



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

Tese de Doutorado

**REDE DE SENSORES SEM FIO PARA AQUISIÇÃO DE
DADOS DE MALHAS DE ATERRAMENTO SUBMETIDAS
A CORRENTES IMPULSIVAS**

MALONE SOARES DE CASTRO

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA – BRASIL

JULHO DE 2016

Malone Soares de Castro

**REDE DE SENSORES SEM FIO PARA AQUISIÇÃO DE
DADOS DE MALHAS DE ATERRAMENTO SUBMETIDAS
A CORRENTES IMPULSIVAS**

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

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.

Orientador

Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Julho de 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C355r Castro, Malone Soares de.

Redes de sensores sem fio para aquisição de dados de malhas de aterramento submetidas a correntes impulsivas / Malone Soares de Castro. – Campina Grande, 2016.

114 f. : il. color.

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

"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Edson Guedes da Costa".

Referências.

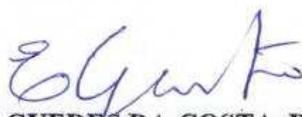
1. Redes de Sensores sem Fio. 2. Aquisição de Dados. 3. Monitoramento de Aterramento. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Costa, Edson Guedes da. III. Título.

CDU 621.39(043)

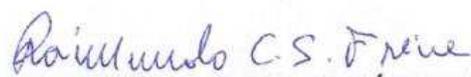
"REDE DE SENSORES SEM FIO PARA AQUISIÇÃO DE DADOS DE MALHAS DE ATERRAMENTO SUBMETIDAS A CORRENTES IMPULSIVAS"

MALONE SOARES DE CASTRO

TESE APROVADA EM 23/09/2016



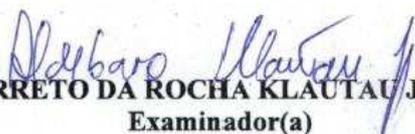
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



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



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

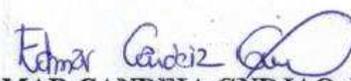


ALDEBARO BARRETO DA ROCHA KLAUTAU JÚNIOR, Dr., UFPA
Examinador(a)



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

BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



EDMAR CANDEIA GURJÃO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

DEDICATÓRIAS

*A Guga, Zinho e Li, meus filhos,
que fazem em mim, a vida pulsar.*

*Ao meu pai, José Farias, que do alto me amparou nesta caminhada,
e à minha mãe, Terezinha, meu maior exemplo de coragem e determinação.*

*Aos meus irmãos, Moema, Remo, Rômulo, Roberto e Renato
e suas famílias, que sempre estiveram do meu lado.*

AGRADECIMENTOS

Aos Professores:

Raimundo Carlos Silvério Freire e Edson Guedes da Costa, pela amizade, pela confiança e pela orientação.

Benemar Alencar de Souza, Ivan José da Silva Lopes, Aldebaro Barreto da Rocha Klautau Júnior, Helder Alves Pereira e Edmar Candeia Gurjão, componentes da banca examinadora, pelas sugestões e contribuições.

Benedito Antonio Luciano, que me cedeu gentilmente material bibliográfico, realizou a revisão dos meus escritos e, principalmente, pelo apoio e incentivo.

Moema Soares de Castro Barbosa, minha irmã, pelas sugestões e revisão do texto. E principalmente, pelo ombro amigo nas dificuldades.

Aos alunos:

Newton Fonsêca pela contribuição imprescindível para a concretização deste trabalho e pelo incentivo, quando o fardo estava pesado.

Valdemir Brito que sempre achou solução para os problemas relacionados ao gerador de impulsos e por suas sugestões pertinentes.

Marconni Gonçalves, João Marcelo, Filipe Lucena, Gabriel Vidal, Ramon Dias, Rafael, Marcos Ribeiro, Vanuza Nascimento, Túlio Albuquerque, Thaís Luana, Cybelle Belém e Arthur Alves por compartilhar tantos ensaios e pelas discussões enriquecedoras.

A tantos outros alunos do LAT e do LIMC, pelas sugestões e pelos comentários trocados pelos corredores, pelos momentos compartilhados, que trouxeram leveza para os meus dias.

Aos funcionários:

José Eduardo da Silva, Francisco Freire Soares, José Adriano Bezerra, Jennefer Pequeno e Higor Costa, pela prontidão em me socorrer na realização dos ensaios, no Laboratório de Alta Tensão.

Ângela de Lourdes Ribeiro Matias, Pedro Francisco Alves da COPELE e Lucimar Ribeiro Gomes Andrade do DEE, pela dedicação no desempenho de suas funções e pela atenção, a mim dispensada, ao longo deste trabalho.

Às instituições:

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba e Eletrobrás Distribuição Piauí.

EPÍGRAFE

“Todos os homens, por natureza, desejam conhecer.”
(Aristóteles)

RESUMO

Neste trabalho, desenvolveu-se um sistema de aquisição de dados, capaz de adquirir sinais impulsivos de tensão e corrente, que são utilizados para avaliar as condições de degradação de malhas de aterramento energizadas. O sistema é formado por uma rede de sensores sem fio, capaz de adquirir sinais resultantes da injeção de impulsos de corrente de alta intensidade, em diversos pontos da malha. O sistema desenvolvido foi avaliado por meio de experimentos utilizando-se um gerador de impulsos de corrente de alta intensidade, capaz de simular sinais de descargas atmosféricas. Nos experimentos, foram feitas aquisições de sinais simultaneamente com um osciloscópio e com o sistema proposto. Comparando-se os sinais adquiridos pelos dois meios, resultou em 99,9% de similaridade. Depois de comprovada a eficácia, o sistema de aquisição de dados desenvolvido foi usado na avaliação das condições operativas de um aterramento real. A partir dos resultados obtidos, observou-se que o sistema foi capaz de adquirir os dados originários da aplicação de impulsos de corrente no solo, transmiti-los usando comunicação sem fio, e realizar o processamento desses dados. O uso de uma rede de sensores sem fio diminui a influência dos efeitos eletromagnéticos, presentes em subestações elétricas, sobre os sistemas de medição. Além disso, a medição à distância proporciona maior segurança aos profissionais envolvidos. Assim, a partir dos dados adquiridos é possível se emitir uma avaliação das condições de degradação de uma malha de terra energizada, bem como, construir modelos que são úteis no planejamento e na predição de falhas do aterramento. Portanto, o sistema oferece as condições adequadas para os estudos das altas correntes, tensões e frequências e seus efeitos.

Palavras chaves: Aquisição de dados, monitoramento de aterramento, rede de sensores sem fio.

ABSTRACT

In this work, it was developed a data acquisition system capable of acquiring impulsive signal of voltage and current. With these data it is possible to evaluate the degradation conditions of energized grounding grids. The system comprises a wireless sensor network, able to acquire signals resulting from injection of high intensity current impulses on different points of the grounding grid. The system developed was assessed by experiments using a high intensity current impulse generator, which is able to simulate atmospheric discharge signals. In these experiments, they were acquired signals simultaneously with an oscilloscope and with the proposed system. Comparing the signals acquired by the two forms, it resulted in 99.9% similarity. After proven effectiveness, the data acquisition system developed has been used in assessing the operating conditions of an actual grounding. From the results obtained, one can observe that the system was capable of acquiring data originating from the application of current impulses in the soil, transmit them using wireless communication, and perform processing such data. The use of a wireless sensor network reduces the influence of electromagnetic effects present in electrical substations, on the measurement systems. In addition, remote measurement provides greater security to the professionals involved. Thus, from the data acquired it is possible to issue an evaluation of degradation conditions of an energized grounding grid and build models that are useful in planning and prediction of grounding faults. Therefore, the system provides the adequate conditions for the study of high currents, voltages and frequencies and their effects.

Key words: Data acquisition, grounding grid monitoring, wireless sensor network.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esboço do aterramento elétrico com um eletrodo.....	25
Figura 2.2 - Esboço das linhas de corrente em torno do ponto C, de onde sai uma corrente I.	26
Figura 2.3 - Superfícies equipotenciais devido a um eletrodo de injeção de corrente.	26
Figura 2.4 - Correntes elétricas transversais e longitudinais num segmento do eletrodo.	27
Figura 2.5 - Eletrodo submetido a corrente impulsiva (a) sem ionização; (b) com ionização do solo.....	28
Figura 2.6 - Zona de ionização no solo.....	28
Figura 2.7- Representação da ocorrência do potencial de toque.....	29
Figura 2.8 - Representação da ocorrência do potencial de passo	30
Figura 2.9 - Disposição dos eletrodos no método de Wenner.....	31
Figura 2.10 - Distribuição das linhas de corrente no solo no método de Wenner.	32
Figura 2.11 - Fotografia de descargas atmosféricas sobre a cidade de Londrina (PR).	34
Figura. 2.12 - Forma de onda representativa de uma descarga atmosférica (Sinal 8/20 μ s).	36
Figura 2.13 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados incluindo o meio de medição e o processamento digital do sinal.....	37
Figura 2.14 - Representação de uma rede de sensores sem fio.	39
Figura 2.15 - Topologias das redes.....	41
Figura 4.1 – Localização do terreno usado como solo. (a) Croqui da localização da sala do gerador e do terreno; (b) Localização do LAT no mapa da UFCG (Google Maps).	54
.....	54
Figura 4.2 – Detalhes das hastes. (a) Desenho de uma vista em corte das hastes no solo; (b) Fotografia da haste de injeção, conector e cabo.	55
Figura 4.3 – Fotografias do gerador de impulso de corrente (80 kJ/100 kV). (a) Banco de capacitores, resistores e centelhadores. (b) Transformador elevador de tensão e diodo retificador; (c) Mesa de controle.	56
Figura 4.4 - Circuito do gerador de impulsos.	57
Figura. 4.5 - Configuração do experimento para realização de ensaios preliminares.	58
Figura 4.6 - Configuração do experimento para testar o sistema desenvolvido.	58
Figura 4.7 - Configuração do experimento para avaliar um aterramento.....	59
Figura 5.1 – Sinais de tensão e corrente na haste de injeção e tensão propagada medida em uma haste auxiliar.	62
Figura 5.2 – Impedância transitória em função da tensão de carregamento.....	64
Figura 5.3 – Croqui de uma malha de terra com unidades remotas de aquisição distribuídas no solo.....	65

Figura 5.4 – Sinais de tensão e de corrente originários da aplicação de cargas de um impulso de corrente no solo (tensão de carregamento de 20 kV): (a) Tensão e corrente na haste de injeção; (b) Tensão em uma haste auxiliar.....	66
Figura 5.5 – Diagrama de blocos da unidade remota de aquisição.	69
Figura 5.6 – Diagrama de blocos do circuito da unidade remota de aquisição (UA). O circuito de condicionamento do sinal de alta tensão (HV) é separado do circuito de aquisição e transmissão de dados, que opera em baixa tensão (LV)	70
Figura 5.7 – Diagrama ilustrativo do algoritmo de detecção do impulso e transmissão dos dados;.....	71
(a) algoritmo; (b) Sinal 8/20 com detalhe do ponto de detecção do impulso.....	71
Figura 5.8 – Fotografia dos equipamentos instalados em campo para a realização de testes. .	72
Figura 5.9 – Gráfico da tela para apresentação do gráfico do sinal adquirido.	73
Figura 5.10 – Estágio de baixa tensão da unidade de aquisição.	74
Figura 5.11 – Estágio de baixa tensão da unidade de aquisição.	74
Figura 5.12 – Forma de onda da tensão na haste auxiliar adquirida com o módulo SAD1 e com o osciloscópio, distantes da haste de injeção: (a) 9 m ; (b) 6 m	76
Figura 5.13 – Forma de onda da tensão na haste auxiliar, situada a 9 m do ponto de injeção, adquirida com o módulo SAD2 e com um osciloscópio	77
Figura 5.14 – Formas de onda da tensão adquirida usando o módulo SAD1 em dois pontos do aterramento. (a) a 6 m do ponto injeção de cargas; (b) 9 m da haste de injeção de cargas no solo.	78
Figura 5.15 – Forma de onda da tensão adquirida a 9 m da haste de injeção, usando o módulo SAD2.	79
Figura 5.16 – Forma de onda da tensão adquirida em dois pontos equidistantes da haste de injeção de corrente no solo.....	79
Figura 5.17 – Forma de onda da tensão adquirida em dois pontos diferentes do solo, na mesma direção.	80

LISTA DE QUADROS

QUADRO 3.1- Sintetização das contribuições dos trabalhos apresentados que são aplicáveis à aquisição de dados para o monitoramento de malhas de terra.....	51
QUADRO 5.1 – Valor de pico dos sinais de correntes da aplicação de impulsos de corrente no solo (tensão de carregamento 20 kV).....	63
QUADRO 5.2 - Impedância impulsiva para diferentes valores de tensão de carregamento.....	63
QUADRO 5.3 - Especificação do sistema de aquisição de dados.....	68
QUADRO 5.4 - Desvio da relação de divisão entre SAD1 e SAD2 para cada escala do estágio de condicionamento do sinal.....	75

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AD	Analógico-Digital
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i> (Conversor analógico digital)
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador digital de sinais)
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória de leitura programável, eletricamente apagável)
FFD	<i>Ful Function Device</i> (Dispositivo de funções completas)
GI	Gerador de impulsos
HF	<i>High frequency</i> (Alta frequência)
HV	<i>High voltage</i> (Alta tensão)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i> – Instituto de Engenherios Eletricistas e Eletrônicos
IJESI	<i>International Journal of Engineering and Science Invention</i> – Jornal Internacional de Engenharia e Inventos Científicos
I&M	<i>Instrumentation and Measurements</i> (Instrumentação e medidas)
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LF	<i>Low frequency</i> (Baixa frequência)
LV	<i>Low voltage</i> (Baixa tensão)
MRT	Monofilar com retorno por terra
NBR	Norma Brasileira
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de acesso aleatório)

RFD	<i>Reduced function device</i> (Dispositivo de funções reduzidas)
RSSF	Rede de sensores sem fio
SG	<i>Spark Gap</i> (Centelhadores)
SAD	Sistema de aquisição de dados - módulo
UA	Unidade remota de aquisição
UCC	Unidade de controle central
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UPC	Unidade de processamento central

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Contextualização	17
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Geral	19
1.3.2 Específicos	19
1.4 Metodologia	19
1.6 Estrutura da Tese	23
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 Aterramento Elétrico.....	24
2.1.1 Circulação da Corrente Elétrica no Solo	25
2.1.2 Potenciais de Segurança.....	29
2.1.3 Medição da Resistividade do Solo pelo Método de Wenner	30
2.1.4 Parâmetros Representativos das Condições de Operação do Aterramento Submetidos a Impulsos de Corrente	32
2.2 Descargas Atmosféricas	34
2.2.1 Descargas Atmosféricas nos Sistemas Elétricos	35
2.2.2 Sinal 8/20 μ s	35
2.3 Sistema de Aquisição de Dados.....	36
2.4 Rede de Sensores sem Fio.....	38
2.4.1 Padrão IEEE 802.15.4.....	40
2.4.2 Padrão de Comunicação ZigBee	41
2.5 Resumo.....	42
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	43
3.1 Pesquisas com Aterramentos Submetidos a Impulsos de Corrente Elétrica	43
3.2 Sistemas para Monitoramento de Malhas de Aterramento	46
3.2.1 Sistemas para o Monitoramento da Malha de Terra em Baixa Frequência	46
3.2.2 Sistemas para Monitoramento da Malha de Terra em Frequências Elevadas	47
3.3 Resumo.....	52
4 ENSAIOS E MEDIÇÕES.....	53
4.1 Materiais	53
4.1.1 Solo	53

4.1.2 Hastes	54
4.2 Gerador de Impulsos de Corrente.....	55
4.3 Configuração de Experimentos para Ensaios Preliminares.....	57
4.4 Configuração de Experimentos para Teste do Sistema Desenvolvido.....	58
4.5 Configuração do Experimento para Avaliação de um Aterramento	59
4.6 Resumo.....	59
5 RESULTADOS	61
5.1 Ensaios Preliminares	61
5.1.1 Sinais Adquiridos	61
5.1.2 Impedância Impulsiva.....	63
5.1.3 Impedância Transitória.....	64
5.2 Sistema de Aquisição de Dados para Avaliar as Condições de Operação de Malhas de Aterramento Energizadas.....	65
5.2.1 Especificação do Sistema de Aquisição de Dados	66
5.2.2 Unidade Remota de Aquisição	68
5.3 Resultados dos Experimentos para Validar o Sistema Desenvolvido	73
5.4 Resposta de um Aterramento ao Impulso de Corrente	77
5.4.1 Sinais Adquiridos em Hastes Isoladas	77
5.4.2 Sinais Adquiridos em Duas Hastes	79
5.5 Resumo.....	81
6 CONCLUSÕES.....	82
6.1 Sugestões de Trabalhos.....	84
6.2 Artigos Produzidos	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A – Resistividade do Solo e Resistência de Terra.....	97
APÊNDICE B – Linhas do Código da Rotina para Cálculo da Correlação Cruzada	103

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As descargas atmosféricas são a causa de um terço das interrupções no fornecimento de energia elétrica no mundo (KOWALENKO, 2012). De acordo com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2015), o Brasil é o país de maior incidência de raios no mundo, e que cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição de energia elétrica em todo o território nacional, são provocados por raios.

Um sistema de aterramento elétrico tem a função básica de prover um caminho de baixa impedância para escoamento de cargas elétricas, sendo essencial para a segurança de pessoas e instalações elétricas, tanto em frequência industrial (50 ou 60 Hz) quanto em situações de surtos e curtos circuitos. Além disso, o aterramento deve estabelecer uma tensão de referência para todo o sistema elétrico, especialmente para o de proteção (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Assim, um aterramento adequado é essencial para a segurança, continuidade dos serviços e confiabilidade do sistema elétrico.

Pelo exposto, o monitoramento das condições reais de operação do aterramento é fundamental para a continuidade dos serviços no sistema elétrico. O monitoramento deve considerar o comportamento da malha de aterramento tanto em regime permanente, como em casos de surtos e curtos-circuitos, pois o desempenho do aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade é muito diferente daquele na frequência industrial (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995; GRCEV, 2009).

Quando se trata de aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade, deve ser observado que a injeção de cargas, decorrentes desses sinais, no solo provoca diversos fenômenos elétricos e magnéticos, que são simultâneos, em frequências elevadas e com altas amplitudes. Por isso, a análise dos efeitos das descargas atmosféricas nos aterramentos não se constitui em tarefa técnica trivial, em decorrência da complexidade física dos fenômenos, da dispersão dos seus parâmetros e da dificuldade de avaliação dos seus efeitos (VISACRO, 2005).

A despeito da evidência da necessidade de se avaliar uma malha de aterramento, na frequência industrial e em frequências elevadas, na sua maioria, pesquisas abordaram o monitoramento das condições de operação do aterramento considerando apenas a frequência industrial. Nos últimos anos, vários grupos de pesquisas publicaram artigos (ARAÚJO *et al.* 2010; GONÇALVES *et al.* 2015; CLARK *et al.* 2013; DIAZ e SILVA 2011; GRCEV, 2011; GUO *et al.* 2014; HADDAD *et al.* 2010; PEDROSA *et al.* 2011; SOUZA, SILVEIRA e VISACRO, 2014; VISACRO *et al.* 2015) demonstrando que seus estudos consideraram os efeitos das altas correntes, tensões e frequências elevadas, contudo suas contribuições não se aplicam a avaliação das condições operativas das malhas de terra de subestações, sem a necessidade da desenergização e garantindo a segurança dos equipamentos e das pessoas envolvidas.

1.2 Motivação

Devido à importância do aterramento para o sistema elétrico, faz-se necessário garantir seu funcionamento com segurança, continuidade dos serviços e confiabilidade. Para tanto, deve-se conhecer as suas reais condições de operação, em frequência industrial e em frequência elevada.

O desenvolvimento de um sistema adequado e dedicado para a aquisição de sinais elétricos no solo da malha de aterramento, utilizando comunicação sem fio, possibilita a avaliação das condições *on site* de operação do sistema de aterramento, submetido a impulsos de corrente de alta intensidade. O termo condições *on site* refere-se às condições reais de operação do sistema em relação ao tempo e ao espaço.

A adoção da comunicação sem fio, no sistema de aquisição, possibilita uma diminuição da influência dos efeitos eletromagnéticos, inerentes ao ambiente de subestações elétricas. Além disso, a medição a distância oferece mais segurança para os profissionais envolvidos.

Ademais, o sistema deve oferecer as condições adequadas para o estudo das altas correntes, das altas tensões, das frequências elevadas e seus efeitos. E assim, com os dados adquiridos, torna-se possível emitir uma avaliação das condições de degradação de uma malha de aterramento, bem como, construir modelos que sejam úteis ao planejamento e à predição de falhas do aterramento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Desenvolver um sistema de aquisição de dados, capaz de adquirir sinais impulsivos de tensão e corrente de altas intensidades, a serem utilizados na avaliação das condições de degradação de malhas de aterramento energizadas.

1.3.2 Específicos

- Especificar os parâmetros do sistema de aquisição de dados adequado a adquirir sinais impulsivos de alta intensidade;
- Escolher uma tecnologia para construção de uma rede de sensores sem fio, capaz de adquirir, em diversos pontos da malha, sinais resultantes da injeção de cargas provenientes de corrente elétrica de alta intensidade;
- Desenvolver e conceber circuitos de aquisição, transmissão de dados e rotina computacional para tratamento dos dados, considerando a operação em ambientes de subestações energizadas;
- Validar o sistema desenvolvido por meio da realização de experimentos em condições de impulsos de alta intensidade que reproduzam as condições reais de operação de um aterramento;
- Analisar o comportamento da tensão, em diversos pontos de um aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade, a partir de dados adquiridos com o sistema desenvolvido.

1.4 Metodologia

Para se atingir o objetivo proposto, o desenvolvimento da pesquisa foi realizado segundo as etapas:

Etapa 1 - Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica foi uma atividade de pesquisa realizada de forma permanente ao longo do trabalho de doutorado e teve como objetivo manter a contextualização atualizada, considerando o monitoramento de sinais para avaliação das condições operacionais de aterramentos submetidos a impulsos de corrente de alta

intensidade. Além disso, para compreensão e conhecimento de conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho, foram realizadas pesquisas em áreas correlatas:

- Compreensão do comportamento de sistemas de aterramento em frequência industrial;
- Estudo do desempenho de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente de baixa e de alta intensidades;
- Compreensão do fenômeno das descargas atmosféricas sobre sistemas de aterramento;
- Entendimento do processo de escoamento de cargas no solo, provenientes de corrente elétrica;
- Identificação dos parâmetros relevantes para o monitoramento de sistemas de aterramento, com a finalidade de elaboração de uma avaliação das condições de degradação da malha;

Etapa 2 - Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados para estudar o comportamento do aterramento tanto na frequência industrial, como em frequências elevadas. Também foram realizados ensaios para se conhecer os sinais que simulam as descargas atmosféricas em laboratório, utilizando-se um gerador de impulsos de corrente de alta intensidade. Além disso, foram realizados experimentos para se conhecer as características dos sinais decorrentes da injeção de cargas no solo, com a finalidade de especificar o sistema de aquisição de dados.

Etapa 3 - Concepção de circuitos

A concepção de circuitos consiste na elaboração do projeto, desenvolvimento e concepção propriamente dita dos circuitos que compõem o sistema: aquisição de dados, condicionamento de sinais e transmissão de dados. Essa parte física do circuito, que compreende dispositivos e componentes eletrônicos, é chamada de *hardware*.

Etapa 4 – Desenvolvimento de rotina computacional

A elaboração de rotina computacional, que também é denominada por *software*, compreende o desenvolvimento de rotina para recepção e análise dos dados adquiridos.

Etapa 5 - Testes para validação do sistema

A etapa de testes do sistema compreende a realização de experimentos para validar o *hardware* e o *software* desenvolvidos. No decorrer dos testes, foram identificadas as necessidades de correção de falhas, ou de melhorias, do sistema como um todo, compreendendo circuitos e rotinas computacionais. Este processo foi cíclico, introduzindo melhoramentos até se estabelecer a versão final.

O teste consiste na comparação dos sinais adquiridos, de forma simultânea, com o sistema desenvolvido e com o osciloscópio. Foram realizados testes em bancada, em laboratório de alta tensão e em campo. Considerando que o sistema de aquisição de dados desenvolvido tem dois blocos, sendo um em baixa tensão e o outro em alta tensão, inicialmente o circuito de baixa tensão foi testado na bancada. Em seguida, os testes em laboratório de alta tensão e em campo foram realizados para testar os dois blocos (alta tensão e baixa tensão) em conjunto. Nos testes em alta tensão, utilizou-se um gerador de impulsos de corrente de alta intensidade.

Etapa 6 – Ensaio para avaliação do comportamento de um aterramento

Os ensaios para a avaliação do comportamento de um aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade foram realizados com o objetivo de verificar os resultados a partir da aquisição de dados adquiridos com o sistema desenvolvido e validado.

Etapa 7 - Produção de textos e apresentação de trabalhos

A produção de textos, tarefa inerente ao trabalho de doutorado, engloba também a redação de artigos submetidos a periódicos e elaboração de trabalhos apresentados em eventos científicos nacionais e internacionais.

1.5 Contribuição da Pesquisa

O cenário futuro do setor elétrico brasileiro apresenta grandes desafios envolvendo integração de sistemas, geração descentralizada, fontes alternativas de energia, medição inteligente, dentre outros. Neste contexto, há exigência de evolução rápida e contínua no aumento da confiabilidade, disponibilidade e da segurança do suprimento de energia, mantendo-se em altos níveis a continuidade dos serviços. A principal contribuição desta pesquisa é o desenvolvimento de um sistema para aquisição de sinais de tensões e correntes de altas intensidades, em frequências elevadas, mantendo-se a subestação energizada. Pelo exposto, o sistema desenvolvido deve ser capaz de operar em

ambientes sujeitos a interferências elétricas e magnéticas de altas magnitudes, próprio de subestações energizadas.

