

Aparato sensorial para medição remota de corrente de fuga via LoRa em isoladores de subestações de transmissão de energia elétrica

Victor H. Yoshizumi*. Ana C. C. Barquete**. Sofia M. A. Lopes*. Danilo H. Spatti***
Rogério A. Flauzino*. Ivan N. da Silva*. Beatriz L. Tavares**. Alexandre G. C. Latorre**

*Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos, São Paulo, Brasil (e-mail: yoshizumi@usp.br, sofia.moreira.lopes@alumni.usp.br, raflauzino@usp.br, insilva@sc.usp.br).

**ARGO Transmissão de Energia S/A, São Paulo, São Paulo, Brasil (e-mail: ana.barquete@argoenergia.com.br, beatriz.tavares@argoenergia.com.br, alexandre.latorre@argoenergia.com.br).

*** Departamento de Sistemas de Computação, Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo (ICMC-USP), São Carlos, São Paulo, Brasil (e-mail: spatti@icmc.usp.br).

Abstract: The investigation of fault detection in power insulators has focused on the key variables involved in the aging process of these devices. Especially in environments with severe pollution, the premature degradation of insulators poses risks to the operation of the system, as well as damage to utilities, which lose revenue with unscheduled shutdowns or maintenance performed before the period established by the manufacturers. For this purpose, the quantification of the level of pollution can be estimated through various methods, such as those based on the detection of light and sound emissions or on the measurement of leakage currents. Thus, the main objective of this work is the development of a new tool, to be made available through a sensory apparatus for measuring leakage currents in insulators of electric power substations. The developed system was tested in practice on insulators installed at a pilot substation. Thus, such results can also contribute to the process that aims to estimate the moment to proceed with preventive maintenance on the equipment.

Resumo: A investigação da detecção de avarias em isoladores de potência tem se voltado para as variáveis-chaves envolvidas no processo de envelhecimento destes dispositivos. Sobretudo em ambientes com poluição ambiental severa, a degradação dos isoladores de maneira prematura traz riscos à operação do sistema, bem como prejuízos às concessionárias, as quais perdem receitas com desligamentos não programados ou manutenções executadas antes do período estabelecido pelos fabricantes. Para tanto, a quantificação do nível de poluição pode ser estimada por intermédio de vários métodos, tais como aqueles baseados na detecção de emissões luminosas e sonoras ou na medição de correntes de fuga. Assim, o principal objetivo deste trabalho é a elaboração de um novo ferramental, a ser disponibilizado por meio de um aparato sensorial para medição de correntes de fuga em isoladores de subestações de energia elétrica. O sistema desenvolvido foi testado na prática em isoladores instalados em uma subestação piloto. Assim, tais resultados podem também contribuir no processo que visa estimar o momento de se proceder com a manutenção preventiva no equipamento.

Keywords: Insulators; Leakage Current; Monitoring Sensor; Partial Discharges; Atmospheric Pollution.

Palavras-chaves: Isoladores; Corrente de Fuga; Sensor de Monitoramento; Descarga Parcial; Poluição Atmosférica.

1. INTRODUÇÃO

As correntes de fuga nos isoladores representam um dos principais desafios para os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, especialmente em ambientes altamente poluídos, como áreas industriais ou regiões costeiras. Os sistemas de transmissão de energia que operam em ambientes poluídos enfrentam o risco de falhas devido à deterioração dos equipamentos, sendo o isolador um dos componentes mais afetados (Qiu *et al.* 2015).

A diminuição do desempenho dos isoladores resulta na formação de arcos elétricos, gerando uma grande corrente de

fuga que percorre a superfície, causando danos permanentes ao dispositivo. O acúmulo de poluentes e sais sobre a superfície dos isoladores pode levar à formação de uma película condutora contínua durante chuvas ou neblinas, desencadeando no fenômeno de *flashover* ilustrado na Fig. 1, que é um dos principais problemas associados às falhas de isoladores, resultando em diminuição da qualidade da energia e confiabilidade do sistema, sendo objeto de estudo para correlacionar tensão, número de isoladores e densidade de poluição (Salem *et al.* 2020, Wang *et al.* 2019, Salem *et al.* 2022a).

