



GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

SISTEMA DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE MALHA DE ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES ENERGIZADAS DE ALTA TENSÃO

GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA(1)(2);ARTHUR FRANCISCO ANDRADE(2);RÔMULO DE OLIVEIRA TEIXEIRA(3);VALDEMIR DA SILVA BRITO(4);EDSON GUEDES DA COSTA(1);LENILSON ANDRADE BARBOSA

ASSOCIACAO TECNICO CIENTIFICA ERNESTO LUIS DE O JUNIOR(1);UFCG(2);LIGHT(3);INSTITUTO FEDERAL DE EDUCACAO, CIENCIA E TECNOLOGIA DA PARAIBA(4)

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um sistema de monitoramento e diagnóstico (*hardware* e *software*) para malhas de aterramento de subestações de alta tensão energizadas. O sistema é composto por malhas auxiliares, sensores de umidade/resistividade do solo, geradores de impulso de corrente, uma rede de sondas que monitoram o potencial na superfície do terreno da malha e um *software* de monitoramento e diagnóstico. Os parâmetros monitorados são: impedância impulsiva, resistência de aterramento, tensões de passo e toque, condutividade, umidade e temperatura do solo. Esses parâmetros são comparados, para fins de diagnóstico, a valores limites pré-definidos.

PALAVRAS-CHAVE

Aterramento, Impedância Impulsiva, Monitoramento, Potencial de Superfície, Resistência de Aterramento

1.0 INTRODUÇÃO

A exigência cada vez maior em se manter a continuidade do sistema elétrico tem impulsionado as empresas do setor elétrico a realizarem o monitoramento dos ativos com subestações energizadas. No caso dos aterramentos elétricos, a realização de testes com o objetivo de avaliar seu desempenho em subestações energizadas, pode conduzir a erros de leitura nos instrumentos de medição associados a interferências eletromagnéticas, exposição ao risco de morte do operador (enquanto realiza os ensaios), bem como danos aos equipamentos utilizados [1, 2].

Nos últimos anos foram desenvolvidos sistemas capazes de medir os valores de resistência ou impedância de aterramento, tensões de toque e de passo [3-7]. Esses sistemas, apesar de portáteis requerem a presença de técnicos em campo (expondo-os a risco de morte), não avaliam a sazonalidade e não conseguem avaliar de forma automática o desempenho geral do sistema de aterramento. Portanto, o monitoramento remoto e automático de malhas de aterramento ainda é um desafio, não existindo, até o momento, sistema comercial capaz e apto para atender essa demanda, nem muito menos apontar medidas corretivas para eventuais problemas detectados em campo.

Visando mitigar as limitações e resolver os problemas listados anteriormente, foi proposto o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de monitoramento e diagnóstico para malhas de aterramento de subestações energizadas de alta tensão. O sistema é constituído por uma infraestrutura de malhas auxiliares, *hardware* (geradores de impulso de corrente e rede de sensores), e por um *software* que permite a avaliação e o diagnóstico do estado operacional da malha de aterramento. O sistema foi testado e validado no Laboratório de Alta Tensão de Campina Grande e em uma subestação energizada de alta tensão da Light Energia S.A.. No futuro pode ser instalado em qualquer subestação de qualquer concessionária de energia.

2.0 SISTEMA DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO

O sistema de monitoramento e diagnóstico desenvolvido é composto por um conjunto de unidades de geração e medição de correntes e tensões que servem para excitar a malha de aterramento e fornecer dados ao *software* de avaliação das condições operativas. Este *software* comanda automaticamente a injeção de sinais, armazena os dados para avaliar a sazonalidade e determina/calcula os parâmetros de avaliação do sistema de aterramento sob análise: impedância impulsiva, resistência da malha de aterramento, potenciais de segurança (tensão de passo e de toque), condutividade, umidade e temperatura do solo. A partir dos parâmetros monitorados é realizado o diagnóstico da performance global do sistema de aterramento, assim como, são determinadas as regiões críticas do sistema.

2.1 Metodologia proposta

No fluxograma da Figura 1 é possível ter uma visão geral da metodologia empregada no desenvolvimento do sistema de monitoramento. Inicialmente foi realizado um levantamento do estado da arte acerca de aterramentos elétricos e resposta impulsiva de malhas de aterramento, possibilitando a determinação de parâmetros ou grandezas a serem avaliadas pelo sistema de monitoramento. Adicionalmente, foram levantados os requisitos básicos do sistema de monitoramento de aterramentos.

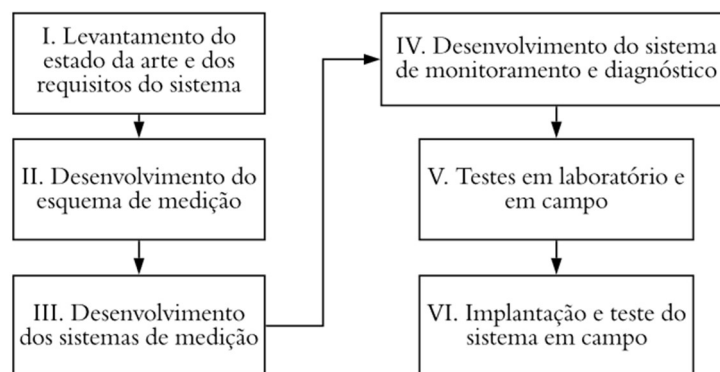


FIGURA 1 - Fluxograma da metodologia implementada no desenvolvimento do sistema.

