



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

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA EM UM SISTEMA DE
ATERRAMENTO**

Marconni Freitas Barroso Ribeiro Gonçalves

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Março de 2015

Marconni Freitas Barroso Ribeiro Gonçalves

**AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA EM UM SISTEMA DE
ATERRAMENTO**

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

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Prof. Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Março de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G635a Gonçalves, Marconni Freitas Barroso Ribeiro.
Avaliação da impedância impulsiva em um sistema de aterramento /
Marconni Freitas Barroso Ribeiro Gonçalves. – Campina Grande, 2015.
65 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. Edson Guedes da Costa".
Referências.

1. Sistema de Aterramento. 2. Impedância Impulsiva. 3. Impulsos de
Corrente. 4. Tempo de Frente. I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU 621.316.9(043)

"AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA EM UM SISTEMA DE ATERRAMENTO"

MARCONNI FREITAS BARROSO RIBEIRO GONÇALVES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/03/2015



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



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



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

CAMPINA GRANDE - PB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai, Demosthenes Filho, e a minha mãe, Eleonora.

AGRADECIMENTOS

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

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

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

A todos os meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, aconselhando-me para o bem.

A minha noiva, Camila, pelas horas empregadas comigo para o desenvolvimento deste trabalho, também por se mostrar uma grande pessoa, ajudando-me nos momentos de dificuldade.

Ao professor Edson Guedes pela orientação e pela confiança em mim depositada.

A todos os meus amigos, tanto os de graduação como os de infância.

Aos meus colegas de pós-graduação que consciente ou inconscientemente ajudaram no meu desenvolvimento acadêmico e pela companhia nesta caminhada.

A todos os professores e funcionários do Laboratório de Alta Tensão.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG pelo apoio oferecido e de cujo grupo me orgulho de fazer parte.

A Eletrobras Distribuição Piauí pelo apoio financeiro e por disponibilizar materiais necessários para a realização da pesquisa.

Ao CNPq e a COPELE pelo apoio financeiro.

“La inspiración existe, pero tiene que encontrarte trabajando.”

(Pablo Picasso)

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo experimental para a análise do comportamento da impedância impulsiva em um sistema de aterramento. Com o objetivo de avaliar a impedância impulsiva, foram aplicados no solo impulsos de corrente elétrica (representativos de descargas atmosféricas) com diferentes tempos de frente e amplitudes. Para tanto, utilizou-se um gerador de impulsos de alta corrente elétrica. O gerador de impulsos foi carregado com diferentes níveis de tensão de 15 kV a 35 kV. A configuração do gerador de impulsos escolhida inicialmente proporcionou a injeção de impulsos de corrente 8/20 μ s em diferentes amplitudes. Também, com o objetivo de analisar o comportamento da impedância impulsiva em diferentes tempos de frente de onda, a tensão de carregamento dos capacitores foi mantida fixa em 20 kV e os parâmetros do circuito gerador de impulso (RLC) foram alterados. A aplicação de impulsos de corrente no solo foi viabilizada utilizando-se de uma haste de aço revestida por cobre enterrada no solo. A aquisição de dados foi realizada com um osciloscópio digital de quatro canais. A tensão aplicada foi medida usando uma ponta de prova de alta tensão e a corrente foi obtida por um resistor *shunt*. Os resultados mostraram que quando a variável de análise foi a tensão de carregamento do gerador de impulsos, a impedância impulsiva tornou-se cada vez menor quando se elevava a tensão aplicada ao solo. Os resultados evidenciaram que quando a variável de análise foi o tempo de frente do sinal de corrente aplicado, a impedância impulsiva variou inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente aplicado.

Palavras-chave: sistema de aterramento, impedância impulsiva, impulsos de corrente, tempo de frente.

ABSTRACT

In this work was realized an experimental study for the analysis of impulsive impedance behavior in a grounding grid. In order to evaluate the impulsive impedance, were applied to the soil electric current impulses (representing lightning discharges) with several front times and amplitudes. So, a high current impulse generator was used. The impulse generator was charged with different voltage levels from 15 kV to 35 kV. The configuration of the generator initially chosen provided the injection of current impulses 8/20 μs at different amplitudes. Also, in order to analyze the behavior of the impulsive impedance at different wave front times, the capacitor's charging voltage was established in 20 kV and the impulse generator parameters (RLC) was changed. The injection of current impulses into the soil was made possible using a steel grounding rod coated with copper buried into the ground. The data acquisition was performed with a four-channel digital oscilloscope. The applied voltage was measured using a high voltage probe and current was obtained by a shunt resistor. The results showed that when the analysis variable was the charging voltage of the impulse generator, impulsive impedance became increasingly lower as the rising voltage applied to the soil. The results showed 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 current signal applied.

Key words: grounding grid, impulsive impedance, current impulses, front time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Fluxograma das etapas de avaliação de um sistema de aterramento.....	14
Figura 2.1 – Representação de uma descarga atmosférica.....	16
Figura 2.2 – Sinal representativo de uma descarga atmosférica	17
Figura 2.3 – Fotografias: (a) malha de aterramento; (b) componentes fundamentais de um aterramento.....	19
Figura 2.4 – Componentes de corrente elétrica em um segmento de eletrodo	22
Figura 2.5 – Representação da zona de ionização do solo	24
Figura 2.6 – Gráfico da variação da impedância complexa em relação à frequência.....	26
Figura 4.1 – Fotografias: (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador	32
Figura 4.2 – Diagrama esquemático do gerador de impulso	33
Figura 4.3 – Fotografias: (a) haste de injeção de corrente; (b) haste auxiliar para aquisição da tensão propagada..	35
Figura 4.4 – Fotografia do terrômetro e seus acessórios.....	36
Figura 4.5 – Esquema para medição da resistência de aterramento	37
Figura 4.6 – Configuração do ensaio com o varistor para aquisição dos sinais de tensão e corrente	38
Figura 4.7 – Configuração do ensaio no solo para aquisição dos sinais de tensão e corrente	38
Figura 4.8 – Esquema de aplicação e aquisição de sinais de tensão e corrente no solo..	39
Figura 5.1 – Gráfico da resistência de aterramento <i>versus</i> a distância entre o eletrodo auxiliar de tensão e o sistema de aterramento	42
Figura 5.2 – Forma de onda dos sinais de tensão e corrente aplicados no varistor	44
Figura 5.3 – Forma de onda dos sinais de tensão e corrente aplicados no solo	46
Figura 5.4 – Gráfico de Z_p em função da tensão de carregamento dos capacitores.....	49
Figura 5.5 – Gráfico de $z(t)$ em relação à tensão de carregamento dos capacitores.....	50
Figura 5.6 – Gráfico das correntes injetadas na haste de aterramento.....	51
Figura 5.7 – Gráfico de Z_p em função de T_f	55
Figura 5.8 – Gráfico da tensão aplicada em função de T_f	55
Figura 5.9 – Gráfico da corrente injetada em função de T_f	56
Figura 5.10 – Gráfico de $z(t)$ em relação à configuração do gerador de impulsos.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Resumo das principais contribuições na área de aterramentos	28
Tabela 3.2 – Continuação: Resumo das principais contribuições na área de aterramentos.....	29
Tabela 5.1 – Dados da medição da resistência de aterramento.....	41
Tabela 5.2 – Dados para determinação da resistência de aterramento.	42
Tabela 5.3 – Dados técnicos do varistor utilizado para verificação do gerador de impulsos.....	43
Tabela 5.4 – Configuração do gerador de impulsos.....	44
Tabela 5.5 – Valores de Z_p com relação à amplitude do sinal aplicado.....	47
Tabela 5.6 – Tempo de crista dos sinais de tensão e corrente.	49
Tabela 5.7 – Valores das amplitudes da tensão propagada no solo.....	52
Tabela 5.8 – Parâmetros das oito configurações distintas do gerador de impulsos.....	53
Tabela 5.9 – Parâmetros relacionados à impedância impulsiva com relação à configuração do gerador de impulso.....	54
Tabela 5.10 – Valores das amplitudes da tensão propagada no solo.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- CIGRÉ – International Council on Large Electric Systems.
- CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
- ELAT – Grupo de Eletricidade Atmosférica.
- IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- IEC – International Electrotechnical Commission.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- LAT – Laboratório de Alta Tensão.
- MQP – Método da Queda de Potencial.
- NBR – Norma Brasileira de Regulamentação.
- SG – Espinterômetro do Gerador de Impulso de Corrente.
- SI – Sistema Internacional de Medidas.
- UFMG – Universidade Federal de Campina Grande.
- ZnO – Óxido de Zinco.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	13
1.1 Motivação	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	15
1.3 Organização do Trabalho	15

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Descargas Atmosféricas	16
2.1.1 Sinais Representativos de Descargas Atmosféricas	17
2.1.2 Efeitos das Descargas Atmosféricas em Sistemas de Potência	18
2.2 Sistemas de Aterramento	19
2.2.1 Considerações Iniciais	19
2.2.2 Características Elétricas do Solo	21
2.2.3 Comportamento de Aterramentos Frente a Correntes Impulsivas	22
2.2.4 Ionização do Meio	24
2.2.5 Grandezas para Avaliação de Sistemas de Aterramento	25

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
------------------------------------	----

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Gerador de Impulsos de Corrente Elétrica	32
4.2 Material	34
4.3 Métodos	35
4.3.1 Medição da Resistência de Aterramento em Baixa Frequência (Etapa 1)	36
4.3.2 Escolha do Sinal de Corrente a Ser Aplicado no Solo (Etapa 2)	37

4.3.3 Ensaio com o Sinal de Corrente Escolhido e Variação da Tensão de Carregamento (Etapa 3)	39
4.3.4 Ensaio com Impulsos de Diferentes Frequências Mantendo-se a Tensão de Carregamento Constante (Etapa 4)	39

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES	41
5.1 Resistência em Baixa Frequência	41
5.2 Configuração do Gerador de Impulsos	43
5.2.1 Injeção de Corrente Impulsiva em Varistor de ZnO	43
5.2.2 Injeção de Corrente Impulsiva no Solo	45
5.3 Ensaio com Configuração Fixa do Gerador e Variação da Tensão de Carregamento	46
5.3.1 Avaliação da Impedância Impulsiva	47
5.3.2 Avaliação da Impedância Transitória	49
5.3.3 Avaliação da Propagação do Sinal de Tensão no Solo	51
5.4 Ensaio com Impulsos de Diferentes Frequências Mantendo-se a Tensão de Carregamento Constante	52
5.4.1 Avaliação da Impedância Impulsiva	53
5.4.2 Avaliação da Impedância Transitória	56
5.4.3 Avaliação da Propagação do Sinal de Tensão no Solo	57

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

As descargas atmosféricas são fenômenos da natureza que ocorrem de forma aleatória, não sendo possível prever onde, como e com que intensidade irão ocorrer. No setor elétrico, a ocorrência das descargas pode gerar danos permanentes aos equipamentos do sistema e desligamentos das linhas de transmissão e distribuição. Segundo KOWALENKO (2010), as falhas decorrentes de descargas atmosféricas são responsáveis por um terço das causas de interrupção no fornecimento de energia elétrica no mundo.

Assim, devido à incerteza sobre a incidência de surtos atmosféricos e seus efeitos no sistema elétrico, medidas preventivas vêm sendo adotadas com o objetivo de evitar ou minimizar possíveis danos. Uma dessas medidas é o uso de um sistema de aterramento eficiente, capaz de fornecer às correntes advindas da descarga um caminho de baixa impedância para a terra, garantindo a segurança das pessoas e das instalações.

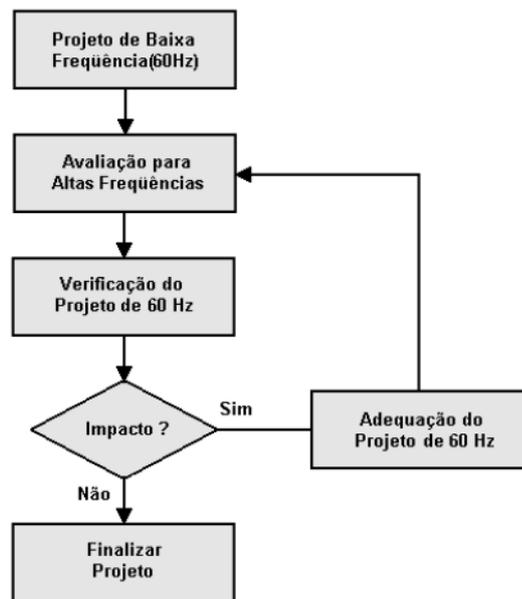
O sistema de aterramento é feito, basicamente, utilizando hastes condutoras cravadas no solo. As correntes de descarga, ao atingirem a terra, percorrem o eletrodo de aterramento e ionizam o solo ao seu redor, ocasionando o que pode ser considerado como um aumento no diâmetro do eletrodo. Como consequência, haverá uma redução na impedância do aterramento, tornando o sistema de aterramento um caminho preferencial para o escoamento das correntes de surto.

Atualmente, apenas o parâmetro resistência de aterramento é considerado em projetos de malhas de aterramento. Dessa forma, os possíveis efeitos indutivos e capacitivos (mais expressivos quando se tem correntes impulsivas percorrendo a malha) são desconsiderados na maioria dos casos, dando margem ao aparecimento de potenciais no solo acima do permitido em norma.

Entretanto, é fundamental que o ponto de partida na avaliação de sistemas de aterramento seja feita pela sua resistência (baixa frequência), pelo fato dos conceitos e dos processos de medição serem consolidados e largamente utilizados como referência na avaliação de aterramentos, mesmo quando submetidos a correntes impulsivas. Dessa

forma, FRAGA (2008) propõe um fluxograma contendo as etapas necessárias para avaliação de sistemas de aterramento, com o objetivo de validar a malha não só para sinais em baixa frequência, bem como, para correntes impulsivas. O fluxograma é mostrado na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Fluxograma das etapas de avaliação de um sistema de aterramento.



Fonte: (FRAGA, 2008).

