



**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO PARA
DIAGNOSTICO DAS CONDIÇÕES DE ATERRAMENTO DE
SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS**

LUANA DE VASCONCELOS GOMES

**Campina Grande - Paraíba - Brasil
Agosto de 2012**

LUANA DE VASCONCELOS GOMES

SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO PARA DIAGNOSTICO
DAS CONDIÇÕES DE ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES
ENERGIZADAS

Dissertação de Mestrado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientadores:

Professor Edson Guedes da Costa, D. Sc.

Raimundo Carlos Silvério Freire, D. Sc.

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Agosto de 2012



G633s Gomes, Luana de Vasconcelos.
Sistema Eletrônico embarcado para diagnóstico das condições de aterramento de subestações energizadas / Luana de Vasconcelos Gomes. - Campina Grande, 2012.
47 f.

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

1. Sistema de Aterramento. 2. Potenciais de Superfície. 3. Sistemas Embarcados. 4. Dissertação - Engenharia Elétrica. I. Costa, Edson Guedes da. II. Freire, Raimundo Carlos Silvério. III. Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB). IV. Título

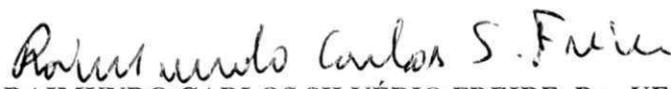
CDU 621.316.9(043)

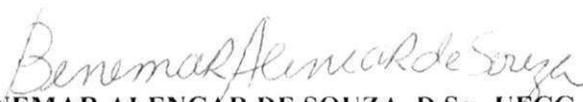
**"SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO PARA DIAGNÓSTICO DAS CONDIÇÕES DE
ATERRAMENTO DE SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS"**

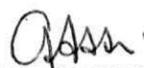
LUANA DE VASCONCELOS GOMES

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 31/08/2012


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


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


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


JOSÉ GUTEMBERGUE DE ASSIS LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade e forças para seguir em busca de meus objetivos.

Agradeço aos meus pais Ana Lucia de Vasconcelos Gomes e Antonio Soares Gomes, como também aos meus irmãos Luciana de Vasconcelos Gomes Monteiro e José Paulo de Vasconcelos Gomes por seu apoio incondicional.

Ao meu noivo, Janmil L. Nóbrega Jr que sempre esteve ao meu lado nesta jornada me doando seu carinho, incentivo, amizade e amor.

Agradeço aos Mestres Edson Guedes da Costa e Raimundo Carlos Silvério Freire pela orientação e pela confiança depositada em mim para a realização deste trabalho e, sobretudo pela amizade em todas as horas.

Á Túlio Chaves Albuquerque, pela sua valiosa contribuição e auxílio permanente nas etapas de realização deste trabalho.

Aos professores: Lucas Hartmann, Marcos Morais e Kyller Gorgônio pelo auxílio nas dúvidas sobre o Qt.

Aos professores: Euler Macêdo e Tarso Vilela pelo apoio no desenvolvimento dos ensaios.

Aos parceiros de laboratório: Alice Oliveira, Malone Castro, Marcos Túlio, Newton Fonseca e Antonio Newton pela ajuda na realização dos ensaios.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro durante a vigência do Curso.

A todos os amigos e colegas de curso que sempre me ajudaram nas horas de dúvidas.

Encomendas ao Senhor tuas obras e teus projetos realizar-se-ão.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| Agradecimentos..... | ii |
| Sumário | iii |
| Lista de Figuras | iv |
| Lista de Tabelas..... | vi |
| Resumo..... | vii |
| Abstract | viii |
| Capítulo 1: Introdução..... | 1 |
| 1.1 Considerações Iniciais | 1 |
| 1.2 Objetivo | 3 |
| 1.3 Organização do Trabalho..... | 3 |
| Capítulo 2: Revisão Bibliográfica | 4 |
| 2.1 Haste Vertical..... | 5 |
| 2.2 Hastes em Paralelo..... | 6 |
| 2.3 Malha de Aterramento | 9 |
| 2.4 Método das Diferenças Finitas..... | 12 |
| 2.5 Sistemas Embarcados..... | 15 |
| Capítulo 3: Material e Métodos..... | 16 |
| 3.1 Protótipo do Medidor de Potencial | 17 |
| 3.1.1 Descrição Interna do Medidor de Potencial | 18 |
| 3.1.2 Processo de Medição..... | 19 |
| 3.1.3 Processo de Transmissão de dados | 20 |
| 3.2 Sistema Eletrônico Embarcado | 22 |
| 3.2.1 Sistema de Medição | 22 |
| 3.2.2 Plataforma Embarcada: <i>Beagleboard</i> | 25 |
| 3.2.3 Rotina Computacional..... | 27 |
| 3.3 Ensaios de Medições da malha de Aterramento | 33 |
| Capítulo 4: Resultados e Análises..... | 35 |
| 4.1 Caso 1:Malha de Aterramento sem falhas | 35 |
| 4.2 Caso 2: Malha de Aterramento com falhas | 38 |
| 4.3 Avaliação do Sistema de Medição | 41 |
| Capítulo 5: Conclusões | 43 |
| 5.1 Trabalhos Publicados | 44 |
| Bibliografia | 45 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1– Distribuição das Linhas Equipotenciais em uma Haste Simples (Kindermann et al, 1995). | 5 |
| Figura 2. 2 – Comportamento dos fluxos de dispersão de correntes em um Solo Estratificado em duas camadas (Kindermann et al., 1995)..... | 6 |
| Figura 2.3 – Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes (KINDERMANN et al., 1995)..... | 7 |
| Figura 2.4 – Zona equipotencial de duas hastes (KINDERMANN et al., 1995). | 7 |
| Figura 2.5 – Distribuição da corrente entre as hastes A e B (KINDERMANN et al., 1995). | 8 |
| Figura 2.6 – Distribuição de potencial entre duas hastes de aterramento (a) circuito para estabelecimento da distribuição do potencial, (b) curva de distribuição do potencial..... | 8 |
| Figura 2.7 – Distribuição de potencial ao longo da linha (CAMINHA , 2001). | 9 |
| Figura 2.8 – Parâmetros geométricos de uma malha de terra retangular. | 10 |
| Figura 2.9 – Definição segundo a IEEE-80 de alguns conceitos de potenciais. | 11 |
| Figura 2.10 –Distribuição: (a) Linhas equipotenciais e (b) Potenciais no interior e no entorno de uma malha de aterramento. | 11 |
| Figura 2.11 - Discretização do domínio (HAYT JUNIOR et al, 2003)..... | 13 |
| Figura 3.1 – Fotografia do Protótipo do Medidor de Potencial..... | 17 |
| Figura 3.2 – Diagrama de blocos funcionais do medidor de potencial. | 18 |
| Figura 3.3 – Fluxograma do processo de medição do medidor de potencial. | 20 |
| Figura 3.4 – Fluxograma do processo de transmissão do medidor de potencial. | 21 |
| Figura 3.5 – Diagrama de blocos funcionais do sistema eletrônico embarcado..... | 22 |
| Figura 3.6 – Fotografia do sistema eletrônico embarcado..... | 22 |
| Figura 3.7 – Diagrama de blocos funcionais do sistema de medição do sistema eletrônico embarcado. | 23 |
| Figura 3.8 –Fluxograma do processo de medição do sistema eletrônico embarcado..... | 24 |
| Figura 3.9 – Características técnicas da <i>Beagleboard C4</i> (FERNANDEZ, 2010)..... | 25 |
| Figura 3.10 – <i>BeagleTouch</i> acoplada a <i>Beagleboard</i> | 26 |
| Figura 3.11 – <i>BeagleJuice</i> | 26 |
| Figura3.12 – Fotografia da interface gráfica do sistema eletrônico embarcado (Tela Inicial). | 28 |
| Figura3.13 – Fotografia da janela de medição do sistema eletrônico embarcado. | 29 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.14– Fotografia da janela de medição + teclado para entrada de coordenadas do sistema eletrônico embarcado. | 29 |
| Figura 3.15 – Fotografia da visualização dos pontos de medição internos e externos da malha de aterramento. | 30 |
| Figura 3.16 – Fotografia da janela do fator de curto-circuito do sistema eletrônico embarcado. | 30 |
| Figura 3.17– Fotografia do gráfico do mapeamento dos níveis de potencial superficial da malha de aterramento no sistema eletrônico embarcado. | 31 |
| Figura 3.18– Fotografia dos gráficos com formatos distintos plotados em diferentes janelas no sistema eletrônico embarcado. | 31 |
| Figura 3.19– Fotografia do gráfico que apresenta as coordenadas de um determinado ponto indicado pelo curso. | 32 |
| Figura 3.20– Fotografia do aumento do zoom aplicado a uma dada região do gráfico da figura 3.19. | 32 |
| Figura 3.21– Fotografia do <i>varivolt</i> utilizado nas medições. | 33 |
| Figura 4.1 – Esboço das medições de potenciais de superfície de uma malha de aterramento (sem falhas) realizadas em laboratório. | 36 |
| Figura 4.2– Níveis de potencial superficial da malha de aterramento sem falhas. | 37 |
| Figura 4.3– Linhas equipotenciais da malha de aterramento sem falhas. | 37 |
| Figura 4.4– Combinação dos resultados de mapeamento dos níveis de potencial superficial com as linhas equipotenciais de uma malha de aterramento sem falhas. | 38 |
| Figura 4.5 – Esboço das medições de potenciais de superfície de uma malha de aterramento (com falha) realizada em laboratório. | 39 |
| Figura 4.6– Níveis de potencial superficial da malha de aterramento com falhas. | 40 |
| Figura 4.7 – Linhas equipotenciais da malha de aterramento com falhas. | 40 |
| Figura 4.8– Combinação dos resultados de mapeamento dos níveis de potencial superficial com as linhas equipotenciais de uma malha de aterramento com falhas. | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1.1 - Algumas pesquisas que analisam as malhas de aterramento a partir de medições em campo..... | 2 |
| Tabela 4.1 - Comparação entre as medições dos níveis de potencial de superfície realizados pelo sistema eletrônico embarcado e o osciloscópio... | 42 |

RESUMO

Um fator importante na qualidade da energia do sistema elétrico é o sistema de aterramento. A maioria dos equipamentos de uma subestação utiliza a conexão de terra como referência para todas as outras tensões operacionais. Do ponto de vista da proteção, o objetivo de uma malha de aterramento é proporcionar uma superfície equipotencial no solo. Essa malha deve garantir que, quando uma corrente circular pelo aterramento, seja ela proveniente de uma falta ou de uma descarga atmosférica, não aparecerá diferenças de potencial entre diferentes pontos da subestação.

Os sistemas de aterramento de subestações exigem uma avaliação periódica devido não só ao envelhecimento das malhas de terra como também aos problemas de corrosão, além dos desgastes devido à ocorrência de surtos elétricos. Essa avaliação deve ser feita com a subestação energizada, pois o desligamento das mesmas traria transtornos aos consumidores.

Neste trabalho é apresentado um método de diagnóstico em malha de aterramento de subestações energizadas, que visa, por meio do mapeamento das tensões superficiais do solo (parte interna e externa da malha de aterramento) da subestação, identificar a localização de possíveis falhas (zonas de altas resistividades ou de desgaste/descontinuidade) na malha. Para isso, desenvolveu-se um sistema eletrônico embarcado capaz de medir diversos pontos de potenciais superficiais distribuídos ao longo da malha de aterramento. O sistema também é capaz de evidenciar o comportamento dos potenciais na superfície do solo, tanto em condições de regime permanente como também na ocorrência de um curto-circuito, por meio do processamento dos dados medidos via rotina computacional que exterioriza estes resultados por meio de gráficos bidimensionais (2D). As medições são realizadas na frequência industrial utilizando a corrente de desequilíbrio (desbalanço) do transformador como referência para a elevação do potencial do solo.

Palavras Chaves: Diagnóstico de Malha de Aterramento; Potenciais de Superfície; Método das diferenças finitas; Sistemas Embarcados.

ABSTRACT

An important factor in the quality of electric power system is the Grounding System. Most equipment uses a substation ground connection as a reference for all other operating voltages. In protection, the objective of a grounding grid is to provide an equipotential surface in soil that will ensure that when a current circulating through the ground either from a fault or a lightning strike will not show differences in potential between specific substation points.

The substation grounding systems require a periodic evaluation not only due to aging of ground loops, corrosion problems, apart from wear due to the occurrence of power surges. As the conditions to turn off the power substation increase in difficulty to pass, so increases the need to seek viable measurements alternatives, giving preference to methods of measurement of energized substation.

On this paper is presented the development of a diagnosis in ground grid substation energized, which aims through the mapping of the surface tension of the soil (inside and outside the ground grid) substation, identifying the location of possible faults (e.g. zones of high ohmic resistance, corrosion, discontinuity) in the grid. It was developed an embedded electronic system capable of measure and to process several surface voltages distributed throughout the grounding grid. The system is also able to enhance behavior of the potential the soil surface, both in steady state conditions or in the occurrence of a short circuit, by processing the measured data via computer routine that exteriorize these results by two-dimensional graphics (2D). This evaluation must be done with the substation in working, where the current imbalance (unbalance) of the transformer is done reference to the rise of the ground potential.

Keywords: Grounding grid diagnosis; Surface potentials; Finite difference method; Embedded System.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de potência constituem um elemento básico no desenvolvimento econômico e social da sociedade moderna. Nos últimos anos a demanda tem apresentado um aumento significativo exigindo que os sistemas evoluíssem de um conjunto de pequenos sistemas isolados para grandes e complexos sistemas interligados com dimensões nacionais e, até mesmo, continentais. Conseqüentemente, há um aumento da necessidade dos sistemas operarem dentro de padrões de qualidade e continuidade de serviço mais rigoroso.

Dentro deste contexto, o aterramento elétrico tem um papel de fundamental importância nos sistemas de potência que é de garantir a segurança das pessoas que circulam sobre e nas redondezas das malhas de aterramento e de assegurar o funcionamento estável do sistema elétrico com uma adequada continuidade de serviço e um desempenho seguro do sistema de proteção. Um aterramento elétrico bem projetado e em boas condições de operação permite a condução adequada das correntes de falta, correntes de desequilíbrio e correntes decorrentes de surtos atmosféricas e de manobra ao solo, fazendo com que seres humanos, equipamentos e animais fiquem sujeitos à distribuição de potenciais elétricos aceitáveis, dentro dos limites das normas de segurança, ou seja, que não lhes causarem danos.

Uma baixa resistência de terra não é garantia de segurança, pois não existe uma relação direta entre a resistência de aterramento e a máxima corrente a que uma pessoa é capaz de suportar (LEÓN et al., 2011), por isso além de verificar o valor da resistência de aterramento durante a análise de qualidade e eficiência de um sistema de aterramento deve-se avaliar também o estado dos condutores da malha e dos seus pontos de conexão.

Em virtude da sua importância no aspecto operacional do sistema e com relação à segurança, os sistemas de aterramento das subestações exigem uma avaliação periódica, devido não só à corrosão ou desgaste das conexões dos condutores da malha de aterramento, como também à alta resistividade do solo ou imperfeição do terreno (Ex.: pedras, composição do terreno, inclinação do solo, etc.). Além disso, é importante

ressaltar que nestas avaliações devem-se considerar as condições climáticas e sua sazonalidade, pois um solo úmido apresenta um comportamento diferente de um terreno seco (resistividade do solo úmido é inferior a de um solo seco).

A necessidade de desenvolver técnicas de medições com a subestação energizada é fundamental, pois permissões para desligamentos, de sistemas ou parte de sistemas, são cada vez mais difíceis de serem obtidas. Na Tabela 1.1 destacam-se alguns trabalhos que foram desenvolvidos, no decorrer dos anos, objetivando avaliar as condições de operação dos sistemas de aterramentos, na qual a análise se baseia em medições realizadas em campo.

