

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO  
DE MALHA DE TERRA ENERGIZADA

KLEIBER TENÓRIO DE SOUSA

DM 38 / 2015

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KLEIBER TENÓRIO DE SOUSA

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO  
DE MALHA DE TERRA ENERGIZADA

DM 38 / 2015

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KLEIBER TENÓRIO DE SOUSA

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO  
DE MALHA DE TERRA ENERGIZADA

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MONITORAMENTO  
DE MALHA DE TERRA ENERGIZADA

AUTOR: KLEIBER TENÓRIO DE SOUSA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA.

APROVADA EM \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra  
(ORIENTADOR – UFPA)

---

Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes  
(CO-ORIENTADORA – UFPA)

---

Profa. Dra. Alessandra Macedo de Souza Lopes  
(MEMBRO EXTERNO – UFPA)

VISTO:

---

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes  
(COORDENADOR DO PPGEE/ITEC/UFPA)

## AGRADECIMENTOS

AO SENHOR DEUS PAI TODO-PODEROSO, DO QUAL TUDO DEPENDE  
E DIANTE DO QUAL TODA A CRIAÇÃO SE CURVA.

Agradecimentos ao meu Orientador Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra,

A minha Co-Orientadora Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes,

Ao meu grande amigo Prof. Msc. Márcio N. de A. Moscoso,

Aos meus familiares pelo companheirismo e paciência,

A toda equipe do projeto SMQEE e

A equipe da ELETRONORTE e da UHE de Coaracy Nunes.

## SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 INTRODUÇÃO.....	1
1.2 ATERRAMENTO ELÉTRICO E QUALIDADE DE ENERGIA.....	3
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.4 ESTADO DA ARTE EM MONITORAMENTO DE MALHA DE TERRA.....	7
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	9
2. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ATERRAMENTO.....	10
2.1 RESISTIVIDADE DO SOLO.....	10
2.2 SISTEMA DE ATERRAMENTO.....	14
2.3 EFEITOS DO CHOQUE ELÉTRICO SOBRE O CORPO HUMANO.....	21
2.3.1 POTENCIAL DE TOQUE.....	24
2.3.2 POTENCIAL DE PASSO.....	25
3. CENÁRIO E MOTIVAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO.....	27
3.1 INSTALAÇÃO DO TERRA REMOTO.....	30
3.2 CAMPANHA DE MEDIÇÃO NA MALHA DE TERRA DA UHE.....	31
3.3 APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA.....	37
4. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA MALHA DE TERRA DA UHE DE COARACY NUNES.....	39
4.1 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO.....	40
4.2 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA DO INSTRUMENTO.....	43
4.3 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE DE GERENCIAMENTO.....	49
5. RESULTADOS OBTIDOS.....	54
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Constituição básica de um aterramento.....	4
Figura 2.1 – Efeito da umidade na resistividade do solo.....	11
Figura 2.2 – Efeito do tipo e da concentração de sal na resistividade do solo.....	12
Figura 2.3 – Circuito equivalente do aterramento em baixas frequências.....	14
Figura 2.4 – Modelo de solo homogêneo representado em fatias em torno do eletrodo.....	16
Figura 2.5 – Perfil de potencial no solo.....	16
Figura 2.6 – Distribuição de potencial na superfície do solo.....	18
Figura 2.7 – Comparação dos valores de resistência de uma haste vertical resultante das expressões (2.14) e (2.15).....	19
Figura 2.8 – Sistema de condução intrínseca do coração humano.....	22
Figura 2.9 – Sinal do eletrocardiograma a da pressão arterial.....	23
Figura 2.10 – Potencial de toque.....	24
Figura 2.11 – Potencial de passo.....	25
Figura 3.1 – Pátio de máquinas da UHE de Coaracy Nunes.....	28
Figura 3.2 – Diagrama em blocos do sistema SMQEE.....	29
Figura 3.3 – Terrômetro da Megabras.....	30
Figura 3.4 – Local de instalação do terra remoto.....	30
Figura 3.5 – Curva Rxd da medição realizada com terrômetro para instalação do terra remoto.....	31
Figura 3.6 – Ponto de lançamento de cabos do terrômetro TM25m.....	31
Figura 3.7 – Ponto 1 de medição.....	32
Figura 3.8 – Ponto 2 de medição.....	32
Figura 3.9 – Ponto 3 de medição.....	32
Figura 3.10 – Ponto 4 de medição.....	33
Figura 3.11 – Ponto 5 de medição.....	33
Figura 3.12 – Ponto 6 de medição.....	33
Figura 3.13 – Medição 1 na cordoalha posicionada atrás da máquina 3.....	34
Figura 3.14 – Medição 2 na cordoalha posicionada atrás da máquina 3.....	34
Figura 3.15 – Medição 3 na cordoalha posicionada atrás da máquina 3.....	34
Figura 3.16 – Aspecto geral das instalações do pátio de transformadores.....	35
Figura 3.17 – Carcaça do Transformador da fase C.....	35
Figura 3.18 – Aterramento das estruturas da fase C do Gerador G3.....	35
Figura 3.19 – Aterramento das estruturas da fase B.....	36
Figura 3.20 – Aterramento das estruturas da fase A.....	36
Figura 3.21 – Corrente de neutro da Ponte Tiristorizada 1 e 2 da máquina 2.....	36
Figura 3.22 – Medição de tensão e corrente realizada pelos instrumentos.....	37
Figura 4.1 – Arquitetura do sistema de monitoramento.....	40
Figura 4.2 – Aspecto geral do extensor de rede e instalação na UHE de Coaracy Nunes.....	41

Figura 4.3 – Parque de máquinas da UHE de Coaracy Nunes.....	41
Figura 4.4 – Conversor CC-CC SP320-24 da Mean Well.....	42
Figura 4.5 – Conversores CC-CC SP320-24 e LM 2596.....	42
Figura 4.6 – Medição de tensão e corrente realizada pelo instrumento.....	43
Figura 4.7 – Visão frontal da placa Arduino UNO.....	44
Figura 4.8 – Diagrama em blocos do instrumento.....	44
Figura 4.9 – Conversor CC construído com o LM 2596.....	44
Figura 4.10 – Transdutor de corrente SCT – 013 – 000.....	45
Figura 4.11 – Circuitos de condicionamento.....	45
Figura 4.12 – Módulo de rede sem fio ( <i>WiFi</i> ).....	46
Figura 4.13 – Versão final da placa de condicionamento e comunicação.....	46
Figura 4.14 – Módulo ( <i>shield</i> ) de Memória e RTC.....	47
Figura 4.15 – Circuito de condicionamento + módulo de comunicação.....	47
Figura 4.16 – Integração dos módulos do instrumento em Laboratório.....	48
Figura 4.17 – Visão geral dos módulos do instrumento.....	48
Figura 4.18 – Fluxograma do firmware do instrumento.....	49
Figura 4.19 – Tela inicial do software SMQEE.....	50
Figura 4.20 – Módulos funcionais do software SMQEE.....	51
Figura 4.21 – Mapa de instrumentos visualizados no SMQEE.....	51
Figura 4.22 – Aspecto geral da tela de medições do SMQEE com dados fictícios.....	51
Figura 4.23 – Diagrama ER do banco de dados do SMQEE.....	52
Figura 4.24 – Protocolo de comunicação Servidor-Instrumento.....	53
Figura 5.1 – Interface preliminar do software SMQEE.....	54
Figura 5.2 – Ponto 1 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.....	55
Figura 5.3 – Ponto 2 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.....	55
Figura 5.4 – Ponto 3 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.....	55
Figura 5.5 – Ponto 4 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.....	56
Figura 5.6 – Ponto 5 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.....	56
Figura 5.7 – Teste na UHE de Coaracy Nunes com versão preliminar do instrumento.....	57
Figura 5.8 – Teste do instrumento com extensor de rede na UHE de Coaracy Nunes.....	57
Figura 5.9 – Registro dos procedimentos de teste.....	58
Figura 5.10 – Tela do SMQEE exibindo valores de medição na UHE de Coaracy Nunes.....	58
Figura 5.11 – Teste em Laboratório com o instrumento.....	59
Figura 5.12 – Tela 1 do SMQEE com medições em Laboratório.....	59
Figura 5.13 – Tela 2 do SMQEE com medições em Laboratório.....	60
Figura 5.14 – Tela 3 do SMQEE com medições em Laboratório.....	60
Figura 5.15 – Tela do SMQEE de visualização dos instrumentos.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Faixas características de resistividade de certos tipos de solo.....	11
Tabela 2.2 – Influência da adição de sal na resistividade do solo.....	12

## RESUMO

O bom desempenho do sistema de aterramento de subestações e de usinas geradoras é uma condição essencial para que tais plantas possam operar dentro dos padrões de qualidade estabelecidos. Portanto, um sistema de monitoramento contínuo da malha de aterramento é uma ferramenta importante para auxiliar as equipes técnicas na identificação de falhas que afetem a operação dos Sistemas Elétricos de Potência. Alguns dos métodos tradicionais de medição nas malhas de aterramento necessitam do desligamento das instalações. No entanto, os contratos de concessão preveem penalidades por indisponibilidade da Geração e Transmissão, de modo que a adoção de procedimentos de avaliação constante do sistema de aterramento, sem o desligamento das instalações é essencial. Atendendo a essas especificações, esta Dissertação apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado de aquisição de sinais de tensão e corrente em pontos selecionados da malha de aterramento. Outro componente do sistema proposto é um software capaz de gerenciar a rede formada pelos diversos instrumentos de medição, organizar as informações coletadas em uma base de dados e produzir relatórios de acompanhamento das condições de operação da malha de aterramento. Um aspecto importante do sistema é a adoção da tecnologia de redes sem fio para comunicação entre um computador servidor e o conjunto de instrumentos de medição. Os resultados obtidos experimentalmente reforçam a contribuição do sistema desenvolvido e encorajam novos esforços de aperfeiçoamento.

**PALAVRAS-CHAVES:** Sistemas de aterramento, monitoramento, sistemas embarcados, redes sem fio.

## ABSTRACT

The good performance of grounding system in substations and generating plants is an essential condition for their operation according with established quality standards. Therefore a continuous monitoring system for grounding grid is an important tool to aid technical teams to identify failed zones that depreciate the Power Systems operation. Some traditional measuring methods in grounding grids need the power system shutdown. However the concession contracts allow penalties for the unavailability of generation and transmission facilities. Therefore the constant adoption of grounding grid evaluation without the plant shutdown is important. Having these specifications as target this Dissertation presents an embedded system development for voltage and current measurement. Another proposed system component is the software to manage the measuring network and organize the collected information in a database to produce grounding system operation reports. An important aspect of the system is the adoption of wireless network technology to data transfer between each measuring instrument and a web server installed in the power plant operation center. The experimentally obtained results reinforce the system contribution and encourage new developments.

**KEYWORDS:** Grounding systems, monitoring, embedded systems, wireless network.

## CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

### 1.1 INTRODUÇÃO

O acompanhamento da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) fornece parâmetros importantes para compor um panorama da operação e da capacidade do Setor Elétrico (Geração, Transmissão e Distribuição) em atender as necessidades dos mais diversificados consumidores de energia elétrica. Assim, pode-se afirmar que os índices de qualidade do fornecimento de energia elétrica são os indicativos pelos quais a sociedade percebe a capacidade do setor elétrico em suprir suas demandas. Esses índices são utilizados pelos órgãos regulatórios desse setor nos mais diferentes países. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é responsável pela regulamentação do Setor Elétrico. A ANEEL possui um conjunto bem definido de normas, procedimentos, fiscalizações e atuações junto às empresas que operam no ramo, buscando a plenitude das atividades relativas ao mercado de energia elétrica.

Em nosso país, após o início do processo de privatização no setor elétrico, criaram-se condições para modernização de sua infraestrutura pelo aumento do nível de investimento. Um maior patamar de oferta de energia é um insumo fundamental para o estabelecimento de um ciclo de crescimento econômico desejado por qualquer sociedade moderna. Num contexto de fortalecimento da economia, espera-se não só a construção de novas instalações de Geração, Transmissão e Distribuição como também o crescimento e a diversificação do parque industrial e a ampliação de atividades nos mais diversos ramos de atividade econômica. Observam-se, ainda, maiores níveis de consumo de bens e serviços por parte da população, entre outros aspectos perceptíveis em nações que alcançam um maior dinamismo econômico.

Nesse contexto, é importante ressaltar dois pontos: a expansão setor elétrico brasileiro e a demanda crescente por energia. Com relação ao primeiro ponto, a expansão do setor elétrico compreende não só a adição de novas hidrelétricas, vocação natural do país, como também a diversificação das fontes primárias como biomassa, solar e eólica. Essa última com capacidade instalada prevista em 9,8 GW para o final de 2015, segundo a Associação Brasileira de Energia Eólica [1]. Já o potencial térmico, numa visão de médio prazo, é visto como tendo um papel de complementariedade e regulação da oferta de energia, para fazer

frente aos riscos hidrológicos, como observados nos anos de seca mais pronunciada. O papel das fontes térmicas continuará sendo de complementação, dado que a oferta de energia proveniente das fontes renováveis obedece à sazonalidade típica dos ciclos da natureza e não estão plenamente disponíveis ao longo do ano [2]. Assim, a adição de novas fontes de energia com dinâmicas diferentes, quando comparadas com o sistema hídrico, contribui para elevar o grau de complexidade da operação de um Sistema Elétrico de Potência (SEP). O segundo ponto está relacionado a uma sociedade que passa por um período de transição para um nível de maior atividade econômica. Essa exigência se traduz pela ampliação das atividades nas mais diversas cadeias produtivas, maior acesso a bens e serviços pela população em geral, além de um aumento *per capita* do consumo em nível residencial. Nesse sentido, a oferta de energia deve também ser medida em termos qualitativos de acordo com os índices e procedimentos definidos pela ANEELL válidos para as unidades de Geração, Transmissão e Distribuição.

Do exposto até aqui, pode-se visualizar o setor elétrico em fase de expansão para atender às necessidades demandadas pela sociedade em geral. Esse cenário compele toda infraestrutura do setor para um nível mais aprofundado de acompanhamento de sua própria operação bem como de uma revisão do planejamento das atividades de manutenção. A disponibilidade das instalações e o atendimento dos índices de qualidade tornam-se metas centrais fixadas para os Sistemas de Geração, Transmissão e Distribuição. Nesse sentido, é necessário desenvolver soluções e procedimentos que possibilitem aos SEP operarem com mais segurança face ao conjunto de interferências que podem provocar perda de QEE.

Os problemas que comprometem a QEE, embora conhecidos e estudados desde algum tempo, sofrem mudanças quanto à abordagem e a ênfase dada. À medida que se avança nos estudos sobre os fenômenos de QEE, as investigações passam a ser concentradas em particularidades de cada sistema, como por exemplo, o levantamento de danos causados pelos problemas de QEE; a identificação das principais fontes causadoras de tais problemas e suas respectivas contribuições, visando à atribuição de responsabilidades; definição de métodos e procedimentos para a apuração dos parâmetros determinantes associados à QEE, entre outros. No sistema elétrico, de uma forma geral, o monitoramento da qualidade de energia garante a confiabilidade e a segurança do sistema, as quais são imprescindíveis no processo de suprimento de energia, como já exposto. Distorções harmônicas, variações de tensão de curta duração (VTCDs), transitórios, entre outros fenômenos podem comprometer o tempo de vida

útil dos componentes do sistema, aumentar o custo com manutenções, ocasionar disparos indesejados da proteção entre outros problemas.

Dado que toda a operação do setor elétrico está comprometida com os índices de QEE, torna-se evidente a necessidade de manter seu ponto de operação o mais distante possível das regiões de descontinuidade e de perda de qualidade. Isso encoraja esforços de desenvolvimento para disponibilizar ferramentas de monitoramento e diagnóstico de sua operação. Tais ferramentas podem ampliar a percepção das relações de causa e efeito de toda série de fenômenos que provocam interrupções ou desvios de qualidade visando ajustar os SEP para regiões de maior robustez e garantia na oferta de energia.

A qualidade do fornecimento de energia é afetada por eventos como desequilíbrios, manobras, descargas atmosféricas, entre outros fenômenos. A boa condição da malha de aterramento é um componente necessário para que os SEP possam se recuperar de tais eventos e retomar as suas condições nominais de operação. Portanto, o sistema de aterramento é um componente de grande importância para a operação segura dos SEP já que está associado, por exemplo, à operação dos sistemas de proteção e a manutenção dos gradientes de potencial em limites seguros para os profissionais que atuam em suas instalações. Assim, torna-se essencial desenvolver sistemas que possam monitorar continuamente as condições de operação da malha de aterramento, sobretudo para as instalações mais antigas. Antes disso, faz-se necessário tecer algumas considerações, em caráter introdutório, acerca da importância das malhas de aterramento para a operação do sistema elétrico. Tais considerações serão aprofundadas no Capítulo 2.

## **1.2 ATERRAMENTO ELÉTRICO E QUALIDADE DE ENERGIA**

De acordo com [3], um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Este sistema é ilustrado de forma genérica na Figura 1.1 e se constitui basicamente de três componentes:

- \* As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos;
- \* Eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo);
- \* Terra (solo no local da instalação) que envolve os eletrodos.

Figura 1.1 – Constituição básica de um aterramento.



Fonte: Silvério Visacro Filho, Aterramentos Elétricos, 2002.

Ainda de acordo com [3], os eletrodos de aterramento podem ter configuração muito diversificada como cantoneiras de ferro galvanizado, sistemas hidráulicos ou malhas em reticulado, comuns em Usinas e Subestações. A forma, assim como a disposição geométrica dos eletrodos no solo são as mais variadas, de acordo com a aplicação. Destacam-se as hastes verticais, usadas principalmente quando as camadas mais profundas do solo têm menor resistividade, e que são muito práticas, por serem de fácil cravação. Os eletrodos horizontais, enterrados usualmente a profundidade de 0,5 m, são usados principalmente quando a maior preocupação é o controle do gradiente de potencial na superfície do solo.

Visto como um circuito a parâmetros concentrados, o aterramento apresenta resistência, capacitância e indutância. Cada uma dessas componentes influi na capacidade de condução de corrente para a terra. Dessa forma, o sistema elétrico percebe então o aterramento por meio da impedância deste. A impedância de aterramento, então, oferece uma oposição à passagem de corrente injetada pelo sistema em direção ao solo e pode ser quantificada pela relação entre a tensão aplicada ao aterramento, medido em relação a uma referência, e a corrente resultante. A referência [3] continua afirmando que, em muitas aplicações, não se faz alusão à impedância do aterramento, mas a sua resistência. Isto porque, nas condições dessas aplicações, os efeitos reativos são muito reduzidos. Essas condições são usuais para fenômenos lentos, cujas frequências representativas têm valor reduzido. A configuração resultante para o circuito equivalente ao aterramento se aproxima de um conjunto de condutâncias colocadas em paralelo. Esse é o caso de ocorrências próximas às condições de regime em sistemas de potência, como em curtos-circuitos.

Segundo [4], para que um SEP opere corretamente, com uma adequada continuidade de serviço, com um desempenho seguro do sistema de proteção e, mais ainda, para garantir os

limites de segurança pessoal, é fundamental que o aterramento mereça um cuidado especial. Esse cuidado deve ser traduzido na elaboração de projetos específicos, nos quais, com base em dados disponíveis e parâmetros pré-fixados, sejam considerados todas as possíveis condições a que o sistema possa ser submetido. Os objetivos principais do sistema de aterramento listados a seguir:

- \* Obter uma resistência de aterramento mais baixa possível, para correntes de falta a terra;
- \* Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro dos limites de segurança de modo a não causar fibrilação no coração humano;
- \* Fazer com que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- \* Proporcionar um caminho de escoamento para a terra de descargas atmosféricas;
- \* Usar a terra como um caminho de retorno de corrente no sistema Monofilar com Retorno por Terra (MRT);
- \* Escoar as cargas estáticas geradas nas carcaças de equipamentos.