Na sequência foi desenvolvido o esquema de medição a ser empregado. O esquema desenvolvido é um pouco mais elaborado que aqueles usualmente encontrados nas normas, tendo vista que o sistema proposto deve ser aplicado no monitoramento simultâneo de várias grandezas físicas e elétricas.

Em seguida, foi iniciado o desenvolvimento dos sistemas de medição de tensão e corrente impulsivas e na frequência industrial. Esta foi uma parte crucial do trabalho, pois além da dificuldade de projetar um sistema de medição com capacidade de medir grandezas com características completamente diferentes, teve-se também a necessidade de se desenvolver um esquema de comunicação de dados que possibilitasse uma comunicação segura e efetiva no ambiente da subestação. Além disso, foi realizado o desenvolvimento de um sistema de geração de impulsos de corrente, responsável pela excitação das malhas de aterramento, visando a verificação de sua performance.

A quarta etapa da metodologia adotada no desenvolvimento da solução consistiu na proposição e implementação de um *software* de monitoramento e diagnóstico de malhas de aterramento de subestações energizadas, que além dessa função principal, é responsável pela configuração e controle dos sistemas de medição tensão, umidade e temperatura, assim como, dos geradores de impulsos de corrente. Adicionalmente, foi realizado um estudo com o objetivo de se determinar a quantidade e o posicionamento ótimo da rede de sensores/sondas a serem implantadas na subestação piloto. Um algoritmo de otimização foi desenvolvido em um ambiente de simulação.

Em paralelo às atividades de desenvolvimento do *software*, foram realizados inúmeros testes no Laboratório de Alta Tensão da UFCG, visando testar tanto os sistemas eletrônicos empregados no controle, medição e comunicação, quanto o *software* de monitoramento. Para realização dos testes foi construída malha de aterramento elétrico experimental, na qual foram aplicados impulsos de corrente de 10 A até alguns kA. Com isso, foi possível verificar o desempenho do sistema em situações típicas e adversas. Além dos testes em laboratório, foram conduzidos testes em campo com intuito de averiguar o desempenho global do sistema no ambiente operacional ao qual se destina.

Por fim, tem-se a etapa de implantação e teste do sistema de monitoramento em campo, na qual todas as funcionalidades do sistema foram avaliadas e internalizadas pela equipe da Light no ambiente da subestação piloto.

2.1.1 Estado da arte resumido

Os métodos atualmente utilizados para avaliação de aterramentos consistem na medição de grandezas elétricas conforme procedimentos definidos em normas como a IEEE Std. 80 [8], IEEE Std 81 [9], e a NBR 15749 [2]. As medições não são, em geral, realizadas de forma automática. É sabido que os sistemas convencionais de medição (terrômetros), apesar de portáteis, requerem a presença de técnicos em campo para instalar o arranjo de medição (expondo-os a risco de morte), e técnicos capacitados para operar os equipamentos e interpretar corretamente os resultados. Além disso, várias horas podem ser necessárias para a conclusão de um único teste.

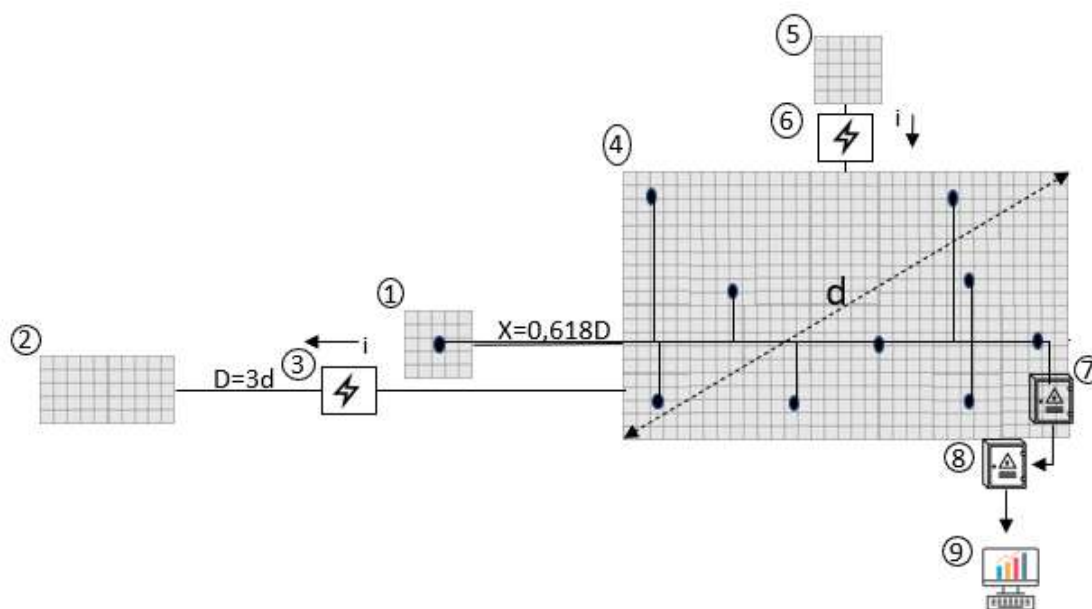
Assim, técnicas para monitoramento ou diagnóstico de aterramentos energizados por meio da medição de potenciais de superfície ou tensões de toque e de passo vêm sendo propostas. Nesse sentido, [10] ressaltaram a dificuldade

