

Desenvolvimento de um sistema de análise de descargas parciais em cabos elétricos isolados

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

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

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

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

Janderson Rodrigues Alves
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
janderson.alves@ufu.br

Lorenço Vasconcelos Santos
Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Uberlândia-MG, Brasil
lorenco.santos@ufu.br

Resumo — As redes de distribuição subterrâneas, em especial as de média tensão, fazem uso intensivo e obrigatório de cabos elétricos isolados. E para avaliar de maneira preditiva o estado destes, há a necessidade quase imperativa de medição de descargas parciais. Contudo, esta medição em campo e online (sem necessidade de desenergizar o circuito) é muito complexa pois é propensa a grande quantidade de ruídos. Neste contexto, esta pesquisa propõe a criação de um equipamento de medição de descarga parcial totalmente embarcado (todos os recursos contidos em um só hardware móvel) e foca em medições em campo para cabos isolados de média e alta tensão. O equipamento conta com até 6 canais de medição em altas taxas de medição (125 Ms/s) e processamento em tempo real. Sua memória de medição permite a aquisição de até 700 mil amostras de sinais de descargas. Valos este muito acima de qualquer sistema comercial. Os resultados preliminares mostram que o sistema é capaz de registrar tais fenômenos de descargas em campo mostrando alta sensibilidade e bom suporte aos operadores, viabilizando o diagnóstico mais preciso, mais automático. Consequentemente, dando mais condições assertivas às equipes de manutenções de subestações de distribuição e redes subterrâneas. O equipamento também tem um custo bem inferior ao praticado no mercado internacional, possuindo características bem similares as melhores marcas.

Palavras-chave — descargas parciais, sistema de medição, cabos elétricos isolados, monitoramento, manutenção preditiva.

I. INTRODUÇÃO

Segundo Refaat et al. [1], cerca de 80% das redes elétricas subterrâneas de distribuição que operam em níveis de tensão de 3,22kV até 11kV, empregam a utilização de cabos elétricos isolados. Porém, ao longo de sua vida útil, ocorre a deterioração de sua isolamento, podendo ser ocasionada por condições naturais (temperatura ambiente, humidade, radiação, etc), estresses mecânicos durante instalação e falhas operacionais.

Um cabo com sua isolamento comprometida, comumente apresenta a presença de descargas parciais (DPs) em pontos específicos de seu comprimento, sendo um grande indicativo do estado de vitalidade da sua isolamento. Portanto, se torna de grande importância a análise preditiva de DP nos condutores isolados, com o intuito de garantir a confiabilidade e segurança do sistema elétrico.

No entanto, essas análises são dificultadas pelo ambiente ruidoso em que são realizadas, tornando a distinção entre sinais de DPs e ruídos uma análise muito complexa.

Também, é preciso considerar que a medição ocorra em ambientes adversos com o sistema elétrico ativo, para a ininterruptão da distribuição elétrica. Em virtude disso, o operador da medição não possui simples acessibilidade e manejo de equipamentos e instrumentos nestes ambientes, devido a procedimentos de segurança a sua integridade física.

A constituição de um sistema para análise de DPs inclui operações com sinais de alta frequência. Um sinal de DP tem largura de banda que chega facilmente aos 20Mhz [2]. Neste sentido, considerando a referência de amostragem de Nyquist-Shannon, para uma visualização do sinal minimamente fidedigna, é necessário que a frequência de amostragem seja pelo menos de duas vezes a maior frequência do sinal. Na prática, os sistemas comerciais começam em taxas de aquisições de 100 milhões de amostras por segundo. Isto exige um hardware sofisticado para guardar tantas amostras e em breve espaço de tempo, gerando altos ‘throughput’.

Há variadas formas de se medir DPs. Uma delas é por meio de antenas UHF [4-5-6], ou piezoelétricos [7] ou até mesmo por câmeras acústicas [8]. Esses métodos são funcionais, porém ainda muito sensíveis a interferências eletromagnéticas e/ou harmônicas geradas pelo próprio sistema em operação, o que causa uma redução significativa na precisão dos dados aferidos.

Com estes fatores em mente, foi realizada esta pesquisa e desenvolvimento para um sistema de análise de descargas parciais em cabos isolados. Intitulado como PD.Analyzer, todo o ecossistema necessário para a aferição estão incluídos em seu projeto, como sensores, o hardware de aquisição e processamento de dados, e também, o software de processamento de sinais necessários para fazer as análises dos dados coletados em campo. Com este sistema foi possível capturar e analisar descargas parciais em campo e de maneira online (sem desenergizar o cabo), destacando-se pelo custo-benefício e a praticidade de sua utilização.