Tabela 2.1- Algumas pesquisas que analisam as malhas de aterramento a partir de medições em campo.

| Autor | Título do Trabalho | Ano |
|-------------------|--|------------|
| DIAS, A.D. | Malhas de Aterramento em Subestações Energizadas: Medição e Análise | 2011 |
| León, F. A. H. | Design and Construction of a Dynamic System for Step and Touch Voltage Measurements for Grounding Systems | 2011 |
| Beltani, J.M. | Medição de Malha de Terra em Subestações Energizadas | 2007 |
| Galvani, L.V | Avaliação de malhas de terra em subestações energizadas através de medições seletivas em frequência diferente de 60 Hz | 2005 |
| Giannini, R. | “Earth Surface Potentials Measuring Device for Large Grounding Systems Testing” | 2004 |
| Meliopoulos, A.S. | A PC based ground impedance measurement instrument – “Smart Ground Multimeter(SGM)” | 1993 |

Existem publicações que buscam simular e analisar o comportamento do sistema de aterramento utilizando técnicas bastante diversificadas como Método dos Momentos (GUO et al, 2006), Método dos Elementos Finitos (SADIKU, 1989), Métodos Analíticos (GREEV et al, 1990). Com se sabe, malhas que possuem distribuição de potenciais uniforme e com valores baixos não apresentam problemas de degradação, contudo malhas que possuam concentrações elevadas de potencial em determinadas áreas podem evidenciar a sua degradação. Assim, uma forma indireta de se avaliar o estado de degradação de uma malha de aterramento, sem a necessidade do desligamento da subestação, é analisar a distribuição de potencial na área da malha e em seu entorno.

1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema eletrônico embarcado capaz de medir e mapear os potenciais superficiais de uma subestação (SE) energizada, tanto em regime nominal como na ocorrência de um curto-circuito. O sistema possui a capacidade de medir diversos pontos de potenciais distribuídos ao longo da malha de aterramento visando realizar um mapeamento dos potenciais superficiais da subestação. O sistema também é capaz de forma indireta avaliar o estado de degradação de uma malha de aterramento, sem a necessidade do desligamento da subestação e assim localizar possíveis zonas de altas resistividades, zonas de desgaste ou de descontinuidade na malha ou problemas de sazonalidade com a malha. Os dados medidos são processados com o auxílio de ferramenta computacional que utiliza o método das diferenças finitas. A análise será realizada na frequência industrial utilizando a corrente de desbalanceamento do transformador como referência para a elevação do potencial do solo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2, é realizada a fundamentação teórica sobre sistema de aterramento, suas principais características e configurações. Também se aborda neste capítulo o método numérico das diferenças finitas e apresentam-se as potencialidades da plataforma embarcada *Beagleboard* adotada como ferramenta de desenvolvimento neste trabalho.

No Capítulo 3 estão descritos os materiais empregados na concepção do sistema eletrônico embarcado e do seu antecessor o protótipo do medidor de potencial, como também a metodologia aplicada nos ensaios experimentais.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados das medições realizadas em laboratório, assim como a análise dos mesmos.

Conclui-se este trabalho no Capítulo 5, no qual se apresenta as conclusões e considerações finais.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Um sistema de aterramento é constituído basicamente de três componentes: os condutores metálicos que ligam o sistema aos eletrodos (ou hastes) de aterramento, os eletrodos de aterramento e a terra que envolve os eletrodos. O comprimento, o diâmetro e a disposição destes componentes são parâmetros determinantes na dispersão das correntes e, conseqüentemente, na resistência do sistema de aterramento e na distribuição de potencial ao longo do solo.

Os solos normalmente são heterogêneos formados por diversas camadas com resistividades e profundidades diferentes. Estas camadas, devido à formação geológica, são em geral horizontais e paralelas à superfície do solo. Fatores como tipo, teor de umidade, temperatura, compactação e pressão do solo têm influencia direta no valor da resistividade do solo.

A resistência oferecida à passagem da corrente elétrica para o solo através de um aterramento nomeia-se como “resistência de aterramento” sendo mais popularmente conhecida como “resistência de terra”. A resistência de aterramento pode ser definida pela relação entre a elevação de potencial referida ao infinito e a corrente que a gerou (VISACRO, 2002).

O tamanho do sistema de aterramento corresponde à profundidade de penetração das correntes escoadas. O grau de penetração determina as camadas do solo envolvidas com o aterramento (KINDERMANN et al, 1995). É através da haste de aterramento cravada no solo que são escoadas correntes de defeito para a terra, podendo-se considerar esses defeitos como internos (curtos-circuitos) ou externos (descargas atmosféricas). Quando uma corrente é injetada no eletrodo de aterramento aparecem na área circunscrita pelo mesmo e no seu entorno gradientes de potencial. Os gradientes têm o seu valor máximo nas proximidades do eletrodo e os valores diminuem à medida que afastam do mesmo. Considera-se como zona de influência do eletrodo de aterramento a região no solo onde o potencial varia com a injeção da corrente. Um ponto importante que define os limites da zona de influência de um eletrodo é o terra de referência. Pode-se definir “Terra de Referência” como o ponto em que o potencial não varia, quando uma dada corrente circula pelo eletrodo. Do ponto de vista estritamente teórico este ponto está no infinito, para qualquer eletrodo e qualquer corrente (CUNHA, 2003).

Para se instituir um melhor entendimento sobre a distribuição de potencial ao longo do solo, estudaram-se diferentes tipos de configuração de sistemas de aterramento, partindo da mais simples constituída por uma única haste vertical até chegar a malhas de aterramento de grande porte. E também se aborda neste trabalho o método numérico das diferenças finitas que busca simular a distribuição dos potenciais elétricos das malhas de aterramento através da medição dos potenciais de superfície de vários pontos da subestação.

2.1 HASTE VERTICAL

Uma haste cravada verticalmente em solo homogêneo é considerada a configuração existente mais simples para um sistema de aterramento. Este tipo de sistema é largamente utilizado em residências e em postes para aterrar o neutro do secundário dos transformadores de distribuição. A Figura 2.1 mostra as linhas equipotenciais de uma haste cravada em solo homogêneo.

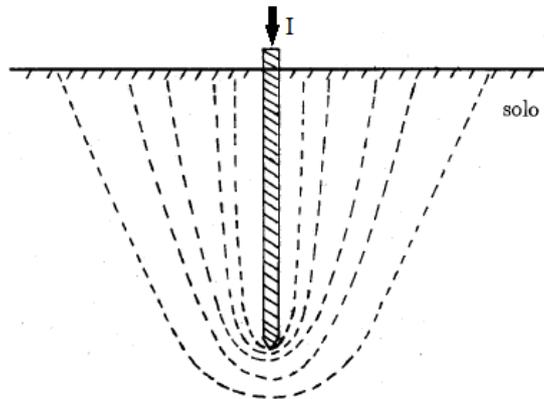


Figura 2.1– Distribuição das Linhas Equipotenciais em uma Haste Simples (Kindermann et al, 1995).

A corrente injetada no topo da haste espalha-se pela superfície do condutor e se propaga através do solo, formando superfícies equipotenciais elípticas que ao se distanciarem da haste tornam-se cada vez mais esféricas. Como comentado anteriormente o solo, na sua grande maioria, não é homogêneo, pois são compostos por camadas de diferentes resistividades. Em consequência a variação da resistividade do solo, tem-se a variação da dispersão da corrente e consequentemente a alteração da distribuição de potenciais na superfície do solo. Na Figura 2.2 são mostradas as variações sofridas pelas linhas de escoamento da corrente e pelas linhas equipotenciais, em solos onde as relações entre as resistividades das diferentes camadas ρ_1 e ρ_2 variam.

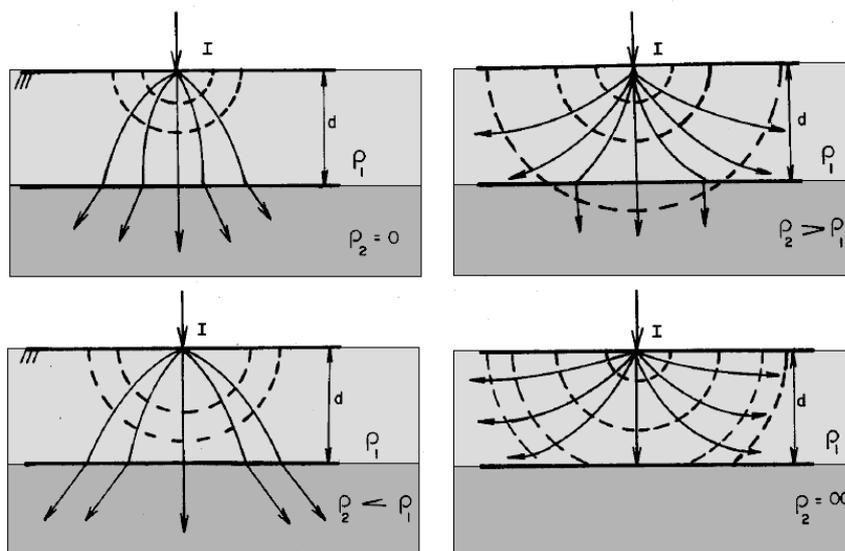


Figura 2. 2 – Comportamento dos fluxos de dispersão de correntes em um Solo Estratificado em duas camadas (Kindermann et al., 1995).

A resistência de terra de uma única haste cravada em solo homogêneo pode ser representada pela Equação 2.1 (KINDERMANN et al, 1995):

$$R_T = \frac{\rho_a}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{d} \right). \quad (2.1)$$

onde: ρ_a é a resistividade aparente do solo [$\Omega \cdot m$], L é o comprimento da haste [m] e d , é o diâmetro da haste [m].

Observando a Equação 2.1, verifica-se que a variação do valor da resistência de terra do eletrodo é mais dependente da variação do comprimento, do que da variação do diâmetro do eletrodo. Nota-se também que conforme se aumenta o comprimento da haste, diminui-se sua resistência de aterramento. Porém, chega-se a um ponto que aumentar o comprimento da haste já não é mais vantajoso, pois mesmo aumentando-se bastante o comprimento da haste, a redução da resistência será muito pequena. Portanto, há um tamanho de haste economicamente ótimo para a maioria dos casos. (SALGADO et al, 2009).

2.2 HASTES EM PARALELO

A resistência de terra de um sistema de aterramento pode ser significativamente reduzida com a instalação de hastes em paralelo. O cálculo da resistência de hastes paralelas interligadas não segue simplesmente a lei de resistências elétricas em paralelo,

devido à interferência que ocorre entre as zonas equipotenciais de cada haste, conforme apresentado na Figura 2.3.

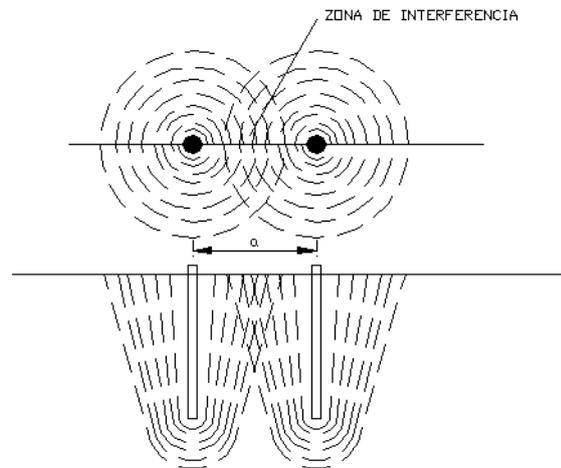


Figura 2.3 – Zona de interferência nas linhas equipotenciais de duas hastes (KINDERMANN et al., 1995).

Segundo Kindermann a zona de interferência entre as linhas equipotenciais causa uma área de bloqueio do fluxo da corrente de cada haste, resultando uma maior resistência de terra individual. Como a área de dispersão efetiva da corrente de cada haste torna-se menor, a resistência de cada haste dentro do conjunto aumenta. Isto faz com que ao se instalar duas hastes em paralelo o resultado final seja um valor de resistência menor que aquele para uma haste, porém maior que o valor da resistência para uma haste dividida por dois.

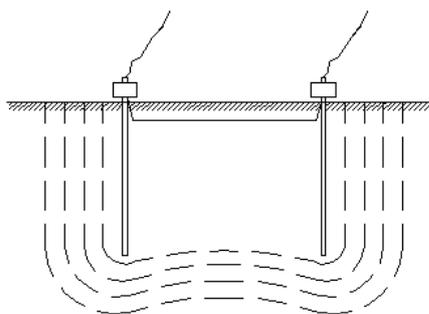


Figura 2.4 – Zona equipotencial de duas hastes (KINDERMANN et al., 1995).

Constata-se que o aumento do espaçamento entre as hastes implica na diminuição da interferência entre elas, porém um aumento muito grande torna-se economicamente inviável. Utiliza-se normalmente um espaçamento em torno do comprimento da haste, é comum se utilizar esse espaçamento em torno dos três metros.

Para a obtenção da distribuição do potencial de superfície para um sistema de aterramento formado por duas hastes em paralelo aplica-se uma diferença de potencial

entre duas hastes de aterramento (A e B), que fará circular uma determinada corrente entre as mesmas no solo, como está mostrado na Figura 2.5.

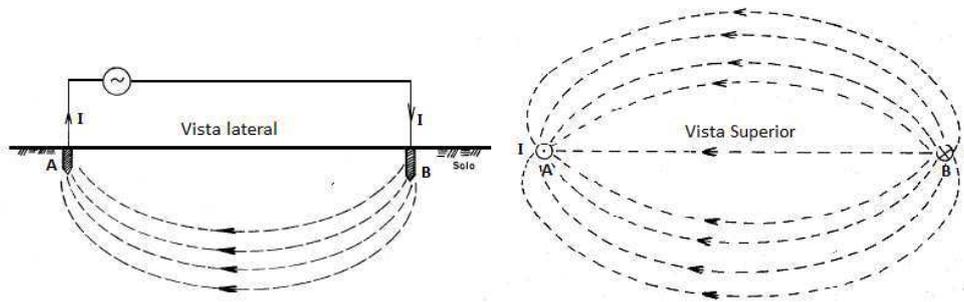


Figura 2.5 – Distribuição da corrente entre as hastes A e B (KINDERMANN et al., 1995).

As hastes A e B estão cravadas em solo homogêneo separadas uma da outra por uma distância “x”, conforme é apresentado pela Figura 2.6 (a). Conectando um dos terminais de um voltímetro à primeira haste de aterramento (A) e o outro terminal a uma haste de prova P que é cravada no solo em diferentes pontos ao longo do trajeto AB que liga as duas hastes de aterramento pode-se determinar o potencial do ponto x (onde estiver enterrada a haste de prova P) em relação ao potencial da haste A. Traçando-se a curva dos potenciais medidos para as diversas distancias “x”, obtém-se a curva de distribuição dos potenciais entre as hastes de aterramento, representado na Figura 2.6(b).

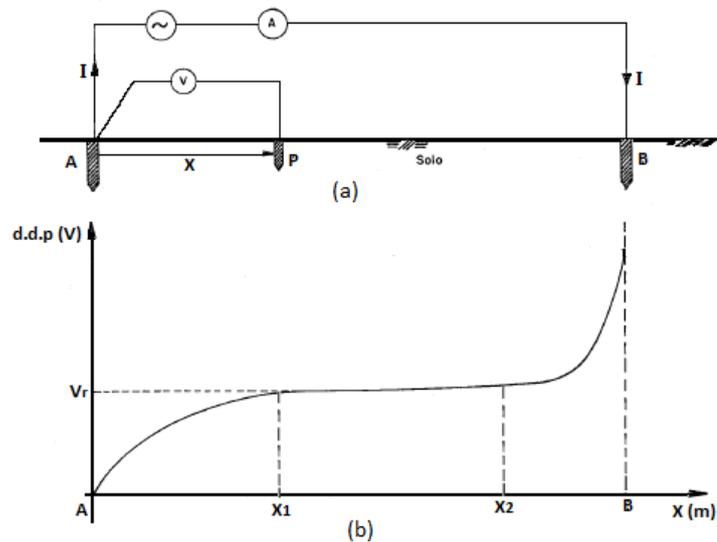


Figura 2.6 – Distribuição de potencial entre duas hastes de aterramento (a) circuito para estabelecimento da distribuição do potencial, (b) curva de distribuição do potencial.