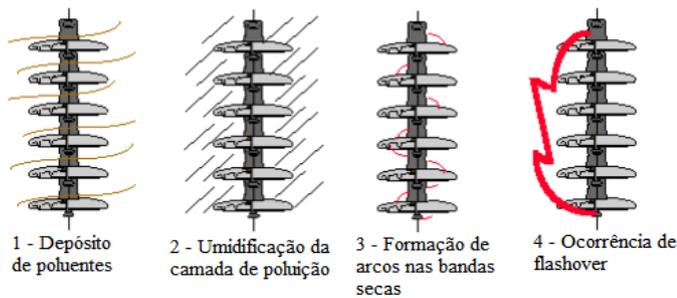


Fig. 1 Processo de *flashover* em isoladores, adaptado de Abdelaziz *et al.* 2004.

Para lidar com esse desafio, diversas abordagens têm sido adotadas, incluindo a inspeção e lavagem periódica dos isoladores para remoção de depósitos, aprimoramento dos aspectos construtivos e o uso de ferramentas para estimar condições climáticas propícias ao surgimento de arcos elétricos.

A prática de lavagem dos isoladores é comum no litoral brasileiro devido à sua eficácia e simplicidade, embora isso possa favorecer o surgimento de correntes de fuga em isoladores cerâmicos devido ao acúmulo de água (Quaresma, 2018). Por outro lado, permitir o acúmulo de certos contaminantes sólidos pode exigir a prática de raspagem, destacando a importância do processo de lavagem (Portella *et al.* 2008). É evidente que existe um tempo ideal para inspeção e limpeza dos isoladores, embora estudos sobre esse tempo ótimo sejam escassos na literatura. Em termos de pesquisa sobre novos aspectos construtivos, mudanças na geometria do isolador que o tornem mais resistentes ao fenômeno de *flashover*, bem como a alteração do recobrimento superficial das peças tornando mais difícil o surgimento de corrente de fuga, contribuem para aprimorar o desempenho dos isoladores (Khatoun, Khan e Singh 2017). Os isoladores poliméricos também tem ganhado destaque nos Estados Unidos nos últimos 30 anos, no entanto, apresentam desafios de resistência à degradação frente à insolação e intempéries, características típicas em regiões costeiras do Brasil (Gubanski e Vlastos 1990). Além disso, a estimação das condições que identificam os níveis de poluentes é crucial, juntamente com o entendimento dos processos elétricos envolvidos na formação de arcos devido às correntes de fuga (Salem *et al.* (2022b)). Diversas ferramentas inteligentes como redes neurais artificiais e os algoritmos bioinspirados, mostram-se promissoras na solução desses problemas, destacando a influência da temperatura, umidade do ar, direção do vento, precipitação e níveis de poluição, no surgimento de tais fenômenos (Jinlei *et al.* 2018, Yan, Gang e Jiafu 2020, Song *et al.* 2022).

Deste modo, o objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um protótipo de aparato sensorial de baixo custo para medição de correntes de fuga, as quais possam ocorrer na superfície externa de isoladores de subestações de transmissão de energia elétrica. Como decorrência desse trabalho, tem-se então o intuito de colaborar com os demais procedimentos que visam o monitoramento de contaminantes e poluentes aglomerados em sistemas de isolamento, com o intuito de identificar e sinalizar

a necessidade de procedimentos de manutenção preventiva a fim de se evitar eventuais falhas.

2. DESENVOLVIMENTO DO APARATO SENSORIAL

O sistema proposto para o aparato sensorial de monitoramento de correntes de fuga, decorrentes da deposição de contaminantes em isoladores elétricos, é fundamentado em filosofias do *System on a Chip*, incluindo comunicação de longo alcance como a tecnologia LoRa (*Long Range*). Esta filosofia representa redução de custos, desenvolvimento simplificado e possibilidade de utilização de vários níveis de segurança.

Na Fig. 2 tem-se a visualização do Kit Lora-E5, o qual utiliza o microcontrolador STM32WLE5JC, sendo seu núcleo de processamento Arm® Cortex®-M4 256-Kbyte Flash de memória e 64-Kbyte SRAM, e frequência de operação do LoRa para 868/915/923/920/865 MHz.