II. VISÃO GERAL DO SISTEMA

O PD.Analyzer tem, além do circuito de medição, aquisição e digitalização de sinais, embarca também em um só equipamento todos os recursos necessários para se fazer as medições em campo. Isto inclui um processador de alto desempenho para executar o programa de processamento de

sinas que é exibido em uma interface gráfica touch screen de 15", um sistema de bateria com autonomia superior a 4h e todos os elementos auxiliares necessários para autonomia da medição em campo. A Figura 1 ilustra os principais elementos de projeto do sistema proposto. As próximas seções detalham elementos de medição.

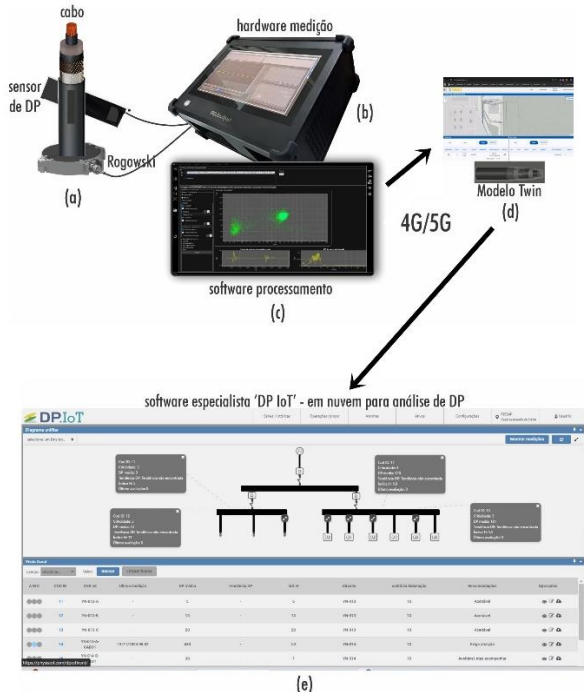


Figura 1 – Elementos gerais de hardware e software que compõem a solução de medição de descargas criadas. (a) Cabo isolado sendo sensorizado. (b) Hardware de medição de descargas parciais. (c) Software sendo executado dentro do hardware de medição visto no item Figura 1b. (d) Software já presente na nuvem para receber as medidas em campo do equipamento de medição e alimentar com dados os modelos de degradação dos ativos. (e) Software que analisa todas as medidas já feitas para aquele cabo e com base nestas medidas, faz diagnóstico e progressão, exibindo essas informações em uma interface supervisiória.

Como este presente trabalho foca só no sistema de medição (Figura 1b), os softwares especialistas (Figura 1c a 1e) são objeto apenas de ilustração neste trabalho. Todavia, eles recebem os dados coletados e pré-processados e passam por diferentes softwares que fazem análises até produzir, ao final, um diagnóstico do cabo com base em todo o histórico de medições e dados coletados pelo hardware.

III. SENSORES UTILIZADOS

Para realizar a medição de cabos isolados sem que haja a interrupção do sistema elétrico, é necessário a utilização de sensores não invasivos, como HFCT (“High Frequency Current Transformer”), sensores de corrente do tipo Rogowski (para o sinal de sincronização), e sensores de corrente de acoplamento magnético de alta frequência em geral, como o FMC (Flexible Magnetic Coupler) da fabricante Techimp. A Figura 2 ilustram alguns destes sensores.



Figura 2 - (a) Sensor HFCT. (b) Sensor Rogowski (c) Sensor FMC.

O sensor HFCT e FMC registram a emissão eletromagnética dos sinais de descargas para que possam ser registrados pelo hardware. Mais especificamente, o HFCT é um transformador de corrente que registra as correntes ‘de fuga’ que passam pela malha de aterramento do condutor. Nesta malha é induzida o pulso de descarga parcial. Todavia, este tipo de TC é construído para registrar sinais de até 100MHz.

Já o FMC ele tem o mesmo princípio de uma antena. Ele é fixado na porção externa do cabo (como se fosse uma manta envolvendo o cabo) e toda emissão eletromagnética ocasionada pela geração do pulso de descarga é registrado por este sensor. Sua vantagem é que sua instalação é bem simples, enquanto o HFCT exige geralmente que o circuito seja desligado para instalação deste.