Pelo exposto, neste trabalho são realizadas avaliações do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica, tendo como base a resistência de aterramento em baixa frequência. Com isso se pretende estudar, analisar e compreender a resposta do aterramento, possibilitando assim, estudos para a formulação e validação de modelos computacionais de cálculo do comportamento transitório de aterramentos elétricos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é avaliar o comportamento da impedância impulsiva e impedância transitória de um sistema de aterramento quando submetido a impulsos de corrente elétrica, com amplitudes e formas de onda diferentes.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar a resistência do aterramento em baixa frequência (frequência industrial), para servir de referência;
- Determinar a impedância impulsiva e a impedância transitória do sistema de aterramento a partir dos sinais de tensão e corrente adquiridos;
- Avaliar o comportamento do sistema de aterramento quando submetido a correntes em baixa frequência e correntes impulsivas;
- Analisar o comportamento da impedância a partir de sinais de corrente e tensão aplicados;
- Avaliar a dependência entre a impedância de aterramento e a forma de onda do sinal aplicado no solo;
- Avaliar a propagação de sinais impulsivos de tensão no solo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Com o intuito de alcançar os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada da seguinte forma.

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

No Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica concernente ao tema em estudo: aterramentos elétricos submetidos tanto a correntes em baixa frequência quanto a correntes impulsivas.

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

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e análises sobre os ensaios realizados em sistema de aterramento submetido a correntes de baixa frequência e correntes impulsivas. O capítulo foi dividido em quatro tópicos seguindo o mesmo modelo da metodologia utilizada no Capítulo 4.

Por fim, as conclusões da dissertação e as propostas para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

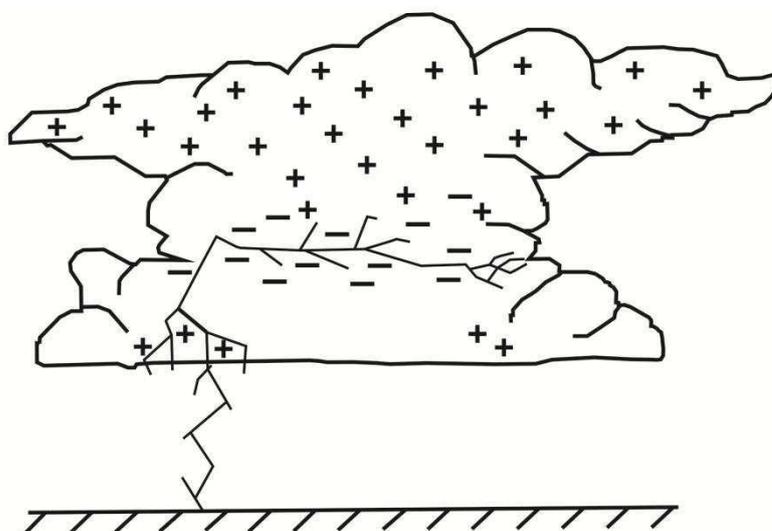
A fundamentação teórica sobre descargas atmosféricas e sistemas de aterramento é realizada neste capítulo. No tópico sobre sistemas de aterramento são enfatizadas as definições das principais grandezas utilizadas na avaliação do desempenho de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica (sinais com tempos de ocorrência da ordem de microssegundos).

2.1 DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

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

O fenômeno consiste em um fluxo de corrente impulsiva de alta intensidade e curta duração, cujo percurso é normalmente de alguns quilômetros. O tempo de duração de um raio (descarga elétrica quando atinge o solo) é normalmente de dezenas de microssegundos e o seu valor de pico típico é em torno de 30 kA (UMAN, 1987). Uma descarga típica entre nuvem e solo é ilustrada na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Representação de uma descarga atmosférica.



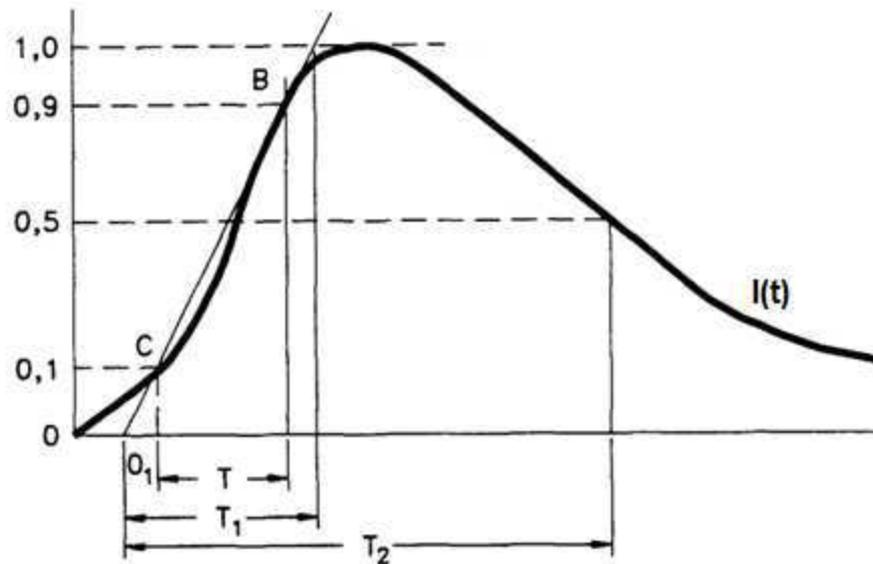
Fonte: Reproduzida de (RAKOV; UMAN, 2003).

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

2.1.1 SINAIS REPRESENTATIVOS DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

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

Figura 2.2 – Sinal representativo de uma descarga atmosférica.



Fonte: (IEC 60-1, 1989).

Em que:

- **I(t)**: Impulso de corrente elétrica representativa de uma descarga atmosférica;
- **O₁**: Origem virtual. É utilizado como a origem do sinal, com o objetivo de desconsiderar a presença de ruídos nos pontos iniciais da forma de onda;
- **T**: Intervalo de tempo entre os instantes nos quais o impulso está com 10% (ponto C) e 90% (ponto B) de sua amplitude máxima;

- **T₁ ou T_f**: Tempo de frente do sinal. É definido como sendo $1,25 \times T$. Representa o intervalo de tempo entre a origem virtual e a amplitude máxima do impulso;
- **T₂ ou T_{mc}**: Tempo de meia cauda. É o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a cauda do impulso atinge 50% do seu valor de pico.

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

2.1.2 EFEITOS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Uma das causas de sobretensões em equipamentos de sistemas de potência são as descargas atmosféricas, devido à curta duração (da ordem de microssegundos) e amplitude do sinal incidente. As descargas podem ocorrer de forma direta (quando atingem diretamente as subestações), ou indireta (sobre as linhas de transmissão do sistema).

A ocorrência desse fenômeno de natureza impulsiva nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica requer cuidado especial às companhias do setor elétrico, pois as descargas podem provocar danos aos equipamentos que estão ligados à rede, prejudicando a qualidade do fornecimento de energia ou até mesmo causando sua interrupção.

No Brasil, é registrada uma elevada atividade atmosférica anual, devido à alta incidência de raios. Segundo relatório publicado no portal eletrônico do ELAT/INPE (Grupo de Eletricidade Atmosférica/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) há perdas financeiras anuais estimadas em R\$ 1 bilhão, ocasionadas por incêndios, queima de equipamentos, desligamentos de sistemas de energia, entre outras causas. Cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição são provocados por raios, sendo que em torno de 40% dos transformadores ligados à rede acabam por sofrer avarias decorrentes das descargas atmosféricas.

De modo a minimizar o elevado número de desligamentos provocados por raios, diversas técnicas têm sido desenvolvidas, destacando-se entre elas o aperfeiçoamento dos sistemas de aterramento, para redução da impedância de aterramento, e o uso de para-raios. Tais técnicas podem ser aplicadas em áreas críticas, onde a incidência de

descargas é maior, já que quando uma descarga é drenada para uma malha de aterramento, o sinal tende a percorrer a malha e, ao longo dela, dissipando para o solo. Desta forma, os sinais provenientes da descarga são atenuados a níveis seguros, para proteção de pessoas e equipamento.

2.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

2.2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

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

O aterramento consiste, essencialmente, em uma conexão elétrica a terra, através de hastes de aterramento. E o valor da resistência de aterramento é um dos parâmetros mais utilizados para representar a eficácia desta ligação, ou seja, quanto menor for a resistência, melhor será a resposta do aterramento quando solicitado (VISACRO, 2007). Na Figura 2.3 (a) pode ser observada uma malha de aterramento e na Figura 2.3 (b) são mostrados os elementos básicos de uma malha de aterramento.

Figura 2.3 – Fotografias: (a) malha de aterramento; (b) componentes fundamentais de um aterramento.



(a)

(b)

Fonte: (RODRIGUES, 2012).

Conforme a Figura 2.3 (b), os três elementos fundamentais de um aterramento são: os eletrodos de aterramento constituídos, geralmente, de um corpo de aço revestido de cobre e que têm por finalidade dissipar a corrente elétrica no solo; as conexões

elétricas, que ligam um ponto do sistema aos eletrodos; e a terra que envolve os eletrodos.

Os três componentes fundamentais listados podem estar dispostos em diferentes configurações ou arranjos com a finalidade de facilitar o escoamento da corrente elétrica. Além disso, o material utilizado nas hastes e o solo em que se trabalha com o aterramento tem influência na característica da corrente elétrica dissipada (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

A principal configuração utilizada é de hastes cravadas verticalmente no solo e interligadas por cabos de cobre nu. Porém, diversos estudos têm sido realizados na área com o intuito de melhorar a eficiência do aterramento, ou seja, diminuir a resistência de terra. Uma das pesquisas realizadas foi a avaliação de um sistema de aterramento composto por hastes perfuradas, com o objetivo de permitir a passagem de água internamente às hastes e, conseqüentemente, diminuir a resistência de aterramento. Porém, a dependência da passagem de água dificultou o trabalho, tornando-o complexo e oneroso (HE *et al.*, 2005).

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

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

Assim, é mediante o uso da haste de aterramento cravada no solo que são escoadas correntes de defeito, como aquelas oriundas de descargas atmosféricas. Quando essas correntes atravessam o eletrodo de aterramento e propagam-se no solo são gerados gradientes de potencial que tendem a diminuir à medida que se afastam da

haste que sofreu a descarga (MELIOPOULUS; MOHARAM, 1983), (TAO *et al.*, 2008), (ARAÚJO *et al.*, 2010), (CASTRO, 2012).

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

2.2.2 CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO SOLO

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

A resistividade elétrica (ou resistência elétrica específica) é uma característica específica de cada material que define o quanto ele se opõe à passagem de uma corrente elétrica. De acordo com CHAKER (1981) a resistividade do solo (ρ) é definida como a resistência elétrica (R) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (m) preenchido com este solo. Na Equação 1 é mostrada a definição matemática para a resistividade e sua unidade de medida no Sistema Internacional de medidas (SI) é $\Omega.m$ (Ohm vezes metro):

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}, \quad (1)$$

em que:

ρ – resistividade elétrica média do solo ($\Omega.m$);

R – resistência elétrica do solo (Ω);

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

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

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

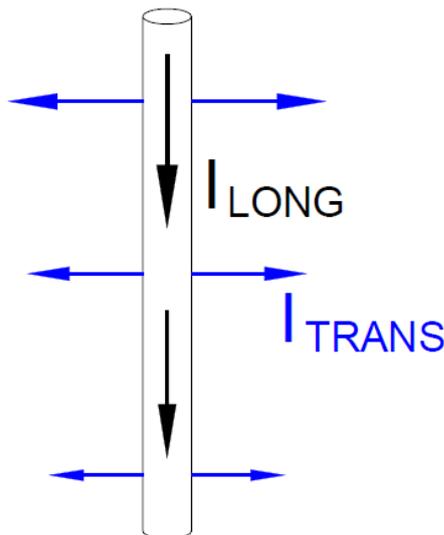
2.2.3 COMPORTAMENTO DE ATERRAMENTOS FRENTE A CORRENTES IMPULSIVAS

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

Para avaliação do comportamento do aterramento no contexto de um sistema elétrico, é necessário entender que a conexão à terra apresenta resistências, indutâncias e capacitâncias (além do efeito não linear provocado pelos campos gerados devido a passagem de corrente elétrica), com efeitos próprios e mútuos, constituindo em uma rede de elementos básicos que afetam a capacidade de condução de corrente e distribuição de potencial no solo circunvizinho aos eletrodos (HADDAD; WARNE, 2004).

Quando são submetidos a correntes impulsivas, os eletrodos de aterramento podem ser decompostos em partes elementares que compreendem um pequeno trecho do eletrodo e o solo vizinho. Tal elemento é caracterizado pela presença de duas correntes fundamentais: uma parcela de corrente transversal, que deixa o eletrodo e é dissipada no solo, e uma parcela de corrente longitudinal, que é transferida ao elemento de eletrodo seguinte (VISACRO, 2005). A representação em termos de componentes de circuitos resultante desta caracterização é mostrada na Figura 2.4.

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



Fonte: Reproduzida de (VISACRO, 2007).

- **Componente da Corrente Longitudinal:** formada pelas componentes de resistência e indutância. Ela é responsável pelas perdas internas no condutor e pela geração de campo magnético em volta dos caminhos de corrente. Essa componente é mostrada na Equação 2:

$$I_{long.} = I_R - j \cdot I_L, \quad (2)$$

em que:

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

I_R – componente de corrente resistiva;

I_L – componente de corrente indutiva.

- **Componente da Corrente Transversal:** formada pelas componentes de corrente de natureza condutiva e capacitiva. Ela é responsável pelo escoamento de corrente elétrica para o solo e pela geração de campo elétrico no solo. Essa componente é mostrada na Equação 3:

$$I_{trans.} = I_G + j \cdot I_C, \quad (3)$$

em que:

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

I_G – componente de corrente condutiva;

I_C – componente de corrente capacitiva.

O campo elétrico gerado devido à componente transversal determina o fluxo de correntes capacitivas e indutivas no solo. Portanto, a influência de indutâncias e capacitâncias no meio depende das características elétricas do solo e da frequência do sinal injetado (VISACRO, 2007). Para ocorrências de fenômenos lentos, Quando a frequência do sinal tem valor reduzido, ou seja, no caso de ocorrências próximas às condições de regime (valores próximos à frequência industrial), o aterramento pode ser tratado apenas por uma resistência e não mais pela impedância. Nesta condição, os efeitos reativos são bastante reduzidos, podendo ser desprezados.