Fig. 2 Kit do sistema LoRa-E5.

A placa escolhida para desenvolvimento deste sensor, a STM32WLE5JC, possui implementadas “*features*” para seguranças de ataques externos e internos, tanto em *hardware* como em *software*. Como exemplo, têm-se a proteção de escrita e leitura na memória, MPU (*Memory Protection Unit*), isolamento segura entre os núcleos M4 e M0, instalação e atualização segura do *firmware*, LoRaWAN com dois níveis de criptografia dos dados.

Um fator crítico no projeto é o alcance dos sistemas de comunicação, sendo que para tais situações a filosofia de comunicação LoRa é a mais adequada. No entanto, para garantir confiabilidade em campo, o *hardware* escolhido para testes fora submetido a diversos ensaios visando caracterizar sua atuação com e sem obstáculos. Para tanto, frente a este intuito, foram então realizados testes dos parâmetros de comunicação envolvendo a tecnologia LoRa, sendo eles a frequência utilizada para transmitir os dados, potência de transmissão, largura de banda, fator de espalhamento e *coding rate*.

Nos testes realizados foram empregados os seguintes parâmetros, conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros considerados nos testes de transmissão (1).

Parâmetro	Valor
Potência de saída	14 dBm
Largura de banda	125 kHz
Fator de espalhamento	7
Coding rate	4/5

Neste primeiro teste, a distância de transmissão foi de 387 metros com os parâmetros da Tabela 1. Este teste foi feito com duas placas de comunicação à distância, funcionando como *Master/Slave*, sendo que na Fig. 3 é possível visualizar (via imagem de satélite) os obstáculos entre as placas.



Fig. 3 Teste 1 (Distância de 387 metros).

Para realização do segundo teste os valores dos parâmetros de comunicação foram alterados conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros considerados nos testes de transmissão (2).

Parâmetro	Valor
Potência de saída	22 dBm
Largura de banda	125 kHz
Fator de espalhamento	7
Coding rate	4/5

Neste cenário, a distância de transmissão obtida foi de 465 metros, como pode ser visto na Fig. 4.



Fig. 4 Teste 2 (Distância de 465 metros).

Para os propósitos do projeto, a Fig. 5 apresenta um diagrama compacto que permite visualizar as principais motivações em se utilizar o sistema de aquisição proposto, o qual pode ser integrado aos sensores de corrente de fuga (entrada analógica), sensores de poeira (sinal PWM – *Pulse Width Modulation*), sensores de RF (Radiofrequência – entrada analógica), sensores de variáveis ambientais (comunicação I2C – *Inter Integrated Circuit*) e sensores de emissão acústica (entrada analógica).

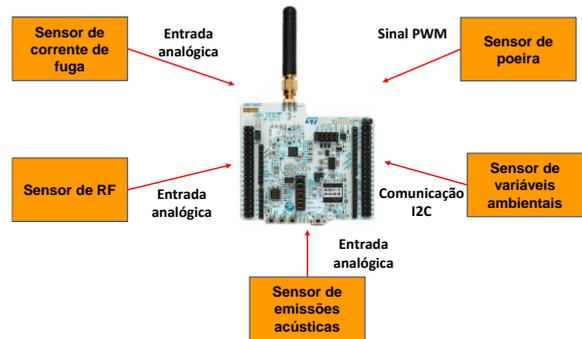


Fig. 5 Diagrama esquemático sobre as principais características da placa de aquisição.

Assim, cada elemento sensorial pode ser especificado separadamente a fim de compor o sistema de monitoramento das variáveis elétricas e ambientais, sendo que o sensor de corrente de fuga é um dos que necessita de especial atenção.

Para evitar interrupções nos circuitos para monitoramento da corrente de fuga, optou-se pela confecção de uma bobina de Rogowski. Este tipo de arranjo permite o monitoramento de correntes sem a necessidade de interrupção do circuito, tendo em vista que a bobina é aberta com o intuito de envolver o condutor a ser monitorado. O funcionamento da bobina se baseia nas leis de Ampère e de Faraday-Neumann-Lenz, ao medir o valor líquido da corrente elétrica que percorre um condutor e fornecer um valor de tensão em sua saída equivalente ao valor de corrente aferido. A bobina desenvolvida para o protótipo do sensor, a qual foi também utilizada nos experimentos em laboratório, é apresentada na Fig. 6 a seguir.