Por último, o sensor de Rogowski registra a forma de onda fundamental de 60Hz. Isto é importante porque a teoria clássica de descargas parciais estabelece que é importante identificar em qual porção do ciclo de 60Hz aqueles sinais estão sendo registrados. Na Figura 3 ilustra 2 diferentes gráficos de medições de descargas parciais conhecidos como PRPD (“Phase-Resolved Partial Discharge”). O sinal de 60Hz aparece em ambos para referenciar quando os sinais de descargas aparecem. Cada sinal registrado (seja ele um sinal de DP ou um ruído) é representado como um ponto no gráfico. Na Figura 3a, observamos que os sinais são bem distribuídos durante os 360° do sinal ou os seus 16ms. Já no PRPD da Figura 3b, uma certa distorção acontece próximo do ângulo de X°. Esta concentração de sinais nesta região são sinais de descargas parciais. Já os demais pontos são provavelmente sinais de ruídos. Esta distinção só é claramente possível graças a esta associação de ocorrência e está estritamente ligado ao fenômeno física de DPs [9]

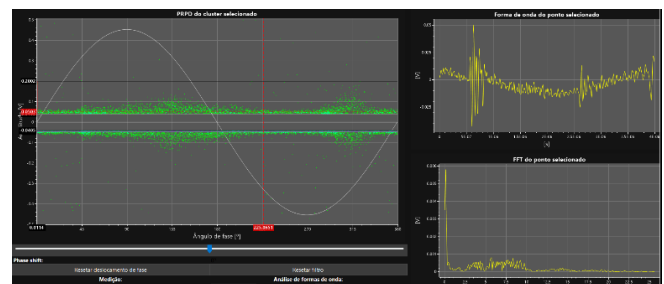


Figura 3 - Gráficos de PRPD gerados pelo sistema proposto e sua associação com a referência de 60Hz registrado pelo sensor de Rogowski (PRPD sem descargas).

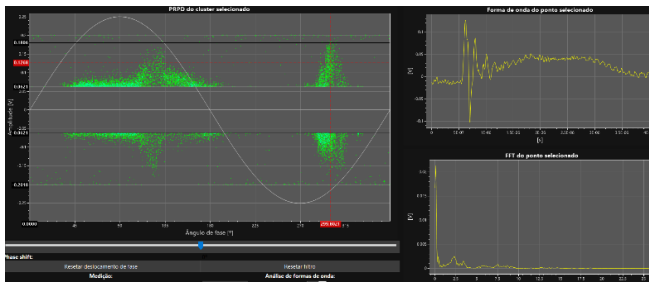


Figura 4 - Gráficos de PRPD gerados pelo sistema proposto e sua associação com a referência de 60Hz registrado pelo sensor de Rogowski. (PRPD com descargas).

IV. CONDICIONAMENTO DE SINAL

O principal elemento de medição de DP, no que tange o hardware, são os circuitos de condicionamento de sinais. Além de delimitar a faixa de frequência do sinal antes que ele seja digitalizado, o circuito de condicionamento também atua para a proteção nos canais de entrada. Na figura da sequência tem-se o diagrama esquemático deste circuito.

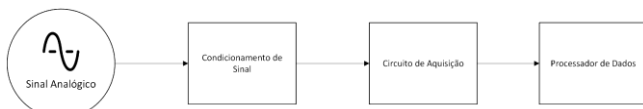


Figura 5 - Arquitetura para captura de sinais de descargas parciais.

O esquemático do circuito de condicionamento é detalhado na Figura 6. Nele, essencialmente, tem-se um conjunto de circuitos de proteção de sobretensões de entrada e um arranjo de resistores para trabalhar com o sinal de maneira diferencial. Um circuito integrado é usado como filtro ativo e amplificador. Um dos canais é ligeiramente alterados para trabalhar com as faixas de frequência do sensor de Rogowski, que tem frequências bem inferiores.

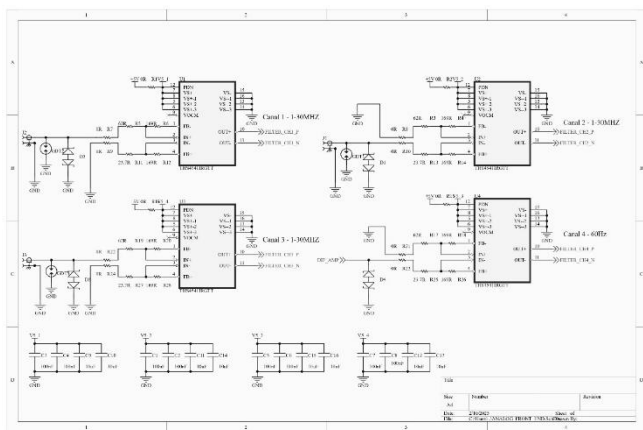


Figura 6: Diagrama esquemático do circuito de condicionamento de sinal.