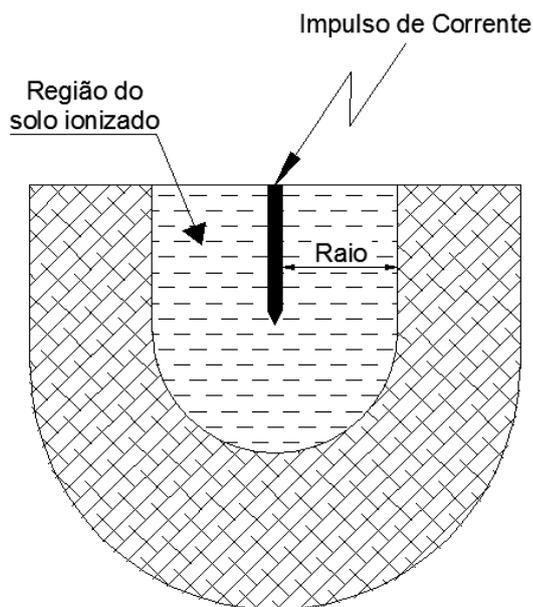
Os efeitos de uma descarga atmosférica fazem com que a análise de um sistema de aterramento seja mais complexa, pois os efeitos indutivo e capacitivo do solo devem ser considerados. Em contrapartida, o surto pode facilitar a passagem de corrente elétrica devido à ionização do ar que envolve hastes de aterramento juntamente com o solo.

2.2.4 IONIZAÇÃO DO MEIO

Um impulso de corrente, ao ser injetado no solo, gera campos elétricos. Quando o campo atinge valores críticos (que dependem da resistividade do solo e da umidade) é iniciado o de ionização do ar contido no solo (na vizinhança do eletrodo), alterando a impedância do aterramento e, conseqüentemente, proporcionando maior escoamento de correntes de surto (HADDAD; WARNE, 2004), (VISACRO, 2007).

Segundo KINDERMANN e CAMPAGNOLO (1995) o efeito da ionização do solo se comporta como se houvesse um aumento efetivo do raio do eletrodo. Porém, a região de aumento é limitada, ou seja, o solo em torno da haste é ionizado até uma distância limite (raio). Na Figura 2.5 pode ser observado o efeito a partir da injeção de um impulso de corrente elétrica.

Figura 2.5 – Representação da zona de ionização do solo.



Fonte: Reproduzida de (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Alguns estudos foram realizados acerca da influência da ionização do solo no comportamento dos sistemas de aterramento. ESPEL (2004) considera que a ionização do solo exerce grande influência sobre o comportamento de aterramentos submetidos a impulsos de corrente. Por outro lado, PEDROSA *et al.* (2011), ALÍPIO e VISACRO (2013) consideram que o efeito da ionização é superestimado provocando a redução do interesse de pesquisadores estudarem outros efeitos no solo, dentre eles a dependência das características elétricas do solo com a frequência do sinal aplicado.

2.2.5 GRANDEZAS PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE ATERRAMENTO

O comportamento esperado para um sistema de aterramento diante de descargas atmosféricas é que a impedância de surto da malha seja menor que a impedância equivalente do restante do sistema de aterramento, de modo a evitar que a corrente danifique os equipamentos ligados no sistema (VISACRO, 2007).

Nesse sentido, o comportamento do sistema de aterramento em baixa frequência é utilizado como referência para análise do mesmo sistema submetido a correntes impulsivas. A resistência em baixa frequência é uma grandeza representativa do comportamento de um sistema de aterramento submetido a sinais de frequências de ordem reduzida e corresponde à razão V/I , em que V e I são a tensão e corrente aplicadas à malha de aterramento, respectivamente (GRCEV, 2009).

VISACRO (2007) e GRCEV (2011) consideram que as principais grandezas representativas da resposta do aterramento ao impulso de corrente são: impedância transitória, impedância harmônica, impedância impulsiva, coeficiente impulsivo e comprimento efetivo do eletrodo.

a) Impedância Transitória

No domínio do tempo, a relação entre a tensão ($v(t)$) e a corrente ($i(t)$) define a impedância transitória do aterramento ($z(t)$), ou seja, ela é dada pela razão entre a tensão e a corrente elétrica (ao longo do tempo) no ponto de injeção, como pode ser observado na Equação 4:

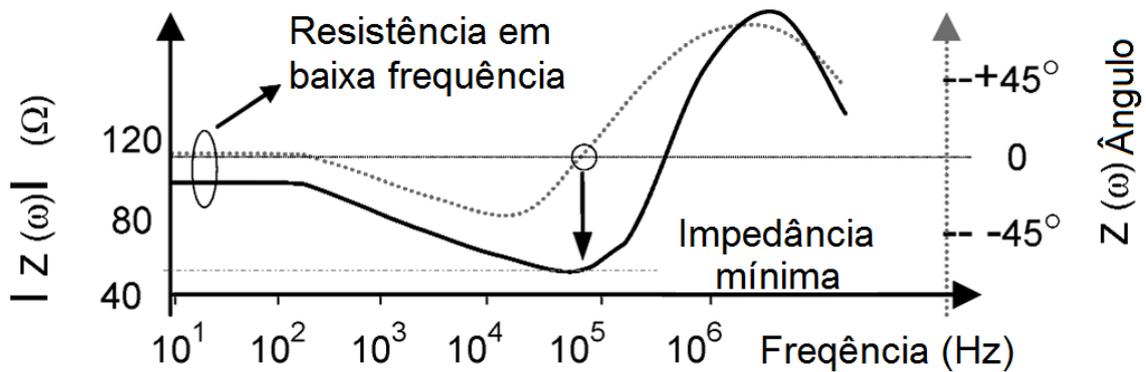
$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)}. \quad (4)$$

b) Impedância Harmônica

No domínio da frequência, a relação entre o sinal de tensão ($V(j\omega)$) e de corrente ($I(j\omega)$) aplicados define a impedância harmônica ($Z(j\omega)$), ou complexa, do aterramento. A relação é mostrada na Equação 5:

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)}. \quad (5)$$

Com o intuito de observar o comportamento da impedância de aterramento com relação à variação da frequência tem-se o resultado da simulação de um eletrodo horizontal enterrado no solo mostrado na Figura 2.6.

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

Fonte: Reproduzida de (VISACRO, 2007).

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

c) Impedância Impulsiva

Quando se considera o aterramento submetido a correntes impulsivas associadas a descargas atmosféricas, é muito comum se fazer referência à impedância impulsiva do aterramento (Z_p). Enquanto a impedância harmônica descreve o comportamento do aterramento no domínio da frequência, a impedância impulsiva é uma grandeza escalar, conceituada no domínio do tempo, que relaciona o valor de pico da tensão aplicada (V_p) e o valor de pico de corrente elétrica (I_p) desenvolvidos no ponto de injeção, como pode ser observado na Equação 6 (GUPTA; THAPAR, 1980):

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}. \quad (6)$$

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

d) Coeficiente Impulsivo

O coeficiente impulsivo (A_{imp}) é definido como a relação entre a impedância impulsiva (Z_p) e a resistência de aterramento em baixa frequência (R_{LF}), como pode ser observado na Equação 7:

$$A_{imp} = \frac{Z_p}{R_{LF}}. \quad (7)$$

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

e) Comprimento Efetivo do Eletrodo

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

Em (VISACRO, 2007) concluiu-se que na utilização de eletrodos curtos, ou seja, menores que o comprimento efetivo, a impedância impulsiva é menor que a resistência em baixa frequência, logo o coeficiente impulsivo é menor que 1. Já para eletrodos maiores que o comprimento efetivo, a impedância impulsiva mostrou-se maior que a resistência de aterramento em baixa frequência.

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica sobre sistemas de aterramento. Inicialmente são mostrados em uma tabela os trabalhos mais relevantes na área, em seguida, é descrita a contribuição de alguns trabalhos. Os principais trabalhos realizados sobre sistemas de aterramento e injeção de correntes em baixa frequência e correntes impulsivas são mostrados nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1 – Resumo das principais contribuições na área de aterramentos.

Pesquisadores	Estudo realizado
Bellaschi (1935)	Avaliação dos efeitos e magnitudes de correntes provenientes de descargas atmosféricas.
Dwight (1936)	Trabalhou com fórmulas para o cálculo da resistência de aterramento em baixa frequência.
Sunde (1940)	Estudou as características impulsivas em condutores enterrados.
Dvegan e Whitehead (1973)	Mostraram a dependência da impedância transitória com as características elétricas do solo.
Liew e Darveniza (1974)	Modelo analítico para descrição do comportamento da não linearidade do solo.
Gupta e Thapar (1980)	Apresentaram um método de determinação da indutância em um sistema de aterramento.
Kosztaluk <i>et al.</i> (1981)	Mostraram a influência do fenômeno de ionização sobre o comportamento dinâmico de aterramentos.
Meliopoulus e Moharam (1983)	Alertaram que a determinação da impedância impulsiva contém uma incerteza.
Sekioka <i>et al.</i> (1998)	Dependência da resistência de aterramento em relação à corrente.
Visacro e Rosado (2009)	Influência do comprimento do eletrodo no coeficiente impulsivo.
Grcev (2009; 2011)	Formulação e análise dos parâmetros elétricos do solo.

Tabela 3.2 – Continuação: Resumo das principais contribuições na área de aterramentos.

Pesquisadores	Estudo realizado
Haddad <i>et al.</i> (2010)	Mostrou que a dependência da resistência impulsiva em relação à duração do impulso e a intensidade da corrente elétrica injetada não devem ser consideradas para modelar sistemas de aterramento.
Araújo <i>et al.</i> (2010)	Realizaram ensaios para medição de propagação de tensão e um malha de aterramento.
Pedrosa <i>et al.</i> (2011)	Mostraram a dependência dos parâmetros elétricos do solo em relação à frequência.
Alípio e Visacro (2013)	Apresentaram um trabalho experimental para determinar a dependência dos parâmetros elétricos do solo em relação à frequência do sinal.
Clark (2014), Guo (2014)	Trabalharam com simulações e experimentações para avaliação de transitórios quando um sistema de aterramento é submetido a correntes impulsivas.
Souza <i>et al.</i> (2014)	Verificaram o efeito de ionização do solo a partir do comportamento de descargas em linhas de transmissão.
Castro <i>et al.</i> (2014)	Realizaram um trabalho experimental do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica.

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

DWIGHT (1936) trabalhou com uma série de fórmulas práticas para o cálculo da resistência de aterramento em baixa frequência para diferentes configurações de eletrodos de aterramento.

DVEGAN e WHITEHEAD (1973) utilizaram de formulações matemáticas para mostrar que a impedância transitória de um sistema de aterramento tem resposta distinta, ao longo do tempo, variando de acordo com a resistividade elétrica do solo e a dimensão dos eletrodos. No trabalho também é mostrado diversas curvas de impedância transitória para solos com diferentes resistividades. Foi observado que para solos com resistividade elevada (valores maiores que $1000 \Omega\text{m}$) a impedância transitória tende a se elevar ao longo do tempo, já para solos com resistividades mais baixas (valores menores que $700 \Omega\text{m}$) a impedância transitória tende a decair ao longo do tempo.

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

KOSZTALUK *et al.* (1981) realizaram um trabalho experimental em que foi considerado o fenômeno de ionização solo para assim propor um modelo de representação. A partir dos resultados, eles mostraram que o solo pode ser tratado como um elemento não linear, visto que o comportamento dinâmico de sistemas de aterramento submetido a correntes impulsivas é influenciado pelo sinal que é aplicado.

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

ARAÚJO *et al.* (2010) realizaram ensaios de impulso de corrente em sistemas de aterramento compostos por uma haste e por quatro hastes interconectadas formando um quadrado. Eles mostraram que devido à heterogeneidade do solo pontos distintos de

medição apresentaram diferentes níveis de tensão, apesar de as distâncias de captação do sinal serem as mesmas, porém em direções distintas.

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

CASTRO *et al.* (2014) realizaram uma avaliação experimental do comportamento da impedância impulsiva e da impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica em relação à amplitude da corrente injetada no solo, bem como da frequência do sinal aplicado. Foi observado que a impedância impulsiva 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.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos material e métodos empregados nas medições em laboratório, com o objetivo de avaliar o comportamento de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica.

Nos ensaios são utilizados um gerador de impulsos de corrente, um osciloscópio digital, pontas de prova de alta tensão, hastes de aterramento e um varistor.

4.1 GERADOR DE IMPULSOS DE CORRENTE ELÉTRICA

Para a aplicação de sinais impulsivos no solo, utiliza-se um gerador de impulsos de corrente elétrica 80 kJ/100 kV, de oito estágios, fabricado pela HAEFELY, pertencente ao LAT/UFMG (Laboratório de Alta Tensão/Universidade Federal de Campina Grande). Na Figura 4.1 (a) é mostrada uma fotografia do gerador e na Figura 4.1 (b) uma fotografia de sua mesa de controle.

Figura 4.1 – Fotografias: (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.



(a)



(b)

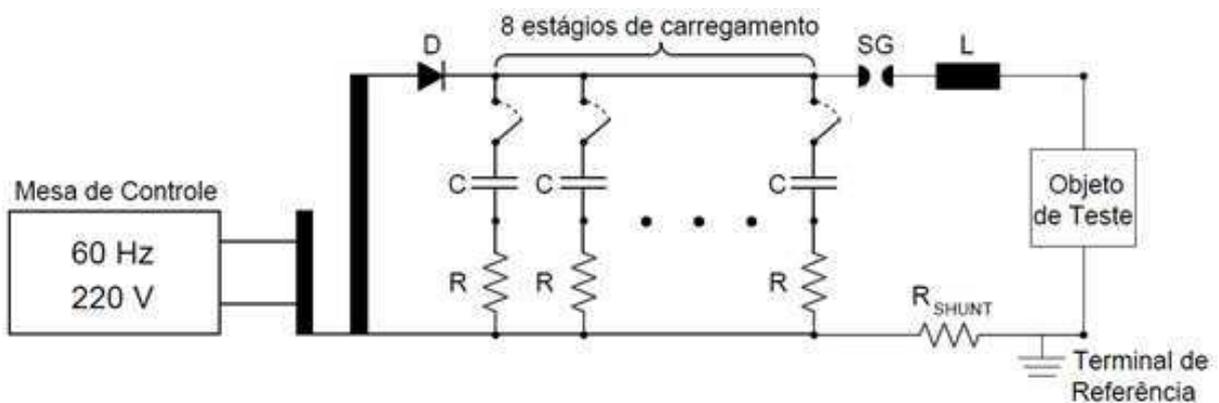
Fonte: Produzida pelo autor.

O gerador (Figura 4.1(a)) é formado por oito estágios de carregamento em paralelo. Cada estágio é composto por um capacitor de 2 μF e uma resistência variável e, dependendo da quantidade de estágios interligados, o gerador pode atingir uma tensão máxima de carregamento de 100 kV. Já os controles da mesa (Figura 4.1(b)) envolvem, entre outras funções, a operação do regulador de tensão, o controle da tensão de

carregamento e a polaridade do impulso desejado. Para o carregamento do gerador, utiliza-se a tensão na rede elétrica fornecida pela concessionária local.

