



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA DIAGNÓSTICO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO SUBMETIDO A IMPULSOS DE CORRENTE ELÉTRICA

MALONE SOARES DE CASTRO

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA – BRASIL

JULHO DE 2012

Malone Soares de Castro

Sistema de Aquisição de Dados para Diagnóstico de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Elétrica

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

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.

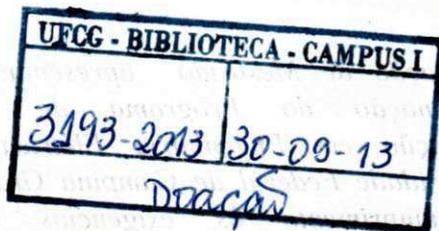
Orientador

Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Orientador

Campina Grande – Paraíba - Brasil

Julho de 2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

C355s Castro, Malone Soares de.
Sistema de aquisição de dados para diagnóstico de um sistema de
Aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica/Malone Soares de
Castro. – Campina Grande, 2012.
60f.: il.col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.
Orientadores: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire e Prof. Dr.
Edson Guedes da Costa.
Referências.

1. Aquisição de Dados. 2. Malhas de Aterramento. 3. Potenciais no
Solo. 4. Impedância Transitória. 5. Impulso de Corrente Elétrica.

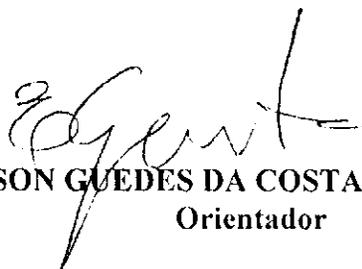
I. Título.

CDU 621.391(043)

**SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA DIAGNÓSTICO DE UM SISTEMA
DE ATERRAMENTO SUBMETIDO A IMPULSOS DE CORRENTE ELÉTRICA**

MALONE SOARES DE CASTRO

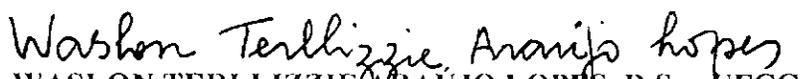
Dissertação Aprovada em 27.07.2012



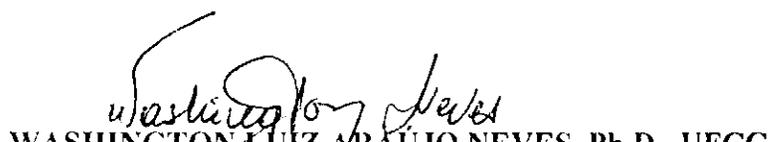
EDSON GUEDES DA COSTA, D.Sc., UFCG
Orientador



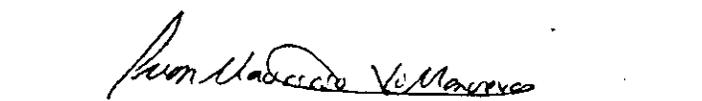
RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador



WASLON TERLLIZZIE ARAÚJO LOPES, D.Sc., UFCG
Componente da Banca



WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Componente da Banca



JUAN MOISÉS MAURÍCIO VILLANUEVA, Dr.
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
JULHO - 2012

DEDICATÓRIA

*A Guga, Zam e Li, meus filhos, por todas as Luas
que vivemos e por tantas outras que virão.*

*Ao meu pai, José Farias (que não teve tempo de
ver este trabalho concluído) e a minha mãe, Terezinha, pelos valores que trago comigo.*

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

AGRADECIMENTOS

Aos Professores:

Raimundo Carlos Silvério Freire e Edson Guedes da Costa pela confiança em mim depositada, pela dedicação com que conduziram a orientação, pelo incentivo, pela paciência, e principalmente pela amizade.

Benedito Antonio Luciano, que além da amizade me cedeu gentilmente material bibliográfico, realizou a revisão da proposta e da dissertação e sempre esteve pronto a dar apoio e incentivo.

George Rossany Lira, jovem professor, sempre disponível para ajudar.

Ao aluno de pós-doutorado Juan Maurício Villanueva, que apesar do pouco tempo de convivência, sempre esteve disponível para contribuir.

Aos alunos de doutorado:

Euler Macêdo, pelo incentivo, dedicação e contribuição imprescindível; os irmãos Maxwell e Wendel Moura Costa, que com presteza e desprendimento sempre estiveram prontos a me ajudar.

Alice Rodrigues pelos ensaios que compartilhamos e pelo socorro oportuno nas horas em que o tempo era exíguo.

Aos alunos de mestrado Luana Gomes, Felipe Castro, Diego Araújo e Valdemir Brito, pela disponibilidade em ajudar e pelas informações precisas na hora certa.

Aos alunos de graduação:

Newton Fonseca, pela dedicação e empenho, que sempre esteve pronto para ajudar nas atividades desenvolvidas no LIMC dando contribuição imprescindível para a realização deste trabalho.

Filipe Lucena, Thaís Luana Vidal, Túlio Chaves de Albuquerque, João Rubens Zacarias, e Mônica Costa que sempre estiveram disponíveis ajudando nos ensaios realizados e oferecendo apoio nas atividades desenvolvidas no LAT.

Aos funcionários:

José Eduardo da Silva, Francisco Freire Soares e José Adriano Bezerra pela ajuda na realização dos ensaios, no Laboratório de Alta Tensão.

Ângela de Lourdes Ribeiro Matias, Pedro Francisco Alves da COPELE e Lucimar Ribeiro Gomes de Andrade do DEE, pela dedicação e disponibilidade, estiveram sempre prontos a oferecer contribuição necessária à realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo apoio financeiro. Ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG pelo apoio oferecido e de cujo grupo me orgulho de fazer parte. Aos meus colegas de pós-graduação que consciente ou inconscientemente ajudaram no meu desenvolvimento acadêmico e pela companhia nesta caminhada.

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

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ACRÔNIMOS.....	11
RESUMO	12
ABSTRACT.....	13
1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Motivação.....	14
1.2Objetivos	16
1.3 Estrutura do Trabalho	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.Aterramento.....	17
2.1.1 Características Elétricas do Solo.....	17
2.1.2 Ionização	18
2.1.3 Propagação de Sinais Impulsivos no Solo.....	19
2.1.4 Grandezas Representativas para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Submetidos a Impulsos de Corrente Elétrica	20
2.2.. Sistema de Aquisição de Dados.....	21
2.2.1 Especificação de um sistema de aquisição de dados.....	23
2.3. Rede de transmissão baseada no Padrão ZigBee.....	24
2.4. Revisão Bibliográfica	25
2.4.1 Características Elétricas e Ionização do Solo.....	26
2.4.2 Eletrodos	27
2.4.3 Parâmetros de Avaliação.....	27
2.4.4 Modelos e Simulação	28
2.4.5 Métodos de Medição e Sistemas de Aquisição.....	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Material.....	31
3.2. Métodos	32
3.3.Circuitos de Condicionamento	34
3.4.Sistema de Aquisição e Controle.....	36
3.5.Transmissão de Dados via Rádio.....	38
3.6.Experimentos Realizados	39
3.6.1 Gerador de Impulsos de Corrente Elétrica.....	39

3.6.2 Ensaio para Definição de Parâmetros do Sistema	40
3.6.3 Ensaio para Validação do Sistema	41
3.6.3.1 Ensaio Utilizando Sinal Simulado 8/20 μ s.....	41
3.6.3.2 Ensaio Utilizando Gerador de Impulsos.....	42
4. RESULTADOS	44
4.1 Definição de Parâmetros do Sistema de Aquisição de Dados.....	44
4.2 Circuitos Implementados	47
4.3 Sistema de Aquisição de Dados: Sinais Adquiridos	49
4.3.1 Resultados com Sinal 8/20 μ s Simulado	49
4.3.2 Resultados com o Gerador de Impulsos.....	49
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	53
5.1. Trabalhos Futuros	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Correntes elétricas transversais e longitudinais num segmento do eletrodo.	18
Fig. 2.2 - Zona de ionização no solo (Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995)).	19
Fig. 2.3 - Forma de onda representativa de uma descarga atmosférica, adaptado de notas de aulas da disciplina Técnicas de Alta Tensão (Costa, 2011).	19
Fig. 2.4 - Atenuação e distorção da tensão e da corrente ao longo do eletrodo. (Adaptado de Visacro (2007)).....	20
Fig. 2.5 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados.	22
Fig. 2.6 - Topologias das redes ZigBee (Adaptado de Vasques <i>et al.</i> 2012).	25
Fig. 3.1 - Distribuição das unidades do sistema de aquisição de dados na malha de aterramento. ...	32
Fig. 3.2 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados proposto.	33
Fig. 3.3 - Gerador de impulsos de corrente e conexões para a haste de injeção e para módulo de aquisição.....	34
Fig. 3.4 - Circuitos de condicionamento para aquisição de tensão e corrente com o dsPIC. a) UAC – tensão. b) UAC – corrente. c) UAn – tensão.	35
Fig. 3.5 – Fluxograma de operação e transmissão/recepção da UAC.	37
Fig. 3.6 – Fluxograma de aquisição e transmissão de dados em uma UAn.	38
Fig. 3.7 (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.	39
Fig. 3.8 – Diagrama esquemático do gerador de impulso.....	40
Fig. 3.9 - Configuração do ensaio no sistema de aterramento para determinação de parâmetros...	40
Fig. 3.10 - Disposição das hastes enterradas no solo.....	41
Fig. 3.11 – Configuração para teste com sinal 8/20 μ s simulado.....	42
Fig. 3.12 - Configuração do ensaio no sistema de aterramento para validação.....	42
Fig. 3.13 - Disposição das hastes no solo (a) Vista superior (b) vista em perspectiva.	43
Fig. 4.1 Curvas de tensão adquiridas com tensão de carregamento de 15 kV. 1 – Haste de injeção; 2 - Haste auxiliar a 7,4 m; 3 – Resistor de 5,488 m Ω ; 4 - Haste auxiliar a 4 m.....	44
Fig. 4.2 - Curvas adquiridas com tensão de carregamento de 15 kV. 1 –Tensão na haste de injeção; 2 – Tensão no resistor de 5,488 m Ω ; 3 - Tensão na haste auxiliar a 7,40 m.....	45
Fig. 4.3 - Impedância transitória obtida com uma tensão de carregamento de 15 kV.....	46
Fig. 4.4 – Circuito Regulador de Tensão.....	47
Fig. 4.5 – Circuito da UAC para Medir Tensão e Corrente.	48
Fig. 4.6 – Circuito da UAn para Medir Tensão.....	48
Fig. 4.7 a) Sinal simulado 8/20 μ s no Agilent Benchlink; b) Sinal de entrada no sistema de aquisição de dados; c) Sinal amostrado a partir do sinal simulado.	49
Fig. 4.8 - (a) microcontrolador e módulo ZigBee; (b) Sistema de aquisição a partir de sinal gerado; (c) sinal adquirido pelo sistema desenvolvido utilizando simulação; (d) módulo de aquisição; (e) sinal adquirido e dados recebidos pelo ZigBee e mostrados no computador; (f) sinal adquirido pelo osciloscópio usando o gerador de impulsos; (g) sinal adquirido pelo sistema desenvolvido utilizando o gerador de impulsos.....	50
Fig. 4.9 - Formas de onda da tensão aplicada a) adquirida com o osciloscópio; b) adquirida com o sistema desenvolvido.	51
Fig. 4.10 - Formas de onda da corrente aplicada: a) adquirida com o osciloscópio; b) adquirida com o sistema desenvolvido.....	52

Fig. 4.11 - Formas de onda da tensão em uma haste auxiliar, colocada a 9 m do ponto da haste de injeção: a) adquirida com o osciloscópio; b) adquirida com o sistema desenvolvido. 52

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1-Valores dos Resistores R1 e R2	36
TABELA 4.1 - Impedância impulsiva calculada para cada valor de tensão aplicada.	45
TABELA 4.2 - Parâmetros do sistema de aquisição de dados	46

LISTA DE ACRÔNIMOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	Analógico/Digital
CNPq	Conselho Nacional Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPELE	Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
dsPIC	<i>Digital Signal Controller-Microchip</i> (Microcontrolador digital de sinais)
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i> (Memória de leitura programável, eletricamente apagável)
FFD	<i>Full functions device</i> (Dispositivo de funções completas)
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i> (Arranjo de Portas Programável em Campo)
GMS	<i>Ground Monitor Service</i> (Monitor de Serviço de Aterramento).
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> (Instituto de Engenharias Elétrica e Eletrônica).
ISM	<i>Industrial Scientific Medical</i> (Industrial, Científica e Médica).
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LIMC	Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas
MRT	Sistema monofilar com retorno por terra
NBR	Denominação de Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de acesso aleatório)
RFD	<i>Reduced functions device</i> (Dispositivos de funções reduzidas)
SG	Espinterômetro do Gerador de Impulso
SH	<i>Sample and hold</i> (Amostra e segura)
TLM	<i>Transmission-Line Modeling</i> (Modelo de Linhas de Transmissão)
UAC	Unidade de aquisição central
UAn	Unidade de aquisição remota
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFG	Universidade Federal de Goiás
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Conector Serial Universal)

RESUMO

O aterramento é um elemento essencial para a segurança de pessoas e instalações elétricas, sendo de grande importância a avaliação da operação de sua malha. Para a avaliação de uma malha de aterramento é necessário se conhecer suas características elétricas tanto na frequência industrial como na condição de surto. As características elétricas são obtidas a partir da injeção de sinais de corrente na malha e seus efeitos são medidos, ou sinais de tensão são adquiridos, em diversos pontos do aterramento. A análise dos sinais é de fundamental importância para a avaliação adequada das condições operacionais do aterramento. Neste trabalho é apresentado um sistema de aquisição de dados (sinais) para avaliação de sistemas de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica (surto), utilizando uma rede de transmissão sem fio. O sistema é portátil e capaz de realizar a comunicação de dados, via rádio com padrão ZigBee, permitindo a transferência dos sinais de tensão adquiridos em diversos pontos do aterramento. O sistema de aquisição de dados utiliza um microcontrolador dsPIC modelo 30F3011 sendo formado por uma unidade central (UAC) e unidades remotas (UAN). A UAC controla o sistema e adquire os dados dos sinais de tensão e corrente, aplicados por meio de um gerador de impulsos de corrente, enquanto as UAN adquirem os dados do sinal de tensão propagado no aterramento. O início da operação do sistema de aquisição ocorre de forma controlada permitindo que as unidades monitorem os sinais de tensão no sensor e com isso identifiquem o início do impulso. Para tanto, são registrados os dados de 64 μ s antes e 448 μ s após o impulso ter sido detectado. Após sua transmissão da UAC para o microcomputador, os dados são analisados e exibidos na forma de sinais de impedância transitória e de distribuição dos potenciais propagados no solo. O sistema desenvolvido foi validado por testes em bancada, utilizando um sinal simulado de 8/20 μ s e por meio de ensaios com um gerador de impulsos, com tensão de carregamento dos seus capacitores em 11 kV. O sistema pode ser usado para identificar diferenças entre a especificação do projeto de sistema de aterramento e sua execução, avaliar o estado de degradação do aterramento e emitir um diagnóstico de sua malha, além de ser útil em projetos de sistemas de monitoramento, que permitam a inserção da malha de terra em sistemas de redes inteligentes (*Smart Grids*).

Palavras chaves: Aquisição de dados, diagnóstico de malhas de aterramento, distribuição dos potenciais no solo, impedância transitória, impulsos de corrente elétrica, malha de aterramento.