Após a etapa de condicionamento, o sinal passa pelo circuito de aquisição, onde ele é convertido de analógico para digital. Tal circuito possui largura de banda de até 500 MHz e 10-bit de resolução. Além disso, contém uma memória com capacidade para 2 GS (gigas-ample) ou 2.000.000.000 de amostras, permitindo o armazenamento das formas de onda captadas pelos sensores.

Por fim, tem-se na última etapa, onde os sinais armazenados são lidos e processados. O sistema conta com um

processador de 8 núcleos e 8 threads e 16 GB RAM (Random Access Memory). A interpretação dos dados é realizada através de uma interface em uma tela sensível ao toque de 15 polegadas. A Figura 6 ilustra o protótipo do equipamento aqui construído. Mais detalhes de funcionamento em campo podem ser consultados em [10].



Figura 7 - Fotos reais do sistema construído e seus acessórios (sensores) de medição.

V. PROCESSAMENTO DOS SINAIS ARMAZENADOS

Uma vez que os sinais de ruído e de descargas são registrados, agora eles devem ser processados por um programa de computador embarcado dentro do equipamento para tentar separar os eventuais sinais de descargas dos ruídos. Para isto, uma sequência de algoritmos é aplicada. Esta sequência é mostrada na Figura 7.

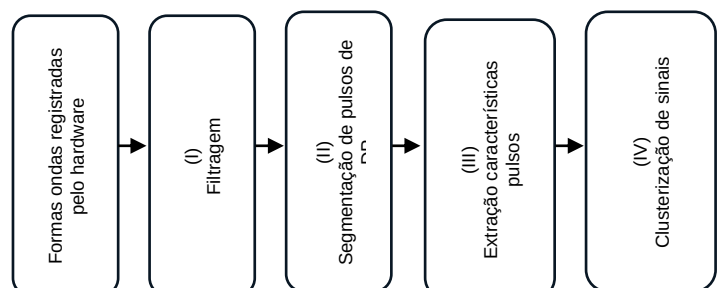


Figura 8: Etapas do software embarcado no sistema de medição para processamento dos sinais coletados.

Cada uma das etapas são descritas resumidamente na sequência:

I - Filtragem: nesta etapa, os sinais devem ser filtrados para diminuir a quantidade de ruídos. A filtragem usada aqui é de wavelets. A filtragem Wavelet transforma um sinal do domínio do tempo para um domínio tempo-escala, expressando-o por meio da combinação de várias versões trasladadas e expandidas/comprimidas de uma única função base $\psi(t)$, chamada de wavelet mãe. Essa família de versões trasladadas e escalonadas da wavelet mãe é mostrada na Equação (1) em que a e b são os parâmetros de escala e de translação da wavelet, respectivamente. A função de base escolhida foi a de Daubechies. Na equação a e b são os parâmetros de escala e de translação da wavelet, respectivamente.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, \quad a \neq 0 \quad (1)$$

II – Segmentação de pulsos de DP: a técnica de segmentação deve analisar cada ciclo e ser capaz de identificar a presença de pulsos de DP e extrair cada um separadamente para posterior análise. Com esse requerimento, a técnica utilizada é baseada no processamento em domínio do tempo e em características como energia e taxa de cruzamento por zero. Utilizando a abordagem de janelamento, define-se a STE (short term energy) e a STAZCR (short time average zero crossing rate) como nas equações (2) e (3). Nelas, E_m mede a energia média do m-ésimo quadro, Z_m representa a STAZCR do m-ésimo quadro e $w[\cdot]$ é a função de janelamento utilizada.

$$E_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x[k]w[m-k])^2 \quad (2)$$

$$Z_m = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N |sgn(x[k]) - sgn(x[k-1])|w[m-k] \quad (3)$$

III – Extração das características dos pulsos de descargas parciais: um grande desafio da análise de DP para avaliação da qualidade de dielétricos está na separação das fontes de DP. Esse processo é necessário para isolar pulsos de DP gerados por outros equipamentos que não o ativo sob teste. Ou para diferenciar os tipos de DP gerados no próprio ativo em teste, uma vez que um mesmo equipamento pode apresentar diferentes defeitos que geram DP. Para isto, cada pulso tem algumas de suas características mensuradas. A primeira delas é a carga aparente que é dada pela Equação (4).