No texto da referência [5], os autores afirmam que muitos dos problemas relacionados com QEE estão relacionados com o aterramento e condutores em geral. Em eventos relacionados com QEE, é normalmente reportado que 80% de todos os problemas de QEE comunicados pelas empresas, em suas instalações, são devidos a aterramentos e condutores. Embora não existam bases científicas para garantir o percentual de 80%, muitos dos problemas de QEE são resolvidos simplesmente apertando uma conexão frouxa ou substituindo um condutor danificado. Entretanto, uma revisão das técnicas referentes a aterramento e condutores é necessária como primeiro passo para avaliação de problemas de QEE em geral.

A dinâmica de um SEP (desde a Geração até as cargas) é de elevada complexidade. Desse modo, construir uma cadeia de medição para monitorar os elementos que o compõe, incluindo o sistema de conexão a terra, está na base de quaisquer sistemas de controle e diagnóstico. As considerações até aqui expostas dos problemas de QEE relacionados ao papel do sistema de aterramento buscaram contextualizar o desenvolvimento, proposto neste trabalho, de um sistema automático de monitoramento de malhas de terra para Usinas e Subestações energizadas. O monitoramento contínuo da malha de aterramento é importante para a identificação de problemas que afetam a qualidade da energia fornecida pelos SEP. A

boa condição da malha de aterramento é uma condição necessária para que os SEP possam se recuperar dos eventos de falta e retomar as suas condições nominais de operação. A massa de dados produzida por esse sistema de monitoramento pode ser cruzada com os dados de outros sistemas tradicionalmente utilizados, como oscilógrafos, para evidenciar as correlações entre os eventos que estejam afetando a operação do SEP em questão. A partir dessa análise, os procedimentos mitigatórios podem ser encaminhados com maior eficiência, visando trazer o sistema elétrico para um patamar mais robusto de operação.

Mais recentemente, um esforço considerável de pesquisa tem sido empregado na construção de sistemas inteligentes que permitam avaliações de caráter mais qualitativo da operação dos SEP. Tal mudança de paradigmas enseja a construção de sistemas similares ao apresentado nesse trabalho, cujo objetivo é o de constituir-se como uma ferramenta adicional ao esforço de acompanhamento da operação de um sistema de elevada complexidade como é o caso do sistema elétrico.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de malhas de terra energizadas. O referido sistema se caracteriza, assim, como uma ferramenta de acompanhamento do desempenho de sistemas de aterramento em geral. Para tanto, o sistema deve ser composto por uma rede de instrumentos de aquisição e por um software para organização dos registros coletados a partir dos mesmos instrumentos. Vale ressaltar, no entanto, que as funcionalidades do sistema desenvolvido são de âmbito geral, aplicáveis a qualquer instalações similares.

Os objetivos específicos do sistema aqui proposto são listados a seguir:

- a) Desenvolvimento de sistema embarcado (instrumentos) de aquisição de sinais de tensão e de corrente de um sistema de aterramento;
- b) Especificação da tecnologia de transmissão de dados;
- c) Desenvolvimento software de gerenciamento da rede dos instrumentos de medição e de organização da base de dados.
- d) Integração e sincronização com o sistema de oscilografia já instalado na UHE de Coaracy Nunes.
- e) Realização de testes de validação do sistema integrado.

## 1.4 ESTADO DA ARTE EM MONITORAMENTO DE MALHAS DE TERRA

O monitoramento contínuo das malhas de aterramento é importante por se tratar da primeira linha de defesa contra as contingências que podem afetar segurança dos profissionais e dos equipamentos. O desempenho do aterramento é afetado por fatores como: falha de conexão física entre condutores e eletrodos; forças elétricas das correntes que circulam no aterramento; corrosão dos materiais empregados na instalação; erosão do solo, entre outros. Além disso, mudanças na resistividade do solo provocadas por variações de condições ambientais (a serem exploradas no Capítulo 2) evidenciam a necessidade de monitoramento contínuo do sistema de aterramento visando identificar zonas de falha.

Em 2012, a referência [6] apresentou um sistema de monitoramento *online* de tensões de toque e de passo em malhas de subestações. O método básico consistiu em utilizar uma das fases do SEP e um transformador abaixador para injetar uma corrente controlada no solo através de um eletrodo auxiliar. A injeção de tal corrente provoca elevações de potencial na malha de aterramento da subestação. Essas elevações de potencial são medidas por vários instrumentos para que então sejam determinadas as tensões de toque e de passo correspondentes. Entre o secundário do transformador abaixador e a terra há um circuito formado por um par de tiristores cujo disparo controla o valor da corrente injetada no solo à semelhança de um evento de falta. Em essência, as variações entre as tensões medidas podem ser utilizadas para inferir as mudanças de condições do aterramento. Os equipamentos de medição são posicionados em locais pré-determinados, de acordo com a IEEE Std. 81.2 [7]. Cada instrumento utiliza um transdutor de tensão cujo sinal de saída é aplicado a um conversor A/D. As amostras são processadas e o resultado é transferido para um computador através de um módulo Zigbee de 2.4 GHz que, por sua vez, possui alcance adequado para instalações de pequeno a médio porte. A rede de sensores do sistema pode ser facilmente reconfigurada mantendo seu custo baixo. Finalmente, a base de dados contendo as medições é avaliada por um algoritmo inteligente para inferir mudanças de desempenho no sistema sob análise.

Também em 2012, o trabalho apresentado em [8] mostra o desenvolvimento de um sistema de detecção de falhas em malhas de aterramento de subestações energizadas. O referido sistema possui um módulo de aquisição de sinais de tensão baseado em um microcontrolador PIC<sup>®</sup>. Esse módulo de aquisição tem a capacidade de medir diversos pontos

de potenciais distribuídos ao longo da malha de aterramento da subestação. Outro módulo do sistema tem como elemento central uma placa de desenvolvimento da plataforma BeagleBoard®. Na memória desse módulo está presente um software que analisa os sinais de tensão por meio de um algoritmo baseado no método de diferenças finitas e por meio dessa análise é criada uma representação gráfica da distribuição de potenciais na superfície do solo da subestação. Tal distribuição de potenciais forma um mapeamento para identificar possíveis zonas de alta resistividade, zonas de desgaste, de descontinuidade na malha ou pontos de falha. As medições são realizadas na frequência industrial utilizando a corrente de desbalanceamento de um transformador como referência para elevações de potencial do solo.

Já em 2015, o estudo mostrado em [9] propõe um sistema *online* de aquisição de tensão e de corrente de falta para determinar a elevação de potencial na superfície do solo e a impedância de aterramento de uma subestação. Essas medições também são utilizadas para avaliar se as tensões de passo e de toque se encontram dentro de patamares seguros. As unidades de aquisição de tensão e de corrente são construídas com microcontroladores contendo conversores A/D. A frequência de amostragem é configurada de forma a capturar 100 amostras por ciclo de 50 Hz. As formas de onda são capturadas e transmitidas para um computador. Adicionalmente, os valores de corrente de falta registrados pelos relés de proteção e os registros dos analisadores também são utilizados. Os valores de correntes injetados na malha de aterramento quando a subestação alvo desse estudo foi comissionada são utilizados e comparados com as medições *online* para calcular as elevações de potencial na subestação. Dessa comparação resulta o cálculo da impedância de aterramento da subestação. Sucessivas análises dos eventos de falta permitem detectar modificações do comportamento do aterramento relacionadas a fatores como rupturas de condutores do sistema de aterramento e elevações de resistências de contato de conexões.

## **1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

O Capítulo 1 deste trabalho apresenta considerações de âmbito geral sobre a expansão dos SEP, sua complexidade e a importância de se acompanhar as variáveis que interferem em sua operação através da construção de ferramentas de monitoramento de malhas de aterramento energizadas. O Capítulo 2 explora os conceitos e definições básicos sobre sistema de aterramento, a saber, os fatores que influenciam na variação de resistividade do solo, os elementos presentes em um aterramento e os efeitos do choque elétrico sobre o corpo

humano. O Capítulo 3 evidencia o cenário e a motivação que resultou no desenvolvimento do trabalho. O Capítulo 4 apresenta a estrutura do sistema proposto formado pela rede de instrumentos e pelo sistema de software. O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos em testes com o sistema em funcionamento. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 – CONCEITOS BÁSICOS SOBRE ATERRAMENTO

Os sistemas de aterramento são empregados nas instalações elétricas, eletrônicas e mecânicas para os mais diferentes propósitos. As aplicações vão desde sistemas de proteção (em caso de eventual falha de algum equipamento), dissipação de eletricidade estática ou, ainda, proteções contra descargas atmosféricas e surtos provenientes de manobras. Portanto, o sistema de aterramento é um elemento fundamental presente em uma instalação elétrica, seja nos circuitos de potência, nos centros de telecomunicações ou em sistemas de transmissão de dados. Este Capítulo está dividido nas seções (2.1) de Resistividade do Solo, (2.2) de Sistemas de Aterramento, cujas definições básicas foram apresentadas no Capítulo 1, e (2.3) sobre Efeitos do Choque Elétrico sobre o Corpo Humano.

### 2.1 RESISTIVIDADE DO SOLO

Pode ser demonstrado que a resistência de aterramento ( $R_T$ ) é diretamente proporcional à resistividade do solo ( $\rho$ ) em que os eletrodos são colocados como mostra a Equação (2.1). A constante  $K$  apenas expressa os efeitos geométricos (dimensões físicas) dos eletrodos.

$$R_T = K \cdot \rho \quad (2.1)$$

Do ponto de vista da aplicação, interessa-se em avaliar a resistência de aterramento. No entanto, a relação (2.1) mostra que os parâmetros que influenciam a resistividade do solo interferem diretamente na resistência de aterramento. Pode-se definir a resistividade do solo ( $\rho$ ) como a resistência elétrica ( $R$ ) medida entre as faces opostas de um cubo de dimensões unitárias (comprimento  $L$  de 1m e área das faces  $A$  de 1 m<sup>2</sup>) preenchido com esse solo. Sua unidade é  $\Omega \cdot m$  [3].

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad \text{ou} \quad \rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (2.2)$$

Em seu estado natural o solo é mal condutor, sobretudo se estiver totalmente seco. Sua resistividade é muito elevada quando comparada a condutores convencionais. Por exemplo, os solos comuns tem uma resistividade variando entre 5 e 20.000  $\Omega \cdot m$  enquanto que o Cobre puro tem uma resistividade de  $1,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Em [3] são mostrados os fatores que interferem na resistividade do solo resumidos a seguir:

## (a) Tipo de solo

Os tipos de solo não são claramente definidos. Em função disso, não se pode atribuir um valor específico de resistividade para um tipo de solo. A experiência mostra, ainda, que se podem encontrar valores diferentes de resistividade para um mesmo tipo de solo em localidades diferentes. Contudo, podemos definir faixas de valores de resistividade representativos de uma determinada variedade de solo.

Tabela 2.1 – Faixas características de resistividade de certos tipos de solo.

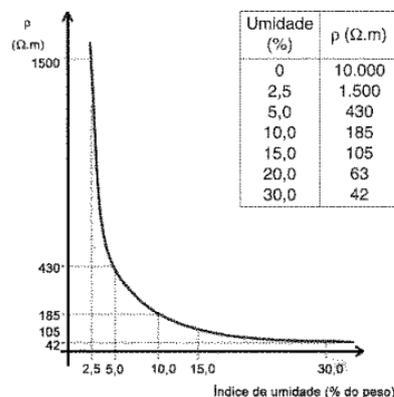
Tipo de Solo	Resistividade ( $\Omega.m$ )
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argilas	80 a 330
Terra de jardim	140 a 480
Calcário fissurado	500 a 1.000
Calcário compacto	1.000 a 5.000
Granito	1.500 a 10.000
Areia comum	3.000 a 8.000
Basalto	10.000 a 20.000

Fonte: Silvério Visacro Filho, Aterramentos Elétricos, 2002.

## (b) Umidade do solo

Em baixas frequências, ou frequências industriais (50 Hz e 60 Hz), a condução do solo se realiza essencialmente por mecanismos eletrolíticos. Tais mecanismos dependem da presença de água e dos sais que vão prover os íons da mistura. Assim, um aumento da umidade do solo implica em uma diminuição de sua resistividade. A Figura (2.2) mostra a relação entre umidade e resistividade para um solo arenoso. Observa-se a diminuição pronunciada da resistividade para uma variação de 0 a 18% da umidade.

Figura 2.1 – Efeito da umidade na resistividade do solo.



Fonte: Silvério Visacro Filho, Aterramentos Elétricos, 2002.

## (c) Concentração e tipos de sal dissolvidos em água

Como visto no item (b), a resistividade do solo depende da umidade por ele retida. Como a resistividade da água depende dos sais nela dissolvidos (condução eletrolítica), conclui-se que a resistividade do solo depende da quantidade e dos tipos de sais dissolvidos na água retida no mesmo. Assim, um solo com poucos sais minerais tem sua resistividade pouco alterada pela adição de água destilada. A Tabela (2.2) mostra a variação de resistividade de uma amostra de solo arenoso à medida que se faz a adição de sal.

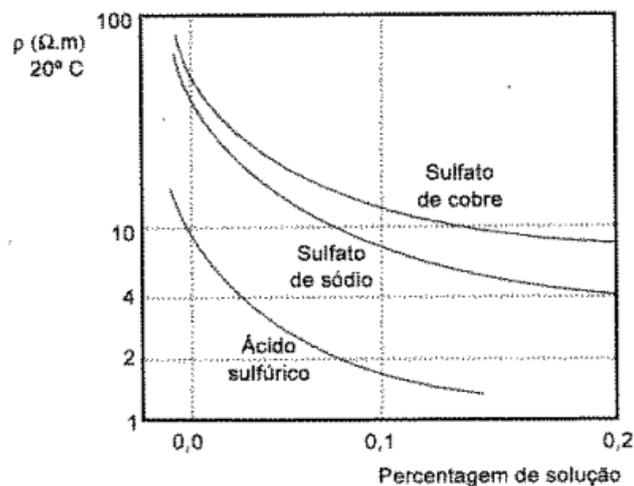
Tabela 2.2 – Influência da adição de sal na resistividade do solo.

Sal adicionado (% em peso)	Resistividade ( $\Omega.m$ ) Solo arenoso
0	107
0,1	18
1,0	1,6
5,0	1,9
10,0	1,3
20,0	1,0

Fonte: Silvério Visacro Filho, Aterramentos Elétricos, 2002.

A Figura (2.2) mostra redução de resistividade do solo em função da concentração e do tipo de sal nele presente.

Figura 2.2 – Efeito do tipo e da concentração de sal na resistividade do solo.



Fonte: Silvério Visacro Filho, Aterramentos Elétricos, 2002.

(d) Compacidade do solo

Um solo mais compacto tem maior continuidade física, o que proporciona valores menores de resistividade. Por conta disso, é recomendável que realize a medição da resistência de aterramento somente um tempo depois de sua instalação para que o solo possa se recomodar.

(e) Granulometria do solo

A granulometria do solo deve ser considerada sob dois aspectos: (i) Capacidade de retenção de água nas camadas do solo e (ii) Continuidade física do solo.

Nos dois aspectos, a presença de uma granulometria maior tende a aumentar a resistividade, pois um solo com essa característica tende a reter menos água, que vai para as camadas mais profundas ou evapora-se, e também possui menor grau de continuidade física. Quando o solo tem uma granulometria variada, o seu valor médio de resistividade tende a ser menor já que o espaço entre os grãos maiores são ocupados pelos grãos menores o que aumenta a capacidade de retenção de água e aumenta o grau de continuidade física.

(f) Temperatura do solo

A influência da temperatura na resistividade do solo pode ser considerada sob dois aspectos:

\* uma maior temperatura provoca maior evaporação o que tende a aumentar a resistividade do solo pela redução de sua umidade. Isso deve ser especialmente observado em regiões tropicais com elevadas temperaturas altos índices de insolação.

\* considerando que a resistividade do solo é influenciada pela água retida nele, uma temperatura menor implicará em uma resistividade maior da água e, em consequência, uma resistividade do solo também maior.

(g) Estratificação do solo

A composição do solo é geralmente estratificada em várias camadas de formação diferentes e cada camada possui um valor de resistividade característico dos materiais que a compõe. O solo é essencialmente um meio anisotrópico, pois camadas mais profundas podem aflorar em determinados locais ocasionando descontinuidades na superfície. Assim, a resistividade passa a variar dependendo da direção tomada. Dessa forma, passa-se a se considerar um valor médio de resistividades das camadas sobrepostas. Esse valor médio é denominado de resistividade efetiva do solo.

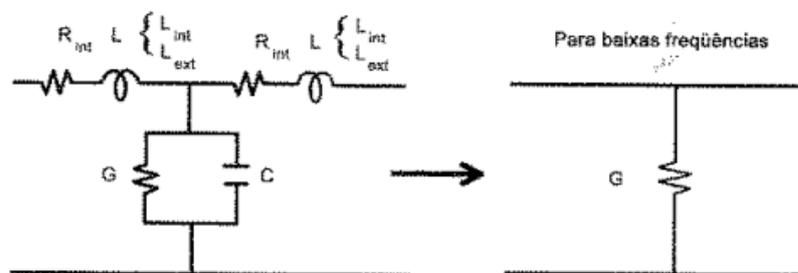
## 2.2 SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Como já exposto no Capítulo 1, um aterramento elétrico consiste em uma ligação elétrica proposital de um sistema físico (elétrico, eletrônico ou corpos metálicos) ao solo. Este sistema se constitui basicamente de três componentes: As conexões elétricas que ligam um ponto do sistema aos eletrodos; Eletrodos de aterramento (qualquer corpo metálico colocado no solo); O solo do local da instalação, cuja resistividade é um parâmetro importante para o projeto e a operação do sistema de aterramento.

Na referência [5], afirmam seus autores que as concessionárias de energia possuem critérios bem definidos de projeto aplicado a seus sistemas de aterramento. Tais critérios referem-se, fundamentalmente, ao aterramento em baixas frequências. Contudo, devido à necessidade de atender às exigências dos órgãos reguladores, no que se refere à continuidade e qualidade dos serviços, bem como à imposição relacionada à segurança, torna-se necessário que os critérios de projeto dos sistemas de aterramento contemplem, além da baixa frequência, os transitórios devidos a correntes impulsivas oriundas de descargas atmosféricas.

Já na referência [3], afirma-se que uma conexão para a terra apresenta resistência, capacitância e indutância, cada qual influenciando na capacidade de condução de corrente para o solo. Assim, deve-se admitir, em princípio, a existência de uma impedância de aterramento. Quando se consideram as condições de baixas frequências (frequências industriais), baixos valores de corrente e resistividades do solo não muito elevadas, os efeitos capacitivos são muito reduzidos o que permite tratar o comportamento da impedância de aterramento como uma resistência (ou condutância) linear como ilustra a Figura (2.3).

Figura 2.3 – Circuito equivalente do aterramento em baixas frequências.



(Fonte: Livro Aterramentos Elétricos. [Visacro Filho, S.]

Já nas aplicações de altas frequências como nos casos de ondas impulsivas de tensão e corrente, associadas à ocorrência de descargas atmosféricas, se faz necessário considerar os

efeitos capacitivos, a resistividade do solo e os efeitos da reatância indutiva presente nos condutores e eletrodos. Mais especificamente, o aumento impulsivo de corrente provoca a ionização do solo em torno da haste com o aparecimento de canais de descarga no solo. Esses canais de descarga implicam em um aumento equivalente da superfície dos eletrodos proporcional ao valor de pico de corrente. Disso resulta um aumento tanto da corrente condutiva quanto capacitiva no solo, provocando a redução da impedância de aterramento.

