumento da frequência do sinal solicitante, começam a surgir os efeitos reativos do aterramento elétrico, modificando o módulo e fase da impedância harmônica.

2.3.2 IMPEDÂNCIA TRANSITÓRIA DE ATERRAMENTO

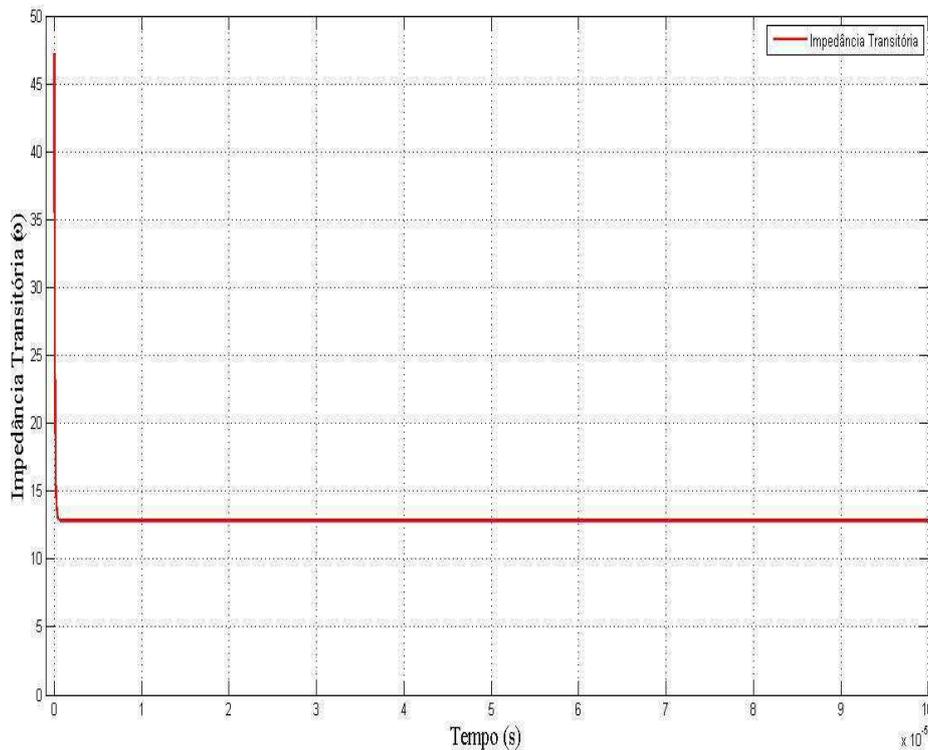
No domínio do tempo, considerando ondas impulsivas de alta frequência, o comportamento do aterramento elétrico pode ser representado por uma impedância transitória $z(t)$ dada pela razão da tensão $v(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de

corrente e a corrente $i(t)$ injetada, considerando a variação do sinal no tempo como mostra a Equação (2.5).

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

Para ilustrar o comportamento de um aterramento elétrico em altas frequências, foi simulado no software Comsol Multiphysics, uma haste cilíndrica de 3 m de comprimento e 0,2 m de diâmetro enterrado em um solo com resistividade de $100 \Omega \cdot \text{m}$. A Figura 2.8 ilustra a impedância transitória do aterramento elétrico simulado.

Figura 2.8 - Impedância transitória.



Observando-se a Figura 2.8, percebe-se que a impedância transitória possui duas componentes: a componente transitória e a componente de regime permanente. A componente transitória está associada a altas frequências, com variações bruscas na amplitude da impedância transitória. A componente de regime permanente se aproxima do valor da resistência de aterramento em baixa frequência (ARAÚJO, 2016a).

2.3.3 IMPEDÂNCIA IMPULSIVA

A impedância impulsiva de aterramento (Z_p) é um parâmetro relacionado ao domínio do tempo que avalia o comportamento de um aterramento elétrico submetido a correntes impulsivas. Esse parâmetro é determinado pela razão entre os valores de pico da onda de tensão (V_p) e corrente (I_p) no mesmo espaço, como mostra a Equação (2.6).

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}. \quad (2.6)$$

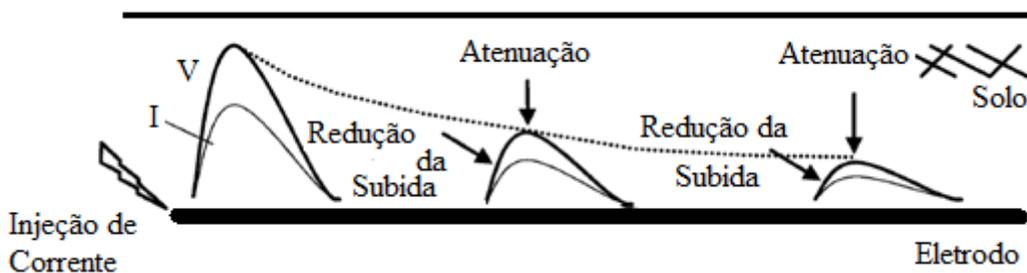
Esses picos de ondas de tensão e corrente não ocorrem no mesmo instante, apesar disso, tal parâmetro permite determinar a máxima elevação de potencial no aterramento durante uma descarga atmosférica, a partir do produto da impedância impulsiva pelo valor de pico da corrente do sinal solicitante (ARAÚJO, 2016a).

2.3.4 PROPAGAÇÃO DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS NO SISTEMA DE ATERRAMENTO

A corrente impulsiva que é injetada em um eletrodo de aterramento, gera ondas eletromagnéticas ao longo do eletrodo e solo. A propagação dessas ondas em um meio com perdas apresentam atenuações e distorções, resultando na variação da frequência da onda propagada e redução de sua amplitude (TELLÓ, 2007). A atenuação é diretamente proporcional à condutividade do meio e frequência do sinal solicitante (SADIKU, 2010).

VISACRO (2007a) realizou estudos sobre a propagação de um impulso de corrente ao longo de um eletrodo horizontal e concluiu que o sinal propagado, além dos efeitos previamente citados, apresenta uma redução do tempo de frente. São apresentadas na Figura 2.9 as ondas propagadas, em que se destaca a atenuação e a distorção.

Figura 2.9- Atenuação e distorção da tensão e da corrente ao longo do eletrodo. (Adaptado de VISACRO (2007a)).



2.3.5 COMPRIMENTO EFETIVO

A corrente que é injetada no eletrodo de aterramento apresenta atenuação ao longo do mesmo, com isso, a densidade de corrente diminui ao longo do eletrodo. Considerando esses fatos, GUPTA *et al.* (1980), definiu o conceito de comprimento efetivo, que é o comprimento limite, ao longo do eletrodo, que a onda de corrente é completamente atenuada. Segundo os autores, o comprimento efetivo depende da condutividade do solo e da frequência máxima do sinal de corrente injetado.

O aumento do eletrodo, além do seu comprimento efetivo, não contribui para a redução da impedância impulsiva. No entanto, esse aumento no comprimento do eletrodo irá reduzir a resistência de aterramento e isso pode levar um erro na análise da qualidade do aterramento quando a impedância impulsiva é estimada diretamente a partir do coeficiente impulsivo. Por essa razão, um valor reduzido de resistência em baixa frequência não corresponde a um valor de impedância impulsiva reduzida (VISACRO, 2007a).

2.3.6 EFEITO DA INTENSIDADE DA CORRENTE

O solo apresenta comportamento linear. Isso significa que a tensão aplicada e a corrente resultante no solo são constantes. Entretanto, dependendo da intensidade do sinal de corrente injetado nos eletrodos de aterramento, o campo elétrico estabelecido em torno desses eletrodos, pode ultrapassar seu valor crítico e romper a rigidez dielétrica desse meio, sendo assim, o solo apresenta um comportamento não linear, apresentando descargas elétricas do eletrodo para o solo. Valores entre 300 a 1000 kV/m, são tipicamente adotado como campo elétrico crítico na literatura (Grcev *et al.*, 2005). Em termos práticos, a ocorrência do fenômeno de ionização se traduz na redução da impedância de aterramento (TELLÓ, 2007).

2.3.7 DEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS DO SOLO COM A FREQUÊNCIA

Para determinar o desempenho de aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas, é necessário obter a resposta do aterramento elétrico para frequências elevadas. Nessa situação, os parâmetros eletromagnéticos do solo, resistividade e

permissividade, são dependentes com a frequência do sinal solicitante, influenciando significativamente a resposta transitória do aterramento elétrico (VISACRO, 2007a).

A origem física da dependência dos parâmetros elétricos, resistividade e permissividade, estão relacionadas aos processos de polarização e perdas associadas que ocorrem no meio. Entende-se por polarização um deslocamento reversível dos centros das 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.

Quando o solo é submetido a campos eletromagnéticos variantes no tempo, a densidade de corrente resultante total no mesmo é quantificada pela quarta equação de Maxwell (Sadiku, 2010):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \varepsilon \mathbf{E}. \quad (2.7)$$

A condutividade elétrica (σ) fornece uma medida da capacidade do meio de conduzir cargas elétricas e das perdas associadas ao processo de condução. A permissividade (ε) fornece uma medida da capacidade do meio de se polarizar sob a ação de um campo elétrico e da energia armazenada associada ao processo de polarização. Enquanto a condutividade é um número real, a permissividade é um número complexo:

$$\varepsilon = \varepsilon_{real} - j\varepsilon_{imag}. \quad (2.8)$$

A componente real da permissividade (ε_{real}) fornece uma medida do grau da polarização do material. Enquanto a componente imaginária ($j\varepsilon_{imag}$) fornece uma medida das perdas que ocorrem durante o processo de polarização (Sadiku, 2010).

Substituindo a Equação (2.8) na Equação (2.7) temos:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left((\sigma + \omega \varepsilon_{imag}) + j\omega \varepsilon_{real} \right) \mathbf{E}. \quad (2.9)$$

A análise da Equação (2.9) nos mostra que a condutividade efetiva do solo ($\sigma_e = \sigma + \omega \varepsilon_{imag}$), é constituída da condutividade em baixa frequência do meio (σ) 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.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

GONOS *et al.* (1999) realizaram estudos experimentais em malhas de aterramento triangulares submetidas a correntes impulsivas de 8/20 μ s e intensidade de 3 kA. Os autores apresentaram uma correlação entre a impedância impulsiva e a resistência em baixa frequência, apresentando um comportamento linear entre essas duas grandezas. Também foi mostrado pelos autores que o pico da impedância transitória ocorre em 0,2 μ s e atinge seu valor mínimo em 0,3 μ s. No entanto, a curva de impedância transitória aumentou com o tempo, apresentando valores superiores à resistência em baixa frequência. Segundo TELLÓ (2007) a impedância transitória, pode aumentar ou diminuir, ao longo do tempo, dependendo das características do solo, da configuração do aterramento elétrico, entre outros fatores.

CHOI *et al.* (2002) determinaram o módulo e fase da impedância harmônica de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas, entre as frequências de 0,1 Hz a 1MHz. Os resultados mostraram o caráter indutivo da malha de aterramento ensaiada e a redução do módulo no espectro de frequência.

TOSEVA *et al.* (2003) simularam um condutor horizontal de 100 m enterrado no solo submetido a correntes impulsivas. Os autores verificaram que o perfil de distribuição de corrente ao longo do eletrodo tem dependência significativa com o coeficiente de reflexão das camadas e a profundidade da camada do solo. Os resultados mostraram que para frequências abaixo de 1 kHz, o perfil da distribuição de corrente tem comportamento quase estático. No intervalo de frequências entre 10 kHz a 100 kHz, foi observado que quanto maior a frequência da corrente injetada no eletrodo de aterramento, o comprimento efetivo desse eletrodo é menor.

LIU *et al.* (2003) realizaram estudos para avaliar o fenômeno da ionização do solo em aterramentos elétricos. Foram injetadas correntes impulsivas, variando a intensidade da corrente impulsiva injetada, em diferentes eletrodos enterrados em solos de resistividade que variaram de até 827 $\Omega \cdot m$. Nos estudos, foi verificado que, na área da ionização do solo, o mesmo teve sua resistividade reduzida desde 1,7% a 47% da resistividade do solo original (baixa frequência).

IDRIS *et al.* (2005) realizaram estudos experimentais em uma malha real de subestação e estação de telecomunicações sob condições impulsivas. Os autores

analisaram a influência da distância do objeto de teste ao terra remoto nas medições de tensão e corrente impulsiva. No estudo, a malha de aterramento apresentou comportamento capacitivo quando o objeto de teste estava a uma distância de 5 m do terra remoto e distâncias superiores a 40 m entre objeto de teste e terra remoto, a malha de aterramento apresentou comportamento indutivo.

HABJANIC *et al.* (2006) simularam transitórios eletromagnéticos em aterramentos elétricos, no instante de um curto-circuito, contemplando o fenômeno da ionização do solo. O campo elétrico crítico do solo, considerado nas simulações, foi de 350 kV/m. Eles realizaram simulações em uma haste vertical enterrada e numa malha de terra horizontalmente enterrada. As correntes injetadas variaram de 5,2 kA a 30,8 kA. Como era esperado, os potenciais, na superfície do solo, diminuí significativamente quando ocorre a ionização do solo. A redução, nos potenciais na superfície do solo, justifica a necessidade de incluir na simulação o efeito da ionização do solo, para o caso de correntes de alta intensidade.

POLJAK *et al.* (2007) simularam um eletrodo horizontal de aterramento enterrado no solo submetido a uma corrente impulsiva. Os autores calcularam a impedância de aterramento no domínio do tempo empregando o método de elementos de fronteira, solucionando as equações pelo método de Galerkin. A resposta no domínio da frequência foi obtida a partir da transformada rápida de Fourier.

VISACRO *et al.* (2007b) realizaram estudos experimentais sobre o comportamento de hastes de aterramento enterrados em solos de alta resistividade e baixa resistividade. Os autores utilizaram a Transformada rápida de Fourier para transformar os sinais medidos no domínio do tempo, para o domínio da frequência. Os resultados mostraram que em baixa frequência, os efeitos reativos são desprezíveis e o módulo da impedância harmônica tende à resistência em baixa frequência. Para solos com baixa resistividade, o módulo e fase da impedância harmônica crescem com o aumento da frequência, evidenciando um comportamento indutivo. Para solos com alta resistividade, o módulo e fase da impedância harmônica diminuem com o aumento da frequência, evidenciando um comportamento capacitivo.

ALÍPIO *et al.* (2008) pesquisaram a influência do comprimento do eletrodo de aterramento no coeficiente impulsivo. A partir de resultados experimentais, eles mostraram que para eletrodos menores que seu comprimento efetivo, o coeficiente impulsivo é menor que 1. Para eletrodos maiores que seu comprimento efetivo, o

coeficiente impulsivo é maior que 1, pois a impedância impulsiva é maior que a resistência em baixa frequência.