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)dt = \quad (4)$$

Outra característica é a estimativa de energia dos pulsos. Isto pode ser calculado pela Equação (5).

$$E = \frac{\Delta t}{RN} \sum_{k=A}^B |fft(x[n])[k]|^2 \quad (5)$$

Outra característica é a largura de banda média do sinal de DP segmentado. Ele pode ser dado pela Equação (6).

$$T = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (t - t_0)^2 \tilde{x}^2(t)dt} \quad (6)$$

IV – Clusterização dos sinais: uma característica comum entre sinais de diferentes fontes de emissão de DPs é a existência de regiões com densidades muito diferentes no espaço de clusterização. Isso se deve ao fato de fontes diferentes de DP e de ruído possuírem taxas de ocorrência

muito diferentes. Assim, o uso de algoritmos de clusterização, como o k-means, pode ser usado para separar sinais de ruídos e fontes diferentes. O algoritmo aqui proposto foi modificado e por isto foi chamado de k-means++ e é mostrado na sequência.

ALGORITMO 4: INICIALIZAÇÃO DE PROTÓTIPOS K-MEANS++ MODIFICADO

Entrada: conjunto de dados e quantidade de protótipos
Saída: especificação dos protótipos e de matriz de partição inicial U

- 1 $n \leftarrow$ quantidade de protótipos
- 2 $X \leftarrow$ conjunto de dados
- 3 $c1 \leftarrow$ escolher aleatoriamente um protótipo inicial a partir de X com função densidade de probabilidade uniforme
- 4 $D \leftarrow$ para cada ponto x em X , calcular a distância de Mahalanobis ao protótipo inicial utilizando como matriz de covariância $F_i = \frac{\sum_k w_k (x_k - \zeta_i)(x_k - \zeta_i)^T}{\sum_k w_k}$, em que w_k é um peso proporcional à estimativa de densidade local de cada ponto.
- 5 **while** ($i \leq n$) **do**
- 6 $c1 \leftarrow$ escolher aleatoriamente o próximo protótipo a partir de X , selecionando um ponto x' com probabilidade $\frac{D(x')^2}{\sum_k D(x_k)^2}$
- 7 $D \leftarrow$ para cada ponto x em X , calcular a distância de Mahalanobis ao protótipo mais próximo utilizando como matriz de covariância $F_i = \frac{\sum_k w_k (x_k - \zeta_i)(x_k - \zeta_i)^T}{\sum_k w_k}$, em que w_k é um peso proporcional à estimativa de densidade local de cada ponto.
- 8 **end**
- 9 $U \leftarrow \mu_{ik} = \frac{D_{ik}^{-2}}{\sum_{j=1}^n D_{jk}^{-2}}$ em que $D_{ik}^{-2} = \frac{P_i}{\sqrt{\det(F_i)}} \exp(-0.5(x_k - \zeta_i)F_i^{-1}(x_k - \zeta_i)^T)$, $F_i = \frac{\sum_k w_k^i (x_k - \zeta_i)(x_k - \zeta_i)^T}{\sum_k w_k^i}$, $P_i = \frac{S_i}{\sum_{k=1}^N S_i}$ e $S_i = \sum_{k=1}^N \exp(-0.5(x_k - \zeta_i)F_i^{-1}(x_k - \zeta_i)^T)$, em que w_k^i é um peso proporcional ao inverso da estimativa de densidade local de cada ponto.

VI. TESTES PARA VALIDAÇÃO

Para demonstração da validação do sistema, foram realizados dois testes completos que são descritos logo na sequência. Cada um deles com seus objetivos específicos de demonstração de funcionalidade.

Experimento 1 – validação em laboratório e com sistema padrão-ouro: este teste realizou-se em um ambiente laboratorial controlado (ver Figura 8a) para demonstrar que o sistema é capaz de medir com precisão descargas e usando fonte de alimentação de até 75kV livres de descargas, para não contaminar a medição. Além da fonte, foi também usado um segundo equipamento de medição de descargas parciais tido como padrão-ouro (Aquila, Techimp) (ver figura 8b, para estabelecer uma comparação entre os 2 equipamentos: o aqui construído e o tido como referência. Para isto, foi selecionado um cabo EPR de 35mm² classe de tensão 8/15KV. Para provar descargas, a camada semicondutora dele foi removida de maneira controlado em um retângulo como mostrado na Figura 7c, para gerar intencionalmente descargas parciais. Este cabo foi submetido a até 17kV de nível de tensão, com degraus de até 2kV. Foram usados sensores HFCT da fabricante Techimp (ver Figura 7d) e um sensor do tipo Rogowski na fase de distribuição, para a aferição do sinal analógico de referência de 60 Hz.