ABSTRACT

Grounding is an essential element for the safety of persons and electrical installations, being of great importance evaluate the operation of its mesh. To evaluate a ground grid is necessary to determine its electrical characteristics both in industrial frequency and in the surge conditions. The electrical characteristics are obtained from the injection of electrical current in the mesh and its effects are measured, or voltage signals are acquired at different points of the ground. The analysis of the signals is fundamental for the adequate evaluation of the operation conditions of grounding. This paper presents a data acquisition system (signs) for assessment of grounding systems subjected to impulses of electrical current (surge), using a network of wireless transmission. The system is portable and capable to perform data communication via radio standard ZigBee, allowing transfer of data voltage signals acquired at different points of ground. The data acquisition system uses a model dsPIC 30F3011 microcontroller being formed by a central unit (UAC) and remote units (UAN). UAC controls the system and acquires data of current and voltage signals, applied by means of a current impulse generator, while the UAN must acquire data from voltage signal propagated on the ground. The operation beginning of acquisition system occurs in a controlled manner. Each unit monitors the voltage signals at the sensor and thus identifies the beginning of the impulse. For this purpose, data are recorded 64 μs before and 448 μs after the impulse has been detected. After the transmission from the UAC to the microcomputer, the data is analyzed and displayed in the form of transient impedance signal and potential distribution propagated in the soil. The system has been validated by testing using a simulated signal of 8/20 μs and by test with an impulse generator with its capacitor charging voltage of 10 kV. The system can be used to identify differences between the project specification of grounding system and its implementation, evaluate the degradation of the grounding and provide a diagnosis of the mesh, besides being useful in projects for monitoring systems that allow the insertion of ground mesh systems in intelligent networks.

Keywords: data acquisition, diagnosis of ground grids, electrical current impulses, ground grids, potential distribution in the soil, transient impedance.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O aterramento de sistemas elétricos é fundamental para garantir a segurança de pessoas e instalações elétricas. Sua função básica é oferecer um caminho de baixa resistência para escoamento de correntes provenientes de surtos atmosféricos e de chaveamentos dos sistemas elétricos, desbalanceamento na frequência industrial e curto-circuitos. Além disso, o aterramento deve estabelecer uma tensão de referência para todo o sistema elétrico em que se encontra inserido.

A busca crescente por qualidade e eficiência dos sistemas elétricos exige o funcionamento adequado do sistema de aterramento, tanto em regime permanente como em regime transitório. Em regime permanente, o sistema de aterramento atua, sobretudo, para atenuar o surgimento de tensões no neutro pelo desbalanceamento de corrente nas fases. Por sua vez, nos casos de surtos de corrente e curto-circuitos, o aterramento deve promover o escoamento da corrente para a terra. Pelo exposto, fica evidente que para o funcionamento adequado do sistema de aterramento, faz-se necessário o monitoramento e o diagnóstico das condições de operação do aterramento tanto na frequência industrial, quando submetido a impulsos de corrente.

Trabalhos abordando o monitoramento e diagnóstico de aterramentos na frequência industrial vem sendo realizados por pesquisadores da UFCG, UFG, UFMG entre outros. Citando alguns destes, Lima *et al.*, (2012), Alves *et al.*, (2012) e Dias *et al.*, (2011). avaliaram parâmetros e novos arranjos do sistema de aterramento, por sua vez, Macedo *et al.*, (2011). desenvolveram um dispositivo para diagnóstico da malha de aterramento energizada e Rodrigues, A. (2012) investigou o uso de novos materiais aplicados no revestimento das hastes

Devido à complexidade do trabalho com sinais de alta intensidade e frequências elevadas, a maioria das pesquisas sobre sistemas de aterramento, aborda sinais em baixa frequência. O monitoramento de sistemas de aterramento quando submetidos a surtos de corrente e curto-circuitos não é usual, muito embora, as consequências destes eventos provoquem danos expressivos. Contudo, os sistemas de aterramento não devem ser estudados exclusivamente em frequência industrial, pois falhas decorrentes de descargas atmosféricas são responsáveis por cerca de um terço das causas de interrupção no

fornecimento de energia elétrica no mundo (Kowalenko, 2010). A injeção de impulsos de corrente no solo provoca diversos fenômenos elétricos e magnéticos, que são simultâneos, em altas frequências e com altas amplitudes, o que confere complexidade à aquisição de dados, necessários para o monitoramento do aterramento. Assim, 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). As dificuldades apresentadas, também se refletem na falta de consenso sobre que grandezas são representativas para caracterizar o desempenho do aterramento sob impulso (Visacro 2007, Grcev 2009) .

Trabalhos que utilizam simulação para avaliar o comportamento dinâmico de aterramentos tiveram grandes avanços a partir de computadores cada vez mais rápidos, com capacidade de realizar operações que demandam grandes esforços computacionais (Fraga, 2008). Os trabalhos com simulação são úteis para estimar resultados ou quando não se dispõe de espaço físico e de equipamentos apropriados para realização de ensaios experimentais. No entanto, necessitam de resultados experimentais para serem validados.

Os trabalhos experimentais tradicionalmente usam o osciloscópio para aquisição de dados. Foi identificado na bibliografia uma proposta de desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para medir a impedância impulsiva de aterramento em pé de torre. O dispositivo deve operar em baixa tensão e baixa corrente (Rodrigues, B, 2012). A aquisição de dados, tanto com osciloscópio, como com o dispositivo citado, tem flexibilidade limitada pela necessidade de fios e cabos que levem o sinal do ponto de medição ao restante do sistema de aquisição de dados

Desenvolver um sistema de aquisição que permita analisar o comportamento da corrente injetada em malhas de aterramento, com injeção de altas correntes impulsivas, da ordem de quiloampères, possibilitaria identificar diferenças entre a especificação do projeto e a execução do sistema de aterramento, avaliar o estado de degradação do aterramento, além de emitir um diagnóstico de malha de aterramento.

Desta forma, neste trabalho é apresentado um sistema portátil para aquisição de dados de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica, utilizando uma rede de transmissão sem fio baseado no Padrão ZigBee. Os dados poderão ser utilizados para monitoramento ou diagnóstico do sistema de aterramento

1.2Objetivos

O objetivo geral é o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados para diagnóstico de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica.

O sistema de aquisição de dados deve ser portátil, capaz de adquirir dados de tensão e corrente resultantes da injeção de um impulso de corrente elétrica no solo de um sistema de aterramento, bem como, os sinais de tensão propagados no solo. Uma rede de transmissão sem fio, baseada no Padrão ZigBee, deve estabelecer o sincronismo da transmissão de dados. Neste trabalho serão abordados os casos de sistemas de aterramento expostos a surtos de corrente provenientes de descargas atmosféricas.

Com o sistema de aquisição de dados será possível:

- Estudar a dissipação da corrente impulsiva no solo;
- Avaliar a velocidade de propagação de sinais impulsivos no solo;
- Avaliar a aplicação de técnicas de aquisição de sinais impulsivos de corrente e tensão no solo;
- Aplicar técnicas de transmissão de sinais impulsivos de corrente e de tensão.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 5 capítulos, que serão apresentados a seguir.

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos básicos concernentes a aterramento, inclusive a propagação de sinais impulsivos no solo. No mesmo capítulo ainda são descritos, de forma breve, os blocos que compõem um sistema de aquisição de dados e o padrão de comunicação sem Fio ZigBee. Por fim é apresentada uma revisão bibliográfica acerca de aterramentos submetidos a impulsos de corrente elétrica.

Material e Métodos são descritos no Capítulo 3, onde são abordados os módulos que formam o sistema de aquisição de dados desenvolvido. Além disso, são apresentados materiais e métodos utilizados nos ensaios para definição de parâmetros do sistema de aquisição de dados, e também, daqueles realizados para validação do sistema.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos com as devidas discussões.

Por fim, as conclusões e propostas de trabalhos futuros são explanadas no Capítulo 5.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados os conceitos de um sistema de aterramento, bem como os blocos básicos de um sistema de aquisição de dados e a transmissão de dados sem fio na tecnologia ZigBee. Também é apresentada a revisão bibliográfica acerca de aterramentos submetidos a impulsos de corrente elétrica.

2.1. Aterramento

A função do aterramento é basicamente prover uma ligação física, proposital, de um sistema elétrico à terra (Visacro, 2005), sendo um dos principais elementos para garantir a segurança de pessoas e equipamentos. As principais características desejadas são (Kindermann e Campagnolo, 1995):

- Baixa resistência de aterramento;
- 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 de equipamentos.

As três componentes básicas de um sistema de aterramento são: conexões elétricas, eletrodos de aterramento e solo (Visacro, 2005), que podem estar dispostas em diferentes configurações ou arranjos para facilitar o escoamento da corrente elétrica. O arranjo mais simples é realizado com um único eletrodo cravado no solo. O mais complexo, a malha de aterramento, é composta por eletrodos, fios e/ou cabos conectados e enterrados no solo.

O tipo de solo tem grande influência sobre o sistema de aterramento, a sua resposta ao impulso de corrente depende das suas características elétricas, conforme descrito na próxima seção.

2.1.1 Características Elétricas do Solo

A resistividade e a permissividade elétricas são as propriedades do solo com maior influência sobre o desempenho de um sistema de aterramento. A resistividade ρ , expressa em $\Omega \cdot m$ (Ohm vezes metro), depende, entre outros fatores, da natureza do solo e das condições

climáticas. A permissividade ϵ , expressa em F/m (Faraday por metro), corresponde à característica de polarização de um material em resposta a um campo elétrico aplicado.

Em Visacro, (2005) e Visacro, (2007) encontra-se uma análise do efeito da corrente elétrica no solo, na qual se considerou que a corrente elétrica é introduzida no solo através de um eletrodo em forma de haste. A corrente elétrica injetada no eletrodo tem duas componentes conforme descrito na Figura 2.1: uma transversal e outra longitudinal. 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.

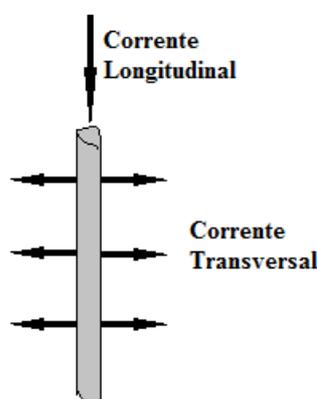


Fig. 2.1 - Correntes elétricas transversais e longitudinais num segmento do eletrodo.

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 (Visacro, 2005; Visacro, 2007). Portanto, a relação não depende da geometria dos eletrodos, mas das características elétricas do solo e da frequência do sinal injetado.

Quando um impulso de corrente elétrica é injetado no solo, pode ocorrer a ionização do ar contido no solo, na região próxima ao eletrodo de injeção, alterando a impedância do aterramento.

2.1.2 Ionização

O campo elétrico criado pelo impulso de corrente tem a propriedade de facilitar a ionização do ar contido no solo, na vizinhança do eletrodo de injeção. Este efeito se comporta como se houvesse um aumento efetivo do raio do eletrodo, o que provoca uma diminuição no valor da resistência do aterramento (Kindermann e Campagnolo, 1995). Na

Figura 2.2 é ilustrada uma representação do solo ao redor de um eletrodo submetido a impulsos.

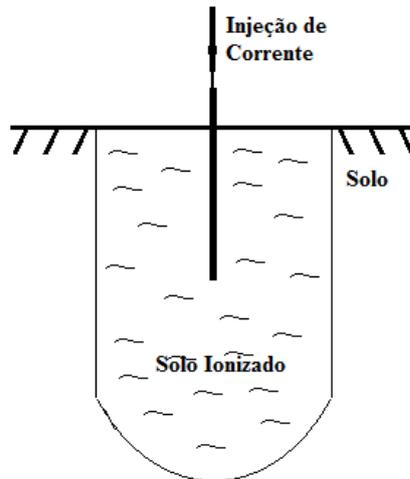


Fig. 2.2 - Zona de ionização no solo (Adaptado de Kindermann e Campagnolo (1995)).

2.1.3 Propagação de Sinais Impulsivos no Solo

O sinal impulsivo representativo de descargas atmosféricas é modelado por meio de uma sinal que é rotulado por 8/20 μ s, mostrado na Figura 2.3. O tempo de frente, T_f , é determinado pelo comprimento do segmento de reta que passa pelos pontos de ordenadas 30% e 90% do valor de pico, com início em zero e final ao atingir o valor de pico. T_c é o tempo de cauda e se refere ao tempo em que o impulso partindo de amplitude zero, tem um decaimento de 50% do valor de pico. Para o sinal 8/20 μ s, T_f é 8 μ s e T_c é 20 μ s.

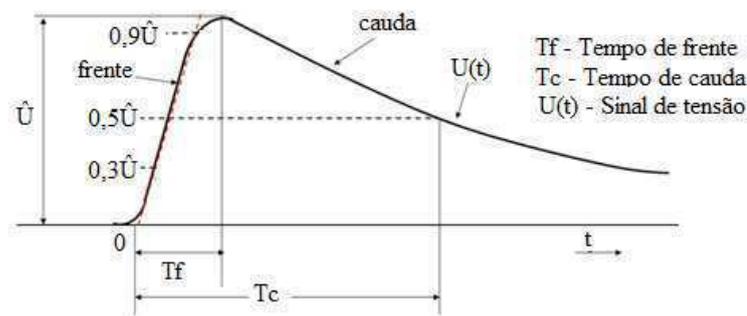


Fig. 2.3 - Forma de onda representativa de um descarga atmosférica, adaptado de notas de aulas da disciplina Técnicas de Alta Tensão (Costa, 2011).

A aplicação de um impulso de corrente elétrica em um eletrodo fincado no solo provoca a propagação de um sinal, que devido a perdas, sofre atenuação na direção da propagação. De acordo com Grcev (2009), a resistividade do solo tem grande influência na velocidade de propagação de sinais impulsivos. Ele obteve uma velocidade de propagação de

um impulso no solo de $0,33c$ (c é a velocidade da luz no vácuo que tem valor aproximado de 300×10^6 m/s) para um solo de resistividade $\rho = 1000 \Omega.m$. Tanto a dependência da velocidade de propagação da resistividade do solo, como a atenuação do sinal propagado são comprovados em diversos trabalhos experimentais, dentre os quais Grcev (2009), Araújo *et al.* (2010) e Visacro (2007).

Visacro (2007), realizou estudo da propagação de um impulso de corrente ao longo de um eletrodo horizontal e concluiu que o sinal propagado, além dos efeitos previamente citados, apresenta uma redução do tempo de frente. São apresentadas na Figura 2.4 as ondas propagadas, em que se destaca a atenuação e a distorção.

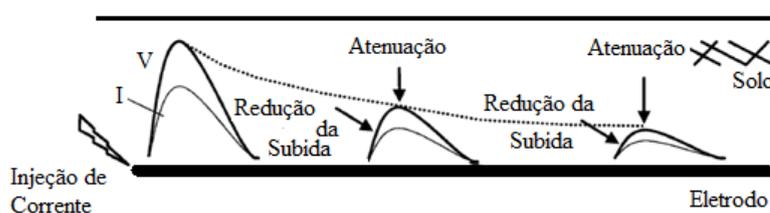


Fig. 2.4 - Atenuação e distorção da tensão e da corrente ao longo do eletrodo. (Adaptado de Visacro (2007))

2.1.4 Grandezas Representativas para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Submetidos a Impulsos de Corrente Elétrica

Não existe consenso entre diversos autores quanto aos parâmetros que caracterizam o comportamento dinâmico de eletrodos de aterramento (Grcev, 2009). 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 a razão V/I , em que V é a tensão aplicada ao aterramento e I é a corrente injetada (Grcev 2009).

Um dos principais objetivos dos parâmetros que caracterizam o comportamento dinâmico de sistemas de aterramento é determinar o quanto este comportamento se desviou daquele apresentado em baixas frequências. As grandezas representativas da resposta do aterramento ao impulso de corrente são as seguintes: impedância transitória, impedância impulsiva, coeficiente impulsivo, comprimento efetivo do eletrodo, tempo de duração do transitório e impedância harmônica (Grcev 2009). A definição de cada uma destas grandezas é apresentada 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:

$$z(t) = \frac{v(t)}{i(t)}. \quad (1)$$

- 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):

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p}. \quad (2)$$

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

$$A = \frac{Z_p}{R_{LF}}. \quad (3)$$

- Comprimento efetivo do eletrodo, l_{ef} , é o máximo comprimento do eletrodo de aterramento para o qual o seu aumento não implica em redução da impedância impulsiva;
- 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 ($I(j\omega)$):

$$Z(j\omega) = \frac{V(j\omega)}{I(j\omega)}. \quad (4)$$

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

Meliopoulus e Moharam (1983) alertam para o fato de 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.

