

Desenvolvimento de um sensor alternativo para detecção de descargas parciais em campo

Rafael de Sousa Santos
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
rafael.sousa@ufu.br

Paulo Henrique Oliveira Rezende
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
paulohenrique.rezende@ufu.br

Andréia Coelho Domingos
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
andrea.domingos@ufu.br

Alan Petrônio Pinheiro
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
alanpetronio@ufu.br

João Vitor Ramos Mitidiero
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
joao.mitidiero@ufu.br

Resumo — A integridade do isolamento de cabos elétricos é um fator determinante para a segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos. Defeitos nesse isolamento podem resultar na ocorrência de descargas parciais (DP), fenômeno que acelera a degradação do material isolante e pode levar à falha do sistema. Diante desse cenário, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sensor magneticamente acoplado para a detecção de DP em cabos isolados, visando sua aplicação em campo. O sensor proposto, denominado *Helical Antenna Sensor* (HAS), foi projetado para operar na faixa de HF, utilizando uma geometria helicoidal combinada com blindagem metálica para mitigar interferências eletromagnéticas. Essa configuração visa otimizar o desempenho do sensor em ambientes com alta densidade de ruído, característica comum em subestações e redes elétricas ativas. Para avaliar a eficácia do sensor HAS, foram realizados ensaios laboratoriais em diferentes tipos de cabos e circunstâncias, nos quais defeitos foram induzidos artificialmente para simular condições típicas de falha. Além disso, testes em campo foram conduzidos em uma subestação, a fim de validar seu desempenho em um ambiente operacional real. Os resultados experimentais demonstraram que o sensor HAS é capaz de detectar pulsos característicos de DP, apresentando vantagens como flexibilidade de instalação e viabilidade de operação em ambientes ruidosos. Em comparação ao sensor *High Frequency Current Transformer* (HFCT), amplamente utilizado para esse tipo de medição, o HAS mostrou-se uma alternativa promissora, especialmente por não exigir a desenergização do ativo para a instalação. Entretanto, desafios relacionados ao nível de ruído nos sinais adquiridos ainda devem ser considerados para o aprimoramento do protótipo. Assim, os resultados deste estudo indicam que o sensor desenvolvido tem potencial para viabilizar a detecção de DP em cabos isolados em condições de campo, contornando algumas das limitações do HFCT e contribuindo para o avanço das técnicas de monitoramento de isolamento elétrico e, por consequência, à qualidade da energia provida.

Palavras-chave — medição, monitoramento, isolamento, cabos isolados, sensor.

I. INTRODUÇÃO

Os cabos isolados são amplamente utilizados em sistemas de transmissão e distribuição de energia, sendo o principal elemento de interconexão, devido à sua segurança operacional e resistência a fatores externos [1]. Esses fatores os tornam cada vez mais populares em aplicações de média tensão (MT) e alta tensão (AT).

A confiabilidade de condutores elétricos está atrelada à integridade de seu isolamento, sendo a presença de envelhecimento significativo ou defeitos um dos principais indicadores de desgaste, afetando a operação segura dos ativos elétricos. Segundo a IEC 60270, condutores com isolamento defeituoso geram elevados campos elétricos e, por consequência, o surgimento de descarga parcial (DP) nessa área. Por sua vez, esse fenômeno acelera a degradação do dielétrico, levando-o ao colapso [2]. As DP podem assumir os seguintes tipos conhecidos: descargas internas (geradas por microfissuras no isolamento preenchidas com gás), corona (provocada por pontas afiadas próximas ao condutor de alta tensão) e descargas de superfície (causadas por contaminação na superfície do material isolante ou na camada dielétrica externa) [3].

As descargas parciais podem ser monitoradas por meio de técnicas *offline* e *online*. O monitoramento *offline* é realizado em laboratório, dotado de recursos atenuadores de ruído, permitindo uma aquisição mais precisa dos sinais de DP. Já a medição *online* ocorre em redes de distribuição ou subestações, sendo influenciada por ruídos eletromagnéticos que podem dificultar a detecção dos pulsos de DP [4].