Com o gerador, podem-se produzir sinais de $8/20 \mu\text{s}$, que representam a forma de onda da descarga atmosférica, e também, sinais de $4/10 \mu\text{s}$. De forma geral, é possível obter impulsos de corrente com diferentes tempos de frente e diversas amplitudes, bastando, para tal, realizar o ajuste adequado dos elementos resistivos, indutivos e capacitivos do circuito (LIRA *et al.*, 2010). O diagrama esquemático do gerador de impulsos é mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Diagrama esquemático do gerador de impulso.



Fonte: Reproduzida de (Modrusan, 1999).

Para auxílio na geração de correntes impulsivas é utilizada uma mesa de controle, conectada ao próprio gerador. Inicialmente, as esferas ou centelhadores (SG) são afastadas para uma distância segura, garantindo que não haja descargas antes do programado. Então, devem-se carregar os capacitores com a tensão desejada e, a partir da aproximação dos centelhadores ocorre descarga entre as esferas em direção ao objeto de teste. A corrente elétrica gerada percorre o objeto de teste, no caso deste trabalho, o varistor de ZnO (Óxido de Zinco), utilizados para ajustes na configuração do gerador de impulsos, ou o solo. A determinação da corrente de descarga é 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 valores de $5,488 \text{ m}\Omega$ ou $10,54 \text{ m}\Omega$. A partir do conhecimento do valor do R_{SHUNT} e da queda de tensão produzida nele, pode-se determinar o valor da corrente de descarga.

4.2 MATERIAL

O solo utilizado para aplicação de correntes impulsivas encontra-se nas proximidades do LAT, na cidade de Campina Grande, localizada no Agreste da Borborema. Segundo informações publicadas no portal eletrônico do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), Campina Grande tem o clima quente e úmido, caracteriza-se por apresentar chuvas concentradas nos meses de outono e inverno e um período de estiagem de 5 a 6 meses. O período seco começa em novembro e prolonga-se até o mês de fevereiro, sendo o mês de novembro o mais seco. Por sua vez, a estação chuvosa inicia em abril e termina em agosto, sendo o mês de julho o de maior precipitação. As temperaturas médias anuais são elevadas e variam de 22 °C a 26 °C e a umidade relativa do ar não é uniforme, variando de 45% a 90% ao longo do dia.

O solo em que se encontra o sistema de aterramento apresenta estratificação com três camadas. A primeira camada com resistividade média ρ_1 de 43,19 Ωm e altura h_1 de 0,75 m, a segunda camada com resistividade média ρ_2 de 6,24 Ωm e altura h_2 de 0,55 m, e a terceira camada com resistividade média ρ_3 de 76,10 Ωm e altura h_3 infinita. O solo possui estrutura geológica dura e rochosa. Em períodos de pouca chuva, com o solo muito seco, torna-se difícil o cravamento de hastes. As medições de resistividade do solo são realizadas de acordo com o método de Wenner, em concordância com a norma NBR 7117 (Norma Brasileira de Regulamentação 7117). Para obter a estratificação do solo, é utilizado o software TecAt Plus 5.2 (RODRIGUES, 2012).

Para injeção de corrente impulsiva no solo é utilizada um haste de aço, revestida em cobre, medindo 1,20 m de comprimento, 13 mm de diâmetro e enterrada a 1,00 m no solo. Já para aquisição de sinais de tensão propagados, são utilizadas hastes auxiliares de aço, revestidas em cobre, medindo 0,50 m de comprimento, 11 mm de diâmetro e enterradas a 0,40 m do solo. Na Figura 4.3 (a) e (b) são mostradas fotografias das hastes de injeção e auxiliares, respectivamente.

Figura 4.3 – Fotografias: (a) haste de injeção de corrente; (b) haste auxiliar para aquisição da tensão propagada.



(a)

(b)

Fonte: Produzida pelo autor.

4.3 MÉTODOS

Para a realização dos ensaios, utiliza-se um osciloscópio digital, pontas de prova de alta tensão, cabos blindados (coaxial), hastes de aterramento (tanto para injeção de corrente quanto para aquisição de dados) e um gerador de impulsos. Após a aquisição dos dados, deve-se utilizar um computador e rotina computacional para o processamento das informações obtidas.

Os sinais aplicados e propagados no solo são adquiridos por meio do osciloscópio e das pontas de prova de alta tensão (que suportam até um máximo de 40 kV de pico). As pontas de prova atenuam o nível de tensão e, assim, asseguram que o osciloscópio não seja danificado. É importante ressaltar que tanto para o processo de injeção de corrente quanto para aquisição de sinais são utilizados cabos coaxiais blindados, com o objetivo de reduzir os efeitos de capacitâncias parasitas.

A região em que se aplicam os impulsos de corrente é isolada por meio de postes de sinalização e fita zebra. Durante os ensaios, é realizado o controle de pessoas e animais na área isolada.

A metodologia aplicada para se atingir os resultados encontra-se dividida em quatro etapas:

Etapa 1 – Medição da resistência de aterramento em baixa frequência.

Etapa 2 – Escolha do sinal de corrente a ser aplicado no solo a partir da definição da configuração do gerador de impulsos.

Etapa 3 – Realização de ensaios usando o sinal escolhido variando-se a tensão de carregamento dos capacitores de 15 kV até 35 kV, em intervalos de 5 kV.

Etapa 4 – Realização de ensaios com impulsos de corrente de diferentes tempos de frente e mantendo-se a tensão de carregamento dos capacitores em 20 kV.

4.3.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO EM BAIXA FREQUÊNCIA (ETAPA 1)

A medição da resistência de aterramento em baixa frequência (R_{LF}) é realizada com o terrômetro digital modelo AEMC Instruments 6472, pertencente ao LAT/UFCG. Além do terrômetro, outros equipamentos (acessórios) são utilizados na medição, tais como: um *kit* contendo uma marreta, rolos de cabos isolados (com comprimentos distintos e bitolas de 2,5mm²), uma trena e duas hastes de aço revestidas por cobre (com 0,50 m de comprimento e 11 mm de diâmetro cada). O conjunto completo utilizado na medição é mostrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Fotografia do terrômetro e seus acessórios.

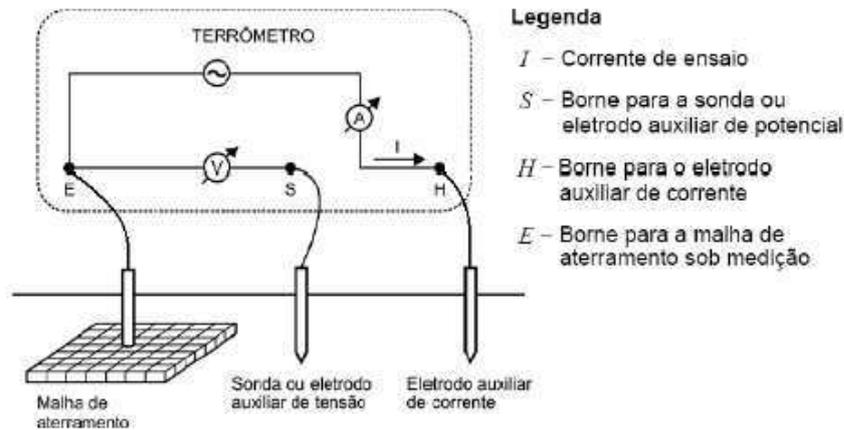


Fonte: (RODRIGUES, 2012).

O método para medição da R_{LF} , também conhecido por MQP (Método da Queda de Potencial), consiste em fazer circular uma corrente através da malha (ou haste) de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha 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 referida ao infinito e a corrente que a gerou.

No processo de medição, o eletrodo auxiliar de tensão deve ser deslocado ao longo de uma direção predefinida, a partir da periferia do sistema de aterramento sob ensaio, em intervalos regulares de medição iguais a 5% da distância entre a malha de aterramento e o eletrodo de corrente. Este processo está esquematizado na Figura 4.5 (NBR 15749, 2009).

Figura 4.5 – Esquema para medição da resistência de aterramento.



Fonte: (NBR 15749, 2009).

Para a realização da medição, inicialmente configura-se o terrômetro com as características do experimento e os cabos de ligação entre o terrômetro e as hastes auxiliares são conectados. O eletrodo auxiliar de corrente é cravado no solo a uma distância de 19 m da malha de aterramento. O eletrodo auxiliar de tensão é cravado a distâncias variáveis, começando a 1 m do eletrodo de corrente e variando-se de 1 em 1 m até alcançar a distância de 18 m do eletrodo de corrente. Para cada posição da haste de tensão o terrômetro é configurado e acionado para determinação da resistência de aterramento. Os valores registrados no terrômetro são armazenados para análise.

Com os valores de resistência de terra medidos e as respectivas distâncias utilizadas na medição em campo, é traçada uma curva em função da distância entre a malha de terra e o eletrodo auxiliar de corrente. A partir da análise da curva, determina-se a região de patamar do gráfico, que corresponde ao valor da resistência de aterramento do sistema sob ensaio.

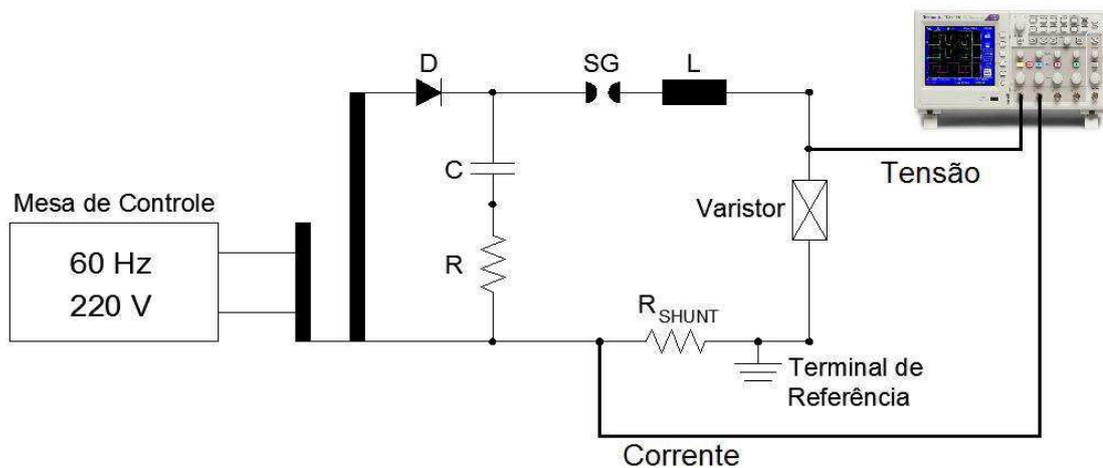
4.3.2 ESCOLHA DO SINAL DE CORRENTE A SER APLICADO NO SOLO (ETAPA 2)

Esta etapa descreve os procedimentos envolvidos na escolha do sinal de corrente adequado. Aqui são definidos os parâmetros do gerador, possibilitando a aplicação dos sinais a serem utilizados na etapa 3. O gerador de impulsos de corrente é ajustado com

base em ensaios realizados em varistores e, depois de ajustadas as configurações do gerador, os sinais de corrente são aplicados no solo.

Pelo exposto, inicialmente, o objeto de teste utilizado é um varistor de ZnO, para caracterização do sinal de corrente. Os sinais de tensão e corrente são adquiridos e registrados no osciloscópio. A configuração do ensaio é mostrada na Figura 4.6.

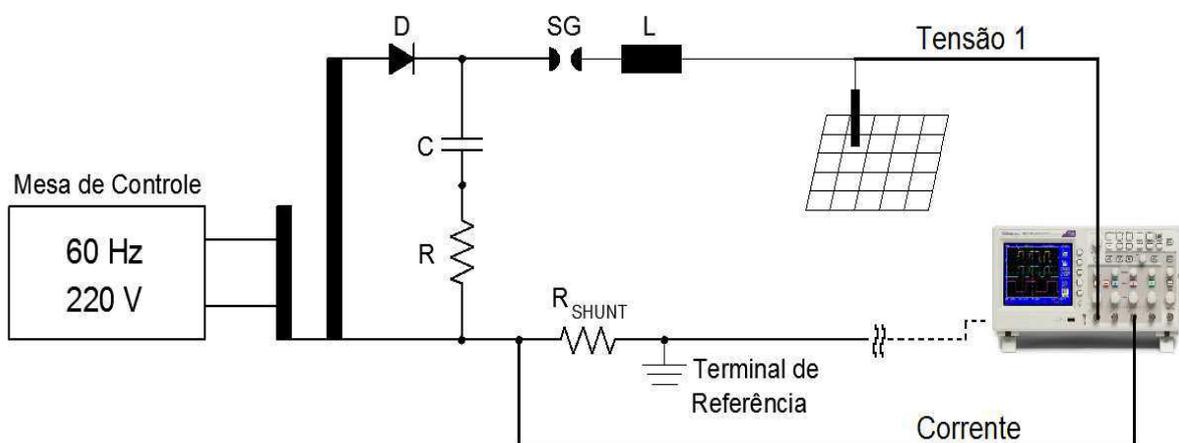
Figura 4.6 – Configuração do ensaio com o varistor para aquisição dos sinais de tensão e corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Já para a caracterização do sinal de corrente aplicado no solo, é utilizada uma haste de injeção. Aplicam-se impulsos de corrente e os sinais de tensão e corrente desenvolvidos são registrados no osciloscópio. Na Figura 4.7 é apresentado o esquema do ensaio em que o objeto de teste foi o sistema de aterramento.

Figura 4.7 – Configuração do ensaio no solo para aquisição dos sinais de tensão e corrente.