ROSADO (2008) realizaram ensaios experimentais em eletrodos de aterramento submetidos a correntes impulsivas com tempo de frente variando de 10 μ s a 0,4 μ s e tempo de cauda em torno de 60 μ s. Foi verificado que para eletrodos curtos, o valor de sua impedância impulsiva é menor do que sua resistência em baixa frequência para eletrodos maiores que seu comprimento efetivo. Os autores também observaram que para solos de alta resistividade, a corrente injetada é adiantada em relação a tensão desenvolvida nos eletrodos, prevalecendo o efeito capacitivo do solo. Para eletrodos longos enterrados em solos de baixa resistividade, o comportamento é predominantemente capacitivo para correntes de excitação com tempo de frente superior a 3,5 μ s e para correntes de excitação inferiores a este tempo de frente, o eletrodo apresenta comportamento predominantemente indutivo. A conclusão que os autores chegaram é que o comportamento da impedância de aterramento depende da forma de onda da corrente injetada, do comprimento dos eletrodos e da resistividade do solo.

ARAÚJO *et al.* (2010) realizaram ensaios de impulso de corrente em aterramentos elétricos compostos por uma haste e por quatro hastes interconectadas formando um quadrado. Os autores mostraram que devido à heterogeneidade do solo, os potenciais medidos em pontos distintos do solo apresentaram diferentes níveis de tensão, evidenciando que as ondas de tensão e corrente não se propagam de forma uniforme por solos que apresentam camadas com diferentes resistividades e espessuras.

VISACRO (2011) realizou testes experimentais em uma malha de terra avaliando sua elevação de potencial no domínio do tempo e impedância impulsiva para correntes impulsivas com tempos de frente abaixo de 10 μ s e baixas amplitudes. As correntes impulsivas foram injetadas em pontos diferentes, verificando impedâncias impulsivas distintas para cada ponto da malha de terra. Ele verificou que a magnitude da impedância impulsiva tem seu valor aumentado com a redução do tempo de frente da onda impulsiva. Outro resultado diz respeito a variação da impedância impulsiva em relação ao lugar geométrico que é injetada a corrente impulsiva.

GUIMARÃES *et al.* (2012) realizaram estudos de uma malha de aterramento submetidas a correntes impulsivas, enterradas num solo homogêneo de resistividade de 160 $\Omega \cdot m$. A corrente impulsiva foi injetada em diferentes pontos da malha de aterramento, verificando valores distintos para a impedância impulsiva. Os autores observaram que a impedância impulsiva varia de acordo com o local da injeção de

corrente. No mesmo estudo, os resultados experimentais foram comparados com os resultados simulados, verificando que a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, não tem influência significativa na amplitude e forma de onda da elevação de potencial em relação ao terra remoto, devido à baixa resistividade do solo. Também foi observado que o pico do módulo e fase da impedância harmônica acontece aproximadamente em 2 MHz.

ALÍPIO *et al.* (2012) realizaram estudos sobre a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência em aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas. Os autores concluíram que, a hipótese dos parâmetros elétricos do solo ser constantes com a frequência, leva a erros significativos quando compara-se os resultados obtidos em simulações com os experimentais. Em relação aos valores de tais parâmetros, a variação da resistividade no domínio da frequência mostrou-se muito dependente do valor de resistividade do solo em baixas frequências. Esses dados experimentais obtidos pelos autores indicam a ocorrência de uma redução na resistividade com o aumento da frequência do sinal solicitante. A redução é mais pronunciada para uma faixa de frequência entre 100 Hz e 1 MHz. A redução da resistividade pode ser de 20% em solos de baixa resistividade (entre 60 e 150 Ωm) e de 80% em solos de alta resistividade (entre 2 e 9 $\text{k}\Omega\text{m}$). Os autores também observaram uma redução nos valores da permissividade com o aumento da frequência do sinal solicitante. De acordo com os resultados, há uma dispersão muito grande nos valores de permissividade relativa, quando é considerado vários tipos de solo.

AKBARI *et al.* (2013) analisaram o comportamento de aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas. As equações de Maxwell, no domínio do tempo, foram solucionadas utilizando o método dos elementos finitos. No estudo, as dependências da condutividade e permissividade do solo em relação frequência é representada utilizando fórmulas analíticas desenvolvida por ALÍPIO *et al.* (2012). Os resultados evidenciaram que a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência é mais pronunciada em aterramentos elétricos enterrados em solos de alta resistividade. Também foi observado que o módulo e fase da impedância harmônica, em relação a frequência, são inversamente proporcional com a resistividade do solo.

CASTRO *et al.* (2014) realizaram uma avaliação experimental do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de uma haste de aterramento enterrada no solo, submetida a correntes impulsivas, em relação à amplitude da corrente injetada no solo, como também, do tempo de frente e cauda do

sinal de corrente aplicado. Foi observado que a impedância impulsiva apresentou variação desprezível quando se manteve a forma de onda do sinal de corrente aplicado no solo e variou-se a sua amplitude. Eles observaram também que a impedância impulsiva varia quando o tempo de frente do sinal aplicado no solo é modificado, atingindo seu maior valor para correntes impulsivas mais rápidas.

SILVEIRA *et al.* (2014) realizaram estudos simulando a aplicação de correntes de descargas atmosféricas em cabos de linhas de transmissão e analisando as sobretensões provocadas. Foi considerada a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência. Nesse trabalho são analisados os efeitos da dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência que contribui para a redução das tensões induzidas. No entanto, a redução se torna mais evidente para solos com resistividade em baixa frequência.

CAVKA *et al.* (2014) apresentaram uma avaliação dos diferentes modelos que representam a dependência dos parâmetros elétricos do solo com o espectro de frequência. Os modelos são expressões para a condutividade do solo e permissividade relativa, que são baseados em dados experimentais. Foi mostrado também que os modelos de solo de Scott, Smith-Longmire, Messier e Visacro-Alipio obtiveram resultados globais semelhantes, que estão em acordo com os resultados experimentais. As diferenças entre os modelos são encontrados para altas frequências e para solos de baixa resistividade.

GONÇALVES (2015) realizou um estudo experimental para a análise do comportamento da impedância impulsiva em uma haste cilíndrica enterrada em solo de baixa resistividade. Foram aplicados na haste de aterramento impulsos de corrente elétrica com diferentes tempos de frente e amplitudes. O autor avaliou a impedância impulsiva em relação à intensidade da corrente injetada, como também de sua forma de onda. Os resultados mostraram que quando se aumenta a intensidade da corrente injetada, a impedância impulsiva torna-se cada vez menor, evidenciando o efeito da ionização do solo. Também foi mostrado pelo autor que a impedância impulsiva variou inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente aplicado.

As Tabelas 3.1 e 3.2 ilustram os principais trabalhos no que concerne aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas.

Tabela 3.1 - Resumo da pesquisa realizada sobre sistemas de aterramento.

Pesquisadores	Estudos realizados
GONOS <i>et al.</i> (1999)	Realizaram estudos experimentais em malhas de aterramento triangulares submetida a correntes impulsivas de 8/20 μ s e intensidade de 3 kA.
CHOI <i>et al.</i> (2002)	Determinaram o módulo e fase da impedância harmônica de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas entre as frequências de 0,1 a 1 MHz.
TOSEVA <i>et al.</i> (2003)	Simularam um condutor horizontal de 100 m enterrado no solo submetido a correntes impulsivas.
LIU <i>et al.</i> (2003)	Realizaram estudos para avaliar o fenômeno da ionização do solo em sistemas de aterramento.
IDRIS <i>et al.</i> (2005)	Realizaram estudos experimentais em uma malha real de subestação e estação de telecomunicações sob condições impulsivas.
HABJANIC <i>et al.</i> (2006)	Simularam transitórios eletromagnéticos em sistemas de aterramento, no instante de um curto-circuito, contemplando o fenômeno da ionização do solo.
POLJAK <i>et al.</i> (2007)	Simularam um eletrodo horizontal de aterramento enterrado no solo submetida a uma corrente impulsiva. A resposta no domínio da frequência foi obtida a partir da transformada rápida de Fourier.
VISACRO <i>et al.</i> (2007b)	Avaliaram a resposta de um eletrodo de aterramento submetido a correntes impulsivas no domínio da frequência. Os resultados mostraram que para solo de baixa resistividade, o módulo e fase da impedância harmônica aumenta com o tempo, evidenciando um comportamento indutivo.

Tabela 3.2 – Continuação: Resumo da pesquisa realizada sobre sistemas de aterramento.

ALÍPIO <i>et al.</i> (2008)	Pesquisaram a influência do comprimento do eletrodo de aterramento no coeficiente impulsivo.
ROSADO (2008)	Realizou ensaios experimentais em configurações de eletrodos enterrados em solos de baixa e alta resistividade submetida a correntes impulsivas.
ARAÚJO <i>et al.</i> (2010)	Realizaram ensaios de impulso de corrente em sistemas de aterramento compostos por uma haste e por quatro hastes interconectadas formando um quadrado.
GUIMARÃES <i>et al.</i> (2012)	Realizaram estudos de uma malha de aterramento submetidos a correntes impulsivas, enterradas num solo homogêneo de resistividade de $160 \Omega \cdot m$.
ALÍPIO <i>et al.</i> (2012a)	Realizaram estudos sobre a dependência dos parâmetros elétricos do solo com a frequência em sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas.
AKBARI <i>et al.</i> (2013)	Analysaram o comportamento de sistemas de aterramento submetidos a corrente impulsivas.
CASTRO <i>et al.</i> (2014)	Realizaram uma avaliação experimental do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de uma haste de aterramento enterrada no solo submetida a correntes impulsivas.
SILVEIRA <i>et al.</i> (2014)	Realizaram estudos simulando a aplicação de correntes de descargas atmosféricas em cabos de linhas de transmissão e analisando as sobretensões provocadas.
CAVKA <i>et al.</i> (2014)	Apresentaram uma avaliação dos diferentes modelos que representa a dependência dos parâmetros elétricos do solo, com o espectro de frequência.
GONÇALVES (2015)	Realizou um estudo experimental para a análise do comportamento da impedância impulsiva e uma haste de aterramento.

Na revisão bibliográfica verifica-se que, nenhum dos trabalhos analisados não contempla a avaliação de malhas de aterramento, típicas de subestações de distribuição, submetidas a corrente impulsivas de alta intensidade. Esse estudo é importante para

verificar a influencia do fenômeno da ionização do solo na resposta transitória de malhas de aterramento em alta frequência.

Nesse capítulo foram apresentados trabalhos relevantes no que concernem aterramentos elétricos submetidos a correntes impulsivas. No próximo capítulo serão descritos os materiais e métodos empregados nos ensaios experimentais em laboratório utilizados para avaliar a resposta de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas de alta intensidade com tempos de frente distintos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

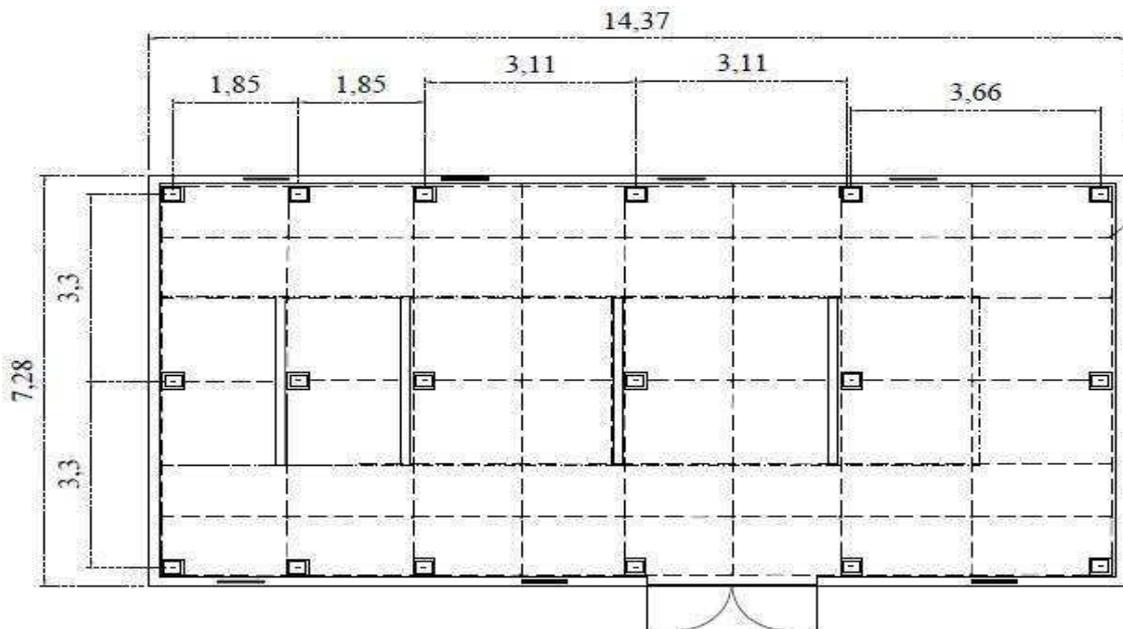
Nesse capítulo, são descritos os materiais e métodos empregados nos ensaios experimentais em laboratório.

4.1 MATERIAL

Objetivando-se analisar a resposta de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas, foi construída uma malha de aterramento nas proximidades do Laboratório de Alta Tensão, localizado na cidade de Campina Grande – PB.

A malha de aterramento sob teste, ilustrada na Figura 4.1, é constituída de 18 hastes verticais de aço revestidas por cobre, com 3 m de comprimento e 12,2 mm de diâmetro, interligadas por cabos de cobre nu com 50 mm^2 de seção transversal, por meio de soldas exotérmicas.

Figura 4.1 - Malha de aterramento sob teste.



4.2 MÉTODOS

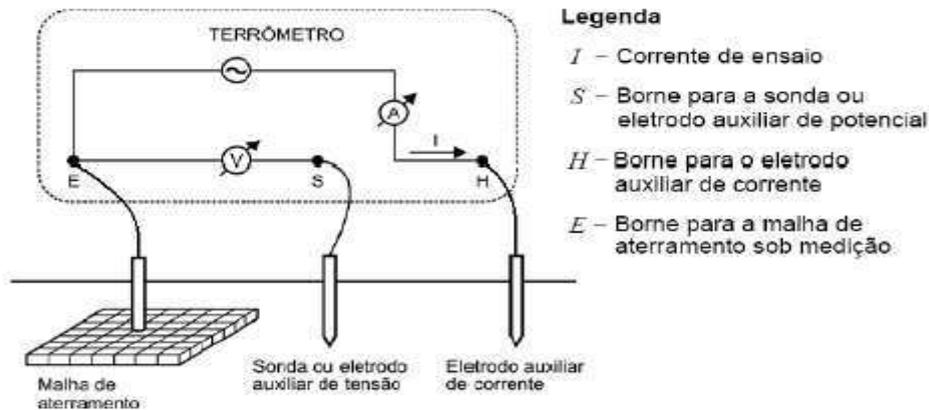
A metodologia adotada para avaliar o transitório de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas é mostrada nas próximas subseções. Inicialmente, foram determinadas a resistência de aterramento em baixa e a resistividade aparente do solo. Em seguida, foi utilizado um gerador de impulso de correntes, aplicando-se na malha de aterramento sob teste impulsos de corrente de alta intensidade com tempos de frente distintos. Para aquisição dos sinais da corrente impulsiva injetada e da tensão estabelecida no eletrodo de injeção de corrente, foram utilizados dois osciloscópios digitais. Os sinais de corrente e tensão, obtidos nas medições, foram processados a partir de uma rotina computacional na plataforma Matlab®, com isso, foram determinados os sinais de corrente e tensão, a impedância transitória, impedância impulsiva e impedância harmônica (módulo e fase).