O desenvolvimento atual de sensores para detecção de DP possibilita novas maneiras de analisá-las. Entre eles, destaca-se o *Transient Earth Voltage* (TEV), um tipo de sensor capacitivo com alta sensibilidade, que detecta o pulso de DP por meio dos sinais que se propagam pelo revestimento metálico do equipamento. Porém, seu uso em cabos não é recomendado, sendo mais adequado para motores, transformadores e *Gas Insulated Switchgear* (GIS) [5;6]. Outro sensor amplamente utilizado é o *High Frequency Current Transformer* (HFCT), que opera por meio do acoplamento magnético e é considerado referência na detecção de DP em cabos isolados, graças à sua alta sensibilidade e capacidade de instalação na malha de aterramento. No entanto, sua aplicação requer acesso físico ao ponto de aterramento do condutor, o que pode limitar sua utilização em determinadas situações de campo. Entre os sensores em ascensão, destacam-se ainda os sensores acústicos e ultrassônicos, cuja popularidade tem aumentado significativamente. Eles são capazes de detectar a emissão sônica proveniente do pulso de DP. Contudo, é necessário posicioná-los próximos à fonte da descarga para melhor detecção, o que raramente é factível [7;8].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sensor baseado em acoplamento eletromagnético, que se modele ao corpo do condutor isolado e seja capaz de detectar pulsos de DP ao longo do cabo, eliminando a necessidade de acessar o cubículo elétrico ou qualquer região cujo acesso não seja permitido durante a operação.

II. DESENVOLVIMENTO

A. Captação do pulso de descarga parcial

A presença de descargas parciais em cabos isolados gera uma intensificação do campo elétrico na região afetada pelo defeito, resultando em uma perturbação eletromagnética que se propaga ao longo da blindagem do condutor até o aterramento. Esse fenômeno pode ser detectado por sensores baseados no princípio do acoplamento eletromagnético, os quais são amplamente empregados no monitoramento de descargas parciais. Dentre os dispositivos utilizados para essa finalidade, destacam-se as antenas de ferrite (*Ferrite Antennas*), laços magnéticos (*Magnetic Loops*), sensores de tensão transiente de terra (*Transient Earth Voltage – TEV*) e antenas monopolo (*Monopole Antenna*), cada um com características específicas de sensibilidade e aplicação.

B. Implementação do sensor

A elaboração do sensor proposto fundamenta-se no aprimoramento dos métodos atualmente empregados em dispositivos magneticamente acoplados para a detecção de descargas parciais. O sensor, denominado *Helical Antenna Sensor* (HAS), foi projetado para se adaptar à geometria do condutor de teste. Sua estrutura interna (Figura 1) é composta por um elemento receptor de geometria helicoidal, cujo núcleo, constituído por material dielétrico, confere maior resistência mecânica ao dispositivo. Externamente, o sensor é revestido, em um dos lados, por uma blindagem metálica projetada com o objetivo de minimizar interferências eletromagnéticas no ambiente de medição, garantindo maior precisão na detecção dos sinais de descarga parcial. A antena é formada por 12 espiras e opera na faixa de alta frequência (HF), compreendida entre 3 e 30 MHz, proporcionando sensibilidade adequada para identificação de pulsos característicos do fenômeno em cabos isolados.

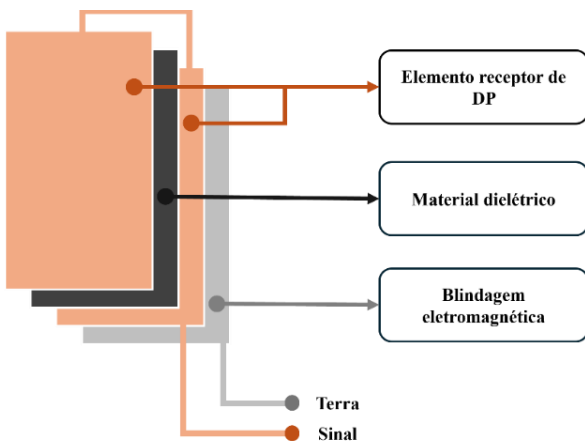


Fig. 1. Diagrama simplificado do sensor

C. Estrutura do condicionamento do sinal

O método de aquisição da DP, representado na Figura 2, inicia-se com a captação do pulso de descarga parcial de alta frequência pelo sensor. O sinal detectado é, então, submetido a um pré-processamento por meio de um filtro *anti-aliasing*

do tipo passa-banda, projetado para operar na faixa de 1 a 10 MHz, com o objetivo de atenuar componentes indesejáveis e preservar as características espectrais da DP. Em seguida, o sinal filtrado é acoplado a um *Low Noise Amplifier* (LNA), que apresenta uma faixa de operação de 0,5 a 500 MHz e um ganho de 28 dB, proporcionando maior sensibilidade e precisão na aquisição do pulso de DP. Após a amplificação, o sinal é transmitido via cabo coaxial até o sistema de medição (*Aquila, Techimp*), onde é processado e analisado para identificação das atividades de descargas parciais.