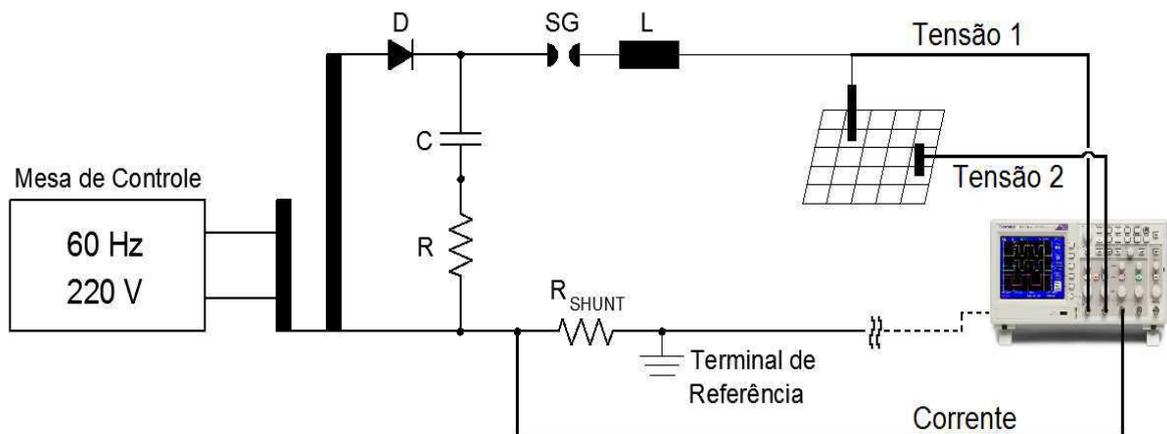
Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da validação da configuração do gerador com os resultados de (LIRA *et al.*, 2010), utiliza-se uma combinação de resistores, capacitores e indutor com o objetivo de gerar sinal de corrente característico de descargas atmosféricas.

4.3.3 ENSAIOS COM O SINAL DE CORRENTE ESCOLHIDO E VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CARREGAMENTO (ETAPA 3)

A partir do sinal definido na etapa 2, são realizadas cinco aplicações de correntes impulsivas no solo. A configuração do gerador utilizada é para geração de corrente 8/20 μ s e varia-se a tensão de carregamento dos capacitores entre 15 kV e 35 kV, em passos de 5 kV. A tensão e a corrente são adquiridas na haste de injeção e, também, é adquirida a tensão propagada no solo através de duas hastes auxiliares (não são utilizadas simultaneamente) posicionadas a 5 e 10 m do ponto de injeção de corrente. O esquema do ensaio é apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 – Esquema de aplicação e aquisição de sinais de tensão e corrente no solo.



Fonte: Produzida pelo autor.

O processamento dos dados é realizado mediante o uso de rotinas computacionais, em que as impedâncias impulsiva e transitória do sistema de aterramento são avaliadas.

4.3.4 ENSAIOS COM IMPULSOS DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS MANTENDO-SE A TENSÃO DE CARREGAMENTO CONSTANTE (ETAPA 4)

Com o intuito de se obter a geração de sinais de diferentes frequências (T_f distintos), oito configurações distintas do gerador de impulsos são escolhidas a partir dos resultados de (LIRA *et al.*, 2010). Os sinais escolhidos representam o de maior e de menor T_f e outros seis intermediários.

Para a consumação do ensaio, cinco aplicações consecutivas de correntes impulsivas são realizadas no solo e a tensão de carregamento é mantida constante em 20 kV para cada configuração do gerador. Os sinais de tensão e corrente são adquiridos em duas hastes. Na primeira haste, a aquisição realizada é da tensão e corrente injetadas no solo. Já na segunda haste, capturam-se os sinais de tensão propagados no solo. Ainda com relação a segunda haste, ela é posicionada ou a 5 m ou a 10 m da haste de injeção e a escolha dessa posição é realizada conforme a opção dos pesquisadores. O esquema do ensaio também está representado na Figura 4.8.

O processamento dos dados é realizado a partir de rotinas computacionais, em que as impedâncias impulsiva e transitória do sistema de aterramento são determinadas para posterior análise.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises sobre os ensaios realizados em sistema de aterramento submetido a correntes em baixa frequência e correntes impulsivas. O capítulo foi dividido em quatro tópicos seguindo o mesmo modelo da metodologia utilizada no capítulo anterior.

5.1 RESISTÊNCIA EM BAIXA FREQUÊNCIA

Nesta seção são apresentados os resultados e análises da medição da resistência em baixa frequência a partir de gráficos e tabelas. Antes da realização das medições foram verificadas as condições climáticas da região. O ensaio foi realizado no dia 06 de novembro de 2014, com temperatura ambiente média de 26,9 °C, pressão atmosférica de 723 mmHg e umidade relativa do ar de 56%.

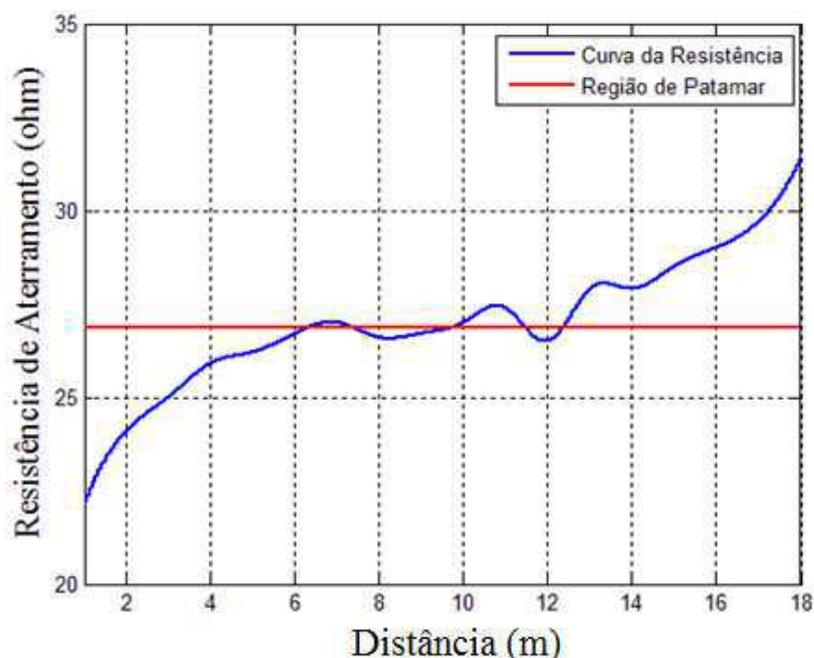
Os valores da R_{LF} medidos pelo terrômetro em função da distância entre o eletrodo auxiliar de tensão e o sistema de aterramento são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados da medição da resistência de aterramento.

Distância (m)	Resistência (Ω)	Distância (m)	Resistência (Ω)
1	22,1	10	27,0
2	24,1	11	27,4
3	25,0	12	26,5
4	25,9	13	27,9
5	26,2	14	27,9
6	26,7	15	28,5
7	27,0	16	29,0
8	26,6	17	29,7
9	26,7	18	31,4

Utilizando-se uma rotina computacional, os dados da Tabela 5.1 foram plotados em um gráfico. Para melhor visualização do gráfico, um método numérico (interpolação linear) foi utilizado na rotina computacional com o intuito de suavizar a curva plotada, mostrada na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Gráfico da resistência de aterramento *versus* a distância entre o eletrodo auxiliar de tensão e o sistema de aterramento.



Fonte: Produzida pelo autor.

Devido à dificuldade em se obter uma reta horizontal na região de patamar, a determinação da R_{LF} foi feita conforme indicado em norma (NBR 15749, 2009). Segundo esta norma, o valor da resistência de aterramento é obtido quando, em três leituras sucessivas, a diferença entre cada uma das medidas realizadas e a média das três medições não for maior do que 10% da média citada.

Assim, tomaram-se os valores das resistências medidas com relação às distâncias 7, 8 e 9 m e calculou-se a média e as diferenças percentuais. Desse modo foi atendido o que é referenciado na norma, a R_{LF} encontrada foi de 26,77 Ω . O valor determinado encontra-se acima do que estipula a NBR 15749 (2009) que é 25 Ω . Como as medições foram realizadas na época de seca o valor de R_{LF} foi considerado elevado. Os valores são mostrados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Dados para determinação da resistência de aterramento.

Medidas (Ω)	Média (Ω)	Diferença (%)
27,0	26,77	0,85
26,6		0,64
26,7		0,26

Retornando à análise do gráfico mostrado na Figura 5.1, conclui-se que há uma região de patamar. Desta forma, o espaçamento entre o eletrodo auxiliar de corrente e a

malha de aterramento foi adequado, visto que não há superposição das áreas de influência dos potenciais provocados no solo pelos eletrodos de corrente e tensão (NBR 15749, 2009), (HADDAD; WARNE, 2004).

5.2 CONFIGURAÇÃO DO GERADOR DE IMPULSOS

A segunda etapa do trabalho consistiu na avaliação do próprio gerador de impulso de corrente, configurando-o para aplicação de sinais impulsivos no objeto de teste e, desse modo, garantir a geração de sinais 8/20 μ s (representativos de descargas atmosféricas). A configuração do gerador para permitir a obtenção de sinais representativos de descargas atmosféricas foi avaliada com o uso de varistores de ZnO. Uma vez ajustado o gerador, os impulsos de corrente eram aplicados ao solo.

Assim, inicialmente é realizada a análise da aplicação de correntes impulsivas no varistor de ZnO e, em seguida, é realizada a análise da aplicação de correntes impulsivas no solo, bem como um comparativo entre os resultados apresentados. As medições foram realizadas no dia 07 de novembro de 2014, com temperatura ambiente média de 27,4 °C, pressão atmosférica de 721 mmHg e umidade relativa do ar de 53%.

5.2.1 INJEÇÃO DE CORRENTE IMPULSIVA EM VARISTOR DE ZNO

Inicialmente, escolheu-se um varistor de ZnO sem danos aparentes para servir como objeto de teste. Os dados técnicos do varistor são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Dados técnicos do varistor utilizado para verificação do gerador de impulsos.

Dados Técnicos do Varistor de ZnO	
Quantidade	1
Altura	28 \pm 0,5 mm
Diâmetro	41 \pm 1,0 mm
Classe	1
Tensão nominal	4 kV _{RMS}
Tensão de operação contínua	3,4 kV _{RMS}
Corrente nominal de descarga	10 kA
Tensão residual para impulso atmosférico de 5 kA	12,43 kV _{PICO}
Tensão residual para impulso atmosférico de 10 kA	13,2 kV _{PICO}
Tensão residual para impulso atmosférico de 20 kA	14,9 kV _{PICO}

Fonte: Reproduzida de (BRITO, 2013).

Com o objetivo de reproduzir um sinal característico de descargas atmosféricas 8/20 μ s, utilizou-se uma configuração específica do gerador de impulsos. A combinação dos elementos R , L e C utilizados no gerador é mostrada na Tabela 5.4.

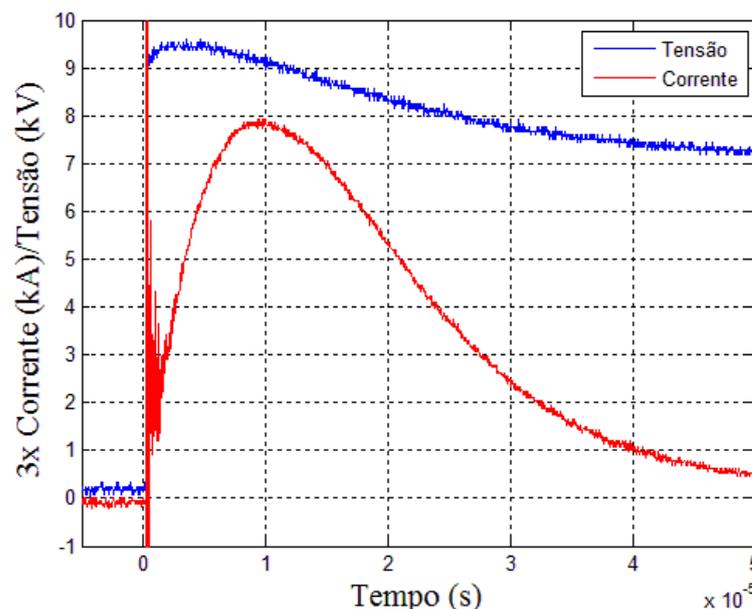
Tabela 5.4 – Configuração do gerador de impulsos.

Configuração Utilizada	
Número de Estágios	5
Resistor	5 Ω
Indutor	5,7 μ H
Capacitor	2 μ F
R_{SHUNT}	10,54 m Ω

A partir da combinação dos elementos do gerador de impulsos, foram aplicados sinais de tensão e corrente no varistor três vezes consecutivas. O sinal de tensão foi obtido diretamente do osciloscópio e, a partir de rotina computacional, a média dos três sinais foi calculada e plotada em um gráfico. A determinação do sinal de corrente foi viabilizada utilizando-se um resistor *shunt* (R_{SHUNT}), em que a partir da aquisição do sinal de tensão aplicado no objeto de teste e com o valor do R_{SHUNT} conhecido, determina-se o sinal de corrente injetado. Novamente, a média dos três sinais de corrente foi calculada e plotada em um gráfico.

Os dois sinais aplicados no varistor estão representados na Figura 5.2 e, para uma melhor visualização, o sinal de corrente foi ampliado em três vezes.

Figura 5.2 – Forma de onda dos sinais de tensão e corrente aplicados no varistor.



Fonte: Produzida pelo autor.

Devido às dificuldades de gerar em laboratório os impulsos com os valores exatos do impulso padrão, a norma (IEC 60-1, 1989) admite uma tolerância de $\pm 10\%$ para os tempos de frente (T_f) e de meia cauda (T_{mc}). Dessa forma, um impulso atmosférico simulado em laboratório é considerado padrão (8/20 μs) se possuir as seguintes características:

- T_f : 8 $\mu\text{s} \pm 10\% \rightarrow 7,2 \mu\text{s}$ a 8,8 μs ;
- T_{mc} : 20 $\mu\text{s} \pm 10\% \rightarrow 18 \mu\text{s}$ a 22 μs .

A partir da análise do gráfico e de formulações matemáticas (ver item 2.1.1 do Capítulo 2), os tempos de frente (T_f) e de meia cauda (T_{mc}) do sinal de corrente determinados foram:

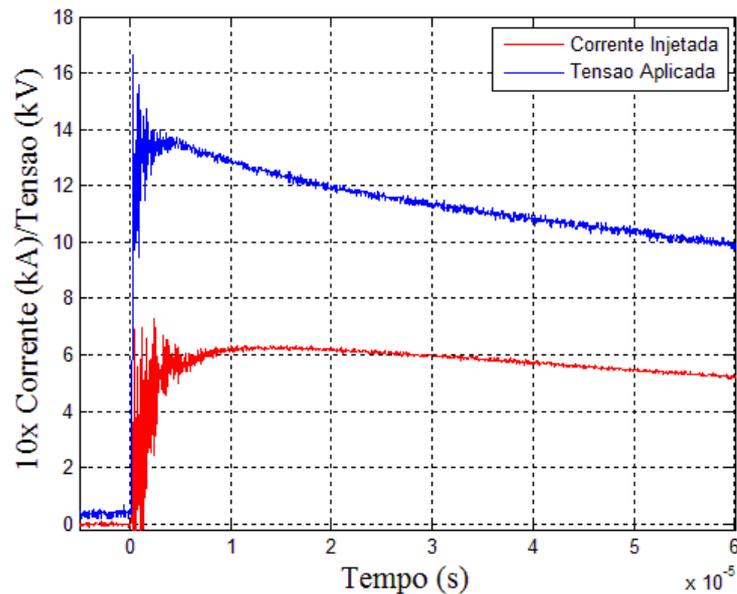
- $T_f = 8,6 \mu\text{s}$;
- $T_{mc} = 24 \mu\text{s}$.