4.2.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Para a medição da resistência de aterramento da malha de aterramento sob teste, foi utilizado o método da queda de potencial. Esse método consiste em fazer circular uma corrente através do aterramento elétrico sob teste por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre o aterramento e o terminal de referência por meio de um eletrodo auxiliar de potencial, ou seja, a resistência de aterramento é definida pela relação entre a elevação de potencial e corrente injetada.

No processo de medição, o eletrodo auxiliar de tensão deve ser deslocado ao longo de uma direção predefinida, a partir da periferia do aterramento elétrico sob teste, em intervalos regulares. Este processo está ilustrado na Figura 4.2 (NBR 15749, 2009).

Figura 4.2 - Esquema para medição da resistência de aterramento.
 Fonte: NBR 15749 (2009).



Realizando-se o procedimento ilustrado na Figura 4.2, obtém-se uma curva da resistência do aterramento elétrico em função da distância entre o aterramento elétrico e o eletrodo auxiliar de tensão. Segundo a NBR 15749 (2009), a resistência do aterramento elétrico sob teste está localizada na região do gráfico em que não há variações significativas da resistência medida entre distâncias consecutivas.

A resistividade (ρ_a) do solo (baixa frequência) foi estimada a partir da resistência (R) de aterramento da malha, utilizando-se a Equação (4.1) (NBR 15751, 2009).

$$R = \rho_a \left\{ \left(\frac{1}{L_t} \right) + \left(\frac{1}{\sqrt{20xA}} \right) \times \left[1 + \left(\frac{1}{1 + H\sqrt{20xA}} \right) \right] \right\} \quad (4.1)$$

sendo:

L_t : Comprimento total dos condutores enterrados, expresso em metros (m);

H : Profundidade da malha, expressa em metros (m);

A : Área ocupada pela malha, expressa em metros quadrados (m²).

4.2.2 ENSAIOS EXPERIMENTAIS COM IMPULSO DE CORRENTE

Impulsos de corrente elétrica de alta intensidade foram injetados na malha de aterramento sob teste, no intuito de verificar a qualidade desse aterramento em alta frequência. Para tanto, um gerador de impulso de corrente elétrica de 80 kJ/100 kV, de 8 estágios, fabricado pela Haefely, pertencente ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) foi utilizado. A Figura 4.3 (a) ilustra

uma fotografia do gerador de impulso e na Figura 4.3 (b) uma fotografia de sua mesa de controle.

Figura 4.3 – Fotografias: (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.



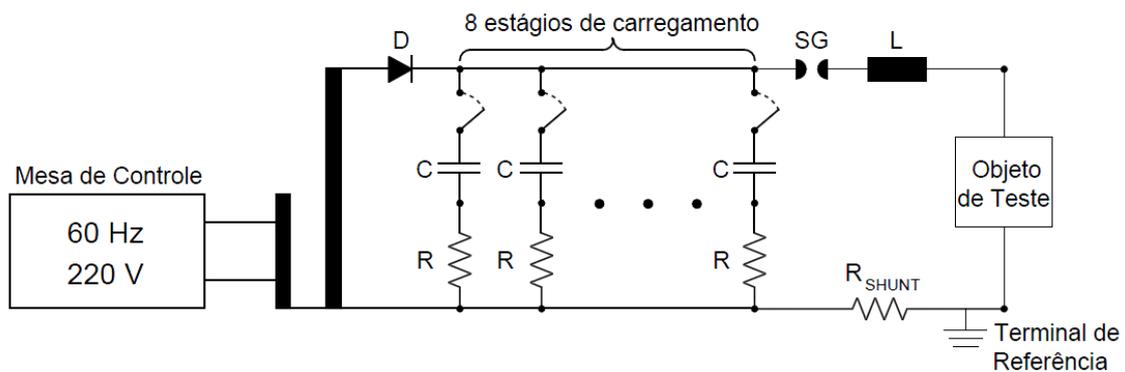
(a)

(b)

O gerador é formado por 8 (oito) estágios com carregamento em paralelo. Cada estágio é composto por 01 (um) capacitor e 01 (uma) resistência conectados a 01 (uma) indutância, em comum. A partir do número de estágios interligados, obtém-se formas de onda de corrente distintas. Nessa pesquisa, foi utilizado quatro configurações distintas do gerador de impulso, permitindo a obtenção de quatro sinais de correntes impulsivas com tempos de frente diferentes.

Como fonte de excitação, o gerador de impulso utiliza a rede elétrica fornecida pela concessionária local. O circuito elétrico do gerador de impulso está ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Circuito elétrico do gerador de impulso [MODRUSAN].

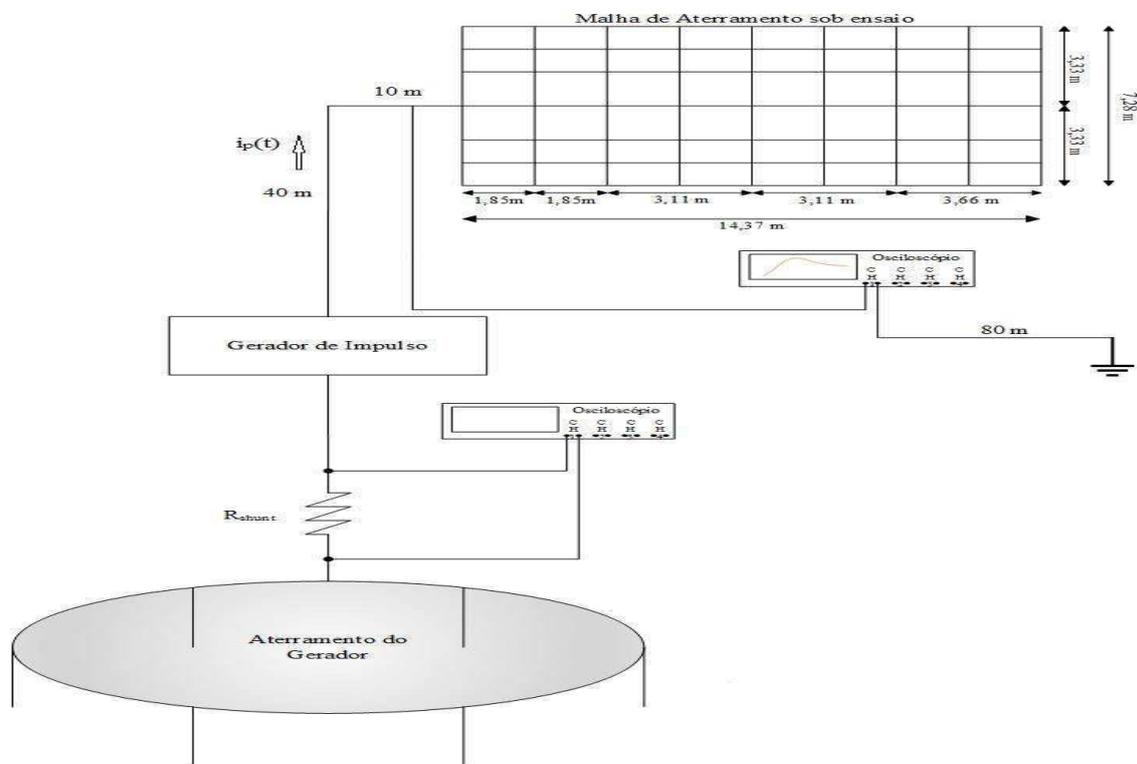


Uma mesa de controle foi utilizada para viabilizar o carregamento e descarregamento dos capacitores de forma controlada. O controle do descarregamento dos capacitores foi feito por centelhadores tipo esfera (*spark-gap*). Inicialmente, as

esferas ou centelhadores são afastadas para uma distância segura, garantindo que não haja descargas antes do programado. Então, deve-se carregar os capacitores com a tensão desejada e, a partir da aproximação dos centelhadores, ocorre a injeção da corrente impulsiva $i_p(t)$ em direção a malha de aterramento sob teste. Nessa pesquisa, utiliza-se tensões de carregamento dos capacitores de 15 kV, 20 kV e 25 kV, resultando em três amplitudes distintas da correntes impulsivas $i_p(t)$ injetada, denominadas $i_{p1}(t)$, $i_{p2}(t)$ e $i_{p3}(t)$.

O circuito elétrico utilizado nos ensaios experimentais está ilustrado na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Circuito elétrico do gerador de impulso.



A saída do gerador de impulso está conectada à malha de aterramento por meio de um cabo coaxial, por onde circula o sinal de corrente impulsivo $i_p(t)$. O ângulo entre os condutores do gerador de impulso e a malha de aterramento sob teste é de 90° , com isso, tensões induzidas devido à variação de fluxo magnético são reduzidas. Para evitar reflexões sucessivas entre a malha de aterramento sob teste e o condutor do gerador de impulso, o comprimento do mesmo é de 50 m. Também foi utilizado uma haste auxiliar de 1 metro de comprimento posicionada a 80 metros de distância da malha de aterramento sob teste. A sua função é o estabelecimento de uma referência de potencial.

Foram realizadas medições sucessivas deslocando a haste de referência e essa distância foi determinada a partir da qual não havia mais diferença no valor de tensão medido.

Para aquisição dos sinais da corrente impulsiva $i_p(t)$ injetada e a tensão $v(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente, foram utilizados dois osciloscópios digitais Tektronix. O sinal da tensão $v(t)$, em relação ao terra remoto, foi adquirido diretamente na haste de injeção de corrente da malha de aterramento sob teste. Uma ponta de prova com atenuação de 30 db e tensão suportável de 40 kV, sob impulso, foi utilizada. A determinação da corrente impulsiva $i_p(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste foi medida de forma indireta, utilizando um resistor de baixa resistência e alta precisão, denominado resistor shunt (R_{SHUNT}), em série com o circuito e com valor de 10,54 m Ω . A partir do conhecimento do valor de R_{SHUNT} e da tensão estabelecida no mesmo devido a corrente impulsiva $i_p(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste, determina-se o valor dessa corrente.

Os sinais de corrente impulsiva $i_p(t)$ e tensão $v(t)$, obtidos nas medições, foram processados a partir de uma rotina computacional na plataforma Matlab®. Após esse processamento, foram determinados os tempos de frente e cauda dos sinais de corrente e tensão, como também a impedância transitória e impedância impulsiva da malha de aterramento sob teste. Aplicando a transformada rápida de Fourier nos sinais de corrente $i_p(t)$ e tensão $v(t)$, foram determinados os sinais de corrente e tensão no domínio da frequência, $I_p(w)$ e $V(w)$, respectivamente.

Nesse capítulo foram descritos os materiais e métodos utilizados para avaliar o transitório de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas de alta intensidade com tempos de frente e cauda distintos. No próximo serão apresentados os resultados obtidos utilizando as etapas descritas nesse capítulo.

5 RESULTADOS E ANÁLISE DE RESULTADOS

Objetivando-se avaliar a resposta transitória de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas de alta intensidade, os ensaios experimentais descritos na seção 4.2 foram realizados.

Os resultados das medições correspondem à resposta transitória da malha de aterramento sob teste, indicada na Figura 4.1, para injeção de correntes impulsivas. Os sinais adquiridos apresentavam-se ruidosos, necessitando da aplicação de filtro.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura média de 30 °C e umidade relativa do ar de 42%.

5.1 RESISTÊNCIA EM BAIXA FREQUÊNCIA

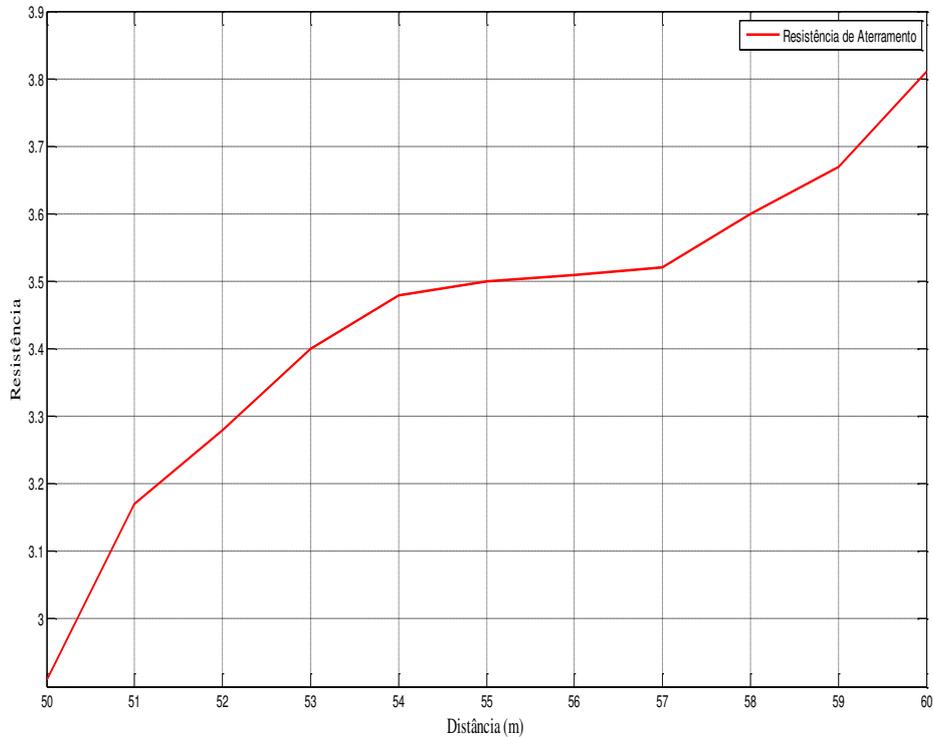
Nesta seção são apresentados os resultados e análises da medição da resistência de aterramento em baixa frequência a partir de gráficos e tabelas. Os valores das resistências medidos pelo terrômetro em função da distância entre o eletrodo auxiliar de tensão e a malha de aterramento sob teste estão ilustrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Resistência em função da distância.

Distância (m)	Resistência (Ω)
50	2,91
51	3,17
52	3,28
53	3,40
54	3,48
55	3,50
56	3,51
57	3,52
58	3,60
59	3,67
60	3,81

A resistência da malha de aterramento sob teste em função da distância esta ilustrada na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Resistência em função da distância.



Observando-se a Figura 5.1, verifica-se que a região do gráfico em que não há variações significativas na resistência, entre distâncias consecutivas, encontra-se entre 54 m e 57 m. A resistência associada a essas medições correspondem a 3,5 Ω .