Figura 8 - Imagem do setup de medição.

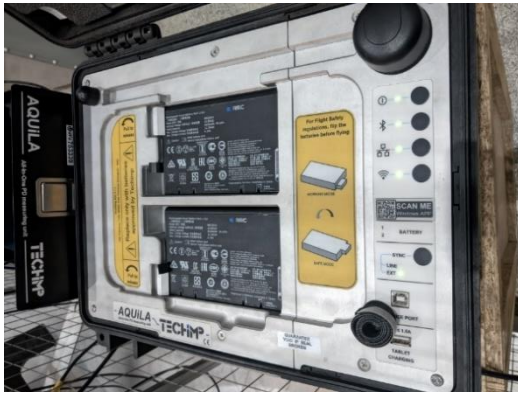


Figura 9 - Imagem Aquila Techimp.



Figura 10 - Avaria do cabo EPR provocada.



Figura 11 - Imagem dos HFCTs em uso.

Experimento 2 – validação em campo: este teste, de característica mais qualitativa, visa demonstrar a aplicação do sistema proposto em campo, em ambiente ruidoso e sem controle. Para isto, o equipamento foi levado até uma subestação de distribuição de 1MVA onde foi instalado no circuito de entrada da subestação, sem nenhuma necessidade de energização. A Figura 8a mostra o HFCT sendo ligado a um cabo para medir as descargas geradas na malha de aterramento. Mais informações sobre o setup de medição do PD.Analyzer em campo podem ser consultadas em [10].



Figura 12 – Instalação do HFCT na malha de aterramento do cabo medido.



Figura 13 – Instalação do sensor de Rogowski no cabo medido.

VII. RESULTADOS E DISCUSSÕES DOS TESTES

Para fins de objetividade, os resultados foram ilustrados de maneira gráfica na Figura 9.

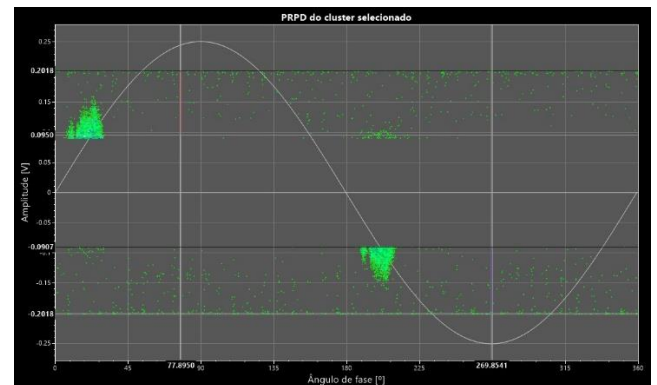


Figura 14 – Resultado gráfico do experimento I (PRPD produzido pelo protótipo de medição desta pesquisa).

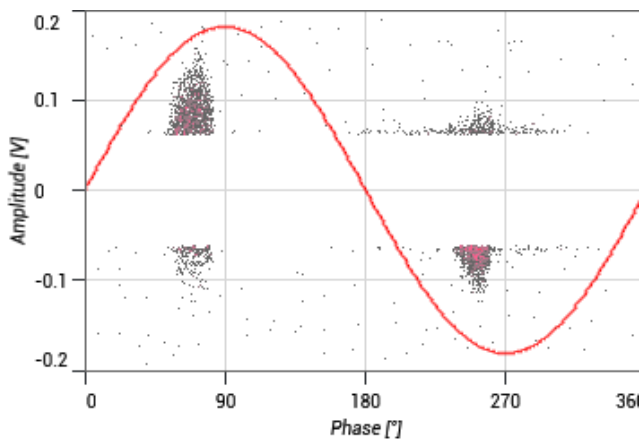


Figura 15 – Resultado gráfico do experimento I (PRPD produzido pelo sistema padrão-ouro adotado nesta pesquisa).