2.2.. Sistema de Aquisição de Dados

De uma forma geral, os sistemas de aquisição de dados têm o objetivo de adquirir

dados sobre um fenômeno elétrico ou físico, tais como: tensão, corrente elétrica e temperatura. Ele deve ser projetado para atender as especificações exigidas por uma determinada aplicação e é composto por sensores ou transdutores, condicionadores de sinais, conversores A/D e programas computacionais (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).

Na Figura 2.5 é apresentado um diagrama de blocos genérico de um sistema de aquisição de dados de n-canais.

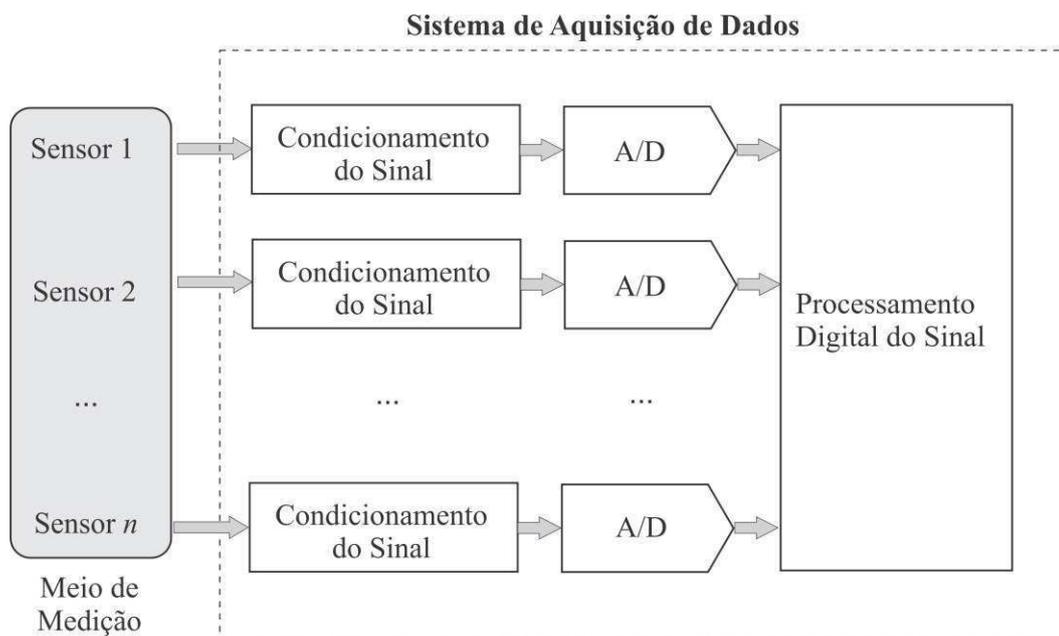


Fig. 2.5 - Diagrama de blocos de um sistema de aquisição de dados.

Um 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. Sinal de tensão ou corrente em alta intensidade requer maior rigor nas condições de segurança em que o sistema deve operar (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012), o que introduz complexidade ao desenvolvimento deste trabalho.

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 processo de amostragem satisfaça às condições de Nyquist, é necessário se conhecer a largura de banda do sinal. Considerando um sinal com frequência

máxima f_{\max} e uma banda $[0; f_{\max}]$, tem-se que a frequência de amostragem é dada por:

$$f_{\text{amostragem}} \geq 2f_{\max} \quad (5)$$

O Teorema de Nyquist garante que o sinal amostrado conterá toda informação do sinal original, desde que (5) seja obedecida.

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

2.2.1 Especificação de um sistema de aquisição de dados

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 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 principais do sinal medido. O número de bits que o conversor A/D utiliza para representar o sinal analógico define a resolução das amostras. Quanto maior a resolução, maior o número de divisões em que a faixa do sinal será representada, portanto, quanto maior a resolução mais sensível é o conversor.

Tradicionalmente, os trabalhos experimentais para investigar a resposta do aterramento ao impulsos de corrente elétrica, utilizam o osciloscópio para a aquisição dos dados. Quando for desejável a sincronização da aquisição de dados, esta pode ser estabelecida por um sistema de transmissão.

Como, tipicamente a velocidade de propagação da onda no solo usado neste trabalho é de 114.000 km/s (Castro, 2012), então a diferença de tempo de início do sinal de impulso e dos sinais nas hastes é da ordem de 64,9 ns (para uma distância de 7,4 m), que é desprezível em relação ao comportamento temporal do impulso. Portanto, neste trabalho, não será feita uma sincronização da aquisição dos dados nas hastes.

Neste trabalho, o sincronismo da comunicação entre os sistemas de aquisição de dados

foi estabelecido por meio de uma rede de transmissão baseado no Padrão ZigBee.

2.3. Rede de transmissão baseada no Padrão ZigBee

O sistema comunicação desenvolvido para este trabalho, é formado por uma rede de transmissão de dados utilizando o padrão ZigBee, implementando uma topologia de rede sem fio.

O padrão de comunicação ZigBee, também conhecido como IEEE 802.15.4 foi desenvolvido pela ZigBee Alliance em conjunto com o IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers* – Instituto de Engenherios Elétricos e Eletrônicos). 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 (ROGERCOM, 2012).

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 que vai de 20 kbps a 250 kbps e o seu baixo consumo de energia o torna apropriado para aplicações portáteis (Macedo, 2010). No Brasil não há necessidade de licença de órgãos governamentais para operar na faixa de 2,4 GHz, o que constitui mais uma vantagem da utilização do Padrão ZigBee.

Numa rede ZigBee existem dois tipos de dispositivos: FFD (*Full Functions Device*) ou dispositivos de funções completas e RFD (*Reduced Functions Device*) ou dispositivos de funções reduzidas. Os dispositivos podem desempenhar as funções: coordenador, roteador e dispositivo final (Vasques *et al.* 2012).

O coordenador só pode ser implementado por um dispositivo FFD e é responsável pela inicialização, distribuição de endereços, manutenção da rede, reconhecimento dos nós, entre outras funções. Pode ser utilizado como interligação entre redes ZigBee. O roteador só pode ser implementado por um dispositivo FFD, 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 através de um dos dispositivos FFD ou RFD (ROGERCOM, 2012).

Quanto à topologia, as redes ZigBee podem ser: em estrela, em árvore e em malha. Na Figura 2.6 são apresentadas as três topologias.

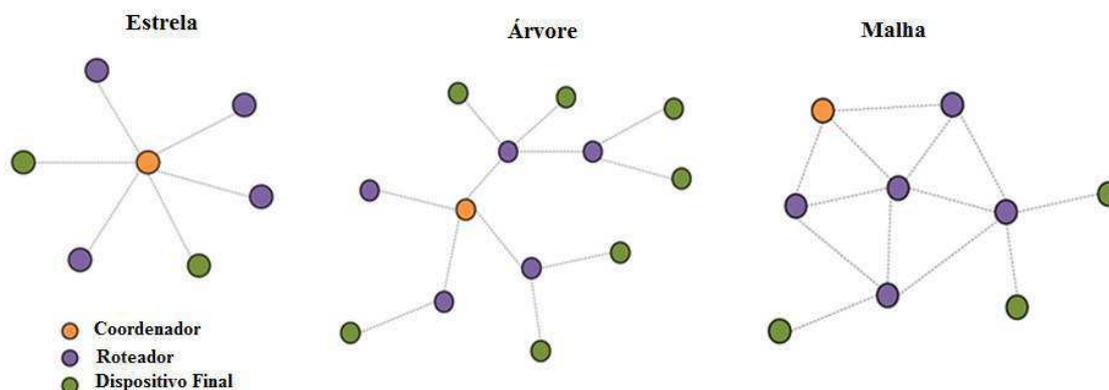


Fig. 2.6 - Topologias das redes ZigBee (Adaptado de Vasques *et al.* 2012).

A rede em estrela é formada por um coordenador central conectado a dispositivos finais ou roteadores. A rede em árvore é formada por topologias em estrela interligadas por roteadores, sob o comando de um coordenador. Na rede em malha todos os dispositivos podem se comunicar entre si e tem apenas um coordenador (Vasques *et al.* 2012).

O ZigBee tem indicação para diversas aplicações, entre as quais, redes de aquisição de dados, automação de controles residenciais, manutenção em rede elétrica (por exemplo, medidores de energia), aplicação na área de saúde (como monitoração de pacientes). Neste trabalho foi implementada a topologia em estrela.

2.4. Revisão Bibliográfica

Bellaschi é citado como um dos pioneiros na pesquisa da influência de impulsos elétricos no solo, ele se engajou na compreensão e solução dos grandes problemas que desafiaram a indústria de energia elétrica, desde 1922, quando se graduou em Massachusetts (IEEE, 1987). Em Bellaschi (1935) é apresentada uma avaliação dos efeitos das correntes de descargas atmosféricas, considerando os resultados de medição do fenômeno ocorrido na natureza comparando com aqueles produzidos em laboratório, utilizando um gerador de impulsos de corrente.

Além de Bellaschi, na primeira metade do século passado, outros trabalhos tiveram contribuições significativas para a pesquisa acerca do comportamento do aterramento, dentre os quais podem ser citados: Dwight e Holliday (1936), que apresentaram expressões para o cálculo da resistência de terra em baixas frequências, considerando diferentes arranjos de eletrodos de aterramento. Apesar de o trabalho ter foco na frequência industrial, ele motivou

diversas pesquisas na tentativa de se conseguir uma adaptação para o caso do comportamento impulsivo. Sunde (1940) publicou um estudo acerca das características impulsivas em condutores enterrados, fazendo uma aproximação pela teoria de ondas viajantes.

Para uma melhor compreensão, os trabalhos estudados serão agrupados com relação ao objeto do estudo.

2.4.1 Características Elétricas e Ionização do Solo

As características elétricas do solo têm grande influência sobre a resposta de aterramentos ao impulso de corrente. Entretanto, devido à 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 Alípio, 2012).

Ahmeda *et al.* (2011) investigaram o crescimento de 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.

Pedrosa *et al.* (2011) realizaram estudos para investigar a dependência dos parâmetros elétricos do solo em relação à frequência na resposta transitória de eletrodos de aterramento submetidos a descargas atmosféricas. No entanto, não obtiveram resultados conclusivos, mas concordam com Visacro (2007) acerca de que se superestimar o efeito da ionização, compensa, em parte, a não consideração da dependência da frequência.

A influência da ionização sobre o comportamento dinâmico de aterramentos tem sido tema de diversos trabalhos, dentre os quais: Kosztaluk *et al.* (1981) que realizaram um trabalho experimental propondo um modelo para avaliar as características impulsivas de um sistema de aterramento considerando a não linearidade do solo, em que a ionização do solo foi incluída.

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. As medições foram realizadas com osciloscópio. Ao final, a pesquisa não é conclusiva, apenas recomenda que casos em que a ionização do solo seja um fator crítico, deve ser feito um estudo rigoroso.

2.4.2 Eletrodos

Na busca por um melhor desempenho do aterramento submetido a impulsos, foram estudados a geometria de distribuição e formato dos eletrodos, bem como o revestimento de hastes.

Dick *et al.* (1978) pesquisaram hastes revestidas com concreto. Rodrigues, A. (2012) pesquisou novos materiais aplicados a hastes de aterramento. Estudou a resposta do aterramento a impulsos de corrente utilizando hastes convencionais, revestidas com concreto e envolvidas com concreto dopado com bentonita. Ela observou que houve uma redução nos valores da impedância impulsiva de aterramento para hastes concretadas com e sem bentonita, com o aumento da tensão de carregamento, que corresponde à tensão com a qual o banco de capacitores, que forma o gerador de impulsos, foi carregado. Por sua vez, Tao *et al.* (2008) estudaram a influência de diferentes arranjos de eletrodos de aterramento na propagação do impulso de corrente no solo.

2.4.3 Parâmetros de Avaliação

Na investigação sobre parâmetros representativos para expressar a 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 forma de onda do impulso de corrente. Grcev (2009) publicou trabalhos baseados em simulações em que são propostas novas expressões empíricas aplicáveis a sinais de corrente em baixa e altas frequências. 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) considerou os efeitos indutivos que afetam o desempenho de aterramentos. Utilizando modelos eletromagnéticos, ele obteve como resultado que o coeficiente impulsivo tem uma relação próxima da linear com o comprimento dos lados da malha de aterramento. Sendo assim, apresentou novas expressões para impedância impulsiva, coeficiente impulsivo e área efetiva de aterramento.

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) 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 de propagação.

Parâmetros importantes para diagnóstico de sistemas de aterramento, como: resistência a baixa frequência, impedância impulsiva, impedância transitória, comprimento efetivo do eletrodo e coeficiente impulsivo, são constantemente questionados.

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.

Visacro *et al.* (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.

2.4.4 Modelos e Simulação

Liew e Darveniza (1974) desenvolveram um modelo analítico capaz de descrever o comportamento da não linearidade do solo quando submetido a impulsos de corrente.

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

Gazzana *et al.* (2011) realizaram uma revisão abordando as principais metodologias utilizadas para análise impulsivas em altas frequências do aterramento. Foram avaliados os modelos: circuitos elétricos, linhas de transmissão, campos eletromagnéticos e modelagem híbrida. Os modelos foram avaliados considerando métodos analíticos e numéricos e eles concluíram que existem vantagens e desvantagens para cada método. Eles concluíram também que os métodos dos circuitos e das linhas de transmissão são menos exatos, no entanto, eles podem oferecer uma boa confiabilidade. O modelo híbrido associa as vantagens dos modelos eletromagnéticos e do circuito, mas sua construção apresenta maior grau de complexidade.

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 Linhas de Transmissão) tridimensional.

2.4.5 Métodos de Medição e Sistemas de Aquisição

Thomas (1970) fez uma revisão acerca dos métodos tradicionais de medição de impulsos de corrente e de tensão abordando inclusive o uso de laser.

Llovera *et al.* (2008) propuseram um novo arranjo dos eletrodos auxiliares utilizados para a medição da impedância transitória. Eles demonstraram a partir de resultados experimentais que o novo arranjo possibilitava a diminuição do efeito indutivo do circuito de medição.

Khelil *et al.* (2011) 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.

Cong-li e Minfang (2007) desenvolveram um sistema de aquisição de dados para monitorar o estado do aterramento a partir da corrosão dos eletrodos.

Macêdo *et al.* (2012) desenvolveram um dispositivo que é capaz de gerar um diagnóstico do aterramento de subestações energizadas a partir da medição do potencial de solo. O sistema foi concebido para avaliar o desempenho do aterramento em frequência industrial.

Rodrigues, B. (2012) apresentou, em junho de 2012, exame de qualificação ao doutorado, no qual propõe o desenvolvimento de um medidor de impedância impulsiva de aterramento em linhas de transmissão. O equipamento deve ser portátil e disponibilizar dados que viabilizem o diagnóstico do comportamento do aterramento de pé de torre frente a descargas atmosféricas. Além dos módulos básicos de um sistema de aquisição de dados, foi proposto um módulo de geração de sinais.

Hildenbrand (1991) apresentou um estudo a respeito de uma metodologia de manutenção em sistemas de aterramento utilizando um dispositivo para medição da resistência de aterramento, o GMS (*Ground Monitor Service* – Monitor de Serviço de Aterramento).

Os trabalhos experimentais para avaliação do desempenho de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente, em geral, usam o osciloscópio como meio de aquisição

dos sinais.

Rodrigues, B. apresentou recentemente uma proposta de pesquisa com o objetivo de desenvolver um dispositivo para medir impedância impulsiva de aterramento em pé de torre em linhas de transmissão, a partir de medições realizadas com baixa tensão e com baixa corrente. Contudo, o estudo não considera os efeitos de sinais impulsivos de alta intensidade nas características elétricas do solo. O grupo de pesquisa da UFMG, do qual Rodrigues, B. faz parte, obteve resultados preliminares considerando a hipótese de que as consequências da aplicação de impulsos de corrente ao solo, em relação às suas características elétricas, são desprezíveis frente à influência da frequência do sinal aplicado.

Este trabalho considera, que os efeitos da aplicação de impulsos de corrente de alta intensidade no solo sobre suas características elétricas são significativos, em consonância com a maioria dos grupos de pesquisa que trabalham na área. Além disso utiliza sinais de alta intensidade e transmissão de dados via rádio.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais e procedimentos metodológicos utilizados para o desenvolvimento e validação do sistema de aquisição de dados são apresentados neste capítulo. O sistema de aquisição tem a finalidade de adquirir dados para diagnóstico de malhas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica. Este sistema é portátil, capaz de adquirir dados de tensão e corrente usando transmissão sem fio, baseada no Padrão ZigBee.