Utilizando-se a Equação (4.1), determina-se a resistividade aparente do solo $\rho_a = 127,27 \Omega \cdot m$.

5.2 RESPOSTA DA MALHA DE ATERRAMENTO NO DOMÍNIO DO TEMPO

Nesta seção são apresentados os resultados que se referem a resposta da malha de aterramento sob teste, no domínio do tempo.

5.2.1 CONFIGURAÇÃO 1 DO GERADOR DE IMPULSO

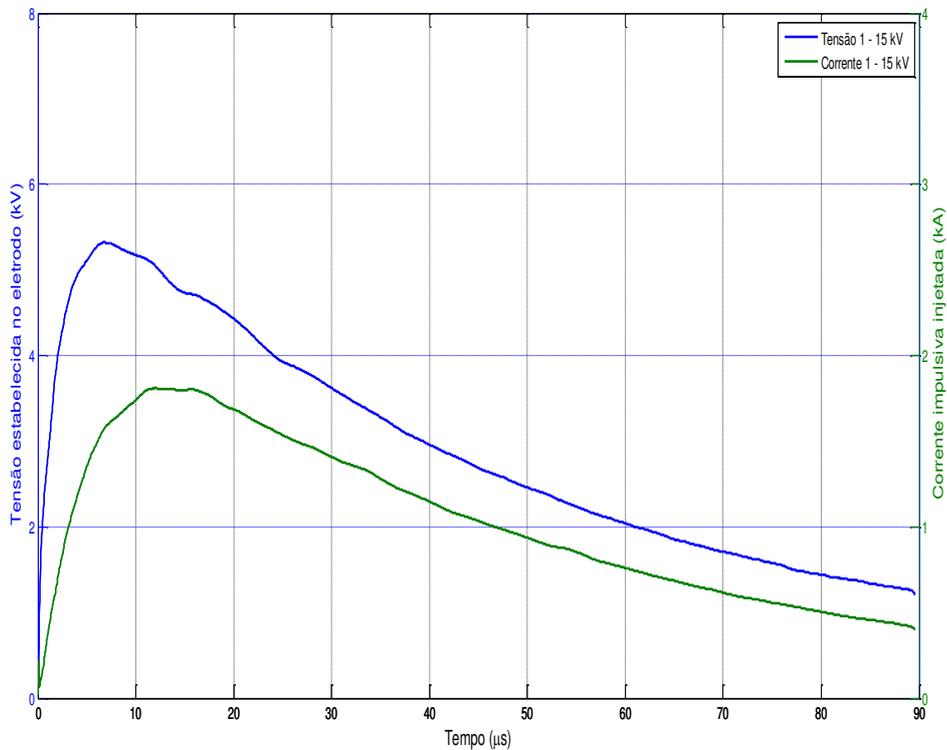
Com o objetivo de reproduzir uma forma de onda característica de uma descarga atmosférica, foi utilizada a configuração do gerador de impulso de corrente mostrada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Configuração 1 do gerador de impulso.

Configuração utilizada	
Número de estágios	3
Resistor	17,5 Ω
Indutor	0,885 μH
Capacitor	2 μF

A corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.2. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 15 kV.

Figura 5.2 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 1 – 15 kV).



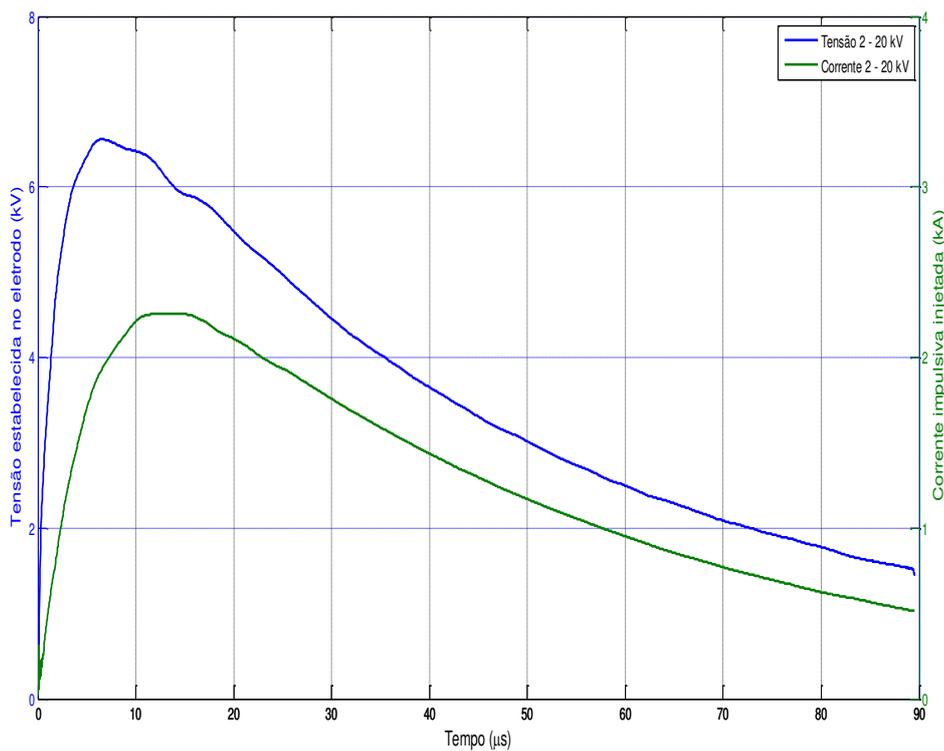
Na Tabela 5.3 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e da tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.3 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 1 – 15 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 1	12,56	51,94	1,81 kA
Tensão 1	6,72	45,03	5,37 kV

A corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.3. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 20 kV.

Figura 5.3 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 1 – 20 kV).



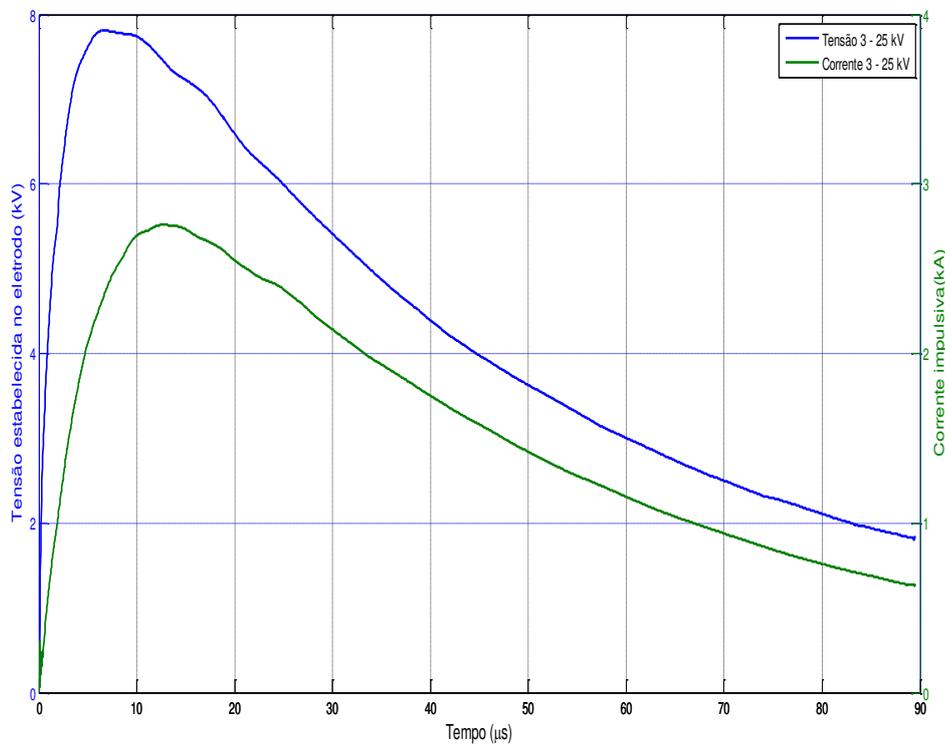
Na Tabela 5.4 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e da tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.4 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 1 – 20 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 2	12,64	51,56	2,27 kA
Tensão 2	6,24	44,33	6,61 kV

A corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.4. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 25 kV.

Figura 5.4 - Sinais de corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 1 – 25 kV).



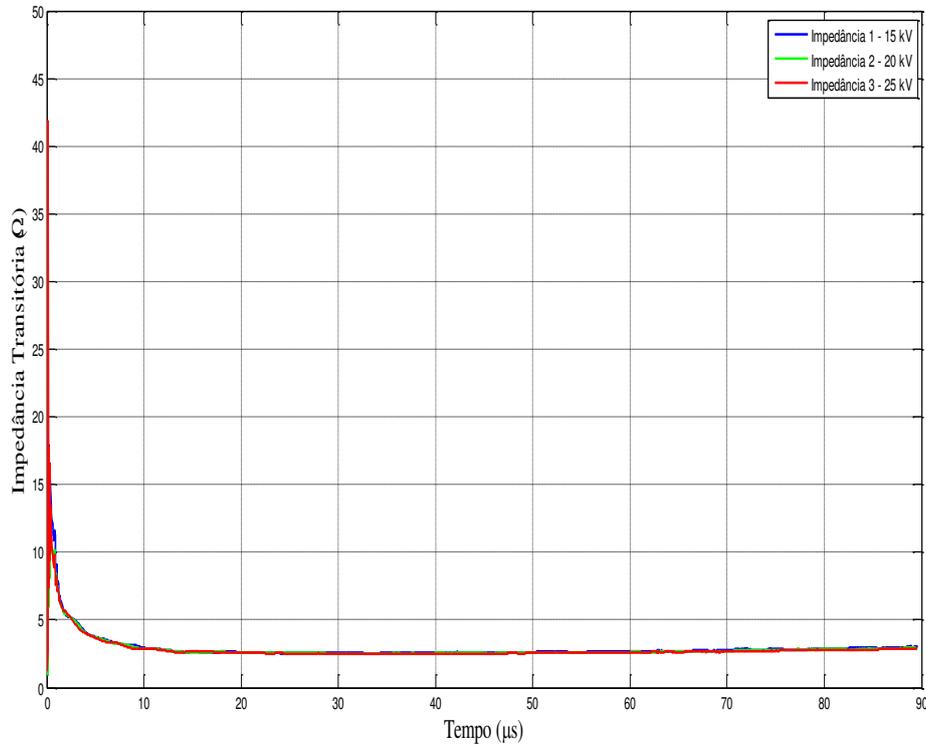
Na Tabela 5.5 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e da tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.5 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 1 – 25 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 3	12,60	50,63	2,81 kA
Tensão 3	6,04	44,33	7,85 kV

Os valores da impedância transitória considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Impedância transitória $z(t)$ em relação a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 1).



Os valores da impedância impulsiva considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Impedância impulsiva em relação a tensão de carregamento dos capacitores (Configuração 1).

Corrente injetada	Z_p (Ω)
Corrente $i_{p1}(t)$ - 15 kV	2,96
Corrente $i_{p2}(t)$ - 20 kV	2,91
Corrente $i_{p3}(t)$ - 25 kV	2,79

5.2.2 CONFIGURAÇÃO 2 DO GERADOR DE IMPULSO

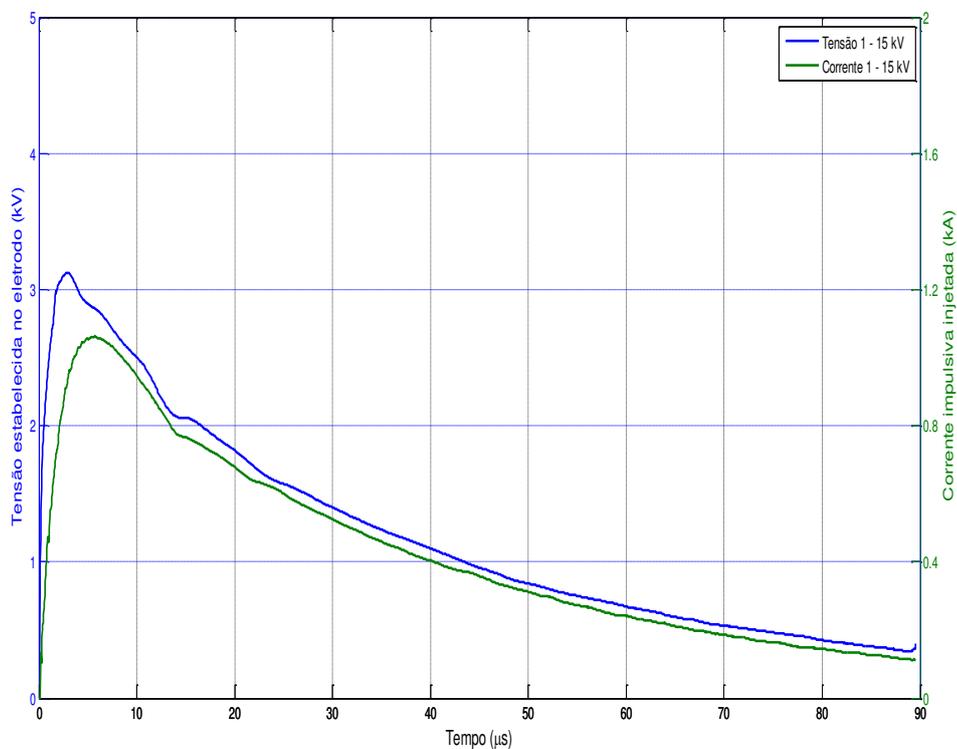
Com o objetivo de reproduzir uma forma de onda característica de uma descarga atmosférica, foi utilizada a configuração do gerador de impulso de corrente mostrada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Configuração 2 do gerador de impulso de corrente.

Configuração utilizada	
Número de estágios	1
Resistor	17,5 Ω
Indutor	0,885 μH
Capacitor	2 μF

A corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.6. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 15 kV.

Figura 5.6 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 2 – 15 kV).