Analisando-se as Figuras 2.5 e 2.6 verifica-se que o potencial varia na vizinhança das hastes de aterramento (AX_1 e BX_2) e é constante no trecho X_1X_2 . Assim, a distribuição de potencial é consequência do fato que a densidade de corrente no solo junto à haste é máxima. À medida que se afasta a área de condução de corrente vai se ampliando diminuindo a densidade de corrente, sendo, então, a queda de tensão desprezível entre os dois pontos. Segundo Visacro esta região é conhecida como patamar de potencial e em termos práticos pode-se dizer que o “terra de referencia” (ponto ao qual se atribui potencial zero e que está infinitamente afastado do aterramento) se localiza neste patamar. A distribuição de potencial ao longo da linha entre as hastes A e B é dada pela curva da Figura 2.7 em que ϕ_A e ϕ_B são as alturas dos cones de tensão das hastes A e B, respectivamente.

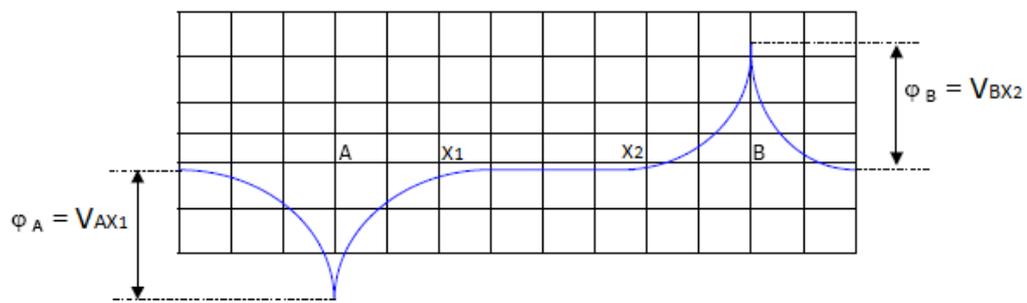


Figura 2.7 – Distribuição de potencial ao longo da linha (CAMINHA , 2001).

2.3 MALHA DE ATERRAMENTO

Os sistemas de aterramento devem ser dimensionados de tal maneira que os potenciais de superfície, decorrentes tanto de uma condição transitória de circulação de corrente de curto-circuito pelo sistema, como também durante a operação normal do sistema elétrico na qual uma corrente de desequilíbrio (desbalanço) é injetada pelo neutro do transformador na malha de terra, sejam inferiores aos máximos potenciais de passo e toque que uma pessoa pode suportar sem a ocorrência de fibrilação ventricular. No intuito de satisfazer as condições de baixa resistência a terra e de baixos potenciais de toque e de passo, as subestações elétricas costumam utilizar uma malha de terra composta de cabos horizontais em quadriculados e hastes verticais conectadas a alguns (ou todos) os nós da malha. A Figura 2.8 ilustra uma típica malha de terra e seus parâmetros geométricos. As malhas de terra são muito eficientes e econômicas, e são utilizadas em quase todas as subestações.

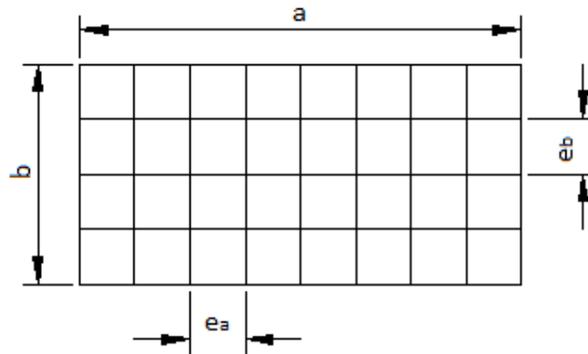


Figura 2.8 – Parâmetros geométricos de uma malha de terra retangular.

A norma IEEE Std 80-2000 define alguns conceitos importantes em relação à distribuição do potencial elétrico (Figura 2.9):

- **Tensão de Passo:** Diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo, separados pela distância de um passo de uma pessoa (1 m).
- **Tensão de Toque:** Diferença de potencial entre uma estrutura metálica e um ponto da superfície do solo, separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa (1 m).
- **Tensão de Toque máximo** – É a máxima tensão de toque encontrada em uma malha de aterramento para determinada corrente de falta.
- **Tensão de Transferência:** Elevação de potencial da malha referida a infinito, usualmente designada GPR (Grounding Potential Rise). Constitui-se no potencial a que ficaria submetida uma pessoa posicionada no terra remoto (grande distância da malha) que tivesse contato com uma parte metálica eventualmente conectada com os eletrodos do aterramento, durante o fluxo de corrente pelo mesmo.

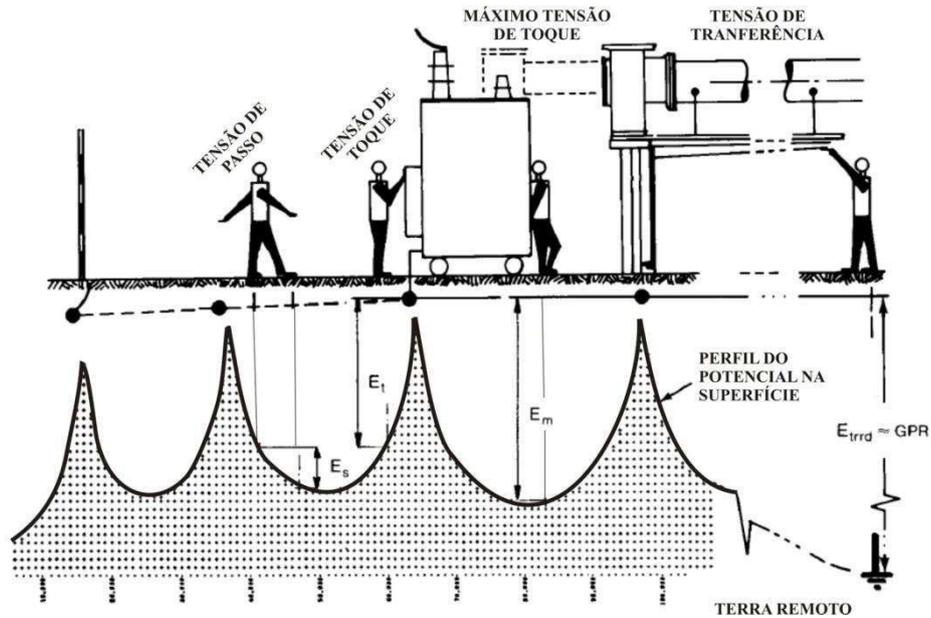


Figura 2.9 – Definição segundo a IEEE-80 de alguns conceitos de potenciais.

Numa malha de terra, a corrente de defeito escoar preferencialmente pelas bordas da malha. Isto se dá, devido à interação entre os condutores no interior da malha que forçam o escoamento da corrente pelas bordas da malha. A distribuição das linhas equipotenciais e dos potenciais no interior e no entorno de uma malha de aterramento é dado na Figura 2.10.

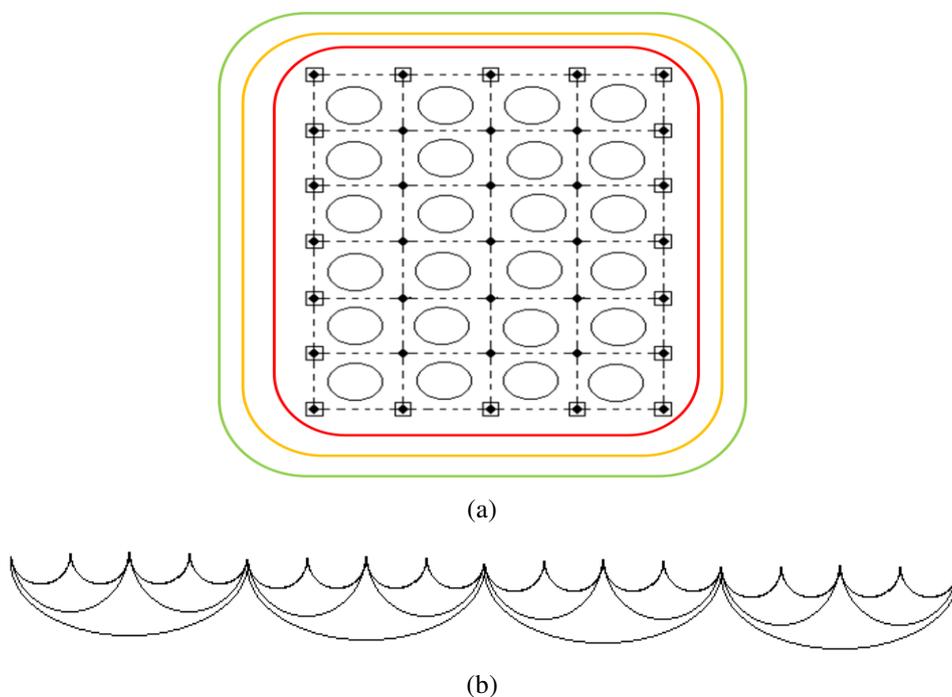


Figura 2.10 – Distribuição: (a) Linhas equipotenciais e (b) Potenciais no interior e no entorno de uma malha de aterramento.

2.4 MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

Para se determinar o potencial elétrico ao longo de toda uma região, em muitos casos quando se é conhecido o potencial V em certos pontos da região em questão, são utilizadas a equação de Poisson (Equação 2.2) ou a equação de Laplace (Equação 2.3) (SADIKU, 2003) (HAYT JUNIOR et al, 2003).

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon} \quad (2.2)$$

$$\nabla^2 V = 0, \quad (2.3)$$

onde ρ_v é a densidade volumétrica de carga e ϵ é a permissividade elétrica.

A Equação de Poisson é obtida a partir da equação de Gauss que está representada pela Equação 2.4 (HAYT JUNIOR, W. H et al, 2003).

$$\nabla \cdot \vec{D} = \nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho_v. \quad (2.4)$$

Sabe-se que $\vec{E} = -\nabla V$ (Equação 2.5) e fazendo a substituição desta equação na Equação 2.4, obtém-se a Equação 2.7, na qual para um meio homogêneo equivale a equação de Poisson.

$$\nabla \cdot (-\epsilon \nabla V) = \rho_v. \quad (2.6)$$

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho_v}{\epsilon}. \quad (2.7)$$

Para os casos em que $\rho_v=0$, indicando que a densidade volumétrica de carga é zero, mas permitindo que cargas pontuais, distribuição linear de carga ou densidade superficial de cargas existam nas fronteiras como fontes de campo, tem-se que a Equação 2.2 será igual Equação 2.3 e passará a ser chamada de Equação de Laplace, que é um caso particular da equação de Poisson. A Equação 2.8 representa a Equação de Poisson em um sistema de coordenadas tridimensional.

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = -\frac{\rho_v}{\epsilon}. \quad (2.8)$$

O mapeamento dos potenciais de superfície de uma região de interesse é obtido através da resolução da equação de Laplace pelo MDF. A resolução será realizada em quatro etapas. O primeiro passo consiste em dividir a região de interesse em uma grade de nós como se pode observar na Figura 2.11.

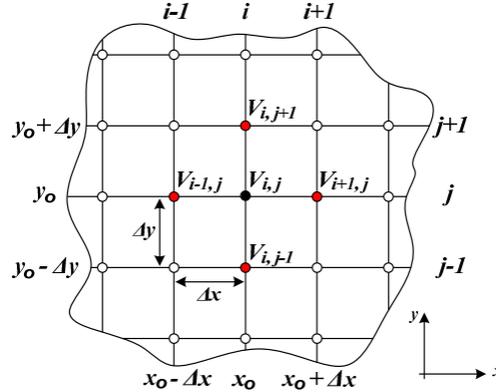


Figura 2.11 - Discretização do domínio (HAYT JUNIOR et al, 2003).

No segundo passo estabelecem-se as condições de contorno, atribuindo aos nós da grade da extremidade da região chamados de nós fixos valores de potenciais fixo. Os nós internos são denominados de nós livres.

No terceiro passo busca-se obter aproximações por diferenças finitas da equação diferencial de Poisson. No domínio bidimensional, conforme a Figura 2.11, ρ_v é substituído por ρ_s (densidade superficial de carga) e $\frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$, Então:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = -\frac{\rho_s}{\epsilon}. \quad (2.9)$$

Por definição a derivada de $V(x,y)$ em um ponto (x_0, y_0) , de forma que Δx seja um incremento suficientemente pequeno ao longo do eixo x .

$$\left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{x=x_0} \approx \frac{V(x_0+\Delta x, y_0) - V(x_0-\Delta x, y_0)}{2\Delta x} = \frac{V_{i+1,j} - V_{i-1,j}}{2\Delta x}. \quad (2.10)$$

Para a derivada segunda basta repetir o procedimento anterior a V' e assim obter a Equação 2.11 em relação ao eixo x e a Equação 2.12 em relação ao eixo y , visto que a obtenção das derivadas de primeira e de segunda ordem correspondentes ao eixo x é similar ao do eixo y .

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right|_{x=x_0} \approx \frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta x^2}. \quad (2.11)$$

$$\left. \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right|_{y=y_0} \approx \frac{V_{i,j+1} - V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta y^2}. \quad (2.12)$$

Fazendo-se $\Delta x = \Delta y = h$ e substituindo-se as Equação 2.11 e Equação 2.12 na Equação 2.9 obtém-se a Equação 2.13, que é a aproximação finita da Equação de Poisson.

$$V_{i,j} = \frac{1}{4} \left(V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1} + \frac{h^2 \rho_s}{\epsilon} \right). \quad (2.13)$$

onde h é o passo ou o incremento da malha.

Caso $\rho_s = 0$ tem-se a aproximação por diferenças finitas da Equação de Laplace, como está ilustrado em Equação 2.14.

$$V_{i,j} = \frac{1}{4} (V_{i+1,j} + V_{i-1,j} + V_{i,j+1} + V_{i,j-1}). \quad (2.14)$$

A Equação de diferenças finitas da Equação de Laplace é escrita para cada ponto da região discretizada em que se deseja calcular a solução do problema.

O quarto passo consiste em calcular de maneira iterativa o valor do potencial em todos os nós livres da grade.

O objeto de estudo deste trabalho são as malhas de aterramento das subestações de baixo e médio porte pertencentes às concessionárias de energia elétrica local, para tanto foi necessário o desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado capaz de diagnosticar as condições operacionais da malha de aterramento de subestações energizadas, tanto em regime nominal como na ocorrência de um curto-circuito. O diagnóstico se baseia em medições das tensões superficiais em vários pontos da malha de aterramento e no mapeamento dos potenciais de superfície utilizando no método das diferenças finitas.

A plataforma embarcada escolhida para o desenvolvimento do sistema foi a *Beagleboard*. A seguir serão apresentadas algumas das potencialidades desta plataforma.

2.5 SISTEMAS EMBARCADOS

Sistemas Embarcados são sistemas eletrônicos de processamento de informações embutidos em um dispositivo específico que interage com o usuário final e com o ambiente externo. Este tipo de tecnologia está cada vez mais presente em nosso cotidiano, como por exemplo, *smartphones*, PDAs, sistema de monitoramento médicos, televisões digitais e outros. Com o avanço da tecnologia, cada vez mais serão criados produtos que contenham sistemas embarcados, e à medida que aumenta a quantidade e variedade destes produtos, há acréscimo de complexidade destes sistemas devido à integração de mais componentes de *software* e de *hardware* ao sistema (GRAAF et al., 2003).

A plataforma embarcada adotada para o desenvolvimento deste trabalho foi a *Beagleboard*. As principais razões que motivaram esta escolha, em princípio, foram: (i) o custo acessível (ii) a disponibilidade de interfaces e drivers de vídeo, som e USB na plataforma (iii) possui a capacidade de se conectar a múltiplos dispositivos (arduino, microcontroladores, sensores e etc.) através dos protocolos de comunicação I2C, SPI, UART e GPIO (iv) acesso a um grande número projetos desenvolvidos que utilizam esta tecnologia (<http://beagleboard.org/project>) e várias publicações (FERNANDEZ, 2010),(TANGADPALLIWAR et al., 2011),(ABY et al., 2011), (MANKODIYA et al.,2010).

Além disso, a *Beagleboard* é capaz de trabalhar com diversas distribuições do sistema operacionais (WinCE, Angstrom, Debian, Ubuntu e Android), o que torna o desenvolvimento dos aplicativos mais flexível e adaptável às necessidades ou interesses dos projetistas, uma vez que nessas distribuições já se encontram prontas e disponíveis em seus repositórios aplicações e bibliotecas em formato binário para uso (processamentos gráficos, gerenciadores de janelas – xfce e gnome, compiladores). Este suporte não apenas facilita o desenvolvimento de novas aplicações, como também permite a adaptação de aplicações já desenvolvidas para outras arquiteturas (HACKMANN et al.,2011).