3.1. Material

O solo utilizado nos ensaios está nas proximidades do LAT-UFCG, em Campina Grande, localizada no Agreste da Borborema, tem o clima quente e úmido com chuvas de inverno, caracteriza-se por apresentar chuvas de outono-inverno e um período de estiagem de 5 a 6 meses. O período seco começa em novembro e prolonga-se até fevereiro, sendo o mês de novembro o mais seco. Por sua vez, a estação chuvosa inicia em março-abril e termina em agosto. As temperaturas médias anuais são elevadas e variam de 22 °C a 26 °C, a umidade relativa é bastante uniforme com média em torno de 80% (Henrique, 2006).

O solo a ser utilizado nos sistemas de aterramento apresentou estratificação com três camadas. A primeira camada com resistividade ρ_1 de 43,19 $\Omega.m$ e altura h_1 de 0,75 m, a segunda camada com resistividade ρ_2 de 6,24 $\Omega.m$ e altura h_2 de 0,55 m, e a terceira camada com resistividade ρ_3 de 76,10 $\Omega.m$ e altura h_3 infinita. O solo possui estrutura geológica dura e rochosa. Em períodos de pouca chuva, com o solo muito seco, torna-se difícil o cravamento de hastes. As medições de resistividade do solo foram realizadas de acordo com o Método de Wenner, em concordância com a norma ABNT NBR 7117. Para obter a estratificação do solo, foi utilizado o software TecAt Plus 5.

Nos experimentos foram usadas três hastes de aço, revestidas por cobre. Uma, medindo 1,20 m de comprimento e 13 ± 2 mm de diâmetro, foi enterrada a uma profundidade de 1,0 m no solo e utilizada como haste de teste. As outras duas, utilizadas como hastes auxiliares, medem 0,49 m e tem diâmetro de 13 ± 2 mm e tiveram 0,40 m enterrados no solo. A haste de teste é aquela na qual o impulso de corrente é aplicado. As hastes auxiliares foram usadas para a obtenção dos sinais de tensão que se propagam no solo.

Para a implementação das unidades de aquisição foi utilizado o microcontrolador dsPIC 30F3011 (Microchip Technology Inc., 2008) com memória programável tipo Flash, memória RAM de 1024 octetos, memória EEPROM de 1024 octetos e conversor A/D de 10

bits, 9 canais e velocidade de conversão de até 10^6 amostras por segundo (usado neste trabalho $0,5 \times 10^6$ amostras por segundo).

A transmissão de dados foi implementada utilizando o sistema de comunicação sem fio ZigBee, que no Brasil opera na faixa de 2,4 GHz e 16 canais. O modelo usado foi o XBee-PRO™, com alcance de 100 m a 1,6 km e taxa de transmissão de dados de 115.200 bps.

3.2. Métodos

O desenvolvimento, implementação e testes de bancada dos circuitos que compõem o sistema de aquisição de dados foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas – LIMC da UFCG. Os ensaios para validação do sistema utilizando o gerador de impulsos de corrente elétrica foram executados no Laboratório de alta tensão – LAT da UFCG.

Na Figura 3.1 é apresentada a distribuição das unidades do sistema de aquisição de dados na malha de aterramento.

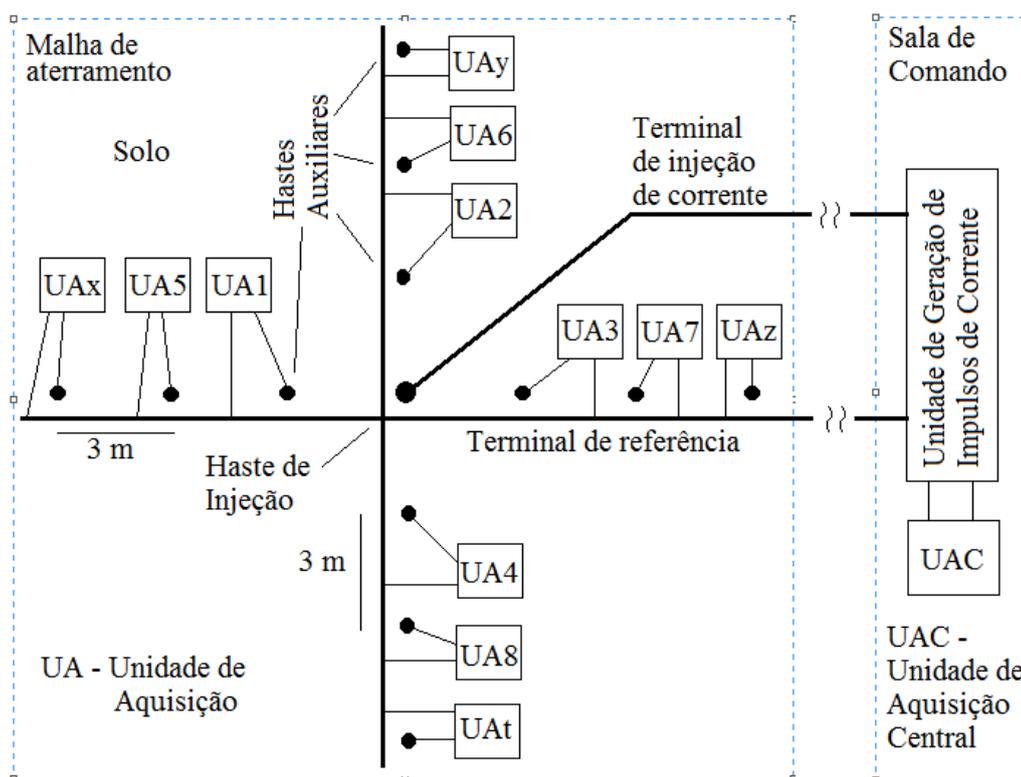


Fig. 3.1 - Distribuição das unidades do sistema de aquisição de dados na malha de aterramento.

Doze unidades remotas de aquisição de dados (UAN) são dispostas na malha de aterramento, elas tem o objetivo de adquirir dados da tensão propagada no solo, em consequência do impulso de corrente aplicado. As UAN estão dispostas radialmente em relação à haste de injeção de corrente e procura cobrir além de toda a área do aterramento,

uma faixa de solo externa. A unidade de aquisição central (UAC) tem a finalidade de adquirir dados de tensão e corrente aplicados no solo, bem como controlar a transmissão de dados adquiridos entre as UAn e a UAC.

Os impulsos de corrente são gerados na sala de comando e uma unidade de aquisição central (UAC) comanda a geração e aplicação dos impulsos, além de fazer a aquisição dos dados de tensão e corrente aplicadas na haste de injeção. Além disso, essa UAC envia um comando por rádiosfreqüências usando módulos ZibBee para que as unidades de aquisição remotas (UAN), localizadas na malha de aterramento (Figuras 3.1 e 3.2), iniciem a aquisição dos dados em cada haste auxiliar. Um cabo (terminal de injeção de corrente) conduz a corrente desde a unidade de geração de impulsos até a haste de injeção, na malha de aterramento. Outro cabo (terminal de referência) vem da unidade de geração de impulsos até a malha de aterramento, passando próximo a todas as hastes auxiliares para servir de referência de tensão e possibilitar a medição de tensão nas mesmas. Estas hastes são dispostas no terreno espaçadas de 3 m de distância entre elas (incluindo a haste de injeção). O número de hastes auxiliares pode ser aumentado segundo a necessidade, respeitando a distribuição da Figura 3.1.

Na Figura 3.2 é mostrado o diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados.

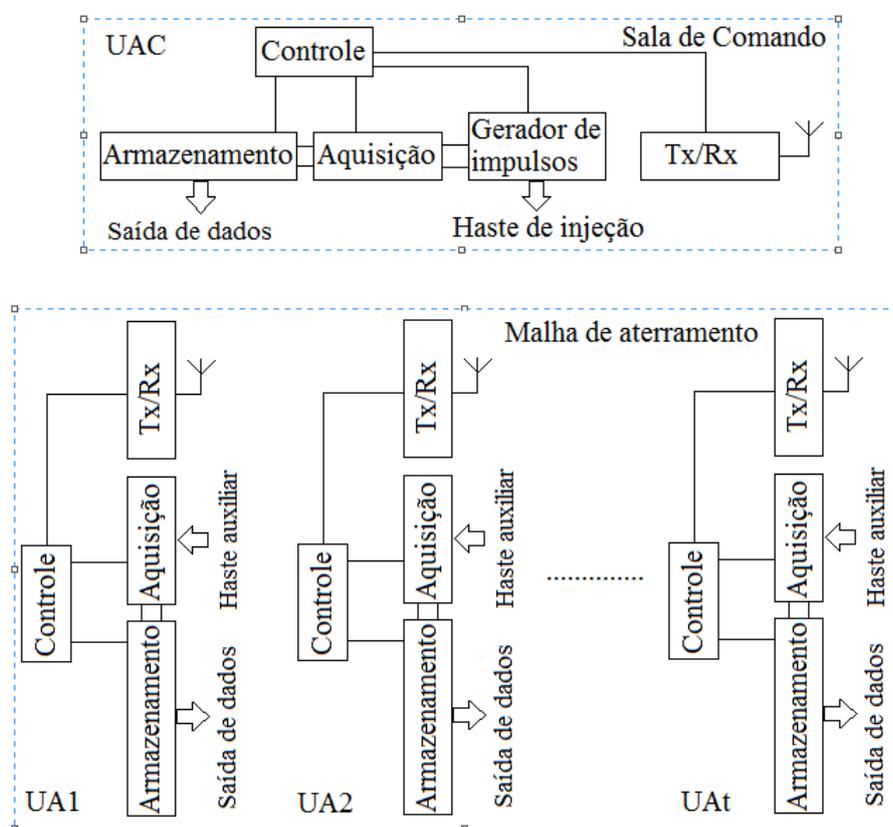


Fig. 3.2 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados proposto.

A unidade de aquisição central (UAC) é composta por módulos de gerador de impulsos, aquisição de dados, armazenamento de dados e transmissão/recepção (Tx/Rx) implementado com ZigBee. As unidades de aquisição remotas são compostas dos mesmos módulos, com exceção do gerador de impulsos. A UAC controla todo o processo e, em torno de cinco segundos antes de enviar os impulsos para a haste de injeção, a UAC envia um comando para todos os módulos de aquisição remotos (UAn), que se sincronizam entre si com a mesma referência de tempo. Cada UAn passa então a adquirir dados de tensão na haste auxiliar a qual está conectada. Quando o valor da tensão adquirida pela UAn ultrapassa 5% do valor de fundo de escala do conversor A/D, detecta-se então a existência do impulso de corrente e a UAn guarda no módulo de armazenamento (Figura 3.2) dados referentes a 50 μ s anteriores e 450 μ s posteriores a essa detecção (o valor típico da duração do impulso de corrente é 250 μ s). Daí em diante a UAn espera novo comando da UAC. Dados de tensão e corrente são adquiridos na UAC da mesma forma que nas UAn, ou seja, com uma detecção da ocorrência do impulso de corrente.

Com os seus valores adquiridos, a UAC passa a solicitar os dados adquiridos por cada UAn, enviando-lhes um comando e o endereço da UAn da qual quer receber os dados. A UAn correspondente envia então os dados e esse processo se repete até que todas as UAn tenham enviado os dados. Os dados são em seguida disponibilizados no módulo de armazenamento da UAC para serem transferidos (por exemplo) para um computador, que os processará.

3.3.Circuitos de Condicionamento

O sistema de aquisição de dados na UAC é conectado ao gerador de impulsos como representado na Figura 3.3.

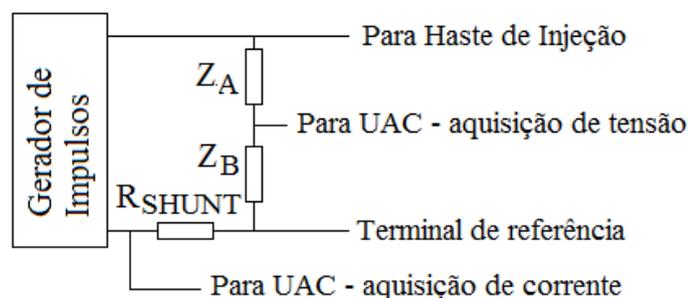


Fig. 3.3 - Gerador de impulsos de corrente e conexões para a haste de injeção e para módulo de aquisição.

O pico de tensão na saída do gerador de impulsos pode chegar a 6 kV, usa-se então o divisor formado pelas impedâncias Z_A e Z_B para se obter uma amostra dessa tensão a ser

adquirida pela UAC. A relação entre as impedâncias Z_A e Z_B está estabelecida na configuração do gerador de impulsos. O pico de corrente pode chegar a 2 kA, usa-se então um resistor shunt (R_{SHUNT}) de 5,488 m Ω para se gerar uma tensão proporcional à corrente a ser adquirida pela UAC.

Todas as UAC e UAn são baseadas em um microcontrolador dsPIC tipo 30F3011, que tem conversor A/D de 16 bits com taxa de amostragem de até 10^6 amostras por segundo (usado neste trabalho $0,5 \times 10^6$ amostras por segundo). Foi escolhido uma tensão de alimentação para esse dsPIC de 5 V. Os circuitos de condicionamento dos sinais de tensão e corrente (no caso da corrente é só para a UAC) têm a configuração representada na Figura 3.4, mudando apenas valores de componentes para se adequar aos valores dos sinais adquiridos.

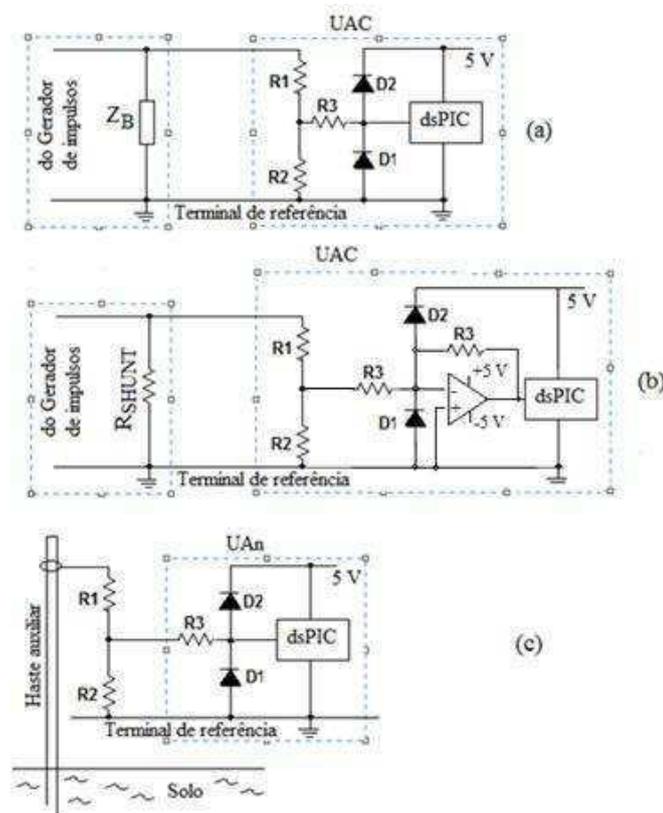


Fig. 3.4 - Circuitos de condicionamento para aquisição de tensão e corrente com o dsPIC. a) UAC – tensão. b) UAC – corrente. c) UAn – tensão.

Os sinais adquiridos nas hastes e no gerador de impulsos devem se adequar aos parâmetros de entrada do microprocessador, no caso, eles devem ter pico de no máximo 5 V, que é a máxima tensão admitida na entrada do conversor A/D do dsPIC. Neste caso, deve-se atenuar o sinal de entrada, o que é feito pelo divisor de tensão formado por R1 e R2 (Figura 3.4). Os diodos das UAC (1N4148) e UAn têm a finalidade de proteger o circuito do dsPIC.