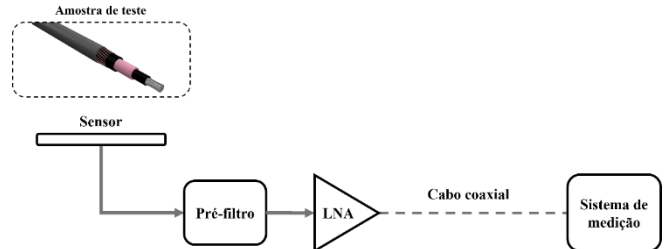


Fig. 2. Estrutura simplificada da aquisição do sinal

D. Validação

Para avaliar o desempenho inicial do sensor proposto, foram conduzidos quatro experimentos laboratoriais e um experimento em campo, totalizando cinco ensaios. Os quatro primeiros experimentos foram realizados em ambiente controlado, utilizando uma fonte de alta tensão (*Dielec*), na qual os cabos foram submetidos a testes em diferentes níveis de tensão: 5 kV, 8 kV e 17 kV. Porém, os sinais capturados foram coletados na tensão de 17 kV ($2U_0$), que corresponde a duas vezes a tensão nominal dos cabos de teste. O outro experimento consistiu em medições realizadas em uma subestação, permitindo a análise do desempenho do sensor em condições reais de operação.

Os ensaios foram conduzidos empregando dois sensores: um *High Frequency Current Transformer* (HFCT), utilizado como referência, e o sensor desenvolvido neste estudo. Nos testes em laboratório, foram selecionadas três amostras de cabos com diferentes tipos de isolamento e seções transversais. O primeiro cabo, de 300 mm², possuía isolamento em *Etileno Propileno Rubber* (EPR) e apresentava descargas parciais de superfície, induzidas artificialmente por meio de um corte na capa externa entre o dielétrico e a malha de aterramento, conforme ilustrado na Figura 3. Já o segundo cabo, de 35 mm², era isolado com *Cross-Linked Polyethylene* (XLPE) e continha cavidades internas, formadas após um processo de envelhecimento artificial em laboratório (envelhecimento térmico em forno). Por fim, o terceiro cabo, de 35 mm², também possuía isolamento do tipo EPR e apresentava descargas internas devido a cavidades, geradas ao ser submetido ao agente estressor água.

Nos experimentos laboratoriais, foram empregados terminais a óleo isolante específicos para evitar a necessidade de instalação de muflas nos cabos isolados. Para garantir a confiabilidade dos resultados, cada experimento foi repetido pelo menos três vezes, possibilitando a análise da persistência das medições. A seguir, são detalhados os experimentos realizados.



Fig. 3. Defeito induzido para obter descarga de superfície

- **Experimento 1:** o primeiro experimento foi conduzido em ambiente laboratorial, com o objetivo principal de avaliar a capacidade do sensor desenvolvido na detecção de pulsos de descarga parcial. Além disso, o ensaio teve como segunda finalidade a análise da forma de onda capturada, verificando sua conformidade com as características esperadas para esse tipo de fenômeno. Por fim, buscou-se examinar se o tipo de descarga detectado pelo sensor correspondia ao defeito induzido na amostra de teste. O procedimento experimental consistiu na utilização de um cabo isolado com *Etileno Propileno Rubber* (EPR), no qual um defeito foi propositalmente introduzido para simular a ocorrência de DP. Para a aquisição dos sinais, o sensor HFCT foi conectado à malha de aterramento da instalação, enquanto o sensor desenvolvido foi posicionado diretamente sobre a região defeituosa do cabo, conforme ilustrado na Figura 4.

