



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL CAM-
PUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS VINÍCIUS CAVALCANTE QUEIROZ

**ANÁLISE DE PADRÕES PRPD UTILIZANDO TRANSFORMADORES DE CORREN-
TE DE ALTA FREQUÊNCIA**

**RIO LARGO - AL
2026**

MARCOS VINÍCIUS CAVALCANTE QUEIROZ

ANÁLISE DE PADRÕES PRPD UTILIZANDO TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA FREQUÊNCIA

Artigo Científico apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção da nota final do Trabalho de Conclusão de Curso (TCC).

Orientadora: Prof. MSc. Allan David da Costa Silva.

**RIO LARGO – AL
2026**

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARCOS VINÍCIUS CAVALCANTE QUEIROZ

Análise de Padrões PRPD Utilizando Transformadores de Corrente de Alta Frequência

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado em 12/06/2026

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **ALLAN DAVID DA COSTA SILVA**
Data: 12/06/2026 16:51:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc. Allan David da Costa Silva
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 **LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA**
Data: 16/06/2026 09:27:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza
Universidade Federal de Alagoas

Documento assinado digitalmente
 **FELIPE CAIO NUNES DE OLIVEIRA LIMA**
Data: 13/06/2026 07:37:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Felipe Caio Nunes de Oliveira Lima
Universidade Federal de Alagoas

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 – 1512

Q3a Queiroz, Marcos Vinícius Cavalcante.

Análise de padrões PRPD utilizando transformadores de corrente de alta frequência. / Marcos Vinícius Cavalcante Queiroz. – 2026.

21 f.: il.

Orientador: Allan David da Costa Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Graduação em Engenharia Elétrica, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2026.

Inclui bibliografia

1. Descargas Parciais. 2. Transformadores de Corrente de Alta Frequência. 3. Manutenção preditiva. I. Título.

CDU: 621.3

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, Rosa Cristina e Israel, por investirem na minha educação e acreditarem no seu poder transformador. Aos meus irmãos, Maiara Ingrid e Manoel José, por serem meus exemplos acadêmicos e por todo o apoio recebido.

Ao meu orientador, professor Allan David, pelo conhecimento compartilhado e pelo tempo dedicado, fundamentais para a concepção deste estudo.

Ao professor Luiz Augusto, pelo fornecimento dos dados experimentais que possibilitaram a execução deste trabalho.

Por fim, agradeço aos meus amigos da graduação, Anielly, Pedro Thomas e Washington, pelo companheirismo e apoio ao longo de toda essa jornada.

ANÁLISE DE PADRÕES PRPD UTILIZANDO TRANSFORMADORES DE CORRENTE DE ALTA FREQUÊNCIA

PRPD PATTERN ANALYSIS USING HIGH-FREQUENCY CURRENT TRANSFORMERS

Marcos Vinícius Cavalcante Queiroz*

Allan David da Costa Silva**

RESUMO

A utilização de High-Frequency Current Transformers (HFCT) tem se destacado como uma alternativa menos invasiva para medições de descargas parciais em equipamentos de alta tensão. Neste trabalho, avaliou-se a viabilidade dessa técnica em aplicações de manutenção preditiva por meio da análise de diagramas Phase-Resolved Partial Discharge (PRPD). Para isso, foram processados sinais experimentais provenientes de diferentes arranjos de ensaio utilizando técnicas de Processamento Digital de Sinais, incluindo pré-filtragem passa-altas e filtragem baseada na Transformada Wavelet, com Signal-to-Noise Ratio (SNR) calculado variando entre 9,14 dB e 15,83 dB. Após o processamento, os parâmetros de amplitude e fase foram utilizados na construção dos diagramas PRPD em linguagem Python. Os padrões obtidos com HFCT foram comparados aos resultados do método elétrico convencional normatizado pela IEC 60270, apresentando comportamento coerente com a literatura especializada para identificação de diferentes tipos de falha. Os resultados demonstram o potencial dos sensores HFCT como ferramenta de monitoramento e diagnóstico não invasivo de descargas parciais em sistemas de alta tensão.