O valor de $R3$, em todas as unidades é de $10\text{ k}\Omega$. Apresenta-se na Tabela 3.1 os valores dos resistores $R1$ e $R2$ para as UAC e UAn.

TABELA 3.1-Valores dos Resistores $R1$ e $R2$

Unidade	$R1$	$R2$
UAC – Tensão	$1\text{ M}\Omega$	$12\text{ k}\Omega$
UAC – Corrente	$150\text{ k}\Omega$	$100\text{ k}\Omega$
UAn – Tensão com $2\text{ kV} > V > 200\text{ V}$	$4,7\text{ M}\Omega$	$10\text{ k}\Omega$
UAn – Tensão com $200\text{ V} > V > 20\text{ V}$	$4,7\text{ M}\Omega$	$100\text{ k}\Omega$

Para se dimensionar os resistores é necessário saber a energia dissipada pelos mesmos. No pico máximo de tensão (2 kV), a potência dissipada por $R2$ e $R1$ é dada por:

$$P = \frac{2000^2}{R1+R2}. \quad (6)$$

Se $R1+R2 = 4,7\text{ M}\Omega$ então a potência de pico será de 851 mW . Como o pulso tem duração de $250\text{ }\mu\text{s}$, então resistores de $1/8\text{ W}$ podem ser usados sem risco de serem danificados, em virtude do impulso ser da ordem de μs , a energia consumida é muito pequena.

3.4.Sistema de Aquisição e Controle

O sistema de aquisição e controle é baseado em um microcontrolador dsPIC. O dsPIC combina as funções de um microcontrolador de 16 bits com um processador digital de sinais, obtendo-se assim uma solução adequada para aplicações em sensores de alta velocidade, processamento de sinais de áudio e de voz, entre outros (Braga, 2012).

Neste trabalho foi utilizado o dsPIC 30F3011 (Microchip Technology Inc., 2008) com memória programável tipo Flash, memória RAM de 1024 octetos, memória EEPROM de 1024 octetos e conversor A/D de 10 bits, 9 canais e velocidade de conversão de até 1 Msps (usado neste trabalho 500 ksps).

A aplicação do impulso de corrente é controlada. Em torno de 5 segundos antes da aplicação do impulso, a UAC é acionada para iniciar o processo de aquisição de dados e imediatamente envia um comando via ZigBee para que todas as unidades de aquisição remotas iniciem também a aquisição. A UAC fica monitorando o sinal adquirido, comparando-o com um valor de referência, pré-definido, para identificar o início de um impulso.

É mostrado na Figura 3.5 o fluxograma da operação e comunicação da UAC. O fluxograma da operação da UAn é ilustrado na Figura 3.6.

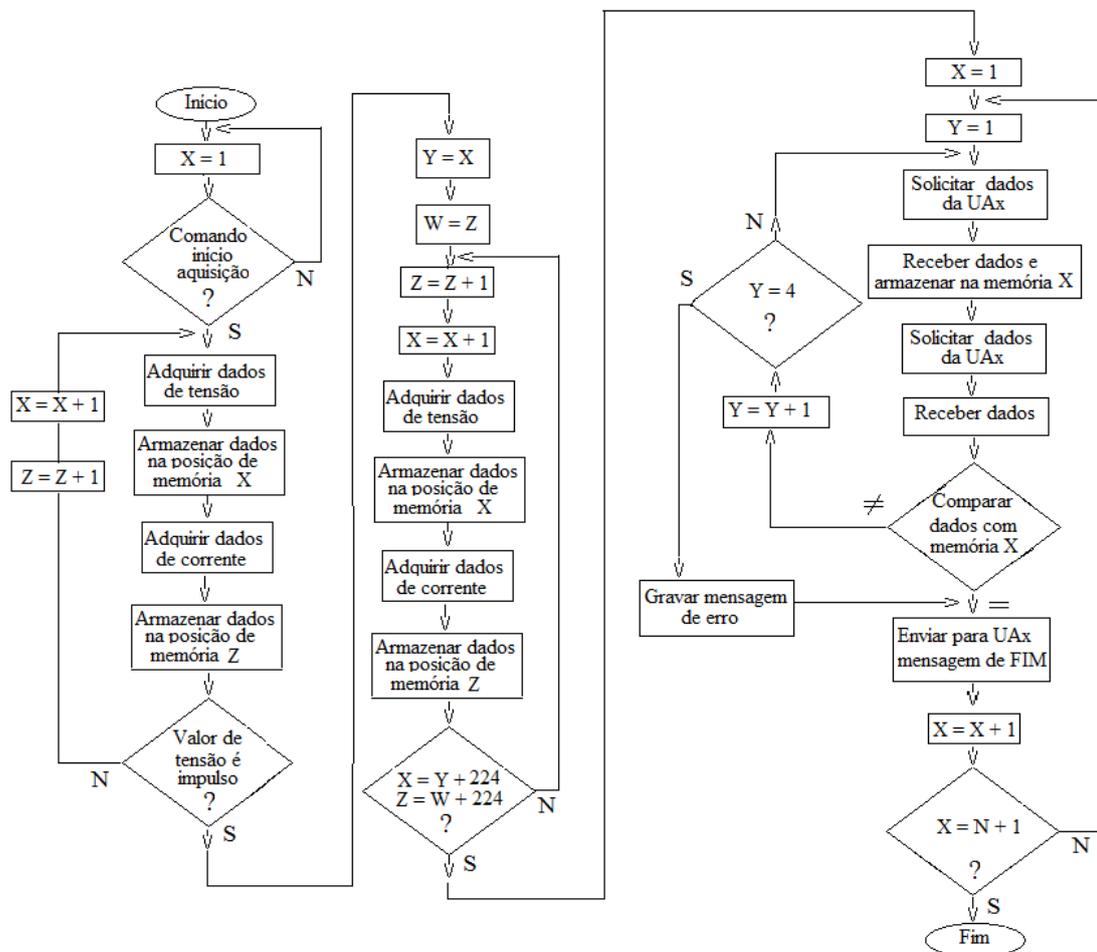


Fig. 3.5 – Fluxograma de operação e transmissão/recepção da UAC.

Na UAC, a unidade de aquisição de dados de corrente não faz a detecção do impulso, pois ela usa a detecção de impulso da unidade de aquisição de dados de tensão.

Uma vez os dados adquiridos e armazenados em cada unidade, inclusive na UAC, esta unidade passa a comandar o processo de transmissão/recepção dos dados. A UAC solicita de cada unidade remota que os dados adquiridos sejam enviados. Para evitar erros na transmissão, os dados são enviados duas vezes e, na UAC, é feita uma comparação entre eles. Caso sejam iguais eles são considerados válidos, caso sejam diferentes o processo é reiniciado por duas vezes. Se ao final da terceira tentativa os dados não tenham sido validados, então uma mensagem de erro é gerada. As unidades remotas vão sendo solicitadas a transmitir os dados adquiridos, uma a uma, até que todas as UAn tenham os dados transmitidos.

Cada unidade de aquisição identifica o impulso localmente. Quando o valor do dado adquirido é superior a 5% do fundo de escala do conversor A/D, a UAC interpreta como tendo detectado um impulso e armazena 32 amostras anteriores e 224 posteriores a essa detecção, correspondendo a 64 μ s anteriores e 448 μ s, respectivamente.

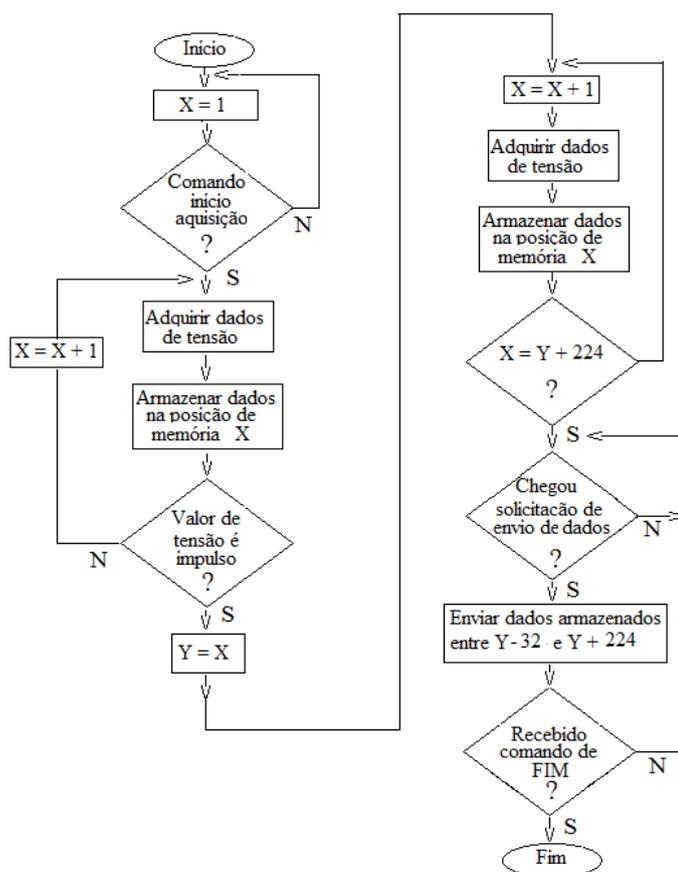


Fig. 3.6 – Fluxograma de aquisição e transmissão de dados em uma UAn.

Ao final deste processo, os dados estão disponíveis para tratamento. Neste trabalho, optou-se por transferir os dados via USB para um *notebook*, no qual rotinas computacionais possibilitam a visualização dos sinais adquiridos na forma de gráficos.

3.5. Transmissão de Dados via Rádio

A transmissão de dados foi implementada utilizando o sistema de comunicação sem fio ZigBee, que no Brasil opera na faixa de 2,4 GHz e 16 canais. O modelo usado foi o XBee-PRO™, com alcance de 100 m a 1,6 km e taxa de transmissão de dados de 115.200 bps. Pelas características do sistema, que é formado por um módulo central (UAC) e doze módulos remotos (UAn), a rede de transmissão de dados foi implementada com a topologia em estrela.

Sendo o conversor A/D de 16 bits, sabendo-se que são armazenadas 256 amostras, e que a velocidade de transmissão é 115.200 bps, então o tempo necessário para cada transferência de dados entre uma UAn e a UAC é de 35,56 ms.

Considerando-se o funcionamento do sistema com as 12 UAn, sabendo-se que dados de tensão e de corrente são adquiridos pela UAC, seriam necessários 497,84 ms para a transmissão de todos os dados, o que, é suficiente para a especificação deste projeto, uma vez que para o sistema proposto, não foi considerada a operação em tempo real, em que é exigida resposta num tempo mínimo, de forma a permitir controle e atuação imediatos.

3.6.Experimentos Realizados

Foram realizadas duas campanhas de ensaios com aplicação de impulsos de corrente elétrica no solo. A primeira teve o propósito de obter dados para a especificação do sistema de aquisição de dados. A segunda teve como finalidade, a validação do sistema desenvolvido. Foi usado, em ambas, um gerador de impulsos de corrente, que é descrito a seguir.

3.6.1 Gerador de Impulsos de Corrente Elétrica

Os ensaios foram realizados utilizando-se um gerador de impulsos de corrente elétrica 80 kJ/100 kV, de 8 estágios, fabricado pela Haefely, que pertence ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UFCG. Na Figura 3.7.a mostra-se uma fotografia desse gerador e na Figura 3.7.b uma fotografia de sua mesa de controle. Cada estágio desse gerador é formado por um capacitor e uma resistência variável de amortecimento. Dependendo da quantidade de estágios interligados, o gerador pode atingir uma tensão máxima de carregamento de 100 kV. O banco de capacitores deve ser carregado com a tensão desejada. No LAT, utiliza-se a rede elétrica fornecida pela concessionária local como fonte de energia.

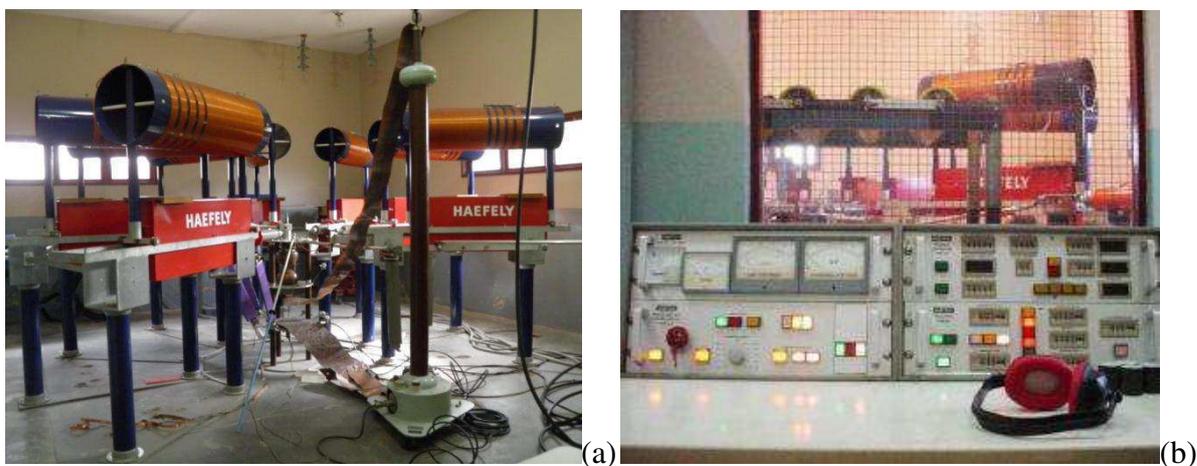


Fig. 3.7 (a) gerador de impulsos de corrente; (b) mesa de controle do gerador.

O procedimento para geração do impulso de corrente é controlado por meio de uma mesa de controle. Com este gerador, pode-se produzir sinais de $8/20 \mu\text{s}$, que representa a forma de onda da descarga atmosférica, e também, sinais de $4/10 \mu\text{s}$, que é representativo dos sinais de manobra.

O diagrama esquemático do gerador de impulso é mostrado na Figura 3.8. Utilizando-se a mesa de controle, inicialmente as esferas, SG, do espinterômetro são afastadas. Após o carregamento do banco de capacitores com a tensão desejada, as esferas do espinterômetro são aproximadas até acontecer uma descarga elétrica. A corrente elétrica gerada percorre o objeto de teste, no caso deste trabalho, a haste de injeção e o solo. Essa corrente passa também através de R_{SHUNT} ($5,488 \text{ m}\Omega$) para gerar uma tensão e poder se estimar seu valor.

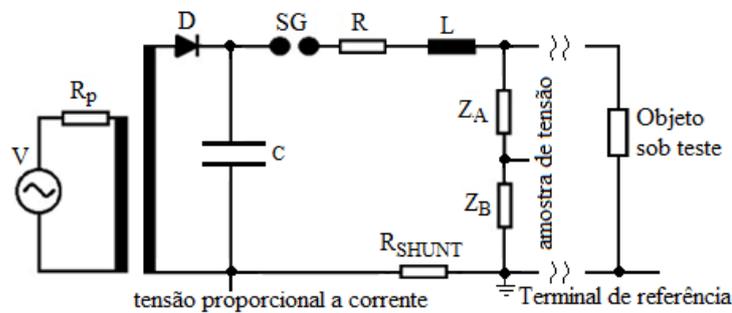


Fig. 3.8 – Diagrama esquemático do gerador de impulso

3.6.2 Ensaio para Definição de Parâmetros do Sistema

Para definir os parâmetros do sistema, foram realizados experimentos e campanhas de medições com o objetivo de modelar formas de onda para a tensão e corrente aplicadas e a sua propagação no solo. O esquema de medição usado nos ensaios é mostrado na Figura 3.9. No experimento, utilizou-se o gerador de impulsos de corrente $80 \text{ kJ}/100 \text{ kV}$, um osciloscópio digital de quatro canais para aquisição de dados, três pontas de prova de alta tensão e três hastes de aterramento.