associada à medição de tensões de passo e de toque em subestações energizadas. Em 2015, [11] realizaram cálculos e medições de tensão de passo e de toque em uma subestação de 110/35/10 kV. Os dados de entrada foram duração, amplitude e frequência da corrente de curto-circuito e estratificação do solo. [1] propuseram um método de monitoramento de uma malha de aterramento em tempo real por meio de sensores de tensão de passo e de toque. Entretanto, em [1] não foram definidas as posições ou quantidade de sensores necessários à realização de um diagnóstico eficaz, nem critérios para tomada de decisão foram elaborados.

De forma objetiva as principais limitações dos procedimentos existentes são: não são autônomos; nem todos podem ser aplicados a malhas energizadas; não realizam diagnóstico automático; não avaliam a sazonalidade das malhas (mudança de suas características em função do clima); não geram e enviam alertas automaticamente; não permitem a recuperação de dados ou criação de séries históricas; e não fornecem acesso remoto ou via web aos usuários.

2.1.2 Esquema de Medição Proposto

Na Figura 2 é apresentado um diagrama geral do sistema e do esquema de medição desenvolvidos: '1', '2' e '5' representam as malhas de aterramento auxiliares utilizadas como referências do sistema; '3' e '6' representam as conexões dos sistemas de aplicação de impulsos de corrente; '7' representa o quadro de comando onde estão contidos os geradores de impulso de corrente e sondas de medição; '8' representa o módulo de comunicação que transmite os dados à sala de comando; '9' corresponde ao software de diagnóstico; '4' a malha sob avaliação; os nós em '1' e '4' representam os pontos de medição de tensão.



- | | |
|---|--|
| (1) – Malha auxiliar para medição de potencial (método MQP). | (6) – Representação do impulso de corrente do gerador 2. |
| (2) – Malha auxiliar para injeção de corrente (método MQP) ou referência para medição de potencial de superfície. | (7) – Quadro de comando. |
| (3) – Representação do impulso de corrente do gerador 1. | (8) – Módulo de comunicação. |
| (4) – Malha de aterramento da subestação. | (9) – Módulo de diagnóstico. |
| (5) – Malha de referência para injeção de corrente em medição de potencial de superfície. | |

FIGURA 2 - Sistema desenvolvido para o monitoramento e diagnóstico do estado operacional de malhas de aterramento.

2.1.3 Sistema de Medição, Comunicação e Injeção de Corrente

O sistema de medição e comunicação é dividido em duas unidades: processamento de sinais e interface do sistema. A unidade de processamento de sinais é um subsistema modular responsável pela adequação/condicionamento dos níveis de tensão ao processador digital de sinais (PDS). Após a digitalização dos dados analógicos de tensão, por meio de uma interface de comunicação, estes dados são disponibilizados para um subsistema de interface. Nesse último, os dados são protocolizados em uma camada de comunicação, baseada em MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*) e disponibilizados via ethernet. Um sistema embarcado (SE) é responsável por realizar tal

protocolização. Um módulo PoE (*Power over Ethernet*) é responsável pelo controle e alimentação da sonda, onde uma tensão de até 48 V é fornecido pelo cabo ethernet, e convertida em uma tensão contínua de 12 V pela PoE.

Com relação à arquitetura do gerador de impulsos, ela é similar à do sistema de medição e comunicação, porém, um módulo de comutação e um submódulo de gerador é adicionado ao subsistema da unidade de processamento de sinais. Este submódulo é responsável pelo armazenamento de energia e posterior descarga no ponto de injeção. Adicionalmente, este submódulo inclui um transdutor de corrente, baseado em efeito Hall, utilizado para a medição da corrente injetada. A unidade de interface do sistema recebe o valor de tensão a ser injetado via *ethernet*, e este valor é repassado à unidade de processamento de sinais. De posse dessa informação, o “Gerador de Impulso e Condicionamento de Corrente” realiza a carga do sistema até atingir a tensão desejada, e logo após, realiza esta descarga no ponto de injeção da malha.