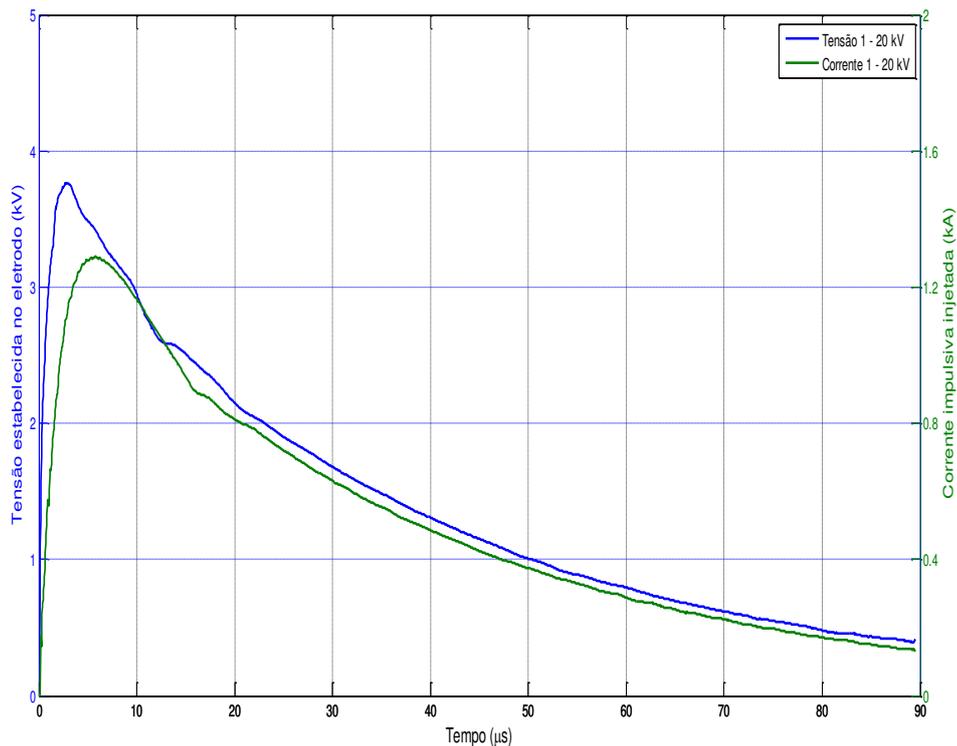
Na Tabela 5.8 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e da tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.8 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 2 – 15 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 1	5,8	29,75	1,06 kA
Tensão 1	2,36	22,38	3,34 kV

A corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.7. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 20 kV.

Figura 5.7 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 2 – 20 kV).



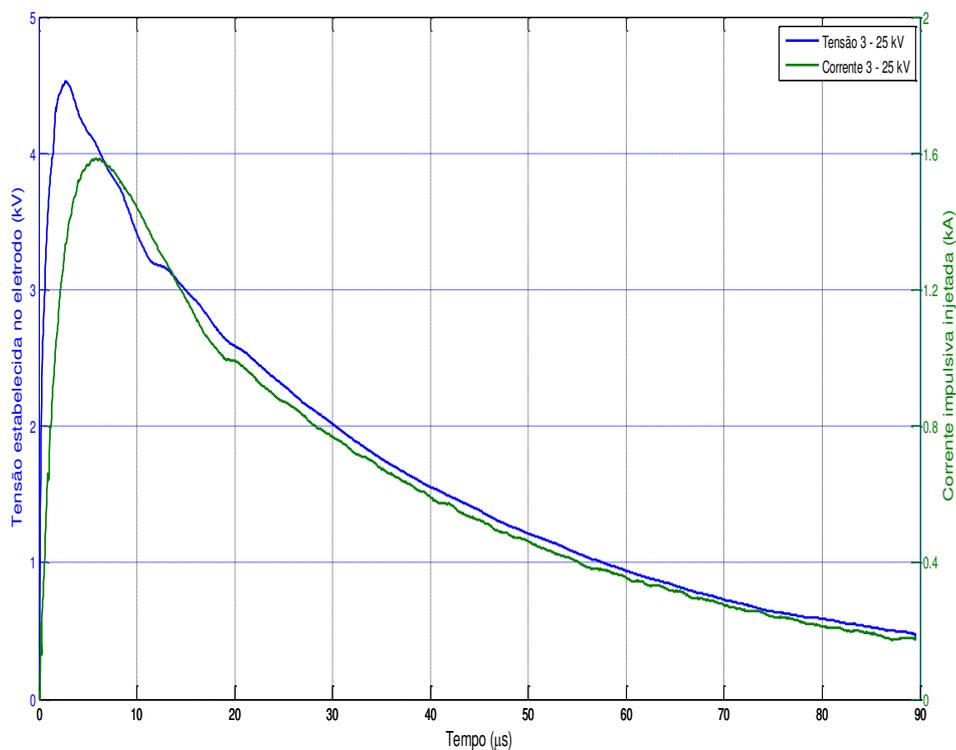
Na Tabela 5.9 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.9 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 2 – 20 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 2	5,8	29,55	1,29 kA
Tensão 2	2,20	23,14	4,01 kV

A corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.8. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 25 kV.

Figura 5.8 - Sinais de corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 2 – 25 kV).



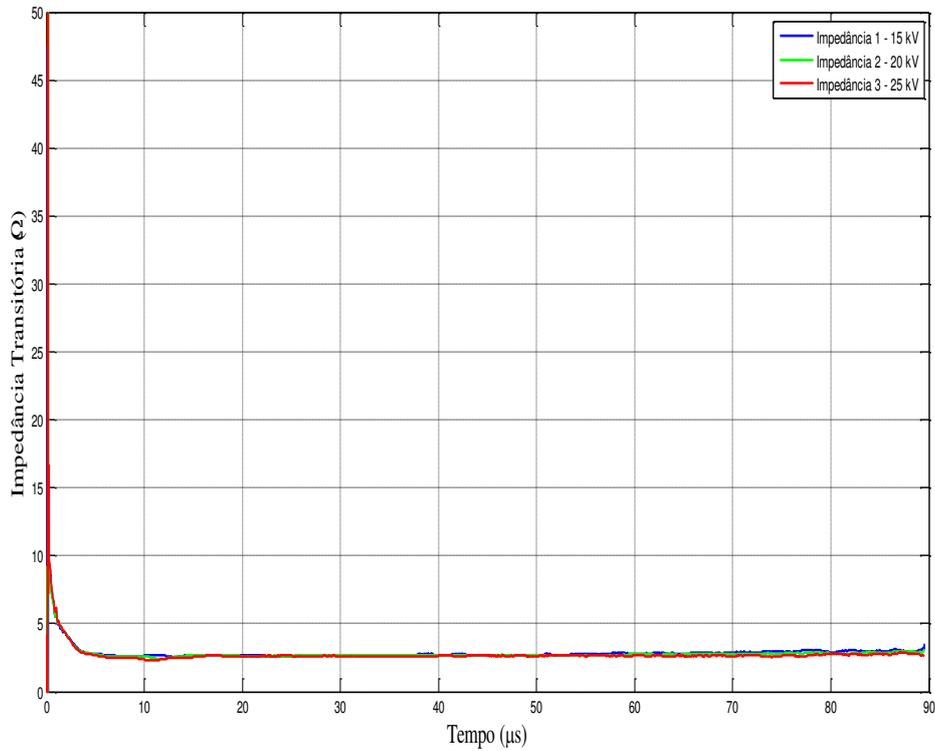
Na Tabela 5.10 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.10 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 2 – 25 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 3	5,8	28,83	1,58 kA
Tensão 3	2,12	22,99	4,82 kV

Os valores da impedância transitória considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Figura 5.9.

Figura 5.9 - Impedância transitória $z(t)$ em função da tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 2).



Os valores da impedância impulsiva considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 - Impedância impulsiva (Configuração 2).

Corrente injetada	Z_P (Ω)
Corrente $i_{p1}(t)$ - 15 kV	3,15
Corrente $i_{p2}(t)$ - 20 kV	3,10
Corrente $i_{p3}(t)$ - 25 kV	3,05

5.2.3 CONFIGURAÇÃO 3 DO GERADOR DE IMPULSO

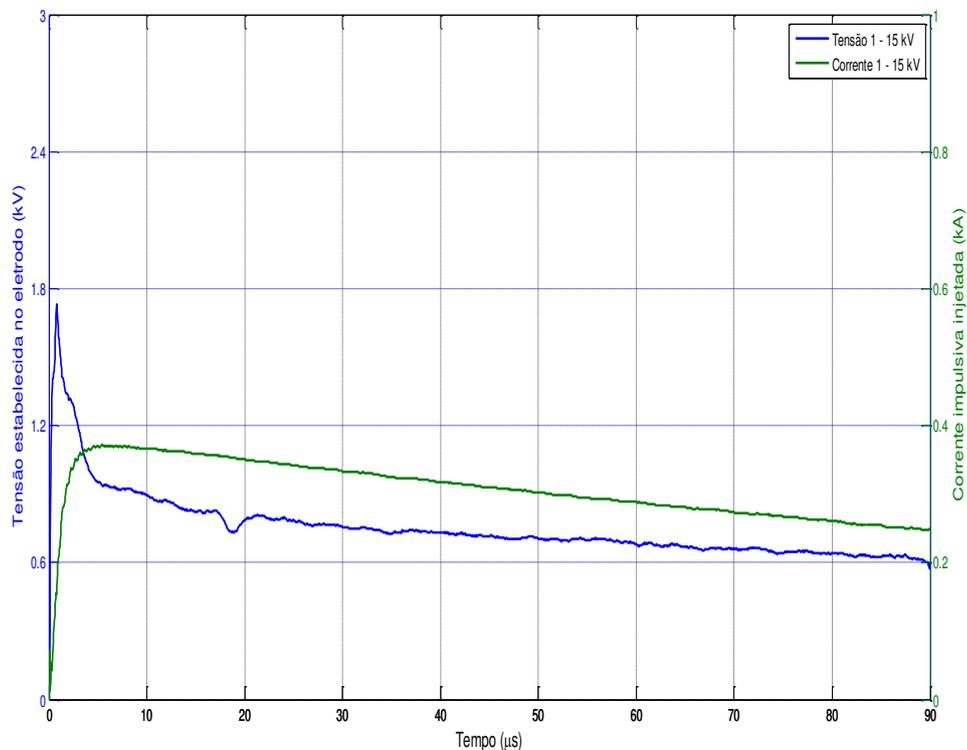
Com o objetivo de reproduzir uma forma de onda característica de uma descarga atmosférica, foi utilizada a configuração do gerador de impulso de corrente mostrada na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Configuração 3 do gerador de impulso de corrente.

Configuração utilizada	
Número de estágios	1
Resistor	5 Ω
Indutor	5,7 μH
Capacitor	2 μF

A corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.10. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 15 kV.

Figura 5.10 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 3 – 15 kV).



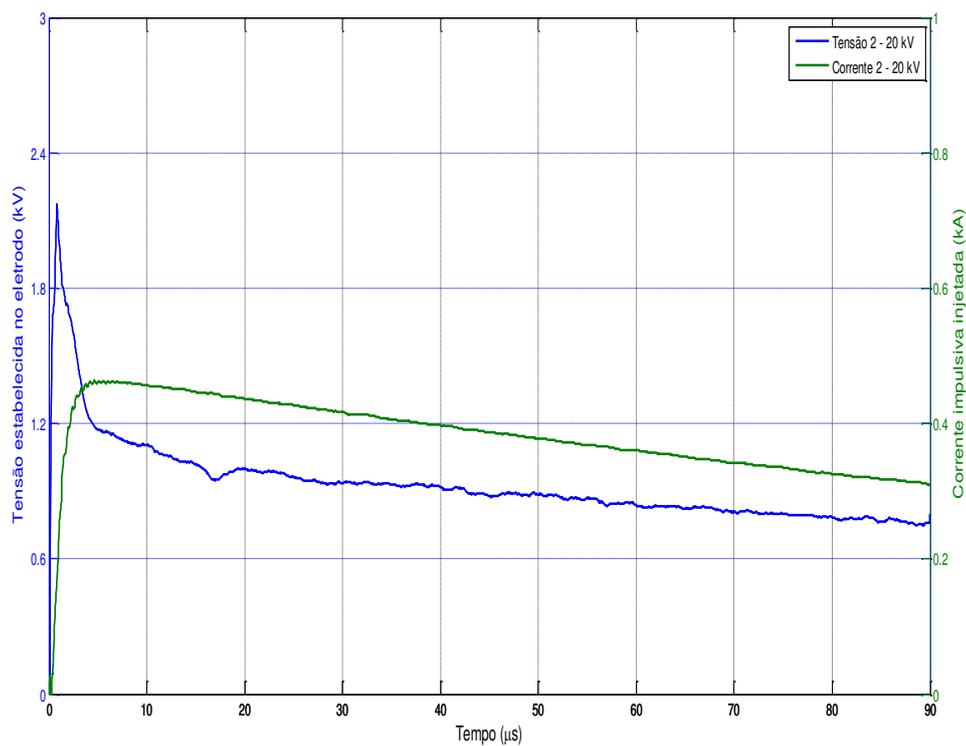
Na Tabela 5.13 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.13 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 3 – 15 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 1	4,56	147,83	0,37 kA
Tensão 1	0,80	22,99	1,73 kV

A corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.11. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 20 kV.

Figura 5.11 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 3 – 20 kV).



Na Tabela 5.14 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.14 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 3 – 20 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 2	4,68	146,15	0,46 kA
Tensão 2	0,84	10,78	2,17 kV

A corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.12. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 25 kV.

Figura 5.12 - Corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 3 – 25 kV).

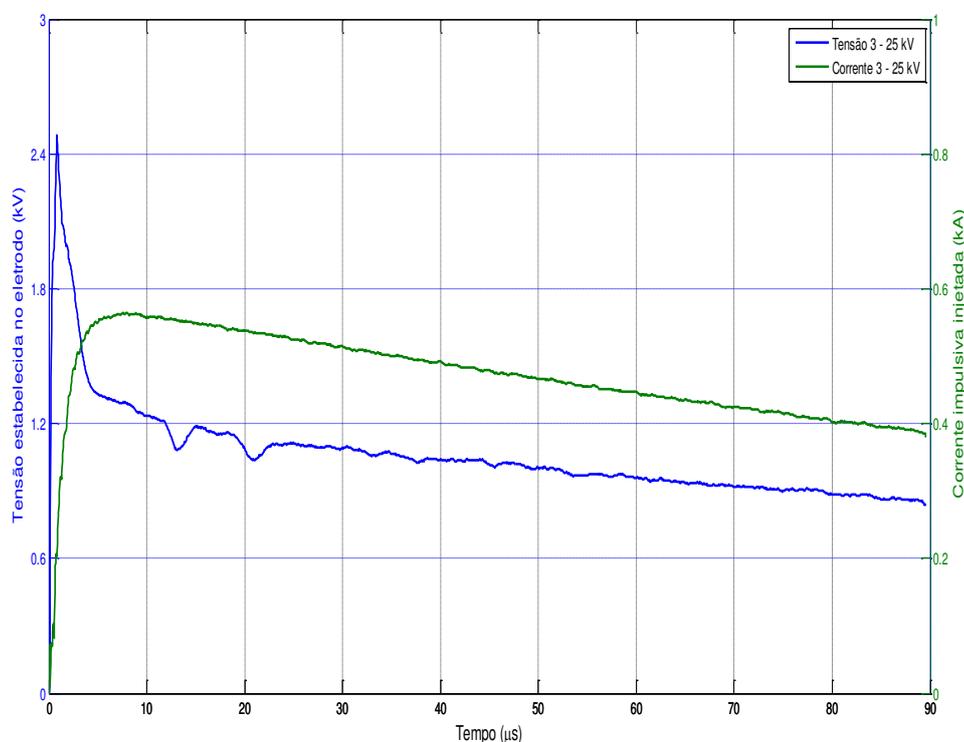


Figura corrente $i(t)$ e tensão $v(t)$ (Configuração 3 – 25 kV).