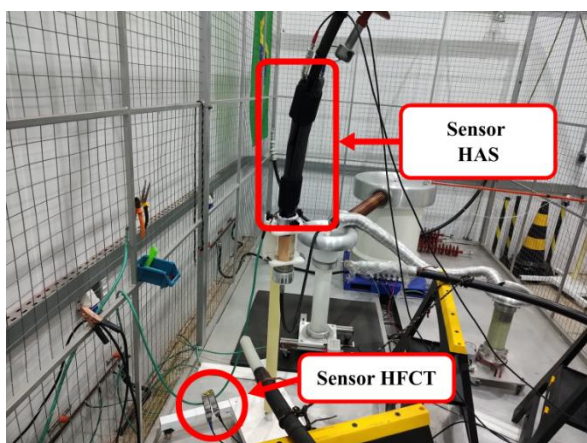


Fig. 4. Primeiro experimento, cabo isolado de 300 mm² acompanhado dos sensores HFCT e HAS.

- **Experimento 2:** assim como o primeiro ensaio, este experimento foi realizado em ambiente laboratorial e teve como principal objetivo avaliar a capacidade do sensor desenvolvido na detecção de descargas parciais associadas a cavidades internas no isolamento do cabo. Para a execução do teste, foi utilizado um cabo isolado com *Cross-Linked Polyethylene* (XLPE), no qual foram induzidas cavidades internas por meio de um

processo de envelhecimento artificial. A configuração experimental incluiu a conexão do sensor HFCT à malha de aterramento da instalação, enquanto o sensor HAS foi posicionado ao longo da superfície do condutor, na região central do cabo, conforme destacado na Figura 5.

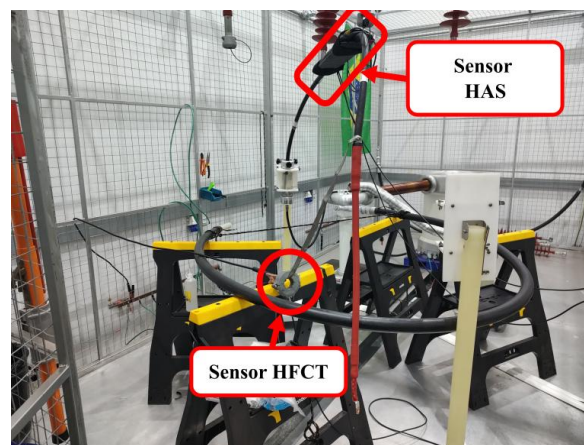


Fig. 5. Segundo experimento, cabo isolado de 35 mm² envelhecimento termico acompanhado dos HFCT e HAS.

- **Experimento 3:** de modo semelhante aos experimentos anteriores, o terceiro experimento foi conduzido em ambiente laboratorial, visando avaliar a capacidade do sensor HAS de distinguir pulsos de descargas parciais do ruído elétrico presente no sistema. Para isso, foram utilizados, como ilustra a Figura 6, um sensor HFCT instalado na malha de terra e o sensor HAS, que foi instalado na extensão do condutor contendo um defeito previamente induzido. Uma fonte de alta tensão controlada completou a configuração experimental. Os sinais adquiridos pelos sensores HFCT e HAS foram analisados utilizando a ferramenta TF-Map (Techimp), que permite a visualização das descargas no domínio tempo-frequência.

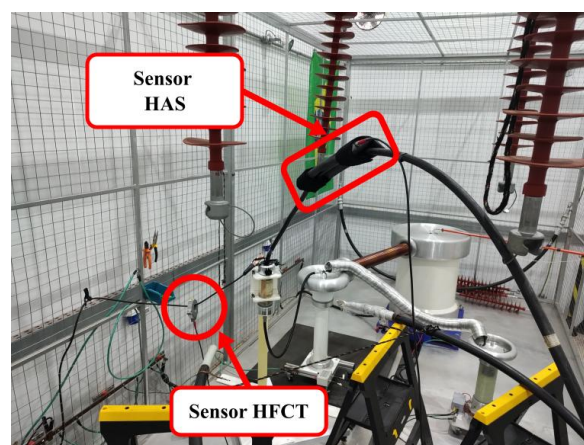


Fig. 6. Terceiro experimento, cabo isolado de 35 mm² agente agressor água acompanhado dos HFCT e HAS.