As características técnica da *Beagleboard* juntamente com a descrição da estrutura funcional do sistema eletrônico embarcado serão apresentadas na seção Materiais e Métodos, a seguir.

CAPÍTULO 3: MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo trata da apresentação dos materiais utilizados no desenvolvimento do sistema eletrônico embarcado (equipamento 2) e do seu antecessor o medidor de potencial (equipamento 1). Primeiramente, serão apresentadas as partes constituintes do protótipo do medidor de potencial, assim como suas principais funcionalidades. Em seguida, descrevem-se os materiais empregados na concepção do sistema eletrônico embarcado, como também as potencialidades deste novo sistema.

O propósito deste trabalho é desenvolver um sistema capaz de diagnosticar as condições de degradação das malhas de aterramento de subestações energizadas, tanto em regime nominal como na ocorrência de um curto-circuito, no qual o sistema é eletrônico, portátil e constituído por hardwares e softwares embarcados. No entanto inicialmente desenvolveu-se um instrumento de medição de potenciais de superfície intitulado de medidor de potencial (equipamento 1) que tem como função medir os potenciais de superfície, armazená-los internamente e posteriormente transmiti-los para o computador através da porta serial, no qual os dados transmitidos para o computador serão processados por uma rotina computacional desenvolvida no MATLAB®, que tem como finalidade gerar gráficos em duas e três dimensões que apresentam o comportamento dos potenciais na superfície do solo, tanto em condições de regime permanente como também simulando o comportamento dos potenciais na ocorrência de um curto-circuito, referentes ao mesmo ponto de referência (DIAS, 2011).

O sistema eletrônico embarcado (equipamento 2) desenvolvido neste trabalho surgiu como uma evolução do método de diagnóstico das condições operacionais da malha de aterramento energizada, que consiste na utilização do medidor de potencial para a medição dos potenciais de superfície e do computador para processar os dados. Este novo equipamento busca aperfeiçoar esta técnica integrando em um único dispositivo o sistema de medição e o mapeamento dos níveis de potencial de superfície.

3.1 PROTÓTIPO DO MEDIDOR DE POTENCIAL

O protótipo do medidor de potencial (equipamento 1) baseia-se em circuitos microcontrolados devido ao seu custo reduzido, sua capacidade de armazenamento e por possuírem um número aceitável de conversores analógico-digitais com uma resolução satisfatória (em média 10 bits). A Figura 3.1 mostra a fotografia do medidor de potencial evidenciando seus principais componentes externos.

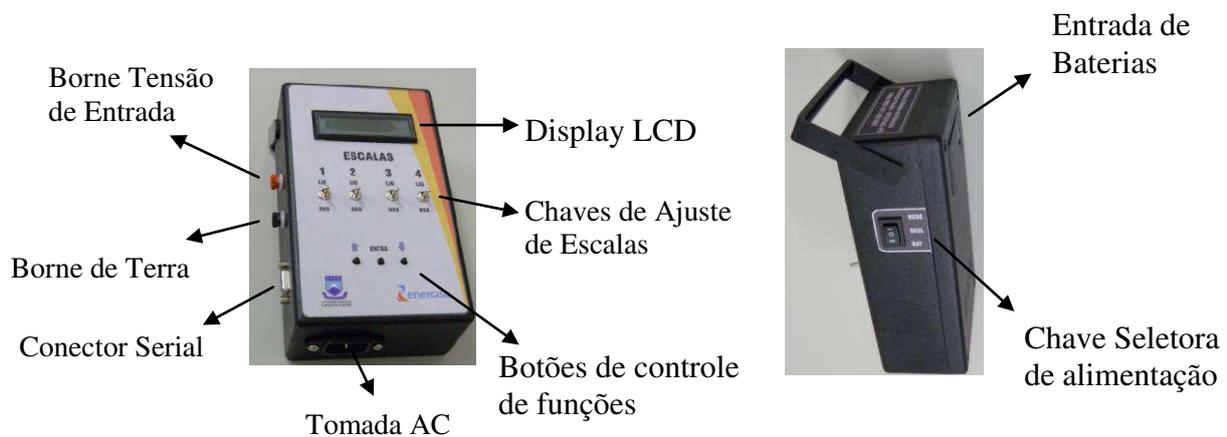


Figura 3.1 – Fotografia do Protótipo do Medidor de Potencial

O medidor de potencial é composto por:

- ❑ **Display LCD (16 x 2) :** permite a visualização da medição e o acompanhamento dos processo de medição, armazenamento das medições na memória interna e transmissão de dados para o computador.
- ❑ **Bornes de tensão de entrada (borne vermelho):** entrada analógica de tensão a ser medida pelo instrumento.
- ❑ **Borne de terra (borne preto):** conexão com o ponto de referencia que servirá de terra para o circuito de medição.
- ❑ **Conector Serial (RS-232):** ponto de conexão através do cabo serial entre o medidor de potencial e o computador (porta serial).
- ❑ **Chaves de ajuste de escala:** permite o ajuste da escala de leitura do instrumento.
- ❑ **Botões de controle de funções (↑ Incremento, ↓ Enter, Decremento):** possibilita o acesso e o controle do processo de medição,

armazenamento das medições na memória interna e transmissão de dados para o computador.

- ❑ **Chave REDE/DESL/BAT:** chave de duas posições que seleciona a fonte de alimentação do equipamento que pode ser através da rede elétrica 220V (REDE) ou por baterias de 9 V externa (BAT).
- ❑ **Tomada AC (conector para cabo de força):** conexão para a rede elétrica (220 V).
- ❑ **Entrada de baterias:** conexão para alimentação externa com baterias (9 V).

3.1.1 DESCRIÇÃO INTERNA DO MEDIDOR DE POTENCIAL

O medidor de potencial é composto por circuito condicionador (formado por divisores de tensão resistivos), circuito de proteção, circuito detector de pico, mostrador de cristal líquido (display LCD), microcontrolador PIC, porta serial, memória externa e possui a capacidade de medir e armazenar um total de 127 pontos distintos. Na figura 3.2 é ilustrado o diagrama de blocos funcionais do medidor de potencial e o seu diagrama elétrico é apresentado na Figura 3.3.

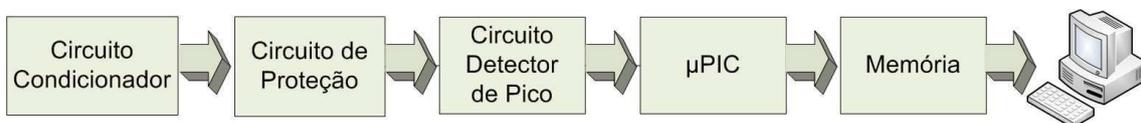


Figura 3.2 – Diagrama de blocos funcionais do medidor de potencial.

Os circuitos divisores de tensão têm como função reduzir a amplitude do sinal de entrada. Projetou-se o sistema para operar em 4 (quatro) escalas, na qual a escala 1 foi projetada para operar no intervalo de 100 mV a 25 V, a escala 2 para o intervalo de 25 V a 50 V, a escala 3 para o intervalo de 50 V a 100 V e a escala 4 para o intervalo de 100 V a 200 V. Estes circuitos realizam a conversão do sinal de entrada em um sinal proporcionalmente menor, entre 0 e 5 V, sabendo que apresentará 5 V quando na entrada do circuito estiver o valor máximo de tensão para o qual o divisor foi projetado.

O circuito de proteção tem a função de proteger o equipamento contra prováveis surtos de tensão, pois proporciona o isolamento entre a parte do sistema responsável pelo condicionamento do sinal de entrada, na faixa de 0 V a 5 V, e a parte responsável pelo microprocessamento do sinal. O circuito é formado basicamente por um buffer e dois diodos.

O circuito detector de pico tem a função de detectar as máximas tensões senoidais proveniente do circuito de proteção, gerando um sinal contínuo (DC), para cada pico (máxima tensão senoidal). Esse valor de tensão estará na faixa de 0 V a 5 V e servirá de entrada para o conversor A/D (Analogico/Digital) do microcontrolador PIC.

O microcontrolador PIC é responsável por coordenar e executar o processo de medição dos potenciais de superfície, o armazenamento das medições na memória do equipamento e posteriormente a transferências dos dados para o computador.

3.1.2 PROCESSO DE MEDIÇÃO

O processo de medição do medidor de potencial é executado pelo microcontrolador PIC 18F452, em que as leituras dos potenciais superficiais são realizadas através do conversor A/D (Analogico/Digital) do PIC e visualizadas através do display LCD.

Com o intuito de simplificar o processo de medição criou-se um *menu* de tarefas, que poderá ser acessado pelo usuário com o auxílio de 3 botões (botão de incremento, botão de Enter e o botão de decremento), e todas as funcionalidades do *menu* poderão ser visualizadas através do display LCD (ver Figura 3.1).

Inicia-se o processo de medição com a seleção das chaves de ajuste de escala para a “Escala 1”. Esta escala será a primeira a ser testada pelo sistema, caso o valor medido se encontre dentro da faixa de operação da escala, o processo de medição continuará, caso contrário será solicitado o ajuste para a próxima escala. O equipamento limita-se a medir diferenças de potenciais inferiores a 200 V.

O fluxograma, mostrado na figura 3.3, apresenta os passos executado durante o processo de medição.

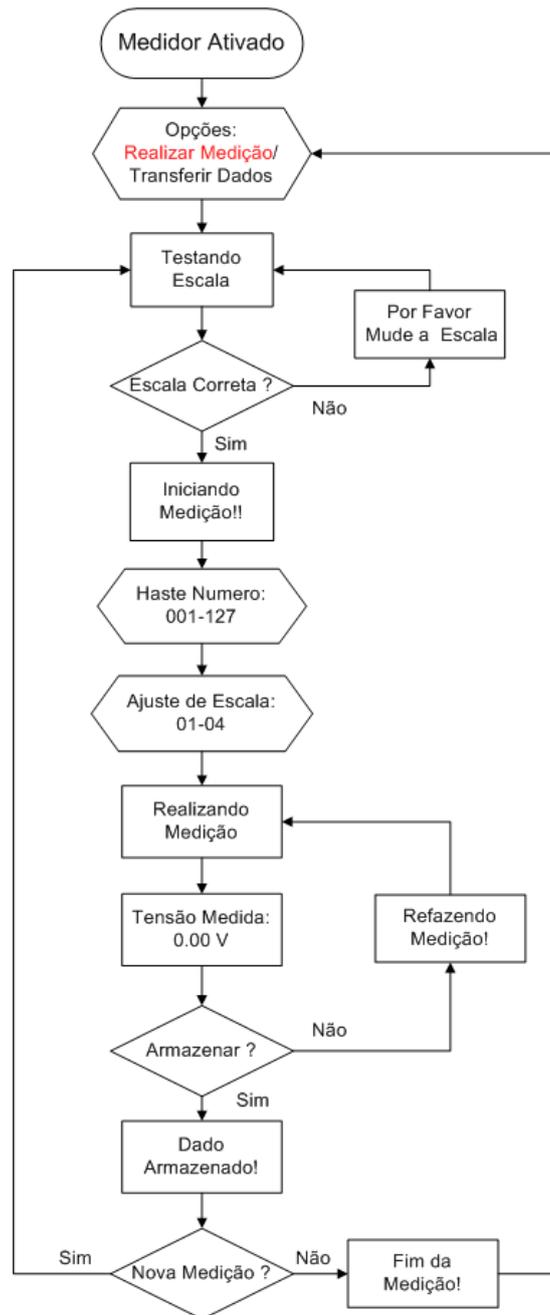


Figura 3.3 – Fluxograma do processo de medição do medidor de potencial.

3.1.3 PROCESSO DE TRANSMISSÃO DE DADOS

Finalizado o processo de medição inicia-se o processo de transmissão de dados para o microcomputador através da porta serial RS-232. O medidor de potencial conecta-se ao microcomputador com o auxílio do cabo serial. O fluxograma, mostrado na figura 3.4, apresenta os passos executado durante o processo de transmissão.

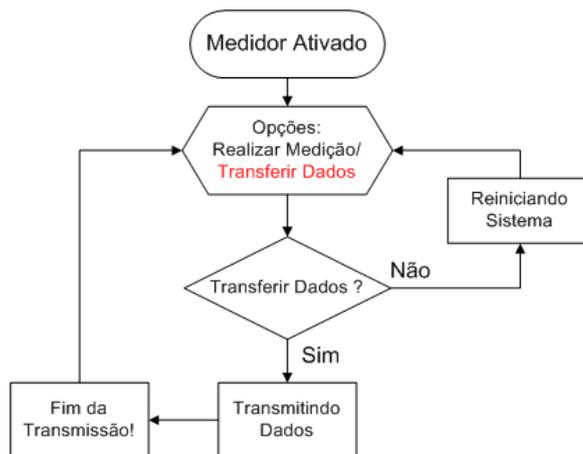


Figura 3.4 – Fluxograma do processo de transmissão do medidor de potencial.

Após o desenvolvimento do medidor de potencial e da consolidação da técnica de diagnósticos das condições operacionais das malhas de aterramento de subestações energizadas (DIAS, 2011), decidiu-se aperfeiçoar esta técnica construindo um equipamento mais moderno e versátil que reúne diferentes tecnologias em um único dispositivo, capaz de medir e processar os níveis de potencial na superfície do solo, dentro e fora dos limites da malha de aterramento, no intuito de proporcionar o monitoramento periódico dos níveis de potenciais de subestações, sem a necessidade de desligamento das mesmas. Vale salientar que o medidor de potencial foi o primeiro equipamento desenvolvido neste trabalho com a função de realizar as medições dos potenciais de superfície das subestações. Embora o medidor de potencial (equipamento 1) se apresente com padrão de qualidade, robustez e eficiência altos, o seu desenvolvimento é considerado como o primeiro passo para o seu aperfeiçoamento. Assim, com o intuito de se obter um sistema capaz de diagnosticar as condições de degradação das malhas de aterramento de subestações energizadas, tanto em regime nominal como na ocorrência de um curto-circuito, que seja eletrônico, portátil e constituído por hardwares e softwares embarcados foi idealizado um novo equipamento denominado de: Sistema Eletrônico Embarcado (equipamento 2), que será apresentado a seguir.

3.2 SISTEMA ELETRÔNICO EMBARCADO

O sistema eletrônico embarcado consiste na reunião de diversas tecnologias: sistema de medição baseado em circuitos microcontrolados e rotina computacional para análise dos potenciais de superfície, que serão gerenciados pela plataforma embarcada *Beagleboard*. Na Figura 3.5 é apresentado o digrama de blocos do sistema eletrônico embarcado e na Figura 3.6 a fotografia do sistema desenvolvido, está ilustrada.

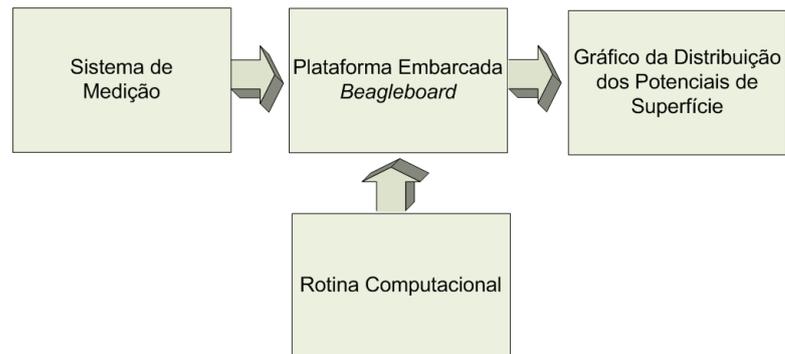


Figura 3.5 – Diagrama de blocos funcionais do sistema eletrônico embarcado.



Figura 3.6 – Fotografia do sistema eletrônico embarcado.