Palavras-chave: Descargas Parciais; Transformadores de Corrente de Alta Frequência; manutenção preditiva.

ABSTRACT

The use of High-Frequency Current Transformers (HFCT) has emerged as a less invasive alternative for partial discharge measurements in high-voltage equipment. In this work, the feasibility of this technique in predictive maintenance applications was evaluated through the analysis of Phase-Resolved Partial Discharge (PRPD) diagrams. For this purpose, experimental signals from different test setups were processed using Digital Signal Processing techniques, including high-pass pre-filtering and Wavelet Transform-based filtering, with the calculated Signal-to-Noise Ratio (SNR) ranging from 9.14 dB to 15.83 dB. After processing, amplitude and phase parameters were used to construct PRPD diagrams in Python. The patterns obtained with HFCT were compared to the results of the conventional electrical method standardized by IEC 60270, showing consistent behavior with the specialized literature for identifying different types of faults. The results demonstrate the potential of HFCT sensors as a non-invasive monitoring and diagnostic tool for partial discharges in high-voltage systems.

Keywords: Partial Discharges; High Frequency Current Transformers; Predictive Maintenance.

*Aluno da Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Engenharia Elétrica - marcos.queiroz@ceca.ufal.br

**Prof. MSc. da Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Engenharia Elétrica - allan.silva@ceca.ufal.br

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica está diretamente ligada ao desenvolvimento econômico e social de um país. Segundo a EPE (2026), o consumo de energia elétrica no Brasil totalizou 567 TWh no ano de 2025, o que representa um crescimento de 0,9% em relação a 2024. Esse elevado consumo impõe a necessidade de elevados níveis de confiabilidade associados aos equipamentos envolvidos nos processos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, de forma a garantir a disponibilidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP).

Nesse cenário, torna-se necessária a adoção de estratégias de manutenção capazes de reduzir interrupções não programadas no SEP, especialmente aquelas associadas à degradação dos sistemas de isolamento em equipamentos de alta tensão, cujas falhas, podem evoluir para eventos catastróficos, podendo ocasionar a indisponibilidade de ativos estratégicos, como transformadores de potência (CIGRÉ, 2024) ou transformadores de instrumento como o exemplo mostrado na Figura 1. Diante disso, a detecção de descargas parciais (DP) tem se destacado como uma importante ferramenta de manutenção preditiva, permitindo a identificação precoce de problemas no sistema de isolamento.

Figura 1 – Transformador de instrumento explodido após a atividade de DP.



Fonte: Acervo do orientador (2026).

As DP consistem em descargas elétricas localizadas que promovem uma ruptura parcial do meio isolante entre condutores. Esse fenômeno geralmente se manifesta na forma de pulsos de corrente elétrica com duração inferior a 1 μ s (IEC 60270, 2025) e intensidade da ordem de picocolomb (pC). Apesar da baixa intensidade, essas descargas atuam como mecanismos de degradação dos materiais isolantes, podendo ocasionar a ruptura do dielétrico.

Frente a isso, diversos métodos para a medição de DP vêm sendo desenvolvidos. Além do método clássico definido pela norma IEC 60270 (IEC 60270, 2025), destacam-se alguns métodos alternativos: o acústico (QUIEN *et al.*, 2018), que detecta as ondas ultrassônicas geradas pela dissipação de energia mecânica da DP; o eletromagnético, frequentemente associado à medição de sinais na faixa de Ultra-Alta Frequência (UHF) (SILVA *et al.*, 2021), o método óptico (LI *et al.*, 2024), que registra as emissões luminosas e radiação ultravioleta; e os métodos químicos, a exemplo da Análise de Gases Dissolvidos (AGD), amplamente utilizada na avaliação de óleos isolantes (MACEDO, 2014; SANTOS JUNIOR, 2025).