2.1.4 Sistema de Monitoramento e Diagnóstico

O sistema se baseia na avaliação de parâmetros obtidos a partir da rede de sensores/sondas frente a valores de referência e frente aos valores históricos. Os parâmetros de avaliação são resistência, impedância de aterramento e as tensões de passo e de toque no terreno da subestação, estimados a partir dos potenciais medidos pela rede de sondas. Adicionalmente, a umidade e a resistividade do solo em dois pontos da subestação podem ser medidas e inseridas no *software* para registro e para serem utilizados como critérios adicionais de avaliação da resistência e impedância da malha em função da sazonalidade do clima. Para este fim, equações foram desenvolvidas para relacionar a relação esperada entre a resistência e impedância da malha e a resistividade da camada superficial do solo, a qual, a princípio, apresenta uma variação sazonal.

Foi realizado um estudo com o objetivo de se determinar a quantidade e o posicionamento ótimo da rede de sensores/sondas a ser implementada na subestação Nilo Peçanha (subestação piloto). Um algoritmo de otimização foi desenvolvido em um ambiente de simulação.

O *software* para aquisição e tratamento de dados foi desenvolvido, o qual aplica os critérios do módulo de monitoramento e fornece ao usuário um diagnóstico acerca do desempenho operacional da malha de aterramento. Para a construção do *software*, fez-se necessário a utilização de ferramentas que possibilitaram a construção de uma aplicação web. Com o desenvolvimento das atividades e as ferramentas à disposição, foi possível a criação de cinco módulos presentes no *software*, sendo eles: (1) Módulo de Tratamento; (2) Monitoramento da Malha de Aterramento (Sensores/Sondas); (3) Módulo Agendador; (4) Módulo Web e (5) Banco de Dados.

2.1.5 Testes em Laboratório e Campo

Testes em laboratório foram idealizados no sentido de avaliar o sistema desenvolvido. Os testes de conformidade do *software* consistiram na avaliação e comparação dos resultados simulados, inicialmente com os algoritmos implementados em sistema computacional voltado ao cálculo numérico, e dos resultados obtidos com as funções correspondentes implementadas no *software* desenvolvido.

Adicionalmente, nesta etapa foram verificadas e comprovadas a funcionalidade dos demais itens do sistema de monitoramento instalando-os na malha de aterramento experimental, localizada nas dependências da UFCG:

- Conectividade entre o *hardware* e *software*;
- Algoritmos para controle e carregamento dos geradores de impulso;
- Sistemas de aquisição de dados;
- Cálculo de impedância e resistência;
- Banco de dados e armazenamento de resultados.

Por fim, o sistema de monitoramento foi testado na malha de aterramento da subestação piloto Nilo Peçanha, situada na instalação da Light Energia S.A. em Pirai - RJ. Os testes ocorreram durante visitas da equipe da UFCG à planta. Uma série de testes foi realizada utilizando o sistema desenvolvido e um Gerador de Impulsos de Corrente (GIC) portátil desenvolvido no LAT/UFCG, de modo a determinar a coerência dos resultados obtidos a partir das aplicações de impulso com o sistema de monitoramento desenvolvido.

2.1.6 Implantação e testes finais em campo

Após todos os testes preliminares realizados em laboratório e em campo, partiu-se para implantação do sistema na subestação piloto e testes finais. Para isso, várias condições operativas foram testadas e avaliadas, sempre comparando os resultados gerados pelo sistema desenvolvido com aqueles fornecidos por sistemas comerciais e instrumentos de bancada/laboratório.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Um dos primeiros resultados produzidos no âmbito do P&D foi Gerador de Impulsos de Corrente (GIC) portátil. Este equipamento foi desenvolvido para permitir a geração de impulsos de corrente e testes em sistemas de aterramento remotos. Na Figura 3 é mostrada uma fotografia do GIC com seus elementos constituintes.

A partir das especificações geradas na fase de levantamento de requisitos e empregando o GIC e sistemas de bancada, foi possível desenvolver o circuito de condicionamento de sinais das sondas de medição de tensão. Na Figura 4 – (a) é apresentada uma versão inicial do sistema de condicionamento desenvolvido. Conforme pode-se perceber, existe uma placa para condicionamento dos sinais de corrente e outra para os sinais de tensão. As duas placas estão interligadas, na forma de módulos, ao DSP utilizado no controle básico do sistema. Essa abordagem permitiu que um mesmo sistema base fosse utilizado para diversos testes e desenvolvimentos distintos, além disso, a conexão em forma de módulo possibilita a fácil manutenção sistema. Esta etapa de projeto e construção do sistema de condicionamento foi uma das mais críticas do projeto devido as características dos sinais a serem medidos.

Após os testes de laboratório e preliminares de campo, foi desenvolvido e acoplado os módulos de comunicação ao sistema de condicionamento. Estes módulos são constituídos de dois subsistemas. Um responsável pela obtenção da alimentação a partir da rede ethernet e outro responsável pela regulação desse sinal de alimentação. Na Figura 4 – (b) é mostrada uma fotografia de módulo de comunicação responsável pela comunicação e obtenção do sinal de alimentação do sistema. Ele baseado em um sistema embarcado na Raspberry Pi. Na Figura 4 – (c) é apresentada uma fotografia do módulo de regulação da tensão utilizada na alimentação de todo o sistema.