A segurança de um sistema de potência está relacionada com a habilidade em responder a distúrbios que possam ocorrer no sistema. Geralmente, os sistemas elétricos, são construídos para continuar operando após serem submetidos a uma eventualidade, como uma descarga elétrica. O sistema de aquisição de dados desenvolvido nessa tese oferece uma solução para o acompanhamento permanente das condições de operação de um sistema de aterramento, uma vez que disponibiliza continuamente dados dos parâmetros que propiciam o conhecimento das suas reais condições de operação, possibilitando tomadas de decisões necessárias à garantia do funcionamento adequado da malha de terra. Além do mais, com os dados adquiridos, é possível emitir uma avaliação das condições de degradação de uma malha de aterramento, tornando-se viável a construção de modelos que serão úteis no planejamento e na predição de falhas do aterramento.

A atual Norma Regulamentadora - NR 10, editada pela portaria MTE 598 de 07/12/2004, “estabelece os requisitos e condições mínimas objetivando a implementação de medidas de controle e sistemas preventivos, de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores que, direta ou indiretamente, interajam em instalações elétricas e serviços com eletricidade”. É significativo o aumento das exigências que o empregador deve cumprir para garantir a segurança dos trabalhadores, sobretudo quando se trata de instalações em alta tensão energizadas. Nesse contexto a contribuição deste trabalho é fundamental, uma vez que possibilita a aquisição de dados em subestações energizadas, utilizando a comunicação sem fios, dispensando assim a intervenção de trabalhadores nas proximidades das zonas controladas e de risco.

Devido à importância do aterramento para o sistema elétrico, o desenvolvimento de um sistema adequado e dedicado para a aquisição de sinais elétricos no solo da malha de aterramento, possibilita a avaliação das condições *on site* de operação do sistema de aterramento, submetido a impulsos de corrente de alta intensidade. Para tanto, o sistema de aquisição de dados desenvolvido nesse trabalho, apresenta condições mais adequadas para a realização de estudos sobre os efeitos das altas correntes e tensões e das frequências elevadas.

O desempenho satisfatório das instalações de um sistema elétrico depende

essencialmente da operação adequada de seus equipamentos, dos instrumentos responsáveis pela monitoração de sua operação e dos dispositivos de medição, proteção e controle. Os dispositivos de medição, proteção e controle utilizados em subestações, que num passado recente eram eletromecânicos, têm sido substituídos por dispositivos eletrônicos e, recentemente, os digitais, esses dispositivos, apesar de mais eficientes, são mais susceptíveis à ocorrência de eventos transitórios como os causados por descargas atmosféricas e manobra. Muitas falhas relatadas, ocorridas em sistemas de supervisão e monitoração digital de instalações de subestações elétricas são atribuídas aos efeitos das tensões transferidas produzidas pelos surtos.

A utilização da comunicação sem fio no sistema de aquisição desenvolvido nessa tese, possibilita a redução da influência dos efeitos eletromagnéticos, inerentes ao ambiente de subestações, garantindo medições mais confiáveis dos sinais de tensão e de corrente, mesmo em subestações energizadas.

1.6 Estrutura da Tese

No Capítulo 2 é explanada a fundamentação teórica abordando os conceitos básicos referentes a aterramento elétrico, descargas atmosféricas e aquisição de dados, necessários ao entendimento do desenvolvimento teórico do trabalho. A revisão bibliográfica, que explora os trabalhos publicados acerca de monitoramento e avaliação de aterramentos, está contida no Capítulo 3. No Capítulo 4, são apresentadas as condições de realização dos experimentos, incluindo os materiais e os métodos utilizados para atingir os objetivos. Os resultados, incluindo detalhamento do sistema, medições para testar o sistema e ensaios para avaliar um aterramento, são descritos no Capítulo 5. No Capítulo 6, estão contempladas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados, de forma sucinta, os principais conceitos acerca de sistemas de aterramento, descargas atmosféricas, sistemas de aquisição de dados e redes de sensores sem fio. Tais conceitos são necessários à compreensão do comportamento de um aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade. Além disso, eles são úteis no desenvolvimento de um sistema aplicado à aquisição de dados para monitoramento das condições de operação de malhas de aterramento submetidas a correntes impulsivas.

2.1 Aterramento Elétrico

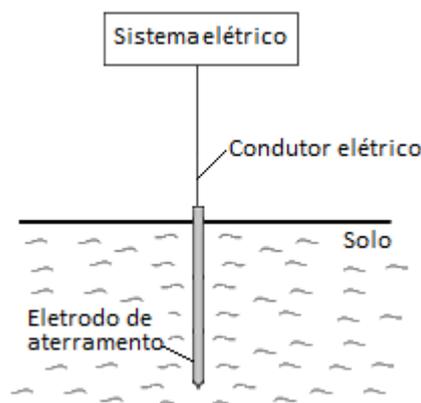
O aterramento é uma ligação física de um sistema elétrico à terra. Em sistemas elétricos de potência, sua função básica é oferecer um caminho de baixa impedância para escoamento de correntes provenientes de surtos atmosféricos e de chaveamentos dos sistemas elétricos, desbalanceamento das correntes na frequência industrial e curtos-circuitos. Além disso, o aterramento deve estabelecer uma tensão de referência para todo o sistema elétrico em que se encontra inserido (VISACRO, 2005). Neste contexto, o aterramento é um dos principais elementos para garantir a segurança de pessoas e equipamentos em sistemas elétricos. É recomendado que um aterramento tenha as seguintes características (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995):

- Baixa resistência;
- Potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança;
- Caminho de escoamento de descargas atmosféricas à terra;
- Uso da terra como retorno de corrente no sistema monofilar com retorno por terra (MRT);
- Escoamento das cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

Os três componentes básicos de um sistema de aterramento são: conexões elétricas, eletrodos de aterramento e solo (VISACRO, 2005). Os componentes podem estar dispostos em diferentes configurações ou arranjos para facilitar o escoamento da corrente no solo. O arranjo mais simples é realizado com um único eletrodo enterrado no solo, conforme mostrado na Figura 2.1. O mais complexo, é composto por eletrodos,

fios e/ou cabos conectados e enterrados no solo.

Figura 2.1 - Esboço do aterramento elétrico com um eletrodo.



Fonte: Adaptado de Visacro (2007)

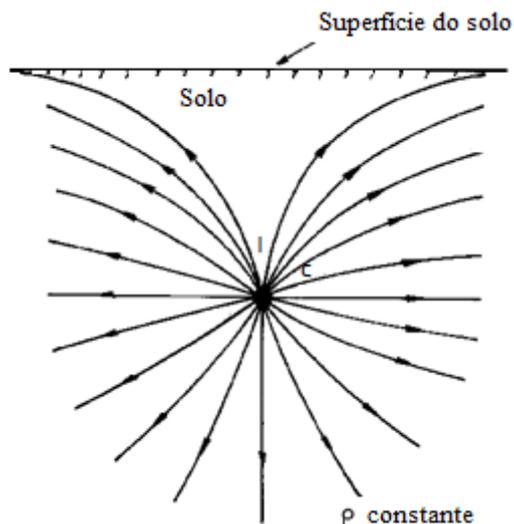
A resistência ao fluxo de cargas elétricas em direção ao solo é chamada de impedância de terra. As características elétricas, químicas e físicas do solo influenciam no valor da impedância de terra. A resistividade do solo depende, dentre outros fatores, da natureza do solo e das condições climáticas. A permissividade, corresponde à característica de polarização de um material em resposta a um campo elétrico, com maior relevância em frequências elevadas. A resistividade e a permissividade elétricas são as propriedades do solo com maior influência sobre o desempenho de um sistema de aterramento.

2.1.1 Circulação da Corrente Elétrica no Solo

Em Kindermann e Campagnolo (1995) é mostrada a distribuição do fluxo de corrente a partir de um ponto C em um solo homogêneo, considerando que desse ponto sai uma corrente elétrica I. Um esboço, das linhas de corrente saindo do ponto C, pode ser visto na Figura 2.2.

Para um eletrodo vertical, fincado em um solo homogêneo, os autores mostram que as superfícies equipotenciais são representadas por linhas tracejadas, se seguem um trajeto conforme esboçado na Figura 2.3.

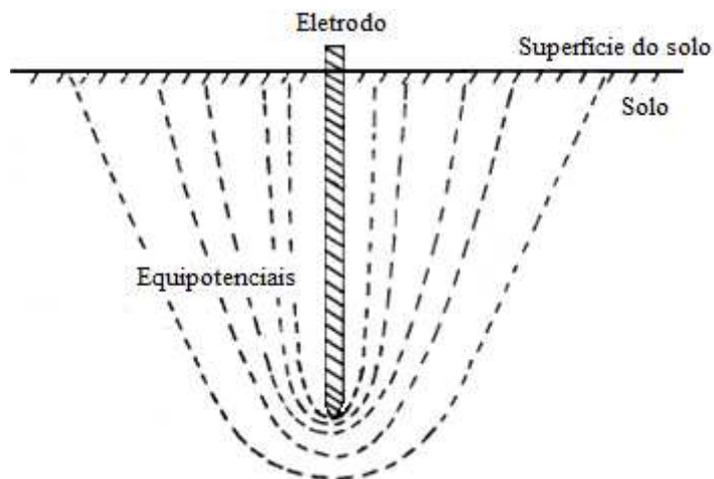
Figura 2.2 - Esboço das linhas de corrente em torno do ponto C, de onde sai uma corrente I.



Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Na Figura 2.3 são esboçadas as linhas equipotenciais devido à injeção de cargas elétricas em um eletrodo vertical fincado no solo.

Figura 2.3 - Superfícies equipotenciais devido a um eletrodo de injeção de corrente.

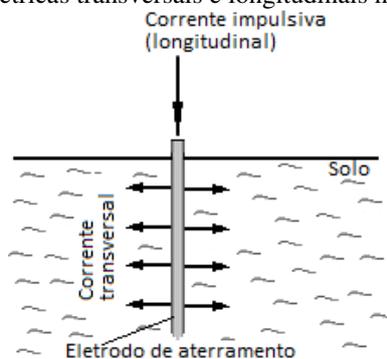


Fonte: (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Encontra-se em Visacro (2005, 2007) uma análise do efeito da corrente elétrica no solo. Considerando que a corrente elétrica é introduzida no solo através de um eletrodo de aterramento, ela se divide em duas componentes: uma transversal e outra longitudinal, conforme mostrado na Figura 2.4. A componente transversal é responsável

pelo escoamento da corrente elétrica no solo e estabelece um campo elétrico. A componente longitudinal é responsável por perdas internas ao longo do condutor, estabelecendo um campo magnético, de acordo com a lei de Ampère.

Figura 2.4 - Correntes elétricas transversais e longitudinais num segmento do eletrodo.



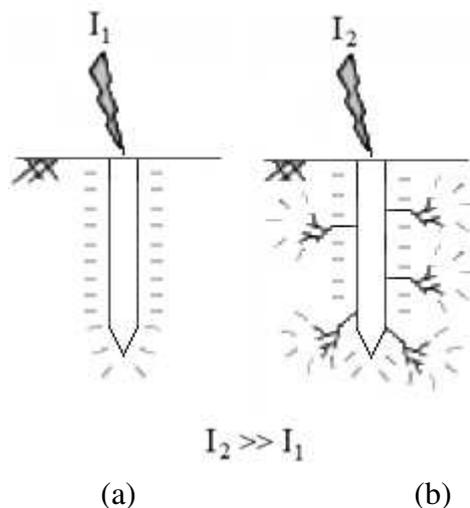
Fonte: Adaptado de Visacro (2007).

O campo elétrico devido à componente transversal determina o fluxo de correntes capacitivas e indutivas no solo. A relação entre as correntes capacitivas e indutivas depende da razão $\sigma/\omega\epsilon$, em que: σ é a condutividade do solo ($\sigma=1/\rho$), ω é a frequência angular e ϵ é a permissividade do meio. Portanto, a relação não depende da geometria dos eletrodos, mas das características elétricas do solo e da frequência do sinal da corrente injetada (VISACRO, 2005, 2007).

Quando um impulso de corrente elétrica é aplicado no solo, pode ocorrer a ionização do ar contido no solo, na região próxima ao eletrodo de injeção, alterando a impedância do aterramento (ESPEL *et al.*, 2004; GRCEV, 2009; DIAZ e SILVA 2011, VISACRO 2015).

Impulsos de tensão aplicados em hastes aterradas podem gerar campo elétrico capaz de favorecer o processo de ionização do ar contido no solo, na vizinhança do eletrodo de injeção (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995). Na Figura 2.5 são mostradas duas hastes submetidas a impulsos de corrente, sendo que em uma (Figura 2.5.b) é representado o processo de ionização.

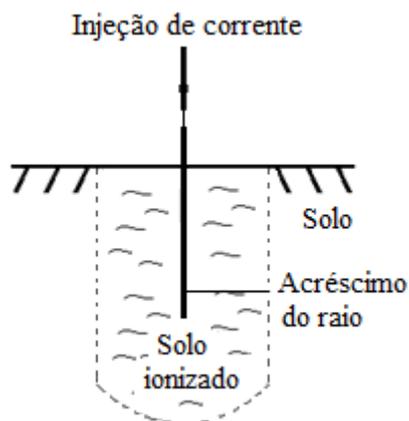
Figura 2.5 - Eletrodo submetido a corrente impulsiva (a) sem ionização; (b) com ionização do solo.



Fonte: Adaptado de Souza *et al.*, (2014).

Na Figura 2.6 é ilustrada uma representação do solo ao redor de um eletrodo submetido a impulsos de corrente elétrica em que ocorreu a ionização do solo. O solo ionizado se comporta como se houvesse um aumento efetivo do raio do eletrodo, e conseqüentemente, provoca diminuição da resistência de terra (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995).

Figura 2.6 - Zona de ionização no solo



Fonte: Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995).

Para Diaz e Silva (2011) e Espel *et al.* (2004), o comportamento transitório do aterramento também é afetado pela ionização do solo. A injeção de impulsos de corrente de alta intensidade no solo, associado ao valor da impedância do aterramento, favorece

a ionização, o que provoca redução do valor da impedância impulsiva.

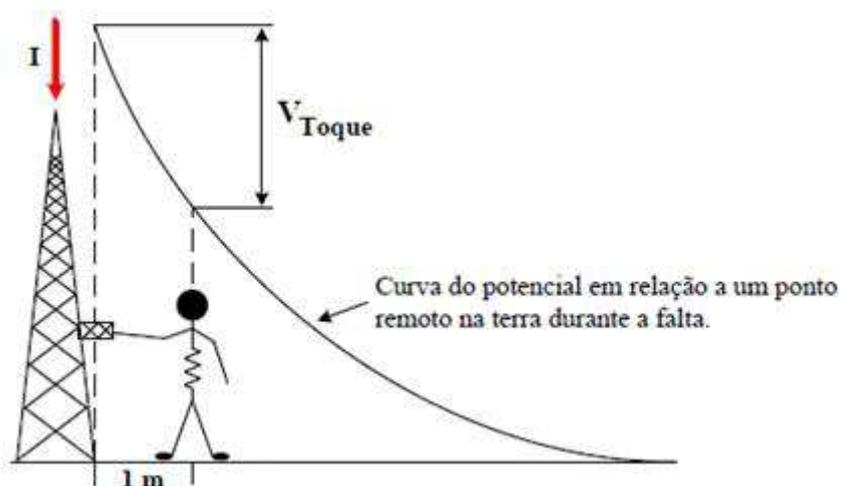
2.1.2 Potenciais de Segurança

Em decorrência do escoamento de correntes elétricas no solo, observam-se gradientes de potenciais na superfície do solo de um aterramento e áreas circunvizinhas. A malha de aterramento deve ser projetada para assegurar que os potenciais estejam dentro dos limites de segurança (DIAS, 2011). Relacionados a esses gradientes, três parâmetros são fundamentais para a avaliação das condições de operação do aterramento: tensão de toque, tensão de passo e tensão de transferência (IEEE-81, 2012; IEEE-80, 2000).

Tensão de Toque

A tensão de toque é a diferença de tensão que pode existir entre um determinado ponto de uma estrutura metálica aterrada, situada ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 m da base da estrutura (IEEE-81, 2012; IEEE-80, 2000). Na Figura 2.7, está representado um esquema de como pode ocorrer o potencial de toque devido uma corrente I .

Figura 2.7- Representação da ocorrência do potencial de toque.



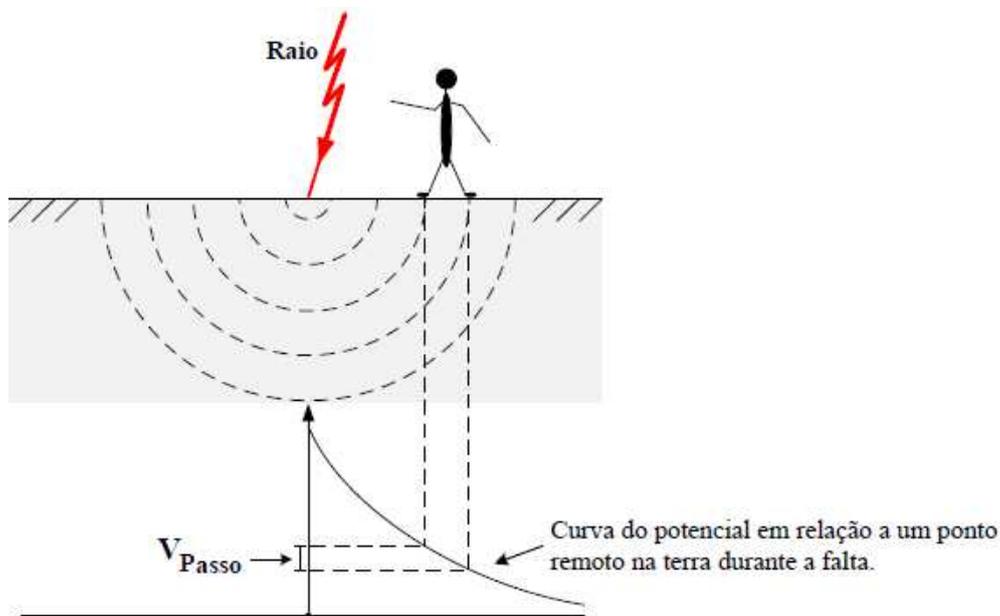
Fonte: Adaptado de Dias (2011).

Tensão de Passo

A tensão de passo é a diferença de potencial que pode ocorrer entre dois pontos situados na superfície da terra, separados por uma distância igual ao passo de uma pessoa. Considera-se essa distância como um metro (IEEE-81, 2012; IEEE-80, 2000).

Pode ser visto na Figura 2.8 um esquema representando uma descarga atmosférica atingindo o solo, e o potencial de passo.

Figura 2.8 - Representação da ocorrência do potencial de passo



Fonte: Adaptado de Dias (2011).

O potencial de toque traz mais riscos ao ser humano do que o potencial de passo. Isso se deve ao fato de que no primeiro caso, o caminho da corrente elétrica no corpo humano inclui órgãos vitais, a exemplo do coração (IEEE-81, 2012; IEEE-80, 2000).

Tensão de Transferência

A tensão de transferência é um caso particular da tensão de toque, em que a pessoa se liga à estrutura metálica por meio de um condutor. Um exemplo dessa tensão se apresenta quando uma pessoa ao conduzir um objeto metálico, inadvertidamente, deixar que o objeto faça a conexão com uma estrutura metálica energizada.

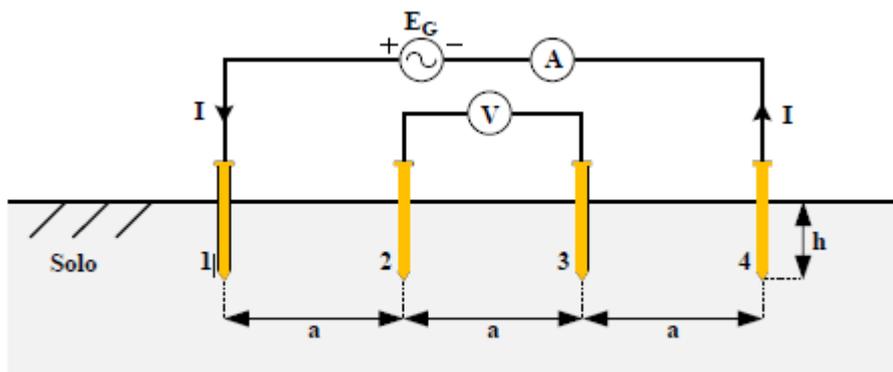
2.1.3 Medição da Resistividade do Solo pelo Método de Wenner

A resistividade do solo (ρ), por definição, é a resistência elétrica medida entre as faces opostas do volume de um solo. O volume consiste de um cubo homogêneo e isotrópico de dimensões unitárias, preenchido pelo solo em análise.

O método de Wenner para medir a resistividade do solo é apresentado em Kindermann e Campagnolo (1995). Nele, a resistividade do solo é obtida a partir de

quatro eletrodos cravados no solo a uma mesma profundidade h , igualmente espaçados por uma distância a e dispostos em linha reta. Na Figura 2.9 é mostrado o esquema da disposição dos eletrodos.

Figura 2.9 - Disposição dos eletrodos no método de Wenner



Fonte: (DIAS, 2011).

Uma corrente elétrica I é injetada no eletrodo **1**, e o retorno se dá pelo eletrodo **4**. Os eletrodos **2** e **3** são sensores que possibilitam medir a diferença de potencial entre estes pontos, devido à corrente no solo. Conhecidas a tensão e a corrente, a resistência elétrica do solo (R) é obtida pela Lei de Ohm. A partir da Expressão (1) a resistividade elétrica do solo é calculada. Deve ser observada a recomendação de que o diâmetro do eletrodo seja menor ou igual a $0,1a$.

$$\rho = \frac{4\pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2+4h^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2+h^2}}} \quad (1).$$

Para $a \gg h$, (1) pode ser simplificada como (2):

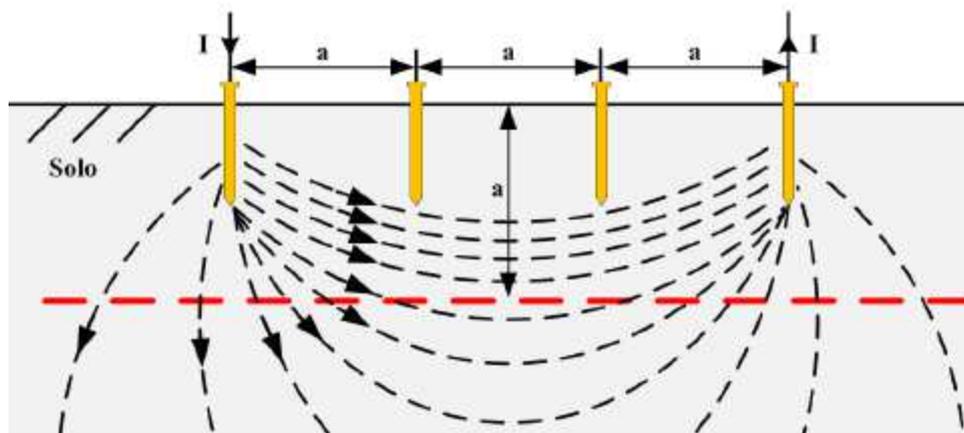
$$\rho = 2\pi \cdot a \cdot R \quad (2).$$

De acordo com (IEEE-81, 2012), (2) é aproximadamente, a resistividade do solo para uma distância a .

De acordo com Kindermann e Campagnolo (1995) praticamente 58% da distribuição de corrente que passa entre os eletrodos **1** e **4** ocorre a uma profundidade igual ao espaçamento a . A corrente elétrica injetada que atinge uma profundidade maior do que a , tem uma área de dispersão grande, e seu efeito pode ser desconsiderado. Na Figura 2.10, é apresentada a distribuição da corrente elétrica no solo, pode-se

observar que elas têm maior concentração na região próxima às hastes e entre elas.

Figura 2.10 - Distribuição das linhas de corrente no solo no método de Wenner.



Fonte: Adaptado de Dias (2011).

Para se obter a resistividade do aterramento, deve se realizar medições da resistividade do solo com diferentes espaçamentos e direções, de forma a cobrir toda a área em análise, obedecendo às recomendações da Norma ABNT NBR 7117.

2.1.4 Parâmetros Representativos das Condições de Operação do Aterramento Submetidos a Impulsos de Corrente

Vários autores têm sugerido grandezas para aferir o comportamento dos sistemas de aterramentos, contudo, a diversidade de condições sob as quais são realizados os experimentos para avaliação dos aterramentos submetidos a impulsos de corrente, bem como as diferentes abordagens dos parâmetros utilizados, tornam a comparação dos resultados obtidos uma tarefa difícil (GRCEV, 2009; ESPEL, 2004). Essas dificuldades se refletem no fato de que não existe consenso entre os autores, sobre quais parâmetros são representativos para caracterizar o desempenho do aterramento (VISACRO, 2007; GRCEV, 2009; ESPEL *et al.*, 2004).

Espera-se que, diante de uma descarga atmosférica, a impedância de surto da malha seja menor que a impedância equivalente do restante do sistema de aterramento para evitar que a corrente danifique os equipamentos do sistema (VISACRO, 2007).

A resistência em baixa frequência é uma grandeza representativa do comportamento de um sistema de aterramento submetido a frequências inferiores a 100 kHz e corresponde à razão V/I , em que V é a tensão aplicada ao aterramento e I é a

corrente injetada no solo (GRCEV, 2009).

Um dos principais objetivos para determinação dos parâmetros que caracterizam o comportamento transitório de sistemas de aterramento é determinar o quanto este comportamento se desviou daquele apresentado em baixas frequências (GRCEV, 2009, VISACRO, 2007).