Observa-se, então, que o tempo de frente do sinal de corrente reproduzido no gerador está dentro da tolerância estabelecida em norma. Já o tempo de meia cauda não atendeu o que estipula a norma, apresentando variação de 20%.

5.2.2 INJEÇÃO DE CORRENTE IMPULSIVA NO SOLO

O mesmo procedimento realizado no varistor foi, então, realizado no solo. Assim, as características elétricas intrínsecas do solo passam a ter influência no circuito e, portanto, os sinais de tensão e corrente obtidos apresentaram comportamento distinto dos sinais aplicados no varistor. A configuração do gerador de impulsos utilizada é a descrita na Tabela 5.4

Os sinais aplicados no solo estão representados na Figura 5.3 e, para uma melhor visualização, o sinal de corrente foi ampliado em dez vezes.

Figura 5.3 – Forma de onda dos sinais de tensão e corrente aplicados no solo.

Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da análise do gráfico e de formulações matemáticas (ver item 2.1.1 do Capítulo 2), os tempos de frente (T_f) e de meia cauda (T_{mc}) do sinal de corrente determinados foram:

- $T_f = 11 \mu\text{s}$;
- $T_{mc} \approx 150 \mu\text{s}$.

Com relação ao tempo de meia cauda do sinal de corrente aplicado no solo, foi realizada uma estimativa do seu valor, já que a resolução utilizada no osciloscópio não contemplou a forma de onda completa. Apesar disso, a comparação entre os tempos de meia cauda dos sinais de corrente aplicados no varistor e no solo mostra que o decaimento do sinal no solo é bem mais lento que no caso do varistor. A diferença pode ser explicada devido à influência da componente capacitiva do solo.

Analisando os gráficos mostrados nas Figuras 5.2 e 5.3, a diferença entre os sinais adquiridos em cada um dos objetos de teste é notória. O fato já era esperado, devido às diferentes características elétricas do varistor e do solo. Porém, o objetivo do ensaio era garantir uma configuração de referência do gerador.

5.3 ENSAIOS COM CONFIGURAÇÃO FIXA DO GERADOR E VARIAÇÃO DA TENSÃO DE CARREGAMENTO

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos a partir da injeção de correntes impulsivas em uma haste aterramento, utilizando-se a mesma configuração do

gerador da etapa anterior, descrita na Tabela 5.4, e tensão de carregamento dos capacitores variável.

O objetivo das medições é avaliar a impedância impulsiva, Z_p , a impedância transitória, $z(t)$, e a propagação do sinal de tensão no solo quando se varia o nível de tensão aplicado ao solo (tensão de carregamento). O tópico foi dividido em três itens, contemplando cada tipo de análise.

Durante os ensaios, cinco diferentes níveis de tensão de carregamento dos capacitores foram utilizados, iniciando em 15 kV e com passos de 5 kV até se atingir o máximo de 35 kV (tensão de segurança para as pontas de prova de alta tensão). Para cada um dos níveis de carregamento, foram realizados cinco ensaios consecutivos, nos quais foram capturados os sinais de tensão e de corrente. Em seguida, foram feitas as médias dos cinco sinais, de modo a se determinar os sinais de tensão e corrente aplicados ao solo e os sinais de tensão propagados no solo. A partir dos sinais tratados, o cálculo de Z_p e $z(t)$ foi realizado.

Os ensaios foram realizados no dia 14 de novembro de 2014 a uma temperatura média de 26,2 °C, pressão atmosférica de 723 mmHg e umidade relativa do ar de 58%.

5.3.1 AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA

Para o cálculo de Z_p , os valores de pico da tensão e da corrente injetados no solo foram obtidos por meio de rotina computacional. Os valores de Z_p e sua variação percentual são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores de Z_p com relação à amplitude do sinal aplicado.

Tensão de Carregamento (kV)	V (kV)	I (kA)	$Z_p(\Omega)$	Variação
15	13,3705	0,6232	21,45	-----
20	17,7832	0,9232	19,26	10,21
25	21,4632	1,1960	17,95	16,32
30	26,1011	1,5979	16,33	23,87
35	30,1474	1,9686	15,31	28,62

Os resultados demonstram que Z_p sofreu variação considerável quando a tensão de carregamento dos capacitores foi elevada. Os resultados evidenciam que quando a tensão de carregamento dos capacitores é aumentada a impedância impulsiva é reduzida, atingindo variação de 28,62%, quando se compara as impedâncias impulsivas

obtidas com carregamento de 15 kV e 35 kV.

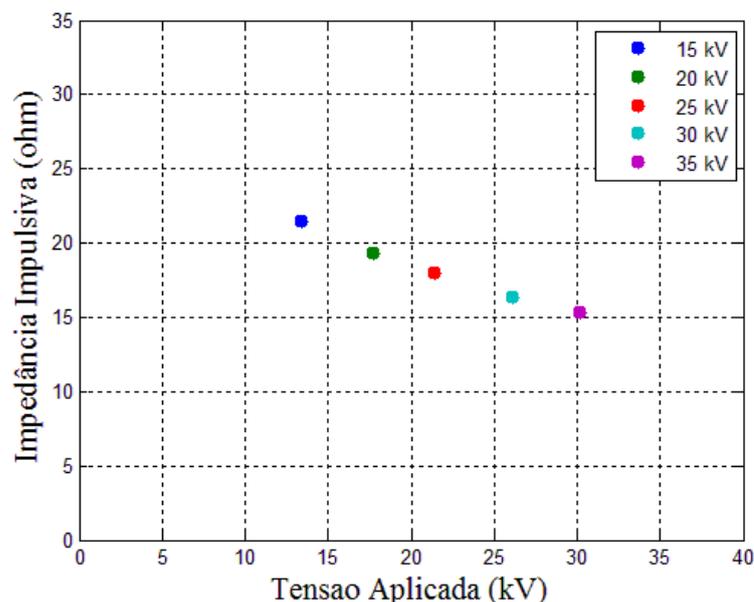
Resultado semelhante foi obtido por DIAZ e SILVA (2011). Eles observaram que a injeção de sinais de corrente com mesmos tempos de frente e amplitudes variadas (entre 20 kV e 60 kV) provocaram respostas distintas do aterramento, em que a impedância impulsiva determinada foi menor para os maiores valores de tensão aplicada. Eles atribuíram tal comportamento ao efeito da ionização do solo.

De acordo com MOUSA (1998), o fenômeno de ionização do solo é provocado pelo campo elétrico crítico (campo necessário para criação de pequenos canais de descargas com condutividade elevada) gerado pelos sinais injetados em uma malha de aterramento. Sabendo que o campo elétrico é diretamente proporcional à tensão que o gerou e que, a partir da Tabela 5.5, quanto maior foi a tensão de carregamento dos capacitores menor foi o valor de Z_p , há forte tendência que a redução verificada tenha sido provocada, de fato, pela ionização do solo.

Em contrapartida, CASTRO *et al.* (2014) observaram que a impedância impulsiva independe da amplitude do sinal injetado quando não há variação significativa nos tempos de frente da corrente. Em seus ensaios, ela trabalhou com umidade relativa do ar em torno de 80%, em período chuvoso. Tais fatos podem ter contribuído para a atenuação do efeito de ionização do solo.

Os resultados da impedância impulsiva, Z_p , e a tensão aplicada ao solo mostrados na Tabela 5.5, foram plotados em um gráfico mostrado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Gráfico de Z_p em função da tensão de carregamento dos capacitores.



Fonte: Produzida pelo autor.

Em seguida, foram analisados os tempos de crista dos sinais de tensão e corrente aplicados ao solo. Foi observado que os picos dos sinais não ocorrem no mesmo instante de tempo, como é mostrado na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Tempo de crista dos sinais de tensão e corrente.

Tensão de Carregamento (kV)	Tempo de crista da tensão (μs)	Tempo de crista da corrente (μs)
15	3,64	12,28
20	3,96	5,16
25	2,72	7,56
30	3,36	7,52
35	2,72	7,84

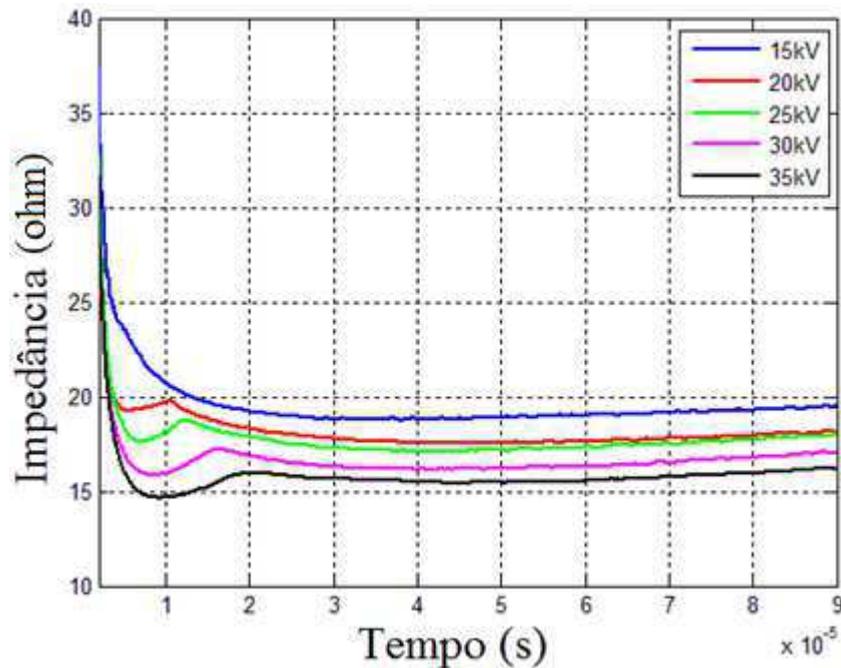
Para todas as tensões de carregamento dos capacitores do gerador de impulso, observa-se que o pico do sinal de tensão ocorreu primeiro que o pico do sinal de corrente. Tal fato pode trazer implicações para o sistema elétrico, pois no instante em que a tensão é máxima, a corrente ainda não foi drenada pela malha de aterramento, podendo causar sobretensão nos equipamentos ligados ao sistema.

Então, o simples fato em se considerar a impedância impulsiva como o quociente entre o pico de tensão e o pico de corrente, desprezando-se os tempos de frente de cada sinal, pode acarretar erros de análise.

5.3.2 AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA TRANSITÓRIA

Assim como no cálculo de Z_p , os sinais de tensão e corrente foram utilizados para determinação da impedância transitória $z(t)$, porém com os sinais contínuos ao longo do tempo.

Com o objetivo de atenuar os ruídos presentes nos sinais adquiridos, utilizou-se a função *smooth* do Matlab®. Esta função faz a média de diversos pontos vizinhos que é utilizada para a determinação da curva, atuando como um filtro passa-baixa. Na Figura 5.5 são mostradas as curvas tratadas de $z(t)$ correspondente a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos.

Figura 5.5 – Gráfico de $z(t)$ em relação à tensão de carregamento dos capacitores.

Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da análise da Figura 5.5, infere-se que as curvas $z(t)$ podem ser divididas em uma parte com variações bruscas no tempo e uma parte com variações mais suaves. Os primeiros instantes são caracterizados pela resposta do solo às variações bruscas dos tempos de frente dos sinais de corrente aplicados ao solo. Nos instantes seguintes da curva é mostrada a evolução da resposta do solo às variações mais lentas, caracterizada pela suavização do sinal de corrente aplicado ao solo. Com o tempo, o valor de $z(t)$ tende para o valor de R_{LF} , porém no gráfico o valor de R_{LF} não pode ser determinado, pois os sinais de tensão e corrente adquiridos não atingiram o regime permanente.

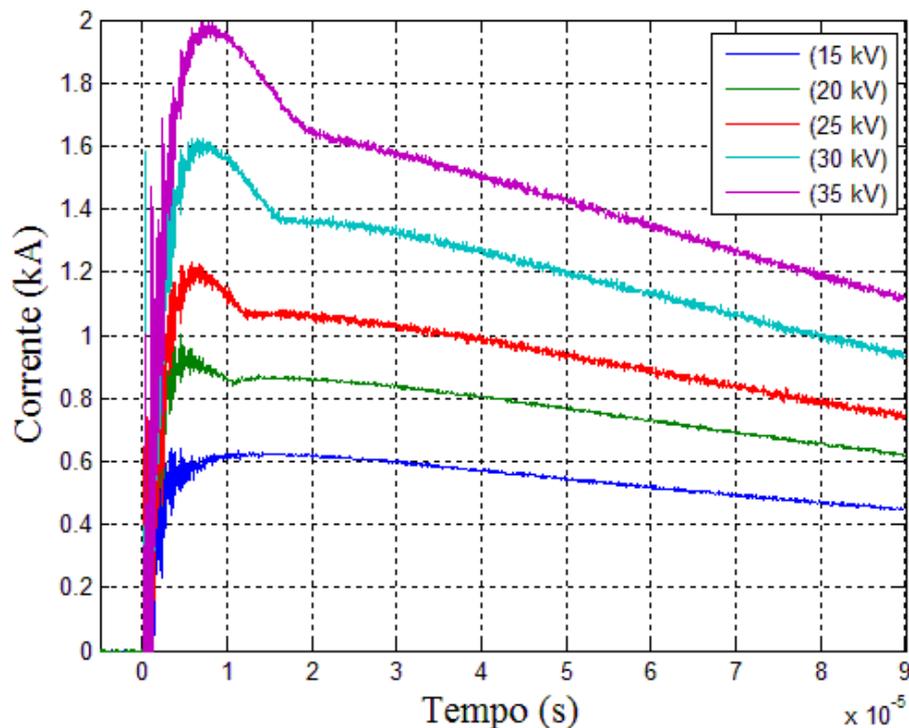
O comportamento de $z(t)$, descrito anteriormente, também foi comprovado por DVEGAN e WHITEHEAD (1973). Em seu artigo, eles mostram que os valores iniciais de $z(t)$ começaram elevados e depois decaíram até alcançar o regime. Os pesquisadores atribuem tal comportamento à resistividade do solo, afirmando que o fenômeno ocorre em solos com resistividades menores que $700 \Omega\text{m}$. Como o solo estudado nesta pesquisa apresentava resistividade em torno de $40 \Omega\text{m}$, o mesmo fenômeno foi verificado.