Outro método alternativo já consolidado é a utilização de Transformadores de Corrente de Alta Frequência (HFCT, do inglês *High Frequency Current Transformer*). Essa técnica se configura como uma alternativa minimamente invasiva, visto que o sensor é acoplado à malha de aterramento do ativo, possibilitando a realização de medições sem a necessidade de retirar o equipamento de operação. Dessa forma, dispensa-se a instalação de um capacitor de acoplamento de alta tensão em paralelo com o objeto sob ensaio, exigência

técnica inerente ao método tradicional estabelecido pela IEC 60270.

A interpretação dos sinais de DP emitidos pelos sistemas de isolamento de alta tensão pode ser realizada por meio de gráficos de Descarga Parcial Resolvidos em Fase (PRPD, do inglês *Phase Resolved Partial Discharge*), importante mecanismo auxiliar de monitoramento. A análise desse gráfico permite identificar defeitos antes que evoluam para falhas catastróficas (NATTRASS, 1988).

Entretanto, tendo em vistas as características dos sinais de DP: baixa amplitude, curta duração e elevada sensibilidade a interferências externas, as medições realizadas em ambientes reais estão frequentemente sujeitas à presença de ruídos e interferências eletromagnéticas, dificultando a correta identificação e interpretação dos padrões PRPD. Dessa forma, torna-se necessária a aplicação de técnicas de Processamento Digital de Sinais (PDS), visando à redução de interferências e à melhoria da qualidade dos padrões PRPD obtidos.

Isso posto, este trabalho tem como objetivo gerar e interpretar padrões PRPD utilizando sinais de Descarga Parcial obtidos por HFCT e, como objetivos específicos: (i) aplicar técnicas de PDS em sinais de DP medidos com HFCT; (ii) gerar e interpretar padrões PRPD associados a diferentes defeitos em objetos de teste e, (iii) comparar os padrões PRPD gerados por medições com HFCT com medições realizadas conforme a norma IEC 60270.

O trabalho foi estruturado em cinco seções. Na segunda seção é apresentada a fundamentação teórica, contemplando os principais conceitos e referenciais que sustentam o desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, são descritos os materiais utilizados e os procedimentos adotados para a elaboração dos gráficos PRPD. Posteriormente, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, com ênfase nas etapas de filtragem e na interpretação dos gráficos gerados a partir da metodologia proposta. Por fim, são reunidas as principais contribuições do estudo, bem como sugestões e perspectivas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção foi estruturada da seguinte forma: inicialmente, abordam-se os princípios físicos do fenômeno, seguidos pelos principais métodos de detecção. Posteriormente, exploram-se a interpretação de padrões via gráficos PRPD, desde o processamento, técnicas de filtragem e plotagem de dados.

2.1 O Fenômeno das Descargas Parciais

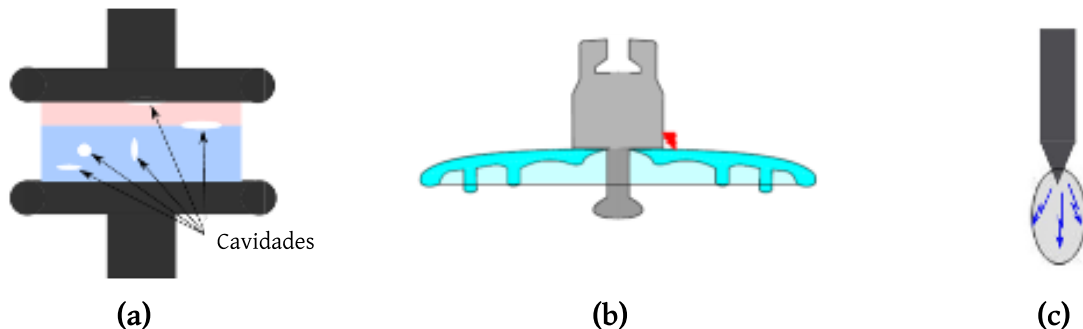
As DP são fenômenos elétricos localizados que se manifestam em cavidades presentes em sistemas de isolamento submetidas a elevados campos elétricos. A origem dessas descargas é frequentemente associada a imperfeições no processo de fabricação dos equipamentos, como a oclusão de bolhas de gás durante a extrusão de cabos de polietileno ou a aplicação deficiente de vácuo em transformadores com isolamento sólido-líquido.