Embora não exista padronização acerca das grandezas que caracterizam a resposta do aterramento ao impulso de corrente, as mais usadas são: impedância transitória, impedância impulsiva, coeficiente impulsivo, comprimento efetivo do eletrodo, tempo de duração do transitório e impedância harmônica (GRCEV, 2009), cujas definições são apresentadas a seguir:

- Impedância transitória $z(t)$, é dada pela razão entre a tensão no ponto de injeção ($v(t)$) e a corrente elétrica injetada ($i(t)$), considerando a variação do sinal no tempo, conforme:

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)}. \quad (3)$$

- Impedância impulsiva Z_p , é uma grandeza escalar obtida pelo quociente entre os valores de pico da tensão aplicada (V_p) e da corrente elétrica injetada (I_p):

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}. \quad (4)$$

- Coeficiente impulsivo A , corresponde à relação entre a impedância impulsiva (Z_p) e a resistência a baixa frequência (R_{LF}):

$$A = \frac{Z_p}{R_{LF}}. \quad (5)$$

- Comprimento efetivo do eletrodo, l_{ef} , é o máximo comprimento do eletrodo de aterramento para o qual o seu aumento não implica em redução significativa da impedância impulsiva;
- Tempo de duração do transitório é o tempo em que a impedância transitória atinge o valor da resistência em baixa frequência, R_{LF} ;
- Impedância harmônica $Z(j\omega)$, que é obtida pelo quociente entre o fasor da tensão aplicada ($V(j\omega)$) e o fasor da corrente injetada ($I(j\omega)$):

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)}. \quad (6)$$

Meliopoulus e Moharam (1983) destacaram que a definição de impedância impulsiva contém uma incerteza, pois 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. Sendo assim, existem três alternativas para o cálculo da impedância impulsiva: a) são considerados o pico de tensão e o pico de corrente; b) são tomados os valores de pico de tensão e o valor de corrente nesse instante; c) são considerados os valores de pico de corrente e o valor de tensão correspondente. Em cada caso, a alternativa usada deve ser declarada.

2.2 Descargas Atmosféricas

A descarga atmosférica é um fenômeno natural e consiste em uma descarga elétrica intensa de corrente (valor típico de pico de 30 kA, podendo atingir centenas de quiloampères) em um período de tempo da ordem de microssegundos (PORTELA, 2000). A descarga atmosférica é comumente denominada de raio. Essas descargas são originadas da diferença de potencial entre nuvens, ou entre nuvens e terra, que estão eletricamente carregadas com cargas opostas. As descargas que ocorrem entre nuvens e terra despertam maior interesse para o setor elétrico em virtude da influência que exercem sobre os sistemas elétricos. As descargas entre nuvens ocorrem a quilômetros de distância em relação à terra e os seus efeitos sobre os sistemas elétricos não são relevantes (SCHROEDER, 2001). Na Figura 2.11 é exibida uma fotografia onde se pode ver as descargas atmosféricas sobre uma cidade.

Figura 2.11 - Fotografia de descargas atmosféricas sobre a cidade de Londrina (PR).



Fonte: (GLOBO, 2015).

2.2.1 Descargas Atmosféricas nos Sistemas Elétricos

As descargas atmosféricas são responsáveis por um terço das interrupções no fornecimento de energia elétrica no mundo. No Brasil, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 40% na distribuição de energia elétrica são provocados por raios (INPE). A partir desses índices, é evidente a relevância do estudo de sistemas elétricos submetidos a descargas atmosféricas.

O Brasil, como maior país da zona tropical do planeta, onde o clima é mais quente e, portanto, mais favorável à formação de tempestades e de raios, registra uma média de 50 milhões de descargas atmosféricas por ano (INPE, 2015).

Para proteger os sistemas elétricos dos danos causados por descargas atmosféricas, os elementos essenciais são: blindagem elétrica (cabo guarda), aterramento e para-raios. Para a implantação e otimização das práticas de proteção faz-se necessário conhecer o fenômeno por meio de seus parâmetros, tais como: corrente de descarga, incidência geográfica e densidade de descargas para a terra. Segundo Grcev (2009) e Haddad (2010) a corrente de descarga é o parâmetro de maior influência sobre os efeitos de um raio.

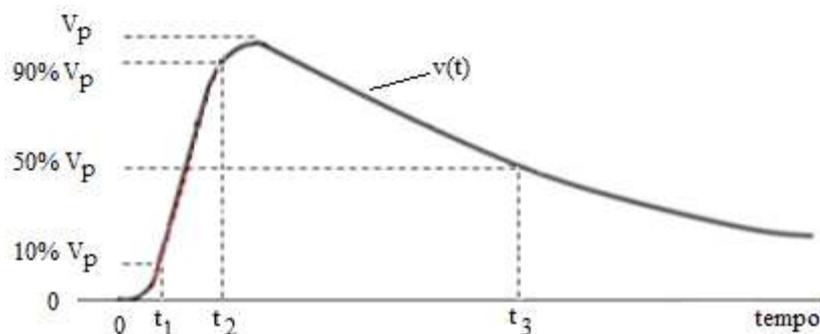
Para se conhecer os parâmetros deste fenômeno, bem como estudar o comportamento do aterramento submetido a descargas atmosféricas, podem ser realizados experimentos utilizando sinais produzidos por um gerador de impulsos de alta intensidade para simular as descargas. Na Seção 2.2.2, são apresentadas as principais características do sinal 8/20 μs que é um padrão representativo do sinal de descarga atmosférica.

2.2.2 Sinal 8/20 μs

Para efeitos de padronização, usualmente a corrente de descarga é representada por um sinal 8/20 μs , que corresponde a uma curva que tem um tempo de frente (T_f) de 8 μs e um tempo de cauda (T_c) de 20 μs , conforme mostrado na Figura 2.12. De forma prática, o tempo de frente corresponde ao tempo de subida do sinal e o tempo de cauda, corresponde ao tempo em que o sinal decai 50% do valor de pico. O método analítico, para determinação dos tempos de frente e de cauda, procura diminuir a influência da incerteza na determinação do instante de início do impulso. Usando semelhança de triângulos, o tempo de frente corresponde a 1,25 vezes o intervalo de tempo que o sinal

vai de 10% até 90% do valor de pico. O tempo de cauda refere-se ao tempo em que o impulso, partindo da amplitude zero, tem um decaimento de 50% do valor de pico (V_p).

Figura. 2.12 - Forma de onda representativa de uma descarga atmosférica (Sinal 8/20 μ s).



Fonte: Adaptado de Costa (2011).

Expressões relativas ao tempo de frente (T_f) e o tempo de cauda (T_c) são apresentadas em (7) e (8):

$$T_f = 1,25(t_2 - t_1) \quad (7)$$

$$T_c = t_3 \quad (8)$$

A resposta de um aterramento submetido a impulsos de corrente, sofre influência da sua forma de onda. Em algumas pesquisas, dentre as quais: Grcev (2011), Gceev (2009), Haddad *et al.* (2010) e Visacro (2007), foram realizados experimentos variando o tempo de frente do sinal, chegando à conclusão que quanto menor o tempo de frente, maior a impedância.

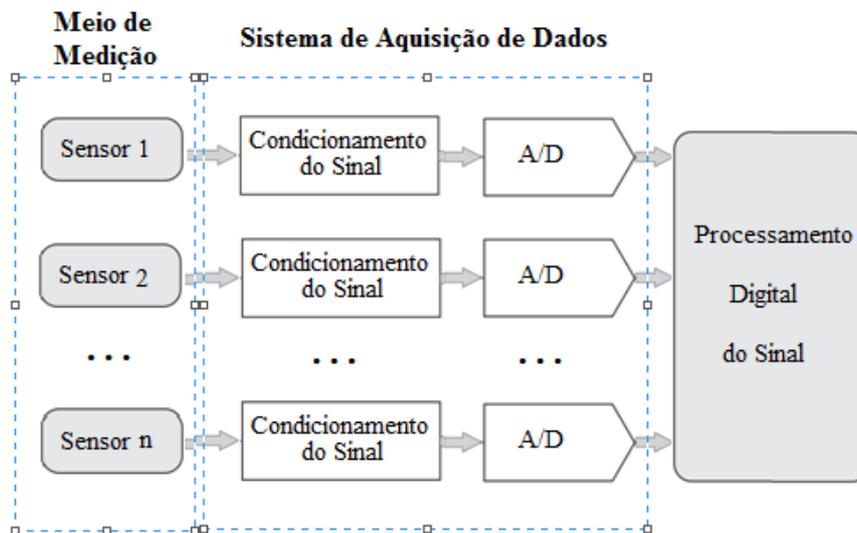
2.3 Sistema de Aquisição de Dados

De uma forma geral, os sistemas de aquisição de dados têm o objetivo de obter dados sobre um fenômeno elétrico ou físico, tais como: tensão, corrente elétrica e temperatura. Tais sistemas devem ser projetados para atender às especificações exigidas por uma determinada aplicação e são compostos por sensores ou transdutores, condicionadores de sinais, conversores do sinal analógico para digital (A/D) e programas computacionais.

Na Figura 2.13, é apresentado um diagrama de blocos genérico de um sistema de aquisição de dados de n -canais, incluindo o meio de medição e o processamento digital

do sinal.

Figura 2.13 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados incluindo o meio de medição e o processamento digital do sinal.



Fonte: (FREIRE, 2010).

O sensor é um dispositivo que responde a um determinado estímulo. O transdutor é um dispositivo que, além de responder a um estímulo, pode converter uma forma de energia em outra. Os sinais adquiridos por meio de sensores, ou transdutores apresentam uma grande diversidade de forma, amplitude e frequência. A função do condicionador de sinais é adequar os parâmetros do sinal adquirido para uma posterior etapa de conversão analógico-digital e às condições de segurança necessárias ao processo.

O conversor A/D é responsável por converter o sinal analógico em um sinal digital. É formado basicamente por amostrador-segurador (*SH-sample/hold*), quantizador e codificador. Para assegurar que o sinal captado possa ser recuperado, de acordo com o teorema da amostragem, a frequência de amostragem, deve ser maior do que o dobro da maior frequência contida (OLIVEIRA, 2012). Considerando um sinal com frequência máxima f_{\max} e uma banda $[0;f_{\max}]$, tem-se que a frequência de amostragem é dada por:

$$f_{\text{amostragem}} > 2f_{\max} \quad (9)$$

Sendo assim, o sinal amostrado conterá toda informação do sinal original, desde que a Equação (9) seja obedecida.

A etapa de processamento digital de sinais permite a utilização de diversas técnicas tais como: filtragem, análise em frequência, compressão de dados, encriptamento, etc. Além disso, podem ser implementados sistema de transmissão de dados e visualização.

Para se especificar um sistema de aquisição de dados, é necessário considerar, principalmente, os seguintes parâmetros: amplitude e largura de banda do sinal de entrada, número de canais analógicos, duração do evento e resolução das amostras.

A faixa dinâmica de amplitude do sinal de entrada corresponde ao intervalo de valores de amplitude que o sinal de entrada pode assumir. A largura de banda do sinal de entrada é a faixa de frequência do sinal de entrada a ser efetivamente trabalhada. O número de canais analógicos corresponde ao número de sinais que o sistema vai adquirir. A duração do evento corresponde à janela de tempo para a visualização das características desejadas do sinal medido. O número de bits que o conversor A/D utiliza para representar o sinal analógico define o passo de quantização. Quanto maior o número de divisões em que a faixa do sinal for representada, melhor é a resolução do conversor.

2.4 Rede de Sensores sem Fio

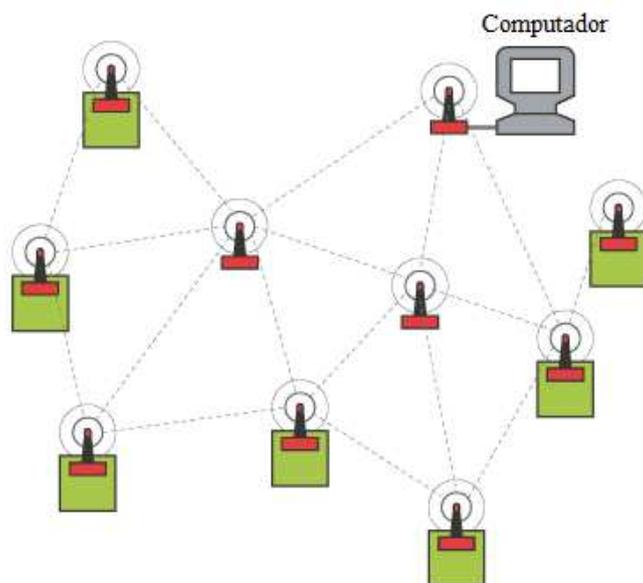
Uma rede de sensores sem fio (RSSF) tem o objetivo de monitorar e eventualmente controlar um ambiente. Ela é formada por um conjunto de dispositivos eletrônicos com a finalidade de adquirir medidas. Cada dispositivo que, comumente é generalizado e denominado de nó sensor, tem basicamente três componentes: sensor (propriamente dito), *hardware/software* e transmissão/recepção de dados sem fio (HILL, 2003).

As potencialidades das redes de sensores sem fio residem na habilidade de agregar desde poucas unidades a um grande número de nós sensores. Os nós devem ter a capacidade de se organizar e se configurar independentemente, de forma a garantir a manutenção da rede na ocorrência de falhas de comunicação ou perda de algum nó (SILVA; FRUETT, 2010). Na Figura 2.14, pode-se ver uma representação de uma rede de sensores sem fio.

É grande o número de aplicações de uma rede de sensores sem fio. A título de ilustração, podem ser citados os exemplos de monitoramento: consumo (água e

energia), variáveis meteorológicas (como temperatura ou umidade do ar), movimentação de pessoas e veículos (segurança), condições de operação de uma máquina (nível de óleo, temperatura, velocidade), etc.

Figura 2.14 - Representação de uma rede de sensores sem fio.



Fonte: Adaptado de Johnson (2015).

Uma aplicação de grande interesse de RSSF é o monitoramento de grandezas em ambientes hostis, em que o acesso é difícil, ou que ofereçam riscos às pessoas. São exemplos dessas aplicações o monitoramento de áreas submersas profundas (vida marinha e exploração de petróleo e gás), de ambientes com elementos tóxicos e de ambientes com riscos de choque elétrico.

O nó sensor é um dispositivo capaz de realizar o sensoriamento, o processamento e a comunicação de dados. Sendo assim, os nós também podem desempenhar funções relativas ao tráfego de informações numa rede. Dependendo da aplicação, alguns nós sensores tem a função de concentrar informações dentro da própria rede, podendo ser também usado para se comunicar com outras redes (LOUREIRO *et al.* 2015).

Devido à diversidade de tecnologias e dispositivos, existe uma grande variedade de formas de se realizar a comunicação entre os nós sensores. Para facilitar a migração entre diferentes dispositivos e possibilitar a comunicação entre as diversas tecnologias, são estabelecidos protocolos de comunicação.

Os principais protocolos de comunicação com as respectivas tecnologias usadas em redes de sensores sem fio são IEEE 802.11 (Wi-Fi), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e IEEE802.15.4 (ZigBee).

2.4.1 Padrão IEEE 802.15.4

O Padrão IEEE 802.15.4 define um protocolo que é aplicado a dispositivos de comunicação em rádio frequência de pequeno alcance, com baixa taxa de transmissão de dados e baixa potência (SANTOS, 2007).

Uma rede IEEE 802.15.4 possui dois tipos de dispositivos:

1) FFD (*Full Function Device*) – é um dispositivo que pode desempenhar qualquer função dentro da rede (coordenador, roteador ou dispositivo final). Pode se comunicar com qualquer dispositivo dentro da rede.

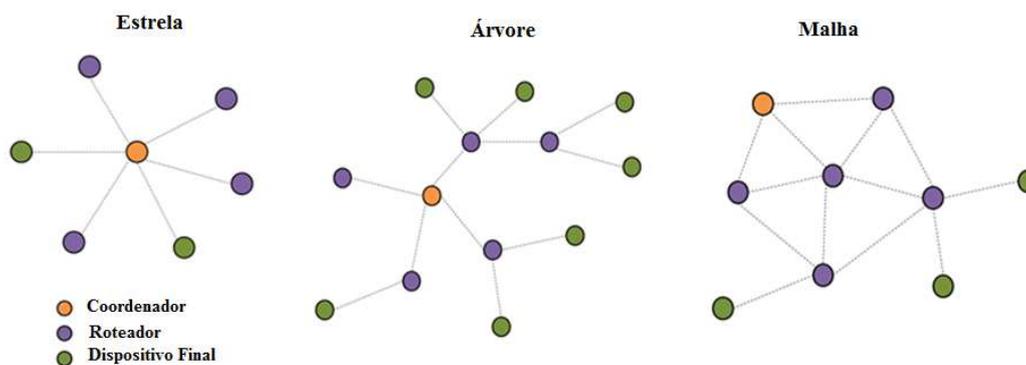
2) RFD (*Reduced Function Device*) – é um dispositivo mais simples. Ele está situado nas pontas da rede e só pode ter a função de dispositivo final. Ele se comunica apenas com um FFD.

Uma rede é constituída por um agrupamento de dispositivos RFD e FFD, sendo que um FFD é definido como coordenador. A função de coordenador só pode ser atribuída a um dispositivo FFD e é responsável pela inicialização, distribuição de endereços, manutenção da rede, reconhecimento dos nós, entre outras funções. Ele pode ser utilizado como interligação entre redes ZigBee. O roteador só pode ser executado por um dispositivo FFD e tem as características de um nó normal na rede, podendo também exercer a função de roteador intermediário entre nós, sem precisar do coordenador, o que permite a expansão da rede. O dispositivo final é o ponto da rede onde os atuadores, ou sensores, serão hospedados e pode ser implementado com um dos dispositivos FFD ou RFD (ROGERCOM, 2012).

Quanto à topologia, as redes podem ser: em estrela, em árvore ou em malha. Na rede em estrela, a comunicação é estabelecida entre um coordenador central conectado e os dispositivos finais, ou roteadores. Na rede em árvore, os dispositivos FFD, usados como roteadores comunicam-se entre si e com os dispositivos finais formando um desenho que se assemelha aos galhos de uma árvore. É formada por topologias em estrela interligadas por roteadores, sob o comando de um coordenador. Na rede em malha, a maioria dos dispositivos são FFD, que podem se comunicar entre si ou com

dispositivos finais, que estejam ao seu alcance e tem apenas um coordenador (VASQUES *et al.* 2012). Na Figura 2.15, são apresentadas figuras ilustrativas das três topologias.

Figura 2.15 - Topologias das redes.



Fonte: Adaptado de Vasques *et al.* (2012).

2.4.2 Padrão de Comunicação ZigBee

O padrão de comunicação ZigBee foi desenvolvido pela ZigBee Alliance em conjunto com o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* – Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), que é a maior organização profissional voltada para a área de engenharia elétrica. O desenvolvimento engloba várias empresas que compartilham o objetivo de fornecer tecnologias para criar um padrão de baixo consumo de energia, baixo custo, segurança, confiabilidade, com funcionamento em rede sem fios baseado em uma norma aberta global (ZIGBEE, 2014).

O módulo ZigBee opera na faixa de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*–Industrial, Científica e Médica), sendo na Europa de 868 MHz (1 canal), nos Estados Unidos 915 MHz (10 canais). No Brasil, opera na faixa de 2,4 GHz, com uma taxa de transmissão máxima de 250 kbps e o seu baixo consumo de energia o torna apropriado para aplicações portáteis. O Brasil não exige licenciamento para se operar na faixa de 2,4 GHz (ZIGBEE, 2014).

A adoção do Padrão IEEE 802.15.4 transfere ao Padrão ZigBee características que tem tornado esse dispositivo de ampla aceitação em aplicações de monitoramento e controle: fácil instalação, confiabilidade na transmissão dos dados, baixo custo e baixo consumo de energia.

2.5 Resumo

Neste capítulo, foi apresentada a fundamentação teórica abordando os principais conceitos relacionados a sistemas de aterramento, descargas atmosféricas, sistemas de aquisição de dados e redes de sensores sem fio. Esses conceitos básicos são necessários para o desenvolvimento e construção de um sistema de aquisição de dados, aplicado ao monitoramento das condições de operação de malhas de aterramento energizadas, submetidas a correntes impulsivas.

No próximo capítulo é feita a revisão bibliográfica acerca de aterramentos elétricos submetidos a impulsos de corrente elétrica, destacando-se as pesquisas aplicáveis à aquisição de dados para monitoramento de malhas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica acerca de aterramentos elétricos submetidos a impulsos de corrente elétrica. O capítulo está dividido em duas seções: na primeira, são descritos de forma compactada os trabalhos nas diversas subáreas que abordam o tema e na outra, são apresentadas as pesquisas aplicáveis à aquisição de dados para monitoramento de malhas de aterramento.

3.1 Pesquisas com Aterramentos Submetidos a Impulsos de Corrente Elétrica

Bellaschi é um dos pioneiros na pesquisa da influência de impulsos elétricos no solo. Em Bellaschi (1935), é apresentada uma avaliação dos efeitos das correntes de descargas atmosféricas no aterramento. Utilizando-se de um gerador de impulsos de corrente, ele comparou resultados obtidos em laboratório com medições do fenômeno na natureza. Dos resultados, ele concluiu que a resposta do aterramento submetido a impulsos é diferente daquele na frequência industrial e que a resistência, medida no eletrodo de aterramento, variou para tipos de solos diferentes. Bellaschi também iniciou os estudos acerca dos efeitos da ionização do solo na impedância do aterramento.

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

A diversidade de condições, sob as quais são realizados os experimentos para avaliação do desempenho de aterramentos submetidos a impulsos de corrente, bem como as diferentes abordagens, tornam a comparação dos resultados obtidos uma tarefa difícil (GRCEV, 2009; ESPEL, 2004). Essas dificuldades se refletem no fato de que não existe consenso entre os autores, sobre que parâmetros são representativos para

caracterizar o desempenho do aterramento submetido a impulsos (VISACRO, 2007; GRCEV, 2009; ESPEL, 2004). Para Grcev (2009), um dos principais objetivos dos parâmetros que caracterizam o comportamento dinâmico de sistemas de aterramento é determinar o quanto esse comportamento se desvia do apresentado em baixas frequências.

Na investigação sobre parâmetros representativos da resposta do aterramento ao impulso, Grcev (1997) realizou estudos acerca da influência da condutividade do solo, eletrodos, parâmetros do aterramento (comprimento, profundidade, ponto de injeção da corrente) e a forma de onda do impulso de corrente. Em Grcev (2009), o trabalho é baseado em simulações e ele concluiu que quando a onda de corrente tem frequências muito altas, o desempenho do aterramento decai durante a subida do sinal de impulso de corrente comparado com o desempenho em regime estacionário. Grcev (2011) utilizou modelos eletromagnéticos e obteve resultados de que o coeficiente impulsivo tem uma relação próxima da linear com o comprimento dos lados da malha de aterramento.

Sekioka *et al.* (1998) realizaram trabalho experimental abordando medição de resistência de aterramento e concluíram que existe uma grande dependência da resistência de aterramento em relação à corrente aplicada.

Em Pedrosa *et al.* (2011), estudos foram realizados para investigar a dependência dos parâmetros elétricos do solo em relação à frequência na resposta transitória de eletrodos de aterramento submetidos a descargas atmosféricas. Eles concordam com Visacro (2007) acerca de que se superestimar o efeito da ionização, compensa, em parte, a não consideração da dependência da frequência. No entanto, em Visacro e Alípio, (2012) conclui-se que em virtude da grande variedade de tipos de solo, composição do solo e condições ambientais, é difícil se obter uma formulação geral que expresse a influência da frequência nos parâmetros do solo.

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

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

Outras possibilidades de sistemas de medição foram estudadas em Khelil *et al.* (2011), que utilizaram um osciloscópio digital para obter dados e avaliar a medição do campo elétrico em um eletrodo plano utilizando ponta de prova capacitiva com transmissão óptica. Também, Thomas (1970) que fez uma revisão acerca dos métodos tradicionais de medição de impulsos de corrente e de tensão abordando o uso do laser. Llovera *et al.* (2008) propuseram um novo arranjo dos eletrodos auxiliares utilizados para a medição da impedância transitória, concluindo que o arranjo proposto diminui o efeito indutivo do circuito de medição.

Sobre a propagação do sinal impulsivo no solo, Tao *et al.* (2008) concluíram, a partir de resultados experimentais, que a distribuição de corrente ao longo de um eletrodo não é uniforme e que o valor de pico da corrente decresce com o distanciamento do ponto de injeção. Conclusão semelhante obtiveram Araújo *et al.* (2010) e Castro *et al.* (2012) a partir de um trabalho experimental para avaliação de potenciais no solo, devido a impulsos de corrente em malhas de aterramento. Eles observaram que o sinal é atenuado na direção da propagação.

Asimakopoulou *et al.* (2011) estudaram a eficiência de métodos baseados em curvas I-V para avaliar a tensão de início da ionização do solo submetido a impulsos de corrente. Foi também investigado o campo elétrico associado à ionização. Para Diaz e Silva (2011), o parâmetro mais importante na ionização do solo, que contribui para a redução da impedância impulsiva, é a quantidade de energia aplicada no solo.

Os novos materiais aplicados a hastes de aterramento foram tema da pesquisa de Dick e Holliday (1978) que pesquisaram hastes revestidas com concreto. Rodrigues, M. (2012) também investigou o uso de hastes revestidas com concreto no aterramento. Além disso, pesquisou a dopagem do concreto por bentonita e observou que houve uma redução nos valores da impedância impulsiva de aterramento para hastes concretadas, no entanto, não obteve resultados conclusivos sobre o uso da bentonita.

Para Haddad *et al.* (2010), a dependência da impedância impulsiva em relação à duração do impulso e à intensidade da corrente elétrica injetada, são parâmetros importantes para modelar o comportamento de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica.

Diversos pesquisadores propuseram modelos para usar em simulações de malhas de aterramento submetidas a impulsos de corrente. Liew e Darveniza (1974) desenvolveram um modelo analítico capaz de descrever o comportamento da não linearidade do solo quando submetido a impulsos de corrente.

Kosztaluk *et al.* (1981) desenvolveram um modelo analógico para representar o comportamento de malhas de aterramento submetidas a impulsos de corrente. Ensaios em laboratório e testes em campo foram realizados para produzir um modelo abrangendo os elementos lineares e os não lineares do solo. As características lineares do solo (indutâncias e resistências) foram modeladas por meio de componentes eletrônicos e as não linearidades, foram modeladas por carboneto de silício.

Fraga (2008) propôs o desenvolvimento de uma metodologia capaz de simular sistemas de aterramento frente a fenômenos de alta frequência usando o método TLM (*Transmission - Line Modeling* – Modelo de sistemas de aterramento por linhas de transmissão) tridimensional.