Usualmente, são desprezados os efeitos reativos para condições de baixas frequências e valores de impedância superiores a  $1 \Omega$ . No entanto, para valores inferiores a  $1 \Omega$ , como é comum em grandes sistemas de aterramento (como em Subestações), deve-se considerar a componente indutiva, pois essa componente pode influenciar não só no valor da corrente de falta como na sua distribuição de potenciais na superfície do solo.

Em resumo, o aterramento se comporta como uma impedância complexa ao ser percorrido por uma corrente impulsiva. Nas frequências industriais, tal impedância pode ser representada por sua componente resistiva. Assim, o valor dessa resistência de aterramento pode ser obtido pela relação entre o potencial desenvolvido no eletrodo e a corrente injetada no mesmo como mostrado na Equação (2.3).

$$R_T = \frac{V_T}{I} \quad (2.3)$$

A oposição à passagem de corrente elétrica para o solo através do eletrodo de aterramento é constituído por três componentes principais:

\*Resistência própria do eletrodo e das conexões elétricas (essas resistências são muito baixas devido à elevada condutância dos materiais empregados);

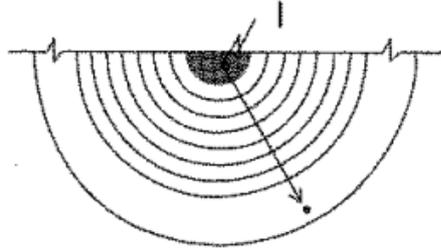
\*Resistência de contato entre o eletrodo e a terra que o envolve (de valor desprezível se a superfície do eletrodo estiver livre de contaminação por material isolante e se o solo estiver bem compactado);

\*Resistência do solo na vizinhança do eletrodo. Essa componente fundamental determina de modo efetivo o valor da resistência de um aterramento corretamente instalado.

Como o comportamento do solo é que, efetivamente, determina a resistência do aterramento, precisa-se considerar o modelo que possa descrever o comportamento da terra na vizinhança do eletrodo face à corrente injetada pelo sistema elétrico. Para tanto, recorre-se a

uma representação simplificada da interação entre um eletrodo de formato hemisférico e do solo que o envolve dividido em fatias também de formato de semiesfera, com ilustra a Figura (2.4).

Figura 2.4 – Modelo de solo homogêneo representado em fatias em torno do eletrodo.

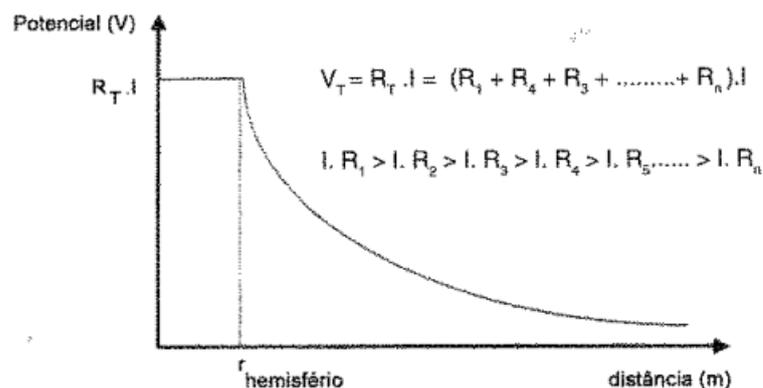


(Fonte: Livro Aterramentos Elétricos. [Visacro Filho, S.]

A soma das resistências de todas as fatias de solo até uma distância infinita resulta no valor da Resistência do Aterramento. Considerando que todas as fatias tenham a mesma espessura, as fatias mais próximas ao eletrodo terão resistência maior, pois a área atravessada pela corrente é menor. Pelo mesmo motivo, para distâncias maiores, a área torna-se tão grande que sua resistência torna-se desprezível. Portanto, quem determina a resistência do aterramento é a terra mais próxima ao eletrodo.

Considerando os potenciais estabelecidos no solo pela injeção de corrente no eletrodo hemisférico, deve-se observar que a corrente que atravessa radialmente cada fatia em direção ao infinito é a mesma. A queda de potencial em cada fatia  $i$  (dada por  $\Delta V_i = R_i \cdot I$ ) decresce à medida que se afasta do eletrodo, devido ao decréscimo da resistência das fatias de solo mais afastadas. Admitindo-se um potencial nulo no infinito, a tensão aumenta à medida que se aproxima do eletrodo, como mostra a Figura (2.5) que ilustra como se desenvolve o perfil de potencial no solo.

Figura 2.5 – Perfil de potencial no solo.



(Fonte: Livro Aterramentos Elétricos. [Visacro Filho, S.]

Para outras configurações de eletrodos, a determinação da resistência de aterramento requer desenvolvimentos analíticos cuja complexidade depende da configuração dos eletrodos. A resistência de aterramento é determinada pela elevação de potencial, referenciada ao infinito, e a corrente injetada no solo através do eletrodo.

Utilizando-se ainda o modelo de eletrodo hemisférico, calcula-se o potencial desenvolvido em um ponto  $x$  no solo distante radialmente de  $r_x$  do centro do eletrodo (ponto pelo qual a corrente é injetada) pela Equação (2.4).

$$V_{rx} - V_{\infty} = - \int_{\infty}^{r_x} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (2.4)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{ou} \quad \vec{E} = \rho \vec{J} \quad (2.5)$$

No caso em questão:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2.6)$$

$$\int_{\infty}^{r_x} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\rho}{2\pi} \cdot I \cdot \left[ \frac{1}{r} \right]_{\infty}^{r_x} \quad (2.7)$$

De onde segue que:

$$V_{rx} = \frac{\rho}{2\pi r_x} \cdot I \quad (2.8)$$

Considerando agora o ponto  $x$  sobre a superfície do eletrodo, pode-se determinar a elevação de potencial do eletrodo em relação ao infinito devido à injeção de corrente  $I$  pela Equação (2.9) a seguir:

$$V_{eletrodo} = \frac{\rho}{2\pi r_{eletrodo}} \cdot I \quad (2.9)$$

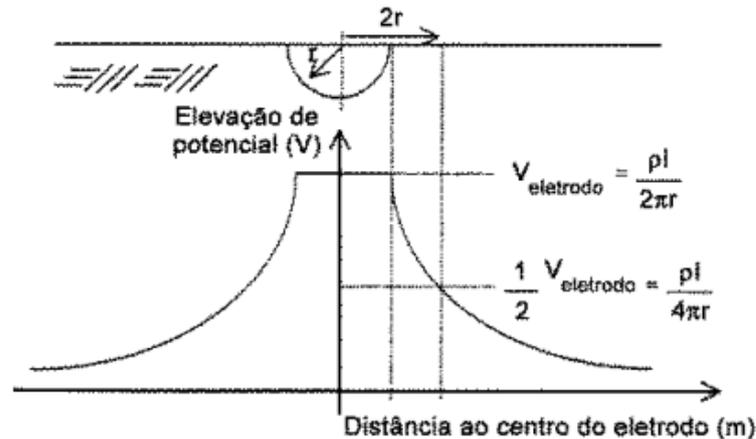
A partir de (2.3) determina-se a resistência de aterramento ( $R_T$ ):

$$R_T = \frac{V_{eletrodo}}{I} \quad (2.10)$$

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi r_{eletrodo}} \quad (2.11)$$

A área da seção do solo atravessada pela corrente aplicada no eletrodo vai aumentando à medida que se afasta deste. Conseqüentemente, reduz-se o valor da resistência dessas seções juntamente com as quedas de potencial por unidade de comprimento. Assim, a maior parte da elevação de potencial fica localizada na porção de solo circunvizinha ao eletrodo como ilustra a Figura (2.6) que também mostra que o potencial reduz-se a metade para uma distância de duas vezes o raio da semiesfera.

Figura 2.6 – Distribuição de potencial na superfície do solo.



(Fonte: Livro Aterramentos Elétricos. [Visacro Filho, S.]

Essa redução deriva da relação de potencial, como mostrado a seguir:

$$V_{r_x} = \frac{\rho}{2\pi r_x} \cdot I$$

$$V_{r_{\text{eletrodo}}} = \frac{\rho}{2\pi r_{\text{eletrodo}}} \cdot I \quad V_{2.r_{\text{eletrodo}}} = \frac{\rho}{2\pi \cdot 2.r_{\text{eletrodo}}} \cdot I \quad (2.12)$$

$$V_{r_{\text{eletrodo}}} - V_{2.r_{\text{eletrodo}}} = \frac{1}{2} \cdot V_{r_{\text{eletrodo}}} \quad (2.13)$$

Para outras configurações de aterramento, a distribuição de corrente no solo a partir do eletrodo será diferente. No entanto, o mesmo método básico poderá ser utilizado, ou seja, as dimensões e a geometria do eletrodo determinam uma formulação específica para o campo elétrico cuja integração desde um ponto no infinito até a superfície do eletrodo fornece a elevação de potencial. Assim, dividindo-se essa elevação de potencial pela corrente obtém-se a resistência de aterramento.

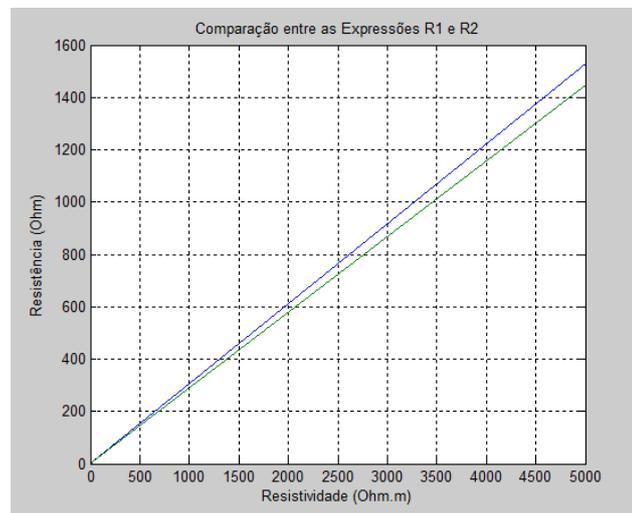
Por exemplo, nas referências [7] e [9] a resistência de aterramento de uma haste de comprimento  $l$  e raio  $a$ , verticalmente instalada no solo é dada pela expressão:

$$R_1 = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \quad (2.14)$$

A expressão para a resistência de aterramento considerada para a mesma haste vertical na referência [10] possui estrutura diferente, mostrada na equação (2.15).

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \left(\ln\frac{4l}{a} - 1\right) \quad (2.15)$$

Figura 2.7 – Comparação dos valores de resistência de uma haste vertical resultantes das expressões (2.14) e (2.15).



Comparando numericamente as duas expressões aplicadas a uma haste de 3,0 m de comprimento com diâmetro de 3/4 " (0,01905 m) e considerando que a instalação foi realizada em solos homogêneos com resistividade variando entre 0 até 5000  $\Omega.m$ , tem-se o gráfico mostrado na Figura (2.7). A diferença entre valores fornecidos pelas duas expressões é menor que 6% para toda faixa de resistividade considerada.

A equação (2.1),  $R_T = K.\rho$ , mostra a proporcionalidade entre a resistência de aterramento e a resistividade do solo  $\rho$  e a influência da geometria dos condutores e eletrodos utilizados no sistema de aterramento. Assim, a resistência de aterramento depende, na sua essência, dos valores de resistividade do solo (e dos fatores que a influenciam, expostos na Seção 2.1), do arranjo espacial e das dimensões físicas dos eletrodos. Disso resulta não só a forma pela qual a corrente oriunda de desequilíbrios ou descargas atmosféricas se dispersará

pelo solo, bem como se distribuirão as elevações de potencial na sua superfície provocadas por essas correntes. Outro aspecto importante é que o dimensionamento a concepção de um sistema de aterramento baseia-se em aproximações como considerar o solo estratificado em duas camadas horizontais com valores de resistividades diferentes.

A referência [3] evidencia as características desejáveis (a serem consideradas desde o projeto) de um sistema de aterramento em função das funções fundamentais que o mesmo deve desempenhar:

- \*permitir o escoamento para terra de correntes de descarga, constituindo-se em um item de segurança;

- \*possibilitar o uso da terra como um condutor de retorno para um sistema elétrico;

- \*influenciar positivamente o desempenho eletromagnético do sistema elétrico, seja na fixação de uma referência de potencial ou na implementação das estratégias de proteção baseadas na detecção de fluxos correntes no solo;

- \*limitar os níveis de potenciais e sua distribuição na superfície do solo a patamares seguros;

Para desempenhar tais funções o aterramento deve ter como características principais: (i) capacidade de condução; (ii) baixo valor de resistência e (iii) configuração de eletrodos que possibilite o controle do gradiente de potencial. Estabelecer um valor para  $R_T$  de forma absoluta é difícil, já que depende de fatores técnicos e econômicos. Por exemplo, é comum encontrar resistências de aterramento menor que  $5 \Omega$  para instalações elétricas de grande porte (Subestações e Usinas) como também se encontram valores na faixa de  $40 \Omega$  a  $400 \Omega$  para redes de distribuição de energia elétrica. Ressalta-se, ainda, que em algumas aplicações o valor da resistência de aterramento não é ponto fundamental (por exemplo: Aterramentos para evitar carregamento estático em equipamento eletro-eletrônico). Já em outros casos, não é possível se alcançar valores reduzidos de resistência por restrições como elevada resistividade do solo e limitação no espaço para instalação dos eletrodos.

Segundo ainda a referência [3] também se observa que, algumas vezes, o valor da resistência pode não alcançar o valor desejado após a instalação de um sistema de aterramento. Nesses casos é possível lançar mão de medidas que podem reduzir o valor da resistência, como:

- (a) Aumento do número de eletrodos em paralelo;
- (b) Aprofundamento dos eletrodos;
- (c) Aumento da seção reta dos eletrodos;
- (d) Tratamento físico e químico do solo.

### 2.3 EFEITOS DO CHOQUE ELÉTRICO SOBRE O CORPO HUMANO

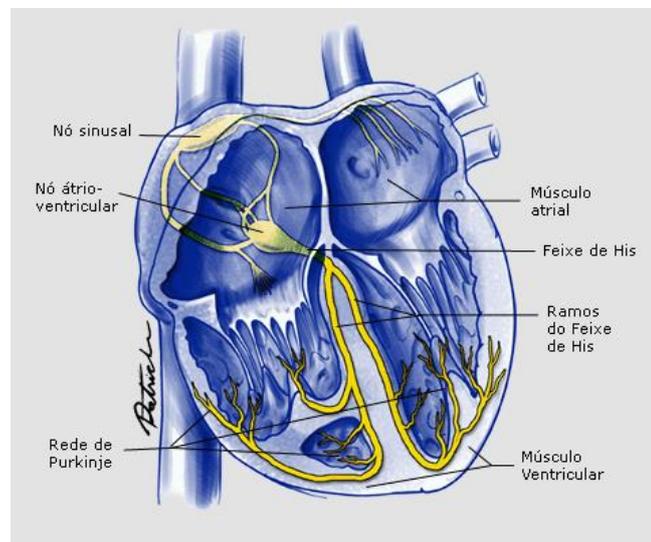
Como já abordado no Capítulo 1, o sistema de aterramento tem, entre outras funções, a manutenção dos gradientes de potencial dentro de patamares seguros para as pessoas que trabalham dentro das instalações elétricas, como Subestações. Segundo [4], o sistema de aterramento é projetado de modo a produzir, durante curto-circuito máximo com a terra, uma distribuição no perfil de potenciais de passo e de toque abaixo dos limites de risco de fibrilação ventricular do coração. Os defeitos no sistema elétrico, que geram correntes de sequência zero, terão suas correntes passando pelo aterramento. A área do aterramento é a região de concentração das correntes de defeitos, portanto os potenciais são elevados e cuidados especiais devem ser observados na segurança.

O choque elétrico é a perturbação que se manifesta no organismo quando este é percorrido por uma corrente elétrica. Seus efeitos variam e dependem: Do percurso e da intensidade da corrente elétrica pelo corpo; Tempo de duração do choque elétrico; Frequência e espécie da corrente elétrica; Tensão elétrica; Estado de umidade da pele e condições orgânicas do indivíduo. Ainda de acordo com [4], as perturbações no indivíduo são manifestadas por:

- \* Inibição dos centros nervosos, inclusive dos que comandam a respiração produzindo parada respiratória;
- \* Alteração no ritmo cardíaco, podendo produzir fibrilação ventricular e uma conseqüente parada cardíaca;
- \* Queimaduras profundas, produzindo necrose de tecidos;
- \* Alteração no sangue provocada por efeitos térmicos e eletrolíticos da corrente elétrica.

Para os choques elétricos relacionados à tensão de toque e de passo durante um defeito no sistema elétrico, o mais importante é o da fibrilação ventricular. O coração é essencialmente uma bomba hemo-hidráulica que faz sangue circular continuamente pelo corpo. O sangue venoso, rico em  $\text{CO}_2$ , entra no coração pela veia cava inferior e superior ocupando o átrio direito. Do átrio direito é bombeado para o ventrículo esquerdo e deste para os pulmões para que seja realizada a troca do  $\text{CO}_2$  pelo  $\text{O}_2$ , formando o sangue arterial. Este sangue retorna ao coração para ocupar, agora, o átrio esquerdo de onde é impulsionado para o ventrículo esquerdo. O ventrículo esquerdo, ao se contrair, bombeia o sangue arterial para todo o corpo.

Figura 2.8 – Sistema de condução intrínseca do coração humano.



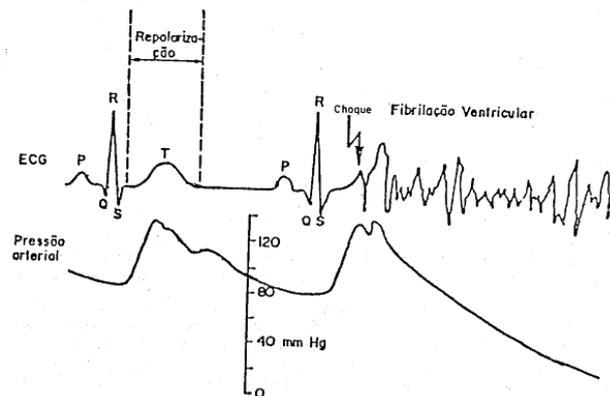
(Fonte: [www.arritmiacardiaca.com.br](http://www.arritmiacardiaca.com.br))

De acordo com [4], as paredes musculares do ventrículo são as mais solicitadas, pois devem bombear o sangue com a pressão adequada para todo o corpo. Nessa região ocorrem os principais problemas cardíacos de enfarte e fibrilação ventricular. Os batimentos do coração são comandados eletricamente por dois nódulos presentes no átrio direito do coração: O nódulo sinusal ou sino atrial (NSA) e o nódulo átrio ventricular (NAV), mostrados na Figura (2.9). O NSA é um gerador elétrico, quimicamente, processa a alternância dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , emitindo um pulso elétrico. Este sinal provoca a contração das paredes do átrio, levando o sangue para o ventrículo. O sinal elétrico é então captado pelo Feixe de His e distribuído pela Rede de Purkinje a todas as fibras musculares do ventrículo, provocando sua contração. As fibras musculares do ventrículo se encontram polarizadas antes de receberem o sinal do NSA e, ao se contraírem, perdem a polarização. Em seguida deve ocorrer o processo de

repolarização das fibras. Esta etapa corresponde ao período mais vulnerável para ocorrência da fibrilação ventricular provocada por um choque elétrico.