Fig. 6 Bobina de Rogowski confeccionada para monitoramento da corrente de fuga.

O enrolamento foi feito de forma a sensibilizar as entradas analógicas do STM32WLE5JC, sendo em seguida recoberto com material termo retrátil para proteção mecânica.

A conversão AD é feita pelo TSSOP-16, o microcontrolador é o próprio STM32 e o Rádio LoRa é formado pelo módulo Ra-02, conforme ilustrado na Fig. 7.

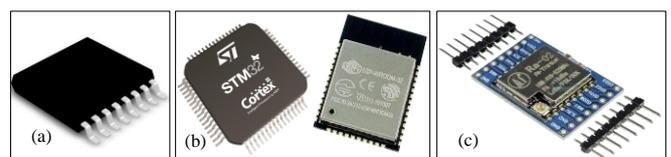


Fig. 7 (a) Conversor TSSOP-16. (b) Ilustração do microcontrolador STM32. (c) Ilustração do rádio LoRa formado pelo módulo Ra-02.

O sistema computacional foi desenvolvido de forma a ser capaz de automaticamente identificar novos elementos sensores no campo de alcance, baseando-se em sistema operativo em tempo real (RTOS – *Real Time Operating System*)

O aparato sensorial responsável por realizar a medição da corrente de fuga nos isoladores foi então instalado no conjunto de chaves seccionadoras invertidas. Assim, cada chave deveria ser envolvida por uma bobina de Rogowski. Em adição, um sensor seria também instalado nas proximidades do arranjo e este reuniria a soma das medições de corrente de fuga, bem como medidas de um sensor de variáveis ambientais e de um sensor de partículas de poeira, conforme o diagrama da Fig. 8.

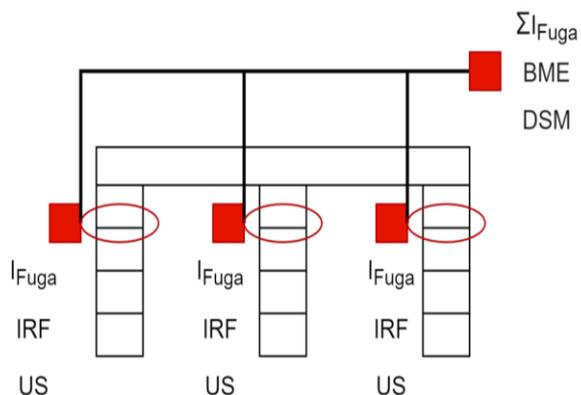


Fig. 8 Esquemático de instalação do sensor de medição da corrente de fuga.

A instalação do protótipo do sensor foi realizada pela equipe de manutenção da transmissora de energia. As Fig. 9, 10 e 11 apresentam os detalhes da instalação.



Fig. 9 Arranjo de chaves seccionadoras invertidas nas quais foram instalados os sensores.



Fig. 10 Bobina de Rogowski na chave seccionadora.

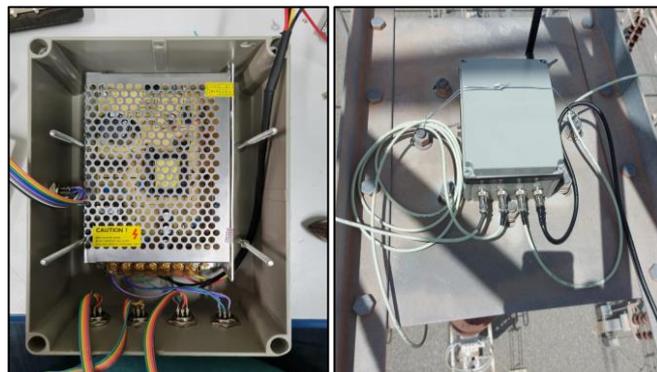


Fig. 11 Detalhe da parte interna e externa do sensor instalado.