3.2.1 SISTEMA DE MEDIÇÃO

O sistema de medição do equipamento 2 (sistema eletrônico embarcado) fundamenta-se no medidor de potencial (equipamento 1), porém apresenta inovações como à automatização do ajuste de escalas através da utilização da chave analógica/multiplexadora, o aumento na faixa de medição e na precisão na aquisição das leituras dos potenciais de superfície. Além disso, substitui-se o circuito do detector de pico pela lógica computacional no PIC. O desenvolvimento do sistema de medição

caracteriza-se como uma evolução do medidor de potencial, no qual os circuitos foram otimizados e as funcionalidades do microcontrolador PIC foram mais bem aproveitadas. Na figura 3.7 é ilustrado o diagrama de blocos funcionais do sistema de medição do sistema eletrônico embarcado e o seu diagrama elétrico é apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.7 – Diagrama de blocos funcionais do sistema de medição do sistema eletrônico embarcado.

O circuito condicionador é composto por divisores de tensão resistivos e amplificadores operacionais e possui como função atenuar os sinais de entrada quando os mesmos forem elevados, sendo o limite máximo da tensão de entrada igual a 200 V, e amplificar as tensões de entrada quando as mesmas forem baixas (aquisição de valores próximos de zero), objetivando aumentar a faixa de medição do equipamento e melhorar a precisão de aquisição das leituras dos potenciais de superfície. O novo sistema de medição opera em 8(oito) escalas, nas quais quatro delas amplificam os valores de medições baixos e as outras quatro atenuam as elevadas tensões e cujo o ajuste automático é realizado através da interação da chave analógica e do microcontrolador PIC. O controle de ajuste do sistema de medição segue os mesmos princípios do medidor de potencial: testam-se inicialmente as escalas mais baixas (que operam em milivolts), caso o valor medido se encontre dentro da faixa de operação da escala executa-se a medição, caso contrário o PIC ajustará a chave analógica para que o sistema opere na próxima escala.

O circuito de proteção está acoplado ao circuito condicionador e é responsável por assegurar que o sinal de entrada do conversor A/D (Analogico/Digital) do microcontrolador PIC não ultrapasse os 5 volts. Ele é composto basicamente de diodos e amplificadores operacionais.

O microcontrolador PIC tem como função controlar o ajuste automático das escalas de medição através da chave analógica/multiplexadora (CD 4051), detectar as máximas tensões senoidais de entrada (detector de pico), coordenar e executar o processo de medição dos potenciais de superfície e transferir os dados medidos para a *Beagleboard* via comunicação serial/USB.

O processo de medição é efetuado pelo microcontrolador PIC 18F452, no qual as medições dos potenciais de superfície são realizadas através do conversor A/D (Analógico/Digital) do PIC e visualizadas na rotina computacional executada na *Beagleboard*. O fluxograma, mostrado na figura 3.8, apresenta os passos executado durante o processo de medição.

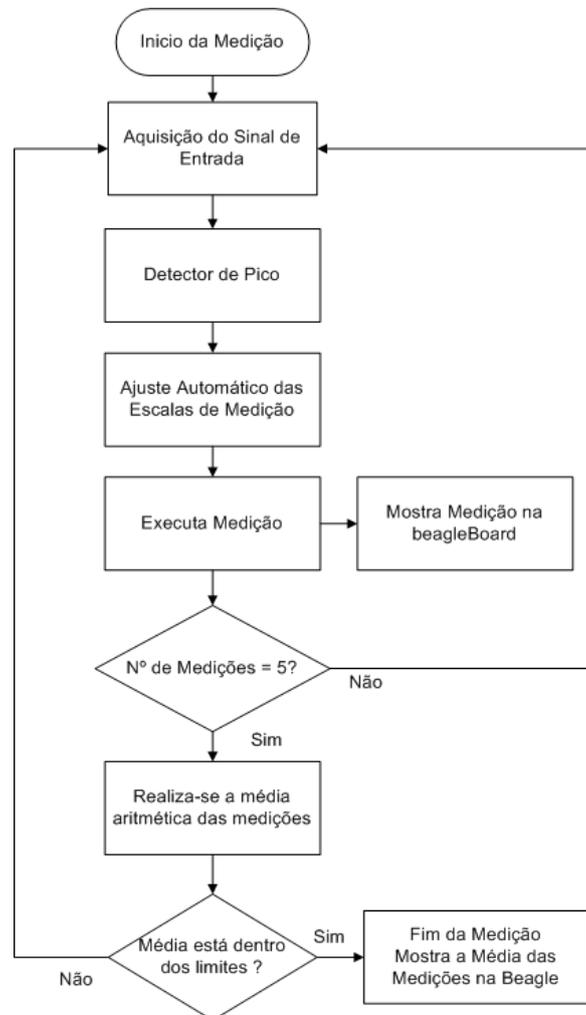


Figura 3.8 – Fluxograma do processo de medição do sistema eletrônico embarcado.

No intuito de estabelecer um mapeamento dos potenciais de superfície mais eficiente adotaram-se as seguintes medidas no processo de medição:

- Executar a medição cinco vezes e depois tirar a média aritmética destas medições, pois se observou que os valores medidos oscilavam entre uma medição e outra;

- Verificar se a média dos valores medidos está na faixa de + 10% e -10% do quinto (5º) valor de medição, visando filtrar prováveis harmônicos durante as medições;

A comunicação entre o sistema de medição e a *Beagleboard* é realizada parte via serial através do CI MAX 232 e do conector RS232 (saída do sistema de medição) e parte via USB através do adaptador serial USB que se conecta a *Beagleboard*. Esta comunicação mista justifica-se pelo fato que a única porta serial da plataforma embarcada *Beagleboard* está sendo usada para estabelecer a comunicação da *Beagleboard* com a *BeagleTouch* (display touchscreen). Estes dispositivos serão apresentados no tópico seguinte.

3.2.2 PLATAFORMA EMBARCADA: *BEAGLEBOARD*

No desenvolvimento do sistema eletrônico embarcado utilizou-se a plataforma embarcada *Beagleboard C4* que serve como módulo base para um display touchscreen intitulado de *BeagleTouch* e um módulo de bateria conhecido como *BeagleJuice*.

A *Beagleboard* é uma plataforma OSHW (Open Source Hardware) desenvolvida pela Texas Instruments que apresenta todas as funcionalidades de um computador básico. Suas dimensões são compactas, mede aproximadamente 7,8 x 7,6 cm e possui baixo consumo de energia e baixa dissipação de calor, necessitando apenas de uma fonte de alimentação de 5volts. Na Figura 3.9 apresentam-se as principais características da *Beagleboard C4* fornecidas pelo fabricante.

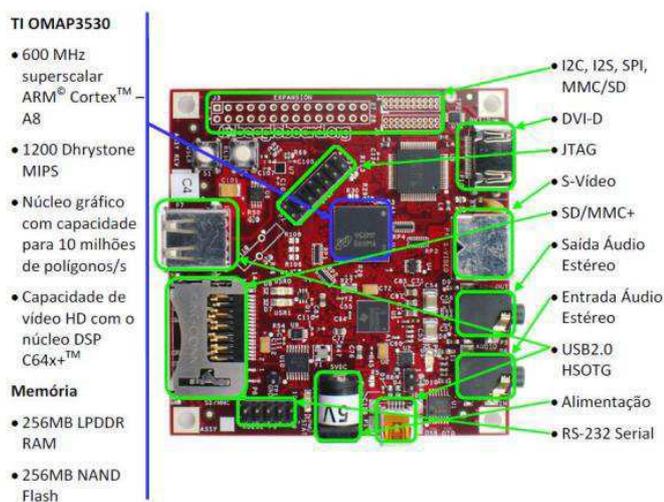


Figura 3.9 – Características técnicas da *Beagleboard C4*(FERNANDEZ, 2010).

A *BeagleTouch* é um display touchscreen (OLED) projetado como módulo de visualização da *Beagleboard* que possui uma resolução de 480×272 pixels e 262K cores. Uma imagem da *BeagleTouch* conectada a *Beagleboard* C4 é apresentada na figura 3.10.



Figura 3.10 –*BeagleTouch* acoplada a *Beagleboard*.

A *BeagleJuice* é uma bateria recarregável (Li-ion) de 4500 mAh capaz de fornecer uma tensão de 5 V por 6,5 horas. Ela pode ser carregada através da mini-porta USB, e uma segunda porta mini-USB também está disponível para um carregamento acelerado. A figura 3.11 mostra uma imagem da *BeagleJuice*.



Figura 3.11 – *BeagleJuice*.

A plataforma embarcada *Beagleboard* é compatível com diversos sistemas operacionais disponíveis no mercado. No entanto, buscando manter o custo do desenvolvimento baixo, optou-se pela utilização do sistema operacional Linux, cuja distribuição adotada foi a Angstrom.

A *Beagleboard* C4 é responsável por coordenar o processo de mapeamento dos níveis de potenciais que foram coletados pelo sistema de medição e transferidos para *Beagleboard* via comunicação serial/USB. O processo de mapeamento é executado pela rotina computacional implementada em Qt e tem como objetivo diagnosticar as

condições de aterramento de subestações energizadas, assunto tratado no tópico a seguir.

3.2.3 ROTINA COMPUTACIONAL

A rotina computacional tem como objetivo evidenciar as condições operacionais das malhas de terra em subestações energizadas. Ela é capaz de mapear os potenciais na superfície da malha e em suas circunvizinhanças, indicando as possíveis concentrações de campo ou as dificuldades da malha em escoar a corrente elétrica, externando as prováveis zonas de alta resistividade, zonas de desgaste ou de descontinuidade na malha, tanto em regime nominal como na ocorrência de um curto-circuito.

O desenvolvimento da rotina computacional teve como base o trabalho de dissertação de Dias (2011) e fundamenta-se no Método das Diferenças Finitas (MDF), que é uma técnica numérica que possibilita a resolução de equações diferenciais parciais, tais como as equações de Laplace, pela delimitação de um domínio e por condições de contorno e/ou condições iniciais. De forma que através desta técnica e com auxílio de recursos computacionais torna-se possível simular o comportamento do potencial elétrico numa determinada região.

Para o desenvolvimento da rotina foi utilizada a plataforma de desenvolvimento QtCreator, o framework Qt e algumas bibliotecas, como por exemplo, Qwt (QtWidgets for Technical Applications) para plotagem de gráficos. O QtCreator é uma ferramenta multiplataforma para desenvolvimento de aplicações com interfaces gráficas de usuário (GUI –Graphic User Interface), focada em Qt e amplamente utilizada em sistemas embarcados e o Qt é um importante framework para desenvolvimento de aplicações gráficas em C++ envolvendo recursos aprimorados de interação entre computador e usuário, como emprego de botões, caixas de texto, menus e atalhos do teclado, entre outros. A biblioteca gráfica Qwt dispõe de diversos tipos de estruturas de dados para o traçado de gráficos bidimensionais para uso técnico – científico. Estes incluem escalas, controles deslizantes, discos, bússolas, termômetros, rodas e botões para controlar ou exibir valores, vetores, etc.

A rotina computacional desenvolvida em Qt possui como dados de entrada e condição de contorno, os valores dos potenciais de superfície medidos pelo sistema de medição, assim como suas respectivas coordenadas e o fator de curto-circuito.

As interfaces gráficas desenvolvidas para facilitar ao usuário operar o sistema eletrônico embarcado serão apresentadas a seguir, de acordo com a dinâmica de execução do processo de medição abordado no tópico 3.2.1.

Na Figura 3.12 é apresentada a tela inicial do sistema eletrônico embarcado que possibilita ao usuário executar as medições em campo, na qual os botões representam os pontos internos e externos a malha de aterramento da subestação que serão medidos.

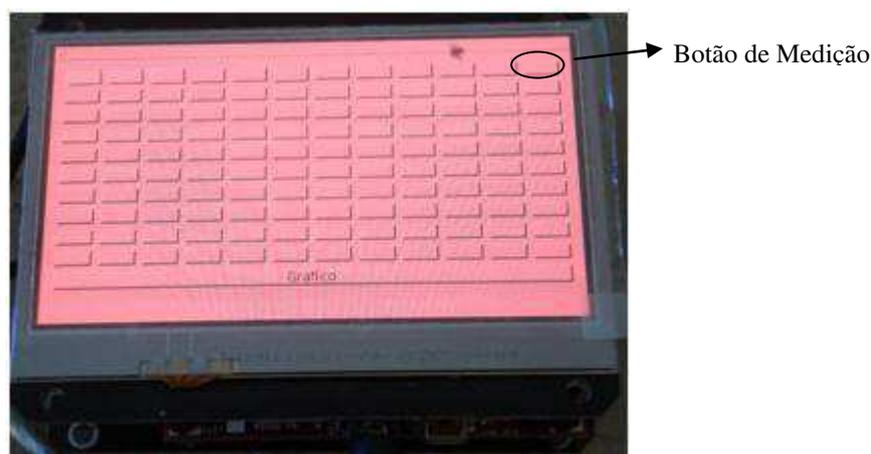


Figura 3.12 – Fotografia da interface gráfica do sistema eletrônico embarcado (Tela Inicial).

Ao clicar em um dos botões de medição da tela inicial do sistema eletrônico embarcado aparecerá uma janela de medição (ver figura 3.13), na qual o sistema de medição, apresentado no tópico 3.2.1, iniciará a aquisição dos potenciais de superfície de um determinado ponto da subestação. Durante o processo de medição executam-se cinco medições e a cada medição seu valor é visualizado no campo “Tensão” da janela de medição, como mostrado na figura 3.13. Após a execução das cinco medições exigidas no processo, o sistema de medição realiza a média aritmética das mesmas e o seu valor é apresentado no campo “Tensão” da figura 3.13 e o botão “OK” é habilitado.

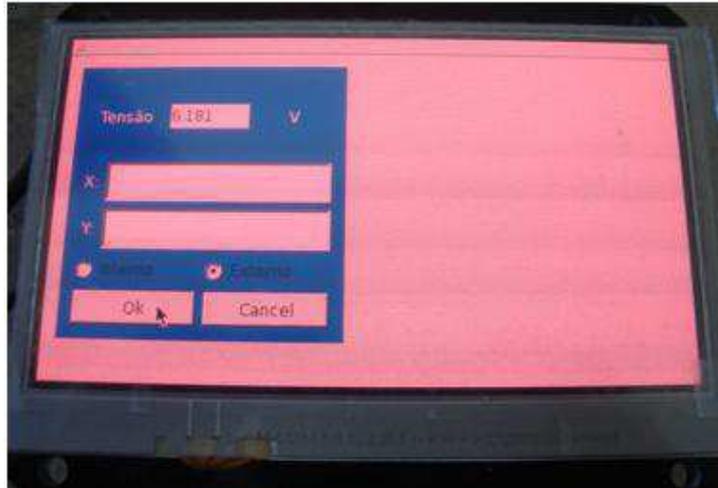


Figura 3.13 – Fotografia da janela de medição do sistema eletrônico embarcado.

Em seguida o usuário deve entrar com as respectivas coordenadas x e y referentes ao ponto de medição através do teclado que aparecerá quando o cursor for posicionado nos campos das coordenadas “X” e “Y”, como apresentado na figura 3.14, e indicar através dos campos “Interno” ou “Externo” se o ponto de medição é interno ou externo a malha de aterramento.



Figura 3.14 – Fotografia da janela de medição + teclado para entrada de coordenadas do sistema eletrônico embarcado.

Preenchidos os campos solicitados na janela de medição, clica-se no botão “OK”, a média das medições é associada às coordenadas inseridas pelo usuário e regressa-se para a tela inicial do sistema, na qual o botão de medição ficará azul caso o ponto de medição for externo a malha de aterramento ou laranja caso o ponto de medição for interno a malha, como mostrado na figura 3.15.