Vale ressaltar, também, que nas curvas referentes às tensões de carregamento de 20, 25, 30 e 35 kV entre os instantes 10 e 20 μs foram observados máximos locais. Há forte tendência que esse comportamento seja proveniente da influência da ionização do

solo ao longo do tempo, já que para a curva referente à tensão de carregamento de 15 kV não foi observado tal fenômeno.

As variações bruscas no tempo, observadas nas curvas de $z(t)$ mostradas na Figura 5.5, também ocorrem nos sinais de corrente injetados, porém de forma invertida, já que $z(t)$ é dado pela razão entre $v(t)$ e $i(t)$. As curvas de corrente são mostradas na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Gráfico das correntes injetadas na haste de aterramento.



Fonte: Produzida pelo autor.

Em sua pesquisa, HADDAD *et al.* (2010) também obtiveram resultados semelhantes, tanto para os sinais de corrente quanto para a impedância transitória, $z(t)$. Eles também atribuíram tal fato ao fenômeno de ionização do solo.

5.3.3 AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO NO SOLO

A aquisição dos sinais de tensão propagados no solo foi realizada por hastes auxiliares posicionadas a 5 m ou 10 m da haste de injeção. A haste auxiliar foi posicionada a 10 m da haste de injeção quando a tensão de carregamento dos capacitores foi de 15 kV. Enquanto que para os demais níveis de tensão de carregamento (20kV a 35 kV), a haste auxiliar foi posicionada a 5 m da haste de injeção. Os valores da

tensão de carregamento dos capacitores, as amplitudes das tensões propagadas no solo e as respectivas distâncias de fixação das hastes são mostrados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Valores das amplitudes da tensão propagada no solo.

Tensão de Carregamento (kV)	Amplitude de V_{prop} (kV)	Posição da haste (m)
15	1,77	10
20	2,49	5
25	3,04	5
30	3,67	5
35	4,24	5

A partir da Tabela 5.7 é possível observar que há atenuação do sinal de tensão aplicado ao solo. Comportamento semelhante foi observado por outros pesquisadores, dentre eles VISACRO (2007), ARAÚJO *et al.* (2010) e PEDROSA *et al.* (2011).

5.4 ENSAIOS COM IMPULSOS DE DIFERENTES FREQUÊNCIAS MANTENDO-SE A TENSÃO DE CARREGAMENTO CONSTANTE

Nesta etapa são apresentados os resultados obtidos a partir da injeção de correntes impulsivas em uma haste de aterramento, utilizando-se oito sinais com diferentes tempos de frente (oito configurações distintas do gerador de impulsos) e tensão de carregamento dos capacitores constante em 20 kV. O objetivo das medições é avaliar a impedância impulsiva, Z_p , a impedância transitória, $z(t)$, e a propagação do sinal de tensão no solo quando se varia a frequência dos sinais de corrente aplicados ao solo (configurações diferentes).

Assim, oito configurações do gerador de impulsos foram escolhidas, tendo como base os resultados de (LIRA *et al.*,2010). O critério de escolha das configurações foi o tempo de frente observado quando o objeto de teste foi um varistor. Os parâmetros de cada configuração são mostrados na Tabela 5.8. A variação das configurações implica em diferentes tempos de frente e de meia cauda da corrente. Contudo, para a determinação da impedância impulsiva somente são considerados os valores de crista dos sinais de tensão e de corrente.

Tabela 5.8 – Parâmetros das oito configurações distintas do gerador de impulsos.

Configuração do Gerador	Nº de Estágios	Indutor (mH)	Resistor (mΩ)	R_{SHUNT} (mΩ)	T_f (μs) Varistor
1	5	5,7	200	10,54	1,12
2	5	5,7	17,5	10,54	5,12
3	5	5,7	2,4	10,54	9,04
4	5	5,7	5,0	10,54	7,88
5	5	5,7	5,0	10,54	2,2
6	5	5,7	2,4	10,54	2,72
7	5	5,7	17,5	10,54	1,2
8	5	5,7	200	10,54	0,16

Para cada configuração do gerador foram realizadas cinco aplicações consecutivas de corrente impulsiva em uma haste de aterramento, com a tensão de carregamento dos capacitores constante em 20 kV, nas quais foram capturados os sinais de tensão e de corrente. Em seguida, foram feitas as médias dos cinco sinais, de modo a se determinar os sinais de tensão e corrente aplicados ao solo e os sinais de tensão propagados no solo. A partir dos sinais tratados, o cálculo de Z_p e $z(t)$ foi realizado.

Os ensaios foram realizados no dia 15 de novembro de 2014, com temperatura ambiente média de 26,9 °C, pressão atmosférica de 722 mmHg e umidade relativa do ar de 55%.

A análise da influência do comportamento da configuração do gerador foi dividida em três tópicos.

5.4.1 AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA IMPULSIVA

Para o cálculo de Z_p , os valores de pico da tensão e da corrente injetados no solo foram obtidos por meio de rotina computacional. Na Tabela 5.9 são apresentados os valores de pico da tensão (V_p), da corrente (I_p), o tempo de frente da corrente (T_{fi}), impedância impulsiva (Z_p) e variação percentual de Z_p .

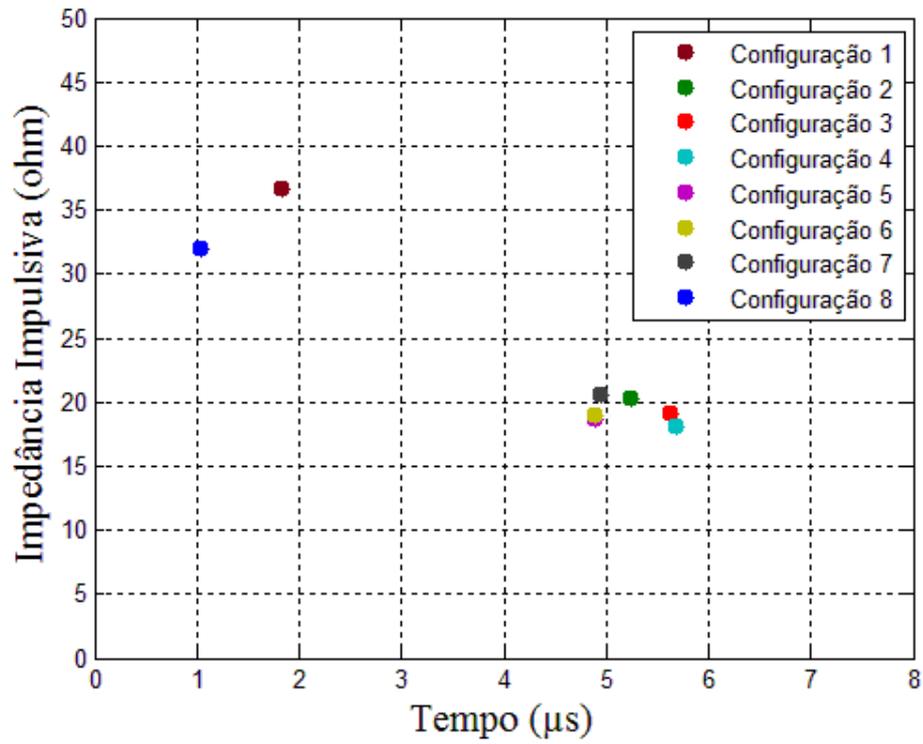
Tabela 5.9 – Parâmetros relacionados à impedância impulsiva com relação à configuração do gerador de impulso.

Configuração do Gerador	V (kV)	I (kA)	T_f (μ s)	Z_p (Ω)	Variação (%)
1	13,82	0,3775	1,83	36,61	-----
2	17,01	0,8375	5,25	20,31	43,70
3	18,51	0,9685	5,64	19,12	47,77
4	18,16	1,0065	5,69	18,05	50,70
5	18,73	1,0073	4,90	18,59	49,22
6	18,61	0,9845	4,89	18,91	48,35
7	18,21	0,8839	4,95	20,60	43,73
8	15,89	0,4964	1,04	32,01	12,56

Embora tenham sido montadas oito configurações distintas para o gerador de impulsos, com o objetivo de se reproduzir uma gama de sinais de diferentes T_f , na Tabela 5.9 foi observada pouca variação entre os T_f dos sinais de corrente aplicados ao solo. Apesar disso, de modo geral, pode-se observar que quanto menor foi o T_f da corrente aplicada, maiores foram os valores determinados para a impedância impulsiva. Comportamento semelhante foi observado por outros pesquisadores, dentre eles (HADDAD *et al.*, 2010), (VISACRO *et al.*, 2011) e (CASTRO *et al.*, 2014). De forma geral, GRCEV (2009) afirma que o comportamento impulsivo de sistemas de aterramento depende, sobretudo, do tempo de frente das correntes de descarga.

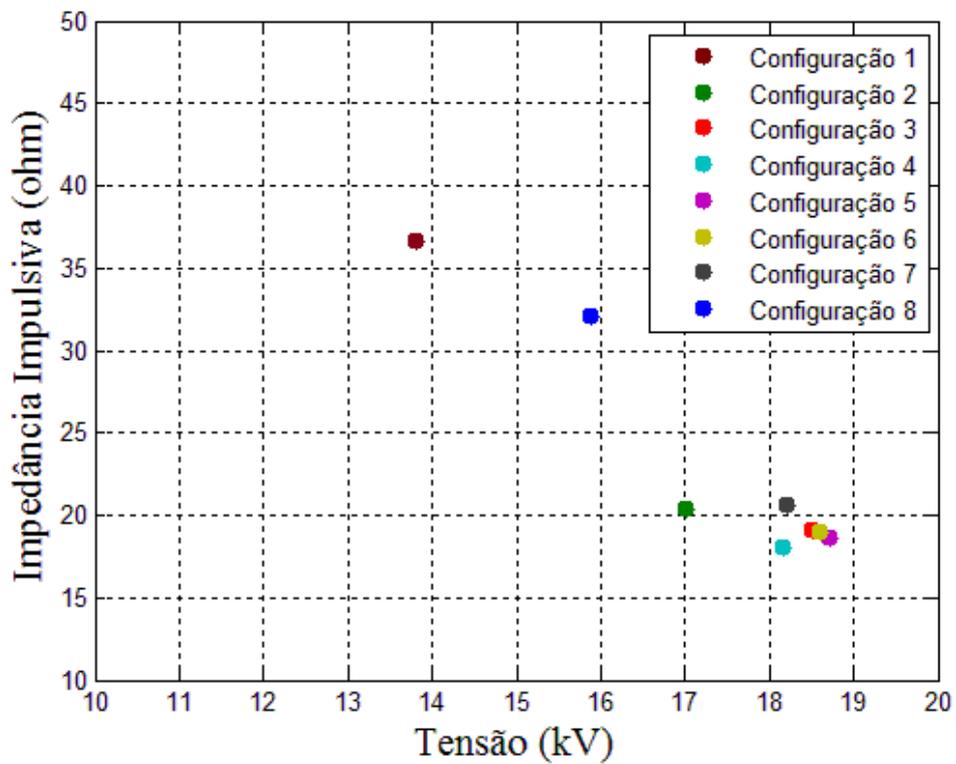
Observa-se, ainda, na Tabela 5.9 que, de forma geral, quanto menor foi a tensão aplicada, maior foi a impedância impulsiva. O mesmo comportamento foi observado quando se comparou a corrente aplicada e a impedância impulsiva. Para melhor visualização da variação da impedância impulsiva com o tempo de frente do sinal de corrente, a tensão aplicada e a corrente injetada, gráficos foram plotados e são mostrados nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9, respectivamente.

Figura 5.7 – Gráfico de Z_p em função de T_f .

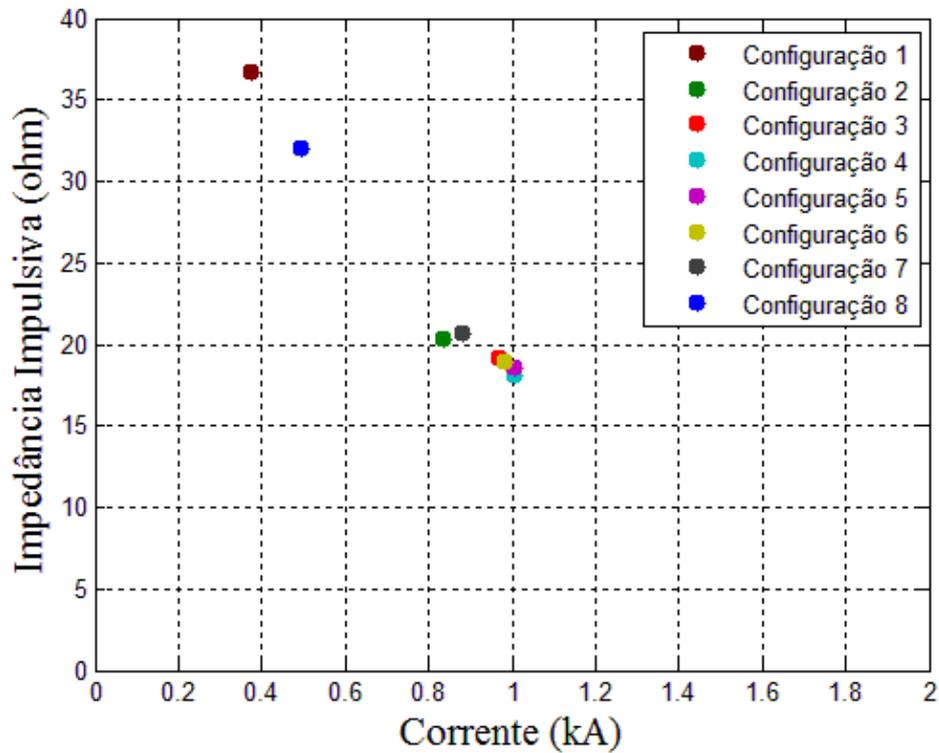


Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.8 – Gráfico de Z_p em função tensão aplicada.