A fibrilação ventricular é o estado de tremulação (vibração) irregular e sem ritmo das paredes dos ventrículos, com perda total da eficiência de bombeamento do sangue. A Figura (2.10) mostra os sinais característicos dos batimentos (eletrocardiograma - ECG) e da pressão arterial na ocorrência da fibrilação ventricular.

Figura 2.9 – Sinal do eletrocardiograma e da pressão arterial.



(Fonte: Livro Aterramento Elétrico – [Kindermann & Campangolo])

As paredes do ventrículo são formadas por tecidos diferentes sobrepostos de maneira estratificada. Cada camada de tecido possui sua própria frequência natural de ressonância. A corrente elétrica do choque, ao passar por essas camadas, produz vibrações distintas, quebrando a eficiência da repolarização. Consequentemente as fibras musculares não respondem mais sincronamente aos sinais emitidos pelos NSA. As paredes ficam, então, tremulando como é típico na ocorrência de uma fibrilação ventricular. A fibrilação ventricular é irreversível espontaneamente e, se nenhuma providência for tomada, acaba por evoluir para o regime de parada cardíaca. Nesse quadro faz-se necessário o imediato socorro a vítima por meio de um desfibrilador, massagem cardíaca e ventilação mecânica.

Charles Dalziel, em estudos realizados nas décadas de 40 e 50 sobre os efeitos do choque elétrico sobre o corpo humano, concluiu empiricamente a relação (2.16), na qual  $I_{choque}$  é a corrente (medida em Ampères) pelo corpo, limite para não causar fibrilação,  $t$  é o tempo (medido em segundos) e está compreendido entre 0,03 e 3 s. Por fim, a constante  $k$  vale 0,116 para uma pessoa com massa de 50 Kg e 0,157 para uma pessoa com massa de 70 Kg.

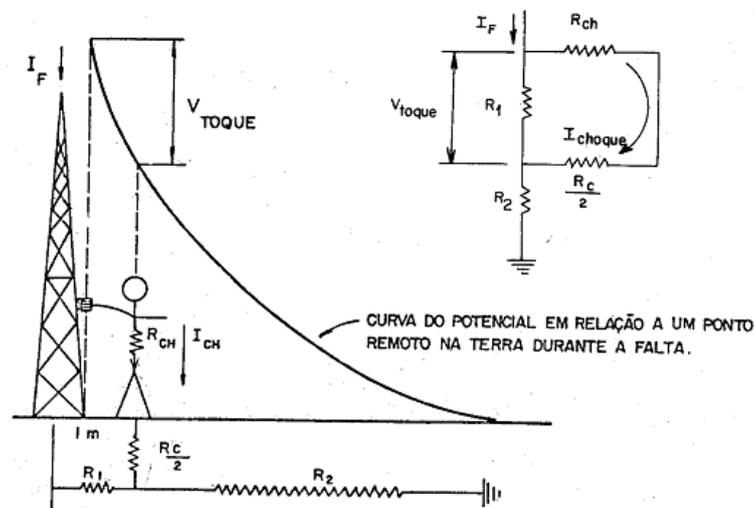
$$I_{choque} = \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (2.16)$$

A expressão é usada para obtenção do limite permissível e aceitável de corrente, para que não ocorra fibrilação, durante o tempo em que a pessoa fica submetida à tensão de toque ou de passo.

### 2.3.1 POTENCIAL DE TOQUE

É a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica de uma instalação elétrica, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1 m da base da estrutura. O potencial máximo gerado por um aterramento durante o período de defeito não deve produzir uma corrente de choque superior ao previsto pela equação (2.16). Pela Figura (2.10), pode-se obter a expressão do potencial de toque em relação à corrente elétrica de choque.

Figura 2.10 – Potencial de toque.



(Fonte: Livro Aterramento Elétrico – [Kindermann & Campangolo])

$$V_{toque} = \left( R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \cdot I_{choque} \quad (2.17)$$

Na relação (2.17),  $R_{ch}$  é a resistência do corpo humano (considerada 1.000  $\Omega$ );  $R_c$  é a resistência de contato que pode ser considerada  $3\rho_s$  (resistividade superficial do solo);  $I_{choque}$  é

a corrente de choque pelo corpo humano. A expressão para o potencial de toque pode ser reescrita de acordo com a equação (2.18).

$$V_{toque} = (1000 + 1,5 \cdot \rho_s) \cdot I_{choque} \quad (2.18)$$

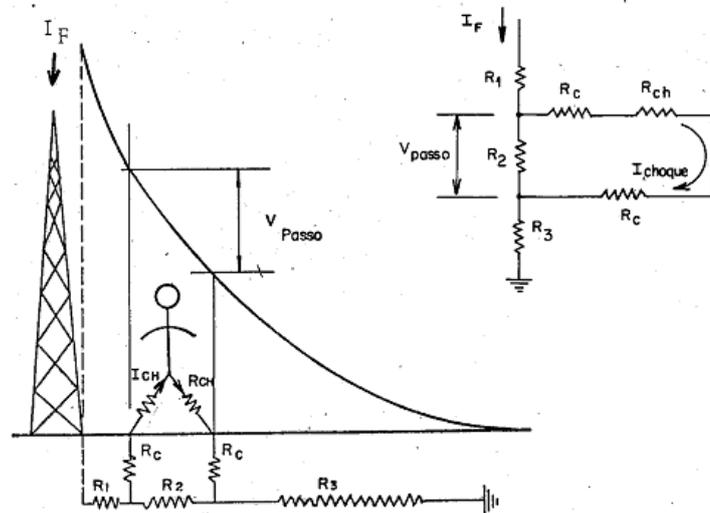
Substituindo  $I_{choque}$  na equação (2.18) obtém-se o potencial de toque máximo definido na Equação (2.19)

$$V_{toque\ máximo} = (1000 + 1,5 \cdot \rho_s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (2.19)$$

### 2.3.2 POTENCIAL DE PASSO

A definição clássica para o potencial de passo para análise de segurança é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distanciados de 1 m (distância entre os dois pés), devido à passagem de corrente de curto-circuito para terra. Pela Figura (2.11), pode-se obter a expressão do potencial de passo em relação à corrente elétrica de choque.

Figura 2.11 – Potencial de passo.



(Fonte: Livro Aterramento Elétrico – [Kindermann & Campangolo])

$$V_{passo} = (R_{ch} + 2R_c) \cdot I_{choque} \quad (2.20)$$

Fazendo  $R_c = 3\rho_s$  e substituindo  $I_{choque}$  pela relação de Daziel, tem-se a relação para o potencial de passo máximo:

$$V_{passo\ máximo} = (1000 + 6.\rho s) \cdot \frac{k}{\sqrt{t}} \quad (2.21)$$

Esta seção evidenciou a importância do sistema de aterramento para a segurança das pessoas que trabalham acessando instalações elétricas, sobretudo Usinas e Subestações. Assim, ressalta-se a contribuição de um sistema que possa monitorar a evolução dos potenciais dos pontos de descida para terra do sistema de aterramento como forma de avaliar se os potenciais de toque e de passo possam se encontrar fora dos patamares seguros.

## **CAPÍTULO 3 – CENÁRIO E MOTIVAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO**

Os dimensionamentos realizados em projetos de sistemas de aterramento baseiam-se em aproximações. Uma das aproximações mais comuns é considerar o solo como sendo formado por camadas horizontais cada uma com seu valor de resistividade distribuído uniformemente. Portanto, a medição da resistência de aterramento realizada após a instalação do sistema (respeitando o tempo de acomodação do solo) é necessária para avaliar se os critérios de projeto foram adequadamente selecionados. Portanto, a medição da resistência de aterramento e dos potenciais de toque e de passo não só possibilitam a comparação com os valores especificados em projeto como também permite o acompanhamento de seu desempenho ao longo do tempo de operação [3].

A literatura e os trabalhos correlatos apresentados nos Capítulos 1 e 2, tidos como referências para a construção do sistema aqui proposto, evidenciam a importância do acompanhamento contínuo das malhas de aterramento para a operação dos SEP dentro dos critérios de qualidade de fornecimento de energia. O desempenho adequado dos sistemas de aterramento é uma condição essencial para o restabelecimento da condição nominal dos SEP mediante as condições de falta. Assim, é importante detectar variações que indiquem a presença de zonas de falhas que possam resultar em situações mais graves com a perda de equipamentos, níveis perigosos de potenciais de toque e de passo para os profissionais que acessam as instalações, falhas na atuação dos dispositivos de proteção, entre outros.

Algumas técnicas de medição já são utilizadas há bastante tempo fornecendo bons resultados. No entanto, são realizadas com as instalações desenergizadas. Com a implantação do novo modelo e de novas regras para o setor elétrico brasileiro, dentre elas, os contratos de concessão que penalizam a indisponibilidade das instalações e as exigências no tocante à segurança, que cobram a responsabilidade das empresas de avaliarem o estado das malhas de terra de suas subestações, foi necessário repensar a metodologia para os testes de avaliação das malhas de terra, considerando agora a hipótese de realizar os trabalhos sem a necessidade de desligamentos dos ativos. Desta forma, é promovida a diminuição da indisponibilidade dos ativos e a otimização dos recursos necessários para a execução dos ensaios, priorizando a segurança das pessoas e das instalações [11].

Uma das motivações para o desenvolvimento do sistema apresentado neste trabalho nasce da experiência de perda (“queima”) de equipamentos (CLP, cartões de entrada/saída, oscilografia, etc) na sala de monitoramento da máquina 3 da UHE de Coaracy Nunes mostrada na Figura 3.1. Há registros de interrupção de fornecimento por conta da perda de tais equipamentos provocada pela incidência de descarga atmosférica. Eventos dessa natureza impedem a visualização correta da máquina 3 no software supervisor presente no centro de operação da UHE resultando na parada das máquinas 1 e 2 da UHE, também observadas na Figura (3.1).

Figura 3.1 – Pátio de máquinas da UHE de Coaracy Nunes.



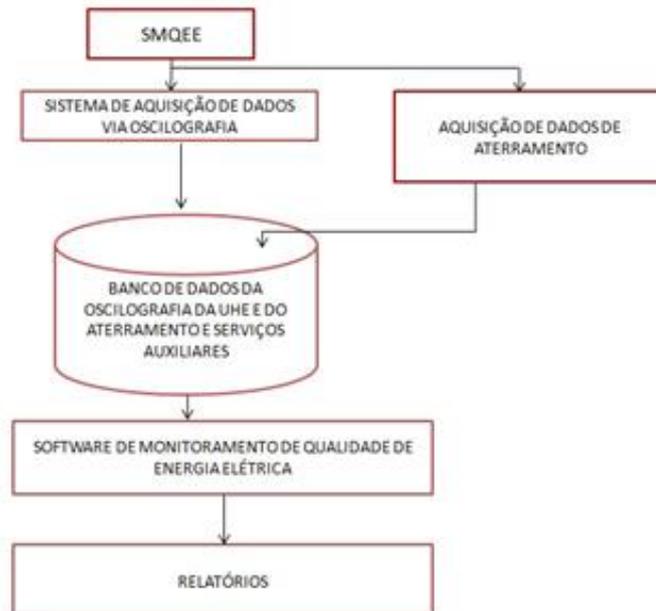
Fonte: Registro realizado pelo autor em visita técnica.

A partir desse cenário se dá a concepção do desenvolvimento de um sistema de monitoramento da QEE como uma ferramenta de auxílio às equipes de operação e manutenção da unidade. Disso resultou uma parceria entre a UFPA e ELETROBRAS/ELETRONORTE, representada pela equipe da UHE, concretizada no projeto de P&D: “Sistema de Monitoramento da Qualidade da Energia nas Instalações da UHE Coaracy Nunes com Análise da Contribuição do Sistema de Aterramento”, denominado de SMQEE. O sistema produzido pelo projeto de P&D é composto pelos seguintes módulos:

- a) Módulo de aquisição de sinais de tensão e de corrente de aterramento;
- b) Sistema de aquisição de dados (formas de onda de tensão e de corrente) provenientes de oscilografia;
- c) Banco de dados para organização das medições do aterramento e da oscilografia;
- d) Software de monitoramento de QEE.

O módulo de aquisição de dados de aterramento, elemento central deste trabalho, representa uma expansão da instrumentação para coleta de dados de tensão e de corrente não contemplada pela oscilografia. Uma vez coletados, os dados provenientes da oscilografia e dos módulos de aquisição de tensão e de corrente no aterramento são armazenados em um banco de dados utilizado pelo SMQEE. A usina conta com três oscilógrafos: o primeiro deles é do fabricante SIEMENS e se dedica ao monitoramento da Subestação; os outros dois são do fabricante REASON, instalados para coletarem informações das máquinas 1, 2 e 3. As amostras dos oscilógrafos são processadas por um algoritmo, baseado em transformada *wavelet*, para a extração dos fenômenos de QEE contidos nas formas de onda coletadas. Uma vez processados, os dados alimentam ferramentas estatísticas e ferramentas baseadas em inteligência computacional (Redes Neurais Artificiais) para facilitar a análise e auxiliar no diagnóstico associados aos eventos de QEE. Além disso, o SMQEE propicia aos seus operadores a visualização das condições da malha de aterramento permitindo o franco conhecimento das tensões residuais na mesma. A Figura (3.2) mostra a concepção do SMQEE em diagrama de blocos.

Figura 3.2 – Diagrama em blocos do sistema SMQEE.



Fonte: Relatório de etapa do Projeto.

Uma das primeiras etapas prevista na metodologia de desenvolvimento do projeto de P&D preconizava a realização de campanhas de medição para observar os níveis de tensão e corrente nos pontos de descida dos condutores (cordoalhas) que se direcionam para os

eletrodos da malha de aterramento da UHE. Para a realização das campanhas de medição e para a implantação do sistema de monitoramento é essencial providenciar a instalação de um eletrodo remoto fixado na terra para servir como referência para as medições de tensão.

### 3.1 INSTALAÇÃO DO TERRA REMOTO

A localização desse eletrodo nas imediações da UHE de Coaracy Nunes foi determinada por meio de medições seguindo recomendações técnicas baseadas em norma ABNT NBR 15749, de 2009 [12]. Nessa campanha de medição, utilizou-se um terrômetro TM25m da Megabras mostrado na Figura (3.3). Esse terrômetro tem como princípio de medição a queda de potencial com a injeção de uma corrente de alta frequência (25 KHz) também em acordo a NBR 15749 [12]. Tal princípio de medição pode ser aplicado na medição de resistência de aterramento de torres de transmissão e de malhas de terra de subestações com as instalações energizadas. A localização do eletrodo remoto precisa ser efetuada a uma distância livre das influências geradas pelas instalações da própria UHE e sua distância foi confirmada pela medição realizada com o terrômetro. A Figura (3.4) mostra o ponto onde a haste do terra remoto foi fixada no solo.

Figura 3.3 – Terrômetro da Megabras.



Fonte: [www.megabras.com](http://www.megabras.com)

Figura 3.4 – Local de instalação do terra remoto.



Fonte: Registro feito em visita à UHE.

A Figura (3.5) mostra a curva obtida com as medições do terrômetro, nas quais cada ponto foi obtido afastando-se o eletrodo de potencial a partir do terra remoto em direção a UHE. A curva mostra a região de patamar obedecendo ao aspecto usual para este tipo de medição. O terra remoto ficou posicionado cerca de 210 m da UHE devido às características peculiares do relevo e do solo no entorno da UHE, como mostra a Figura (3.6).

Figura 3.5 – Curva Rxd da medição realizada com terrômetro para instalação do terra remoto.

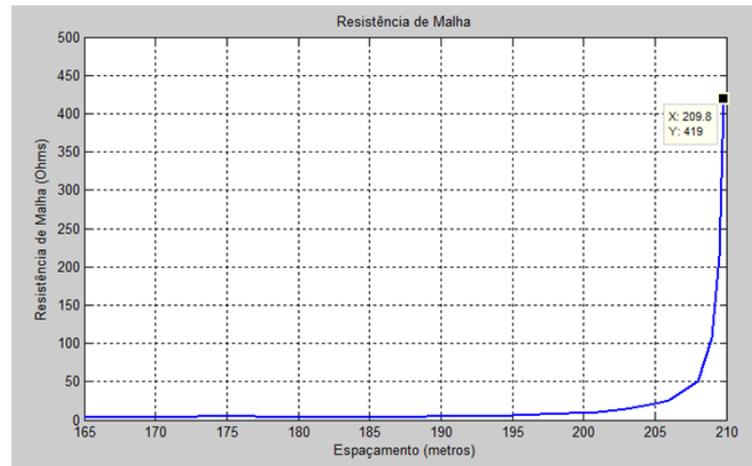


Figura 3.6 – Ponto de lançamento de cabos do terrômetro TM25m.



Fonte: Registro feito em visita à UHE.

### 3.2 CAMPANHA DE MEDIÇÃO NA MALHA DE TERRA DA UHE

Com a instalação do terra remoto, empreendeu-se uma nova campanha de medição com a utilização de um osciloscópio portátil. O objetivo era medir e capturar formas de onda de tensão, medida em relação ao terra remoto, e a corrente injetada nos mesmos pontos. Essa campanha, portanto, serviu como base para o projeto dos circuitos de condicionamento de tensão e de corrente dos instrumentos. Os primeiros pontos medidos foram os locais de descida de cordoalhas de aterramento ao longo da fita de equipontencialização no pátio de

máquinas da UHE. As Figuras (3.7) até (3.11) mostram as formas de onda de tensão (canal A – 5 V/divisão) e de corrente (canal B – 2 A/divisão) medidas com o osciloscópio portátil.

Figura 3.7 – Ponto 1 de medição.

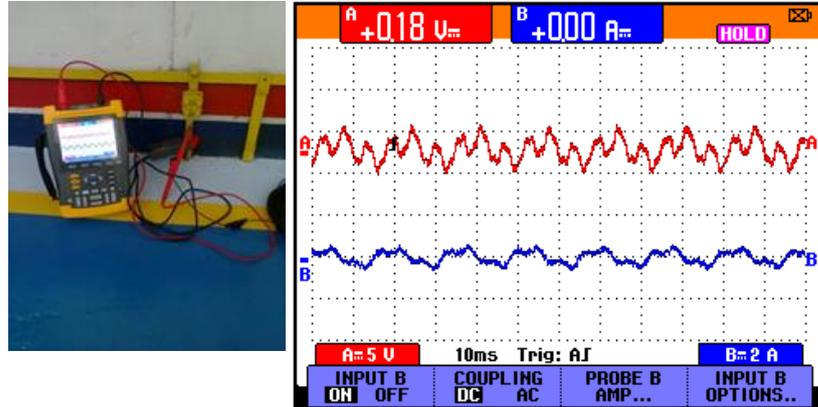


Figura 3.8 – Ponto 2 de medição.

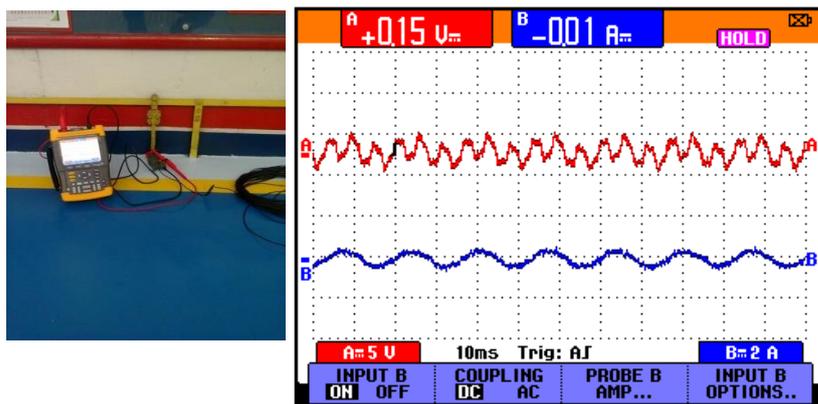


Figura 3.9 – Ponto 3 de medição.