Gazzana *et al.* (2011) realizaram uma revisão abordando as principais metodologias utilizadas para análise em altas frequências do aterramento. Foram avaliados os modelos: circuitos elétricos, linhas de transmissão, campos eletromagnéticos e modelagem híbrida. Os autores concluíram que os métodos dos circuitos e das linhas de transmissão são menos exatos, no entanto, podem oferecer uma boa confiabilidade.

3.2 Sistemas para Monitoramento de Malhas de Aterramento

As pesquisas aplicáveis à aquisição de dados para o monitoramento de malhas de aterramento são discutidas nesta seção que está dividida em duas partes: baixa frequência e frequências elevadas.

3.2.1 Sistemas para o Monitoramento da Malha de Terra em Baixa Frequência

A maioria dos trabalhos, sobre sistemas para o monitoramento de malhas de

aterramento, aborda o seu desempenho na frequência industrial. Jambak *et al.* (2000) e Colak, (2014) desenvolveram sistemas para monitoramento e controle do valor da resistência do aterramento. Quando o valor de referência da resistência é ultrapassado, um sistema de irrigação é acionado para trazer este valor para o patamar desejado. O sistema implementado por Jambak *et al.* (2000) usou o processador AD 7537, MAX 172 12 bit ADC, enquanto Colak, (2014) utilizou o dsPic.

Gomes *et al.* (2012, 2016) apresentaram dois trabalhos, sendo o primeiro referente ao desenvolvimento de um sistema para identificar falhas em sistemas de aterramento de subestações energizadas na frequência industrial e o segundo, está relacionado a um estudo de caso. O sistema consiste de um dispositivo à base de um microcontrolador PIC para aquisição de tensão em pontos da malha de terra. Com os dados adquiridos, utilizando-se de uma rotina computacional, foram traçados gráficos em duas dimensões para mostrar os resultados.

A partir do princípio do método do batimento (ABNT NBR 15749), Zhang *et al.* (2000), Li, Zou, Sun (2006), Liu *et al.* (2009) e Guochen *et al.* (2010) implementaram sistemas de medição de resistência de aterramento. O princípio de funcionamento do sistema de medição consiste na geração de correntes de baixa intensidade e em frequências próximas à frequência industrial que, injetadas no solo, possibilitam medir a resistência do aterramento.

Os trabalhos que utilizaram o método do batimento foram implementados com diferentes processadores. Guochen *et al.* (2010) implementou um sistema baseado na família de dsp TMS320. Liu *et al.* (2009) desenvolveram um sistema utilizando LabVIEW com uma placa de aquisição de dados incorporada. Já Li, Zou e Sun (2006) utilizaram instrumentos do tipo alicates para medir a tensão e a corrente no eletrodo de aterramento. Zhang *et al.* (2000) usaram o processador Intel 80C 196KC na implementação do sistema para avaliação do desempenho do aterramento.

Cong-li e Minfang (2007) desenvolveram um sistema para medir a corrosão do sistema de aterramento a partir de uma correlação entre a teoria de circuitos e a teoria da corrosão. O sistema opera em baixas frequências.

3.2.2 Sistemas para Monitoramento da Malha de Terra em Frequências Elevadas

Chavanne *et al.* (2010) propuseram um sistema para avaliação da admitância de

um meio (por exemplo, o solo). O sistema é formado por dois pequenos cilindros paralelos, introduzidos no meio em estudo e cujos eixos distam de 10 cm. Um cilindro serve de referência e o outro como sensor. A admitância é medida a partir da aquisição de dados de tensão e corrente, resultantes da aplicação de uma diferença de potencial entre os cilindros. O sistema é recomendado para a determinação da permissividade e da condutividade de um material em laboratório, com as condições controladas.

Um sistema de aquisição de dados de tensão e corrente em frequências elevadas e alta amplitude foi desenvolvido por Castro (2012) e Castro *et al.* (2013). O sistema foi baseado em DSP e utilizou comunicação sem fio com base no Padrão ZigBee para a transmissão dos dados adquiridos. Os dados adquiridos foram processados em rotina computacional e exibidos em gráficos da forma de onda do sinal. Os dados obtidos podem ser usados para avaliação das condições de operação de uma malha de aterramento.

O sistema desenvolvido foi testado em laboratório utilizando-se um gerador de impulsos de corrente de alta intensidade, capaz de simular sinais de descargas atmosféricas. Com o gerador foram produzidos sinais de corrente da ordem de 700 A de pico. Com o sistema desenvolvido, também foram adquiridos dados referentes à elevação do potencial no solo em virtude da aplicação de cargas provenientes de impulsos de corrente. Foram medidos sinais de tensão de aproximadamente 9 kV de pico.

Os trabalhos apresentados em Clark *et al.* (2013), Clark *et al.* (2014) e Guo *et al.* (2014) são resultados de uma mesma pesquisa, sendo o primeiro uma publicação em conferência. Os outros dois artigos são complementares, em um é apresentado o desenvolvimento da pesquisa e no outro, os resultados experimentais. A pesquisa consiste de um sistema para medir a impedância de um eletrodo de aterramento em ambientes adversos, submetidos a correntes de alta intensidade. Para transmissão dos dados adquiridos, utilizaram a comunicação sem fio. O arranjo experimental foi montado dentro de um lago e propõe uma alternativa ao esquema de medição recomendado em (IEEE-81, 2012; IEEE-80, 2000), no qual, a ortogonalidade entre a linha de injeção de corrente e o circuito de medição demanda uma grande área.

A montagem experimental dentro de um lago teve o objetivo de utilizar a água como meio homogêneo considerando as suas propriedades elétricas. Os eletrodos de

teste e auxiliares foram imersos na água. O cabo de injeção de corrente e o circuito de aquisição foram apoiados em uma estrutura flutuante. Os sinais da corrente aplicada e do crescimento de potencial foram adquiridos com um osciloscópio digital. O sistema foi testado em laboratório e em campo usando tensões de até 5 kV e correntes de 500 A.

Os dados adquiridos foram transmitidos para tratamento em uma unidade remota utilizando comunicação via rádio. A adoção desse meio de comunicação foi resultado da pesquisa apresentada em Clark *et al.* (2013) em que foram realizados experimentos utilizando cabos, fibra óptica e comunicação via rádio. Os ensaios com a fibra óptica apresentaram resultados satisfatórios, no entanto, essa alternativa foi descartada pelos pesquisadores, em virtude das condições ambientais de ventos e impacto mecânico a que o sistema estava exposto. Os resultados obtidos com o uso da transmissão de dados via cabo apresentaram erros até 5% maiores do que aqueles na comunicação via rádio.

Rodrigues (2014) e Rodrigues e Visacro (2014) desenvolveram um sistema para medir a impedância impulsiva do aterramento de pé de torre, em linhas de transmissão. O sistema é portátil, baseado em DSP e inclui um gerador de impulsos de corrente. O método de medição é uma derivação do método da queda de potencial, que possibilita a medição do crescimento de potencial no solo utilizando três eletrodos, sendo um para injeção de uma corrente de teste, o outro para o devido retorno dessa corrente e o terceiro é usado como haste sensora.

A curva de impedância é traçada a partir da razão entre o sinal de crescimento do potencial no solo e o da corrente injetada, obtida pelo método do resistor *shunt*. O valor de pico dessa curva corresponde à impedância impulsiva e o valor da impedância, quando o estado de regime permanente é atingido, é tomado como resistência de terra.

Para reduzir os efeitos de acoplamento magnético em consequência do uso de cabos na aquisição dos sinais, na disposição das hastes os autores respeitaram a recomendação de ortogonalidade entre as linhas estabelecidas pela haste de teste (de injeção), as hastes auxiliares (de retorno da corrente) e o ponto de referência de tensão, conforme proposto em (IEEE-81, 2012; IEEE-80, 2000).

Os autores, Rodrigues e Visacro (2014), juntamente com Pedrosa *et al.* (2012), fazem parte de uma equipe que considera que a frequência do sinal da corrente injetada no solo, mais especificamente o tempo de subida, tem influência mais significativa no comportamento do aterramento do que a amplitude desse sinal. O sistema foi testado

com sinais de corrente da ordem de 1,3 A e o sinal foi produzido por um gerador de impulsos construído para uma tensão máxima de 1,6 kV.

A partir da revisão bibliográfica se observou que, dentre os trabalhos que abordam a aquisição de dados para monitoramento de malhas de aterramento submetidas a sinais impulsivos de alta intensidade, Clark *et al.* (2014), Guo *et al.* (2014) e Clark *et al.* (2013), Castro *et al.* (2013) e Castro (2012) procuraram reproduzir as condições reais de operação dessas malhas realizando pesquisas com sinais de intensidades elevadas. Além disso, eles realizaram a transmissão de dados utilizando a comunicação sem fio. Por outro lado, Rodrigues (2014), Rodrigues e Visacro (2014) e Chavanne *et al.* (2010) consideraram a aquisição de sinais de baixa amplitude como base para estimar o desempenho do aterramento em amplitudes elevadas e fizeram opção pelo uso de cabos condutores para transmitir os dados adquiridos.

Os trabalhos que se aplicam à aquisição de dados para o monitoramento de malhas de terra estão sintetizados no Quadro 3.1. Na elaboração do quadro foram considerados os aspectos de interesse para esta pesquisa, aquisição de sinais de alta amplitude e em frequências elevadas, operação em ambientes sujeitos a interferências eletromagnéticas, próprio de sistemas elétricos energizados e utilização de comunicação sem fio.

QUADRO 3.1- Sintetização das contribuições dos trabalhos apresentados que são aplicáveis à aquisição de dados para o monitoramento de malhas de terra.

Pesquisadores	Contribuições					
	FE	SE	SF	AC	AT	AI
Chavanne, Frangi e Rosny (2010)	X					
Castro (2012); Castro <i>et al.</i> (2013)	X		X	X	X	
Clark <i>et al.</i> (2013) Guo <i>et al.</i> (2014) Clark <i>et al.</i> (2014)	X		X	X	X	
Rodrigues (2014); Rodrigues e Visacro (2014)	X					
Este Trabalho (2016)	X	X	X	X	X	X

FE – Refere-se ao monitoramento do aterramento em frequências elevadas

SE – Indica se a pesquisa pode ser aplicada a sistema elétrico energizado

SF – Corresponde à pesquisa que usa comunicação sem fio para transmissão dos dados adquiridos

AC – Indica que o trabalho é aplicado à aquisição de sinais de alta corrente em frequências elevadas

AT – Refere-se à pesquisa em que foi realizada aquisição de sinais impulsivos de tensão de alta intensidade

AI – Corresponde à pesquisa que é aplicada a ambientes sujeitos a interferências eletromagnéticas

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Resumo

Neste capítulo, foi apresentada a revisão bibliográfica acerca de aterramentos elétricos submetidos a impulsos de corrente elétrica destacando-se as pesquisas que abordam sistemas para monitoramento de malhas de aterramento. Observa-se que, a maioria dos trabalhos, é aplicada ao monitoramento de aterramentos na frequência industrial, negligenciando as altas correntes, tensões e frequências, presentes na operação real de uma subestação. Portanto, não existe na bibliografia, trabalho que aborde sistema de aquisição de dados para o monitoramento de aterramentos de subestações energizadas, submetidos a sinais impulsivos de alta intensidade.

No próximo capítulo serão apresentados os materiais e métodos necessários para se atingir os objetivos estabelecidos nesta tese.

4 ENSAIOS E MEDIÇÕES

Além da concepção do projeto, circuitos e rotinas computacionais, foram realizados experimentos para se atingir os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento do sistema de aquisição de dados para avaliação das condições de operação de um sistema de aterramento de uma subestação energizada. Neste capítulo, são apresentadas as configurações desses experimentos, inclusive materiais e métodos usados. Inicialmente são descritos os ensaios preliminares, seguidos dos experimentos para testar o sistema desenvolvido e para avaliação de um aterramento. Na avaliação do aterramento, a aquisição dos sinais foi feita com o sistema desenvolvido.

Os experimentos foram realizados de forma controlada. Em virtude da aleatoriedade das descargas atmosféricas, fez-se necessário utilizar um gerador de impulsos de corrente de intensidade elevada que é capaz de simular os sinais de descargas atmosféricas. O gerador é descrito na Seção 4.2.

4.1 Materiais

Os materiais usados são basicamente o solo e as hastes de aterramento. Além disso, foram utilizados componentes eletrônicos e microcontroladores para a concepção dos circuitos, cujas características e especificações são apresentadas no Capítulo 5.

4.1.1 Solo

O solo usado neste trabalho possui estrutura geológica dura e rochosa. Uma vez que o gerador de impulsos de corrente utilizado nos ensaios é um equipamento de grande porte, torna-se inviável transportá-lo para realização de ensaios em campo. Sendo assim, o solo usado para testes e ensaios ficou restrito à área adjacente à sala em que o equipamento está instalado no Laboratório de Alta Tensão (LAT), na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), na cidade de Campina Grande - Paraíba. Na Figura 4.1 é mostrado um croqui do terreno usado nos ensaios, bem como a localização do LAT no mapa da UFCG.

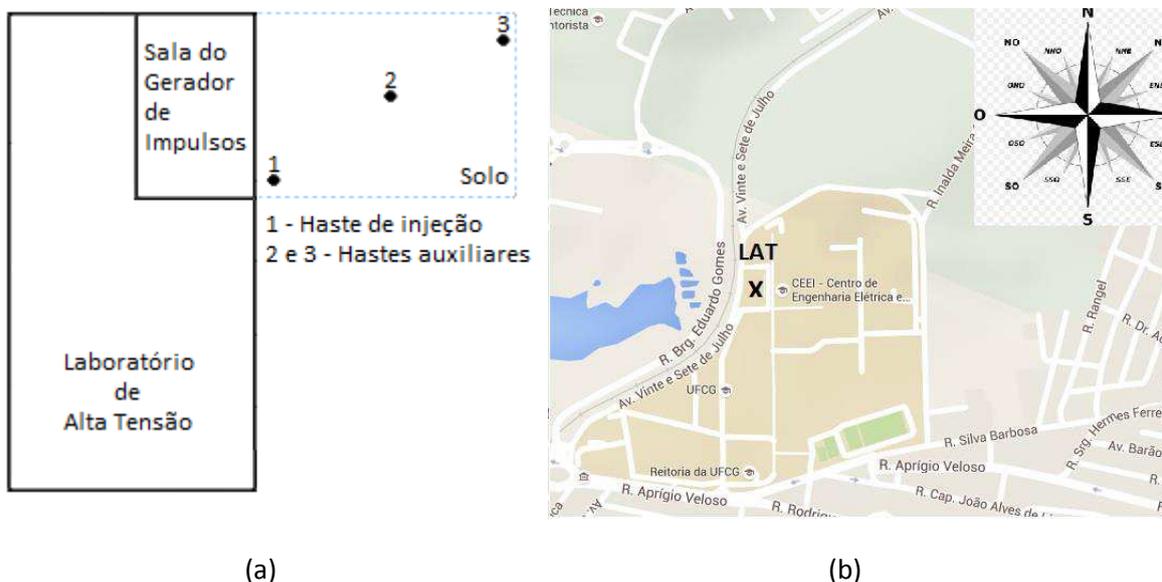
A resistividade do solo e a resistência de terra são parâmetros essenciais para se analisar o escoamento de cargas elétricas no solo, em decorrência da aplicação de impulsos de corrente. Em primeira análise, se observa o quanto a resposta do

aterramento ao impulso de corrente de alta intensidade se afastou do comportamento em baixas frequências.

A resistência de terra do solo utilizado foi de 20Ω , medida no dia 03/06/2016. O solo foi estratificado em duas camadas, sendo a primeira com resistividade de $22,16 \Omega.m$ para uma altura de $3,03m$ e a segunda com $180,76 \Omega.m$ e altura infinita. Observa-se que apesar de o solo não ter um tratamento adequado para uso como aterramento elétrico, os valores são considerados baixos. No entanto, vale ressaltar a não homogeneidade do solo. Os procedimentos realizados e os dados obtidos nas medições da resistência de terra e da resistividade do solo estão no Apêndice A.

Campina Grande é uma cidade localizada no Agreste da Borborema, com Latitude $7^{\circ}13'51''$ sul e Longitude $35^{\circ}52'54''$ oeste e tem o clima do tipo tropical chuvoso, com verão seco. As temperaturas médias anuais são elevadas e variam de $22^{\circ}C$ a $26^{\circ}C$. A umidade relativa é bastante uniforme com média em torno de 80% (HENRIQUE, 2006).

Figura 4.1 – Localização do terreno usado como solo. (a) Croqui da localização da sala do gerador e do terreno; (b) Localização do LAT no mapa da UFCG (Google Maps).



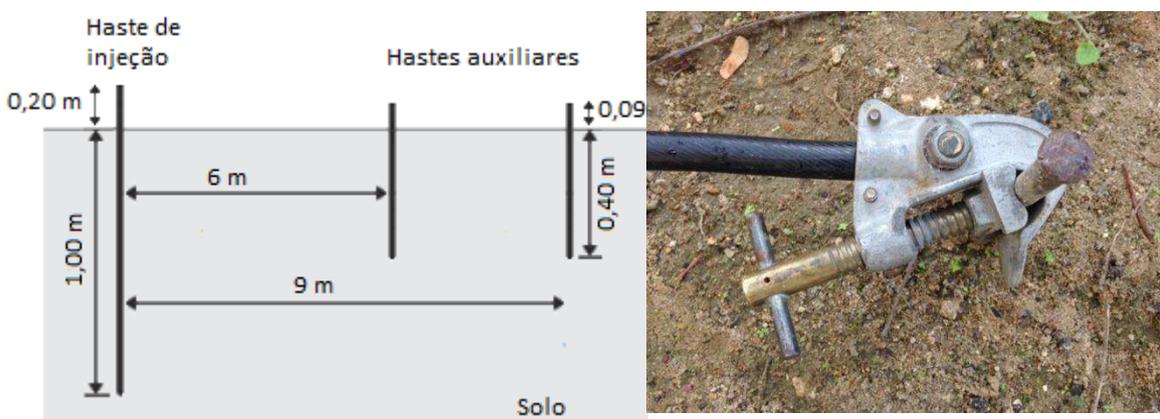
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Hastes

Para realização dos experimentos, foram usadas três hastes de aterramento, sendo uma de injeção e duas auxiliares. A haste de injeção é aquela usada para aplicar o

impulso de corrente no solo e a haste auxiliar é utilizada como sensor da tensão propagada no solo. As hastes usadas são de aço, revestidas por cobre, com 13 ± 2 mm de diâmetro. A haste de injeção mede 1,20 m de comprimento e foi enterrada a uma profundidade de 1,0 m no solo. As hastes auxiliares medem 0,49 m, sendo 0,40 m enterrados no solo. Na Figura 4.2 são mostrados os detalhes das hastes e uma fotografia do cabo de injeção fixado na haste por um conector.

Figura 4.2 – Detalhes das hastes. (a) Desenho de uma vista em corte das hastes no solo; (b) Fotografia da haste de injeção, conector e cabo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ponto de injeção de corrente foi mantido fixo durante todos os ensaios. A disposição das hastes auxiliares depende do objetivo do experimento. Foram montados experimentos para realização de ensaios preliminares para estudar o comportamento do aterramento sujeito a impulsos de corrente, bem como, para testes do sistema desenvolvido e avaliação do solo. Nas seções de 4.3 a 4.5, são detalhadas as configurações usadas.

4.2 Gerador de Impulsos de Corrente

Um gerador de impulso de corrente, com tensão de carregamento de até 100 kV (80 kJ,) foi usado para reproduzir os sinais de descargas atmosféricas. Os ensaios foram realizados com impulsos de alta corrente da ordem de quiloampères. Na Figura 4.3, são apresentadas fotografias do gerador de impulsos de corrente utilizado nos ensaios.

O gerador possui 8 estágios, sendo cada um formado por um capacitor (C) em série com uma resistência (R) variável de amortecimento. Conectados aos estágios,

estão um indutor (L) e o objeto de teste, que neste trabalho corresponde ao solo. Com esse gerador, pode-se produzir, dentre outros, sinais $8/20 \mu\text{s}$, que representa a forma de onda da descarga atmosférica, e também, sinais de $4/10 \mu\text{s}$ (BRITO, 2013).

A mesa de controle é utilizada para controlar a geração do impulso de corrente. O processo de geração do impulso tem início com o carregamento do banco de capacitores com a tensão desejada e em seguida provoca-se o centelhamento no *spark-gap* (SG). O centelhamento provoca a circulação de corrente no circuito RLC. A forma de onda da corrente produzida depende da combinação de valores de R, L e C. A corrente elétrica gerada percorre o resistor R_{SHUNT} de $10,54 \text{ m}\Omega$ e o objeto de teste. O circuito do gerador de impulso é ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.3 – Fotografias do gerador de impulso de corrente (80 kJ/100 kV). (a) Banco de capacitores, resistores e centelhadores. (b) Transformador elevador de tensão e diodo retificador; (c) Mesa de controle.



(a)



(b)

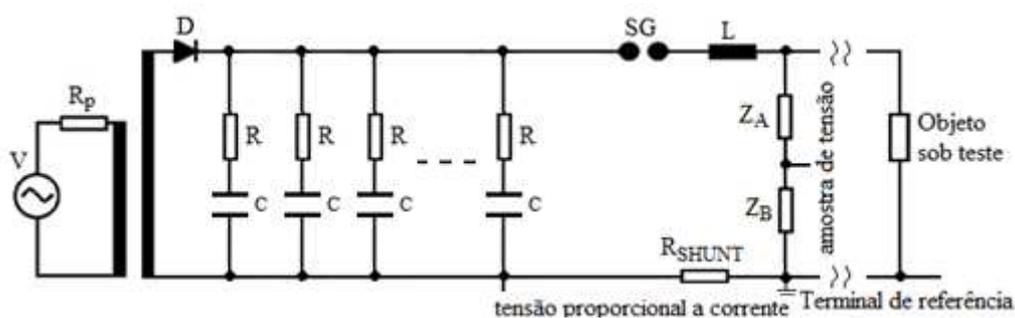


(c)

Fonte: BRITO (2013).

A medição da tensão aplicada é feita diretamente no gerador de impulsos, com uma ponta de prova de alta tensão, ou por meio do divisor de tensão, formado pelas impedâncias Z_A e Z_B . A corrente elétrica de injeção é obtida pelo método da resistência *shunt*, que consiste em determinar a corrente a partir da razão entre a tensão medida nos terminais do resistor R_{SHUNT} (Figura 4.4) e o próprio resistor.

Figura 4.4 - Circuito do gerador de impulsos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

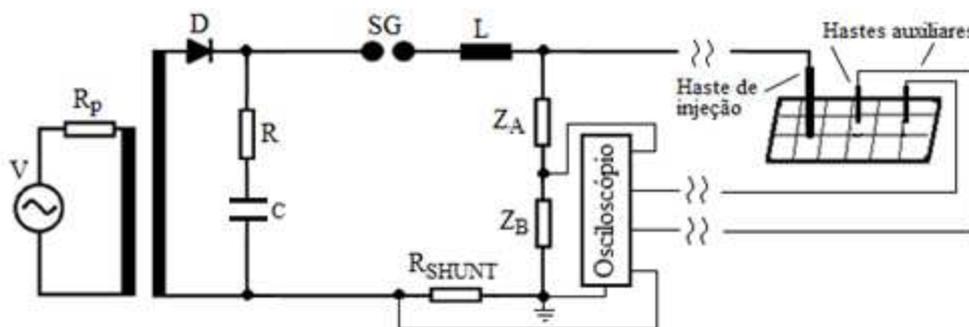
O carregamento do gerador utiliza a energia elétrica de alimentação do laboratório. O sinal de tensão passa por transformação e retificação, para em seguida alimentar o banco de capacitores.

4.3 Configuração de Experimentos para Ensaios Preliminares

Inicialmente foram realizados ensaios para estudar o comportamento transitório do aterramento e definir os parâmetros do sistema de aquisição de dados desenvolvido. Os experimentos foram montados de forma que possibilitasse a aquisição de sinais de tensão e corrente, provenientes de cargas elétricas aplicadas no solo, e de sinais da tensão propagada no solo.

A configuração de medição usada nesses ensaios é mostrada na Figura 4.5. A aquisição dos sinais foi feita com um osciloscópio digital de quatro canais utilizando duas pontas de prova de alta tensão e três hastes de aterramento. Sendo que, as hastes auxiliares foram enterradas a 5,0 m e a 10,0 m do ponto de injeção de corrente elétrica.

Figura. 4.5 - Configuração do experimento para realização de ensaios preliminares.



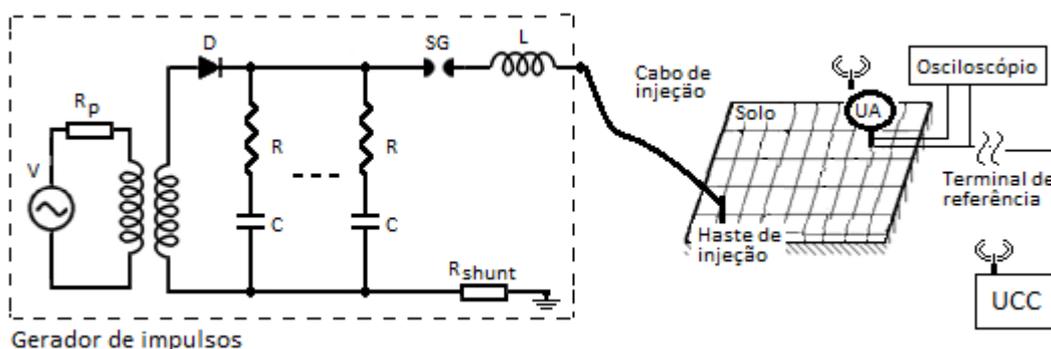
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 Configuração de Experimentos para Teste do Sistema Desenvolvido

O sistema desenvolvido neste trabalho foi testado a partir da aquisição simultânea de sinais com o sistema desenvolvido e com um osciloscópio digital com taxa de aquisição de 2 GHz. Na Figura 4.6 pode-se ver a configuração do experimento.