- **Experimento 4:** o quarto experimento foi conduzido em ambiente de campo, com o objetivo de avaliar o desempenho do sensor desenvolvido na detecção de descargas parciais em condições não controladas. Diferentemente dos ensaios laboratoriais, este experimento permitiu verificar a robustez do sensor

diante de fatores externos, como interferências eletromagnéticas e variações nas condições operacionais da instalação. A configuração do teste envolveu a conexão do sensor HFCT à malha de aterramento do sistema, enquanto o sensor desenvolvido foi posicionado ao longo do condutor, permitindo a captação dos sinais de DP em diferentes pontos do cabo. A disposição dos sensores na subestação é realizada na Figura 7.

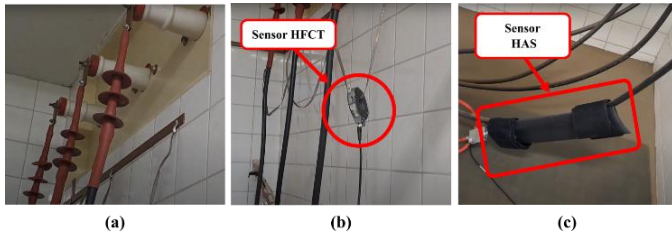


Fig. 7. Terceiro experimento em subestação (a) terminais do transformador, (b) sensor HFCT e (c) sensor HAS

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o experimento 1, após a realização da primeira fase do ensaio, foi possível verificar que o sensor HAS apresenta sensibilidade à presença de atividades de DP. A análise das formas de onda capturadas, apresentadas a seguir, permite comparar o desempenho dos sensores utilizados no experimento. Na Figura 8, observa-se a forma de onda adquirida pelo sensor HFCT, enquanto a Figura 9 exibe a forma de onda registrada pelo sensor HAS. Ambos os sensores demonstraram um padrão característico de DP, embora o sinal obtido pelo sensor HAS apresente maior suscetibilidade a interferências e distorções decorrentes do ruído do ambiente de medição.

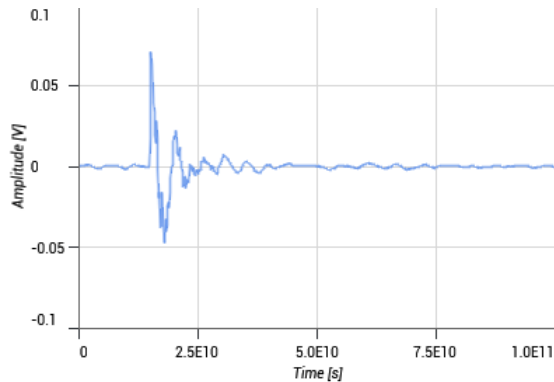


Fig. 8. Forma de onda obtida pelo sensor HFCT.

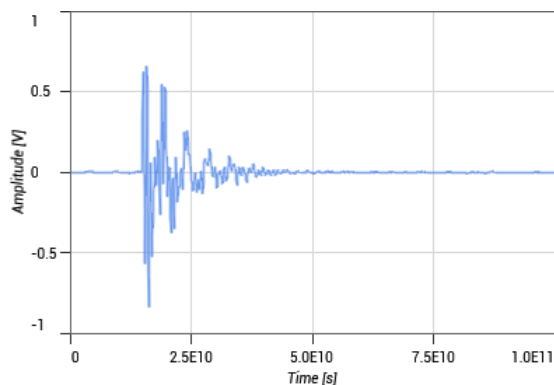


Fig. 9. Forma de onda obtida pelo sensor HAS desenvolvido.

Além da análise das formas de onda, foi realizada a avaliação do *Phase Resolved Partial Discharge* (PRPD). A distribuição dos pulsos de DP em função da fase da tensão aplicada, apresentada na Figura 10 para o sensor HFCT, evidencia um padrão simétrico, característico de descargas de superfície. De forma semelhante, a Figura 11 demonstra que o sensor HAS também foi capaz de detectar pulsos de DP compatíveis com descargas de superfície, validando sua eficácia na identificação desse tipo de fenômeno.