3. RESULTADOS

A partir dos dados coletados foram realizadas duas análises para verificar o comportamento da corrente de fuga. A primeira análise consistiu na avaliação do valor médio desta variável ao longo do período de um dia. Assim, os gráficos apresentados na Fig. 12 são referentes ao comportamento médio das medições de fuga ao longo das horas do dia, junto às fases A, B e C, respectivamente.

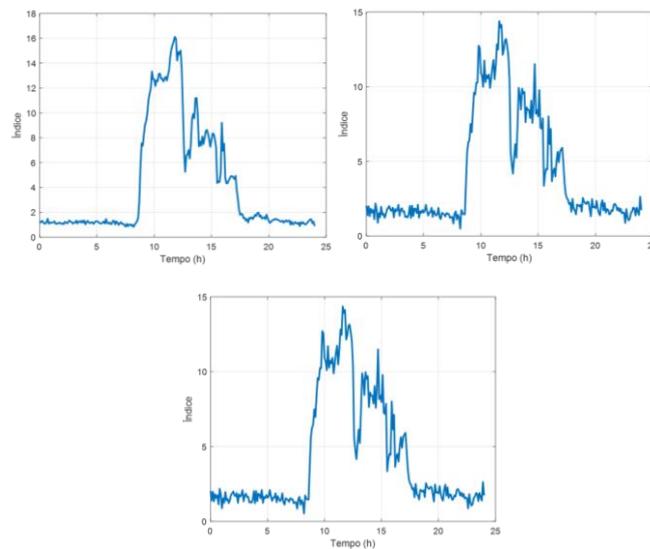


Fig. 12 Comportamento médio da corrente de fuga na fase A, fase B e fase C.

Além da análise do comportamento médio da série temporal da variável de corrente de fuga, também foi realizada uma

análise sobre a tendência do comportamento desta variável. Desta forma, os gráficos de barra apresentados na Fig. 13 mostram qual a tendência de aumento das correntes a cada hora do dia. Novamente, os gráficos apresentados são referentes às fases A, B e C, respectivamente.

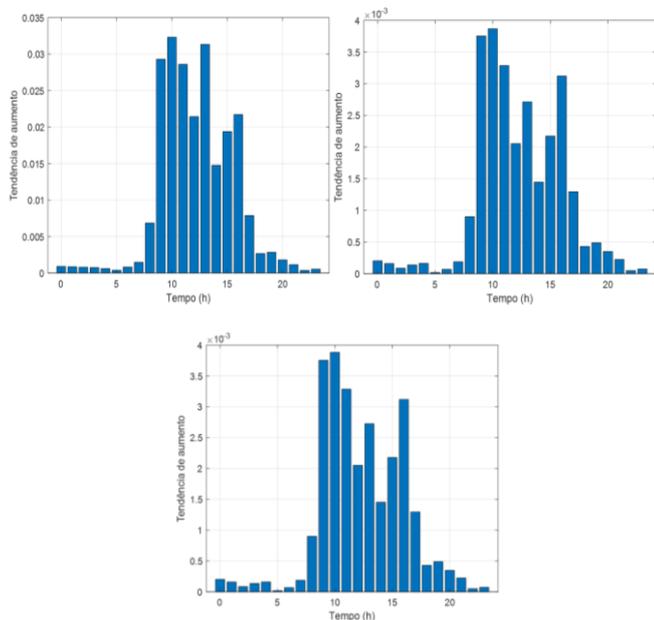


Fig. 13 Tendência de crescimento da corrente de fuga na fase A, fase B e fase C.

Avaliando os gráficos apresentados, nota-se que o comportamento da corrente de fuga é similar para as três fases, indicando uma aparente uniformidade no funcionamento da isolamento dos equipamentos de cada uma das fases. Além disso, observando-se as curvas apresentadas, nota-se dois momentos nos quais a grandeza da corrente de fuga apresenta picos em sua magnitude, um ocorrendo no meio do dia e outro no período da tarde. Este comportamento é similar ao de curvas encontradas na análise de radiação solar incidente e temperatura ao longo do dia, e também em curvas de demanda de energia. Desta forma, os picos de corrente podem estar relacionados com períodos de maior incidência solar ou períodos nos quais há um aumento na demanda de energia.