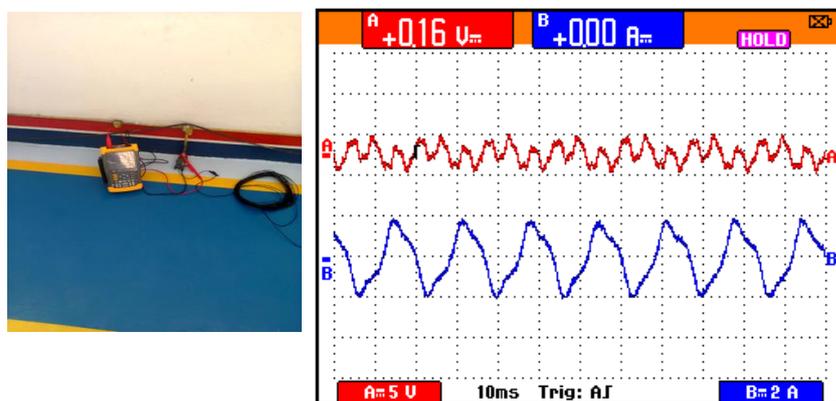


Figura 3.10 – Ponto 4 de medição.

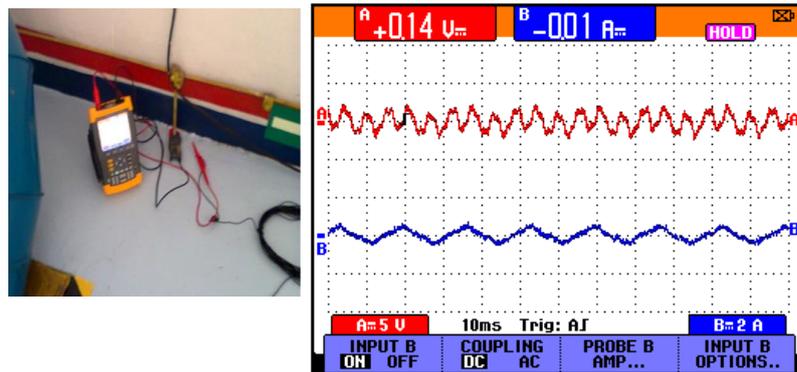
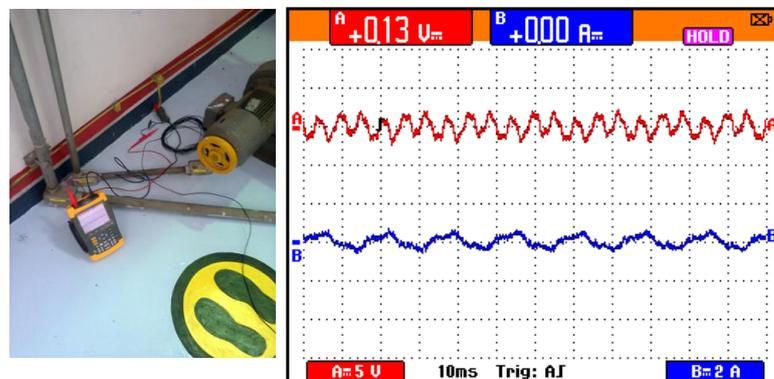
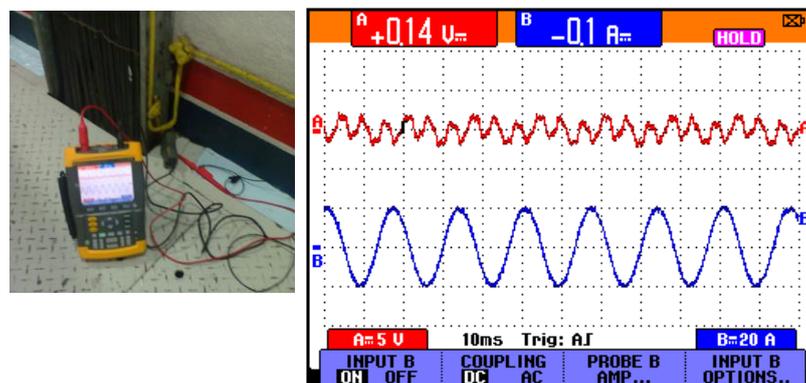


Figura 3.11 – Ponto 5 de medição.



Cumprer observar que esses primeiros registros apresentaram um comportamento similar de baixos valores de tensão e de corrente. A tensão medida em todos esses pontos ficou em torno de 0,70 V, o que confirma os valores típicos medidos em campanhas anteriores. Já nos próximos registros, tomados em outros pontos da UHE, observou-se a mudança do perfil nos valores das correntes.

Figura 3.12 – Ponto 6 de medição.



A Figura (3.12) mostra o sinal de corrente, medido com uma escala de 20 A/divisão, e com frequência de 60 Hz. A cordoalha de aterramento mostrada no ponto da Figura (3.12) desce da sala de equipamentos de controle da máquina 3 (Figura 3.1). As Figuras (3.13), (3.14) e (3.15) mostram três medições feitas na cordoalha posicionada atrás da máquina 3 e que também desce a partir da sala de equipamentos de controle. Observa-se em cada uma das Figuras que a escala de corrente adotada foi de 20 A/divisão. A escala de tensão permaneceu em 5 V/divisão.

Figura 3.13 – Medição 1 na cordoalha posicionada atrás da máquina 3.

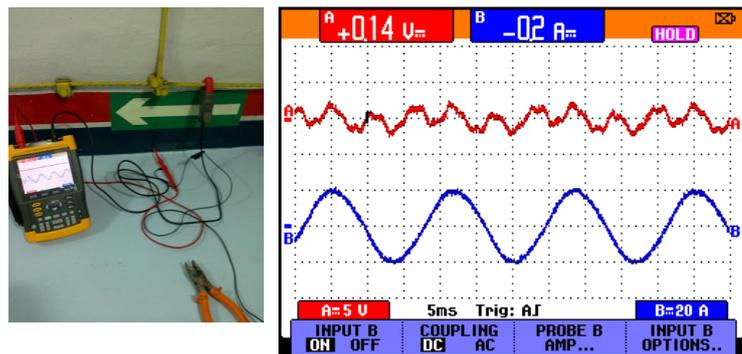


Figura 3.14 – Medição 2 na cordoalha posicionada atrás da máquina 3.

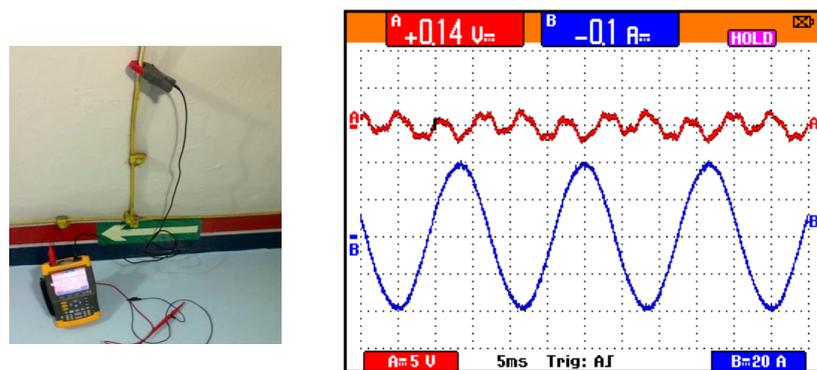
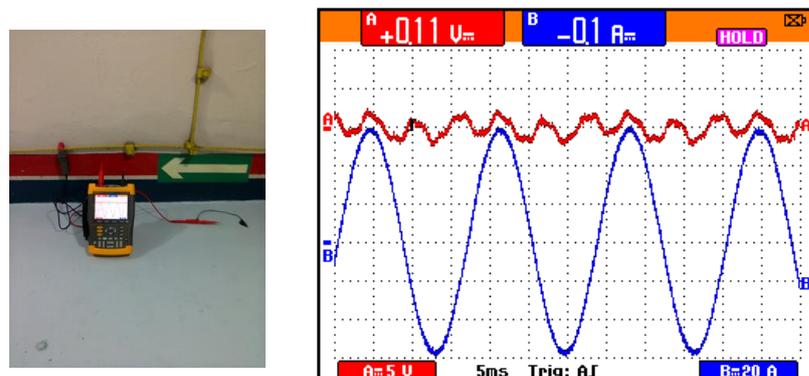


Figura 3.15 – Medição 3 na cordoalha posicionada atrás da máquina 3.



Os próximos registros de medição são do pátio de transformadores da UHE e não contam com os valores de tensão pela impossibilidade, naquele momento, de estender o cabo proveniente do terra remoto. Esses pontos também exibiram valores elevados de corrente. A Figura (3.16) mostra o aspecto geral das instalações.

Figura 3.16 – Aspecto geral das instalações do pátio de transformadores.



Fonte: Registro feito em visita à UHE.

A Figura (3.17) exibe a medição no aterramento da carcaça do transformador da fase C da máquina 3 e a Figura (3.18) mostra a medição no ponto de aterramento das estruturas (isoladores, pára-raios, ferragens etc) da mesma fase C.

Figura 3.17 – Carcaça do Transformador da fase C.

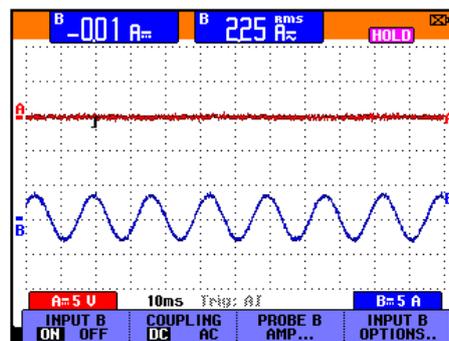
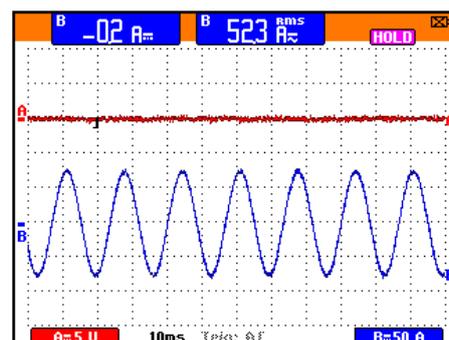


Figura 3.18 – Aterramento das estruturas da fase C do Gerador G3.



A Figura (3.19) mostra a corrente medida na descida da estrutura da fase B e a Figura (3.20) mostra a corrente medida na descida da estrutura da fase A.

Figura 3.19 – Aterramento das estruturas da fase B.

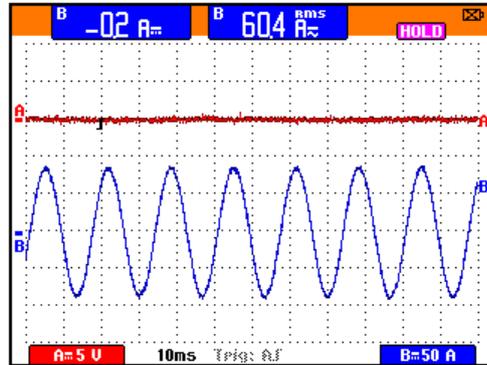
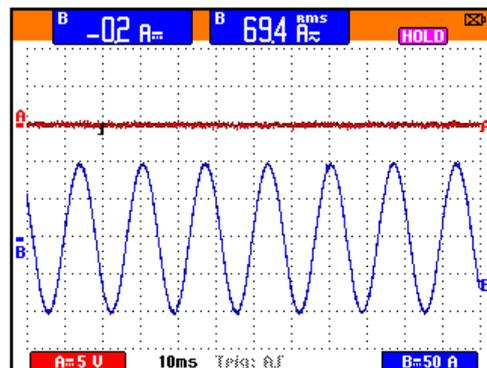
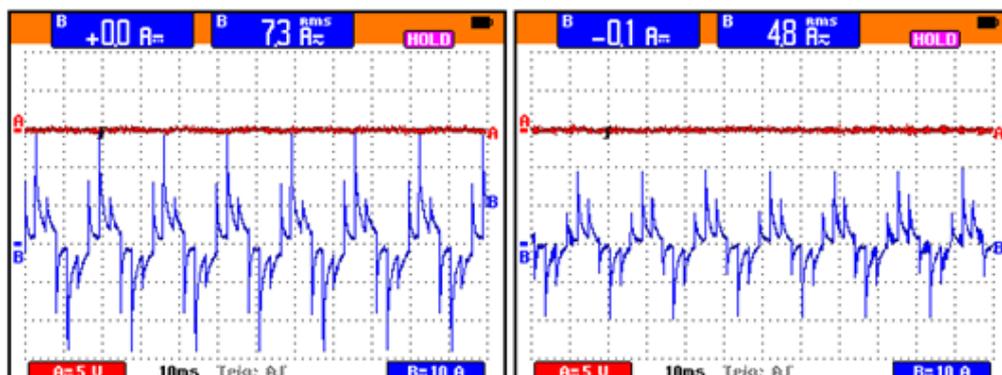


Figura 3.20 – Aterramento das estruturas da fase A.



Finalmente, são apresentadas na Figura (3.21) as formas de onda das correntes de neutro das pontes tiristorizadas 1 e 2 da máquina 2. As formas de onda são típicas da operação de chaveamento.

Figura 3.21 – Corrente de neutro da Ponte Tiristorizada 1 e 2 da máquina 2.

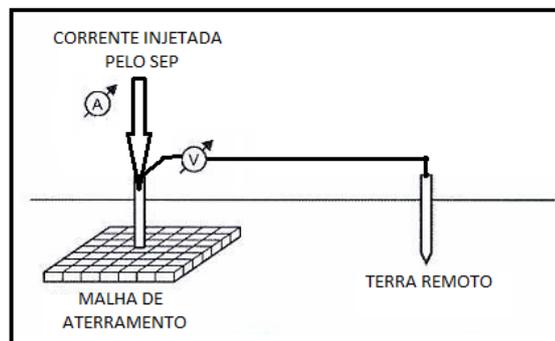


### 3.3 APRESENTAÇÃO DA PROPOSTA

As medições reveladas na campanha de medição do sistema de aterramento da UHE evidenciam a necessidade de monitoramento contínuo para acompanhar o desempenho da malha de terra não só em função do papel primordial do aterramento, já mostrado nos Capítulos anteriores, como também para buscar correlações entre os fenômenos que provocam perturbações na qualidade do fornecimento e a respectiva reação do sistema de aterramento frente a tais fenômenos.

A arquitetura do sistema de monitoramento, aqui proposto, baseia-se na implantação de uma rede de instrumentos microcontrolados para monitorar pontos selecionados da malha do aterramento da UHE. Cada instrumento de monitoramento mede a corrente injetada pelo próprio SEP na malha de terra e a tensão no mesmo ponto medida em relação a uma referência fornecida por um eletrodo de terra instalado remotamente. A Figura (3.21) mostra as medições realizadas pelos circuitos de tensão e corrente de cada instrumento.

Figura 3.22 – Medição de tensão e corrente realizada pelos instrumentos.



A partir das medidas de tensão e corrente, obtém-se a resistência equivalente no ponto de medição dado pela relação:

$$R_{eq} = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

Na equação (3.1),  $V$  e  $I$  são, respectivamente, a tensão medida em relação ao terra remoto e a corrente injetada na malha de aterramento pelos equipamentos da UHE. A partir dos valores calculados de  $R_{eq}$ , monitorado de forma contínua, pode-se avaliar as condições da malha de terra e, a partir dessa análise, detectar zonas de falha. Portanto, a função do sistema de monitoramento é acompanhar o comportamento do sistema de aterramento, por meio das variações detectadas nas resistências equivalentes dos pontos de medição. A proposta de se

construir uma cadeia de medição para monitoramento contínuo da malha de aterramento com base em sistemas embarcados e comunicação sem fio atende a critérios importantes como baixo custo e flexibilidade, já que outros instrumentos podem ser facilmente adicionados à rede de monitoramento e, os que já estiverem instalados, podem ser reposicionados para outros pontos de medição.

## **CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DA MALHA DE TERRA DA UHE DE COARACY NUNES**

Os sistemas embarcados têm sido empregados nos mais diversos sistemas de monitoramento e controle. Isso se deve a fatores como a evolução dos microcontroladores e processadores que incorporam circuitos que antes se encontravam apenas nos processadores mais avançados e o sucessivo barateamento. Esses dispositivos exibem hoje maior disponibilidade de memória e Unidades Centrais de Processamento (UCP) mais elaboradas, o que resulta em maior capacidade de processamento. De modo geral, os microcontroladores possuem circuitos periféricos (Temporizadores, Geradores de sinal PWM, Conversores A/D, Interfaces de Comunicação, entre outros) que lhes confere grande versatilidade, de modo que podem ser utilizados na construção dos mais diversos sistemas de aquisição e controle.

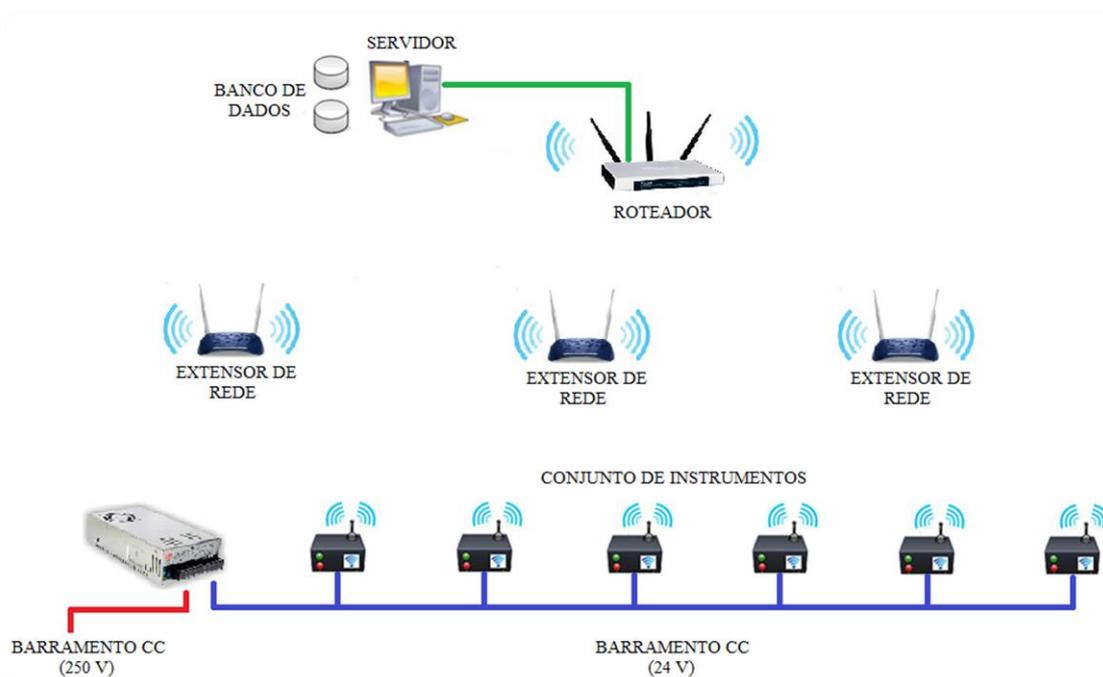
Na seção 1.4 do Capítulo 1, foram apresentados sistemas construídos para monitorar malhas de aterramento de instalações energizadas. A concepção do sistema, aqui proposto, está centrada na idéia de acompanhar o desempenho da malha de aterramento com base na medição das correntes nela injetadas e na medição da elevação de potencial nos mesmos pontos tendo como referência um ponto de terra remotamente fixado e livre das influências eletromagnéticas geradas pela operação dos equipamentos da UHE. Assim, os instrumentos são instalados em vários pontos de descida para a terra dos condutores que compõem o aterramento da Usina. O sistema de monitoramento pode tomar como base as medições de tensão e de corrente para determinar a resistência equivalente do ponto em questão. As variações dos valores de tensão, de corrente e de resistência de cada ponto permitem mapear zonas de falha no desempenho da malha em questão.