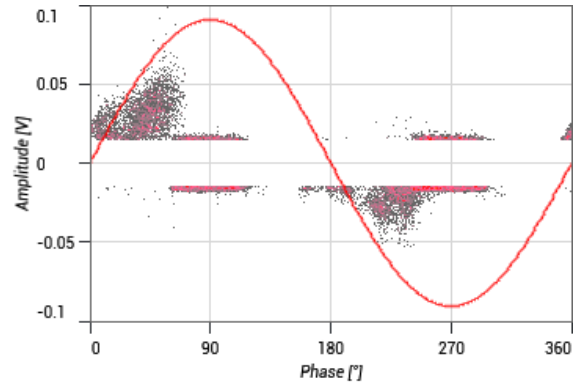


Fig. 10. Padrão PRPD representado descargas de superfícies obtida pelo sensor HFCT.

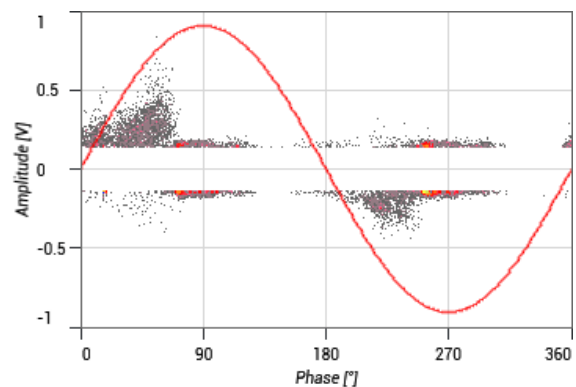


Fig. 11. Padrão PRPD representado descargas de superfícies de onda obtida pelo sensor HAS.

Já no experimento 2, em que o cabo foi submetido a um processo de envelhecimento artificial, foram obtidos os padrões PRPD. A análise dos dados revela que, na Figura 12, coletada pelo sensor HFCT, e na Figura 13, pelo sensor HAS, é possível observar um padrão de simetria ao longo do ciclo da tensão aplicada, característico de descargas associadas a cavidades internas no isolamento. Adicionalmente, nota-se que os pulsos iniciais ocorrem antes do cruzamento por zero da forma de onda de tensão, um comportamento atribuído à presença de cargas parciais remanescentes de eventos anteriores. Esse fenômeno está relacionado à redistribuição do campo elétrico no interior do material isolante, afetando a dinâmica de ionização e a geração de novos pulsos de DP.

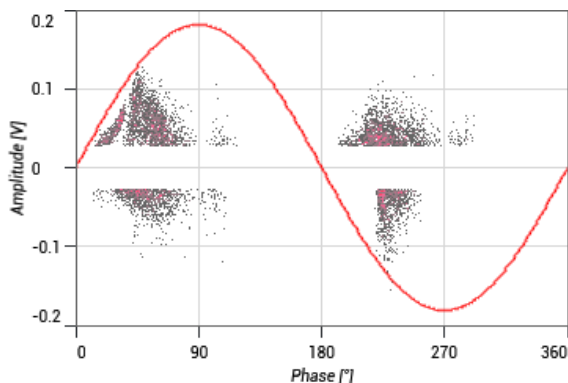


Fig. 12. Padrão PRPD representado descargas internas obtida pelo sensor HFCT.

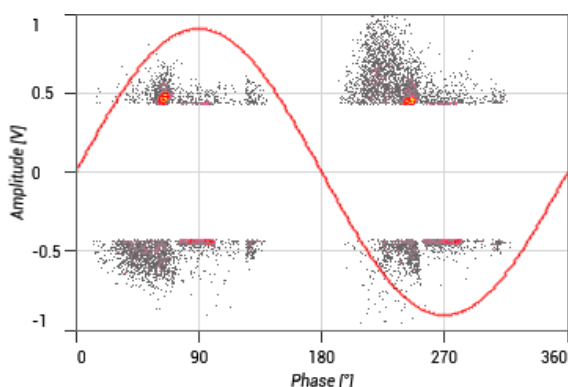


Fig. 13. Padrão PRPD representado descargas internas obtida pelo sensor HAS.