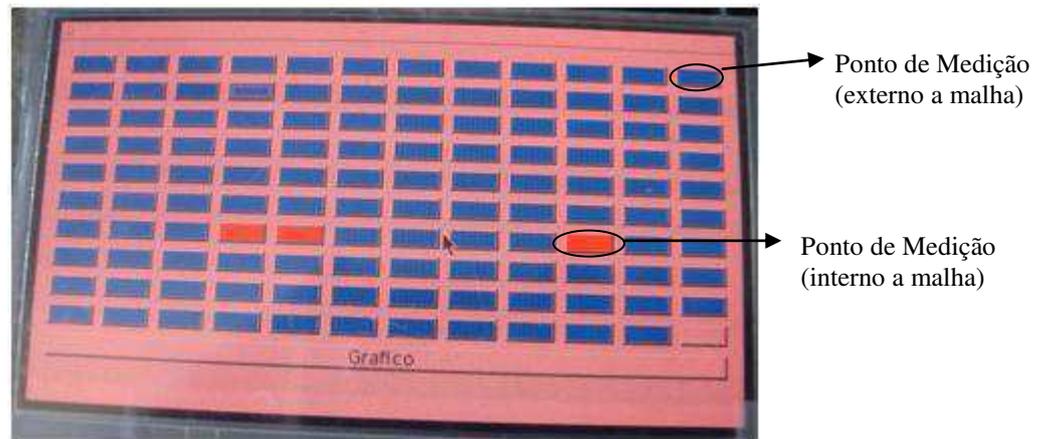


Figura3.15 – Fotografia da visualização dos pontos de medição internos e externos da malha de aterramento.

Concluída a aquisição de todos os pontos de medição (níveis de potencial de superfície) da malha de aterramento, para que o gráfico seja plotado deve-se pressionar o botão “Grafico”, inicialmente aparecerá uma janela de “Fator de curto-circuito”, na qual caso o usuário deseje realizar o mapeamento dos níveis de potencial de superfície durante um curto-circuito, ele deve informar no campo indicado pela figura 3.16 o fator de curto-circuito respectivo aquela determinada malha de aterramento, que é dado pela relação equação 3.1.

$$F_{cc} = \frac{I_{cc}}{I_{x0}}, \quad (3.1)$$

em que F_{cc} é o fator de curto-circuito, I_{x0} é a corrente do neutro do transformador (medido durante as medições) e I_{cc} é a corrente de curto fase-terra (dado de projeto da malha de aterramento).

Caso o usuário deseje visualizar a distribuição dos potenciais de superfície em regime permanente, ele assume que o fator de curto-circuito é 1, valor este considerado como *default* na rotina computacional do sistema eletrônico embarcado.

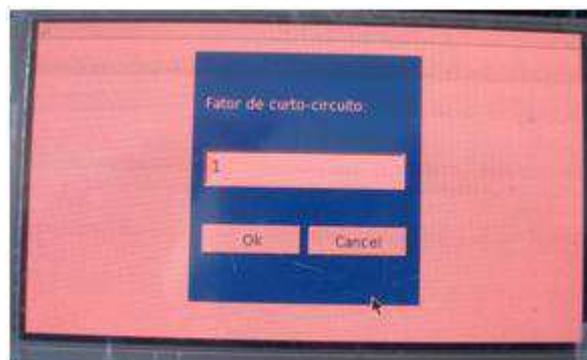


Figura 3.16 – Fotografia da janela do fator de curto-circuito do sistema eletrônico embarcado.

Para que o gráfico com o mapeamento dos níveis dos potenciais de superfície da malha de aterramento seja plotado pelo sistema eletrônico embarcado, deve-se pressionar o botão “OK” da janela de fator de curto-circuito. A rotina computacional dispõe das opções de apresentação do gráfico no formato de espectrograma e/ou linhas equipotenciais, nos quais são atribuídas cores distintas para os diferentes níveis de tensão medidos, como se pode observar na figura 3.17. Assim como, o sistema apresenta as alternativas de plotar vários gráficos em diferentes janelas (ver figura 3.18) e os mesmos podem ser salvos no formato *portable document format* (PDF).

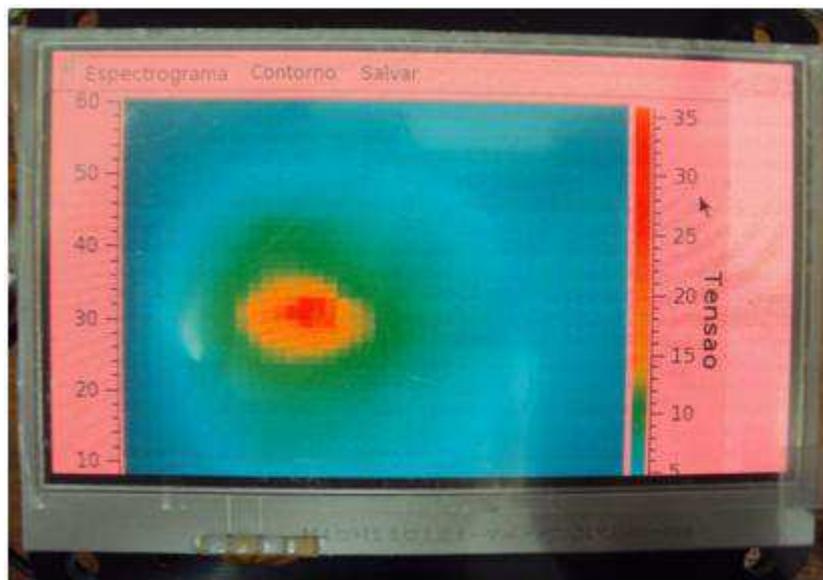


Figura 3.17– Fotografia do gráfico do mapeamento dos níveis de potencial superficial da malha de aterramento no sistema eletrônico embarcado.

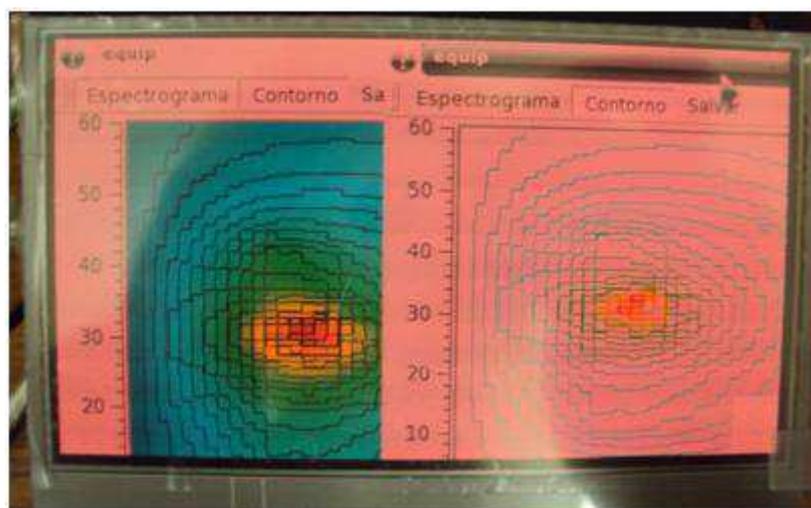


Figura 3.18– Fotografia dos gráficos com formatos distintos plotados em diferentes janelas no sistema eletrônico embarcado.

O sistema eletrônico embarcado oferece ao usuário a opção de aumentar o zoom em uma dada região do gráfico e ao posicionar o curso em um determinado ponto do gráfico são apresentadas as coordenadas do mesmo, como ilustrado na figura 3.19. Na figura 3.20 mostra-se o aumento do zoom aplicado a uma dada região do gráfico da figura 3.19.

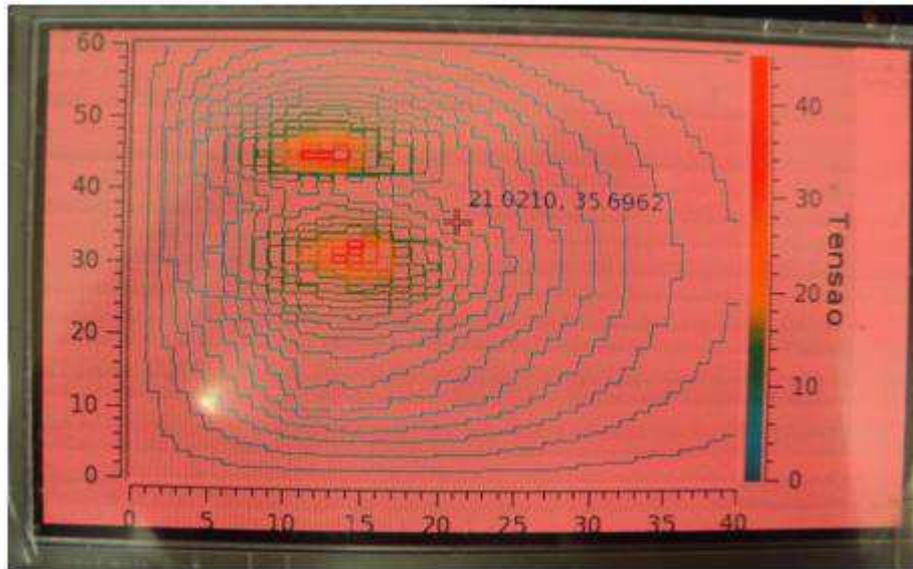


Figura 3.19– Fotografia do gráfico que apresenta as coordenadas de um determinado ponto indicado pelo curso.

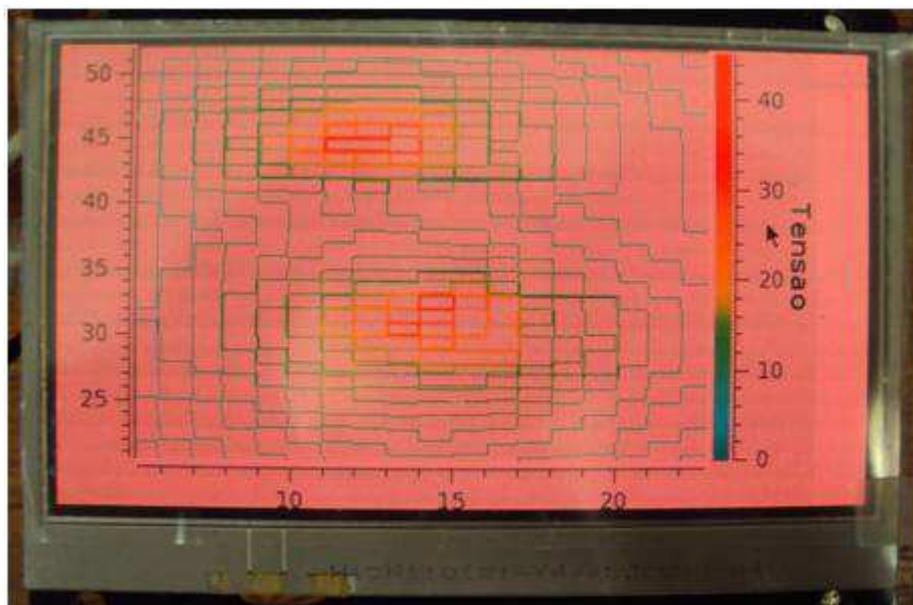


Figura 3.20– Fotografia do aumento do zoom aplicado a uma dada região do gráfico da figura 3.19.

Os gráficos apresentados nas figuras anteriores são resultados das medições realizadas em laboratório, com o objetivo de testar o funcionamento do sistema eletrônico embarcado. Os detalhes sobre a metodologia aplicada nestas medições serão expostos a seguir.

3.3 ENSAIOS DE MEDIÇÕES DA MALHA DE ATERRAMENTO

Com o intuito de verificar o desempenho do sistema eletrônico embarcado, foram realizados ensaios de medições das tensões superficiais da malha de aterramento em laboratório, no qual se construiu uma malha de aterramento composta por três hastes de cobre, com 1,20 m de comprimento, interligadas na forma de um triângulo equilátero através de cabos de cobre. A malha de aterramento localiza-se em terreno heterogêneo com resistência de aterramento $8,46 \Omega$, e configura-se nas dimensões $2,5 \times 2,5 \times 2,5 \text{m}$ com a profundidade de 0,50m com relação à superfície do solo.

Os ensaios foram realizados utilizando-se um transformador de tensão variável (*Varivolt*) que busca simular a corrente de desequilíbrio (desbalanço) injetada na malha através do neutro do transformador durante as medições, visto que o sistema eletrônico embarcado foi desenvolvido para realizar medições em malhas de aterramento energizadas. Na figura 3.21 é mostrada a fotografia do *varivolt* utilizado nas medições.



Figura 3.21– Fotografia do *varivolt* utilizado nas medições.

O processo de medição dos potenciais de superfície no solo consiste em medir a diferença de potencial entre diferentes pontos (internos e externos) da malha de

aterramento com relação um ponto de referência situado suficientemente longe da malha de aterramento. Para realização dos ensaios, além do sistema eletrônico embarcado desenvolvido utilizou-se: hastes de cobre para estabelecer o contato com o solo e demarcar os ponto de medições, como também o ponto de referência, nas quais foram cravadas com auxílio de uma marreta a 20 cm de profundidade do solo; trenas com capacidade de medição de 30 m e 5 m com o objetivo de definir corretamente coordenadas de cada ponto de medição e alocar as hastes nestes determinados pontos para a execução das medições; dois rolos de cabos isolados com comprimentos de 20 m e 100 m, ambos com bitolas de 2,5 mm²; dois multímetros e um alicate amperímetro utilizados para monitorar a corrente de injetada na malha de aterramento no momento da medição e a tensão apresentada pelo *varivolt*.

Inicia-se o processo de medição com a determinação do posicionamento dos prováveis pontos de medição, como também da localização do ponto de referência. Os pontos de medições deverão ter suas coordenadas anotadas e bem definidas, pois estas coordenadas juntamente com seus respectivos valores dos potenciais de superfície compõem um conjunto de variáveis de entrada da rotina computacional que realizará o mapeamento dos potenciais superficiais no solo.

No Capítulo 4 serão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados de acordo com a metodologia abordada nesta seção.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E ANÁLISES

Neste Capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios de medição dos potenciais de superfície de uma malha de aterramento energizada que foram realizados no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Campina Grande.

Inicialmente utilizou-se o sistema eletrônico embarcado para a medição e mapeamento dos potenciais de superfície de um malha de aterramento em condições normais de operação, ou seja, sem falhas. Este estudo caracterizou-se como caso 1.

Em seguida estudou-se o caso 2, no qual se simulou na malha de aterramento uma falha através da injeção de corrente em uma haste de cobre cravada no solo a uma determinada distância da malha de aterramento.

Por fim, é realizada a comparação entre os valores medidos pelo sistema eletrônico embarcado e os apresentados pelo osciloscópio, no intuito de validar as medições realizadas pelo sistema desenvolvido.

4.1 CASO 1: MALHA DE ATERRAMENTO SEM FALHAS

Para que a rotina computacional apresente a distribuição dos níveis de potencial de forma eficiente, faz-se necessário realizar anotações a respeito da exata localização de cada ponto de medição (coordenadas dos pontos de medição no terreno). Indica-se que um esboço do terreno seja desenhado antes do início das medições. Na Figura 4.1 é ilustra um esboço do terreno, na qual se encontra a malha de aterramento com a indicação dos pontos de medição e suas respectivas coordenadas (x e y) utilizados nos ensaios de medição dos potenciais de superfície.