A unidade de aquisição remota – UA e a unidade de controle central – UCC são unidades integrantes do sistema desenvolvido e são descritas no Capítulo 5.

Figura 4.6 - Configuração do experimento para testar o sistema desenvolvido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram testados dois módulos de unidades remotas de aquisição, um de cada vez, que foram denominados de SAD1 e SAD2. Com a unidade SAD1 foram realizadas medições com a haste auxiliar posicionada a 6 m e a 9 m do ponto de injeção de

corrente no solo. Com a unidade SAD2 foram feitas aquisições com a haste auxiliar a 9 m da haste de injeção.

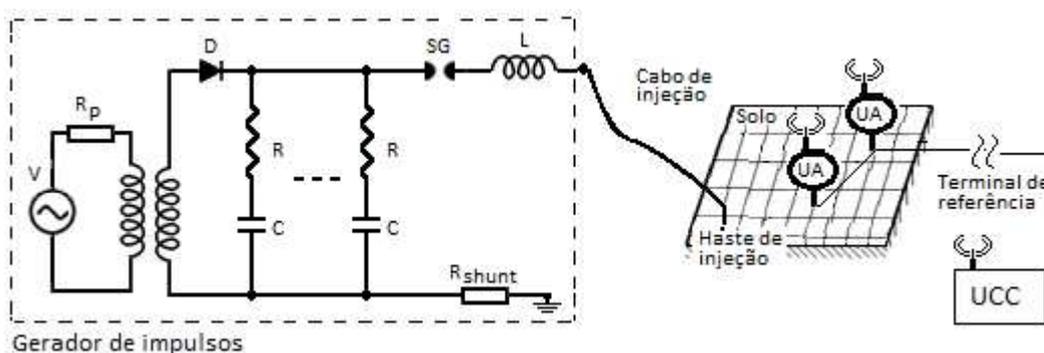
Foram realizados 3 ensaios para cada configuração, com o banco de capacitores do gerador carregado com 20 kV. Para estabelecer uma referência de tensão, o sistema em teste foi conectado a um terminal de referência distante 35 m do ponto de injeção.

4.5 Configuração do Experimento para Avaliação de um Aterramento

Usando o sistema de aquisição de dados testado, foi feita uma montagem experimental para avaliar o comportamento de um aterramento submetido a impulsos de corrente. Para tanto foram avaliados o crescimento de potencial no solo em decorrência da injeção de impulsos de corrente e a impedância impulsiva.

Na Figura 4.7 é mostrada a configuração do experimento. As hastes auxiliares dispostas em duas configurações: A) as duas hastes equidistantes 9 m da haste de injeção de corrente; B) uma haste a 6 m do ponto de injeção e a outra a 9 m.

Figura 4.7 - Configuração do experimento para avaliar um aterramento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma que nos ensaios para teste do sistema, o carregamento do banco de capacitores do gerador foi de 20 kV e foram realizados 3 ensaios para cada configuração. O terminal de referência foi mantido a 35m da haste de injeção.

4.6 Resumo

Neste capítulo, foram apresentados os materiais e os procedimentos para realização de ensaios para se atingir o objetivo desta pesquisa de desenvolver um

sistema de aquisição de dados, aplicado ao monitoramento de aterramentos elétricos energizados. Foram descritos os ensaios preliminares, realizados com a finalidade de caracterizar os sinais para especificação dos parâmetros do sistema de aquisição. Além disso, foram apresentadas as configurações dos experimentos para testar o sistema desenvolvido e para avaliação de um aterramento.

No próximo capítulo, são apresentados os resultados obtidos, contemplando os circuitos concebidos, as rotinas computacionais e os resultados dos ensaios.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para se atingir os objetivos estabelecidos, para a concepção de um sistema de aquisição de dados aplicado à avaliação das condições de degradação de malhas de aterramento energizadas, utilizando comunicação sem fio. O capítulo está dividido em quatro seções: ensaios preliminares, apresentação do sistema de aquisição de dados desenvolvido, resultados dos ensaios para testes do sistema e resposta de um aterramento submetido a impulsos de corrente, no último caso, a partir de aquisições usando o sistema desenvolvido.

5.1 Ensaios Preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados com a finalidade de se estudar o comportamento do aterramento em frequências elevadas. Além disso, os dados adquiridos foram utilizados na especificação do sistema de aquisição de dados aplicado à aquisição de sinais, decorrentes da injeção de cargas elétricas no solo. Os dados foram adquiridos com um osciloscópio em conformidade com a configuração apresentada na Seção 4.3, do Capítulo 4.

Nos experimentos, foram utilizados os impulsos de corrente, gerados a partir do carregamento do banco de capacitores, com as seguintes tensões: 15 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV and 35 kV. Para cada valor de tensão, foram realizadas 5 medições.

Com os dados, foram calculadas a impedância impulsiva e a impedância transitória. A definição desses parâmetros, para a análise do comportamento do aterramento sujeito a impulsos de corrente, deve-se ao fato de que a impedância impulsiva representa a impedância do aterramento no instante crítico, em que a malha de terra está submetida a altas correntes. A impedância transitória, por sua vez, contém informações acerca do comportamento da impedância ao longo do tempo. Outros pesquisadores, a exemplo de Grcev (2011), Visacro *et al.* (2012) e Rodrigues e Visacro (2014), também utilizaram esses parâmetros.

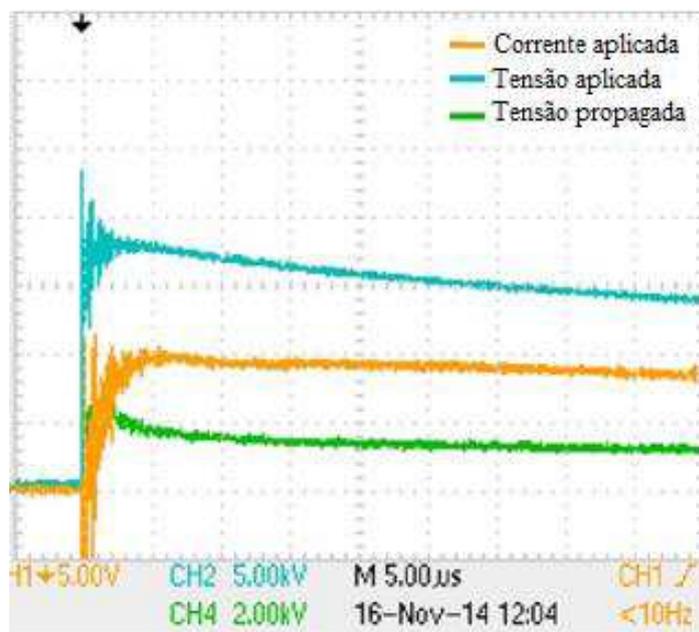
5.1.1 Sinais Adquiridos

Sinais de tensão e corrente originários da aplicação de cargas elétricas foram adquiridos. Os sinais são provenientes da geração de impulsos de corrente com a forma $8/20 \mu\text{s}$. Na Figura 5.1 é exibida uma tela do osciloscópio que apresenta uma medição e no Quadro 5.1 são apresentados os valores de pico correspondentes.

Os sinais de tensão e corrente, medidos na haste de injeção e de tensão em uma haste auxiliar, distante 10 m do pnto de injeção, foram adquiridos. Para medir a tensão foram utilizadas duas pontas de prova de alta tensão, que atenuam o sinal 1000 vezes. A corrente foi obtida pelo método do resistor *shunt*. O valor da corrente é calculado a partir da razão entre a tensão medida nos terminais desse resistor e o seu valor, que neste experimento é de 10,54 m Ω .

Na configuração do experimento, o objeto de teste é o solo. No momento em que o impulso de corrente é aplicado no solo, o circuito RLC passa a sofrer influência das características elétricas do solo. Como consequência, a forma de onda da corrente observada não tem mais a forma 8/20 μ s, fato que pode ser observado na Figura 5.1. Os resultados são semelhantes aos obtidos por Visacro *et al.* (2015), Diaz e Silva (2011), Greve (2009) e Elmghairbi *et al.* (2011).

Figura 5.1 – Sinais de tensão e corrente na haste de injeção e tensão propagada medida em uma haste auxiliar.



Fonte: Elaborada pelo autor.

QUADRO 5.1 – Valor de pico dos sinais de correntes da aplicação de impulsos de corrente no solo (tensão de carregamento 20 kV).

Parâmetro	Corrente Aplicada	Tensão Aplicada	Tensão Propagada
Valor de Pico	1,04 kA	18,0 kV	2,3 kV

Fonte: Elaborada pelo autor.

A tensão propagada no aterramento foi medida conforme a configuração descrita no Capítulo 4, Seção 4.3. Do Quadro 5.1, observa-se que a amplitude do sinal de tensão medido na haste auxiliar, sofreu atenuação na direção da propagação, resultado que é consistente com os apresentados em Araújo *et al.* (2010), Castro *et al.* 2013 e Visacro (2007).

5.1.2 Impedância Impulsiva

A impedância impulsiva foi calculada conforme a Equação (4), considerando-se o valor de pico da tensão e o valor de pico da corrente,

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}$$

No Quadro 5.2 são apresentados os cálculos da impedância impulsiva para cada tensão de carregamento, com o devido desvio, calculado em relação às cinco medições.

QUADRO 5.2 - Impedância impulsiva para diferentes valores de tensão de carregamento.

Charging Voltage (kV)	Impulse Impedance Z_p – (Ω)	Deviation (%)
15	23,53	1,82%
20	17,72	14,74%
25	15,40	4,13%
30	16,72	1,43%
35	15,77	2,19%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos resultados, observa-se que, à medida que a tensão de carregamento aumenta, a impedância impulsiva decresce. Uma possibilidade de explicação desse fenômeno é a ionização do solo. Alguns autores, dentre os quais, Espel *et al.* (2004), Grcev (2009), Diaz e Silva (2011) e Visacro *et al.* (2015), constataram que quando um impulso de corrente elétrica é aplicado no solo, pode ocorrer a ionização do ar na região próxima ao eletrodo de injeção, diminuindo a impedância do aterramento.

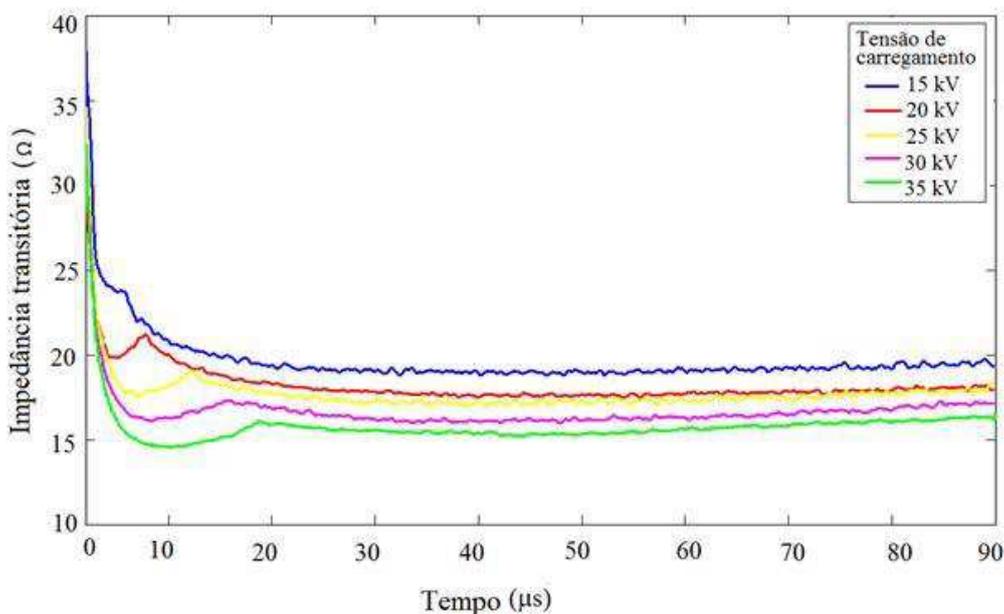
5.1.3 Impedância Transitória

O gráfico da impedância transitória foi traçado, para cada tensão de carregamento, de 15 a 35 kV, considerando a Equação (3):

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

Como foram realizadas 5 medições para cada tensão de carregamento, no traçado de cada curva foi considerado o valor médio das medidas. Os gráficos são apresentados na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Impedância transitória em função da tensão de carregamento.



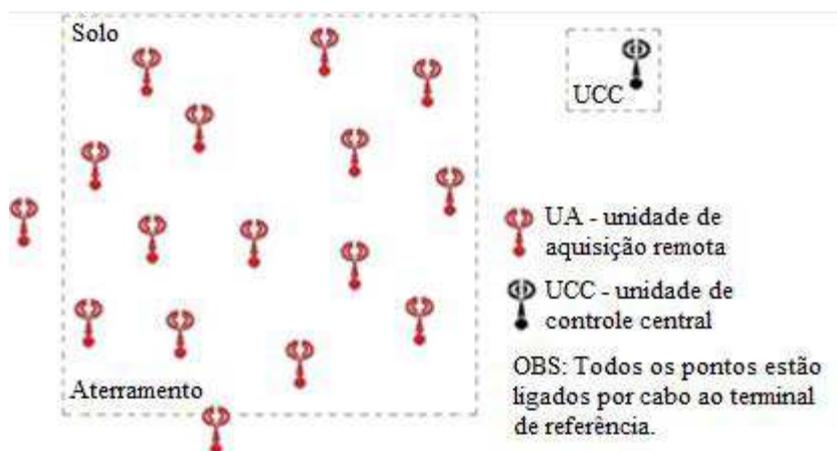
Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da observação da impedância transitória é possível se avaliar o comportamento da impedância ao longo do tempo. Nota-se que, após o transitório, o valor da impedância tende se estabilizar no valor da resistência de terra, 20Ω para o aterramento em análise, conforme observado em Visacro (2007) e Grcev (2009).

5.2 Sistema de Aquisição de Dados para Avaliar as Condições de Operação de Malhas de Aterramento Energizadas

O sistema de aquisição de dados desenvolvido para avaliar as condições de degradação de malhas de aterramento energizadas é formado por diversas unidades remotas de aquisição (UA) e uma unidade de controle central (UCC). Na Figura 5.3 é mostrado um croqui representando unidades remotas de aquisição distribuídas no solo de uma malha de terra.

Figura 5.3 – Croqui de uma malha de terra com unidades remotas de aquisição distribuídas no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A UCC controla todo o processo, que inicia com o envio de um comando para as unidades remotas para sincronização na mesma referência de tempo. Quando um impulso é detectado e os dados correspondentes armazenados, a UCC passa a controlar a transmissão desses dados, para ao final, serem processados por ela.

Cada unidade remota corresponde a um nó sensor, que é constituído por um circuito de aquisição fixado em uma haste auxiliar enterrada no solo de uma malha de terra para a aquisição do sinal de tensão naquele ponto. As unidades remotas são dispostas de forma a englobar toda a área interna da malha. Os nós sensores também

devem ser distribuídos na área externa, possibilitando a análise das tensões de passo nas áreas circunvizinhas do aterramento.

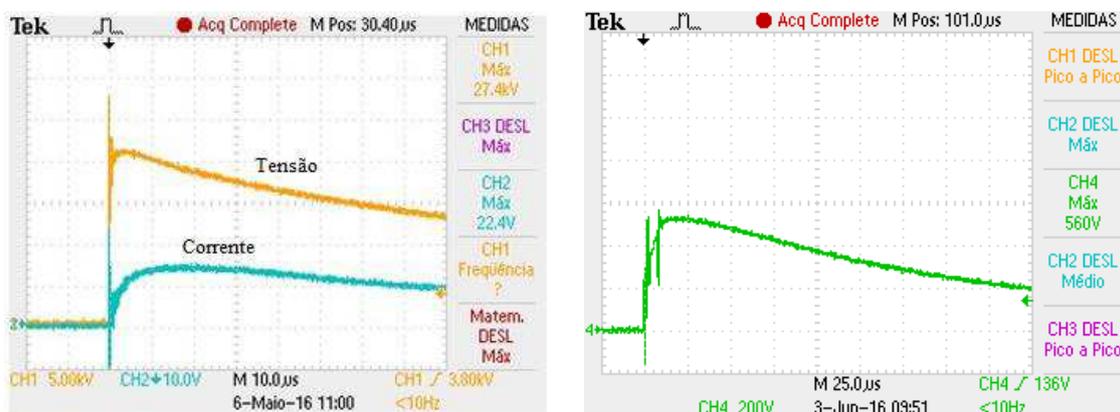
5.2.1 Especificação do Sistema de Aquisição de Dados

Inicialmente foram adquiridos os sinais originários da injeção de cargas elétricas de impulsos de corrente de alta intensidade no solo, produzidos pelo gerador de impulsos de corrente descrito no Capítulo 4, Seção 4.2. Foram adquiridos os sinais de tensão e de corrente no ponto de injeção de cargas e da tensão propagada no solo utilizando-se de um osciloscópio. Os impulsos gerados tinham o formato $8/20 \mu\text{s}$, sendo assim já se tinha o conhecimento prévio das características desses sinais. A partir da análise dos sinais adquiridos, foi possível especificar o sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho de tese.

Amostras dos sinais são apresentadas na Figura 5.4. Analisando a Figura 5.4.a observa-se que o sinal de corrente diverge do modelo $8/20 \mu\text{s}$ do impulso de corrente produzido. Este fato pode ser atribuído à influência das características elétricas do solo, que no momento da injeção de cargas elétricas, torna-se parte do circuito, causando alterações no sinal.

Na Figura 5.4.b é mostrado o sinal de tensão adquirido em uma haste auxiliar nas proximidades da haste de injeção, em que se observa atenuação e distorção em relação ao sinal de tensão na haste de injeção, conforme mostrado na Figura 5.4.a.

Figura 5.4 – Sinais de tensão e de corrente originários da aplicação de cargas de um impulso de corrente no solo (tensão de carregamento de 20 kV): (a) Tensão e corrente na haste de injeção; (b) Tensão em uma haste auxiliar.



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

A distorção e atenuação apresentadas, de acordo com Visacro (2007), deve-se a perdas e à condutividade elétrica do solo. A oscilação presente na subida dos sinais adquiridos, não inviabilizar os objetivos deste trabalho, pela necessidade de detectar e adquirir sinais impulsivos de alta intensidade em aterramentos. Provavelmente ela é originária de ruídos interferentes e pode ser eliminada por tratamento digital do sinal.

A partir dos sinais adquiridos e mostrados na Figura 5.4, o sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho de tese foi especificado por meio dos seguintes parâmetros: taxa de amostragem, amplitude máxima do sinal, tempo de aquisição e número de canais.

Para especificar a taxa de amostragem, partiu-se do tempo de subida do sinal que tem a forma de onda $8/20 \mu\text{s}$, uma vez que os sinais adquiridos e mostrados na Figura 5.4 tem tempo de frente maiores que $8 \mu\text{s}$, essa consideração confere maior margem de segurança ao projeto. Considerando que o intervalo com variação mais rápida é de $8 \mu\text{s}$, um valor prático para a taxa de aquisição é duas vezes o inverso desse tempo (RIBEIRO; BARRADAS, 1980). Portanto, a taxa de aquisição deve ser superior a 250 mil amostras por segundo, que corresponde a 2 vezes o inverso desse tempo de frente. Como os tempos de cauda dos sinais, inclusive o de tensão propagada no solo, são mais lentos que o tempo de subida, essa taxa de amostragem ainda está em conformidade com o teorema da amostragem e, portanto, é suficiente para a reprodução do sinal. Pelo exposto, foi escolhido trabalhar com a taxa de aquisição de pelo menos 10^6 amostras/s, o que significa aquisição de 8 amostras no tempo de subida do sinal.

Para definir o tempo total de aquisição, considerou-se que os tempos de cauda dos sinais mostrados na Figura 5.4 são menores que $250 \mu\text{s}$. Por este motivo, escolheu-se usar um tempo de aquisição de pelo menos $500 \mu\text{s}$, para garantir a aquisição das informações significativas dos sinais de interesse.

Sendo a amplitude do sinal de tensão na haste auxiliar da ordem de quilovolts, fez-se necessário o condicionamento do sinal usando divisor de tensão para atenuá-lo, a poucos volts, que é tensão necessária para o processo de conversão A/D em microcontroladores. Embora o uso do divisor de tensão possibilitasse que uma larga faixa de amplitudes pudesse ser considerada, o fato de nesta pesquisa, em que os experimentos foram controlados, o valor máximo da amplitude do sinal de tensão na haste auxiliar não ultrapassou 3 kV nos testes preliminares, portanto, esse valor foi definido como amplitude máxima do sinal.

Um nó sensor foi instalado em cada haste auxiliar para medir a tensão em um ponto específico do aterramento, sendo assim, é necessário um canal por unidade remota de aquisição.

A quantidade total de hastes auxiliares, bem como distribuição delas no solo, depende das dimensões do aterramento. Embora não tenha sido feito um estudo para identificar a quantidade ótima de hastes, pela prática, considera-se que é razoável uma distância de 3 m entre as hastes auxiliares.

No Quadro 5.3 é apresentado o resumo da especificação do sistema de aquisição de dados.

QUADRO 5.3 - Especificação do sistema de aquisição de dados

Parâmetro	Especificação
Taxa de amostragem	10 ⁶ amostras/s
Amplitude máxima de tensão	3 kV
Duração da aquisição	500 µs
Número de canais por haste auxiliar (nó sensor)	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

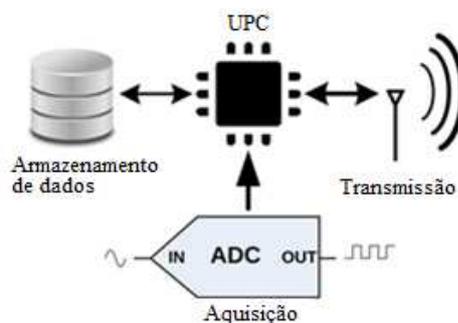
A partir da especificação foi escolhido o microcontrolador TMS320F28377 Delfino por atender aos requisitos do projeto e por apresentar estabilidade.

5.2.2 Unidade Remota de Aquisição

As unidades remotas de aquisição têm a função de adquirir o sinal da tensão correspondente ao crescimento de potencial no solo. Elas são formadas por quatro blocos: unidade de processamento central (UPC), aquisição, armazenamento e transmissão, conforme mostrado na Figura 5.5.

O sinal adquirido é processado pela UPC, que coordena o processo de armazenamento e transmissão de dados, executando um algoritmo de processamento e gestão lógica de informações.

Figura 5.5 – Diagrama de blocos da unidade remota de aquisição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir das especificações apresentadas na Seção 5.2.1, foi escolhido o C2000 LaunchpadXL, baseado no microcontrolador TMS320F28377 Delfino, desenvolvido pela Texas Instruments® para a concepção das unidades remotas de aquisição. A escolha se deveu ao fato de que esse microcontrolador apresenta um conjunto de especificações adequadas aos requisitos do projeto. O microcontrolador possui um núcleo com instruções de 32 *bits*, operando a 200 MHz. O conversor AD integrado pode operar com resoluções de 12 ou 16 *bits*, com taxas de amostragem máximas associadas de 14 e 4,4 Msps respectivamente (TEXAS 2015, 2016). Neste trabalho, considerando-se o tempo da janela de aquisição e a quantidade de amostras desejadas, o dispositivo foi configurado para uma taxa de 2 Msps e resolução de 12 bits, com uma aquisição de 1104 amostras durante o evento de um impulso. Das amostras, 112 correspondem ao sinal medido nos instantes anteriores à detecção do impulso e 992 amostras após.

A transmissão sem fio dos dados foi implementada no protocolo de transmissão ZigBee. A comunicação no padrão ZigBee foi escolhida em virtude da experiência já desenvolvida no âmbito do Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Metrologia – LIMC da UFCG, com aplicações em subestações elétricas energizadas (MACEDO, 2010).

No Brasil, o módulo ZigBee opera na faixa de 2,4 GHz, com uma taxa de transmissão máxima de 250 kbps e o seu baixo consumo de energia o torna apropriado para aplicações portáteis. O Brasil não exige licenciamento para se operar na faixa de 2,4 GHz. Foram utilizados módulos XBee-PRO™ Series 2, fabricados pela Digi® e, dentre as principais características, pode-se destacar o alcance máximo de 1,6 km e taxa de transmissão de até 115.200 bps (DIGI, 2016). O módulo XBee foi programado no

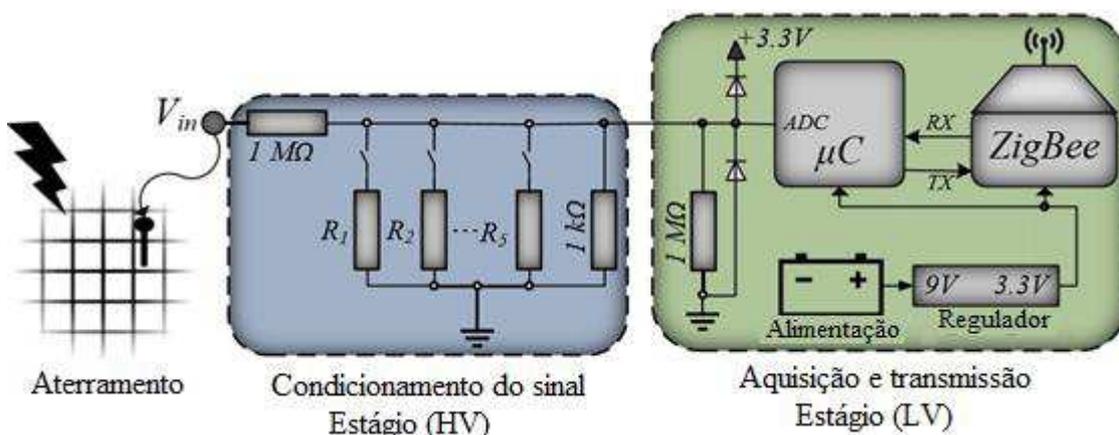
modo transparente (AT) em que os dados são transmitidos e recebidos da mesma forma que uma comunicação serial RS232 padrão. Os módulos dispõem de *buffers*, que corresponde a áreas de memória para armazenamento temporário, para um melhor desempenho na comunicação serial.