O experimento 3, no qual o cabo foi submetido ao agente estressor água, revelou os padrões TF-Map. Inicialmente, observa-se, na Figura 14, a formação de dois agrupamentos distintos: o conjunto de pontos em vermelho indica os pulsos de DP, enquanto os pontos em preto representam o ruído presente na rede elétrica. A comparação com os resultados obtidos pelo sensor HAS, conforme ilustrado na Figura 15, demonstra sua capacidade de capturar os pulsos de DP e diferenciá-los dos ruídos de fundo. Tal distinção é evidenciada pela formação de agrupamentos separados no gráfico TF-Map. Essa separação clara entre DP e ruído comprova que o sensor HAS, aliado a técnicas avançadas de processamento de sinais, pode constituir-se em uma ferramenta eficaz para o diagnóstico e monitoramento de descargas parciais em cabos isolados, mesmo em ambientes ruidosos.

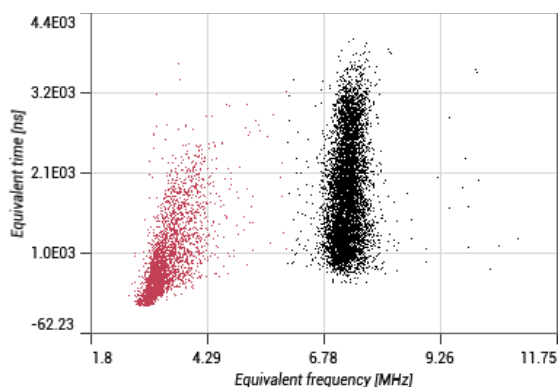


Fig. 14. Agrupamento de pulsos de DP capturando pelo sensor HFCT.

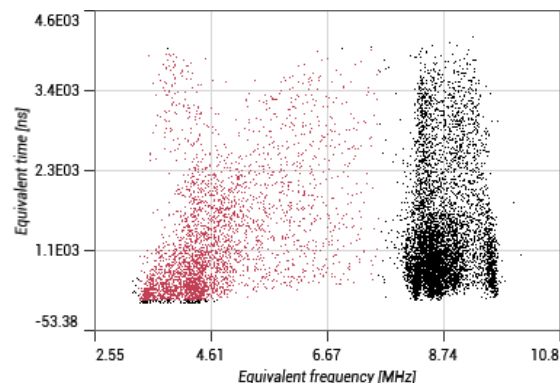


Fig. 15. Agrupamento de pulsos de DP capturando pelo sensor HAS.

Por fim, no experimento 4, realizado em condições reais de operação, foram efetuadas medições de descargas parciais em ambiente de campo, especificamente em uma subestação localizada na Universidade Federal de Uberlândia. Esse experimento teve como principal objetivo avaliar a capacidade do sensor HAS em detectar pulsos de DP em um ambiente com elevados níveis de interferência eletromagnética, característico de instalações elétricas em operação. Os sinais adquiridos durante o ensaio estão apresentados na Figura 16, capturada pelo sensor HFCT, e na Figura 17, pelo sensor HAS, sendo possível identificar padrões característicos de descargas internas. A análise dos pulsos capturados pelo sistema de aquisição indica que o sensor HAS foi capaz de detectar atividades de DP mesmo em um ambiente ruidoso, demonstrando sua aplicabilidade para o monitoramento de descargas parciais em campo.

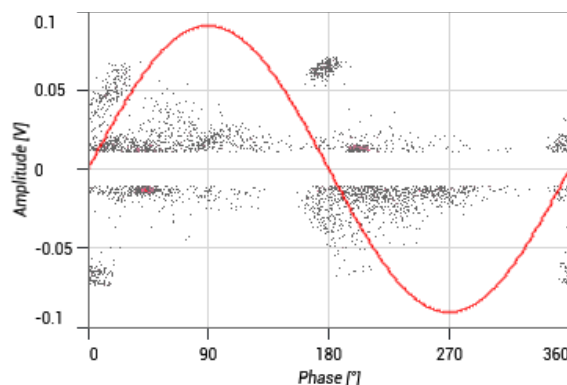


Fig. 16. Padrão PRPD obtida pelo sensor HFCT em condições reais.

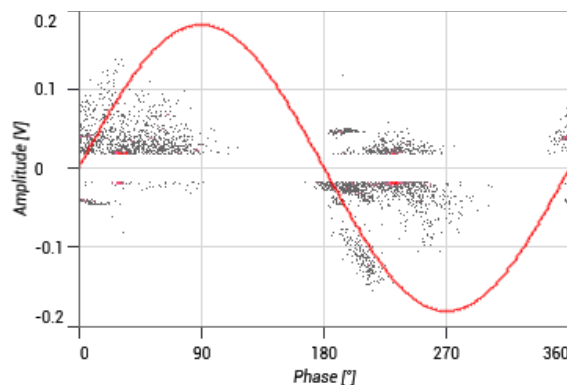


Fig. 17. Padrão PRPD obtida pelo sensor HAS em condições reais.