Além das análises citadas na seção anterior, está sendo também possível a realização de aprimoramentos envolvendo o entendimento das descargas parciais, tal como pode ser comprovado pela Fig. 14.

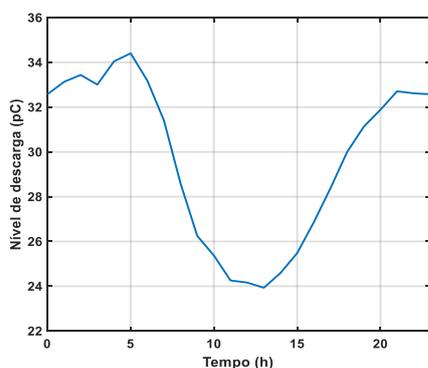


Fig. 14 Qualificação do nível de descargas em função do dia.

A partir da coleta com mais de três meses de dados sobre a corrente de fuga presente nas chaves seccionadoras, observa-se na análise da Fig. 14 que há ocorrência de descargas parciais em todo o momento. Adicionalmente, testemunha-se que as suas maiores magnitudes médias se concentram no horário compreendido entre 20h00 e 06h30, sendo que seu pico está em torno das 05h00. Por outro lado, aquelas de menores magnitudes estão compreendidas no intervalo entre 11h00 e 14h00.

A qualificação do nível de descargas parciais em 2021 e 2022 pode ser conferida na Fig. 15.

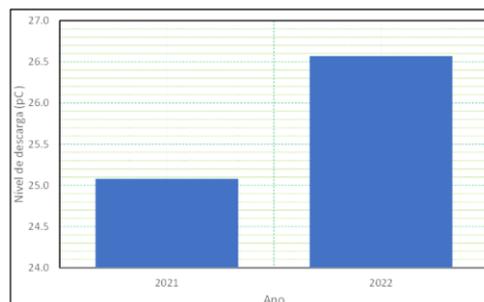


Fig. 15 Qualificação do nível de descargas em função do ano (2021 e 2022).

A partir da Fig. 16, observa-se então que há um aumento crescente das descargas parciais a partir de dezembro/2021. Já a Fig. 17 ilustra o comportamento médio dessas descargas parciais ao longo do dia, o qual foi contabilizado desde o início da aquisição de dados, ou seja, 23 de novembro de 2021.

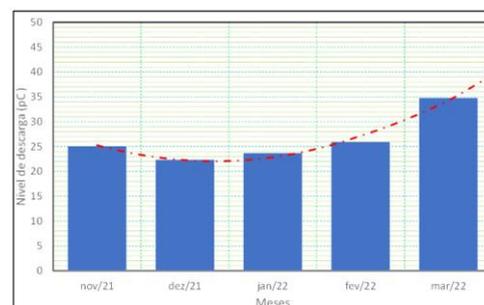


Fig. 16 Qualificação do nível de descargas desde o início da aquisição de dados.

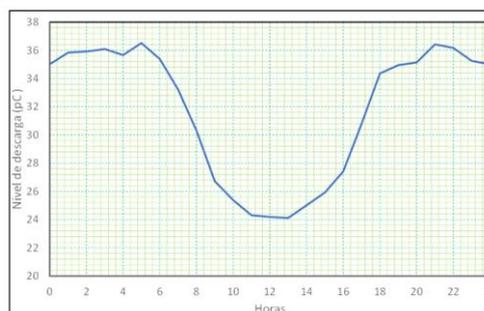


Fig. 17 Comportamento médio do nível de descargas em função das horas do dia.

Frente à compilação constituída com meses de dados sobre a corrente de fuga, testemunha-se então que as suas maiores

magnitudes médias se concentram no horário compreendido entre 18h00 e 06h30, sendo que seu pico está em torno das 05h00. Por outro lado, aquelas de menores magnitudes estão compreendidas no intervalo entre 10h00 e 14h00.