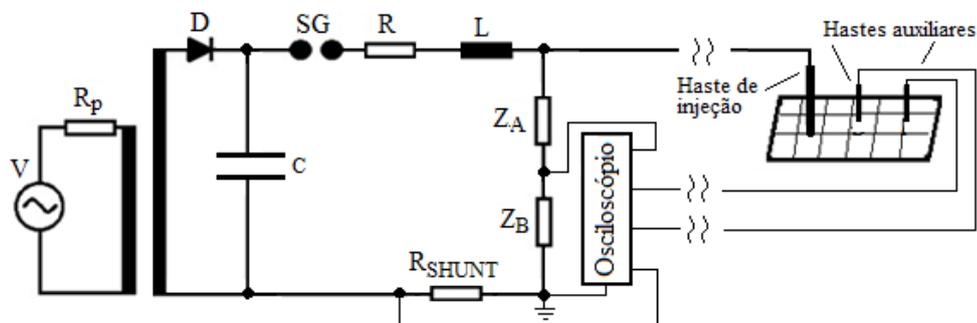


Fig. 3.9 - Configuração do ensaio no sistema de aterramento para determinação de parâmetros.

Foram utilizadas uma haste de injeção e duas auxiliares cujos posicionamentos são mostrados na Figura 3.10, as hastes auxiliares foram fincadas a 4,0 m e 7,40 m do ponto de injeção de corrente elétrica. Os ensaios foram repetidos variando-se a posição das hastes auxiliares radialmente.

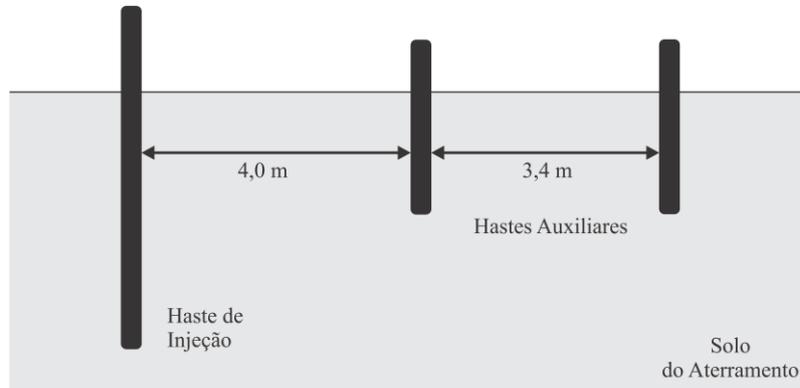


Fig. 3.10 - Disposição das hastes enterradas no solo

Uma amostra do sinal de tensão aplicado foi adquirido por meio da medição da tensão sobre a impedância Z_B (Figura 3.9). A associação das impedâncias Z_A e Z_B forma um divisor de tensão. Os sinais de tensão propagados no solo foram obtidos diretamente nas hastes auxiliares.

A corrente elétrica de injeção foi calculada a partir da medição do sinal de tensão sobre o resistor R_{SHUNT} , de valor 5,488 m Ω (Figura 3.9).

3.6.3 Ensaio para Validação do Sistema

Para validação do sistema foram realizados testes em bancada no Laboratório de Instrumentação e Metrologia Científicas - LIMC, utilizando um sinal simulado e experimentos utilizando o gerador de impulsos do LAT.

3.6.3.1 Ensaio Utilizando Sinal Simulado 8/20 μ s

Os testes utilizando o sinal simulado 8/20 μ s teve o propósito de avaliar o sinal amostrado em relação ao sinal na entrada do sistema de aquisição de dados.

Para realização dos testes foi simulado um sinal 8/20 μ s utilizando o aplicativo *Benchlink Waveform Builder* (banco de dados para construção de formas de onda) da Agilent. O sinal simulado foi colocado na entrada do módulo de aquisição, utilizando o gerador de sinais Agilent 33220A de 20 MHz *Function/Arbitrary Waveform Generator* (gerador de funções e de ondas arbitrárias). O sinal amostrado a partir do sinal simulado foi

então exibido na tela do computador. Na Figura 3.11 é apresentada a configuração utilizada nos testes.

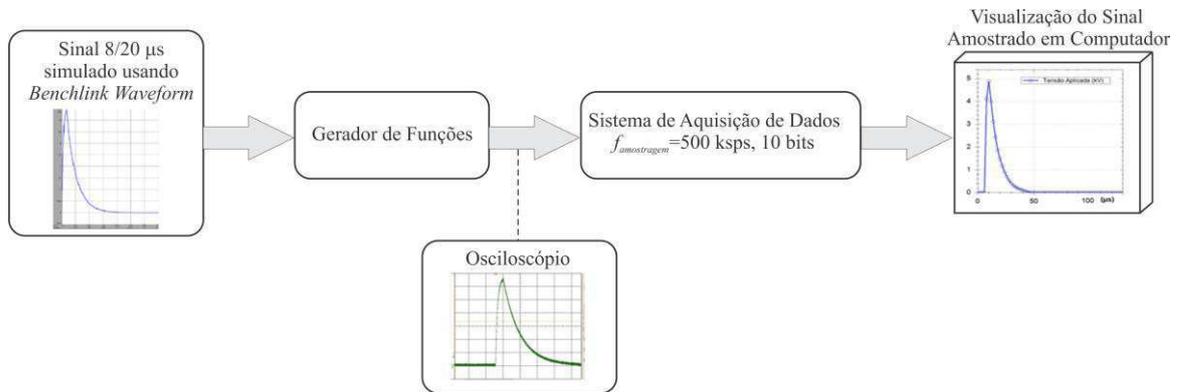


Fig. 3.11 – Configuração para teste com sinal 8/20µs simulado

3.6.3.2 Ensaios Utilizando Gerador de Impulsos

Para validação do sistema desenvolvido também foram feitas aquisições de dados em um sistema de aterramento, como representado na Figura 3.12, utilizando o gerador de impulsos que foi mostrado na Seção 3.6.1 deste capítulo. Também foi montado um sistema de aquisição de dados com osciloscópio, (representado por linha interrompida) para adquirir, de forma simultânea, os mesmos sinais que o sistema desenvolvido, para possibilitar a comparação dos resultados com um sistema tradicional de medição.

A corrente aplicada no solo foi obtida por meio da divisão entre a tensão no resistor R_{SHUNT} , adquirida pela UAC, e o valor do mesmo (5,488 mΩ). Para obter a tensão aplicada, uma amostra da tensão sobre a impedância Z_B foi adquirida pela UAC, sabendo-se que a relação de tensão entre Z_A e Z_B é de 11, pode-se determinar a tensão aplicada.

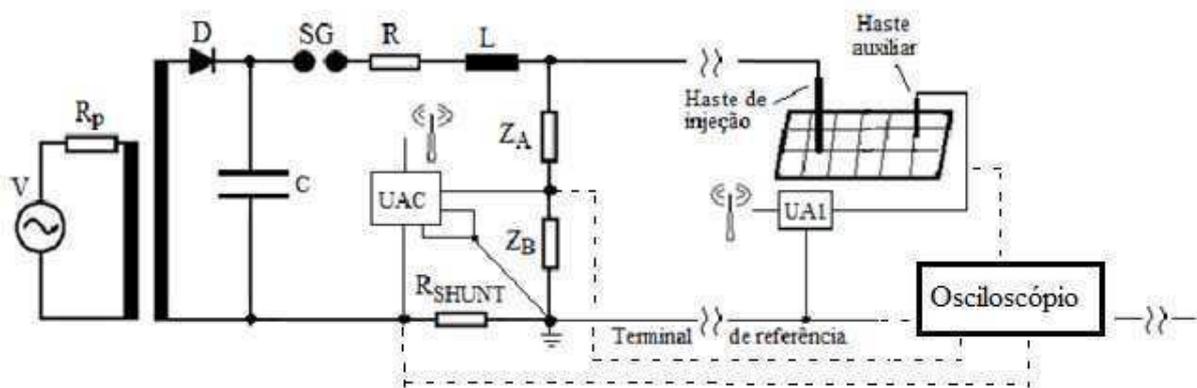


Fig. 3.12 - Configuração do ensaio no sistema de aterramento para validação.

A tensão propagada no solo foi obtida a partir de uma haste enterrada no solo utilizando uma unidade de aquisição remota (Figura 3.13.b). O posicionamento das hastes é apresentado na Figura 3.13.a e uma vista em perspectiva desse posicionamento está representada na Figura 3.13.b. O espaçamento entre a haste de injeção e a auxiliar foi de 9 m. Desta forma, adquirindo um sinal de tensão com amplitude máxima da ordem de centenas de volts.

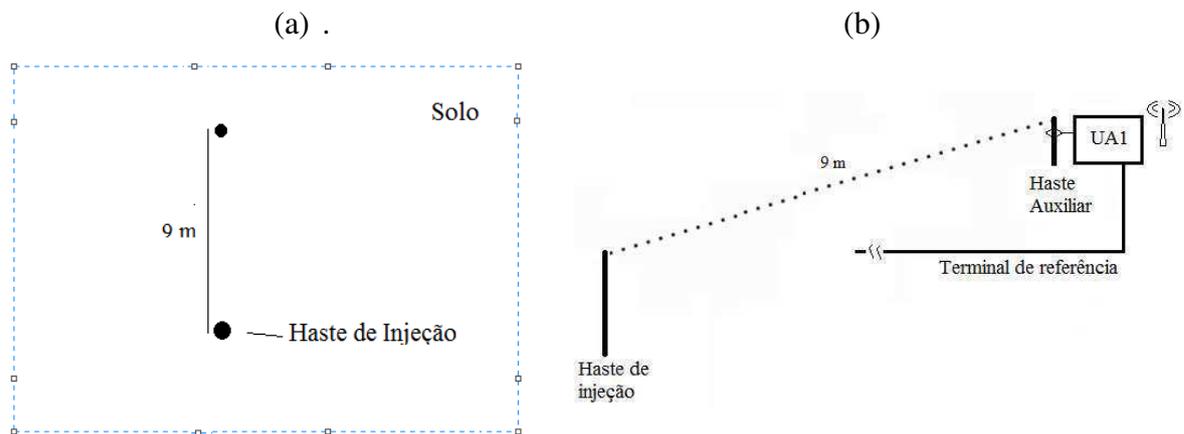


Fig. 3.13 - Disposição das hastes no solo (a) Vista superior (b) vista em perspectiva.

Foram utilizadas duas hastes, uma de injeção e uma auxiliar. A haste de injeção foi enterrada 1,00 m, no solo e a auxiliar 0,40 m. Os resultados obtidos são apresentados no próximo capítulo.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos com a implementação do sistema de aquisição de dados para diagnóstico de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente são apresentados neste capítulo, que está dividido em três partes: na primeira são mostrados os resultados dos ensaios realizados para definição dos parâmetros do sistema proposto, em seguida são apresentados os circuitos implementados e por fim, são analisados os resultados dos testes realizados para validação do sistema desenvolvido.

4.1 Definição de Parâmetros do Sistema de Aquisição de Dados

As medições realizadas para a obtenção de tensão e corrente elétrica, tanto na haste de teste, como nas hastes auxiliares, apresentaram comportamento similares aos apresentados por Araújo *et al.* (2010), Visacro (2007) e Pedrosa *et al.* (2011) em que se verifica que a amplitude da tensão na haste auxiliar decresce com a distância na direção de propagação.

Na Figura 4.1 são apresentadas as formas de onda adquiridas considerando uma escala de tempo de 25 μ s por divisão. Os sinais foram obtidos utilizando-se uma tensão de carregamento, do gerador de impulso de corrente igual a 15 kV.

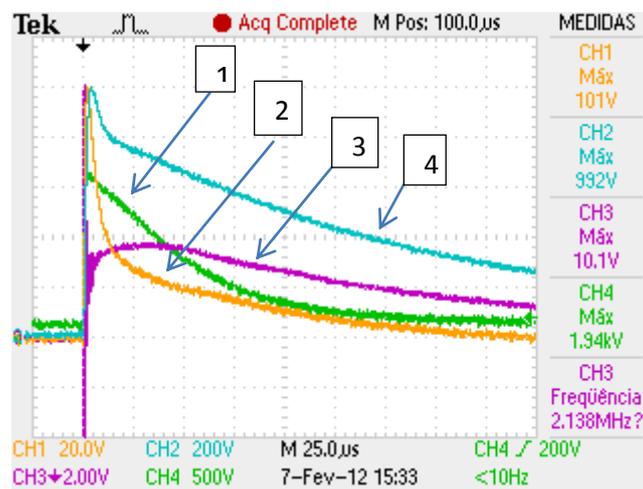


Fig. 4.1 Curvas de tensão adquiridas com tensão de carregamento de 15 kV. 1 – Haste de injeção; 2 - Haste auxiliar a 7,4 m; 3 – Resistor de 5,488 m Ω ; 4 - Haste auxiliar a 4 m.

Para a obtenção dos sinais apresentados na Figura 4.2, utilizou-se 1 μ s por divisão como escala de tempo para se ter detalhes do sinal de corrente.

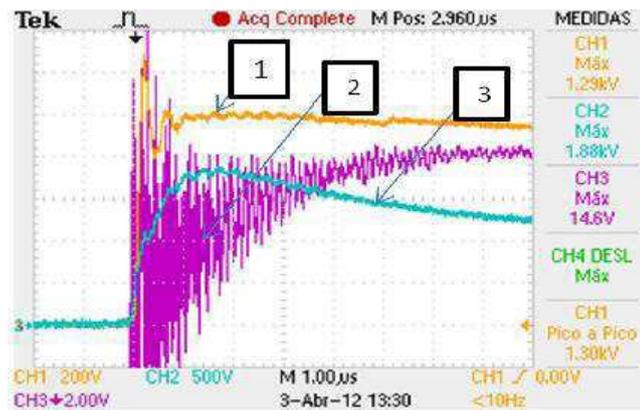


Fig. 4.2 - Curvas adquiridas com tensão de carregamento de 15 kV. 1 –Tensão na haste de injeção; 2 – Tensão no resistor de 5,488 mΩ; 3 - Tensão na haste auxiliar a 7,40 m.

A partir dos valores de tensão e corrente (obtida da tensão em 5,488 mΩ) na haste de injeção foram efetuados os cálculos da impedância impulsiva, dada por $Z_p = V_p/I_p$. Foram realizadas 5 medições e calculou-se o valor médio da impedância com o respectivo desvio padrão, desta forma se minimiza a incerteza da medição. Foram utilizados três valores de tensão de carregamento: 10 kV, 15 kV e 20 kV. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 - Impedância impulsiva calculada para cada valor de tensão aplicada.

Tensão de Carregamento (kV)	Z(Ω)	Desvio padrão
10	60,85	2,49
15	48,93	6,16
20	40,49	3,48

A impedância transitória foi calculada, ponto a ponto, a partir da razão entre os valores do sinal da tensão aplicada e o sinal da corrente injetada. O ambiente computacional MatLab® foi utilizado como ferramenta para a obtenção da curva de impedância transitória. Foram calculados 2500 pontos e em seguida, ligados por segmentos de reta. Na Figura 4.3 é mostrada a forma de onda obtida para a impedância transitória, para uma tensão de carregamento de 15 kV.

A curva da impedância transitória apresenta um decaimento, que tem associação com o tempo de cauda do sinal adquirido, segundo Pedrosa (2011). Após a ocorrência do impulso, o sinal atinge o estado permanente, e passa a ter características do sistema de aterramento submetido a sinais de baixa frequência, em que apenas a componente resistiva é significativa e é dada por R_{LF} de acordo com Visacro (2007) e Pedrosa (2011).

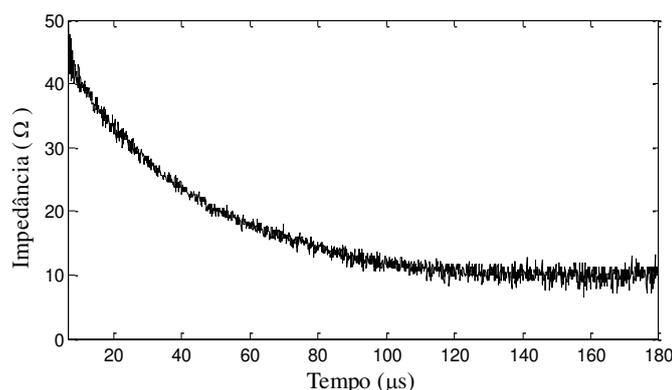


Fig. 4.3 - Impedância transitória obtida com uma tensão de carregamento de 15 kV.