Devido à menor permissividade, essas inclusões gasosas ficam submetidas a um estresse elétrico superior ao do meio isolante adjacente. Para que a DP ocorra nessas cavidades, é necessária a presença simultânea de duas condições: um campo elétrico intenso e disponibilidade de elétrons livres. A tensão inicial necessária para iniciar esse processo, denominada tensão de ignição, é descrita pela Lei de Paschen, sendo função direta do produto entre a pressão interna do gás e a distância da cavidade.

Elas podem se manifestar de diferentes formas, dependendo da geometria do sistema isolante e da natureza do defeito, sendo classificadas em descargas internas, associadas a cavidades no interior do dielétrico e consideradas mais críticas para o isolamento; descargas superficiais, que ocorrem na superfície do dielétrico; e efeito corona, normalmente relacionado a regiões externas submetidas a campos elétricos pouco uniformes, como pontas e cone-

xões. Os três tipos de ocorrências podem ser visualizados na Figura 2.

Figura 2 – (a) Dielétrico com cavidades que podem gerar DP internas. (b) modelo de descarga parcial superficial em isolador de vidro. (c) Modelo de descarga corona em Ponta.



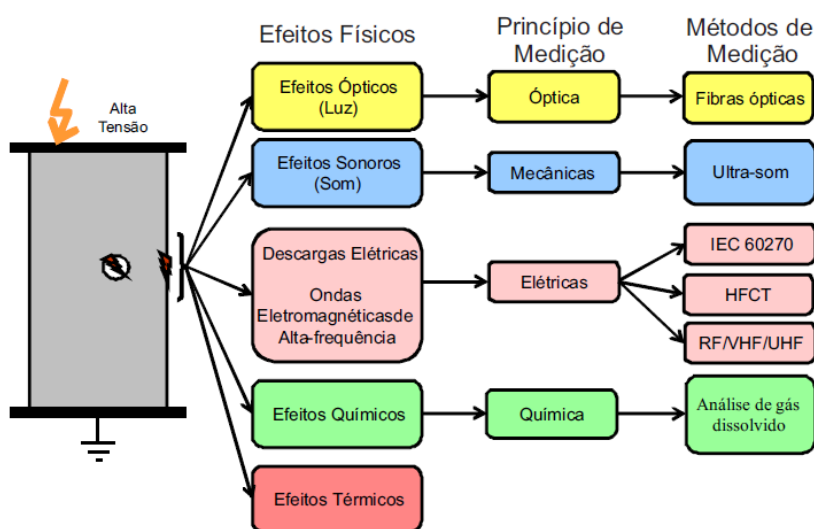
Fonte: Adaptado de Macêdo (2014).

Apesar da baixa intensidade, as DP podem promover a degradação progressiva dos materiais dielétricos, reduzindo a vida útil dos equipamentos de alta tensão. Para mitigar esses efeitos, desenvolveram-se técnicas de medição específicas. Entretanto, a detecção de DP depende de sistemas com elevada sensibilidade, uma vez que elas apresentam cargas na ordem de pC e tensões na faixa de microvolts (SANTOS JÚNIOR, 2025; BARTNIKAS, 1979).

2.2 Métodos de Medição de Descargas Parciais

Diferentes métodos podem ser utilizados para detectar DP, uma vez que produzem: luz, ruído audível, calor localizado e ondas eletromagnéticas em um espectro amplo (SILVA *et al.*, 2025). Cada um desses fenômenos requer um sensor específico. Os sinais acústicos, por exemplo, sensores de ultrassom; a formação de gases em óleo pela AGD. Já sinais elétricos podem ser medidos por meio de HFCT, antenas (RF/VHF/UHF) ou, pelo método elétrico por contato, conforme o diagrama mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Métodos de Detecção de DP.



Fonte: Macedo (2014).

O método elétrico por contato, descrito na IEC 60270, é um método normatizado, confiável e amplamente utilizado. Ele requer um capacitor de acoplamento (C_a) conectado em

paralelo com objeto sob teste, representado pela capacitância C_p , em série com uma impedância externa Z_m .