Legenda:

- 1 – Lâmpada indicadora
- 2 – Chave liga/desliga
- 3 – Seletor de tensão de entrada
- 4 – Entrada para o cabo de alimentação
- 5 – Saída do gerador (terminal -)
- 6 – Saída do gerador (terminal +)
- 7 – Tela para visualização da tensão de carregamento
- 8 – Chave seletora do resistor de carregamento (controla a velocidade de carregamento dos capacitores)
- 9 – Bomes para medição de tensão e corrente
- 10 – Botoeira para disparo do gerador

FIGURA 3 - Fotografia do GIC e seus componentes.

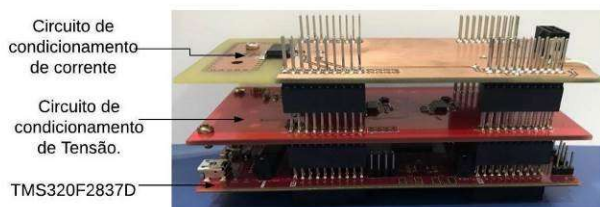


FIGURA 4 - (a) Fotografias dos módulos de processamento e condicionamento de sinais.

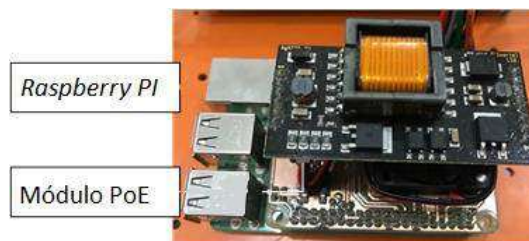


FIGURA 4 - (b) Fotografia do sistema embarcado Raspberry Pi responsável pelo controle da PoE.

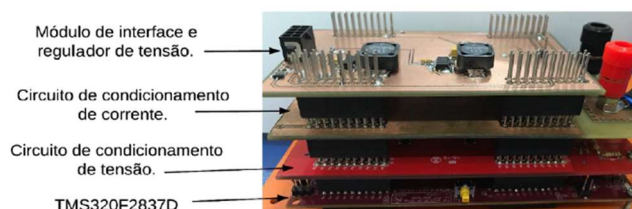


FIGURA 4 - (c) Fotografia do módulo de alimentação e regulação de tensão.

Em paralelo ao desenvolvimento dos sistemas eletrônicos de medição e geração de impulsos, foi desenvolvido um algoritmo para se determinar a quantidade e localização de ótimas de sondas de medição de potencial na malha de aterramento da subestação piloto. Na Figura 5 é apresentado um esquemático dos pontos de medição determinados pelo algoritmo.

Após testes e ajustes com todos os módulos interligados, partiu-se para o desenvolvimento da versão final da sonda de medição de potencial. Na Figura 6 – (a) é apresentada uma fotografia da versão final de uma das sondas desenvolvidas. Do lado esquerdo tem-se os módulos de processamento principal, condicionamento de sinais e de interfaceamento, regulação e comunicação. No lado direito, tem-se o módulo PoE responsável pela comunicação da sonda com o sistema de monitoramento, assim como, alimentação da sonda.

De forma similar, foi desenvolvido a versão final do gerador de corrente impulsiva. A plataforma básica é mesma da sonda de potencial, acrescentando-se apenas o módulo de gerador de impulsos acima do módulo condicionar de sinais. Na Figura 6 – (b) é mostrada uma fotografia do Gerador 01.

Simultaneamente ao desenvolvimento das sondas e geradores, foi implemento o *software* de monitoramento e diagnóstico de malhas de aterramento energizadas. Além destas funções, o *software* permite a configuração e controle remoto das sondas e geradores, assim como, possibilita o armazenamento dos dados medidos formando uma série histórica. Na Figuras 7 – (a) é apresentada a tela principal do *software* desenvolvido, conforme pode-se perceber, basicamente ele possui um *dashboard* principal no qual as principais informações e alertas referentes ao estado da malha são apresentados. O *dashboard* é amigável e intuitivo, podendo ser executado a partir de qualquer dispositivo com navegador de internet e conectado à rede da Light.

Estando todos os módulos do sistema de monitoramento funcionais, partiu-se para montagem dos painéis onde as sondas e gerados seriam alocados. No processo de montagem novos testes de laboratório foram realizados. Na Figura 7 – (b) é apresentada uma fotografia dos painéis sendo montados e testados. Todos os testes foram bem-sucedidos e o sistema foi despachado para Light visando testes finais em campo e implantação.