No caso deste estudo, $R_{LF} = 15 \Omega$, valor que foi obtido por meio das medições, de acordo com o Método de Wenner, em concordância com a norma ABNT NBR 7117.

Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros escolhidos, com base na análise dos resultados obtidos a partir dos ensaios realizados.

TABELA 4.2 - Parâmetros do sistema de aquisição de dados

Parâmetro	Especificação
Taxa de amostragem	2×10^6 amostras/s
Amplitude tensão	5 kV
Amplitude corrente	3 kA
Duração da aquisição	500 μs
Número de canais analógicos	14

Considerando que o sinal tem um tempo de frente de $8 \mu s$, respeitando o Teorema de Nyquist, foi escolhida uma taxa de amostragem de 2×10^6 amostras/s. Os valores de amplitude de tensão e corrente foram definidos considerando os valores típicos destas grandezas para uma descarga atmosférica. A escolha da duração da aquisição de $500 \mu s$ deve-se ao fato de se garantir que, neste tempo, a parte significativa do sinal, para este estudo, e que tem uma duração de tempo de aproximadamente $250 \mu s$ conforme Figura 4.1, tenha sido amostrada. A quantidade de canais foi determinada considerando-se que são necessários 12 canais para adquirir o sinal de tensão propagado nas hastes auxiliares, mais um canal para aquisição da tensão e outro para adquirir a corrente na haste de injeção, o que totaliza 14 canais.

4.2 Circuitos Implementados

Os circuitos implementados foram projetados considerando os resultados obtidos com os ensaios preliminares, apresentados na seção 4.1. São mostradas a seguir, as implementações de três circuitos: o regulador de tensão, o de aquisição de dados de tensão e de corrente na UAC e o de aquisição de tensão nas UAn.

Na Figura 4.4 é mostrado o circuito regulador de tensão, que tem o objetivo de regular a tensão fornecida por uma bateria de 9 V. No caso da alimentação do dsPIC foi usado o dispositivo regulador de tensão LM7805 que fornece na sua saída uma tensão de 5 V. Para a alimentação do módulo ZigBee, optou-se por utilizar o regulador LM317, que foi configurado para fornecer na sua saída uma tensão de 3,3 V.

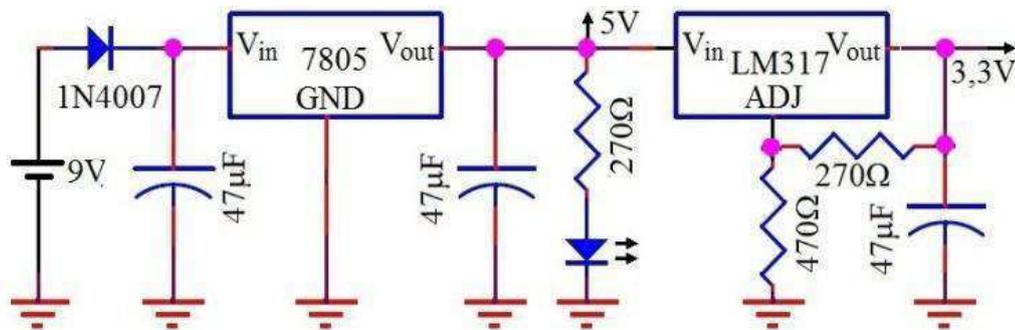


Fig. 4.4 – Circuito Regulador de Tensão.

O circuito para adquirir dados de tensão e corrente aplicados no solo é formado por dois módulos, um para aquisição de tensão e o outro para a aquisição de corrente, conforme apresentado na Figura 4.5. Os sinais de tensão e corrente são adquiridos diretamente do gerador de impulsos que já disponibiliza pontos para estas medições. Observando a figura, um módulo de condicionamento adequa o sinal aos parâmetros do dsPIC, a saída deste módulo é conectada ao pino 5 de cada dsPIC. No caso da tensão, o condicionador é formado basicamente por um divisor de tensão e circuito de proteção com por resistores e diodos, no caso da corrente, foi acrescentado um inversor, para compensar a corrente disponibilizada pelo gerador que é negativa (tensão em R_{SHUNT}). Nos pinos 25 e 26 de cada dsPIC, está a saída dos dados para o módulo de transmissão, implementado em ZigBee.

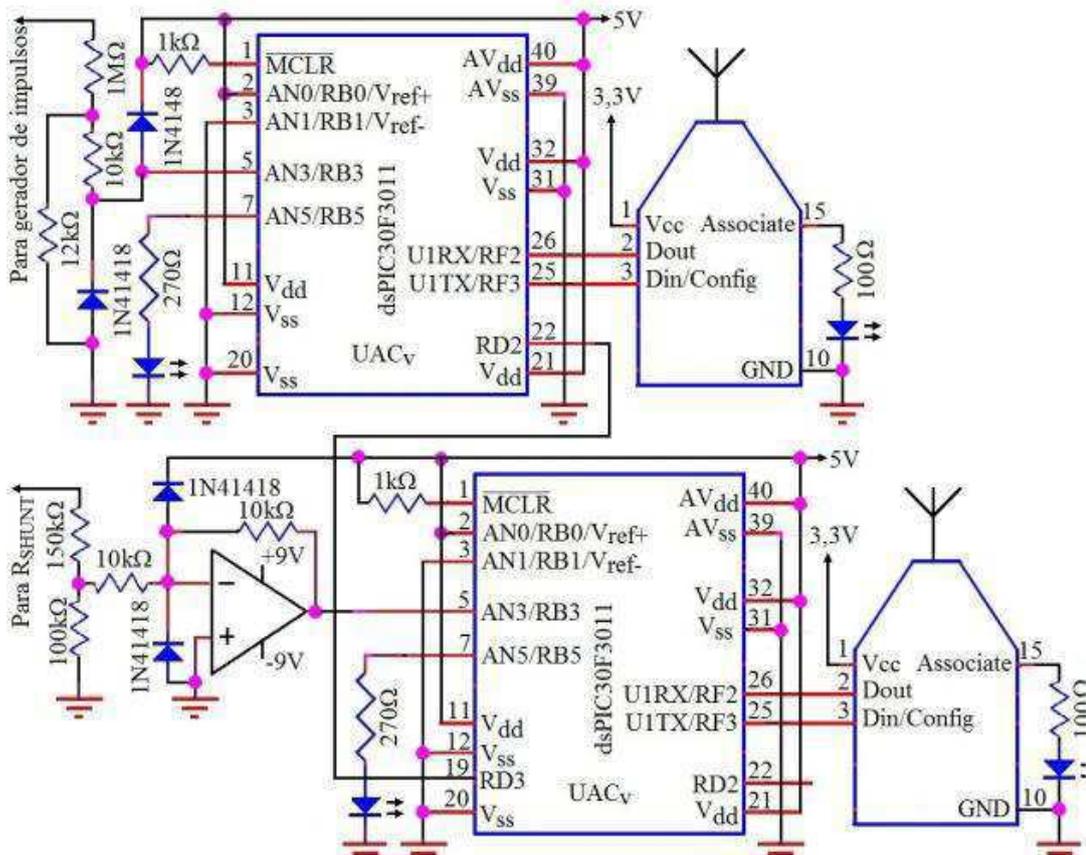


Fig. 4.5 – Circuito da UAC para Medir Tensão e Corrente.

O circuito para aquisição de dados do sinal de tensão propagado no solo é mostrado na Figura 4.6 e é similar àquele utilizado para adquirir dados da tensão aplicada no solo. Um módulo condicionador, formado por resistores e diodos disponibiliza o sinal para o pino 5 do dsPIC, uma vez o sinal amostrado, os pinos 25 e 26 são usados para a transmissão dos dados ao módulo ZigBee.

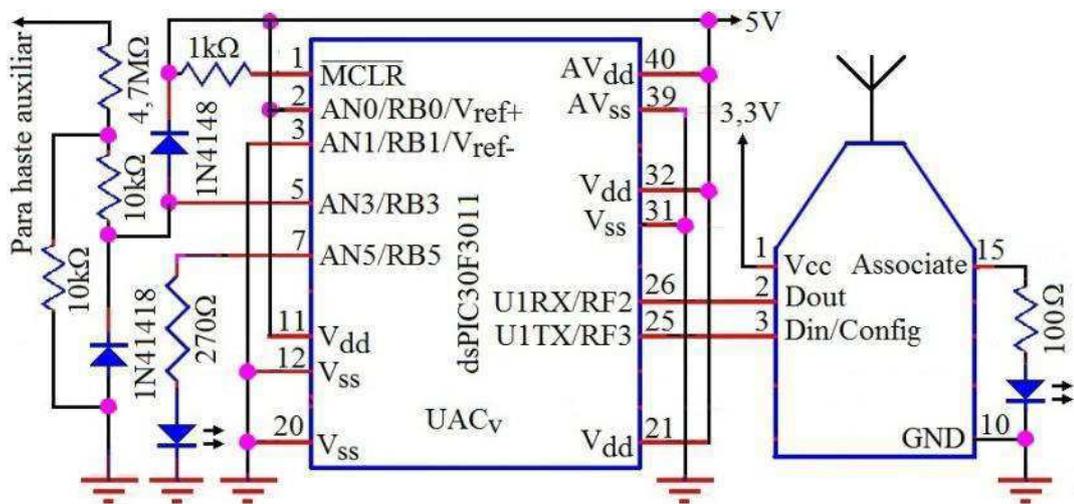


Fig. 4.6 – Circuito da UAn para Medir Tensão.

4.3 Sistema de Aquisição de Dados: Sinais Adquiridos

Os resultados para validação do sistema desenvolvido estão divididos em duas seções, sendo a primeira referente aos resultados obtidos a partir do sinal simulado $8/20 \mu\text{s}$ e a segunda corresponde aos dados obtidos com a realização de experimentos utilizando o gerador de impulsos.

4.3.1 Resultados com Sinal $8/20 \mu\text{s}$ Simulado

Utilizando o *Benchlink Waveform*, que é um software que permite construir um sinal a partir de uma equação ou de parâmetros da curva, foi construído um sinal com forma de onda $8/20 \mu\text{s}$, que pode ser visto na Figura 4.7.a. Através de uma cabo USB, o sinal construído foi colocado no gerador de funções, que por sua vez foi colocado na entrada do sistema de aquisição de dados desenvolvido, a imagem do sinal mostrada na Figura 4.7.b e foi obtida com um osciloscópio. Por fim, o sinal amostrado a partir do sinal simulado $8/20 \mu\text{s}$ (construído com o *Benchlink Waveform*) é apresentado na Figura 4.7.c.

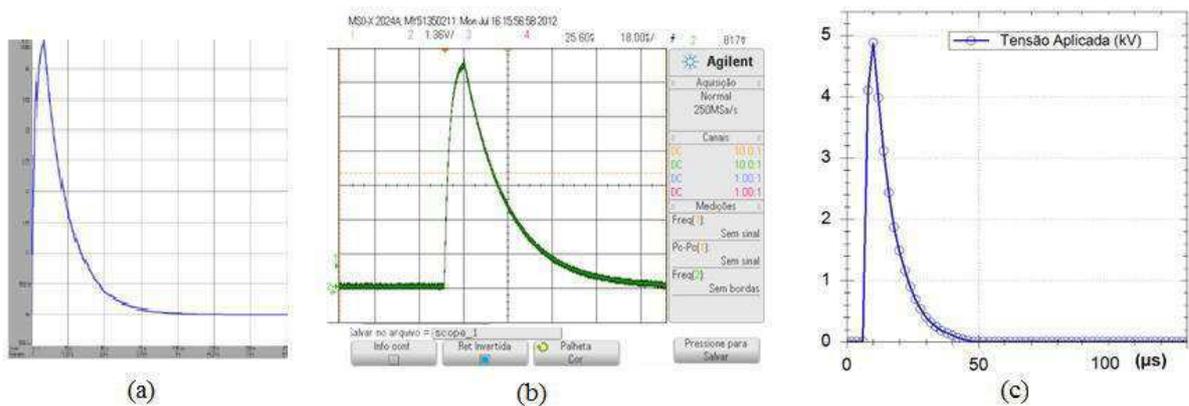


Fig. 4.7 a) Sinal simulado $8/20 \mu\text{s}$ no Agilent Benchlink; b) Sinal de entrada no sistema de aquisição de dados; c) Sinal amostrado a partir do sinal simulado.

O sinal foi simulado com uma taxa de amostragem de $0,5 \times 10^6$ amostras/s. O sinal simulado foi construído com um tempo de frente de $8 \mu\text{s}$ e tempo de cauda de $20 \mu\text{s}$ e considerou-se que em $30 \mu\text{s}$ o sinal atinge a amplitude zero. Comparando-se a curva da Figura 4.7 a) e o sinal amostrado na Figura 4.7 c), observa-se que a amostragem foi suficiente para a recuperação do sinal.

4.3.2 Resultados com o Gerador de Impulsos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em testes com o sistema de aquisição de dados desenvolvido, a partir da aplicação de impulsos de corrente no solo

utilizando o gerador de impulsos. Para execução dos testes foram realizadas 5 medições, com tensão de carregamento de 11 kV.

Fotografias ilustrando a montagem utilizada nos ensaios com o gerador de impulsos, para validação do sistema desenvolvido, são mostradas na Figuras 4.8.

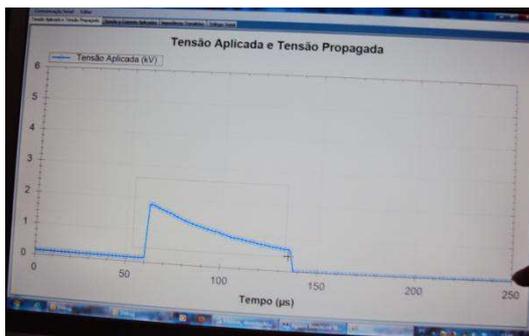
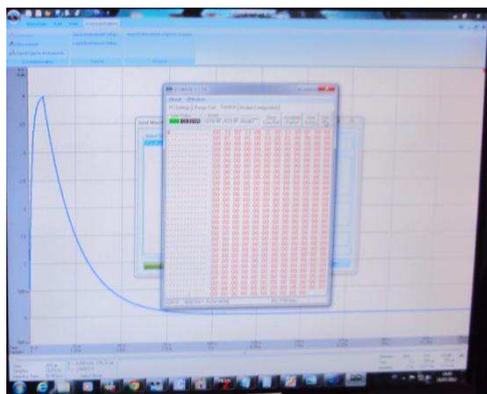
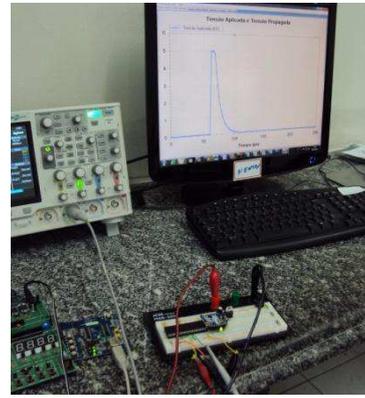
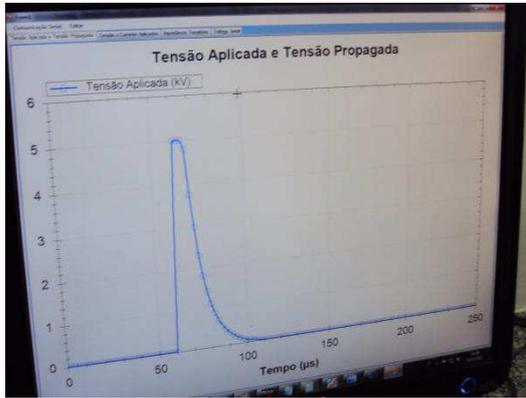
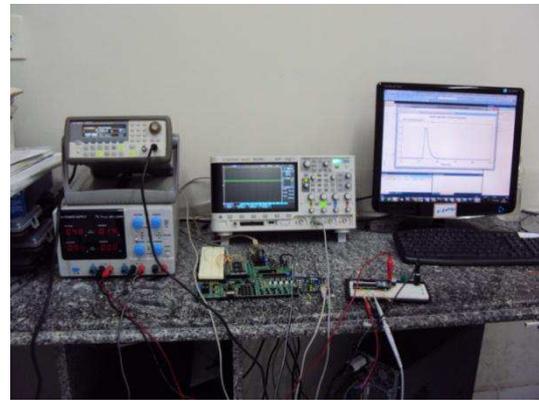
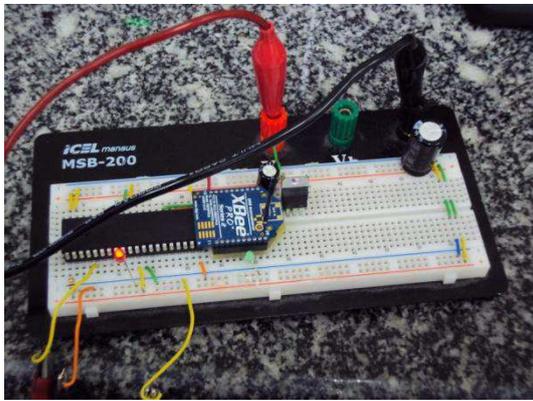


Fig. 4.8 - (a) microcontrolador e módulo ZigBee; (b) Sistema de aquisição a partir de sinal gerado; (c) sinal adquirido pelo sistema desenvolvido utilizando simulação; (d) módulo de aquisição; (e) sinal adquirido e dados recebidos pelo ZigBee e mostrados no computador; (f) sinal adquirido pelo osciloscópio usando o gerador de impulsos; (g) sinal adquirido pelo sistema desenvolvido utilizando o gerador de impulsos.