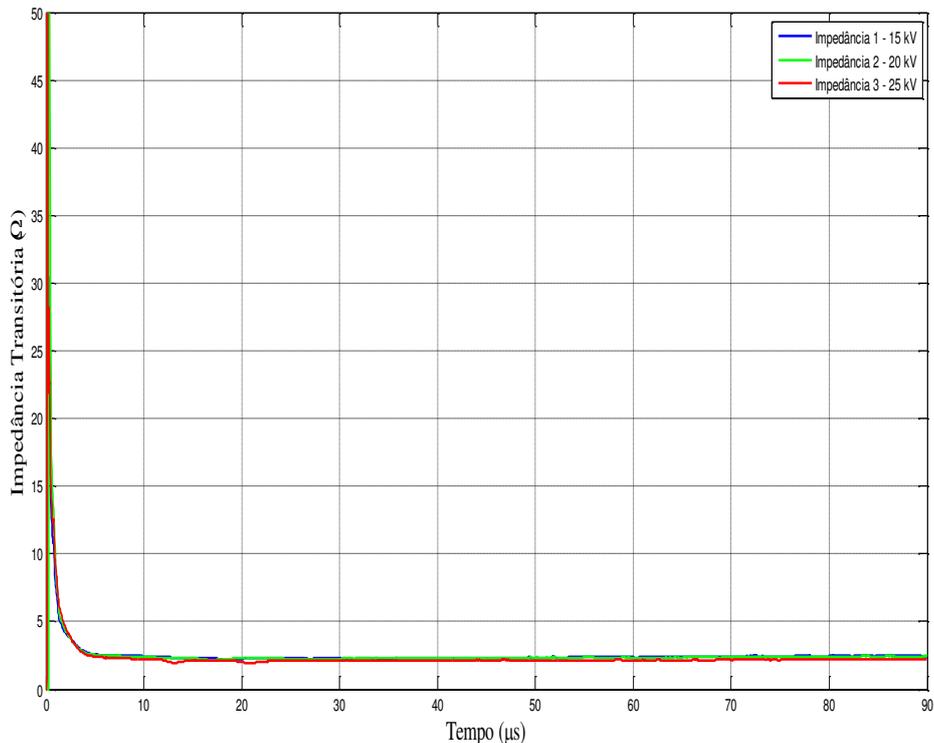
Na Tabela 5.15 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.15 - Tempo de frente e cauda da $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 3 – 25 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 3	5,76	146,15	0,56 kA
Tensão 3	0,84	9,69	2,48 kV

Os valores da impedância transitória considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Figura 5.13.

Figura 5.13 - Impedância transitória (Configuração 3 – 25 kV).



Os valores da impedância impulsiva considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Tabela 5.16.

Tabela 5.16 - Impedância impulsiva (Configuração 3).

Corrente injetada	Z_P (Ω)
Corrente $i_{p1}(t)$ - 15 kV	4,67
Corrente $i_{p2}(t)$ - 20 kV	4,71
Corrente $i_{p3}(t)$ - 25 kV	4,42

5.2.4 CONFIGURAÇÃO 4 DO GERADOR DE IMPULSO

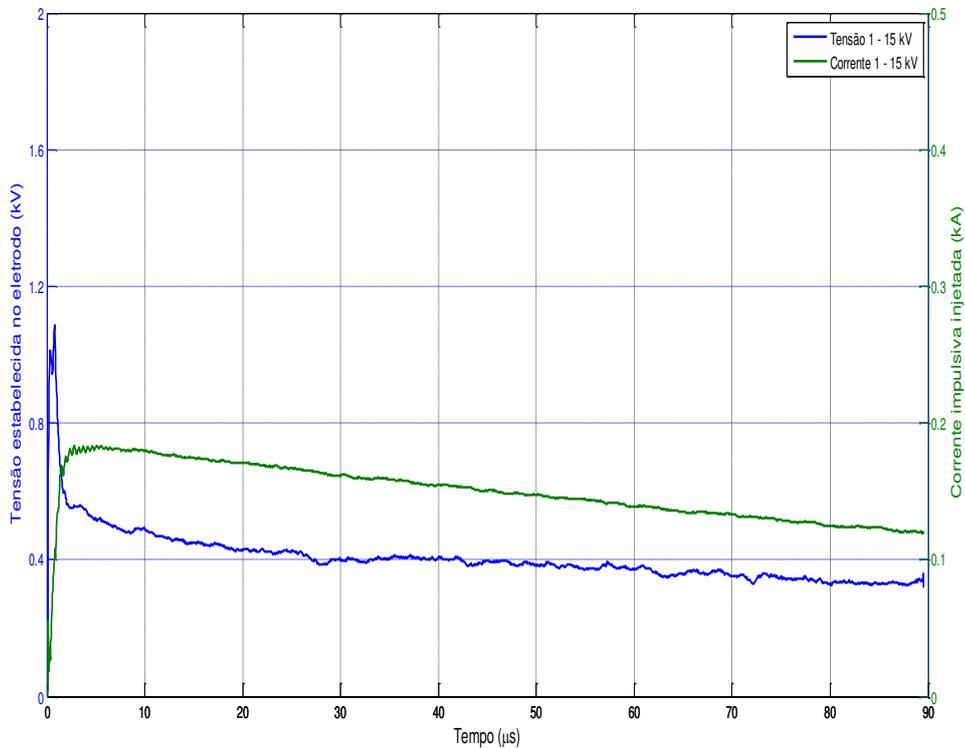
Com o objetivo de reproduzir uma forma de onda característica de uma descarga atmosférica, foi utilizada a configuração do gerador de impulso de corrente mostrada na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Configuração 4 do gerador de impulso de corrente.

Configuração utilizada	
Número de estágios	1
Resistor	100 Ω
Indutor	5,7 μH
Capacitor	2 μF

A corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.14. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 15 kV.

Figura 5.14 - Sinais de corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 4 – 15 kV).



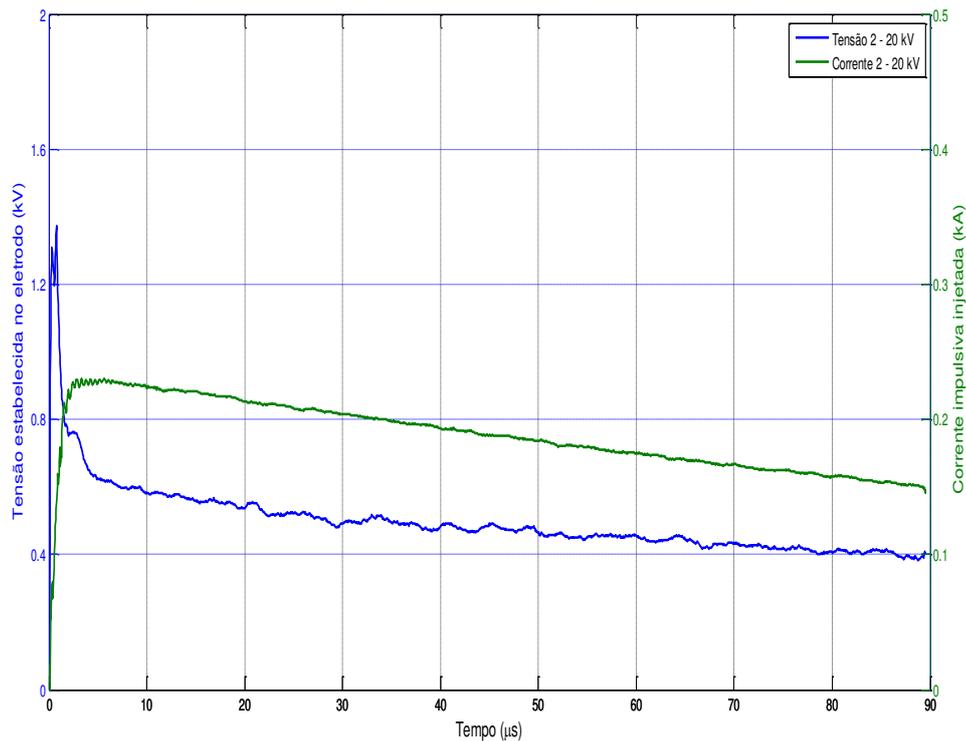
Na Tabela 5.18 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p1}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_1(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.18 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p1}(t)$ e tensão $v_1(t)$ (Configuração 4 – 15 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 1	2,84	146,15	0,18 kA
Tensão 1	0,84	3,8	1,08 kV

A corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.15. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 20 kV.

Figura 5.15 - Sinais de corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 4 – 20 kV).



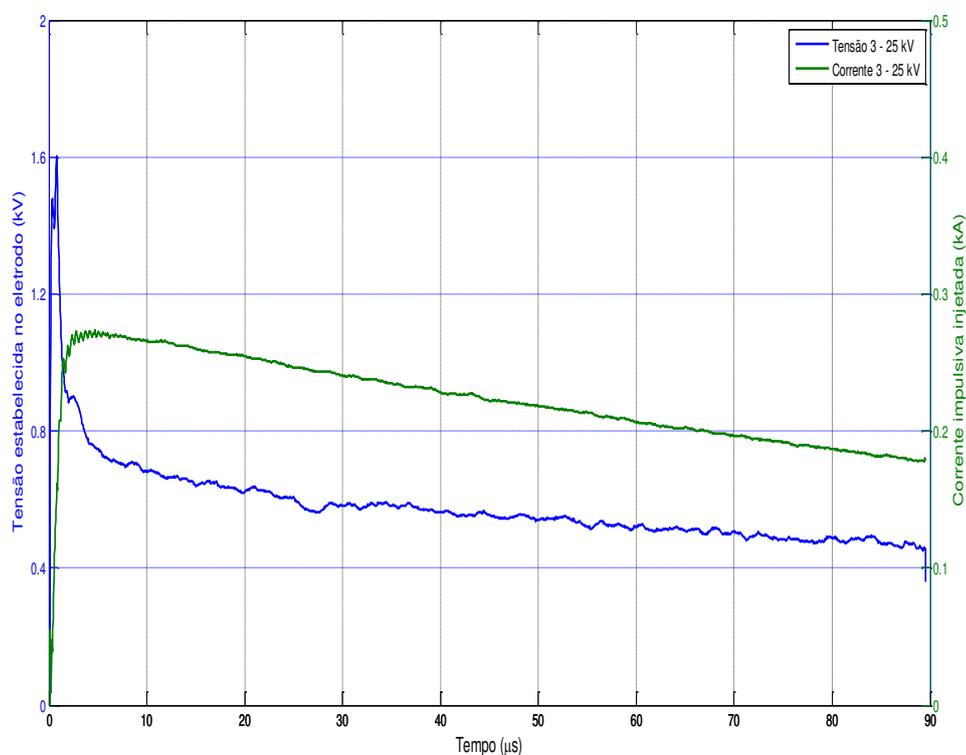
Na Tabela 5.19 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p2}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_2(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.19 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p2}(t)$ e tensão $v_2(t)$ (Configuração 4 – 20 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 2	2,89	146,15	0,23 kA
Tensão 2	0,84	3,4	1,37 kV

A corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente estão ilustrados na Figura 5.16. Para esses sinais, a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso foi de 25 kV.

Figura 5.16 - Sinais de corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 4 – 25 kV).



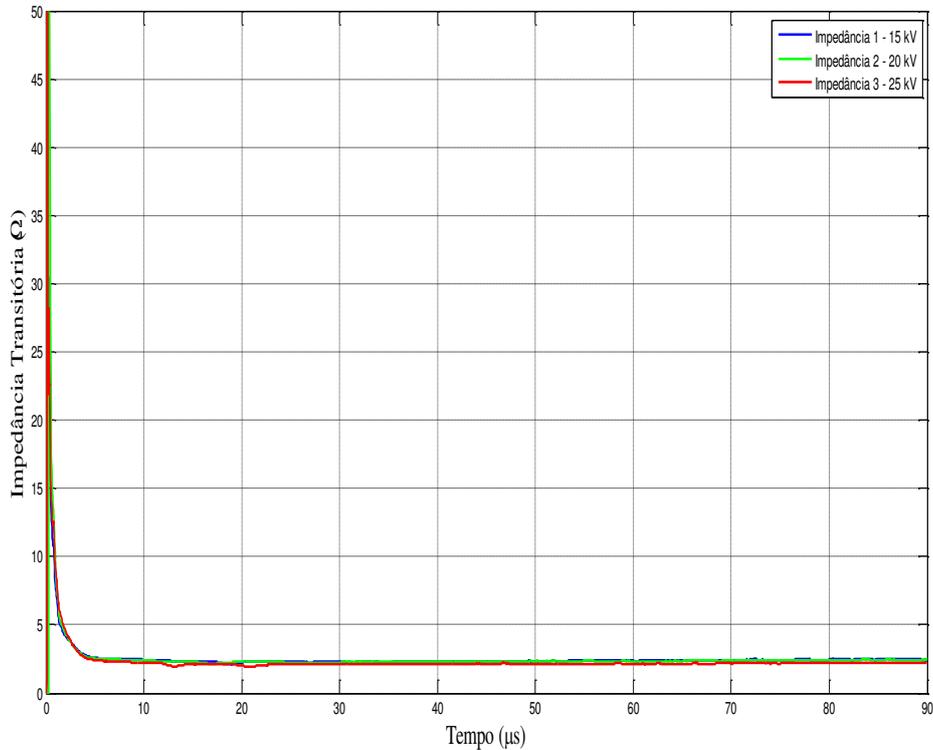
Na Tabela 5.20 são apresentados os tempos de frente e cauda da corrente impulsiva $i_{p3}(t)$ injetada na malha de aterramento sob teste e a tensão $v_3(t)$ estabelecida no eletrodo de injeção de corrente.

Tabela 5.20 - Tempo de frente e cauda da corrente $i_{p3}(t)$ e tensão $v_3(t)$ (Configuração 4 – 25 kV).

Sinal	Tempo de frente (μs)	Tempo de Cauda (μs)	Valor de Pico
Corrente 3	2,89	146,15	0,27 kA
Tensão 3	0,84	3,6	1,60 kV

Os valores da impedância transitória considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Figura 5.17.

Figura 5.17 - Impedância transitória (Configuração 4 – 25 kV).



Os valores da impedância impulsiva considerando cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos estão apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21 - Impedância impulsiva (Configuração 4).