4. CONCLUSÕES

Um problema comum em sistemas elétricos de potência é o surgimento de correntes de fuga em isoladores, especialmente em ambientes poluídos ou com alta salinidade, como regiões costeiras. Para abordar essa questão, foi desenvolvido um aparato sensorial de baixo custo para monitorar essas correntes de fuga em isoladores de subestações de transmissão de energia elétrica.

O aparato sensorial é composto por uma bobina de Rogowski, que permite o monitoramento das correntes de fuga sem interromper o circuito, e utiliza a tecnologia LoRa para transmissão de dados, possibilitando uma comunicação de longo alcance. Além disso, a modularização dos sensores proporciona segurança e robustez à aplicação, permitindo rápida substituição de componentes e desenvolvimento ágil de software.

A escolha da tecnologia LoRa para comunicação foi crucial devido ao seu alcance em áreas desafiadoras. O hardware foi submetido a vários testes para garantir sua eficácia em campo e o aparato foi instalado em uma subestação no nordeste brasileiro para realização dos testes experimentais, com resultados satisfatórios que correspondem às observações práticas.

A integração bem-sucedida do *hardware* e *software*, juntamente com a robustez dos sistemas Pilotos, destaca o sucesso do projeto desde sua instalação inicial. A análise dos dados obtidos do protótipo revelou uma relação significativa entre corrente de fuga, radiação solar e demanda de energia, contribuindo para entender o comportamento dessas correntes nos isoladores.

O desenvolvimento desse protótipo oferece a possibilidade de monitorar os níveis de material contaminante e poluente depositado nos sistemas de isolamento de instalações de transmissão de energia, fornecendo dados para identificar a necessidade de procedimentos de manutenção preventiva e evitar falhas futuras.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de P&D regulado pela ANEEL, contando também com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES (Processo 88887.636079/2021-00).

REFERÊNCIAS

Abdelaziz E. O. et al. (2004) “Prevention of the interruptions due to the phenomena of the electric insulators pollution”. *First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, 2004.*, Hammamet, Tunisia, pp. 493-497.

Gubanski S. M. e Vlastos A. E. (1990) “Wettability of naturally aged silicone and EPDM composite insulators”.

IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, no. 3, pp. 1527-1535.

Jinlei H. et al. (2018) “Insulator contamination prediction model based on bp neural network optimized by genetic algorithm”. In: *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*. [S.l.: s.n.], p. 3166–3172.

Khatoon S., Khan A. e Singh S. (2017) “A review of the flashover performance of high voltage insulators constructed with modern insulating materials”. *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, v. 18, p. 246–249.

Portella K. F. et al. (2008) “Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador”. *Química Nova*, vol. 31, no. 2, pp. 340-348.

Qiu Z. et al. (2015) “Study on glaze electrical erosion characteristics of porcelain post insulator by using inclined plane and graphite-layer-based method”. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 6, pp. 3385-3394.

Quaresma G. H. (2018) “Avaliação do desempenho de isoladores elétricos de porcelana através do uso de recobrimentos poliméricos hidrofóbicos”. 2018. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Salem A. A. et al. (2020) “Effect of Pollution Distribution Scenarios on Flashover Characteristics on Outdoor Insulators”. *2020 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOReD)*, Batu Pahat, Malaysia, pp. 319-324.

Salem A. A. et al. (2022a) “Pollution Flashover Voltage of Transmission Line Insulators: Systematic Review of Experimental Works”. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10416-10444.

Salem A. A. et al. (2022b) “Monitoring Porcelain Insulator Condition Based on Leakage Current Characteristics”. *Materials*, 15(18):6370.

Song Z. et al. (2022) “Simulation of pollution accumulation characteristics of insulators and prediction of pollution impact rate based on improved neural network”. *CAIBDA 2022; 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Big Data and Algorithms*, Nanjing, China, pp. 1-8.

Wang R. et al. (2019) “Prediction model of insulator contamination degree based on adaptive mutation particle swarm optimisation and general regression neural network”. *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 1423-1428.

Yan S., Gang H. e Jiafu Z. (2020) “The Monitoring Interface of Insulator's State Based on the Leakage Characteristics”. *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Beijing, China, pp. 1-4.