O circuito da unidade de aquisição desenvolvido está mostrado na Figura 5.6. O sistema foi dividido em dois estágios: o condicionamento do sinal de alta tensão e o de aquisição e transmissão de dados, este último, refere-se ao circuito de baixa tensão. Com o intuito de reduzir os efeitos da interferência eletromagnética que é decorrente da descarga elétrica em alta tensão, ambos os estágios foram acondicionados em caixas blindadas.

No estágio do condicionamento de alta tensão foi implementada uma cadeia de divisores resistivos com razões selecionáveis de 1:1000, 1:750, 1:500, 1:250, 1:125 e 1:64. A escolha da escala depende do valor máximo esperado do impulso. Neste trabalho, os ensaios são controlados, podendo-se estimar a ordem de grandeza da amplitude do sinal a ser adquirido. O sistema é capaz de medir impulsos de tensão de 211,2 V, com resolução de 0,05 V até 3,3 kV, com resolução de 0,8 V.

O estágio de aquisição e transmissão compreende a concepção do circuito do microcontrolador e do transceptor ZigBee, inclusive o circuito de alimentação elétrica, este último, composto por uma bateria de 9 V e regulador de tensão. A autonomia, dos nós sensores, é de cerca de 18 horas.

Figura 5.6 – Diagrama de blocos do circuito da unidade remota de aquisição (UA). O circuito de condicionamento do sinal de alta tensão (HV) é separado do circuito de aquisição e transmissão de dados, que opera em baixa tensão (LV)

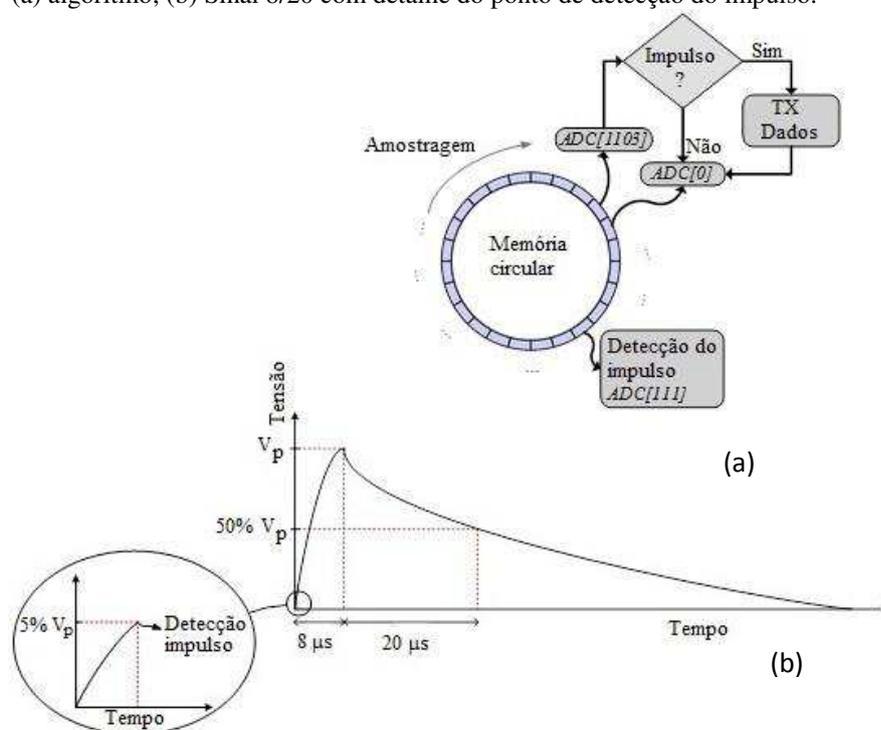


Fonte: Elaborada pelo autor.

O algoritmo de aquisição de um sinal, em uma haste fincada no solo de um aterramento, está ilustrado na Figura 5.7(a). A aquisição tem início no momento em que o módulo de controle é ligado. O sistema passa a fazer a amostragem do sinal de forma contínua e os dados adquiridos são armazenados em uma memória circular. A cada dado adquirido, é verificado se o valor da tensão medida ultrapassa 5% do valor de fundo de escala do conversor AD, valor estipulado como indicador da ocorrência de um impulso. Na Figura 5.7(b) é apresentado um gráfico exemplificando um impulso e no detalhe se pode ver o ponto de detecção do impulso.

Quando um impulso é detectado, a posição respectiva do banco de memória é considerada como sendo a amostra de número 111, esse procedimento procura garantir que as amostras anteriores à detecção do evento sejam mantidas. A seguir, o sistema passa a armazenar as 992 amostras restantes. Considerando a taxa de amostragem adotada, são armazenadas informações referentes a $56 \mu\text{s}$ anteriores ao impulso e $496 \mu\text{s}$ posteriores. Uma vez detectado o impulso e completado o banco de memória, os dados são transmitidos para a UCC e a amostragem é reiniciada.

Figura 5.7 – Diagrama ilustrativo do algoritmo de detecção do impulso e transmissão dos dados; (a) algoritmo; (b) Sinal 8/20 com detalhe do ponto de detecção do impulso.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Dois módulos de aquisição remota foram montados, denominados SAD1 e SAD2. Com os módulos foram realizadas aquisições em laboratório e em campo. Na Figura 5.8 é apresentada uma fotografia do sistema instalado em campo para a realização de testes.

Figura 5.8 – Fotografia dos equipamentos instalados em campo para a realização de testes.



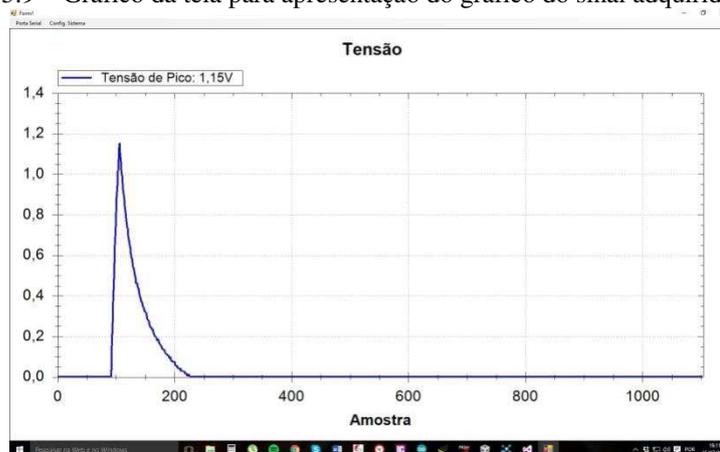
Fonte: Elaborada pelo autor.

Cada unidade é formada por duas caixas metálicas, sendo uma para o circuito condicionador (Estágio HV) e a outra para os circuitos de aquisição e de transmissão (Estágio LV), conforme mostrado na fotografia da Figura 5.8. As conexões são feitas utilizando-se cabo coaxial. O circuito de condicionamento do sinal é conectado à haste auxiliar que está enterrada no solo do aterramento.

Um computador portátil foi usado como base da unidade de controle central. Um módulo ZigBee configurado como coordenador, foi responsável pela solicitação da transmissão dos dados adquiridos. O processamento dos dados transmitidos foi feito usando uma rotina computacional em C# para armazenamento dos dados em arquivo e apresentação do respectivo gráfico em tela.

Na Figura 5.9, pode ser vista uma imagem da tela em que é mostrado um gráfico obtido a partir dos dados do sinal de tensão adquirido em bancada.

Figura 5.9 – Gráfico da tela para apresentação do gráfico do sinal adquirido.



Fonte: Elaborada pelo autor.

As informações disponíveis para visualização na tela podem ser ajustadas conforme a necessidade do usuário. Na versão inicial foram disponibilizadas as informações do valor de pico do sinal, quantidade de amostras e o gráfico da amplitude do sinal em função das amostras. Para cada medição foi gerado um arquivo dos dados adquiridos, o que possibilita o tratamento posterior dos dados.

5.3 Resultados dos Experimentos para Validar o Sistema Desenvolvido

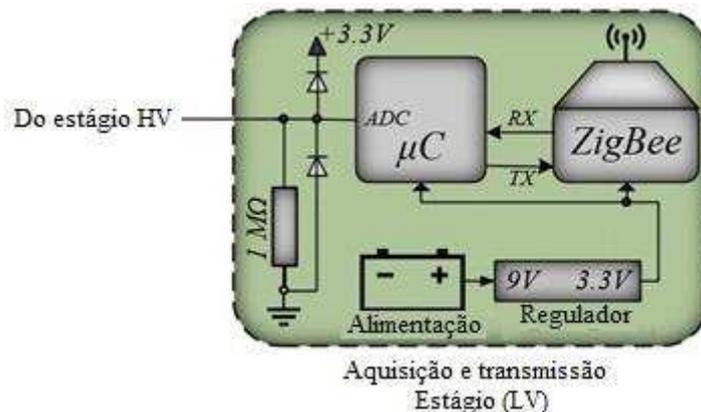
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com os ensaios realizados para validar o sistema de aquisição de dados desenvolvido, usando a configuração descrita na Seção 4.4 do Capítulo 4. Foram feitas aquisições simultâneas de dados com o sistema desenvolvido e com o osciloscópio. Foram testados dois módulos de unidade remota de aquisição SAD1 e SAD2.

Inicialmente foi feita uma verificação dos dois módulos (SAD 1 e SAD2) utilizando-se um procedimento comparativo do nível de amplitude do sinal adquirido com um módulo em relação ao outro. Cada módulo consiste de dois estágios um de baixa tensão (LV) e o outro de alta tensão (HV), conforme apresentado na Figura 5.6. O estágio LV foi desacoplado do HV para a verificação em separado de cada um. Sendo assim a verificação foi feita em duas etapas:

1) Verificação do circuito em baixa tensão – a verificação do estágio LV (Figura 5.10) foi feita em bancada usando um sinal em baixa tensão, que reproduziu a forma de onda do sinal $8/20 \mu\text{s}$. Usando esse sinal, foram feitas aquisições simultâneas utilizando

o estágio LV de SAD1 e de SAD2. Também, foi executada a análise comparativa do valor de pico dos sinais adquiridos resultando em uma diferença de 0,35%.

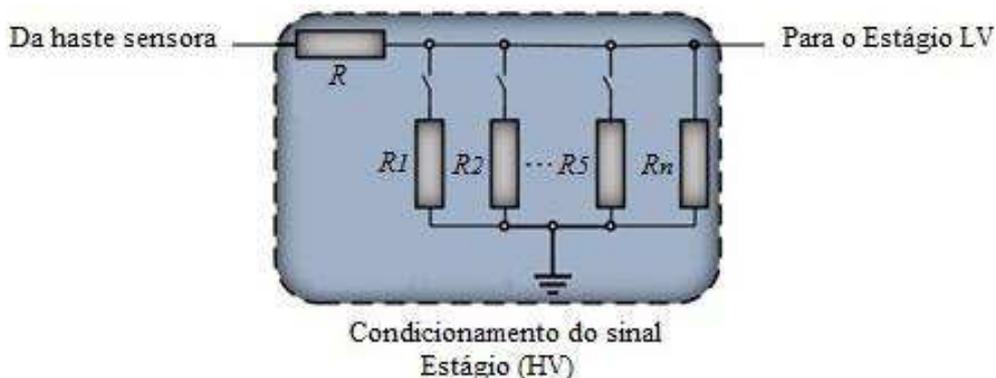
Figura 5.10 – Estágio de baixa tensão da unidade de aquisição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2) Verificação do circuito em alta tensão – o estágio HV compreende uma cadeia de divisores resistivos (Figura 5.11). Por isso a verificação do estágio foi feita para cada escala (1:1000; 1:750; 1:500; 1:250; 1:125; 1:64). A partir dos valores obtidos das medições das resistências foi feita a relação de transformação considerando a escala e o módulo: SAD1 e SAD2.

Figura 5.11 – Estágio de baixa tensão da unidade de aquisição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados são mostrados no Quadro 5.4. O menor desvio (-0,263%) acontece na escala 1:750 e o maior, na escala 1:64, em que o desvio entre as relações de transformação dos módulos SAD1 e SAD2 é de 0,644%.

QUADRO 5.4 - Desvio da relação de divisão entre SAD1 e SAD2 para cada escala do estágio de condicionamento do sinal.

Módulo/Escala	1:1000	1:750	1:500	1:250	1:125	1:64
SAD1	1039,65	766,53	519,23	273,96	134,17	64,99
SAD2	1033,36	768,55	516,71	272,75	133,31	65,41
Desvio	0,006068	-0,00263	0,004865	0,004426	0,00643	-0,00644

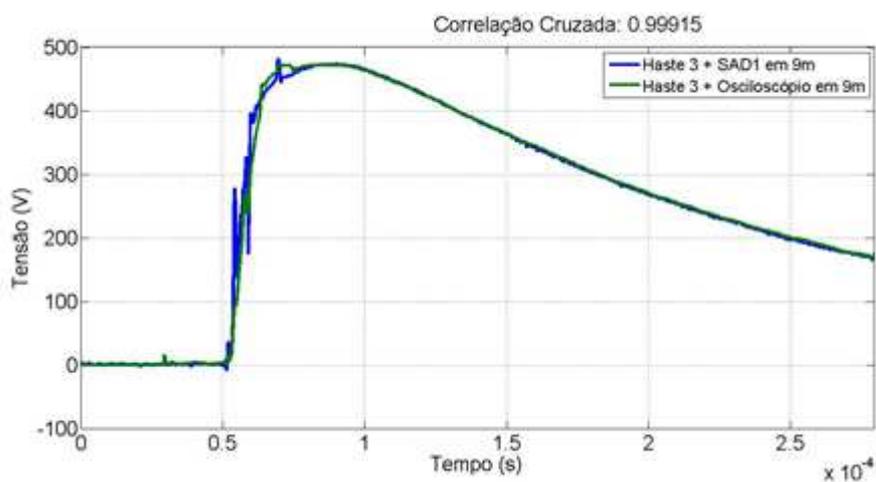
Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a maior diferença entre as relações de transformações obteve-se 0,6% de desvio. Foi constatado que o pior caso acontece quando os erros forem aditivos, somando-se os desvios referentes aos estágios LV e HV tem-se um total de 0,95%. Para os objetivos deste trabalho, um erro menor que 2%, é um índice aceitável. Após a verificação em bancada, os módulos SAD1 e SAD2 foram testados em um aterramento real.

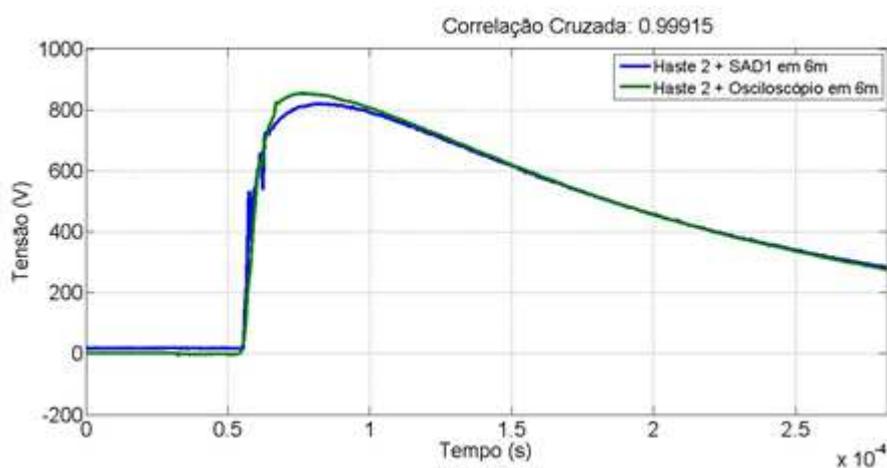
A validação dos módulos no aterramento foi feita por comparação com um osciloscópio. O módulo do sistema desenvolvido em teste e o osciloscópio fizeram aquisição do sinal de tensão em uma haste auxiliar. Considerando que os sistemas de aquisição, osciloscópio e sistema desenvolvido, têm taxas de aquisição, ganhos e gatilhos diferentes, foi desenvolvida uma rotina computacional para possibilitar a comparação dos sinais adquiridos. A comparação foi feita usando correlação cruzada, cujas linhas de código em MatLab, está apresentada no Apêndice B.

O módulo SAD1 foi testado em dois pontos do aterramento situados a 6 m e a 9 m do ponto de injeção de cargas elétricas. Na Figura 5.12(a) são exibidas as formas de onda da tensão na haste auxiliar enterrada a 9 m da haste de injeção adquiridas com o osciloscópio e com o sistema de aquisição em teste. Na Figura 5.12(b) são mostrados os sinais da tensão na haste auxiliar posicionada a 6 m da haste de injeção de cargas elétricas no solo, adquiridos pelos mesmos meios já citados. Observa-se uma boa aproximação entre o sinal obtido com SAD1 e o adquirido com o osciloscópio apresentando uma correlação cruzada entre os sinais de 0,99915, o que significa que os dois sinais tem 99,915% de similaridade.

Figura 5.12 – Forma de onda da tensão na haste auxiliar adquirida com o módulo SAD1 e com o osciloscópio, distantes da haste de injeção: (a) 9 m ; (b) 6 m .



(a)

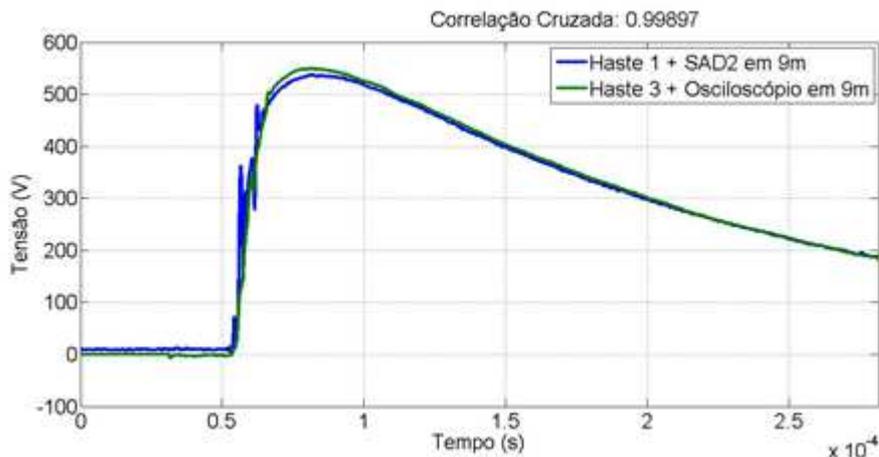


(b)

Fonte: Elaborada pelo autor

O módulo SAD2 foi testado em um ponto, cujo resultado é apresentado na Figura 5.13. A correlação cruzada entre as formas de onda da tensão na haste auxiliar cravada a 9 m do ponto de injeção de corrente no solo, obtidas com o módulo SAD2 e com o osciloscópio é de 0,99897. Ou seja, os dois sinais coincidem em 99,897% dos pontos.

Figura 5.13 – Forma de onda da tensão na haste auxiliar, situada a 9 m do ponto de injeção, adquirida com o módulo SAD2 e com um osciloscópio .



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir dos resultados, em que se obteve correlação cruzada mínima de 0,99897, é possível se assegurar que o sistema desenvolvido é capaz de adquirir sinais decorrentes da aplicação de impulsos de corrente de alta intensidade no solo de um aterramento.

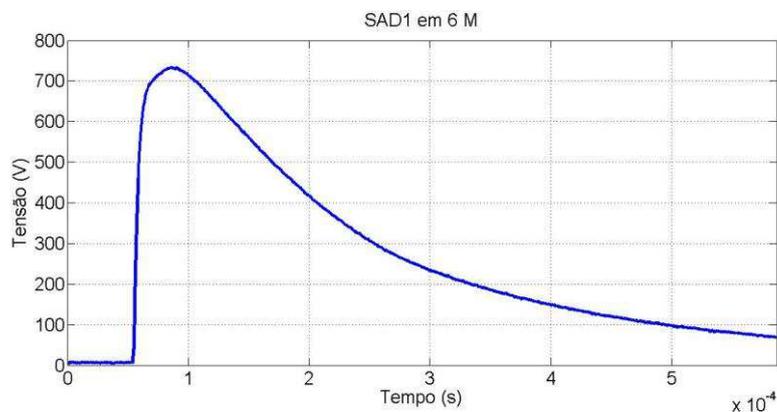
5.4 Resposta de um Aterramento ao Impulso de Corrente

Nesta seção, que está dividida em duas partes, são apresentados os resultados para analisar o comportamento de um aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade usando o sistema de aquisição de dados desenvolvido. Na primeira parte, são apresentados os resultados das medições feitas em hastes isoladas. Em seguida, são mostrados os resultados da aquisição simultânea em dois pontos do aterramento. Os experimentos foram montados conforme descrito no Capítulo 4, Seção 4.5. Para tanto, foram usados dois módulos de aquisição remota, SAD1 e SAD2.

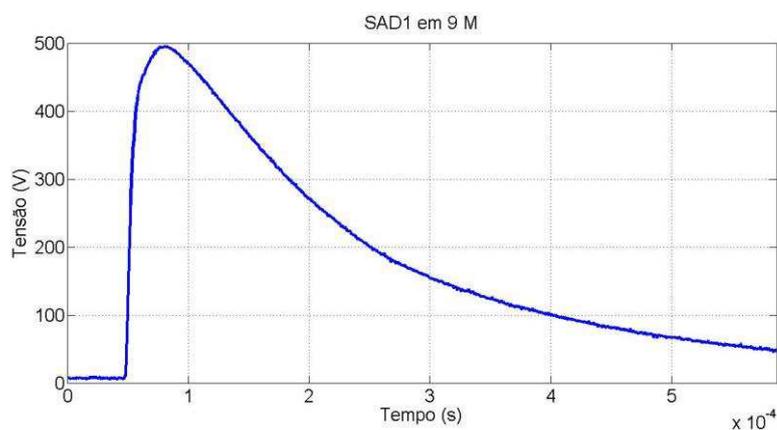
5.4.1 Sinais Adquiridos em Hastes Isoladas

Inicialmente foram feitas aquisições do sinal de tensão em uma haste auxiliar, usando cada módulo separadamente. Com o módulo SAD1, foram feitas aquisições posicionadas a 6 m e a 9 m da haste de injeção. Na Figura 5.15 são exibidos os gráficos correspondentes a essas aquisições.

Figura 5.14 – Formas de onda da tensão adquirida usando o módulo SAD1 em dois pontos do aterramento. (a) a 6 m do ponto injeção de cargas; (b) 9 m da haste de injeção de cargas no solo.



(a)

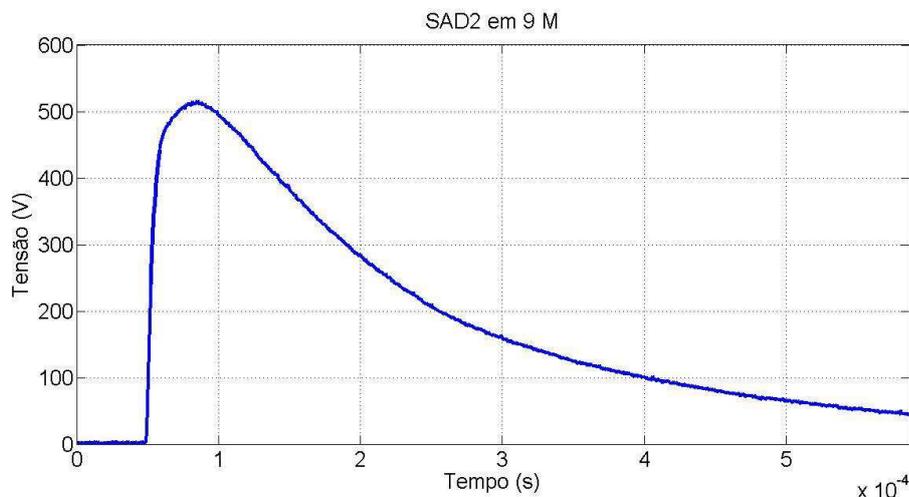


(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o módulo SAD2 foi feita aquisição em uma haste posicionada a 9 m do ponto de injeção, cujo gráfico correspondente pode ser visto na Figura 5.15.

Figura 5.15 – Forma de onda da tensão adquirida a 9 m da haste de injeção, usando o módulo SAD2.



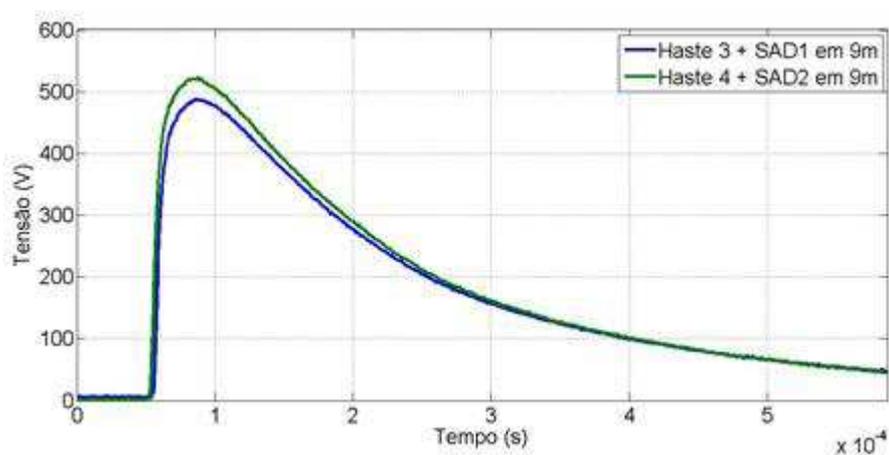
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.4.2 Sinais Adquiridos em Duas Hastes

Nessa seção, são apresentados os resultados das aquisições de sinais de tensão feitas em duas hastes simultaneamente, usando os módulos SAD1 e SAD2. Inicialmente, foram feitas medições em duas hastes equidistantes do ponto de injeção. Em seguida, foram adquiridos sinais em hastes posicionadas em diferentes distâncias da haste de injeção de corrente.

Na Figura 5.16 é apresentado o gráfico contendo as formas de onda da tensão medida em duas hastes auxiliares fincadas a 9 m da haste de injeção de corrente no solo.