A seção (4.1) deste Capítulo apresenta a concepção e a arquitetura geral do sistema de monitoramento. Na seção (4.2) apresentam-se os aspectos gerais do hardware dos instrumentos de aquisição de tensão e de corrente, juntamente com os aspectos principais presentes na estrutura do firmware dos microcontroladores empregados na construção desses equipamentos. A seção (4.3) mostra os aspectos primordiais do sistema de software de gerenciamento dos instrumentos, sua interface com o usuário e a base de dados formada a partir das medições coletadas pelos instrumentos.

#### 4.1 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO

A proposta do sistema de monitoramento de malhas de aterramento para instalações energizadas contempla a implantação de uma rede de instrumentos de medição de tensão e de corrente com transmissão de dados por meio de uma rede sem fio (*WiFi*). Os dados transmitidos de cada instrumento são interceptados e organizados por um software instalado em um computador *desktop* dedicado para o sistema (servidor). A função desse software é de se comunicar com os instrumentos em campo para coletar e organizar todas as medições em uma base de dados para análise posterior. A Figura (4.1) ilustra a arquitetura do sistema.

Figura 4.1 – Arquitetura do sistema de monitoramento.



A estrutura de comunicação de dados é composta por um roteador *WiFi*, ligado à placa de rede do servidor, e por equipamentos extensores de rede (tl-wa830 da TP-LINK). Esses últimos foram adicionados à estrutura de comunicação de modo a garantir a transmissão dos dados entre o servidor e os instrumentos. No ambiente da UHE estão presentes campos eletromagnéticos gerados pelo funcionamento de todos os equipamentos da UHE (Geradores, Retificadores, cabos energizados) e obstáculos que dificultam a comunicação (pilares e paredes). Além disso, a sala de operação da usina se situa em um andar superior e, assim, dependendo do local onde o instrumento estiver instalado, o extensor de rede se torna uma rota alternativa para o instrumento conseguir se comunicar com o roteador e, em seguida, o

servidor. Sem a presença dos extensores de rede, observado na Figura (4.2), haveria restrições para os locais de instalação dos instrumentos.

Figura 4.2 – Aspecto geral do extensor de rede e de sua instalação na UHE de Coaracy Nunes.



A Figura (4.3) mostra uma visão da sala de máquinas da UHE de Coaracy Nunes juntamente com uma ilustração que sugere alguns locais possíveis para instalação dos instrumentos.

Figura 4.3 – Parque de máquinas da UHE de Coaracy Nunes.



Todos os instrumentos e extensores de rede são alimentados a partir de um barramento CC de 250 V (circuito retificador e banco de baterias) dos serviços auxiliares da UHE de Coaracy Nunes. Como a tensão de 250 V CC é incompatível com a tensão de alimentação dos instrumentos e dos extensores, foram especificados dois conversores CC-CC do tipo *buck*

abaixador para reduzir a tensão de 250 V CC para 24 V CC (SP320-24 da Mean Well). O conversor CC-CC é mostrado na Figura (4.4).

Figura 4.4 – Conversor CC-CC SP320-24 da Mean Well.



Fonte: [www.meanwell.com/brazil](http://www.meanwell.com/brazil)

Para cada instrumento e cada extensor de rede há outro conversor CC-CC (LM 2596) para regular a tensão de 24 V proveniente da saída dos conversores 250 V/24 V CC para o nível adequado de funcionamento dos mesmos. A Figura (4.5) ilustra os dois tipos de conversores CC utilizados na alimentação dos instrumentos e dos extensores de rede.

Figura 4.5 – Conversores CC-CC SP320-24 e LM 2596.



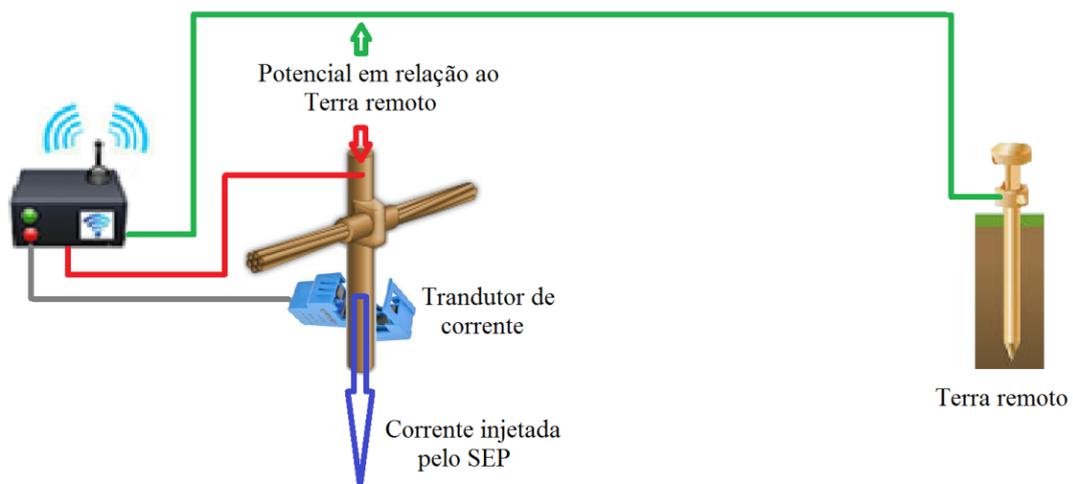
Cada instrumento é instalado em pontos de descida dos condutores de aterramento que se direcionam para os eletrodos que formam a malha de terra da UHE. Como já exposto no Capítulo 3 e ilustrado na Figura (3.21), os instrumentos medem a corrente injetada pelo

próprio SEP na malha de terra e a tensão no mesmo ponto, medida em relação a uma referência fornecida por um eletrodo de terra instalado remotamente. As medições realizadas pelos instrumentos são, então, transmitidas através de um módulo de rede sem fio para o servidor. A próxima seção deste Capítulo trata especificamente do hardware do instrumento desenvolvido para o sistema SMQEE.

## 4.2 DESCRIÇÃO DA ARQUITETURA DO INSTRUMENTO

A arquitetura do sistema de monitoramento proposto baseia-se na construção de uma rede de equipamentos microcontrolados contendo circuitos de medição de tensão e de corrente. Além disso, cada equipamento tem capacidade de transmissão de dados através de módulos de rede sem fio. Os instrumentos monitoram pontos selecionados da malha do aterramento da UHE de Coaracy Nunes. A Figura (4.6) ilustra a instalação do instrumento junto aos condutores que compõem o sistema de aterramento. A partir das medidas de tensão e de corrente, obtém-se a resistência equivalente do ponto onde se localiza o instrumento, de acordo com as considerações realizadas na seção 2.2 do Capítulo 2 e no Capítulo 3.

Figura 4.6 – Medição de tensão e de corrente realizada pelo instrumento.



Cada instrumento é construído com base na placa de desenvolvimento da plataforma Arduino UNO. Essa placa tem como elemento central o microcontrolador ATmega328P da Atmel. O microcontrolador é alimentado com 5 V DC, possui seis canais de conversão analógico para digital (Conversor A/D) com 10 bits de resolução e interface de comunicação de dados. A placa Arduino UNO é ilustrada na Figura (4.7) e o diagrama em blocos da Figura (4.8) ilustra a estrutura do instrumento.

Figura 4.7 – Visão frontal da placa Arduino UNO.

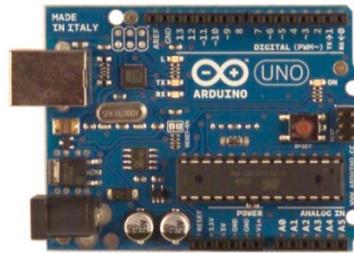
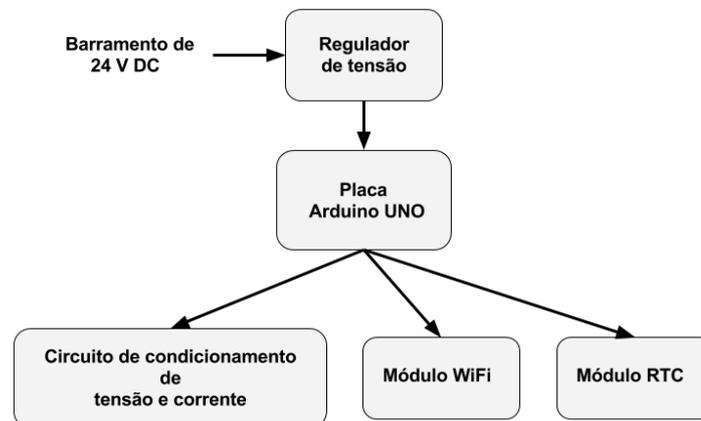


Figura 4.8 – Diagrama em blocos da arquitetura do instrumento.



Como exposto na seção anterior, a alimentação para rede dos instrumentos provém de um barramento CC de 24 V. Como a tensão de alimentação da placa Arduino UNO pode variar entre 7 V e 12V máximo, foi necessário especificar outro conversor CC abaixador, projetado com base no LM 2596, para alimentar a placa do Arduino UNO e os outros módulos que constituem o instrumento. A Figura (4.9) apresenta esse o conversor.

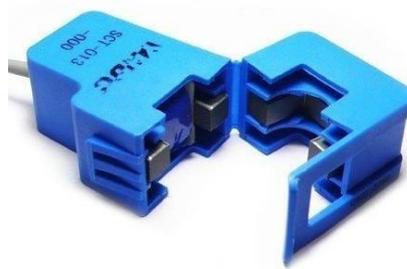
Figura 4.9 – Conversor CC construído com o LM 2596.



O instrumento possui um circuito de condicionamento de tensão e de corrente cujas especificações se deram em função dos resultados obtidos na campanha de medição apresentada no Capítulo 3. Os sinais de corrente são medidos pelo instrumento com a utilização de um transdutor (SCT – 013 – 000) que possui um range de 0 até 100 A AC. A

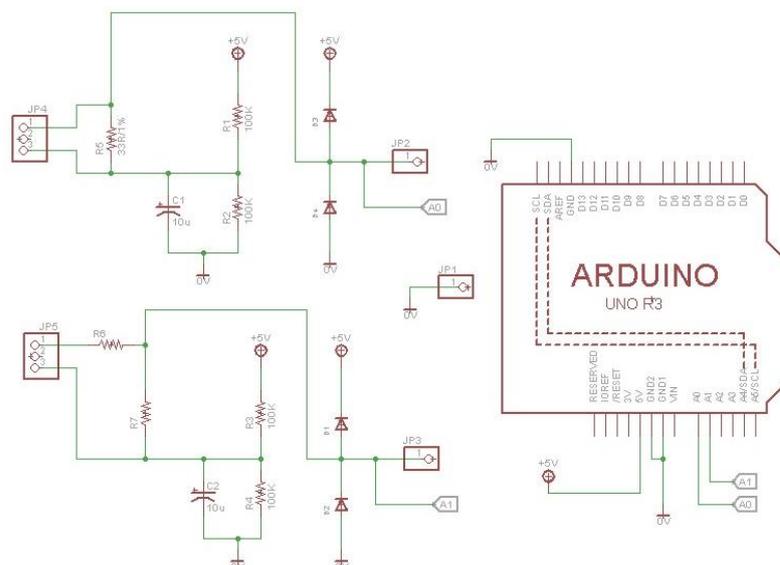
saída do sensor também é uma corrente variando de 0 a 50 mA AC. Este nível de corrente é convertido para tensão com a adição de um resistor de precisão 1% em série com o enrolamento secundário do sensor. O valor do resistor é função do valor máximo de corrente na saída do sensor (50 mA) e do potencial máximo (5 V) na entrada do conversor A/D do microcontrolador. O sensor de corrente é do tipo não invasivo, dado que seu núcleo é abrigado em uma estrutura semelhante a uma garra, o que permite posicionar o sensor em volta do condutor cuja corrente se deseja medir, como ilustra a Figura (4.10). Com esse sensor, não é necessário interromper os pontos onde se deseja medir a corrente injetada pelo sistema na malha de aterramento.

Figura 4.10 – Transdutor de corrente SCT – 013 – 000.



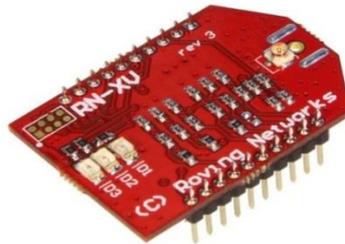
O sinal de tensão é condicionado com a utilização de um divisor de tensão com resistores de precisão 1%. As saídas dos circuitos de condicionamento de tensão e corrente contam com limitadores de tensão (circuito ceifador positivo e negativo com diodos) para proteger a entrada do conversor A/D do microcontrolador. A figura (4.11) mostra os circuitos de condicionamento.

Figura 4.11 – Circuitos de condicionamento de tensão e de corrente.



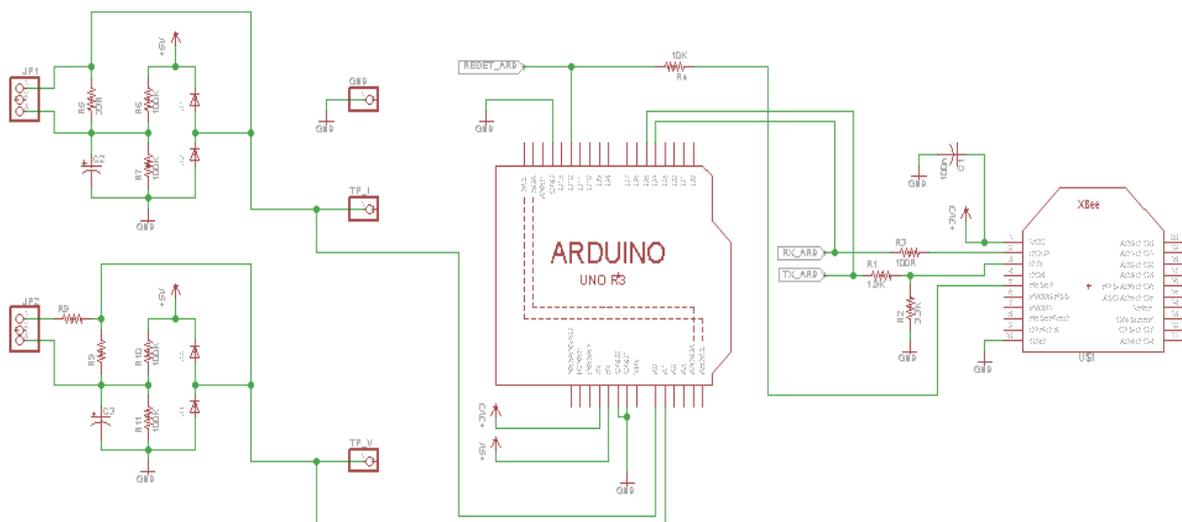
A comunicação entre os instrumentos e o servidor ocorre por meio de um módulo de rede sem fio baseado no RN-171-XV da Roving Networks. Entre outras características, este módulo possui pilha TCP/IP embarcada, padrão 802.11 b/g, baixo consumo e uma taxa de transmissão de até 464 Kbps. A Figura (4.12) mostra o aspecto geral do referido módulo. A presença de um conector UFL permite que acoplar uma antena externa de maior ganho para aumentar a confiabilidade nas transmissões entre os instrumentos e o servidor, dado que o ambiente da UHE é fonte de vários tipos de interferências. O módulo de rede sem fio permite a comunicação a partir dos diferentes locais onde cada equipamento de aquisição for posicionado. A conexão via ‘socket’ permite que cada instrumento possa atender a uma requisição do servidor sempre que solicitado.

Figura 4.12 – Módulo de rede sem fio (WiFi).



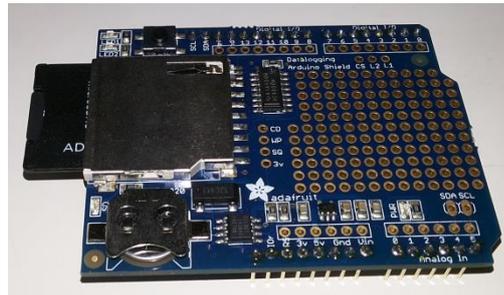
A integração física do módulo de comunicação sem fio ao instrumento se deu por meio de uma placa de interface com o Arduino UNO desenvolvida no projeto. Essa placa também incluiu o circuito de condicionamento da Figura (4.11) para simplificar a montagem do instrumento. A versão final da placa, encaminhada para fabricação, é mostrada na Figura (4.13).

Figura 4.13 – Versão final da placa de condicionamento e comunicação.



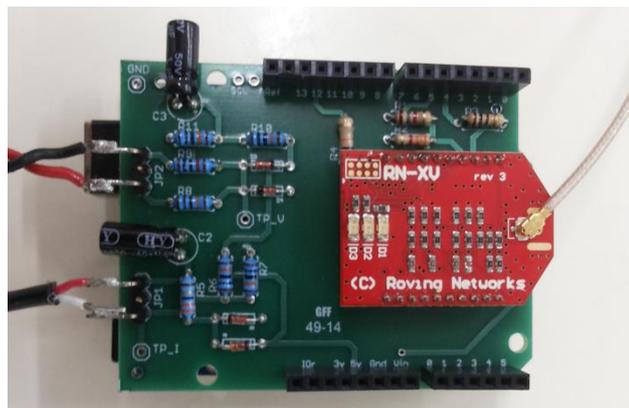
As amostras dos sinais de tensão e de corrente são organizadas em um vetor na memória RAM do microcontrolador Atmega328P para que possam ser calculados os valores *rms* de tensão e de corrente através de uma rotina desenvolvida para esse fim. A dimensão do vetor e a frequência de amostragem são configuradas na programação do instrumento. Outra funcionalidade do instrumento é capturar as formas de onda de tensão e de corrente e armazenar as amostras em memória não volátil. Assim, adotou-se outro módulo contendo uma interface para um cartão de memória flash. Nesse cartão de memória, as amostras podem ser armazenadas e transmitidas quando solicitadas pelo servidor. O módulo de memória também conta com um relógio de tempo real (RTC DS1307) que é sincronizado com o servidor. Assim, o frame de medições enviado por cada instrumento contém a data e a hora do registro. Essa sincronização é necessária para comparar as medições do monitoramento do aterramento com as medições provenientes dos oscilógrafos. O objetivo é relacionar os eventos para ampliar a visão dos fenômenos que afetam a QEE. Figura (4.14) mostra o aspecto geral do módulo de memória com RTC.

Figura 4.14 – Módulo (*shield*) de Memória e RTC.



A Figura (4.15) mostra os circuitos de condicionamento com a adição do módulo de comunicação sem fio (RN-171-XV).

Figura 4.15 – Circuito de condicionamento com módulo de comunicação integrado.



As Figuras (4.16) e (4.17) apresentam o aspecto geral da junção dos módulos que constituem o instrumento.

Figura 4.16 – Integração dos módulos do instrumento em Laboratório.