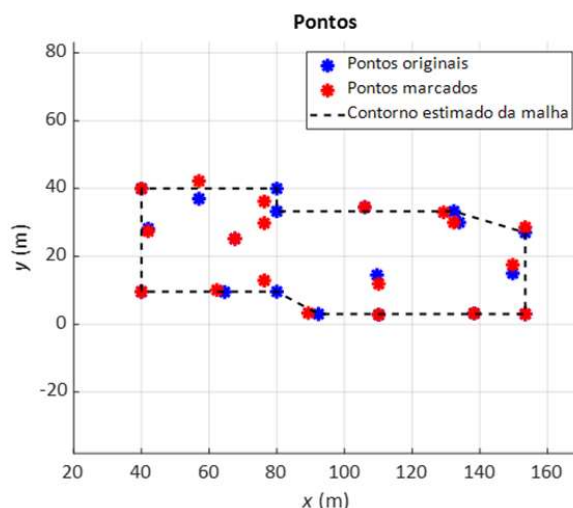


FIGURA 5 - Esquemático com a posição ótima das sondas de medição na subestação piloto.



FIGURA – 6 (a) Fotografia da versão final da sonda de potencial.

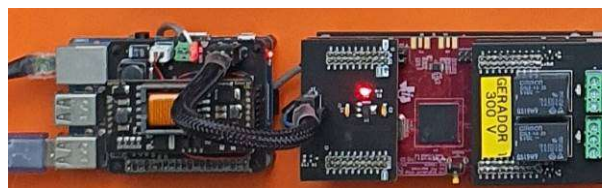


FIGURA – 6 (b) Fotografia da versão final do gerador de impulso de corrente 01.

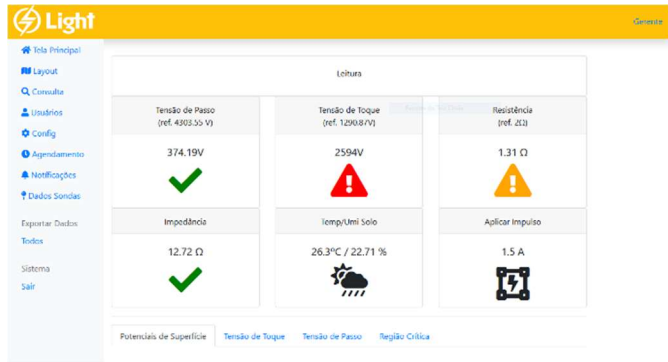


FIGURA 7 – (a) Tela principal do software de monitoramento e diagnóstico de malhas energizadas.



FIGURA 7 – (b) Fotografia demonstrando os testes finais em laboratório e montagem dos painéis com as sondas de medição de potencial e geradores.

Na implantação do sistema de monitoramento na subestação Nilo Peçanha da Light, inicialmente foram realizadas as colocações de todas as hastes de medições as quais seriam conectadas as sondas de medição de potencial. Além disso, foram instalados algumas dezenas de metros de eletrodutos e cabos visando a interligação dos pontos de medição às sondas, assim como, conectar o sistema às malhas auxiliares.

Na sequência, os painéis com as sondas de medição, geradores e *switch* PoE foram instalados nos pórticos da subestação em regiões que possibilitassem, de forma mais simples, a passagem de cabo de comunicação com a sala de controle e que fosse o mais equidistante possível das sondas. Nas Figuras 8 – (a) e (b) são apresentadas fotografias do PAINEL 1 (sondas + geradores) e Painéis 2 (sondas) e 3 (*switch* PoE), respectivamente.

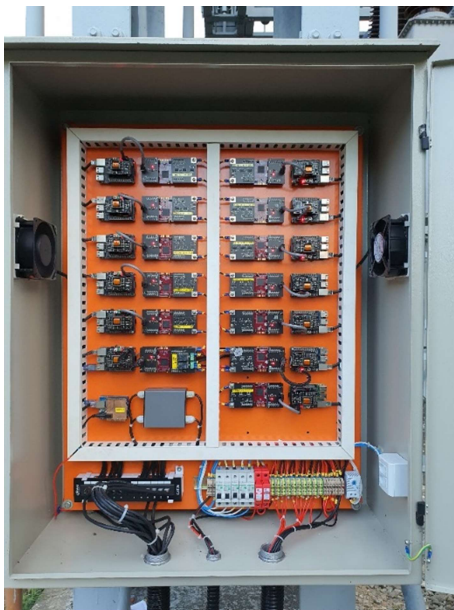


FIGURA 8 – (a) Fotografia ilustrando PAINEL 1 (sondas + geradores) instalado na subestação.

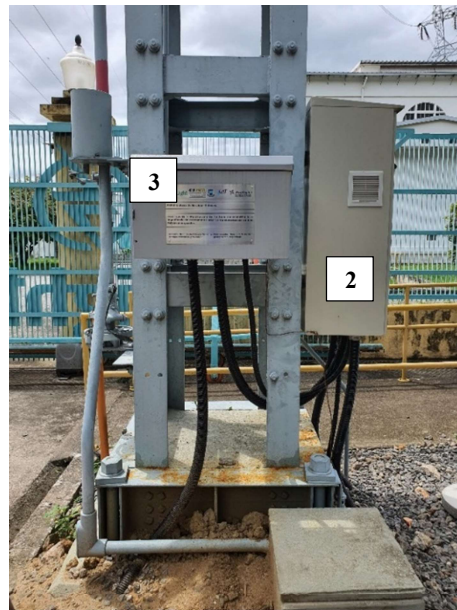


FIGURA 8 – (b) Fotografia ilustrando Painéis 2 (sondas) e 3 (*switch* PoE) instalados na subestação.