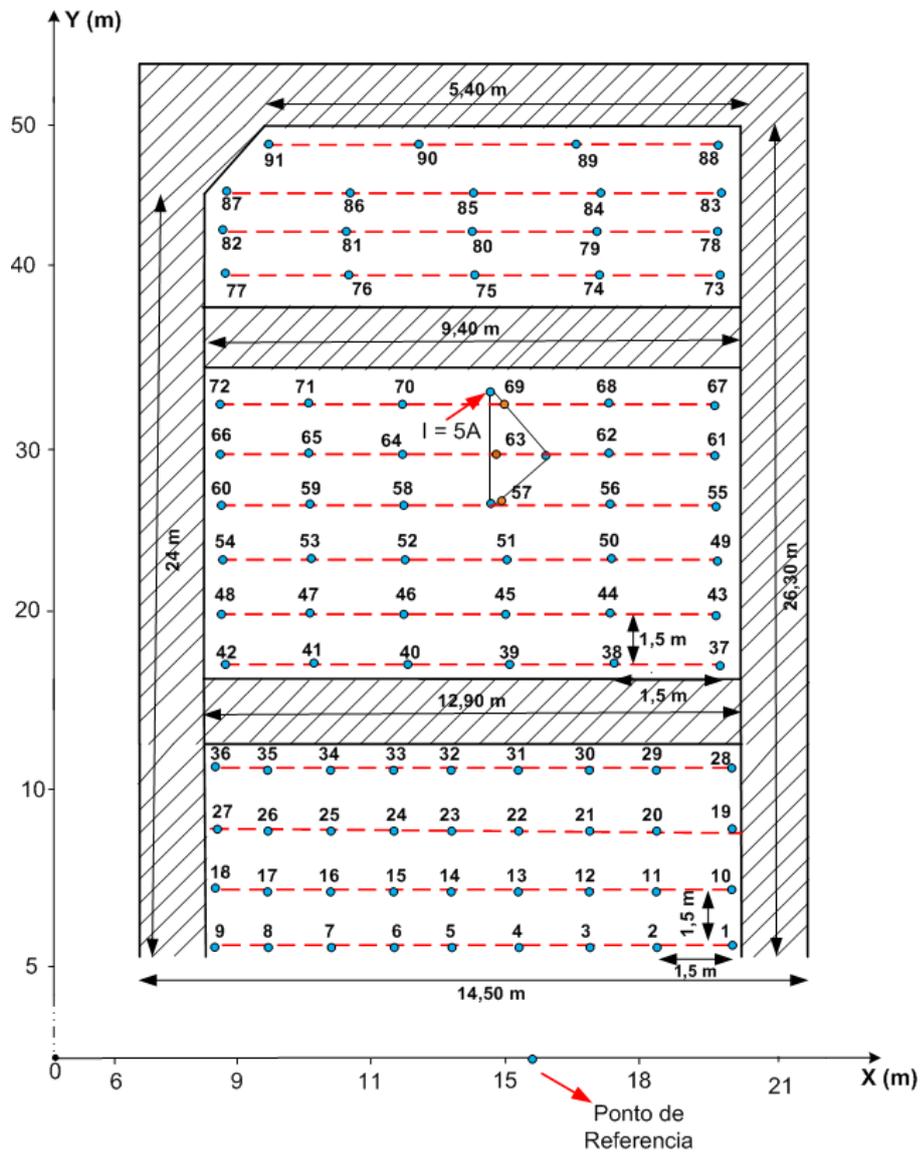


Figura 4.1 – Esboço das medições de potenciais de superfície de uma malha de aterramento (sem falhas) realizadas em laboratório.

As medições dos potenciais de superfície foram realizadas de acordo com a metodologia apresentada na seção 3.3 – Ensaio de medição de malha de aterramento do capítulo anterior, com o propósito de verificar a capacidade do sistema eletrônico embarcado de medir e mapear a distribuição dos potenciais no solo visando avaliar de forma indireta o estado de degradação da malha de aterramento.

No ensaio realizado em laboratório foram medidos 91 pontos, espaçados em média 1,5 m uns dos outros, o ponto de referência foi posicionado a uma distância de 48 m da malha de aterramento e injetou-se uma corrente de desequilíbrio de 5 A na malha.

Os resultados fornecidos pelo sistema eletrônico embarcado, para as condições de regime permanente, estão apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 que respectivamente ilustram a distribuição dos potenciais de superfície e as linhas equipotenciais presentes no solo. No gráfico da figura 4.4 é mostrado a combinação dos dois gráficos apresentados anteriormente (nas figuras 4.2 e 4.3).

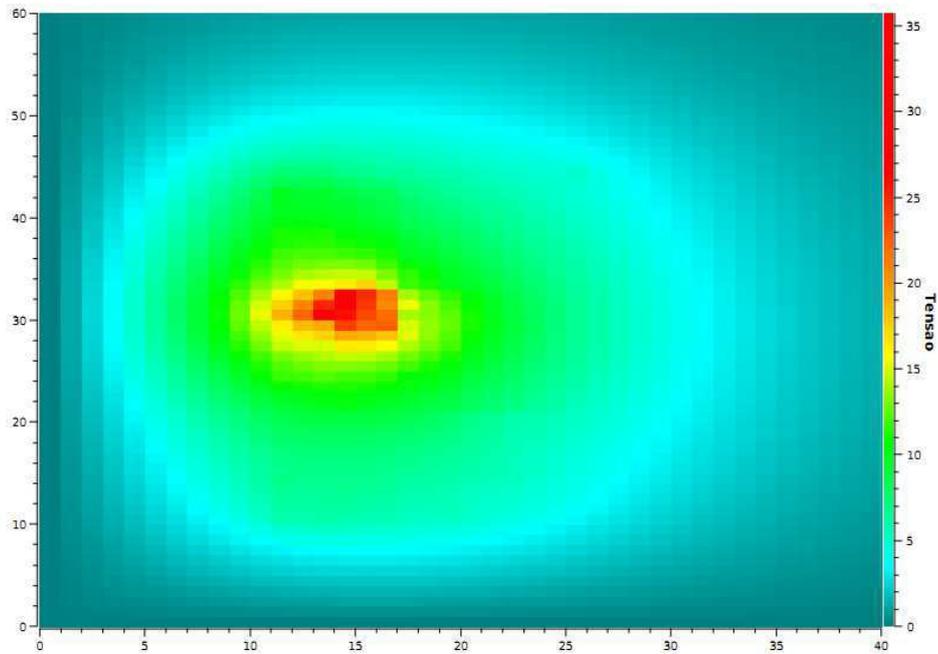


Figura 4.2– Níveis de potencial superficial da malha de aterramento sem falhas.

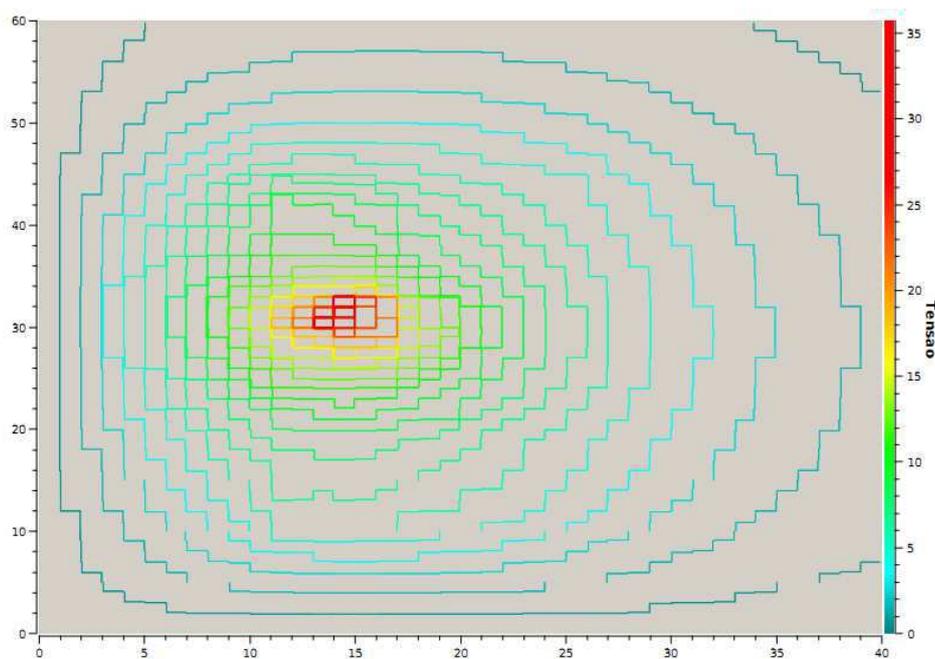


Figura 4.3– Linhas equipotenciais da malha de aterramento sem falhas.

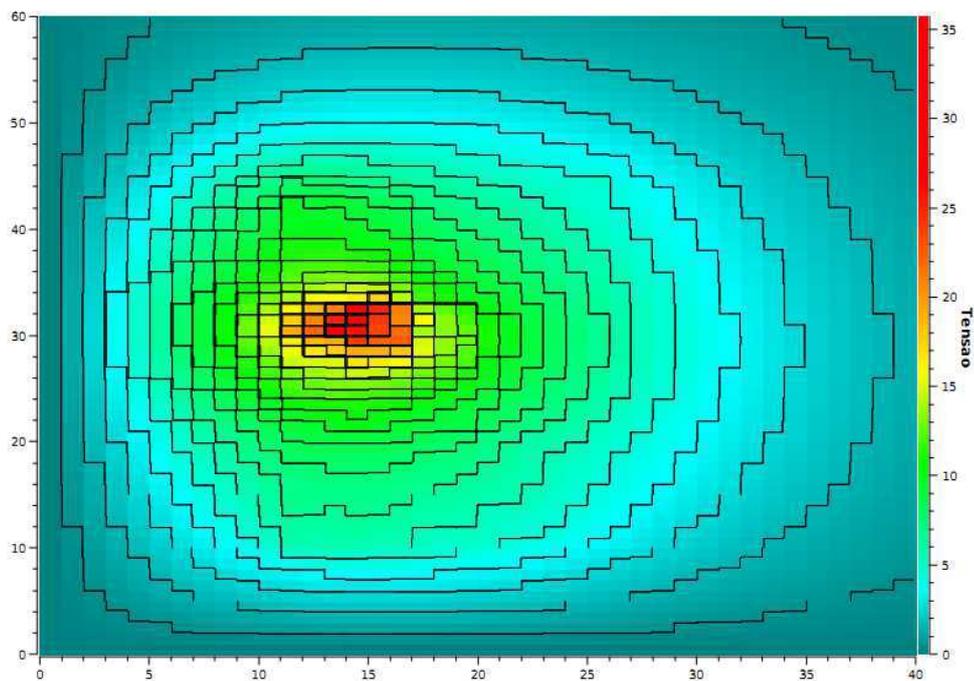


Figura 4.4– Combinação dos resultados de mapeamento dos níveis de potencial superficial com as linhas equipotenciais de uma malha de aterramento sem falhas.

Os gráficos gerados pelo sistema eletrônico embarcado mostraram a distribuição dos potenciais de superfície e das linhas equipotenciais de maneira relativamente uniforme, visto que os pontos próximos à malha de aterramento, na qual se injetou uma corrente de 5 A, apresentaram elevados valores de níveis de tensão e ao se distanciar da malha estes valores foram diminuindo gradativamente. Este comportamento evidencia o escoamento da corrente no solo.

4.2 CASO 2: MALHA DE ATERRAMENTO COM FALHAS

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema eletrônico embarcado diante de uma zona de falha, proveniente, por exemplo, do desgaste ou da descontinuidade na malha. Para isso utilizou-se a mesma configuração do caso 1 e adicionou-se um ponto de falha através de uma haste cravada no solo espaçada a 12 m da malha de aterramento, na qual se injetou uma corrente de 1,3 A, como se pode observar na figura 4.5.

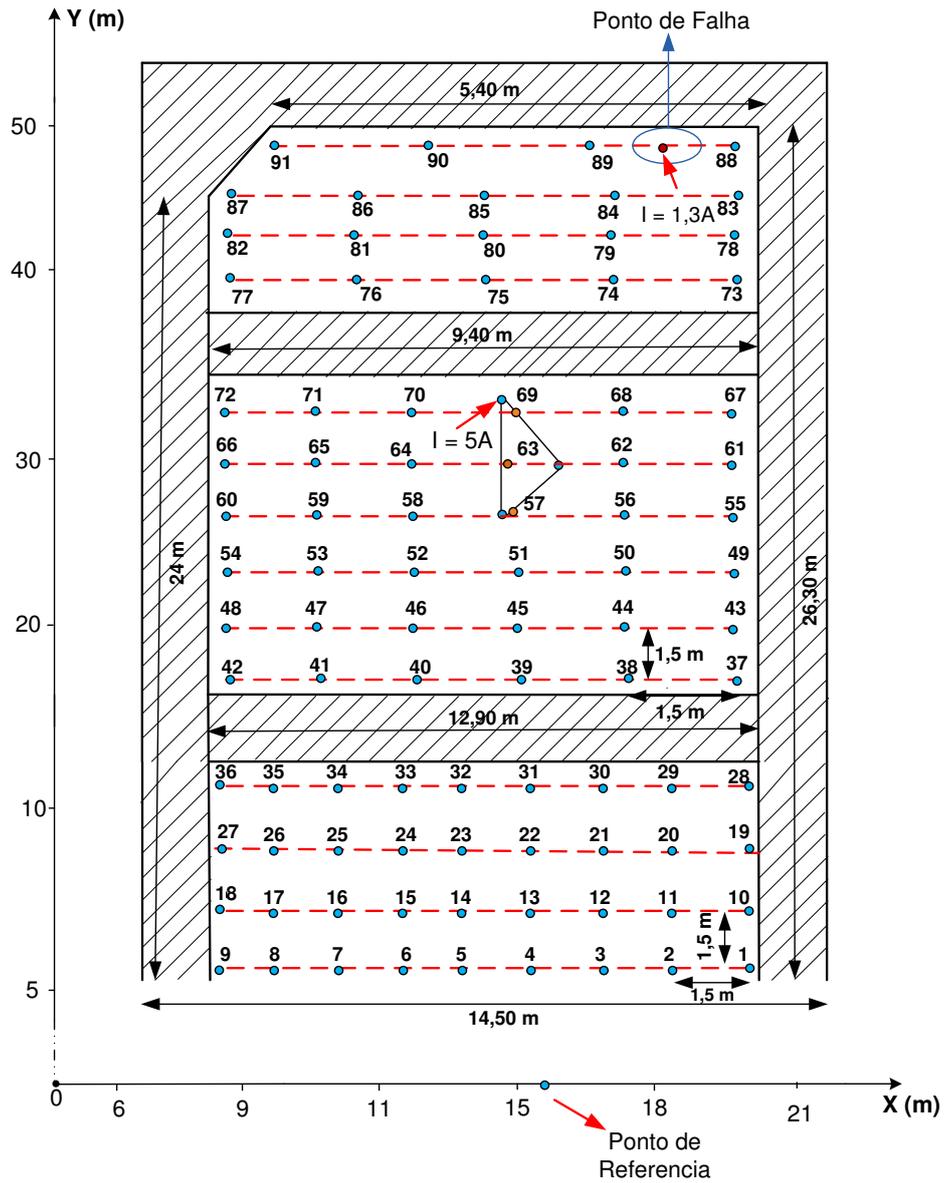


Figura 4.5 – Esboço das medições de potenciais de superfície de uma malha de aterramento (com falha) realizada em laboratório.

Os resultados fornecidos pelo sistema eletrônico embarcado estão apresentados nas figuras 4.6, 4.7 e 4.8, respectivamente. Nelas são mostrados os gráficos que ilustram a distribuição dos potenciais de superfície, as linhas equipotenciais presentes no solo e a combinação dos mesmos em um único gráfico.

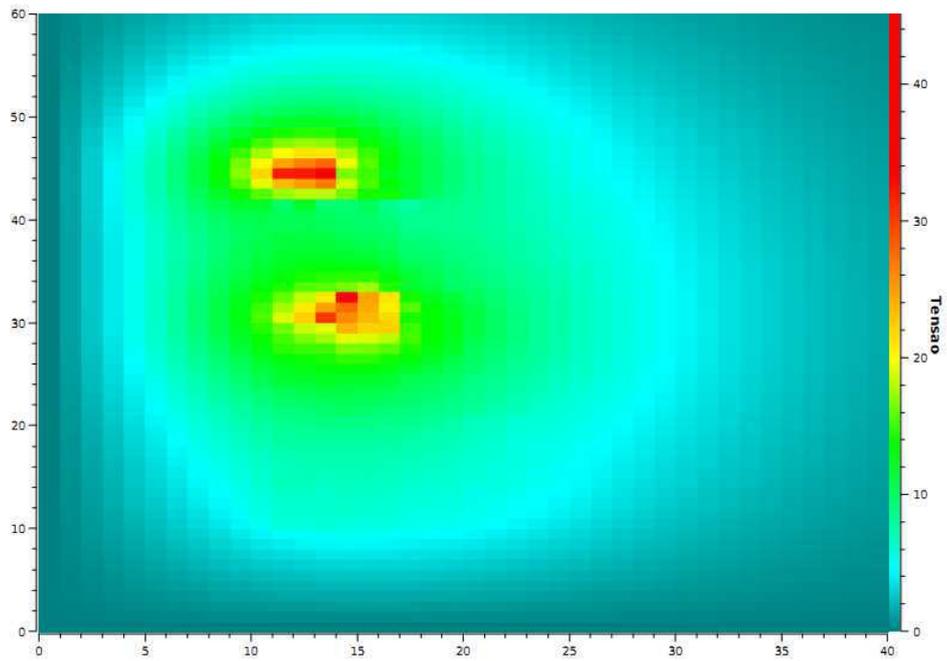


Figura 4.6– Níveis de potencial superficial da malha de aterramento com falhas.