Corrente injetada	Z_p (Ω)
Corrente $i_{p1}(t)$ - 15 kV	6,00
Corrente $i_{p2}(t)$ - 20 kV	5,96
Corrente $i_{p3}(t)$ - 25 kV	5,93

5.2.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Analisando-se os resultados, observa-se que a impedância impulsiva varia quando impulsos de diferentes tempos de frente foram aplicados na malha de

aterramento sob teste. Os resultados obtidos estão de acordo com aqueles obtidos por GONÇALVES (2015), CASTRO (2014) e GUIMARÃES (2012) em que o sinal com menor tempo de frente apresentou maior impedância impulsiva e conseqüentemente a menor impedância foi obtida com o sinal de maior tempo de frente. Observa-se, ainda, que, de forma geral, a impedância impulsiva não varia com a intensidade da corrente injetada, verificando-se que não houve o efeito da ionização do solo. Para as Configurações 1 e 2 do gerador de impulso, a impedância impulsiva é menor que a resistência em baixa frequência, em concordância com resultados obtidos por CASTRO (2014) e ROSADO (2008), evidenciando-se que o comprimento da malha de aterramento sob teste é menor que seu comprimento efetivo para esses sinais de corrente impulsivo. Para as configurações 3 e 4 do gerador de impulso, a impedância impulsiva é maior que a resistência em baixa frequência, em concordância com os resultados obtidos por GUIMARÃES (2012) evidenciando-se que o comprimento da malha de aterramento sob teste é maior que seu comprimento efetivo para esses sinais de correntes impulsivos.

Para todos os casos analisados, observa-se que o sinal de tensão estabelecida no eletrodo de injeção de corrente está adiantada em relação ao sinal de corrente impulsivo injetado, evidenciando assim um comportamento indutivo.

Também foi observado que para todas as formas de onda, a impedância transitória se estabilizou em torno da resistência em baixa frequência. No entanto, as impedâncias transitórias determinadas a partir da Configuração 1 atingiu seu regime permanente em aproximadamente 10 μ s, e as impedâncias transitórias determinadas a partir das outras Configurações atingiram o regime permanente em aproximadamente 5 μ s. Verifica-se que o tempo para a impedância transitória atingir seu regime permanente depende do tempo de frente do sinal de corrente impulsivo.

5.3 RESPOSTA DA MALHA DE ATERRAMENTO NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Nesta seção são apresentados os resultados que se referem à resposta da malha de aterramento sob teste, no domínio da frequência. Os sinais de tensão e corrente a analisados foram apresentados na Seção 5.2.

A transformada rápida de Fourier foi aplicada aos sinais de tensão e corrente, com isso, foram obtidos os sinais de tensão e corrente no domínio da frequência. A impedância harmônica foi obtida da razão entre duas grandezas, tensão e corrente, no domínio da frequência.

5.3.1 CONFIGURAÇÃO 1 DO GERADOR DE IMPULSO

Nas Figuras 5.18 e 5.19 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso.

Figura 5.18 - – Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 1).

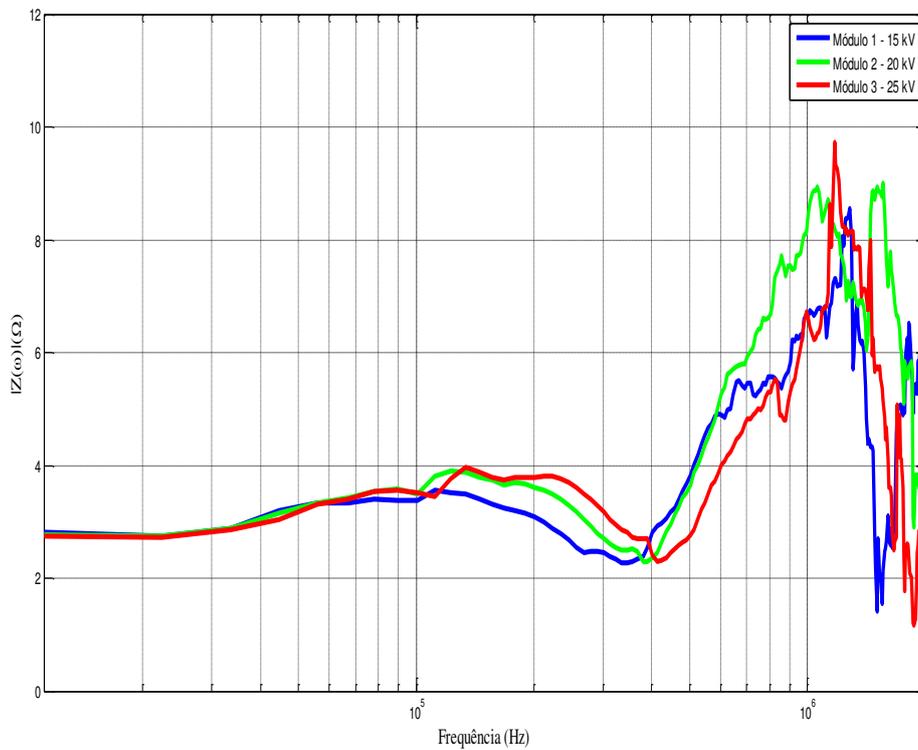
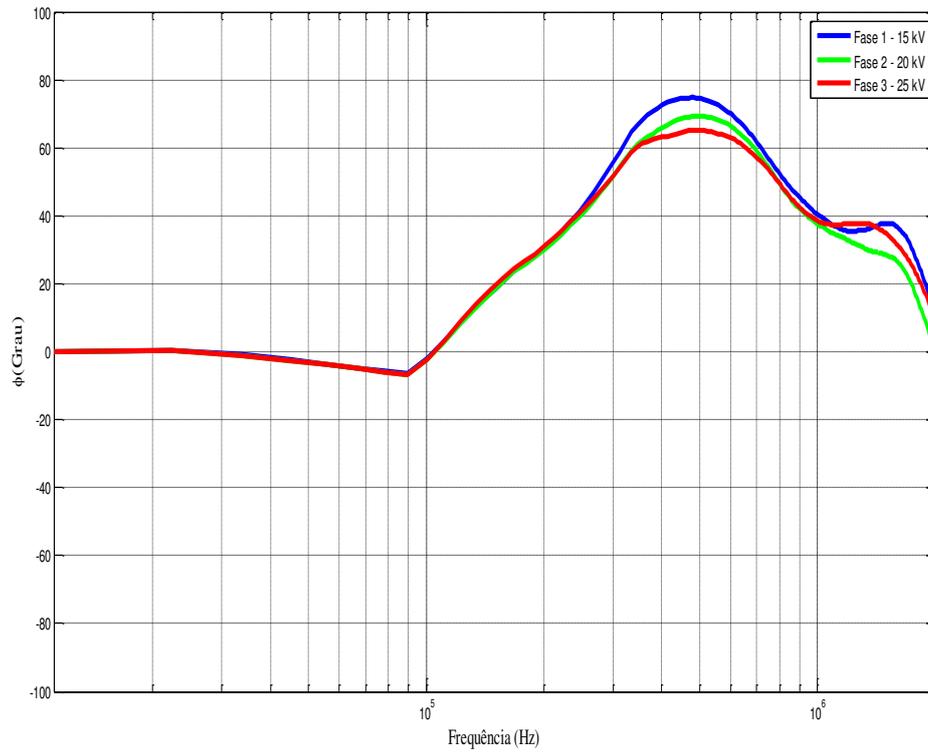


Figura 5.19 – Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 1).



5.3.2 CONFIGURAÇÃO 2 DO GERADOR DE IMPULSO

Nas Figuras 5.20 e 5.21 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso.

Figura 5.20 - Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 2).

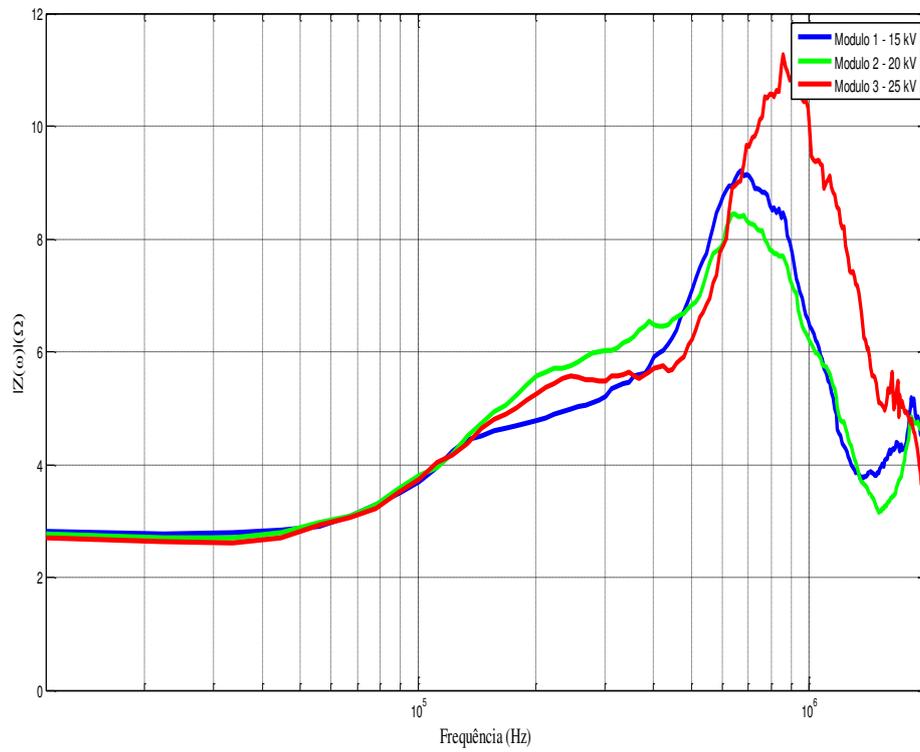
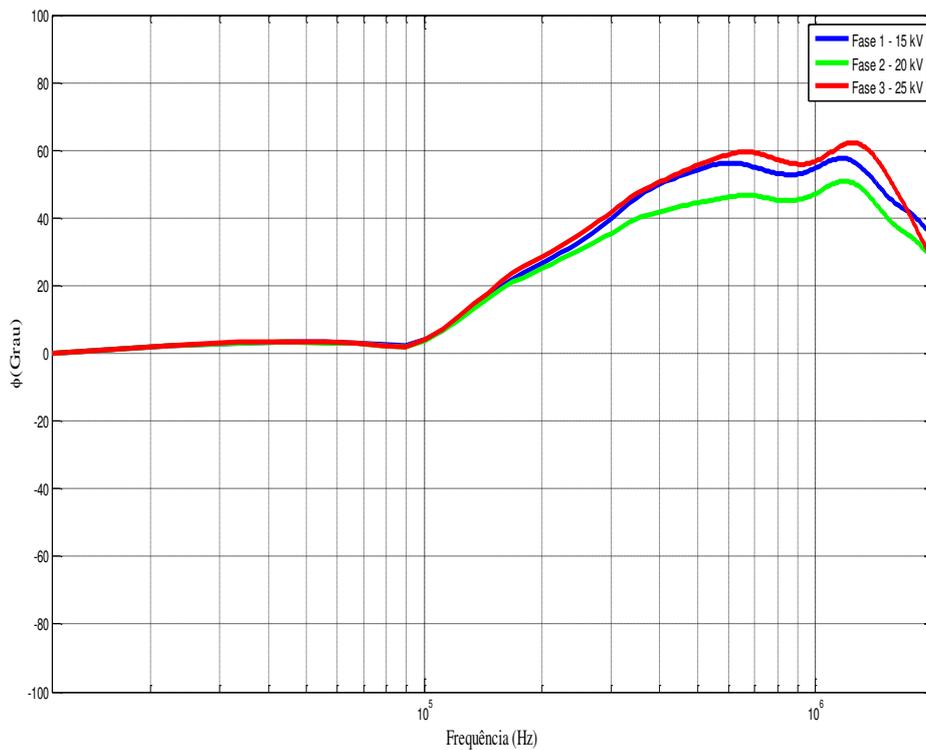


Figura 5.21 - Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 2).



5.3.3 CONFIGURAÇÃO 3 DO GERADOR DE IMPULSO

Nas Figuras 5.22 e 5.23 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso.

Figura 5.22 – Módulos das impedância harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 3).

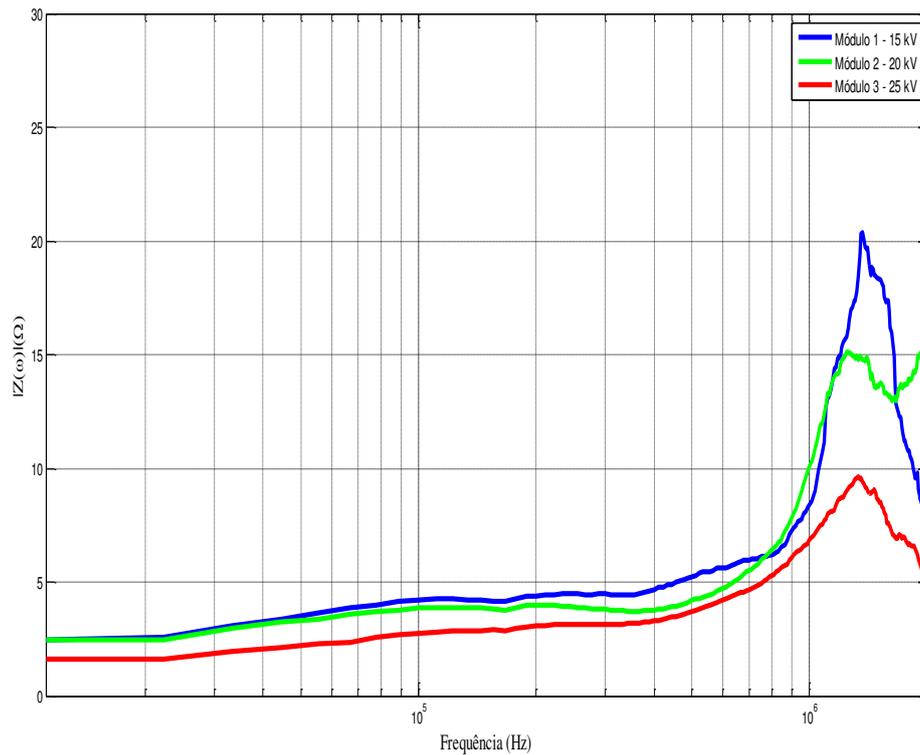
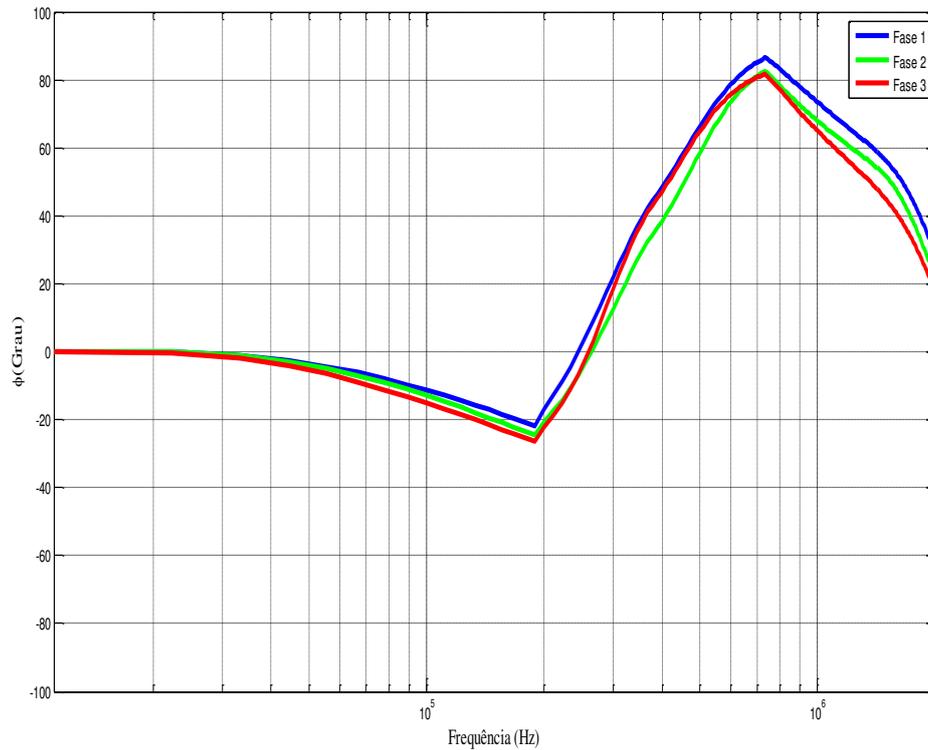


Figura 5.23 – Fases das impedância harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 3).