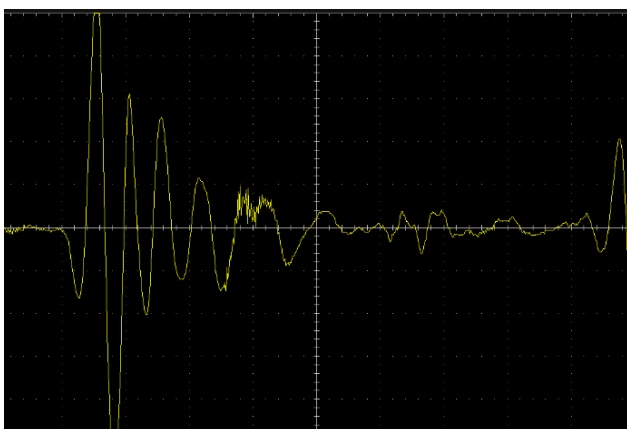


Figura 16 – Exemplos de formas de onda de eventuais DP registradas no sistema proposto.

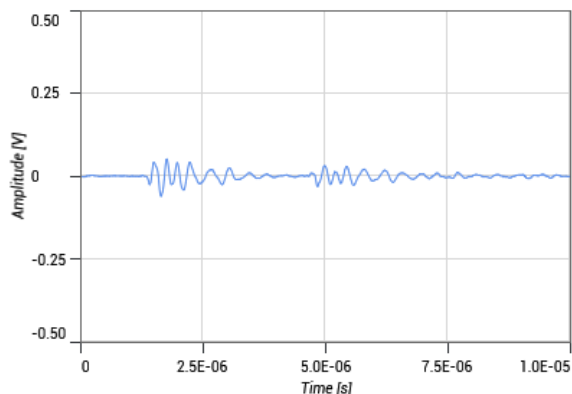


Figura 17 – Exemplos de formas de onda de eventuais DP registradas no sistema padrão ouro.

Nos resultados gráficos, pode-se observar que ambos os sistemas geraram resultados muito parecidos, demonstrando que ambos são capazes de registrar este tipo de descarga (chamado de superfície). Apesar da similaridade entre os PRPDs, observa-se que a fase dos mesmos apresentou uma ligeira diferença no seu ângulo. Isto é porque cada sistema tem seu próprio hardware que tem seu próprio atraso ou avanço de fase que é característico. Uma calibração prévia tem capacidade de fazer este ajuste para que as diferenças medidas sejam decrementadas.

Em ambos os experimentos, não foi feita uma comparação entre as magnitudes numéricas registrados pelos sistemas pois cada um tem sua forma própria de quantificação

de tais grandezas. Por isto uma comparação direta entre elas é equivocada. Uma outra comparação entre o desempenho de medições entre o sistema aqui produzido e o usado como padrão-ouro nesta pesquisa pode também ser visto detalhadamente em [11].

Na Figura 10 tem-se o resultado gráfico das medições do experimento II, aplicado em uma subestação. Nela, também foi levado o sistema padrão-ouro para comparar as medições. Foi usado em ambos os casos os mesmos sensores. Observa-se que nas medições de campo a quantidade de ruídos é muito maior e mais bem espalhada. Mesmo assim, pode-se ver claramente a concentração de descargas parciais por volta do ângulo de 45° e 225° em ambos os sistemas, apesar novamente de existir mais uma diferença de fase entre eles.

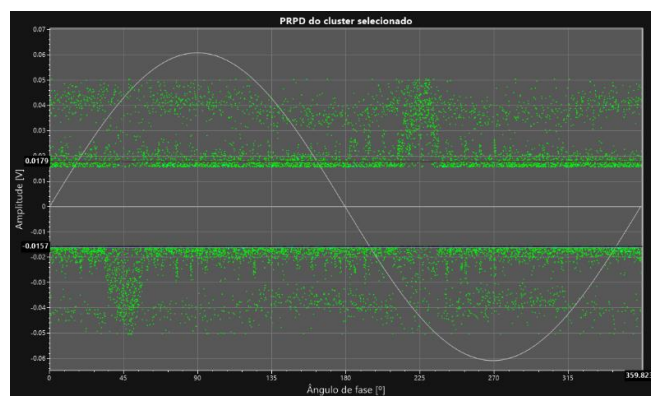


Figura 18 – Resultado gráfico do experimento II (PRPD produzido pelo protótipo de medição desta pesquisa).