A medição é expressa em termos da carga aparente, em pC, definida como a carga que, se injetada instantaneamente entre os terminais do objeto sob teste, produz uma resposta similar à causada pelo pulso real de DP. A carga aparente (q) é dada pela Equação (1) (COSTA; NEVES, 1996):

$$q = (C_p + C_a)\Delta U. \quad (1)$$

Onde ΔU é a queda de tensão em decorrência da DP. A carga liberada pelo capacitor de acoplamento (q_m), medida na impedância, pode ser calculada pela Equação (2):

$$q_m = C_a \cdot \Delta U, \quad (2)$$

logo a relação entre a carga medida e a carga real gerada pela DP é dada por:

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_a}{C_a + C_p}. \quad (3)$$

O capacitor de acoplamento exigido pelo método da IEC 60270 impõe limitações à sua aplicação em campo. Conforme destacado por Nobrega (2016), o procedimento se torna complexo e potencialmente perigoso devido às elevadas tensões presentes no SEP e às restrições físicas das subestações.

Frente a isso, uma solução bem consolidada e de caráter não invasivo é a medição com HFCT. Esse sensor, frequentemente projetado com núcleo bipartido (tipo garra), permite o acoplamento ao cabo de aterramento do equipamento sob teste.

Seu princípio de funcionamento baseia-se na detecção dos pulsos de corrente de alta frequência provenientes das DP que fluem em direção à terra. Uma característica desse sensor é a proteção oferecida aos instrumentos de medição, pois em caso de falha severa no equipamento ensaiado, o núcleo do HFCT tende a saturar, impedindo que os sistemas de aquisição, tipicamente osciloscópios rápidos, sejam submetidos a sobretensões (NOBREGA, 2016).

Entretanto, a identificação de DP provenientes dessas medições requer a aplicação de técnicas de PDS, uma vez que os pulsos se encontram associados a ruídos e interferências eletromagnéticas. Assim, métodos de filtragem digital são empregados para aumentar a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) e possibilitar a extração dos pulsos de descarga parcial.

2.3 Gráficos PRPD

O gráfico PRPD consiste em uma técnica de monitoramento que utiliza duas informações no tempo: a magnitude do pulso e o ângulo de fase no instante de sua ocorrência. Essa sincronização com a rede constitui o princípio central do método, pois permite correlacionar o instante de ocorrência da DP com o comportamento e a polaridade do campo elétrico aplicado ao equipamento.

Para a geração do PRPD, os dados coletados ao longo do tempo são plotados em um gráfico bidimensional. O eixo horizontal representa o ângulo de fase da tensão de referência, enquanto o eixo vertical indica a intensidade da DP, geralmente expressa em pC ou milivolts. O acúmulo desses eventos ao longo de um período de observação gera um padrão característico do defeito (MACEDO, 2014; NATRASS, 1988), permitindo a identificação e classificação dos diferentes mecanismos de descarga presentes no sistema isolante.

2.4 Técnicas de Filtragem Digital

Na etapa de PDS, o algoritmo do filtro passa-altas elíptico é útil para remover componentes de baixa frequência presentes no sinal, como a componente fundamental da rede elétrica e outros ruídos típico do ambiente de alta tensão. Esse filtro permite a passagem dos pulsos de alta frequência característicos das DP. O filtro elíptico é um filtro digital que distribui uniformemente o erro entre sua banda de passagem e de rejeição. A equação da magnitude da resposta em frequência para o filtro passa-altas elíptico é dada por (ANTONIOU, 2018):

$$|H_{hp}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \epsilon^2 U_N^2 \left(\frac{\Omega_p}{\Omega} \right)}. \quad (4)$$

Onde Ω representa a frequência no domínio contínuo, Ω_p a frequência de corte na banda de passagem, ϵ é o parâmetro que determina o tamanho do *ripple* e $U_N(x)$ é a função racional elíptica de Jacobi de ordem N . Para as altas frequências Ω tende ao infinito e o denominador aproxima-se de 1, o sinal irá passar sem atenuação. O inverso ocorre nas baixas frequências, onde Ω tende a 0 e o denominador inclina-se ao infinito, bloqueando a passagem do sinal.