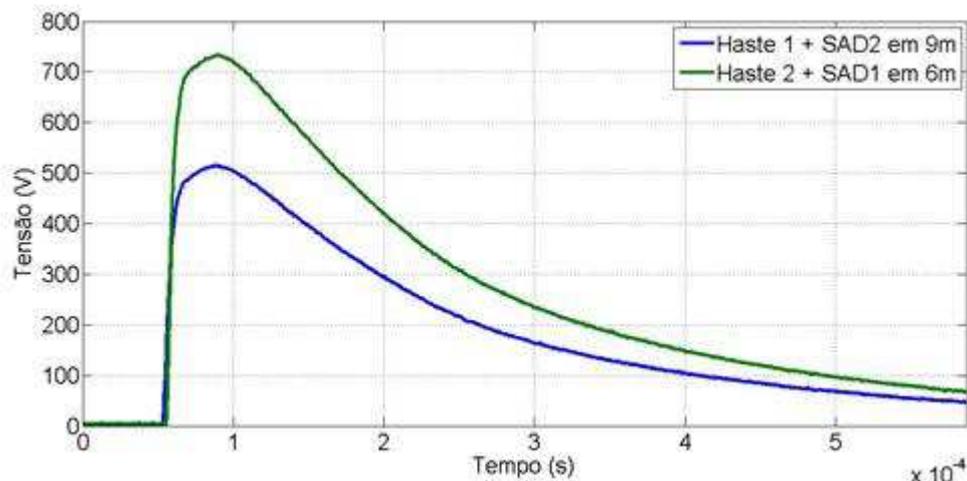
Figura 5.16 – Forma de onda da tensão adquirida em dois pontos equidistantes da haste de injeção de corrente no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 5.17, é mostrado o gráfico contendo os sinais da tensão em hastes auxiliares posicionadas a 9 m (com SAD2) e a 6 m (com SAD1) da haste de injeção, sendo os pontos numa mesma direção.

Figura 5.17 – Forma de onda da tensão adquirida em dois pontos diferentes do solo, na mesma direção.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que os resultados estão em conformidade com aqueles obtidos por outros pesquisadores, dentre os quais, Araújo *et al.* (2010), Gonçalves *et al.* (2015), Diaz e Silva (2011), Elmghairbi *et al.* (2011), Grev (2009), Haddad *et al.* (2010) e Visacro (2007).

No caso dos resultados obtidos com a aquisição, em hastes fincadas em diferentes distâncias em relação ao ponto de injeção de corrente, numa mesma direção, observa-se que a amplitude do sinal de tensão sofre atenuação à medida que se distancia do ponto de injeção. Resultados similares foram publicados em Visacro (2007), Araújo *et al.* (2010), Elmghairbi *et al.* (2011) e Gonçalves *et al.* (2015).

Para as aquisições realizadas em pontos equidistantes da haste de injeção, pode ser observado que os valores são aproximados. A discrepância entre esses valores é de aproximadamente 16,6%. Uma possível causa dessa diferença é a característica rochosa do solo, considerando que os módulos de aquisição foram validados e calibrados e que o solo, usado para realização dos testes, não teve tratamento adequado para escoamento de cargas.

A partir dos resultados obtidos com o sistema de aquisição de dados desenvolvido na pesquisa, observa-se que este é capaz de detectar sinais impulsivos de alta intensidade, gerar tabelas dos dados dos sinais adquiridos e fazer a transmissão desses dados para uma unidade de processamento usando a comunicação sem fio.

5.5 Resumo

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos para se atingir os objetivos estabelecidos para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados aplicado à avaliação das condições de degradação de malhas de aterramento energizadas, utilizando comunicação sem fio.

Dois módulos do sistema de aquisição de dados desenvolvido foram testados e validados. Pelos resultados apresentados, pode-se afirmar que o sistema desenvolvido é capaz de fazer aquisição de sinais para avaliação das condições de operação de uma subestação energizada. A partir dos sinais de tensão adquiridos em diversos pontos do aterramento é possível se avaliar se o aterramento está garantindo o escoamento adequado das cargas, evitando potenciais perigosos.

A transmissão dos dados, correspondentes à aquisição de sinais impulsivos no solo de uma malha de terra, utilizando comunicação sem fio oferece maior segurança aos profissionais mitigando os efeitos causados por interferências eletromagnéticas, presentes em ambientes de tensões elevadas. Além disso, possibilita que as medições sejam realizadas com a subestação energizada.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho de tese foi apresentado o desenvolvimento de um sistema de aquisição. O sistema desenvolvido é adequado e dedicado à aquisição de sinais impulsivos de tensão e corrente de alta intensidade. Devido as suas características, o sistema pode ser utilizado na avaliação das condições de degradação de malhas de aterramento energizadas.

Para se atingir os objetivos estabelecidos, as seguintes etapas foram desenvolvidas:

- Especificar os parâmetros do sistema de aquisição de dados adequado a adquirir sinais impulsivos de alta intensidade;
- Escolher uma tecnologia para a construção de uma rede de sensores sem fio capaz de adquirir, em diversos pontos da malha, sinais resultantes da injeção de cargas provenientes de corrente elétrica de alta intensidade;
- Desenvolver e conceber circuitos de aquisição e transmissão de dados e rotina computacional para tratamento dos dados, considerando a operação em ambientes de subestações energizadas;
- Validar o sistema desenvolvido por meio da realização de experimentos em condições de impulsos de alta intensidade que reproduzam as condições reais de operação de um aterramento;
- Analisar o comportamento da tensão, em diversos pontos de um aterramento submetido a impulsos de corrente de alta intensidade, a partir de dados adquiridos com o sistema desenvolvido.

Para ser adequado e dedicado a adquirir sinais impulsivos de alta intensidade, o sistema foi especificado com taxa de amostragem de 10^6 amostras por segundo, amplitude máxima de 3 kV, tempo de duração da aquisição de 500 μ s e um canal analógico por nó sensor. Por apresentar estabilidade e permitir a aquisição das formas de ondas com as características de sinais impulsivos, foi especificado o C2000 LaunchpadXL, que é baseado no microcontrolador TMS320F28377 Delfino

Para ser adequado a aplicações em subestações energizadas e permitir que o sistema seja imune a interferências eletromagnéticas, a comunicação sem fio no padrão ZigBee especificada.

Para realizar o tratamento dos dados adquiridos foi desenvolvida uma rotina computacional. A rotina desenvolvida possibilita o armazenamento dos dados em arquivo e a visualização do sinal adquirido em tela de um computador.

O sistema de aquisição de dados foi testado e validado em bancada. Depois disso, e para garantir a sua aplicabilidade em condições de impulsos de alta intensidade, semelhantes à operação de um aterramento em uma subestação, o sistema foi validado com aplicações de impulsos de corrente 1,4 kA. Os resultados comprovam que o sistema foi capaz de adquirir sinais de alta amplitude e em frequências elevadas.

Com o intuito de comprovar a reprodutibilidade dos sinais adquiridos, durante a realização dos testes do sistema, foi feita, também, a aquisição simultânea de dados com um osciloscópio. Foram adquiridos dados de sinais de tensão em hastes auxiliares fixadas no solo de um aterramento. A comparação dos resultados obtidos pelos dois meios de aquisição resultou em 99,9% de semelhança entre os sinais adquiridos.

Com o sistema desenvolvido e validado, foram feitas medições da tensão no solo de um aterramento submetido a impulsos de corrente da ordem de kiloampères. Os resultados obtidos corroboram pesquisas similares que mostram a atenuação do sinal à medida que se distancia do ponto de injeção da corrente elétrica no solo.

O sistema desenvolvido foi testado em campo e foi comprovada a sua eficiência em realizar a aquisição de sinais de alta intensidade e em frequências elevadas, em ambientes com influência dos efeitos eletromagnéticos, inerentes ao ambiente de subestações elétricas.

As características técnicas do sistema desenvolvido possibilitam a sua aplicação na análise das condições operativas de uma malha de terra energizada, bem como, permite a concepção de modelos elétricos representativos de malhas. Além disso, pela concepção, pelos ensaios realizados e pelos resultados obtidos, o sistema desenvolvido oferece mais segurança para os profissionais envolvidos.

Desse modo, conclui-se que o sistema desenvolvido reúne as condições técnicas necessárias à aquisição de sinais impulsivos de tensão e corrente de alta intensidade e pode ser utilizado na avaliação das condições de degradação de malhas de aterramento energizadas.

6.1 Sugestões de Trabalhos

A seguir são listadas sugestões de trabalhos em continuação da pesquisa realizada neste trabalho de tese:

- Desenvolvimento de um sistema para fornecimento de energia para alimentação dos nós sensores, de forma a aumentar a autonomia da unidade remota de aquisição de dados, que são instaladas em hastes auxiliares fincadas em pontos do aterramento e conseqüentemente, expostas ao tempo. Pelo exposto, a concepção de um módulo de abastecimento de energia, a partir de fontes alternativas, a exemplo de energia solar, se mostra adequado;
- Concepção de um circuito de condicionamento de sinais que possibilite a medição de sinais impulsivos de alta intensidade independente do conhecimento prévio de sua ordem de grandeza. Uma sugestão é estabelecer faixas de condicionamento do sinal, por exemplo, quatro. Em cada nó, se deve realizar a aquisição nas quatro faixas, simultaneamente. Ao final da conversão, devem ser aproveitados os dados correspondentes à faixa que seja mais coerente, considerando-se a amplitude do sinal adquirido.
- Desenvolvimento de um sistema que possibilite a interface entre o sistema de aquisição de dados desenvolvido neste trabalho e o sistema de gerenciamento da operação de uma subestação. Esta interface possibilitaria o uso dos dados adquiridos diretamente pelo sistema de gerenciamento da subestação, possibilitando o acionamento de alarmes, ou outra atuação sobre o sistema, constituindo-se em uma valiosa ferramenta de apoio à manutenção;
- Desenvolvimento de um gerador móvel de impulsos de corrente de alta intensidade. O uso de um gerador móvel de impulsos de corrente possibilita a aquisição de sinais impulsivos de alta intensidade em uma diversidade maior de malhas de aterramento, além de permitir a aquisição de dados em malhas de terra fora de operação. Este último caso, mostra-se de grande utilidade para o teste de malhas de terra antes do seu início de operação, possibilitando avaliar se o executado na construção de um

sistema de aterramento, corresponde ao que foi estabelecido no respectivo projeto.

- Desenvolvimento de modelos de aterramento submetidos a impulsos de corrente de alta intensidade. Com os dados adquiridos com o sistema de aquisição de dados, desenvolvido neste trabalho de tese, é possível construir modelos do comportamento de malhas de terra submetidas a sinais impulsivos de amplitudes elevadas. Os modelos são úteis no planejamento e na predição de falhas do aterramento.

6.2 Artigos Produzidos

Durante o desenvolvimento desta pesquisa um artigo foi aceito para publicação em periódico. Além disso, foram publicados 14 artigos em eventos, sendo onze em conferências internacionais e três em eventos nacionais. A seguir são listados todos os artigos.

Artigo aceito para publicação em periódico:

GOMES, L. V.; COSTA, E. G.; MACÊDO, E. C. T.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, M. S.; ANDRADE JR., G. V., “*Failure Detection in Energized High Voltage Substation Grounding Grids - a Case Study*” foi aceito para publicação no *International Journal of Engineering and Science Invention - IJESI*.

Artigos publicados em conferências

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; GONÇALVES, M. F. B. R.; LIMA Fo., J. R. *Experimental Evaluation of a Grounding Grids*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM ALTA TENSÃO - ISH, Pilsen, República Tcheca, 2015.

GONÇALVES, M. F. B. R.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, M. S.; LIMA Fo., J. R. *Experimental Evaluation of Impulsive Impedance in Grounding Grids Subjected to Current Impulses*. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM ALTA TENSÃO - ISH, Pilsen, República Tcheca, 2015.

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; SILVA, L. F. D.; LIMA Fo., J. R. *Experimental Evaluation of a Grounding Grid Subjected to High Intensity Current Impulse*. In: 21º. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO COMITÊ TÉCNICO DE MEDIDAS ELÉTRICAS DA IMEKO – TC4, Praga, República Tcheca, 2015.

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; GONÇALVES, M. F. B. R.; LIMA Fo., J. R. *Avaliação Experimental da Impedância em um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente*. In: XVI ENCONTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DO CIGRE – ERIAC, Puerto Iguazu, Argentina, 2015.

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*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS-SBSE, Foz do Iguaçu, Brasil, 2014.

CASTRO, M. S.; FREIRE, R. C. S.; COSTA, E. G.; FONSÊCA, N. S. S.; RODRIGUES, M. A. O.; MACÊDO, E. C. T.; VILLANUEVA, J. M. M.. *Wireless System for Detecting High Intensity Current Impulses Applied to Ground Grids*. In: INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS TECHNOLOGY CONFERENCE - I2MTC, Minneapolis, EUA, 2013.

CASTRO, M. S.; FREIRE, R. C. S.; COSTA, E. G.; MACÊDO, E. C. T.; FONSÊCA, N. S. S.; SILVA, T. L. *Experimental Evaluation of Potential Distribution in a Grounding Grid Subjected to Impulse Current*. In: 19º. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO COMITÊ TÉCNICO DE MEDIDAS ELÉTRICAS DA IMEKO – TC4, Barcelona, Espanha, 2013.

CASTRO, M. S.; FREIRE, R. C. S.; COSTA, E. G.; MACÊDO, E. C. T.; FONSÊCA, N. S. S. *Avaliação Experimental da Impedância Transitória em um Aterramento*. In: X CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA-SEMETRO, Buenos Aires, Argentina, 2013.

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; MACÊDO, E. C. T.; RODRIGUES, M. A. O.; LIRA, G. R. S.; ANDRADE JR., G. V. *Avaliação Experimental da Impedância em um Eletrodo de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS-SBSE, Goiânia, Brasil, 2012.

RODRIGUES, M. A. O.; COSTA, E. G.; CASTRO, M. S.; TROVÃO, L. G. C. Avaliação do Desempenho de um Novo Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS-SBSE, Goiânia, Brasil, 2012.

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; MACÊDO, E. C. T.; RODRIGUES, M. A. O.; GOMES, L. V. *Experimental Impulse Response of Grounding Systems*. In: POWER MODULATOR AND HIGH VOLTAGE CONFERENCE - IPMHVC, San Diego, EUA, 2012.

RODRIGUES, M. A. O.; COSTA, E. G.; CASTRO, M. S. *Performance Evaluation of a New Grounding System*. In: POWER MODULATOR AND HIGH VOLTAGE CONFERENCE - IPMHVC, San Diego, EUA, 2012.

GOMES, L. V.; MACÊDO, E. C. T.; ALBUQUERQUE, T. C.; COSTA, E. G.; ANDRADE JR., G. V.; CASTRO, M. S.; FREIRE, R. C. S. *Embedded System to Grounding Grid Diagnosis of Energized Substations*. In: INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS TECHNOLOGY CONFERENCE - I2MTC, Graz, Áustria, 2012.

MACÊDO, E. C. T.; GOMES, L. V.; ANDRADE JR., G. V.; DIAS, A. D.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, M. S. *Measurement System Applied to Energized Substation Grounding Grids Diagnosis*. In: 18º. SIMPÓSIO INTERNACIONAL DO COMITÊ TÉCNICO DE MEDIDAS ELÉTRICAS DA IMEKO – TC4, Natal, Brasil, 2011.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMEDA, M., HARID, N., GRIFFITHS, H. e HADDAD, A. Earth Surface Potential in the Vicinity of Transmission Tower under Low Frequency and Transient Currents. In: XVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 2011, Hannover.

ARAÚJO, F. J. L., SILVA, J. M. C. L., ANDRADE, G. V. JR., LIRA, G. R. S., COSTA, E. G. e NÓBREGA NETO, S. A. G.; Avaliação de Potenciais no Solo Devido a Impulsos de Corrente em Malhas de Aterramento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE2010, 2010, Belém.

ASIMAKOPOULOU, F. E., GONOS, I. F. e STATHOPOULOS, I. A.; I-V Curves for the Determination of the Ionization Voltage in Soil Samples. In: XVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 2011, Hannover.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15749: Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. Rio de Janeiro, 2009. 49 p.

BELLASCHI, P. L. Lightning Currents in Field and in Laboratory. *Electrical Engineering*, p. 837-843, ago. 1935.

BRITO, Valdemir. S. *Modelo Adaptativo de Para-Raios de Óxido de Zinco para a Região de Baixa Corrente*. 2013. 123 f. Dissertação – Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

CASTRO, M. S.; COSTA, E. G.; FREIRE, R. C. S.; GONÇALVES, M. F. B. R.; LIMA Fo., J. R. Experimental Evaluation of a Grounding Grids. In: XIX INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING - ISH, 2015, Pilsen.

CASTRO, M. S., FREIRE, R. C. S.; COSTA, E. G.; FONSÊCA, N. S. S.; RODRIGUES, M. A. O.; MACÊDO, E. C. T.; VILLANUEVA, J. M. M. Wireless System for Detecting High Intensity Current Impulses Applied to Ground Grids. In: INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS TECHNOLOGY CONFERENCE - I2MTC, 2013, Minneapolis.

CASTRO, Malone S. *Sistema de Aquisição de Dados para Diagnóstico de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Elétrica*. 2012. 60 f. Dissertação – Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

CASTRO, M. S., COSTA, E. G., FREIRE, R. C. S., MACEDO, E. C. T., RODRIGUES, M. A. O. LIRA, G. R. S., ANDRADE JR., G. V. Avaliação Experimental da Impedância em um Eletrodo de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente; In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - SBSE2012, 2012, Goiânia.

CASTRO, M. S.; FREIRE, R. C. S.; COSTA, E. G.; FONSÊCA, N. S. S.; RODRIGUES, M. A. O.; MACÊDO, E. C. T.; VILLANUEVA, J. M. M. Wireless System for Detecting High Intensity Current Impulses Applied to Ground Grids. In: INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENTS TECHNOLOGY CONFERENCE - I2MTC, 2013, Minneapolis.

CHAVANNE, X.; FRANGI, J. P.; ROSNY, G. A new Device In Situ Measurement of an Impedance Profile at 1-20 MHz. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. v. 59, n. 7, p.1850-1859. 2010.

CLARK, D.; GRIFFITHS, H.; HARID, N.; HADDAD, A.; GUO, D. Wireless Measurement System for a Large-Scale Grounding Electrode Test Facility. In: 48th UNIVERSITIE'S POWER ENGINEERING CONFERENCE (UPEC), 2013, Dublin.

CLARK, D.; GUO, D.; LATHI, D., HARID, N.; GRIFFITHS, H.; AINSLEY, A., HADDAD, A. Controlled Large-Scale Tests of Practical –Part II: Comparison of Analytical and Numerical Predictions with Experimental Results. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 29, n. 3, p.1240-1248. 2014.

COLAK, I .; GARIP, I.; ISSI, F. An Application of Maintaining Constant Grounding Resistance of Renewable Energy Sources by using a Dspic. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECOLOGICAL BEHICLES AND RENEWABLE ENERGIES (EVER), 2014, Monte Carlo.

CONG-LI, L. e MINFANG, P.; A New Approach for Monitoring Grounding Grid of Electrical Power System. In: EIGHTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS – ICEMI - IEEE, 2007.

COSTA, E. G. Notas de aula da disciplina Técnicas de Alta Tensão, ministrada no Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, DEE, UFCG, Primeiro Trimestre de 2011.

DIAS, André D. *Malhas de Aterramento em Subestações Energizadas: Medições e Análises*. 2011. 128 f. Dissertação – Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DIAZ, R. R.; SILVA, J. N. Space Charge and Soil Ionization: An Electro-kinetic Approach. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 18, n. 6, p.2032-2039, dez. 2011.

DICK, W. K. e HOLLIDAY, H. R. Impulse and Alternate Current Tests on Grounding Electrodes in Soil Environment. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 1, n. 1, p.102-108. 1978.

DIGI, XBee® 802.15.4. Disponível em: <http://www.digi.com/products/xbee-rf-solutions/modules/xbee-802-15-4>. Acesso em: 13 jun. 2016.

DWIGHT, H. B. Calculation of Resistances to Ground. *Electrical Engineering*, p. 1319-1328, dez. 1936.

ELMGHAIRB, A., AHMEDA, M., HARID, N., GRIFFITHS, H., HADDAD, A. Current and Voltage Distribution in Horizontal Earth Electrodes and a Technique to Increase Effective Length. In: XVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 2011, Hannover.

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

FRAGA, Fábio N. *Contribuições para o Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência Empregando TLM Tridimensional*. 2008. 111 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

FREIRE, R. C. S. Notas de aula da disciplina Dispositivos Eletrônicos, ministrada no Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, DEE, UFCG, Terceiro Trimestre de 2010.

GAZZANA, D. S., BRETAS, A. S., DIAS, G. A. D. e TELLÓ, M. Metodologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo – Revisão do Estado da Arte. Disponível em <http://www.aedie.org/eeej/webrevista/articulos/num1/257-Gazzana.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2011.

GRUPO GLOBO: Disponível em: <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2015/01/concurso-do-inpe-elege-melhores-imagens-de-raio-de-2014-veja-fotos.html>. Acesso em: 7 mar. 2015.

GOMES, L. V.; MACEDO, E. C. T.; ALBUQUERQUE, T. C.; COSTA, E. G.; ANDRADE JR., G. V.; CASTRO, M. S.; FREIRE, R. C. S. Embedded System to Grounding Grid Diagnosis of Energized Substations. In: INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE-I2MTC, 2012, Graz.

GOMES, L. V.; COSTA, E. G.; MACÊDO, E. C. T.; FREIRE, R. C. S.; CASTRO, M. S.; ANDRADE JR., G. V. Failure Detection in Energized High Voltage Substation Grounding Grids - a Case Study. *International Journal of Engineering and Science Invention - IJESI*. No prelo.

GOUCHEN, A.; ZHIYONG, M.; XIAOJUN, W. Design of Grounding Resistance Measurement System based on DSP. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON WEARABLE COMPUTING SYSTEMS, 2010, Shenzhen.

GRCEV, L. Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substations Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 1, p.178, 1997.

GRCEV, L. Impulse Efficiency of Ground Electrode. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 24, n. 1, p. 441-451. 2009.

GRCEV, L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 3, p.1692-1699. 2011.

GUO, D.; CLARCK, D.; LATHI, D., HARID, N.; GRIFFITHS, H.; AINSLEY, A., HADDAD, A. Controlled Large-Scale Tests of Practical –Part I: Test Facility and Measurement of Site Parameters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 29, n. 3, p.1231-1239. 2014.

HADDAD, A., GRIFFITHS, H., AHMEDA, M., HARID, N.; Experimental Investigation of the Impulse Characteristics of Practical Ground Electrodes Systems. *IEEE*, 978-1-4244-8286-3/10, 2010.

HENRIQUE, F. A. N.; *Estimativa da Evapotranspiração de Referência em Campina Grande – PB*. 2006. 102 f. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

HILL, J. L. *System Architecture for Wireless Sensor Networks*. 2003. 196 f. Tese de Doutorado. Universidade da Califórnia, Berkeley.

HU, Z.; GENG, X.; XIAO, J.; HU, X. Research and Realization of On-line Monitoring System for High Voltage Circuit Breaker Based on ZigBee Technology. In: 2009 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, CHRISTCHURCH, 2009, Nova Zelândia.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Sistema Elétrico. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/relampagos.e.efeitos/sistema.eletrico.php>. Acesso em: 14 fev. 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS -INPE.. Perguntas e Respostas. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/el.atm/perguntas.e.respostas.php>. Acesso em: 18 fev. 2015.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE STD – 80: Guide for Safety in AC Substation Grounding. Nova Iorque, 2009. 200 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE STD – 81: Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potential of Grounding System. Nova Iorque, 2012. 74 p.

JAMBAK, M.; AHMAD, H.; BAKER, A. M. A. Automatic maintenance of substation ground resistance. In: SUMMER MEETING. 2000, Seattle.

JOHNSON, T. M.; Disponível em: http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/thienne_johnson/rssf-intro.htm. Acesso em: 12 mai. 2015.

KINDERMANN, Geraldo, CAMPAGNOLO, Jorge M. *Aterramento Elétrico*. 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995.

KHELIL, D., BOUAZABIA, S, HARID, N. e HADDAD, A. Measurement of Electric Field in a Rod Plane Configuration Using the Capacitive Probe with Optical Fiber: Vertical Rod Insertion Effect. In: XVII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 2011, Hannover.

KOSZTALUK, R., LOBODA, M. e MUKHEDKAR, D. Experimental Study of Transient Ground Impedances. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, v. PASS-100, n. 11, p.4653-4660. 1981.

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: 09 fev. 2012.

LIEW, A. C. and DARVENIZA, M. Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths. *Proceedings of IEEE*, vol. 121, No. 2, p.123-135, 1974.

LIU, Z., GAO, J. e ZHANG, S.; Research of the Grounding Measurement System based on LabVIEW in Substation. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTATION TECHNOLOGY AND AUTOMATION, 2009, Changsha.

LI, L, ZOU, J. e SUN, H. Research on the New Clamp-on Ground Resistance On-line Tester Based on AC Variable Frequency. In: WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL, 2006, Dalian.

LLOVERA, P.; LLISO, J. A.; FUSTER, V.; QUIJANO, A. Improved Methodology for High-Frequency Low-Current Measurement of Grounding Rod Impedance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, No. 4, p.1954-1960, 2008.

LOUREIRO, A. A. F.; NOGUEIRA, J. M. S.; RUIZ, L. B.; MINI, R. A. F; NAKAMURA, E. F.; FIGUEIREDO, C. M. S. Rede de Sensores sem Fio. Disponível em: <http://homepages.dcc.ufmg.br/~loureiro/cm/docs/sbrc03.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2015.

MACÊDO, Euler C. T. *Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Pára-Raios de Óxido de Zinco*. 2010. 87 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

MELIOPOULUS, A. P.; MOHARAM, M. G. Transiente Analysis of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*.v. PAS-102, n. 2, p.389-399. 1983.

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

PORTELA, C. Grounding Requirements to Assure People and Equipment Safety Against Lightning. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2000, Cambridge.