5.3.4 CONFIGURAÇÃO 4 DO GERADOR DE IMPULSO

Nas Figuras 5.24 e 5.25 estão ilustrados os módulos e fases das impedâncias harmônicas correspondentes a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso.

Figura 5.24 – Módulos das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 4)

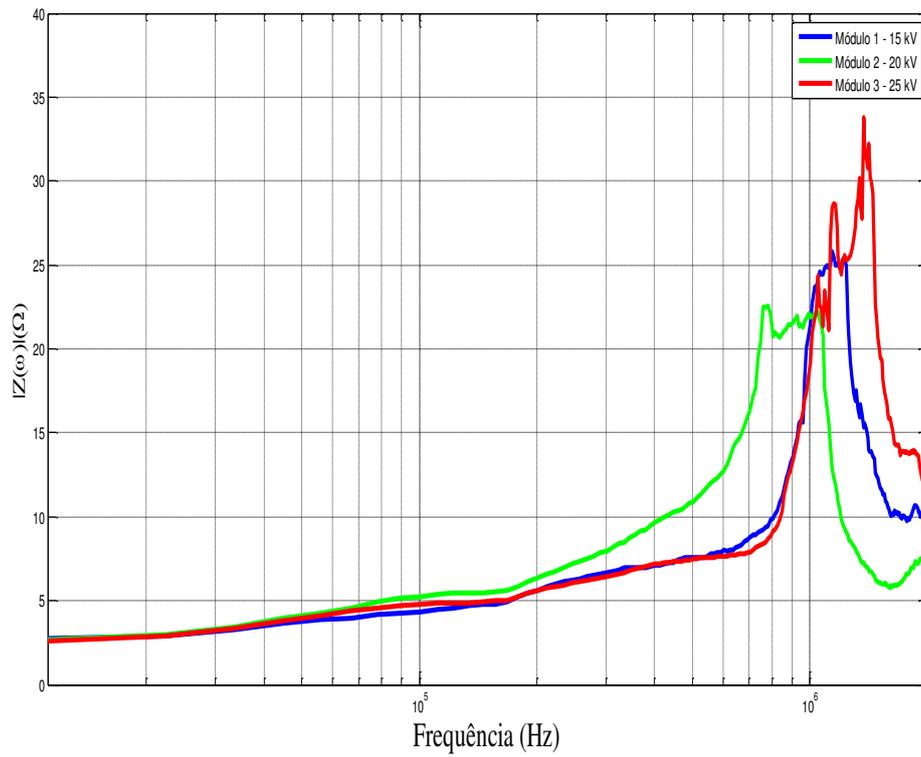
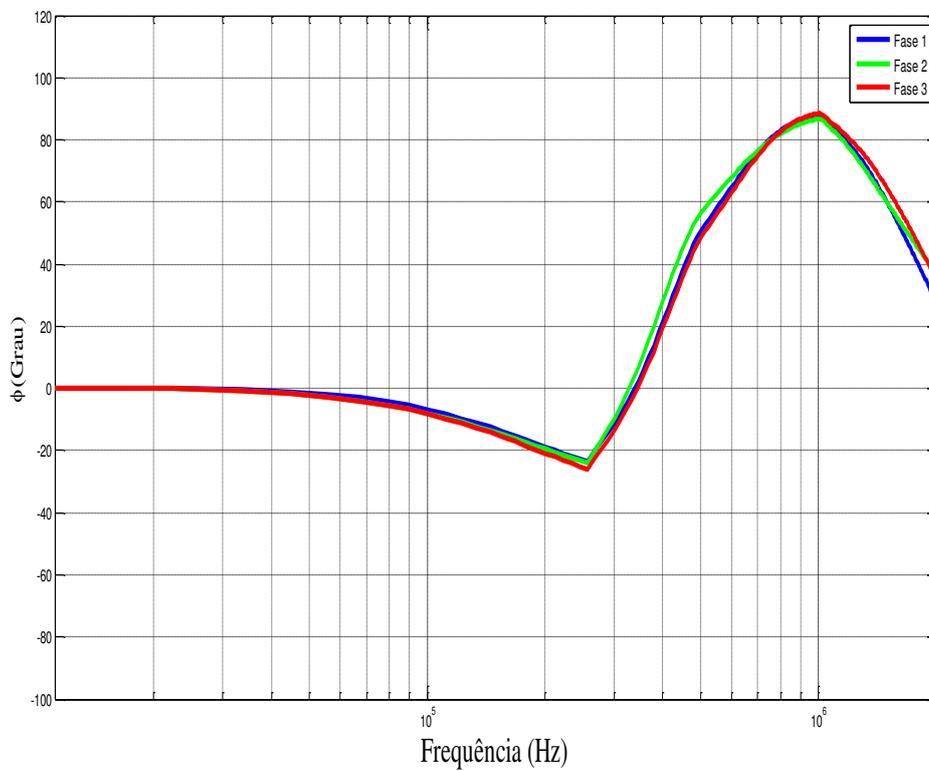


Figura 5.25 – Fases das impedâncias harmônica em relação a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso (Configuração 4).



5.3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Observa-se em todos os resultados obtidos, que para frequências menores que 100 kHz, o módulo da impedância harmônica é aproximadamente igual à resistência em baixa frequência, em concordância com VISACRO *et al* (2007b), AKBARI *et al.* (2013) e GUIMARÃES (2013). Acima de 100 kHz, percebe-se que o módulo da impedância harmônica tem seu valor aumentado, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz, em concordância com os resultados obtidos por AKBARI *et al.* (2013), GUIMARÃES (2013) e VISACRO *et al.* (2007b). Verifica-se que não houve influência da redução da resistividade do solo no módulo da impedância harmônica.

Verifica-se nos resultado obtidos a partir das Configurações 1 e 2, que a fase apresenta comportamento predominantemente resistivo até a frequência de 100 kHz. Para frequências acima de 100 kHz, percebe-se que a fase possui comportamento predominantemente indutivo, atingindo seu máximo em aproximadamente 500 kHz, em concordância com os resultados obtidos por AKBARI *et al.* (2013).

Observa-se nos resultados obtidos a partir das Configurações 3 e 4, que a fase apresenta comportamento predominantemente resistivo até a frequência de 40 kHz, no entanto, o efeito capacitivo da malha é predominante entre as frequências de 40 kHz a 300 kHz. Para frequências acima de 300 kHz, percebe-se que a fase possui comportamento predominantemente indutivo, atingindo seu máximo em aproximadamente 1 MHz.

6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram analisados o comportamento de uma malha de aterramento típica de subestação de distribuição submetida a correntes impulsivas de alta intensidade, contemplando impedância harmônica de aterramento, impedância impulsiva e impedância transitória. Os parâmetros utilizados foram a amplitude e o tempo de frente do sinal de corrente impulsiva. Foram utilizadas 4 configurações do gerador de impulso, resultando em 4 sinais de correntes impulsivos distintos. Para cada sinal de corrente injetada, foram utilizadas três amplitudes distintas.

Quando se analisa o comportamento da impedância transitória e impedância impulsiva em relação a intensidade do sinal de corrente impulsiva injetado verifica-se que: o efeito da ionização do solo não tem influências significativas nesses parâmetros.

Quando se analisa o comportamento da impedância transitória e impedância impulsiva em relação ao tempo de frente do sinal de corrente impulsivo injetado verifica-se que: a impedância impulsiva é inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente impulsivo; a impedância transitória estabiliza-se em torno da resistência de baixa frequência; o tempo para a impedância transitória atingir seu regime permanente depende do tempo de frente do sinal de corrente impulsivo.

Quando se analisa o módulo da impedância harmônica em relação a intensidade do sinal de corrente impulsiva injetado verifica-se que: não tem alterações significativas para baixa frequências; existe variações em alta frequência.

Quando se analisa o módulo da impedância harmônica em relação ao tempo de frente do sinal de corrente impulsivo injetado verifica-se que: para baixas frequências tem valor próximo ao valor da resistência em baixa frequência; o valor máximo encontra-se em aproximadamente 1 MHz; não houve influência da redução da resistividade do solo no módulo da impedância harmônica.

Quando se analisa a fase da impedância harmônica em relação a intensidade do sinal de corrente impulsiva injetado verifica-se que: não tem alterações significativas.

Quando se analisa a fase da impedância harmônica em relação ao tempo de frente do sinal de corrente impulsivo injetado verifica-se que: a frequência correspondente à fase máxima depende do tempo de frente do sinal de corrente impulsivo; o efeito capacitivo da malha de aterramento depende do tempo de frente do

sinal de corrente impulsivo; para baixas frequências a fase da impedância harmônica é predominantemente resistiva; para altas frequências a fase da impedância harmônica é predominantemente indutiva.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuros propoem-se:

- Analisar a resposta da configuração da malha de aterramento analisada nessa dissertação em solo de alta resistividade;
- Analisar a influência do local da injeção de correntes impulsivas da malha de aterramento analisada nessa dissertação, verificando sua resposta no domínio do tempo e frequência;
- Determinar, por simulação computacional, a impedância harmônica e impedância transitória de aterramento da malha de terra ensaiada, verificando a influência das hipóteses de resistividade e permissividade do solo constantes e variáveis na frequência;
- Determinar, por simulação computacional, a impedância harmônica e impedância transitória de aterramento da malha de terra ensaiada, verificando a influência do efeito da ionização do solo;
- Realizar as medições dos sinais de corrente e tensão por fibras ópticas;

6.2 PUBLICAÇÕES

No decorrer do curso de mestrado foram aceitos para publicações os seguintes artigos, relacionados com o trabalho desenvolvido:

ARAÚJO, F.J.L; COSTA, E.G; PEREIRA, H.A; GONÇALVES, M.F.B.R; COSTA, J.M; ALMEIDA, G.J.C. **Avaliação no Domínio do Tempo da Resposta Transitória de uma Malha de Aterramento Submetida a Correntes Impulsivas.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Natal, Brasil, 2016.

ARAÚJO, F.J.L; COSTA, E.G; PEREIRA, H.A; GONÇALVES, M.F.B.R; COSTA, J.M. **Avaliação da impedância harmônica de uma malha de aterramento submetida a correntes impulsivas.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Natal, Brasil, 2016.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, M.;SHESHYEKANI, K.;ALEMI, M. R. The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, v. 55, n. 4, p. 739–746, July 2013.

ALIPIO, R. S. Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência. 154 paginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, 2008.

ALIPIO, R.; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 27, n. 2, p. 927–935, April 2012.

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

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

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, p. 177–187, FEBRUARY 2014.

CHOI, J.K.; AHN, Y.; GOO, S.; PARK, K.; YOON, J.; Direct Measurement of Frequency Domain Impedance Characteristics of Grounding System. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 2, p. 2218–2221, April 2002.

GONOS, F.; TOPALIS, F.V.; STATHOPULOS, A. Transient impedance of grounding rods. High Voltage Engineering, v. 2, n. 2, p. 272–275, April 1999.

GONÇALVES, F. B. R. G. Avaliação da impedância impulsiva em um sistema de aterramento. 67 paginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UCG, Campina Grande, 2015.

GUPTA, B.R., THAPAR, B. Impulsive Impedance of Grounding Grids. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 4, n. 6, p. 367–374, April 1980.

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

HABJANIC, A.; TRLEP, M. The Simulation of the Soil Ionization Phenomenon Around the Grounding System by the Finite Element Method. IEEE transactions on magnetics, VOL. 42, NO. 4, p. 867-870, April 2006.

IDRIS, N. A.; RAMLI, A.; N. M.; H. AHMAD. Performance of Earthing Systems of Operational/Live Stations under Impulse Conditions. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 3, n. 2, p. 490–495, September 2005.

IEC 60-1: High-voltage test techniques – Part 1: General definitions and test requirements. 2^a ed., 1989.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/>>. Acesso em: 25/01/2016.

LIU, Y.; THEETHAYI, N.; GONZALEZ, R. M.; THOTTAPPILLIL, R. The Residual Resistivity in Soil Ionization Region Around Grounding System for Different Experimental Results. IEEE International Symposium on EMC, Boston, p.794-799, August 2003.

MODRUSAN, M. Laboratory and On-Site Testing of Metal Oxide Arresters. HAEFELY HIGH VOLTAGE TEST – E1 94. Cigré SC 33, Basel, 1999.

NBR 15749. Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. ABNT, 2009.

NBR 7117. Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner). ABNT, 1981.

ROSADO, G. C. Investigação teórico-experimental sobre a resposta de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas. 77 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, 2008.

RODRIGUES, M. A. O. Avaliação do Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento. 81 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2012.

SADIKU, M. N. O. Elementos de Eletromagnetismo. 5ª edição. 2010.

SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S.; ALÍPIO, R.; CONTI, A. Lightning-Induced Voltages Over Lossy Ground: The Effect of Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, VOL. 56, NO. 5, p. 1129 - 1136, October 2014

SUNDE, E. D. Earth conduction effects in transmission systems, Dover publications, Inc., Nova York, 1949.

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; RAIZER, A.; ALMAGUER, H. G.; MUSTAFA, T. I.; COELHO, L. V. Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixas e Altas Frequências. Ed. Porto Alegre: ediPUCRS, 2007.

TOSEVA, V. A.; GRCEV, L. High Frequency Current Distribution in Horizontal Grounding Systems in Two-layer Soil. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, v. 1, n. 4, p. 205–208, May 2003.

VISACRO, S. Aterramentos Elétricos. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.

VISACRO, S. — Resposta dos aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas. XIX SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GrupoX – Sobretensões e Coordenação de Isolamento, Rio de Janeiro, Outubro de 2007a.

VISACRO, G.; ROSADO, G. Response of grounding electrodes to impulsive currents: an experimental evaluation. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, v. 51, n. 1, p. 161–164, February 2009.

VISACRO, S.; GUIMARAES, M. B. N.; ARAUJO, R. A.; ARAUJO, L. S. Experimental Impulse Response of Grounding Grids. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1-4, 2011, Chengdu, China. (2011)