IV. CONCLUSÃO

Este estudo apresentou o desenvolvimento e a validação de um sensor magneticamente acoplado para a detecção de descargas parciais em cabos isolados, com foco na aplicação em campo. O dispositivo proposto foi projetado para otimizar o processo de monitoramento, permitindo a identificação de DP sem comprometer a segurança do operador. Diferentemente de sensores convencionais, que necessitam de fixação nos terminais ou em proximidade direta com os pontos de aterramento, o *Helical Antenna Sensor* (HAS) pode ser instalado em qualquer porção do cabo, viabilizando medições sem a necessidade de interrupção do circuito elétrico.

Os resultados experimentais demonstraram que o sensor HAS apresenta desempenho promissor na captação de pulsos de DP, sendo comparável ao sensor de referência HFCT. Sua principal vantagem reside na flexibilidade de instalação, permitindo sua utilização em locais de difícil acesso, sem a necessidade de conexão direta ao aterramento do condutor monitorado. No entanto, a análise dos sinais revelou que o HAS apresenta níveis de ruído mais elevados em comparação ao HFCT, o que pode dificultar a avaliação visual direta dos pulsos de DP sem o emprego de técnicas de pós-processamento.

Ainda assim, o sensor demonstrou ser capaz de detectar os principais tipos de descargas parciais, com sensibilidade inferior à do HFCT, mas suficiente para viabilizar o diagnóstico da ocorrência de DP em campo. Dessa forma, o sensor HAS representa uma alternativa viável para o monitoramento não intrusivo de descargas parciais em cabos isolados, contribuindo para o avanço das técnicas de diagnóstico e manutenção preditiva em sistemas elétricos, além de colaborar para a garantia da qualidade da energia fornecida.

AGRADECIMENTO

Agradecemos sinceramente à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro que tornou esta pesquisa uma realidade. Reconhecemos o papel da FAPEMIG no fomento à ciência e tecnologia em Minas Gerais, e em particular, o investimento em jovens pesquisadores como este que vos escreve. O suporte concedido como bolsista foi essencial para o desenvolvimento deste estudo e para o meu crescimento como cientista.

REFERÊNCIAS

- [1] G.C. Stone et al., "Advances in Interpreting Partial Discharge Test Results from Motor and Generator Stator Windings", (CIGRE Paper 11-302 2002).
- [2] R.Ghosh,P.Seri,R.E.Hebner,andG. C. Montanari, Noiserejectionand detection of partial discharges under repetitive impulse supply voltage, IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 67, no. 5, pp. 4144-4151, May 2020.
- [3] U. Khayam, W. A. Putro, K. Urano, C. Min, M. Kozako, and M. Hikita, Partial discharge pattern of various defects measured by spiral antenna as UHF external sensor on 66 kV GIS model, Int. J. Electr. Eng. Informat., vol. 6, no. 2, pp. 404-420, Jun. 2014.
- [4] S. S. Refaat, M. A. Shams, "A review of partial discharge detection diagnosis techniques in high voltage power cables", 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018).
- [5] A. Itose, M. Kozako and M. Hikita, "Partial discharge detection and induced surface current analysis using transient earth voltage method for high voltage equipment," 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, China, 2016, pp. 456-460.
- [6] A. J. Reid, M. D. Judd and G. Duncan, "Simultaneous measurement of partial discharge using TEV, IEC60270 and UHF techniques," 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, San Juan, PR, USA, 2012, pp. 439-442.
- [7] L. E. Lundgaard, "Partial discharge. XIV. Acoustic partial discharge detection-practical application," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 34-43, Sept.-Oct. 1992.
- [8] Q. Xie, T. Li, J. Tao, X. Liu, D. Liu e Y. Xu, "Comparação do desempenho acústico e precisão de posicionamento de três tipos de sensores ultrassônicos de descarga parcial plana", *IET Radar Sonar & Navigation*, vol. 10, no. 1, pp. 166-173, 2016.