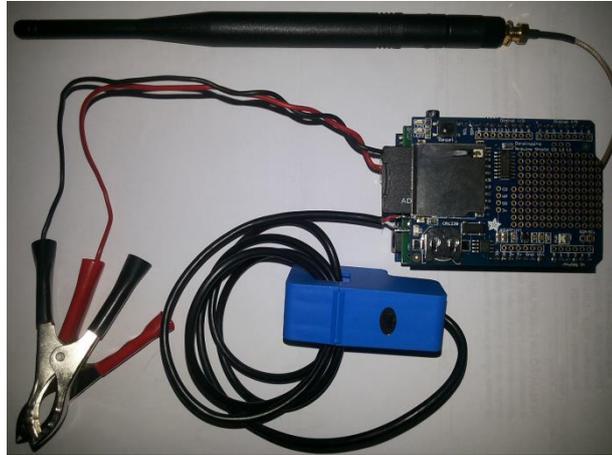


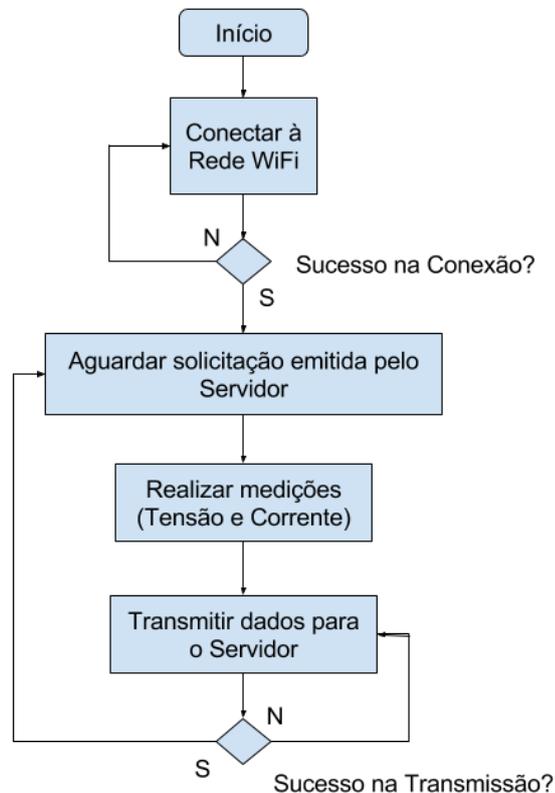
Figura 4.17 – Visão geral dos módulos do instrumento.



Para que o instrumento possa desempenhar suas funções é fundamental que o firmware desenvolvido para o microcontrolador ATmega328P seja corretamente estruturado. A Figura (4.18) mostra um fluxograma simplificado com as principais ações implementadas. Observa-se no fluxograma que, a cada vez que o instrumento for iniciado, são realizadas seguidas tentativas de conexão com o roteador, que acontece mediante o envio de ‘login’ e ‘senha’ por parte do instrumento. Somente após a entrada do instrumento na rede sem fio, o mesmo poderá se comunicar com o servidor. A comunicação com o servidor é realizada via ‘*websocket*’. Essa tecnologia permite a bidirecionalidade na comunicação entre os instrumentos e o servidor. Quando o instrumento consegue conexão na rede sem fio, o mesmo passa a aguardar as instruções (comandos pré-definidos) do servidor que funciona como o dispositivo mestre da rede. À medida que o software do servidor encaminha suas instruções

para os instrumentos, as medições de tensão, de corrente e de resistência são realizadas e transmitidas.

Figura 4.18 – Fluxograma do firmware do instrumento.



### 4.3 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE DE GERENCIAMENTO

O sistema de software SMQEE (Sistema de Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica) possui um bloco de aquisição de dados de aterramento, como mostrado na Figura (3.2) do Capítulo 3. Esse módulo realiza o gerenciamento da rede formada pelos diversos instrumentos de medição. Esse gerenciamento compreende as atividades de configuração remota dos instrumentos, coleta dos dados de medição e o reconhecimento automático de novos instrumentos adicionados à rede. Cabe também ao software de gerenciamento armazenar os dados de medição em um bando de dados. A base de dados pode ser consultada através de uma interface amigável para visualização do histórico de medições do instrumento escolhido pelo usuário. A mesma interface também pode ser utilizada pelo usuário para gerar relatórios para análise posterior. O aspecto geral da tela inicial do sistema de software SMQEE pode ser vista na Figura (4.19).

Figura 4.19 – Tela inicial do software SMQEE.



O software foi desenvolvido como uma aplicação web em Java utilizando frameworks e outras ferramentas para construir os módulos apresentados na Figura (4.20). O conjunto de todos esses módulos resulta nas funcionalidades do SMQEE. O sistema de software agrega as medições dos oscilógrafos da UHE e da rede monitoramento da malha de aterramento. Trata-se de uma ferramenta voltada para análise dos fenômenos detectados na cadeia de medição (oscilógrafos e aterramento) que estejam relacionados com a perda de qualidade do serviço. Dessa análise, resulta o encaminhamento de um conjunto de medidas corretivas a serem encaminhadas para as equipes de operação e manutenção da UHE.

O módulo de Aquisição, mostrado na Figura (4.20), é responsável pela coleta dos registros de medição e está dividido em outros dois submódulos, um de aquisição de dados dos oscilógrafos e outro de coleta de dados dos instrumentos de medição da malha de terra. O submódulo Instrumento gerencia a comunicação com os instrumentos de medição de tensão e de corrente na malha de aterramento. A troca de informação é realizada por um protocolo próprio, desenvolvido para esta aplicação. O servidor envia uma mensagem para todos os instrumentos cadastrados no sistema e os instrumentos respondem com os valores *rms* de tensão, de corrente e de impedância acompanhados com a data e a hora do registro. Caso um instrumento deixe de responder seguidamente a três mensagens do servidor, esse instrumento é considerado com problema e sua conexão é encerrada. O encerramento de uma conexão pode ser visualizado pelo usuário na interface do software por meio de um alarme na forma de uma indicação em vermelho como mostra a Figura (4.21). Observa-se que a tela mostrada na Figura (4.21) é uma visão superior do parque de máquinas da UHE de Coaracy Nunes.

Figura 4.20 – Módulos funcionais do software SMQEE.

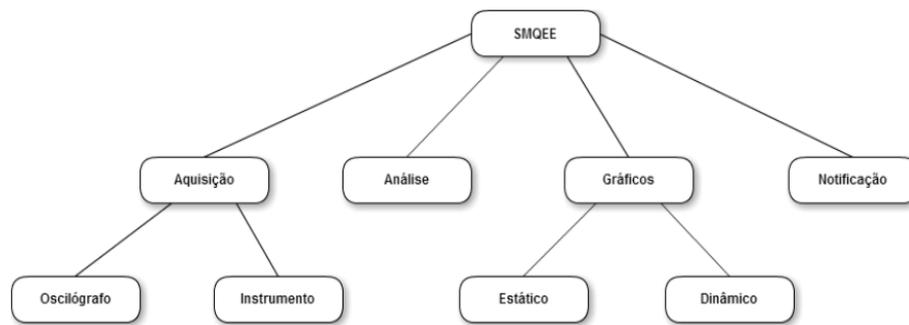
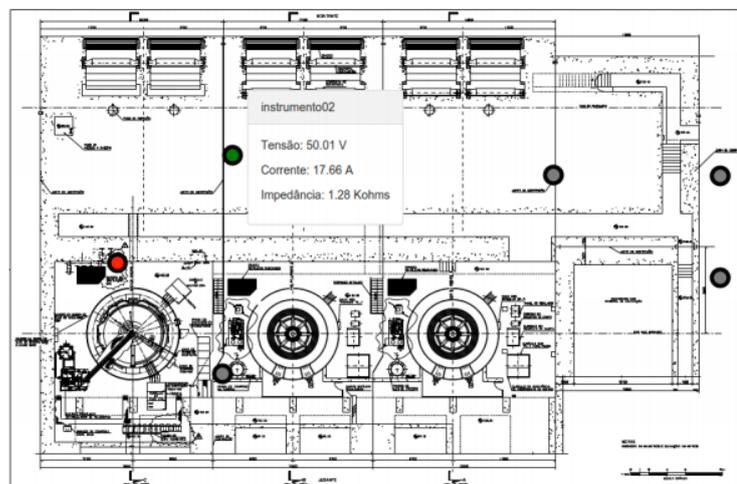
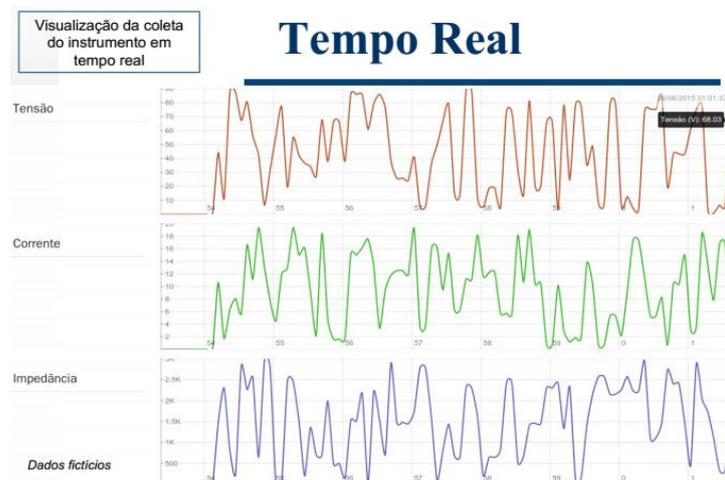


Figura 4.21 – Mapa de instrumentos visualizados no SMQEE.



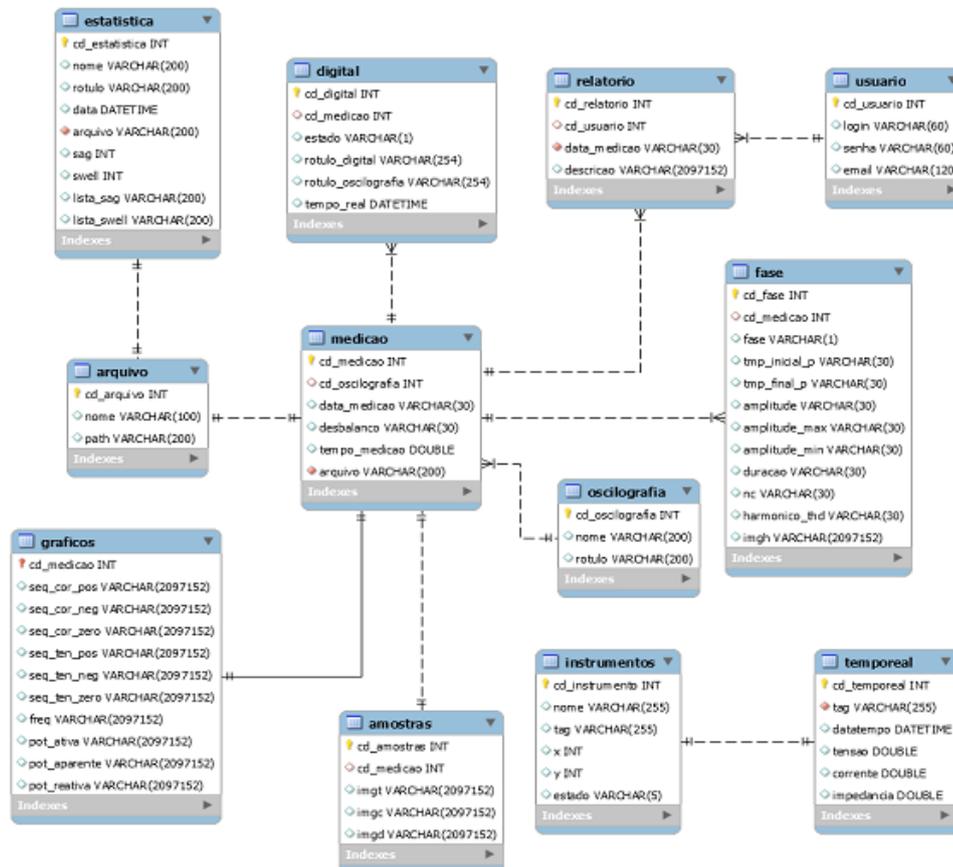
O módulo de Gráficos permite a visualização e fácil interpretação dos dados medidos em campo na forma de um gráfico dinâmico com uma escala adequada como exemplifica a Figura (4.22).

Figura 4.22 – Aspecto geral da tela de medições do SMQEE com dados fictícios.



Os dados coletados pela rede de instrumentos da malha de aterramento e dos oscilógrafos são organizados em um banco de dados desenvolvido para o SMQEE. A partir do banco de dados, podem-se produzir relatórios de acompanhamento das condições de operação da malha de aterramento da instalação. O sistema de gerenciamento de banco de dados (SGBD) escolhido para a modelagem e projeto foi o PostgreSQL 9.3. Para a comunicação entre software e o banco de dados, utilizou-se o framework Hibernate (ferramenta de mapeamento objeto-relacional) através do qual as consultas realizadas no banco são vistas como objetos para a aplicação web em Java. A Figura (4.22) mostra o diagrama Entidade-Relacionamento (ER) que modela o banco de dados desenvolvido para o SMQEE.

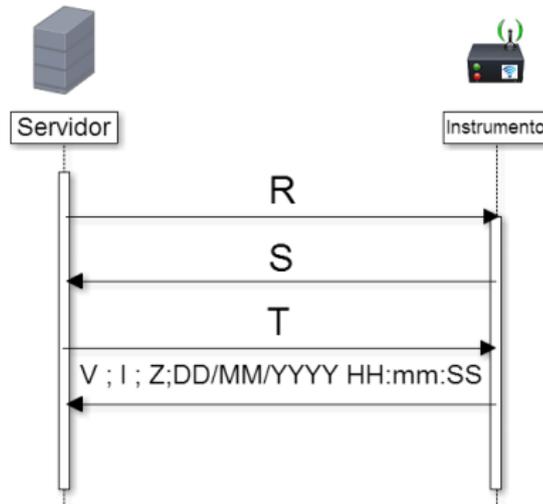
Figura 4.23– Diagrama ER do banco de dados do SMQEE.



Dentre as tabelas do Diagrama ER da Figura (4.22), destacam-se a tabela ‘instrumentos’ e a tabela ‘temporeal’. A primeira armazena informações relacionadas aos instrumentos de medição da malha de terra posicionados na UHE e a segunda armazena os registros de tensão, de corrente, de impedância, incluindo a data e a hora. A Figura (4.23)

ilustra o momento (*handshake*) em que o servidor solicita um registro de medição de um instrumento e o frame de dados de medição enviado para o servidor.

Figura 4.24 – Protocolo de comunicação Servidor-Instrumento.



A gerência das conexões TCP/IP e a coleta de dados dos instrumentos são feitas através de linhas de execução (*threads*) dedicadas para cada instrumento. Isso é feito para dar maior garantia de entrega dos registros de medição. O software SMQEE tem como principais funções gerenciar a rede formada pelos equipamentos de medição da malha de aterramento e organizar os registros coletados em uma base de dados. A partir dos relatórios gerados é possível detectar mudanças sensíveis nos valores de tensão, de corrente e de impedância no aterramento. Essas alterações são cruzadas, pelo software, com a telemetria proveniente dos oscilógrafos de modo a formar um quadro mais representativo dos desequilíbrios que afetam a operação da UHE e que provocam a perda de qualidade do serviço.

## CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS

Como já exposto no Capítulo 3, as campanhas de medição realizadas na UHE de Coaracy Nunes serviram como base para especificar os componentes do circuito de condicionamento dos sinais de tensão e de corrente dos instrumentos de medição. A idéia central do sistema proposto é funcionar como uma plataforma mais flexível de expansão da instrumentação até então utilizada na UHE. Cada instrumento é um transmissor sem fio de tensão e de corrente que podem ser facilmente reposicionados em outros pontos do sistema de aterramento em questão. Essa flexibilidade visa detectar zonas de afastamento das condições nominais dos níveis de tensão e de corrente esperados no aterramento e que pode, juntamente com o monitoramento já instalado, servir para identificar falhas dos equipamentos e subsistemas da UHE com mais segurança.

A partir dos resultados da campanha de medição, deu-se início a fase de projeto e testes no laboratório da Universidade para definição da arquitetura do instrumento de monitoramento de tensão e de corrente. Assim, foram produzidas as primeiras versões do instrumento que foram testadas nas instalações da UHE de Coaracy Nunes em visitas técnicas realizadas pela equipe de projeto.

A seguir mostram-se os resultados obtidos com as primeiras versões do instrumento operando em caráter de teste nas instalações da UHE, utilizando uma versão preliminar do módulo de aquisição de dados de aterramento do SMQEE visto na Figura (5.1).

Figura 5.1 – Interface preliminar do software SMQEE.



As Figuras (5.2) até (5.4) ilustram os procedimentos adotados nos testes bem como os resultados obtidos. Nessas Figuras são mostradas apenas as janelas de corrente dado que o cabo de ligação com o eletrodo remoto não se encontrava disponível na ocasião.

Figura 5.2 – Ponto 1 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.

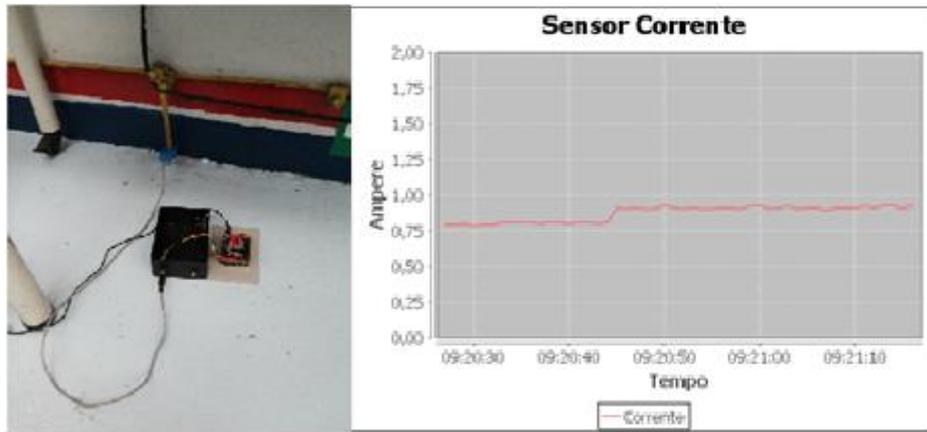


Figura 5.3 – Ponto 2 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.

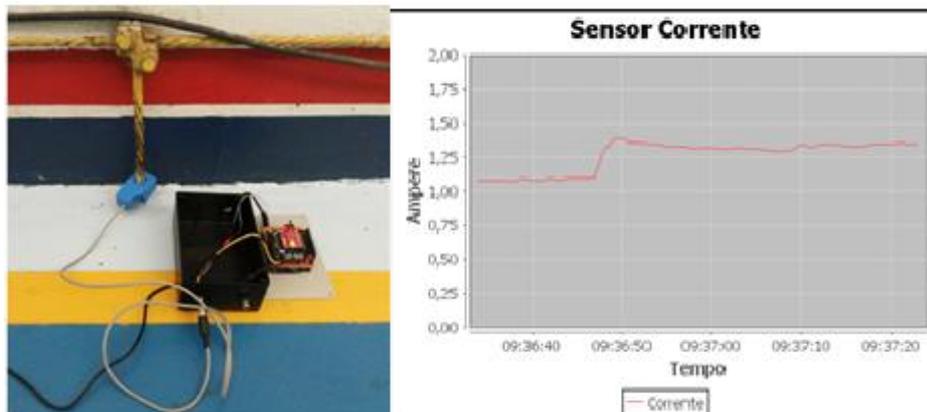
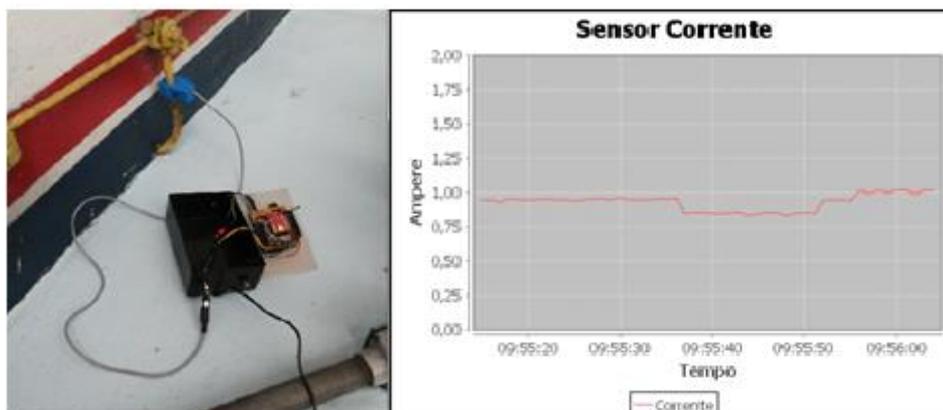


Figura 5.4 – Ponto 3 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.