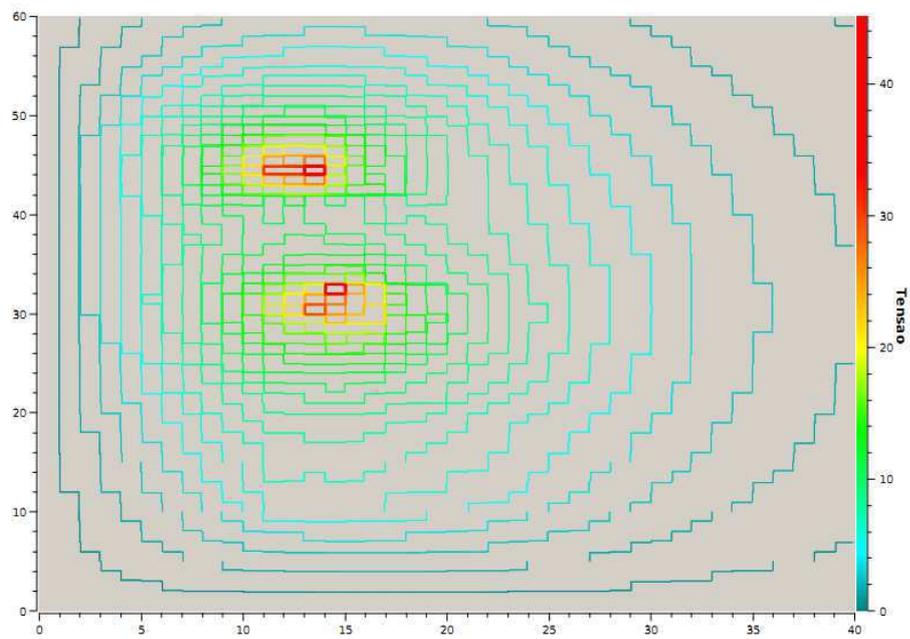


Figura 4.7 – Linhas equipotenciais da malha de aterramento com falhas.

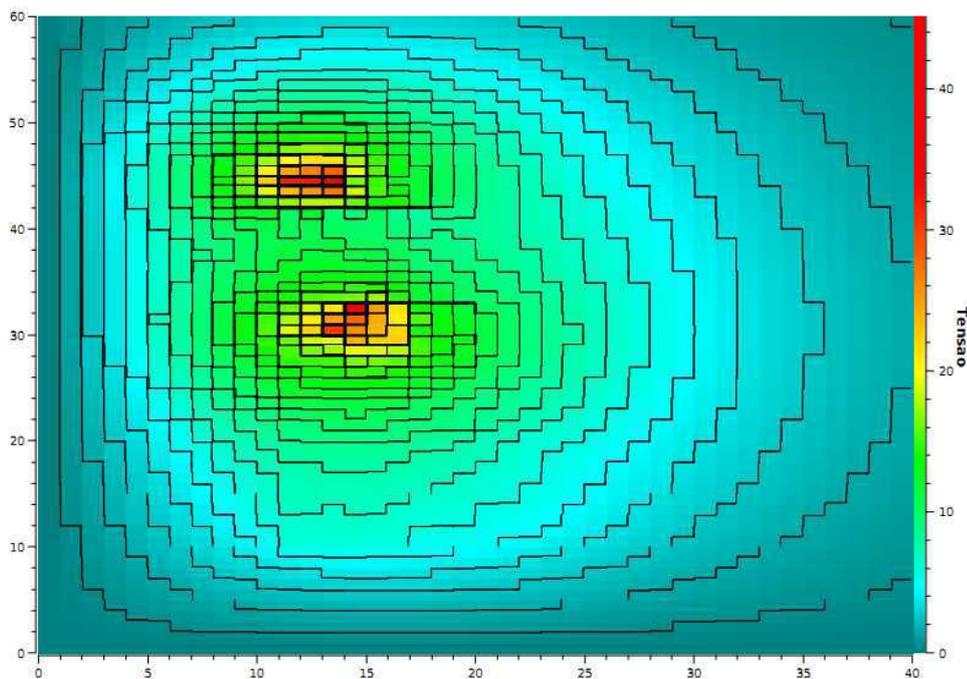


Figura 4.8– Combinação dos resultados de mapeamento dos níveis de potencial superficial com as linhas equipotenciais de uma malha de aterramento com falhas.

Analisando os resultados do sistema eletrônico embarcado para o caso 2 constata-se que uma região de elevada tensão foi evidenciada nos gráficos. Existe uma elevação de tensão no gráfico em tal região, assim como uma concentração das linhas equipotenciais. Então se conclui que os resultados obtidos forma satisfatórios, pois o sistema desenvolvido indicou a localização de uma zona com problemas de elevação de potencial, proporcionando, assim um diagnóstico eficiente.

4.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Para verificar a precisão das medições realizadas pelo sistema eletrônico embarcado, durante o ensaio algumas medições foram realizadas usando um osciloscópio digital Tektronix® modelo TDS 2024B e o sistema desenvolvido simultaneamente. A comparação entre as medições realizadas pelo osciloscópio e o sistema desenvolvido estão apresentados na Tabela 4.1, na qual os pontos de medição evidenciados na tabela correspondem aos mesmos pontos de medição apresentados na Figura 4.1.

Tabela 4.1 Comparação entre as medições dos níveis de potencial de superfície realizados pelo sistema eletrônico embarcado e o osciloscópio.

| Medição dos Níveis de Tensão de Superfície (V) | | | |
|---|--------------------------|-------------------------------|-----------------|
| Pontos de Medição | Sistema Embarcado | Osciloscópio | Erro (%) |
| 1 | 5,80 | 5,60 – 6,40 (média = 6,00) | 3,40 |
| 23 | 5,30 | 5,60 | 5,30 |
| 31 | 7,94 | 8,00- 8,80 (média=8,40) | 5,40 |
| 39 | 9,00 | 9,50 | 5,30 |
| 45 | 10,60 | 11,20 | 5,35 |
| 50 | 15,80 | 16,40 | 3,70 |
| 53 | 16,40 | 17,20 | 4,65 |
| 57 | 21,85 | 22,40 | 2,50 |
| 63 | 25,60 | 26,20 | 2,30 |
| 69 | 30,45 | 31,20 | 2,42 |

Para as medições que oscilavam entre dois valores, calculou-se o erro percentual em relação à média aritmética entre os valores medidos.

Considerando que durante as medições os resultados apresentados pelo osciloscópio variavam entre dois valores e que o sistema eletrônico embarcado apresenta como resultado a média aritméticas das cinco primeiras medições, concluiu-se que o resultado foi satisfatório.

CAPÍTULO 5: CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento de um sistema eletrônico embarcado capaz de medir e mapear os potenciais na superfície do solo de uma malha de aterramento energizada (parte interna e externa), evidenciando as regiões que apresentam elevação de potenciais, tanto em regime nominal como na ocorrência de um curto-circuito, gerando gráficos em duas dimensões para ambas as situações, considerando o mesmo ponto de referência.

No desenvolvimento do sistema eletrônico embarcado para o diagnóstico das condições de operação da malha de aterramento energizada utilizaram-se diferentes tecnologias: como microcontroladores na concepção do sistema de medição, linguagem de programação embarcada para implementação da rotina computacional e a plataforma embarcada *Beagleboard* para gerenciar todo o sistema e possibilitar a interação do usuário com o sistema. O sistema eletrônico embarcado teve como precursor o medidor de potencial, e surge como uma evolução do método de diagnóstico consolidado no trabalho de dissertação de DIAS (2011), pois apresenta o aperfeiçoamento desta técnica através da integração em um único dispositivo do sistema de medição e do mapeamento dos níveis de potencial de superfície, tornando o diagnóstico mais rápido e prático.

Os resultados das medições realizadas no Laboratório de Alta Tensão da UFCG através do sistema eletrônico embarcado mostraram-se satisfatórios, pois o sistema evidenciou de forma rápida e prática a localização de zonas com problemas de elevação de potencial, proporcionando, assim um diagnóstico eficiente.

Como continuação do estudo aqui realizado, propõe-se:

- A implantação de um banco de dados no sistema eletrônico embarcado para que os dados da medição fiquem armazenados quando o equipamento for desligado.
- Implementar na rotina computacional uma outra biblioteca gráfica, diferente da Qwt ou prover uma reestruturação da mesma, para que a resolução dos gráficos em espectrograma que representam o mapeamento dos níveis de tensão apresentem uma melhor definição.

- Adicionar ao sistema eletrônico embarcado a funcionalidade de medir tensão de passo e de toque, objetivando aumentar a eficiência do diagnóstico das condições de operação da malha de aterramento energizada.
- Realização de campanhas de medição em subestações locais, no intuito de verificar o comportamento do equipamento desenvolvido com o decorrer do tempo e em condições operativas reais;

5.1 TRABALHOS PUBLICADOS

Durante o curso de mestrado foram aceitos para publicação os seguintes artigos, relacionado com o trabalho desenvolvido:

GOMES, L.V.; DE MACEDO, E.C.T.; ALBUQUERQUE, T.C.; COSTA, E.G.; JUNIOR, G.V.A.; DE CASTRO, M.S.; FREIRE, R.C.S; *Embedded System to Grounding Grid Diagnosis of Energized Substations*, Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International. Austria, 2012.

MACEDO, 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 Substations Grounding Grids Diagnosis*, TC4 IMEKO/IX Semetro - Metrologia 2011. Brasil, 2011.

DIAS, A. D.; DE ANDRADE JÚNIOR, G. V.; COSTA, E. G.; DE SOUSA, F.P. F.; MACEDO, E. C. T.; GOMES, L. V.; NÓBREGA NETO, S. A. G.; BRASIL, F. C. L. *Grounding Grids Analysis of Energized Substations*. In: 17th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH 2011. Germany, 2011.

BIBLIOGRAFIA

ABY, P.K.; ANUMOL, J.; BIBIN, J.; DINU, L.D; JOMON, J.; SABARINATH, G. *Implementation and Optimization of Embedded Face Detection System*. Proceedings of 2011 International Conference on Signal Processing, Communication, Computing and Networking Technologies (ICSCCN 2011), India, July 2011.

Beagleboard Rev C4 System Reference Manual, <http://beagleboard.org>, Revision 0.0 December 15, 2009

BELTANI, J. M. *Medição De Malha De Terra Em Subestações Energizadas*. Dissertação (Mestrado) – Unesp, Ilha Solteira, 2007.

CAMINHA JR, I. C, (2001). *Análise dos Potenciais de Superfície Gerados no Solo por um Sistema Monofilar com Retorno por Terra*, Tese (doutorado), Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu – SP.

COSTA, E. G., ANDRADE JR., G. V., MEDEIROS, K. P., DIAS, A. D., et al., *Avaliação das Condições de Malhas de Aterramento em Instalações Energizadas*, P&D Energisa PB - UCFG/PaqTc PB, Campina Grande, 2010.

CUNHA, J. G., *Requisitos de Aterramento de Cabine Primária, Segundo A nova NBR 14039*. Enershow. São Paulo, 2003.

DZAPO, H.; GIANNINI, R. *Program Support for Earth Surface Potentials Measuring System*, Measurement Science Review, Volume 3, Section 3, 2003.

DE SOUZA, K. T., DE MOURA, R. F., & CINTRA, G. (2007). *Estudo de alternativas para a construção de malhas de aterramento num solo com alta resistividade elétrica*. Anais do II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica João Pessoa, (pp. 1-8). João Pessoa.

DIAS, A. D. *Malhas de Aterramento em Subestações Energizadas: Medições e Análises*. Dissertação (Mestrado) – UCFG, Campina Grande, 2011.

FERNANDEZ, B. O. *Proposta de um sistema eletrônico embarcado para fiscalização automática de veículos rodoviários de carga*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

GAMBOA, L.R.A.; SILVA, J.M.; RIBAS, C.E. RIBAS, R., et al. *Medição da resistência de malhas de terra energizadas, em SES 34,5/13,8 kV e obtenção da resistividade de solos de SES, em laboratório*. In: Seminário Nacional de Proteção e Transmissão de Energia Elétrica, 18, 2005, Curitiba. Anais, GSE-04.

GRAAF, B.; LORMANS, M.; TOETENEL, H. *Embedded software engineering: the state of the practice*. IEEE Software, [S.I.], v. 20, n.6, p.61-69, Nov.-Dec. 2003.

GREEV, F.; DAWALIBI, R. *An eletromagnetic model for transients in grounding systems*, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, no. 4, pp. 1773-1781, November 1990.
GUOJ., ZUOJ., ZHANG B. and GUANZ. C., *An Interpolation Model to Accelerate the Frequency-Domain Response Calculation of Grounding Systems using the Method of Moments*”, IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 21, N° 1, 2006.

HACKMANN,D.;SANTIAGO,P. W.;BIDARRA, J.;OYAMADA,M.*Um ampliador de tela embarcado utilizando arquiteturas heterogêneas*,XII Workshop de Software Livre (WSL), Porto Alegre, julho 2011.

HAYT JUNIOR, W. H.; BUCK, J. A. *Eletromagnetismo*. Rio De Janeiro: Ltc, 2003.

IEEE Std 80 – IEEE Guide for safety in AC substation grounding – Pub. by IEEE. New York, John Wiley, 2000.

IEEE Std 81.2 - IEEE Guide for Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, 1992.

IEEE Std 81 - IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System,1983.

KINDERMANN, G., & CAMPAGNOLO, J. M.,*Aterramento Elétrico* (3ª ed.). (S.-D. Luzzatto, Ed.) Porto Alegre, RS.,1995.

LEÓN, F. A. H.; PRIETO, M. A. P. P. E QUEVEDO, J. M. P. *Design And Construction Of A Dynamic System For Step And Touch Voltage Measurements For Grounding Systems*, XI SIPDA, Fortaleza, Brazil, October 3-7, 2011.

MACEDO, 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 Substations Grounding Grids Diagnosis*, TC4 IMEKO/IX Semetro - Metrologia 2011.Brasil,2011.

MANKODIYA, K., KLOSTERMANN, M., VOGT, S., CHRIST, O. and HOFMANN U. G. *Teaching Signal Processing with a Dual-Core Embedded Platform*,Proceedings of the 4th European DSP in Education and Research Conference(EDERC 2010), Nice, France, Dec. 2010.

MELIOPOULOS, A.S., et al, *A Pc Based Ground Impedance Measurement Instrument*,IEEE Trans. On Power Delivery, V. 8, N. 3, 1993.

MELIOPOULOS, A.S., etal, *A New Method And Instrument For Touch And Step Voltage Measurements*, IEEE Trans. On Power Delivery, V. 9, N. 4, 1994.

SADIKU, M. N. O. *A simple introduction to finite element analysis of eletromagnetic problems*, IEEE Trans. Educ., vol 32, no 2, pp. 85-9,1989.

SADIKU, M.N.O.,*Elementos de eletromagnetismo*, Porto Alegre:Bookman 3ª Ed,2004.

SALGADO, D. A., & PINTO, M.P., *O Método dos elementos finitos como ferramenta para projetos de malhas de aterramento de subestação* – São Paulo, 2009.

TANGADPALLIWAR, S.; SANDRASEGARAN, K.; RAYMOND, M.; MOITRA A. ; MADANI, F. *Benchmarking Embedded Devices for Broadband Performance Testing*, IEEE Ninth International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Sydney, Australia, 2011.

UBEKU, E.U., ODIASE, F., *Substation Earthing Grid Safety Analysis*. International Journal of Electrical and Power Engineering, 3: 262-267, 2009.

VISACRO FILHO, S. *Aterramento Elétrico: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofia de Aterramento*. 3. ed. São Paulo: Editora Artliber, 2002.

ZHANG B., ZHAO Z., CUI X., and LI L. *Diagnosis of Breaks in Substation's Grounding Grid by Using the Electromagnetic Method*, IEEE Transactions On Magnetics, Vol. 38, No. 2, March 2002.

ZHANG, Z. X.; MA, H. Z; PU, L.; *A Research On Fault Diagnosis Of Grounding Grids*. The First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, (Supergen 2009), Nanjing, China, 2009.