Na Figura 4.9 são mostrados os dados adquiridos com o sistema desenvolvido. Nas Figuras 4.9.a e 4.9.b são mostradas as formas de onda da tensão aplicada no solo, obtidas respectivamente, com o osciloscópio e com o sistema desenvolvido. Ficou comprovado que o sistema de aquisição de dados detectou o impulso, gerou a tabela de dados e a transferiu para um microcomputador. Nota-se que as formas de onda são similares. A queda existente na curva 4.9.b deve-se a quantidade de amostras adquiridas, isso não invalida o procedimento geral. Este mesmo fenômeno se repete com a aquisição das formas de ondas de corrente no gerador de impulso (Figura 4.10.b), e da tensão em uma haste auxiliar (Figura 4.11.b). Conclui-se, portanto, que o sistema de aquisição de dados desenvolvido tem as características adequadas para o tipo de aquisição a que se propõe.

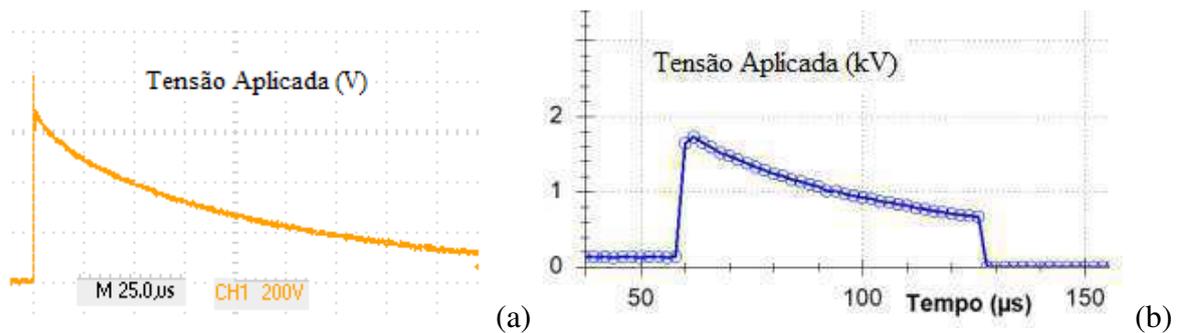


Fig. 4.9 - Formas de onda da tensão aplicada a) adquirida com o osciloscópio; b) adquirida com o sistema desenvolvido.

As formas de onda da corrente aplicada no solo, obtidas respectivamente, com o osciloscópio e com o sistema desenvolvido são mostradas nas Figuras 4.10.a e 4.10.b. Nota-se que, considerando a janela de aquisição, as formas de onda são similares; de modo semelhante ao ocorrido com a forma de onda da tensão no gerador de impulsos, existe uma queda na forma de onda da corrente no gerador apresentada na Figura 4.10.b, como já comentado anteriormente. Também, neste caso, observa-se que o sistema de aquisição de dados desenvolvido tem características adequadas para adquirir sinal de corrente em frequências elevadas e em alta intensidade.

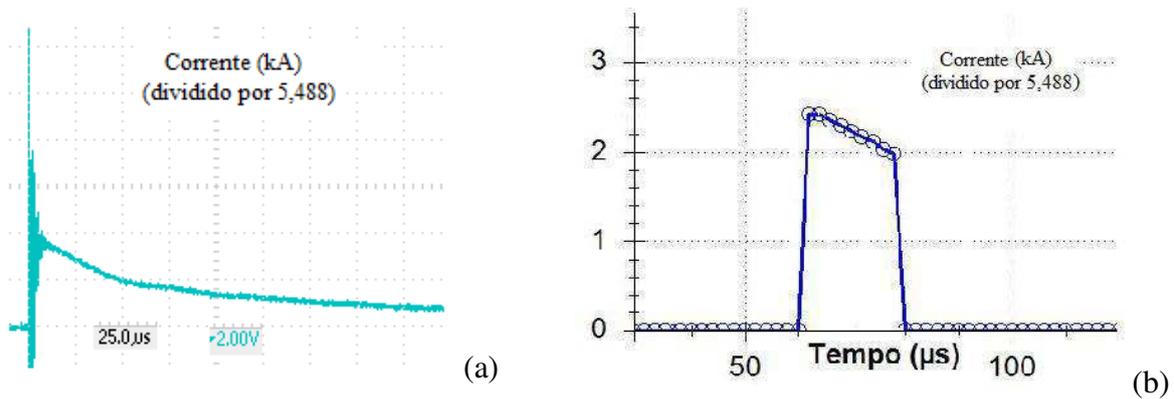


Fig. 4.10 - Formas de onda da corrente aplicada: a) adquirida com o osciloscópio; b) adquirida com o sistema desenvolvido.

Na Figuras 4.11.a e 4.11.b são mostradas as formas de onda da tensão em uma haste auxiliar, colocada a 9 m do ponto da haste de injeção, adquiridas, respectivamente, com o osciloscópio e com o sistema desenvolvido. Consta-se que o sistema de aquisição de dados detectou o impulso, gerou a tabela de dados e a transferiu via ZigBee para a UAC, que por sua vez, transferiu esses dados para um microcomputador. Nota-se que as formas de onda são similares. Conclui-se, portanto, que o sistema de aquisição de dados desenvolvido tem as características adequadas para o tipo de aquisição a que se propõe.

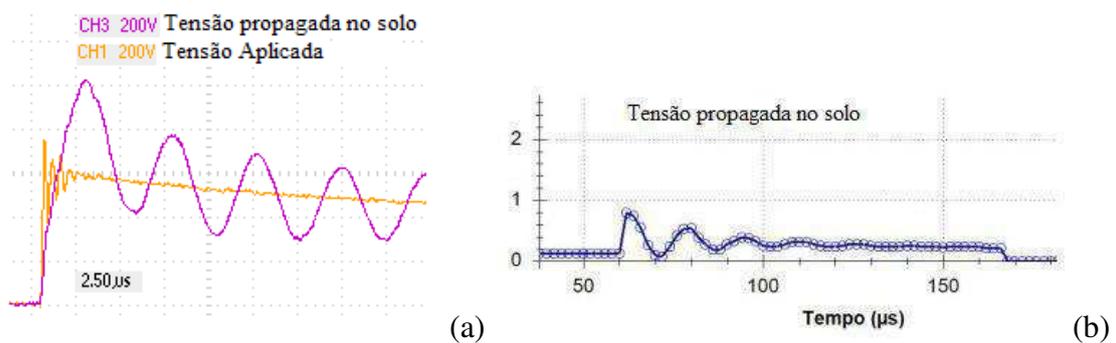


Fig. 4.11 - Formas de onda da tensão em uma haste auxiliar, colocada a 9 m do ponto da haste de injeção: a) adquirida com o osciloscópio; b) adquirida com o sistema desenvolvido.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados para diagnóstico de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente elétrica. O sistema é portátil e tem a capacidade de adquirir dados de tensão e corrente resultantes da injeção de um impulso de corrente elétrica no aterramento, tanto os sinais aplicados, como os sinais de tensão propagados no solo. Uma rede de transmissão sem fio, baseada no Padrão ZigBee, foi usada para a comunicação entre os nós sensores de tensão nas hastes remotas e na Unidade de Aquisição Central. Os testes de validação do sistema foram realizados utilizando simulação e ensaios em laboratório usando corrente de até 2 kA, produzidas por um gerador de impulsos.

O desenvolvimento do sistema obedeceu as fases de projeto, especificação, implementação e testes. Foram projetados e implementados circuitos de condicionamento e de processamento de sinais, tanto para os sinais de tensão e corrente aplicados no solo, quanto para os sinais de tensão propagados. Além disso, foi projetado e implementado o circuito de regulação de tensão para fornecer alimentação aos módulos microcontrolador (a base de dsPIC) e de transmissão de dados sem fio (na tecnologia ZigBee).

A partir dos resultados obtidos observa-se que o sistema de aquisição de dados desenvolvido é capaz de detectar o impulso, gerar uma tabela de dados e transferir estes dados para um microcomputador. O sistema foi projetado, montado e testado.

Resultados experimentais foram obtidos em laboratório e em campo utilizando um osciloscópio digital (4 canais e taxa de aquisição de 2 GHz) e com o sistema desenvolvido. Observa-se que os resultados obtidos pelos dois meios foram similares, concluindo-se, portanto, que o sistema desenvolvido é adequado para a aquisição dos sinais de alta intensidade e em frequências elevadas.

A partir do sistema desenvolvido, estudos futuros, devem possibilitar a implementação de sistemas de monitoramento e diagnóstico integrados ao controle de operação dos sistemas de energia. Também possibilitarão que os dados obtidos pelo sistema de aquisição desenvolvido sejam utilizados na avaliação ou validação de modelos de sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente elétrica utilizados atualmente.

5.1.Trabalhos Futuros

Como continuação do trabalho realizado propõe-se:

- Avaliar a implementação do sistema de aquisição de dados desenvolvido, utilizando um dsPIC com conversor A/D que tenha uma taxa de amostragem de da ordem de 10^9 amostras por segundo para permitir a obtenção da velocidade de propagação;
- Avaliar o consumo de energia elétrica, bem como fontes alternativas de energia, para aumentar a autonomia do sistema, de forma a permitir a instalação do sistema de aquisição de dados em campo, por um determinado período;
- Desenvolver o modo de operação em campo, em que o sistema deve permanecer operando continuamente com a finalidade de monitorar a ocorrência de eventos espontâneos, por um determinado período;
- Desenvolver a integração do sistema de aquisição de dados desenvolvido com o sistema de controle usado em subestações;
- Desenvolver um gerador de impulsos portátil para conferir maior portabilidade ao sistema.

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*, Hannover, Alemanha, 2011.

Alves, A. C. B., Alvarenga, B. e Marra, E.; On the Calculation of the Reduction Factor for Ground Resistance of Foot. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE2012*, Goiânia, Brasil, 2012.

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*, Belém, Brasil, 2010.

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*, Hannover, Alemanha, 2011.

Bellaschi, P. L.; Lightning Currents in Field and in Laboratory. *Electrical Engineering*, p. 837-843, agosto, 1935.

Braga, N. C. Conheça o dsPIC (MIC029); disponível em <http://www.newtonbraga.com.br/index.php/microcontroladores/103-microchip-pic/3472-mic029.html>; acessado em 09/07/2012.

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 - SBSE2012*, Goiânia, Brasil, 2012.

Chisholm, W. A. e Jamischewskyj, W. I.; Lightning Surge Response of Ground Electrodes. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, No. 2, p.1329-1337, 1989.

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, A. D., Andrade Jr., G. V., Costa, E. G., Souza, F. P. F., Macedo, E. C. T., Gomes, L. V., Nóbrega N., S. A. G. and Brasil, F. C. L.; Grounding Grids Analysis of Energized Substations. In: *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*, Hannover, Alemanha, 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*, vol. 1, No. 1, p.102-108, 1978.

Dwight, H. B.; Calculation of Resistances to Ground. *Electrical Engineering*, p. 1319-1328, dezembro, 1936.

Fraga, F. N.; Contribuições para o Desenvolvimento de uma Metodologia para Avaliação de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência Empregando TLM Tridimensional. 111 folhas. *Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFPE*, Recife, Brasil, 2008.

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> acessado em 20/11/2011.

Grcsev, L.; Frequency Dependent and Transient Characteristics of Substations Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, No. 1, p.172-178, 1997.

Grcsev, L.; Impulse Efficiency of Ground Electrode. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, No. 1, p.441-451, 2009.

Grcsev, L.; Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, No. 3, p.1692-1699, 2011.

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 folhas. *Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, UFCG*, Campina Grande, 2006.

Hildebrand, D. J.; Apparatus and Practices for Electrical Noise and Shock Hazard Abatement in Pulsed Power Enviroments. *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 27, No. 1, p.152-155, 1991.

IEEE Power Engineering Review. Peter L. Bellaschi, 60 Years of Contributions to the Electric Power Industry. *IEEE Power Engineering Review*, People, p.14-15, 1987.

Kindermann, G. e Campagnolo, J. M.; Aterramento Elétrico. 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra-DC Luzzatto, 1995.

Kosztaluk, R., Loboda, M. e Mukhedkar, D.; Experimental Study of Transient Ground Impedances. *IEEE Transactions on Power Apparatus*, vol. PASS-100, No. 11, p.4653-4660, 1981.

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*, Hannover, Alemanha, 2011.

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 09/02/2012).

Liew, A. C. and Darveniza, M.; Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths. *Proceedings of IEE*, vol. 121, No. 2, p.123-135, 1974.

Lima, A., Paulino, J. O. e Boaventura, W.; The Use of a Special Grounding Arrangement to Improve the Lightning Performance of Transmission Line. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE2012*, Goiânia, Brasil, 2012.

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.

Macêdo, E. C. T.; Sistema de Avaliação do Nível de Degradação de Pára-Raios de Óxido de Zinco. 2010. 70 folhas. *Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em engenharia Elétrica UFCEG*, Campina Grande, 2010.

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: *IX Semetro -18^o Simpósio Internacional do Comitê Técnico de Medidas Elétricas da IMEKO*, Natal, Brasil, 2011.

Machado, R.; Detecção, Classificação e Quantificação Automática de Variações de Tensão de Curta Duração para Aplicação em Análise de Pós-Operação em Sistemas de Energia Elétrica. 141 folhas. *Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica UFPA*, Belém, Brasil, 2006.

Meliopoulus, A. P.; Moharam, M. G.; Transiente Analysis of Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. PAS-102, No. 2, p.389-399, 1983.

Microchip Technology Inc. *dsPIC30F3010/3011, Data Sheet*, 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em <http://www.ni.com/dataacquisition/>. Acessado em 02/03/2012.

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.

Rodrigues, B. D.; Concepção e Desenvolvimento de um Medidor de Impedância Impulsiva de Aterramentos em Linhas de Transmissão. 2012, 74 folhas,. *Exame de Qualificação, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica UFMG*, Belo Horizonte, Brasil, 2012.

Rodrigues, M. A. O.; Avaliação do Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento. 2012, 77 páginas,. *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica UFCG*, Campina Grande, Brasil, 2012.

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

Sekioka, S. Hayashida, H e Ametani, A.; Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents. *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 145, No. 6, p.693-699, 1998.

Sunde, E. D.; Surge Characteristics of a Buried Bare Wire. *AIEE Transactions*, p. 987-991, vol. 59, 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*, Chongqing, China, 2008.

Thomas, R. J.; High Impulse Current and Voltage Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. IM-19, No. 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, S.; Aterramentos Elétricos. Edição. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.

Visacro, S.; Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia. Edição. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.

Visacro, S.; A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, No. 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*, vol. 27, No. 2, p.927-935, 2012.

Visacro, S. e Rosado, G.; Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, No. 2, p.927-935, 2012.