As Figuras (5.5) e (5.6) mostram as comparações entre as medições realizadas pelo instrumento e as medições fornecidas por um alicate amperímetro, utilizado na operação da UHE.

Figura 5.5 – Ponto 4 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.

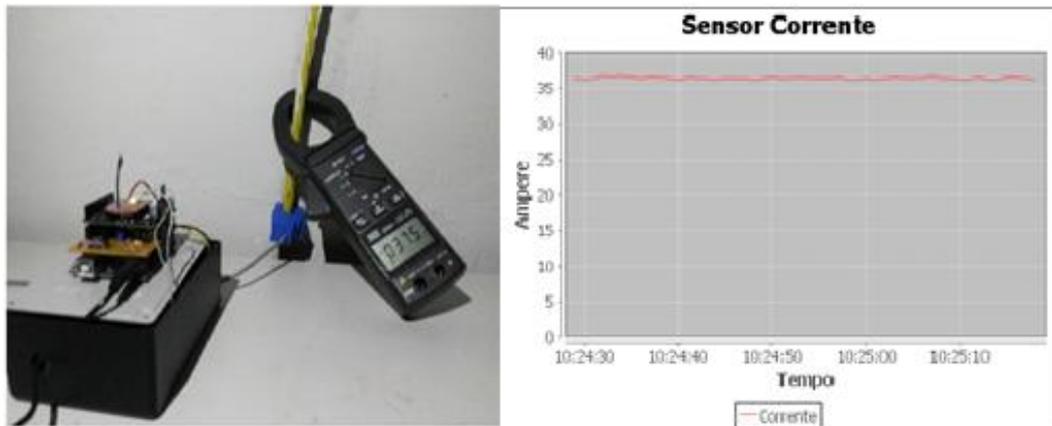
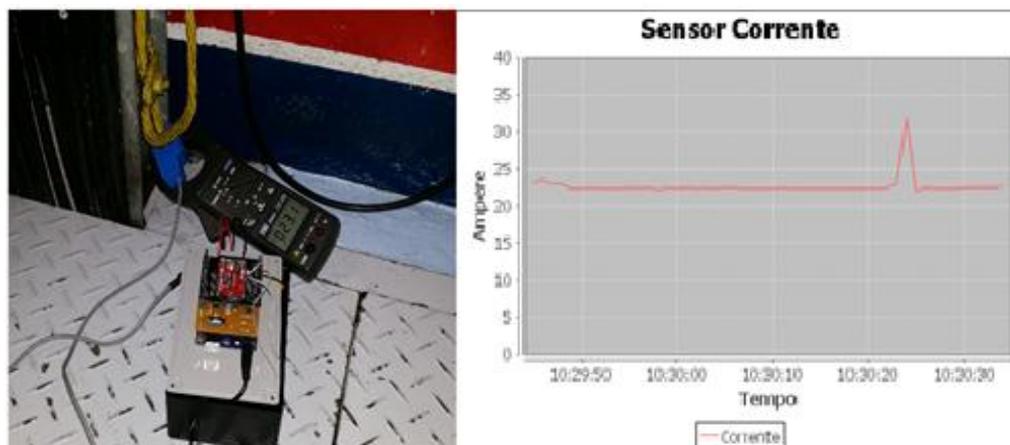


Figura 5.6 – Ponto 5 do aterramento da UHE de Coaracy Nunes.



A comparação dos valores medidos pelo instrumento com as indicações do alicate amperímetro mostra o funcionamento do instrumento como esperado. Já na Figura (5.7), ilustra-se o procedimento de testes realizado com os instrumentos transmitindo a curta distância, pois se tratavam de versões preliminares tanto do instrumento quanto do software servidor. Os resultados obtidos nessa etapa serviram para encaminhar a montagem do protótipo utilizado em projeto piloto.

Figura 5.7 – Teste na UHE de Coaracy Nunes com versão preliminar do instrumento.

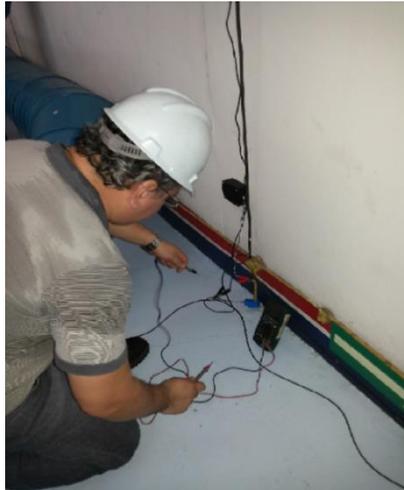


Em um momento posterior, foi realizada nova visita técnica na UHE para realização de novos testes. Desta vez, os testes de comunicação foram realizados com os extensores de rede e com o software SMQEE já instalado em um computador dedicado próximo a sala de operação da usina. Também se disponibilizou nessa ocasião um condutor conectado ao eletrodo remoto para que fossem realizadas medições de tensão e de corrente como pretendido para o projeto piloto. As Figuras (5.8) e (5.9) ilustram os procedimentos adotados em mais essa campanha.

Figura 5.8 – Teste do instrumento com extensor de rede na UHE de Coaracy Nunes.

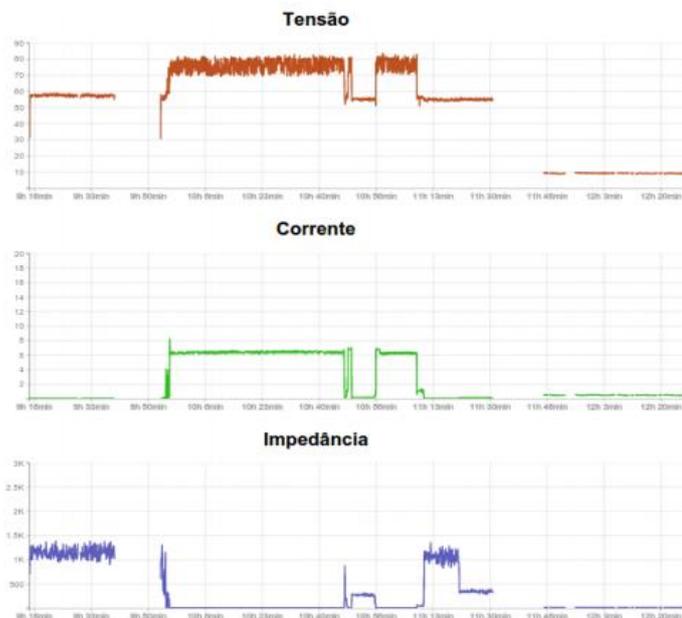


Figura 5.9 – Registro dos procedimentos de teste.



A tela de interface do SMQEE, mostrada na Figura (5.10), mostra alguns intervalos de tempo sem registros, compreendendo os momentos em que os testes eram interrompidos para reposicionar os instrumentos e os extensores de rede. Em função desses testes decidiu-se pela troca do módulo de rede sem fio por outro modelo do mesmo fabricante com um conector do tipo UFL. Isso permitiu a incorporação de uma antena externa de maior ganho para melhorar o desempenho da comunicação entre os instrumentos e o servidor.

Figura 5.10 – Tela do SMQEE exibindo valores de medição na UHE de Coaracy Nunes.



Os testes exibidos a seguir foram realizados no laboratório da Universidade visando concluir a montagem dos protótipos empregados na instalação de um projeto piloto na UHE

de Coaracy Nunes para efeitos de validação do sistema testado de forma integral, isto é, a rede de instrumentos e o software SMQEE, tal como descrito no Capítulo 4. Nesses testes foram utilizadas lâmpadas para gerar um sinal de corrente para o transdutor SCT – 013 – 000. Os sinais de tensão aplicados ao instrumento foram produzidos por um gerador de função conforme ilustra a Figura (5.11).

Figura 5.11 – Teste em Laboratório com o instrumento.



As Figuras (5.12) até (5.14) mostram as medições informadas pelo instrumento para o servidor do SMQEE.

Figura 5.12 – Tela 1 do SMQEE com medições em Laboratório.



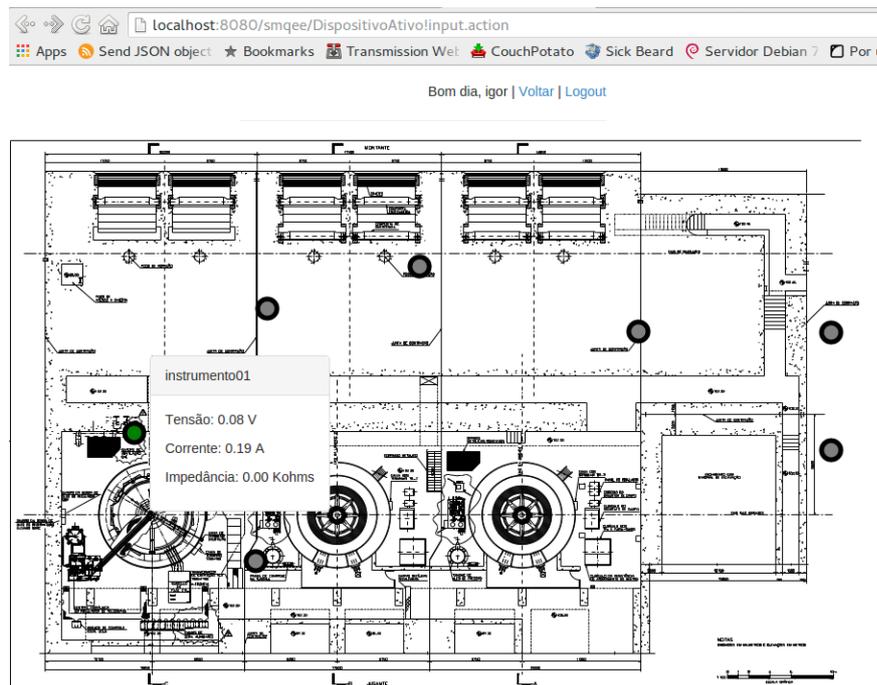
Figura 5.13 – Tela 2 do SMQEE com medições em Laboratório.



Figura 5.14 – Tela 3 do SMQEE com medições em Laboratório.



Figura 5.15 – Tela do SMQEE de visualização dos instrumentos.



A Figura (5.15) mostra a tela do SMQEE que permite visualizar os instrumentos que estão ativos e se comunicando com o servidor bem como aqueles que, por alguma razão, não consigam atender às solicitações do servidor e que passam a ser visualizados com uma indicação em vermelho.

Os testes realizados na UHE de Coaracy Nunes com versões preliminares do instrumento já demonstravam a funcionalidade e viabilidade do sistema de monitoramento. Os testes complementares foram importantes para aperfeiçoar o instrumento tanto quanto para averiguar o funcionamento da rede de comunicação sem fio em meio aos ruídos produzidos pelos equipamentos da UHE. Assim, os resultados obtidos encorajaram a implantação de uma rede de monitoramento com os instrumentos instalados no sistema de aterramento da Usina. A implantação de um projeto piloto é importante para avaliação geral do sistema SMQEE. Isso permite não só em adicionar novas funcionalidades à arquitetura proposta como também dar seguimento para a fase de engenharia de produto visando prover os instrumentos com características próprias de um equipamento comercial cujo desempenho, nível de proteção elétrica e rigidez mecânica estejam de acordo com as exigências de um ambiente como o de uma Usina ou Subestação. Assim,

## **CAPÍTULO 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS DE DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

A distribuição geográfica e complexidade de fenômenos que se manifestam no Sistema Elétrico de Potência torna sua operação sujeita aos mais variados distúrbios que prejudicam a sua operação. Dado a sua importância para os setores produtivos e para a qualidade de vida da população, é fundamental que toda a comunidade técnica que trabalha no setor elétrico disponha de ferramentas e sistemas capazes de monitorar, correlacionar e diagnosticar os eventos que prejudiquem o fornecimento de energia nas unidades de Geração, Transmissão e Distribuição.

O ciclo de privatizações no setor elétrico do Brasil, iniciado nos anos 90 do século XX, permitiu sua reorganização e modernização com regras de mercado que favoreceram investimentos por parte do setor privado. Esse novo cenário mostrou a demanda reprimida que havia por inovações tecnológicas, revelada pelo setor ao se deparar com as demandas de uma sociedade que buscava iniciar um ciclo sustentável de crescimento. Aqui cumpre observar que a matriz energética brasileira, de base essencialmente hidrológica e com grande potencial de explorar outras fontes não poluentes, é um importante diferencial competitivo em um mercado internacionalizado e com grandes preocupações ecológicas. Outro aspecto importante a se considerar são as condicionantes impostas à operação das unidades do setor elétrico no atendimento aos índices de qualidade do fornecimento. Tais índices são amparados em legislação específica para o setor e são fiscalizados pela ANEEL, a quem cabe à aplicação de multas para as empresas que operarem com patamares reduzidos de qualidade. Desse breve apanhado e das proposituras expostas nos Capítulos 1 e 2, evidencia-se a necessidade de monitoramento das variáveis associadas aos fenômenos que perturbam a operação dos SEP e que o afastam das margens definidas pelos parâmetros de qualidade previstos em legislação.

Um dos componentes mais importantes de toda instalação elétrica é o sistema de aterramento. Um sistema de aterramento, funcionando dentro dos valores especificados em projeto, é um elemento essencial para que os SEP possam se recuperar dos efeitos provocados pelos eventos de falta, como curtos-circuitos e descargas atmosféricas. Ressalta-se, ainda, que o desempenho adequado do sistema de aterramento é um item primordial para a atuação adequada dos sistemas de proteção e para manter as tensões de toque e de passo dentro de

patamares seguros. As medições e inspeções dos sistemas de aterramento são igualmente previstas em legislação, sobretudo para as unidades de grande porte como subestações e usinas. Assumindo as penalidades associadas à indisponibilidade das instalações, torna-se evidente a necessidade de se adotar metodologias de monitoramento contínuo de malhas de aterramento com as instalações energizadas.

O cenário que suscitou o desenvolvimento deste trabalho é formado pelo histórico de sinistro de equipamentos e de interrupções associadas aos fenômenos de descargas atmosféricas. Ainda que a região da UHE seja especialmente afetada por tais eventos, as perdas observadas desses equipamentos, relatadas no Capítulo 3, estavam em desacordo com o desempenho esperado para a malha de aterramento da instalação. A partir daí se dá a concepção de um sistema de monitoramento contínuo da qualidade de energia na UHE que reunisse e permitisse a visualização, na mesma base de tempo, dos registros dos oscilógrafos e dos registros coletados na malha de aterramento. A importância de tal ferramenta é permitir a análise mais detalhada das ocorrências de faltas visando reconstituir, com maior resolução, a sequência de eventos que as produziram.

De uma forma generalizada, a concepção de um sistema de controle que pretenda manter um determinado processo dentro das condições nominais de operação inicia pelo projeto da cadeia de medição. Dessa forma, o monitoramento adequado das variáveis que influenciam a operação do processo é importante para manter seu estado dentro das especificações de desempenho pretendidas. Dado que o desempenho de um sistema de aterramento varia em função de seu projeto, das variações de resistividade do solo (Capítulo 2), da idade e da integridade de sua instalação, torna-se importante acompanhar de forma contínua as correntes e as tensões nele estabelecidas, visando detectar pontos ou zonas defeituosas para que as devidas medidas de correção sejam encaminhadas. Nesse ponto reside a principal contribuição deste trabalho, visto como uma proposta flexível e de custo relativamente baixo, para ampliar a instrumentação tradicionalmente empregada nas plantas de potência. Ademais, a possibilidade de cruzar a base de dados formada pelos registros de medição dos instrumentos com a oscilografia já existente na UHE, cria a oportunidade de evidenciar a correlação entre os eventos que provocam redução de QEE.

Os resultados alcançados com os testes realizados na usina e os testes realizados em laboratório comprovam a viabilidade do sistema e encorajam a implantação dos instrumentos na UHE na forma de um projeto piloto para efeitos de validação do sistema. As observações

realizadas em um projeto piloto orientam os ajustes necessários no projeto do instrumento para encaminhá-lo a uma fase adicional de engenharia de produto dado que o desenvolvimento até aqui contou com uma placa de desenvolvimento desprovida de alguns recursos observados normalmente em um equipamento comercial. A adoção dessa plataforma se deu por conta de facilitar o desenvolvimento da proposta pretendida para esse trabalho, cujos resultados justificam a continuidade de seu aperfeiçoamento. A fase de engenharia de produto é importante para dotar o instrumento dos requisitos necessários (proteção elétrica, compatibilidade eletromagnética, grau de proteção mecânica) para alcançar as certificações indispensáveis para essa classe de equipamentos.

Para trabalhos futuros, pode-se considerar a adoção de um microcontrolador com mais recursos de memória, velocidade de processamento, conversor A/D de maior resolução, mais interfaces de comunicação para adicionar novos módulos que resultem em mais funcionalidades para o instrumento que pode ser empregado no monitoramento de outras grandezas físicas, bastando para isso desenvolver novos circuitos de condicionamento. Além disso, o software do SMQEE pode ser incrementado com a adição de novos módulos de estatística e de análise.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Associação Brasileira de Energia Eólica. ([www.abeeolica.com.br](http://www.abeeolica.com.br)).
- [2] – Eletronuclear/ELETROBRAS ([www.eletronuclear.gov.br](http://www.eletronuclear.gov.br)).
- [3] – Silvério Visacro Filho. Aterramentos Elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. São Paulo: Editora Artliber, 2002.
- [4] – Geraldo Kindermann e José Mário Campagnolo. Livro: Aterramento Elétrico. UFSC – EEL – LABPLAN. 5ª Edição. 2002.
- [5] – Telló, M.; Dias, G. A. D.; Raizer, A.; Almaguer, H. D.; Mustafa, T. I.; Coelho, V.L. Livro: Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixas e Altas Frequências com Apresentação de Casos. Editora EDIPUCRS. Porto Alegre. 2007
- [6] – Long, X.; Dong, M.; Xu, W.; Li, Y. W. Online Monitoring of Substation Grounding Grid Conditions Using Touch and Step Voltage Sensors. IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 2, JUNE 2012.
- [7] – IEEE Guide to Measurement of Impedance and Safety Characteristics of Large, Extended or Interconnected Grounding Systems, IEEE Std.81.2, 1992.
- [8] – Gomes, L. V.; Albuquerque, T. C.; Costa, E.G.; Macedo, E. C. T.; Andrade Jr., G. V.; Freire, R. C. S.; Schettino, S.; Cordeiro, A.A. Detecção de Falhas em Malha de Aterramento de Subestações Energizadas. Dissertação de Mestrado. PPGEE – Universidade Federal de Campina Grande.
- [9] – IEEE Std 80. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.
- [10] – Nogueira, P. J. C. “Influência da Estratificação do Solo na Impedância Impulsiva de Aterramento de Linhas de Transmissão”, Dissertação de Mestrado PUCMG/PPGEE, 2002.

[11] – Paulino, M. E. C.; Pereira Jr., D. C. B. Experiência da Celesc Distribuição nas Medições de Resistência de Aterramento em subestações Energizadas Utilizando Variação de Frequência. In: XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. 2012.

[12] – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 15749 – Medição de Resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento. ABNT, 2009.