Após a instalação dos painéis partiu-se para os testes finais de funcionalidade em campo. Para isso, avaliou-se o desempenho dos circuitos geradores, das sondas de medição, assim como, dos sistemas comunicação. Na Figura 9 – (a) é ilustrado um dos testes realizados, no qual conectou-se um osciloscópio digital em paralelo com a sonda de tensão no intuito de avaliar se as respostas fornecidas pela sonda correspondiam àquelas medidas pelo osciloscópio. Diversos testes foram realizados com todas as 19 sondas de medição de potencial, os dois geradores e a sonda GPR, que mede a elevação de potencial no solo. Durante os testes foram corrigidos alguns problemas de conexão e após isso, logrou-se êxito em todos os testes, ou seja, os resultados fornecidos pelo sistema de monitoramento eram idênticos aqueles medidos com o osciloscópio.

Além dos testes de verificação de conformidade dos sinais, avaliou-se também o desempenho da malha de aterramento estimado tanto pelo sistema proposto como por medidor comercial da empresa Metrel. Na Figura 9 – (a)

é ilustrado o valor da impedância impulsiva medida com o equipamento comercial durante um dos testes. A diferença percentual entre valor estimado pelo equipamento da Metrel e o sistema desenvolvido foi de 2,6%. Evidenciando, portanto, a confiabilidade dos resultados produzidos pelo sistema proposto.



FIGURA 9 – (a) Fotografia ilustrando testes em campo.

FIGURA 9 – (b) Fotografia ilustrando testes em campo e comparações com equipamento comercial.

Após todos os testes de implantação terem sido concluídos de maneira exitosa, realizou-se a instalação definitiva do computador com o *software* de monitoramento e diagnóstico de malhas de aterramento energizadas na sala de operação da subestação. Na Figura 10 é apresentada uma fotografia do sistema de monitoramento funcionando de forma completamente remota a partir da mesa do operador da Light.

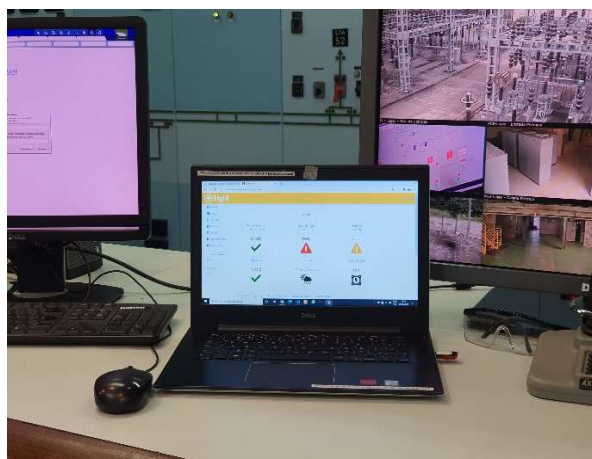


FIGURA 10. Fotografia ilustrando sistema de monitoramento rodando remotamente a partir da sala de comando da subestação piloto.

4.0 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho reportou o desenvolvimento e teste de um sistema de monitoramento e diagnóstico de aterramentos elétricos em subestações energizadas, composto por um conjunto de unidades de geração e medição de correntes e tensões que servem para excitar a malha de aterramento e fornecer dados ao *software* de avaliação das condições operativa. Os parâmetros medidos/calculados para fins de monitoramento e diagnóstico são: impedância impulsiva, resistência da malha de aterramento, potenciais de segurança (tensão de passo e de toque), condutividade, umidade e temperatura do solo.

Testes realizados no Laboratório de Alta Tensão de Campina Grande e na subestação Nilo Peçanha da Light demonstraram as funcionalidades do sistema. O desempenho do sistema, que ainda está em fase de protótipo, atendeu os requisitos e especificações iniciais do projeto.

O sistema pode agregar às empresas de energia: (1) Elevação a confiabilidade do fornecimento ao minimizar chances de desligamentos por falha no aterramento; (2) Redução dos custos operacionais com manutenções indevidas, por exemplo; (3) Minimização dos riscos de falha em equipamentos (*backflashover*, por exemplo) e sistemas de proteção; (4) Identificação da criticidade e não conformidade dos sistemas de aterramento; (5) Automação do processo de

identificação de malhas com maior risco; e (6) Aumento da segurança da infraestrutura, minimizando o risco de choques elétricos.