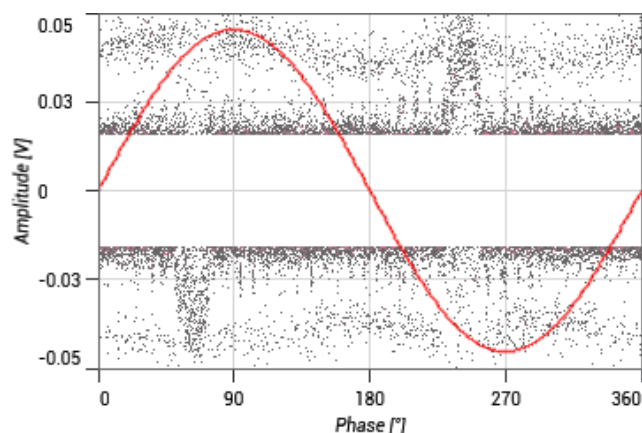


Figura 19 – Resultado gráfico do experimento II (Gráfico de PRPD produzido pelo sistema padrão-ouro adotado nesta pesquisa).

VIII. CONCLUSÃO

Os resultados apontados pelos experimentos aqui conduzidos mostram que o desenvolvimento da tecnologia proposta tem potencial para medição de descargas parciais em campos, especialmente em ambientes contaminados por ruídos. Uma vantagem do sistema proposto é seu custo, que é mais de quatro vezes mais barato do que os tradicionais fornecedores mundiais. Ainda, a aquisição e plotagem do sinal de referência de 60Hz é fundamental para identificar se os fenômenos registrados no gráfico de PRPD são de fatos descargas parciais. A simples análise da forma de onda do sinal nem sempre pode ser usada para identificação e

classificação da mesma. A localização onde ela acontece é tão importante quanto sua forma de onda.

REFERÊNCIAS

- [1] S. S. Refaat, M. A. Shams, "A review of partial discharge detection diagnosis techniques in high voltage powercables", 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018).
- [2] R. Bartnikas, "Partial discharges. Their mechanism, detection and measurement," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 763-808, Oct. 2002, doi: 10.1109/TDEI.2002.1038663.
- [3] AUSTERLITZ, Howard. "Data Acquisition Techniques Using PCs (Second Edition)", 2003, p. 51-77. ISBN 9780120683772, <https://doi.org/10.1016/B978-012068377-2/50004-8>.
- [4] G. V. R. Xavier, E. G. da Costa, A. J. R. Serres, L. A. M. M. Nobrega, A. C. Oliveira and H. F. S. Sousa, "Design and Application of a Circular Printed Monopole Antenna in Partial Discharge Detection," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 10, pp. 3718-3725, 15 May15, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2896580.
- [5] P. C. Baker, M. D. Judd and S. D. J. Mcarthur, "A frequency-based RF partial discharge detector for low-power wireless sensing," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 1, pp. 133-140, February 2010, doi: 10.1109/TDEI.2010.5412011
- [6] J. Liu, G. Zhang, J. Dong, J. Wang, "Study on miniaturized UHF antennas for partial discharge detection in high-voltage electrical equipment," *Sensors*, vol. 15, pp. 2943–2945, 2015. N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics: converters, applications, and design*, John Wiley & Sons, 2a Edição, Nova Iorque, 1995
- [7] Besharatifard, H.; Hasanzadeh, S.; Heydarian-Forushani, E.; Alhelou, H.H.; Siano, P. Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors. *Appl. Sci.* 2022, 12, 3010. <https://doi.org/10.3390/app12063010>
- [8] IV Sagunova, AA Stroganov, V. Losev, SI Gudkov e AVSolnyshkin, "Registro Acústico de Descarga Parcial no Isolamento de Equipamentos de Alta Tensão Usando Polímeros Piezoelétricos", Conferência IEEE 2020 de Jovens Pesquisadores Russos em Engenharia Elétrica e Eletrônica (EIconRus), São Petersburgo e Moscou, 5 Rússia, 2020, pp. 2174-2177, doi: 10.1109/EIconRus49466.2020.9038942
- [9] Greg C. Stone, Andrea Cavallini e Glenn Behrmann. 'Practical Partial Discharge Measurement on Electrical Equipment'. IEEE Press Series on Power and Energy Systems, 1ª ed, 2023.
- [10] Vídeo ilustrativo de operação do PD.Analyzer em subestação. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=eFaeY8IEWJo> Acessado em: 10/2/25 às 18:43hrs.
- [11] Vídeo comparativo entre o PD.Analyzer e um sistema padrão-ouro. Disponível em: <https://youtu.be/gNjLlbjsGs> Acessado em: 10/2/25 às 19:14hr