RIBEIRO, M. P.; BARRADAS, O. Telecomunicações: Sistemas Analógico-Digitais. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos / Embratel, 1980.

RODRIGUES, Breno D. *Concepção e Desenvolvimento de um Medidor de Impedância Impulsiva de Aterramentos de Linhas de Transmissão*. 2014, 95 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

RODRIGUES, B. D.; VISACRO, S. Portable Grounding Impedance Meter Based on DSP. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. v. 63, n. 8, p.1916-1925. 2014.

RODRIGUES, Maria. A. O. *Avaliação do Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento*. 2012, 77 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil.

ROGERCOM. ZigBee. Disponível em: <http://www.rogercom.com/>. Acesso em 14/04/2012.

SANTOS, Sérgio T. *Redes de Sensores sem Fio em Monitoramento e Controle*. 2007. 87 f. Dissertação – Coordenação de Pós Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SCHROEDER, Marco. A. O. *Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do*

Morro do Cachimbo. 2001. 233 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

SILVA, M.; FRUETT, F. Rede de Sensores sem Fio de Baixo Custo para Monitoramento Ambiental. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2010, Bonito.

SEKIOKA, S. HAYASHIDA, H e AMETANI, A. Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents. *In: IEE PROC. GENER. TRANSM. DISTRIBUT.*, 1998.

SHAN, Q.; GLOVER, I. A.; MOORE, P. J.; PORTUGUES, I. E.; WATSON, R. J.; RUTHERFORD, R. Performance of Zigbee in Electricity Supply Substations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING, 2007, Shanghai.

SOUZA, R. E.; SILVEIRA, F. H.; VISACRO, S. The Effect of Soil Ionization on the Lightning Performance of Transmission Lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 2014, Viena.

SUNDE, E. D. Surge Characteristics of a Buried Bare Wire. *AIEE Transactions*, v. 59, p. 987-991. 1940.

TAO, Y., SIMA, W. , YANG, C. e YANG, Q. Experimental Investigation on the Impulse-Current Distribution of Grounding Electrodes with Various Structures. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND APPLICATION, 2008, Chongqing.

TEXAS INSTRUMENTS.*TMS320F2837xS Delfino™ Microcontrollers: Technical Documents*. Dallas, 2016. 213 p.

TEXAS INSTRUMENTS.*LAUNCHXL-F28377S Overview User's Guide*. Dallas, 2015. 24 p.

THOMAS, R. J. High Impulse Current and Voltage Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. IM-19, n. 2, p.102-117.1970.

VASQUES, B.; COUTINHO, I.; LIMA, M.; Carneval, V. ZigBee.; Disponível em http://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/zigbee/index.html. Acessado em 27/04/2012.

VISACRO, Silvério. *Aterramentos Elétricos*. 1ª. Edição. 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, n. 1, p.381-386. 2007.

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

VISACRO, S., ALÍPIO, R. PEREIRA, C.. GUIMARÃES, M., SCHOEDER, M. A. O.Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 57, n. 1, p. 121-127. 2015.

VISACRO, S. e ROSADO, G. Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 51, n. 1, p.161-164. 2009.

ZHANG, B.; ZENG, R.; HE, J.; SUN, W.; YAO, J. Novel Measurement System for Grounding Impedance of Substations and Power Plants . In: POWER SYSTEM TECHNOLOGY. 2000.

APÊNDICE A – Resistividade do Solo e Resistência de Terra

Neste apêndice são apresentados os procedimentos utilizados e os resultados obtidos das medições da resistividade do solo e da resistência de terra. As medições foram realizadas usando um terrômetro digital que contém uma fonte de corrente interna e *software* embarcado, que possibilita a realização de cálculos. Sendo assim, para cada medição, o instrumento disponibiliza a leitura direta dos valores da resistência e/ou da resistividade do solo, conforme o uso. Na Figura A.1 é exibida uma fotografia do terrômetro.

Figura A.1 – Fotografias do terrômetro usado nas medições.



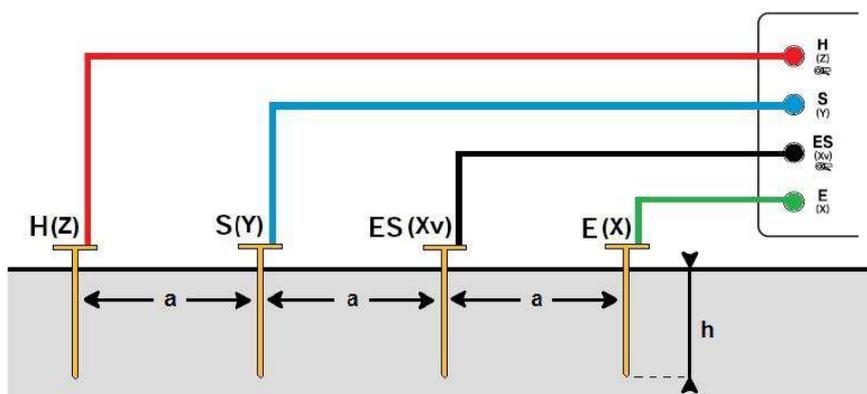
Fonte: Elaborada pelo autor.

Medição da Resistividade do Solo

Para medir a resistividade do solo foi usado o método de Wenner, conforme descrito no Capítulo 2, Seção 2.1.3.

Na Figura A.2 é apresentado o esquema usado para a conexão dos terminais para medição da resistividade. Os terminais H(Z) e E(X) são conectados às hastes de corrente, enquanto S(Y) e ES(Xv) são ligados às hastes de potencial.

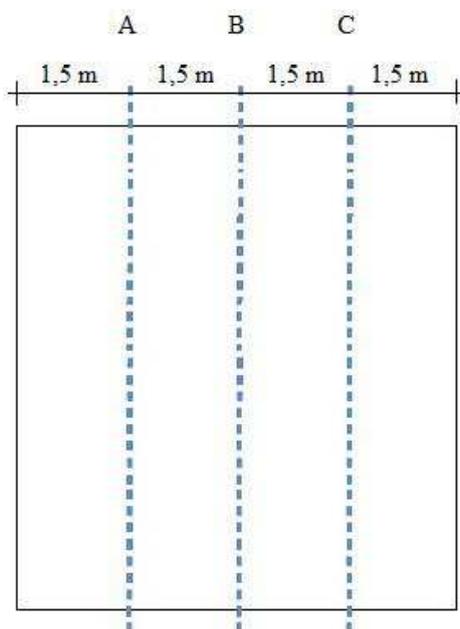
Figura A.2 – Esquema das conexões das hastes para medição da resistividade do solo.



Fonte: (DIAS,2011).

A profundidade a que as hastes foram enterradas foi de 0,3 m. Considerando que o terreno mede 6 m de largura e 19 m de comprimento, os pontos de medição foram dispostos em três direções (A, B, C), conforme ilustrado na Figura A.3.

Figura A.3 – Esquema da disposição dos pontos de medição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

. Os dados obtidos nas medições realizadas são apresentados no Quadro A.1.

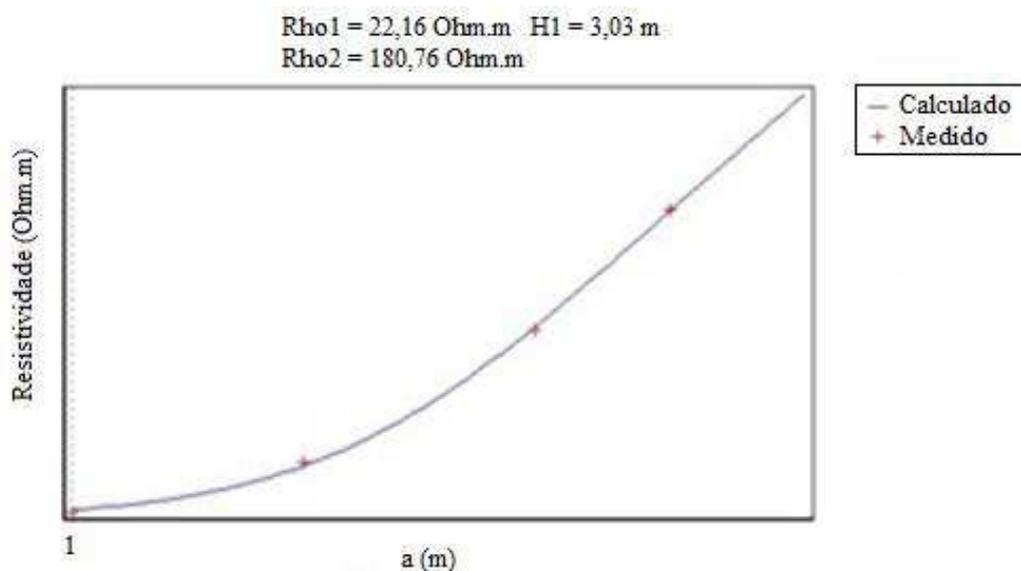
QUADRO A.1- Valores medidos da resistividade do solo e da resistência pelo método de Wenner.

Espaçamento a (m)	Medições					
	A		B		C	
1	20,4 Ω m	3,24 Ω	18,7 Ω m	2,98 Ω	20,2 Ω m	3,22 Ω
2	28,1 Ω m	2,24 Ω	23,0 Ω m	1,90 Ω	21,8 Ω m	1,73 Ω
4	37,0 Ω m	1,47 Ω	34,8 Ω m	1,39 Ω	33,4 Ω m	1,33 Ω
6	48,4 Ω m	1,28 Ω	46,3 Ω m	1,23 Ω	48,2 Ω m	1,28 Ω

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir destes dados foi feito uma modelagem da estratificação do solo utilizando o *software* TecAt Plus 5.2®. O resultado da estratificação no solo é mostrado na Figura A.4. O solo foi estratificado em duas camadas, sendo a primeira com resistividade de 22,16 Ω .m para uma altura de 3,03m e a segunda com 180,76 Ω .m e altura infinita.

Figura A.4 – Gráfico da resistividade do solo em função do espaçamento entre as hastes.



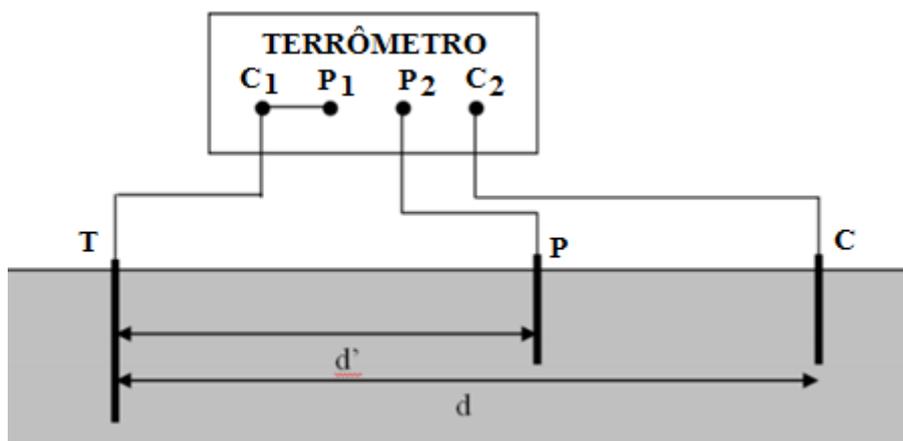
Fonte: Elaborada pelo autor.

Medição da Resistência de Terra

A resistência de terra em baixa frequência foi medida pelo método de Wenner com 3 terminais. O método consiste na injeção de corrente no aterramento em análise (ponto T), com retorno pelo eletrodo de corrente (ponto C). Uma haste sensora de tensão (ponto P) possibilita a medição da tensão neste ponto e, conhecendo-se o valor

da corrente, a resistência pode ser calculada. No caso, do terrômetro usado, o valor de resistência já é disponibilizado para leitura. Na Figura A.5 é mostrado o esquema de ligação dos eletrodos.

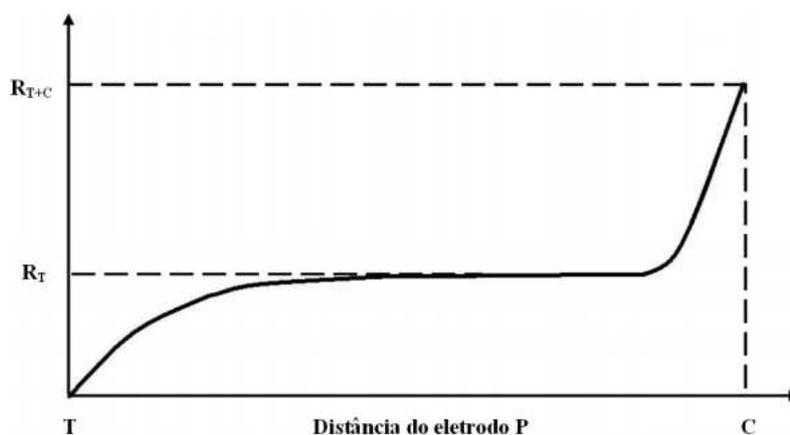
Figura A.5 – Esquema de ligação dos eletrodos para medição de resistência de aterramento



Fonte: COSTA (2011b).

O eletrodo T é fixado no ponto de interesse, o eletrodo de corrente C é cravado a uma distância d . O eletrodo de potencial P é móvel e é cravado entre o ponto T e a haste de corrente C, a uma distância d' do aterramento. A resistência é medida variando-se o posicionamento de P. Os valores da resistência no eletrodo P versus a distância à haste P são plotados em um gráfico. Na Figura A.6 é apresentado um exemplo desse gráfico.

Figura A.6 – Gráfico da resistência de terra versus a distância do eletrodo P.



Fonte: Adaptado de Costa (2011b).

A partir da análise do gráfico observa-se que existe uma faixa de valores em que a resistência medida se mantém constante (região de patamar), esse valor é considerado o

valor da resistência de terra.

Para obtenção da resistência de terra foram realizadas 10 medições variando-se a distância da haste sensora de forma a varrer toda a distância da haste de terra à haste de interesse, no caso, a haste de injeção. Sendo assim, a primeira medida foi feita na distância $d = 1,9$ m e as seguintes, nas distâncias múltiplas até 19,0 m, correspondente à distância total entre as hastes de terra e de corrente.

No Quadro A.2 são apresentados os resultados obtidos a partir das medições realizadas, no dia 03/06/2016, da resistência de terra.

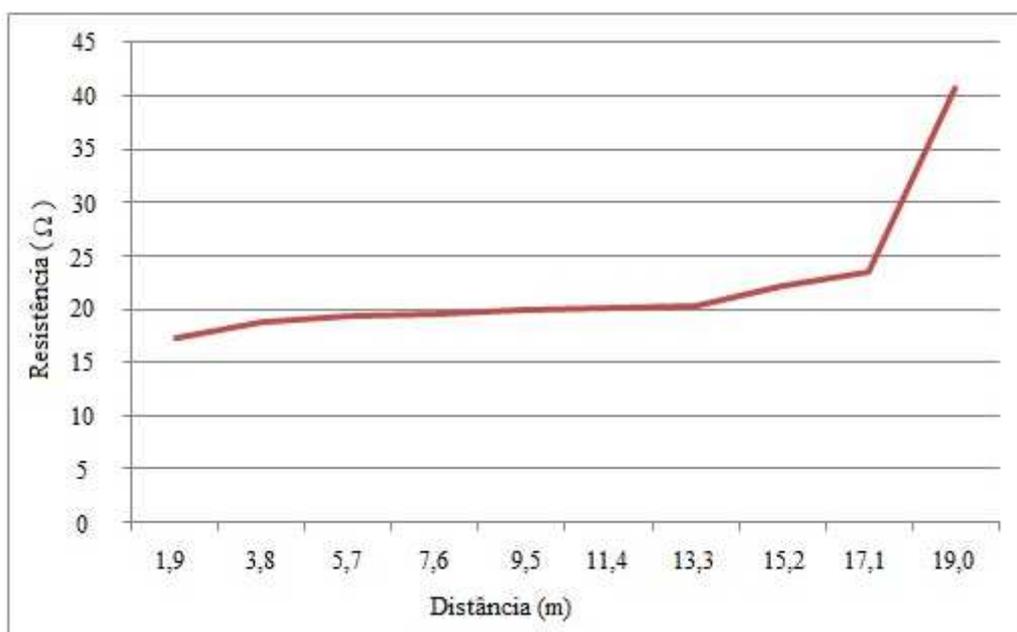
QUADRO A.2 - Valores da resistência de terra em função da distancia da haste de injeção.

Distância (m)	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1	19,0
Resistência (Ω)	17,3	18,8	19,4	19,6	19,9	20,1	20,3	22,1	23,5	40,7

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados obtidos, foi traçado o gráfico apresentado na Figura A.7.

Figura A.7 – Gráfico da Resistência de Terra.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor da resistência de terra corresponde ao valor de patamar da curva traçada a partir dos valores medidos da resistência em função da distância do ponto de interesse. A partir da análise do gráfico apresentado na Figura 5.14, pode-se observar que o patamar da curva ocorre em torno de 20Ω , valor que é atribuído à resistência de terra.

APÊNDICE B – Linhas do Código da Rotina para Cálculo da Correlação Cruzada

Neste apêndice são apresentados os códigos das rotinas utilizando a ferramenta MatLab para o cálculo da correlação cruzada entre os sinais adquiridos simultaneamente com o sistema de aquisição de dados desenvolvido e com o osciloscópio.

```
t_aqps_SAD = 5.32e-07; %Período de amostragem do SAD
t = t_aqps_SAD*linspace(0,1103,1104); %Geração do vetor de tempo
t = t';

%% Grafico SAD2 + Osciloscopio a 9 m
%Ensaio 03 - Teste 07
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaios\Ensaios Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD2 e Haste 01');
wholefile = fileread('Teste 07.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 07.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 07.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaios\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0010\F0010CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

t_aqps_OSC = 1e-7; %Período de amostragem do osciloscópio
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC))); %Vetor
de tempo do sinal do osciloscópio
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
```

```

t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD))); %Vetor
de tempo do sinal do SAD

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC; %Frequência de amostragem do osciloscópio
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD; %Frequência de amostragem do SAD

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD); %Calcula a razão entre as
frequências de amostragens do osciloscópio e do SAD
SAD = resample(SAD,P1,Q1); %Reamostra o sinal do SAD para a frequência
do osciloscópio

OSC = alignsignals(OSC,SAD); %Alinha os sinais do osciloscópio e do
SAD no tempo
SAD = SAD(1:max(size(OSC))); %Limita o sinal do SAD para que os dois
apresentem o mesmo sinal (o SAD tem um sinal mais longo)
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC))); %Vetor de
tempo do SAD e do osciloscópio

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC)); %Calcula o desvio médio da amplitude dos
dois sinais para reajustar o ganho

SAD = SAD-gain; %Com o desvio médio calculado, faz-se a compensação do
sinal do SAD
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff')); %Com os dois sinais
alinhados, na mesma taxa de amostragem, calcula-se a correlação
cruzada entre eles

figure(7); %índice da figura
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid %Plot dos dois gráficos
legend('Electrode 1 + DAS2 at 9m','Electrode 3 + Oscilloscope at
9m','Teste') %Legenda dos gráficos
xlabel('Time (s)') %Legenda do eixo x
ylabel('Voltage (V)') %Legenda do eixo y
title(['Ensaio 3: Test 7. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)]) %Título do gráfico
set(gca,'FontSize',20) %Definição das fontes
xlim([0,max(t)]) %Limitação do eixo x (tempo)

%% Grafico SAD2 + Osciloscopio a 9 m
%Ensaio 03 - Teste 08
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaios\Ensaios Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD2 e Haste 01');
wholefile = fileread('Teste 08.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 08.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 08.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaios\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0011\F0011CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);

```

```

for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

OSC = alignsignals(OSC,SAD);
SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

figure(8);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
legend('Electrode 1 + DAS2 at 9m','Electrode 1 + Oscilloscope at 9m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Test 8. Cross Correlation: ',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

%% Grafico SAD2 + Osciloscopio a 9 m
%Ensaio 03 - Teste 09

```

```

cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaio\Ensaio Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD2 e Haste 01');
wholefile = fileread('Teste 09.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 09.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 09.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaio\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0012\F0012CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

OSC = alignsignals(OSC,SAD);
SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

```

```

figure(9);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
legend('Electrode 1 + DAS2 at 9m','Electrode 1 + Oscilloscope at
9m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Test 9. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

%% Grafico SAD1 + Osciloscopio a 6 m
%Ensaio 03 - Teste 10
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaios\Ensaios Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD1 e Haste 02');
wholefile = fileread('Teste 10.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 10.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 10.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaios\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0013\F0013CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

```

```

OSC = alignsignals(OSC,SAD);
SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

figure(10);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
legend('Electrode 2 + DAS1 at 6m','Electrode 2 + Oscilloscope at
6m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Test 10. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

%% Grafico SAD1 + Osciloscopio a 6 m
%Ensaio 03 - Teste 11
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaio\Ensaio Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD1 e Haste 02');
wholefile = fileread('Teste 11.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 11.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 11.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaio\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0014\F0014CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
end

```

```

OSC = smooth(tensaol,50);

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

OSC = alignsignals(OSC,SAD);
SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

figure(11);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
legend('Electrode 2 + DAS1 at 6m','Electrode 2 + Oscilloscope at
6m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Teste 11. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

%% Grafico SAD1 + Osciloscopio a 6 m
%Ensaio 03 - Teste 12
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaio\Ensaio Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD1 e Haste 02');
wholefile = fileread('Teste 12.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 12.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 12.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaio\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0015\F0015CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    end
end

```

```

        else
            Time1(n)=eval(A);
        end
    end
    Time1=Time1';
    tensao1=zeros(2500:1);
    for n=1:2500
        A=cell2mat(tensao(n));
        if A=='.'
            tensao1(n)=0;
        else
            tensao1(n)=eval(A);
        end
    end
    end
    OSC = smooth(tensao1,50);

    t_aqps_OSC = 1e-7;
    t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
    %t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
    t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

    f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
    f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

    [P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
    SAD = resample(SAD,P1,Q1);

    OSC = alignsignals(OSC,SAD);
    SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
    t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

    gain = 0;
    for k = 1:1:max(size(OSC))-1
        gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
    end
    gain = gain/max(size(OSC));

    SAD = SAD-gain;

    xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

    figure(12);
    plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
    legend('Electrode 2 + DAS1 at 6m','Electrode 2 + Oscilloscope at
    6m','Teste')
    xlabel('Time (s)')
    ylabel('Voltage (V)')
    title(['Ensaio 3: Test 12. Cross Correlation:
    ',num2str(xcorrelation,5)])
    set(gca,'FontSize',20)
    xlim([0,max(t)])

    %% Grafico SAD1 + Osciloscopio a 9 m
    %Ensaio 03 - Teste 13
    cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
    Malone\Dados_Ensaio\Ensaio Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
    03\SAD1 e Haste 03');
    wholefile = fileread('Teste 13.txt');
    newfiledata = strrep(wholefile,',','');

```

```

fileid = fopen('Teste 13.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 13.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaio\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0007\F0007CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

OSC = alignsignals(OSC,SAD);
SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

figure(13);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid

```

```

legend('Electrode 3 + DAS1 at 9m','Electrode 3 + Oscilloscope at
9m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Test 13. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

%% Grafico SAD1 + Osciloscopio a 9 m
%Ensaio 03 - Teste 14
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaios\Ensaios Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD1 e Haste 03');
wholefile = fileread('Teste 14.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 14.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 14.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaios\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0008\F0008CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

OSC = alignsignals(OSC,SAD);

```

```

SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

figure(14);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
legend('Electrode 3 + DAS1 at 9m','Electrode 3 + Oscilloscope at
9m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Test 14. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

%% Grafico SAD1 + Osciloscopio a 9 m
%Ensaio 03 - Teste 15
cd('C:\Users\LIMC-S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa
Malone\Dados_Ensaios\Ensaios Doutorado Malone 03-06-2016\Ensaio
03\SAD1 e Haste 03');
wholefile = fileread('Teste 15.txt');
newfiledata = strrep(wholefile,',','');
fileid = fopen('Teste 15.txt','w');
fprintf(fileid,'%s',newfiledata);
fclose(fileid);
SAD = load('Teste 15.txt');

[nomes , posicoes, unidades, Time, tensao] = textread('C:\Users\LIMC-
S1-01\Dropbox\Doutorado\Programa Malone\Dados_Ensaios\Dados
Osciloscópio\NEW_FOL7\ALL0009\F0009CH4.csv', '%s %s %s %s %s',
'delimiter', ',');
Time1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(Time(n));
    if A=='.'
        Time1(n)=0;
    else
        Time1(n)=eval(A);
    end
end
Time1=Time1';
tensao1=zeros(2500:1);
for n=1:2500
    A=cell2mat(tensao(n));
    if A=='.'
        tensao1(n)=0;
    else
        tensao1(n)=eval(A);
    end
end
end
OSC = smooth(tensao1,50);

```

```

t_aqps_OSC = 1e-7;
t_OSC = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));
%t_aqps_SAD = 5.4496e-07;
t_SAD = t_aqps_SAD*linspace(0,max(size(SAD))-1,max(size(SAD)));

f_aqps_OSC = 1/t_aqps_OSC;
f_aqps_SAD = 1/t_aqps_SAD;

[P1,Q1] = rat(f_aqps_OSC/f_aqps_SAD);
SAD = resample(SAD,P1,Q1);

OSC = alignsignals(OSC,SAD);
SAD = SAD(1:max(size(OSC)));
t = t_aqps_OSC*linspace(0,max(size(OSC))-1,max(size(OSC)));

gain = 0;
for k = 1:1:max(size(OSC))-1
    gain = gain + SAD(max(size(SAD))-k) - OSC(max(size(OSC))-k);
end
gain = gain/max(size(OSC));

SAD = SAD-gain;
xcorrelation = max(xcorr(SAD,OSC,'coeff'));

figure(15);
plot(t,SAD,t,OSC,'LineWidth',3),grid
legend('Electrode 3 + DAS1 at 9m','Electrode 3 + Oscilloscope at
9m','Teste')
xlabel('Time (s)')
ylabel('Voltage (V)')
title(['Ensaio 3: Test 15. Cross Correlation:
',num2str(xcorrelation,5)])
set(gca,'FontSize',20)
xlim([0,max(t)])

```