5.0 REFERÊNCIAS

- X. Long, M. Dong, W. Xu, and Y. W. Li, "Online Monitoring of Substation Grounding Grid Conditions Using Touch and Step Voltage Sensors," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 761–769, 2012.
- ABNT NBR 15749, "Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramento". 2009.
- D. Maguerroski *et al.* Sistema de medição de resistência de aterramento por diferenças parciais de potencial seletivas em frequência e tensões de passo e toque para subestações energizadas. In: Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 24., 2017, Curitiba, 2017.
- E. F. Costa, "Sistema de monitoramento on-line para aterramento," BR 20 2012 003491 9 U2, 2013.
- L. V. Gomes *et al.*, "Failure Detection in Energized High Voltage Substation Grounding Grids - a Case Study," *Int. J. of Eng. and Sci. Invention*, v. 5, n. 7, pp. 24–35, 2016.
- M. S. Castro *et al.* "Avaliação Experimental da Impedância em um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente". In: XVI ERIAC, Puerto Iguazu, Argentina, 2015.
- A. D. Dias *et al.* "Grounding Grids Analysis of Energized Substations," In: XVII Int. Sym. on High Vol. Eng., 2011, Hannover. ISH 2011, 2011.
- IEEE 80, "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding". IEEE, 2015.
- IEEE 81, "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System". IEEE, 2012.
- Kostic, V. I.; Raicevic, N. B. An alternative approach for touch and step voltages measurement in high-voltage substations. *Elec. Pow. Syst. Research*, [s.l.], v. 130, p.59-66, jan. 2016. Elsevier BV.
- Kokorus, R. *et al.* Analysis and comparison of calculation results and measurements of dangerous potentials on earthing systems. In: 2015 IEEE 15th Int. Conf. on Env. and Elec. Engineering (EEEIC), jun. 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS



George R S Lira é professor do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e coordenador dos Laboratório de Alta de Tensão (LAT) e de Inteligência Aplicada a Sistemas Elétricos (LIASE) do DEE. É autor de mais de 90 trabalhos publicados em Revistas e Congressos Internacionais e Nacionais. Vem atuando como pesquisador em diversos projetos de P & D, alguns dos quais resultaram em diversos sistemas, equipamentos e softwares aplicados ao setor produtivo. Suas principais áreas de interesse são: Técnicas de Alta Tensão, Instrumentação Eletrônica, Métodos de Otimização, Inteligência Artificial e Ciência de Dados.

(2) ARTHUR FRANCISCO ANDRADE

Possui graduação (2017), mestrado (2019) e doutorado (2021) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande. Tem atuado principalmente nos seguintes temas: simulações computacionais; cálculo de campos elétricos e magnéticos; transferência de calor; para-raios de ZnO; transformadores; termografia; sistemas de aterramento e métodos de otimização aplicados a problemas relacionados a sistemas elétricos. Atua como revisor para os periódicos High Voltage, IEEE Transactions on Plasma Science, Thermal Science and Engineering Progress, IET Generation, Transmission & Distribution e IEEE Transactions on Power Delivery. Atualmente é professor substituto do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB).

(3) RÔMULO DE OLIVEIRA TEIXEIRA

Meu nome é Rômulo, sou casado, formado em Engenharia Elétrica na Universidade Severino Sombra (hoje Universidade de Vassouras) em 2010, possuo MBA em Gestão de Pessoas pela Centro Universitário de Volta Redonda (Unifoa) em 2012, Pós-graduado em Sistema Elétricos da Geração pela COPPE/ UFRJ em 2014. Atuo como Engenheiro de Campo na área de Geração, Subestações e Linhas de Transmissão na Light Energia SA desde 2011, onde já exerci a função de Eletromecânico de Usinas e Subestações Especializado (2007 até 2010) e também Técnico de Campo na área de Geração, Subestações e Linhas de Transmissão (2010 até 2011).

(4) VALDEMIR DA SILVA BRITO

Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG em 2016. É Professor do Instituto Federal da Paraíba - IFPB desde 2015. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: Técnicas de Medição em Alta Tensão, Para-Raios de ZnO, Sistemas de Aterramento, Técnicas de Monitoramento de Equipamentos Elétricos, Transitórios Eletromagnéticos e Métodos de Otimização.

(5) LENILSON ANDRADE BARBOSA

Nasceu em Campina Grande, Paraíba, Brasil, em abril de 1991. Possui graduação (2017) e mestrado (2019) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e curso Técnico em Eletrônica (2010) pela Escola Técnica Redentorista - ETER. Atualmente é Doutorando (UFCG) e realiza atividades de pesquisa e desenvolvimento no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

(6) EDSON GUEDES DA COSTA

Edson Guedes da Costa orienta alunos de graduação, mestrado e doutorado. Coordena vários projetos de P&D. Coordena de convênios nacionais e internacionais. Atua no monitoramento e diagnóstico de sistemas elétricos, equipamentos de potência e sistemas de isolamento aplicados em sistemas de alta tensão. Pesquisa aterramentos, disjuntores, transformadores, para-raios. Revisa artigos inúmeros congressos nacionais e internacionais e conceituados periódicos científicos. Ele é associado à SBA, e ao Cigre, sendo Senior Member do IEEE. Faz parte do Sterling Comite do SBSE, do Altae e do International Symposium on High Voltage Engineering. <http://lattes.cnpq.br/3930289115658143>.