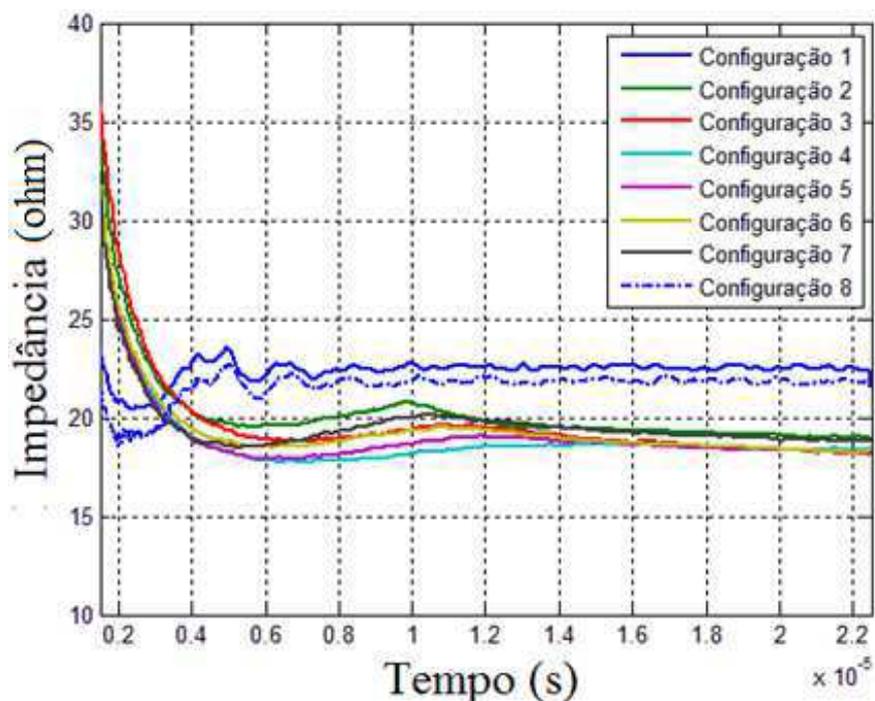
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 5.9 – Gráfico de Z_p em função corrente injetada.

Fonte: Produzida pelo autor.

5.4.2 AVALIAÇÃO DA IMPEDÂNCIA TRANSITÓRIA

Assim como no cálculo de Z_p , os sinais de tensão e corrente foram utilizados para determinação da impedância transitória $z(t)$, porém com os sinais contínuos ao longo do tempo. Com o objetivo de atenuar os ruídos presentes nos sinais adquiridos, utilizou-se a função *smooth* do Matlab®. Na Figura 5.10 são mostradas as curvas tratadas de $z(t)$ correspondente a cada nível de tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos.

Figura 5.10 – Gráfico de $z(t)$ em relação à configuração do gerador de impulsos.

Fonte: Produzida pelo autor.

A partir da análise da Figura 5.10, infere-se que as curvas $z(t)$ podem ser divididas em uma parte com variações bruscas no tempo e uma parte com variações mais suaves. Os primeiros instantes são caracterizados pela resposta do solo às variações bruscas dos tempos de frente dos sinais de corrente aplicados ao solo. Nos instantes seguintes da curva é mostrada a evolução da resposta do solo às variações mais lentas, caracterizada pela suavização do sinal de corrente aplicado ao solo. Com o tempo, o valor de $z(t)$ tende para o valor de R_{LF} , porém no gráfico o valor de R_{LF} não pode ser determinado, pois os sinais de tensão e corrente adquiridos não atingiram o regime permanente.

Observa-se, também, que as curvas $z(t)$ apresentadas, quando se utilizou as configurações 1 e 8, não seguem o mesmo padrão das demais. O fato indica que $z(t)$ pode ser influenciado pelo tempo de frente do sinal de corrente injetado, apresentando valores instantâneos mais elevados quando o tempo de frente é menor.

5.4.3 AVALIAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DO SINAL DE TENSÃO NO SOLO

A aquisição dos sinais de tensão propagados no solo foi realizada a partir da captação do sinal de tensão em uma haste auxiliar posicionada a 5 m da haste de injeção, para todas as configurações utilizadas.

A configuração do gerador utilizada, o valor de pico da tensão aplicada na haste de injeção (V_{p1}) o valor de pico da tensão propagada no solo (V_{prop}) e a razão entre V_{p1} e V_{prop} são mostrados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Valores das amplitudes da tensão propagada no solo.

Configuração do Gerador	V_{p1} (kV)	V_{prop} (kV)	Razão entre V_{p1} e V_{prop}
1	13,82	1,31	10,55
2	17,01	2,24	7,59
3	18,51	2,43	7,62
4	18,16	2,28	7,96
5	18,73	2,56	7,32
6	18,61	2,55	7,30
7	18,21	2,40	7,59
8	15,89	1,46	10,88

A partir da Tabela 5.10, observa-se que há atenuação do sinal de tensão aplicado ao solo quando se compara V_{p1} e V_{prop} , cuja haste auxiliar se encontra a 5 m de distância. Comportamento semelhante foi observado por outros pesquisadores, dentre eles VISACRO (2007), ARAÚJO *et al.* (2010) e PEDROSA *et al.*, (2011).

Comparando-se as Tabelas 5.9 e 5.10, observa-se que as configurações do gerador 1 e 8, os quais produziram sinais de corrente com menores T_f , apresentaram razão entre a tensão injetada e a propagada maior do que as configurações 2 a 7. Isso significa que a atenuação relativa do sinal de tensão propagada foi menor para os sinais de corrente com tempos de frente menores.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados os comportamentos da impedância impulsiva e da impedância transitória de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica. As variáveis utilizadas, para avaliação, foram o tempo de frente dos sinais de corrente injetados e a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulsos de corrente. Os resultados e as análises se referem a um solo seco e com resistividade média de $40 \Omega.m$, caracterizado no capítulo Material e Métodos.

O comportamento dos sinais de corrente injetados foi analisado tanto para varistores de óxido de zinco quanto para o solo. Inicialmente, observou-se que há significativa diferença no comportamento dos sinais injetados nos varistores e diretamente no solo. No caso de sinais injetados no varistor, foi verificada a presença de ruídos, porém apenas nos instantes iniciais dos sinais. Os sinais capturados quando se utilizou varistor foram compatíveis com sinais representativos de descargas atmosféricas ($8/20 \mu s$). No caso de sinais injetados no solo, foi verificada a presença de ruídos nos instantes iniciais da descarga e essas perturbações podem ser tanto erros no arranjo de medição ou, simplesmente, a influência do solo quando submetido a correntes impulsivas.

Quando a variável de análise foi a tensão de carregamento dos capacitores do gerador de impulso, foi constatado que a impedância impulsiva tornou-se cada vez menor quando a tensão aplicada no solo era elevada. Os resultados evidenciam que existe influência da ionização do ar contido no solo e, como efeito, a redução da impedância impulsiva. Observou-se, também, que os picos de tensão e corrente não ocorreram no mesmo instante, podendo acarretar erros de análise e implicações na coordenação de isolamento.

Quando a variável de análise foi o tempo de frente do sinal de corrente aplicado ao solo, produzido por configurações diferentes do gerador e mantendo-se a tensão de carregamento constante, foi observado que a impedância impulsiva variou inversamente proporcional ao tempo de frente do sinal de corrente aplicado.

Nas análises das curvas da impedância transitória constatou-se que elas podem ser divididas em uma parte com variações bruscas no tempo e outra com variações mais

suaves. Os primeiros instantes foram caracterizados pela resposta do solo às variações bruscas dos tempos de frente dos sinais de corrente aplicados ao solo. Nos instantes seguintes da curva foi mostrada a evolução da resposta do solo às variações mais lentas, caracterizada pela suavização do sinal de corrente aplicado ao solo. Com o tempo, o valor da impedância transitória direcionou-se para o valor da resistência de aterramento em baixa frequência.

Como continuação do trabalho realizado propõe-se:

- Mostrar a diferença no comportamento de sistemas de aterramento quando o solo está úmido e quando está seco;
- E, especificamente, avaliar se o efeito de ionização do solo é expressivo quando ensaios são realizados em solo úmido;
- Pesquisar novos arranjos de indutores, resistores e capacitores para, assim, possibilitar a injeção de sinais de corrente com tempos de frente distintos;
- Capturar, também, sinais de corrente propagados no solo, possibilitando a análise do seu comportamento;
- Ampliar as pesquisas para outros tipos de solo, não se limitando apenas ao solo nas proximidades do LAT.
- Projetar e construir um gerador de impulsos de corrente elétrica aplicado a sistemas de aterramento.

REFERÊNCIAS

- ALÍPIO, R; VISACRO, S. Frequency Dependence of Soil Parameters: Effect on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 55, no. 1, pp. 132-139, 2013.
- ARAÚJO, F. J. L.; SILVA, J. M. C. L.; ANDRADE, G. V. JR.; LIRA, G. R. S.; COSTA, E. G.; NETO, S. A. G. N. Avaliação de Potenciais no Solo Devido a Impulsos de Corrente em Malhas de Aterramento. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, Belém, Brasil, 2010.
- BELLASCHI, P. L. Lightning Currents in Field and in Laboratory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 54, no. 8, pp. 837-843, 1935.
- BRITO, V. S. **Modelo Adaptativo de Para-Raios de Óxido de Zinco para a Região de Baixa Corrente**. 123 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2013.
- CASTRO, M. S. **Sistema de Aquisição de Dados para Avaliação de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Elétrica**. 60 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFCG, Campina Grande, 2012.
- CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; BRITO, V. S.; LIRA, G. R. S.; GONÇALVES, M. F. B. R. Avaliação Experimental da Impedância em um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, Foz do Iguaçu, Brasil, 2014.
- CHAKER, V. **Simplified Methods for the Electrical Soil Resistivity Measurement, Underground corrosion**. ASTM STP 741, Edward Escalante, Ed., American Society for Testing and Materials, pp. 61-91, 1981.
- CLARK, D.; GUO, D.; LATHI, D.; HARID, N.; GRIFFITHS, H.; AINSLEY, A.; HADDAD, A. Controlled Large-Scale Tests of Practical Grounding Electrodes - Part II: Comparison of Analytical and Numerical Predictions with Experimental Results. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 29, no. 3, pp. 1240-1248, 2014.

- DIAZ, R. R.; SILVA, J. N. Space Charge and Soil Ionization: an Electro-Kinetic Approach. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 18, no. 6, pp. 2032-2039, 2011.
- DVEGAN, S. S.; WHITEHEAD, E. R. Analytical Models for Distributed Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-92, no. 5, pp. 1763-1770, 1973.
- DWIGHT, H. B. Calculation of Resistances to Ground. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 55, no. 12, pp. 1319-1328, 1936.
- ESPEL, P.; DIAZ, R. R.; BONAMY, A.; SILVA, J. N. Electrical Parameters Associated with Discharges in Resistive Soil. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, no. 3, pp. 1174-1182, 2004.
- FRAGA, F. N. **Contribuições para o Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência Empregando TLM Tridimensional**. 94 páginas. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFPE, Recife, 2008.
- GRCEV, L. Impulse Efficiency of Ground Electrode. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, no. 1, pp. 441-451, 2009.
- GRCEV, L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, no. 3, pp. 1692-1699, 2011.
- GUO, D.; CLARK, D.; LATHI, D.; HARID, N.; GRIFFITHS, H.; AINSLEY, A.; HADDAD, A. Controlled Large-Scale Tests of Practical Grounding Electrodes - Part I: Test Facility and Measurement of Site Parameters. **IEEE Transactions On Power Delivery**, v. 29, no. 3, 2014.
- GUPTA, B. R.; THAPAR, B. Impulse Impedance of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-99, no. 6, pp. 2357-2362, 1980.
- HADDAD, A.; WARNE, D. F. **Advances in High Voltage Engineering - (IEE Power and Energy Series 40)**. Published by: The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 2004.

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

HE, J.; YU, G.; YUAN, J.; ZENG, R.; ZHANG, B.; ZOU, J.; GUAN, Z. Decreasing Grounding Resistance of Substation by Deep-Ground-Well Method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, no. 2, pp. 738-744, 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: 12/02/2015.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>>. Acesso em: 12/02/2015.

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

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

KOWALENKO, K. **Illuminating the Dangers of Lightning Strikes: Protection is Key to Preventing Damage**. Disponível em: <<http://theinstitute.ieee.org/technology-focus/technology-topic/illuminating-the-dangers-of-lightning-strikes>>. Acesso em: 12/02/2015.

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

LIRA, G. R.; FERNANDES Jr., D.; COSTA, E. G. Técnica de Estimção de Parâmetros para Modelos Dinâmicos de Para-raios de Óxido de Zinco. **Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, Belém, Brasil, 2010.

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

- MODRUSAN, M. Laboratory and On-Site Testing of Metal Oxide Arresters. HAEFELY - HIGH VOLTAGE TEST – E1 94. **Cigré SC 33**, Basel, 1999.
- MOUSA, A. M. The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge Of High Currents into Concentrated Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, no. 3, pp. 1669–1677, 1994.
- NBR 7117. **Medição da Resistividade do Solo pelo Método dos Quatro Pontos (Wenner)**. ABNT, 1981.
- NBR 15749. **Medição de Resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do Solo em Sistemas de Aterramento**. ABNT, 2009.
- PEDROSA, G. A.; SCHOEDER, M. A. O.; AFONSO, M. M.; ALÍPIO, R. S.; ASSIS, S. C.; OLIVEIRA, T. A. S.; BRAGA, A. R. **Desempenho de Aterramento Elétrico diante de Descargas Atmosféricas**. O Setor Elétrico, pp.74-84, Nov, 2011.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. **Lightning Physics and Effects**. Ed. Cambridge University Press, 2003.
- 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.
- SEKIOKA, S.; HAYASHIDA, H.; HARA, T.; AMETANI, A. Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 145, no. 6, pp. 693-699, 1998.
- SOUZA, R. E.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. The Effect of Soil Ionization on the Lightning Performance of Transmission Lines. **International Conference on Lightning Protection (ICLP)**, Shanghai, China, 2014.
- SUNDE, E. D. Surge Characteristics of a Buried Bare Wire. **Electrical Engineering**, v. 59, no. 12, pp. 987-991, 1940.
- TAO, Y.; SIMA, W.; YANG, C.; YANG, Q. Experimental Investigation on the Impulse-Current Distribution of Grounding Electrodes with Various Structures. **International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)**, Chongqing, China, 2008.

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

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

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

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

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