O filtro elíptico tem transição mais abrupta em comparação com os filtros digitais Butterworth e Chebyshev, necessitando de uma ordem (N) inferior e economizando poder de processamento em aplicações computacionais (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012).

2.5 Filtragem baseada na Transformada Wavelet

A Transformada Wavelet consiste em uma alternativa à Transformada de Fourier para o processamento de sinais não estacionários, típicos de descargas parciais. Diferentemente da Transformada de Fourier, que fornece apenas informações no domínio da frequência, a Transformada Wavelet permite a análise simultânea no tempo e na frequência (DAUBECHIES, 1992).

A Transformada Wavelet pode ser aplicada a sinais contínuos ou discretos. A Transformada de Wavelet Contínua (TWC) de uma função $f(x)$ é dada pelas Equações (5) – (6):

$$W_\psi(s, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi_{s,\tau}(x) dx, \quad (5)$$

onde

$$\psi_{s,\tau}(x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{x - \tau}{s}\right). \quad (6)$$

Da função wavelet ($\psi(x)$) derivam diversas funções wavelet mãe ($\psi_{s,\tau}(x)$), obtidas pelo pela variação dos coeficientes de escala (s) e deslocamento (τ). Já a Transformada Wavelet Discreta (TWD) surge como uma extensão da TWC para sinais não contínuos no tempo. A TWD pode ser explicitada pela Equação (7) (WEEKS, 2010):

$$W_\psi(j, k) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_n f(n) \tilde{\psi}_{j,k}(n), \quad (7)$$

em que $\tilde{\psi}_{j,k}(n)$ é a wavelet biortogonal a $\psi_{j,k}(n)$.

Tanto a TWC quanto a TWD possuem transformada inversa e, para garantir uma filtragem eficiente, é fundamental selecionar uma wavelet adequada às características do sinal

analisado. Existem diversas wavelets-mãe, dentre as quais destacam-se Db, Coif, MH, Gabor e Symlets.

Em resumo, o método baseia-se na decomposição de um sinal, f , em componentes de aproximação (A) e detalhamento (D). As aproximações representam as componentes de baixa frequência do sinal, enquanto os detalhes correspondem às componentes de alta frequência, associadas a ruídos, variações rápidas e eventos transitórios. Matematicamente, o sinal pode ser expresso como a soma de sua aproximação e detalhe, conforme a Equação (8):

$$f = A_1 + D_1 \quad (8)$$

A TWD funciona como um algoritmo que, a cada iteração, a resolução temporal do sinal de aproximação torna-se mais grosseira, enquanto os coeficientes de detalhe capturam variações do sinal em escalas progressivamente maiores. Do ponto de vista prático, emprega-se um filtro passa-baixa para obtenção das aproximações e, em paralelo, um filtro passa-alta associado à função wavelet para isolar os detalhes. Após cada etapa de filtragem, aplica-se uma operação de decimação, descartando-se metade das amostras. Essa etapa é fundamental para garantir elevada eficiência computacional ao algoritmo, apresentando desempenho comparável ao da FFT (WEEKS, 2010).

Após a decomposição wavelet, os coeficientes obtidos podem ser processados por técnicas de limiarização, amplamente empregadas na mitigação de ruído. Nesse método, coeficientes de baixa magnitude, geralmente associados ao ruído, são atenuados ou eliminados a partir de um limiar preestabelecido T , enquanto coeficientes de maior energia, associados ao sinal de interesse, são preservados. Em seguida, o sinal é reconstruído por meio da transformada inversa. A literatura destaca duas abordagens clássicas de limiarização: a dura (*Hard Thresholding*) e a suave (*Soft Thresholding*) (WALKER, 1999).

No contexto de DP, essa técnica mostra-se particularmente eficiente, pois os pulsos normalmente apresentam maior energia e caráter transitório, enquanto grande parte do ruído ambiente encontra-se distribuída em componentes de baixa energia.

3. METODOLOGIA

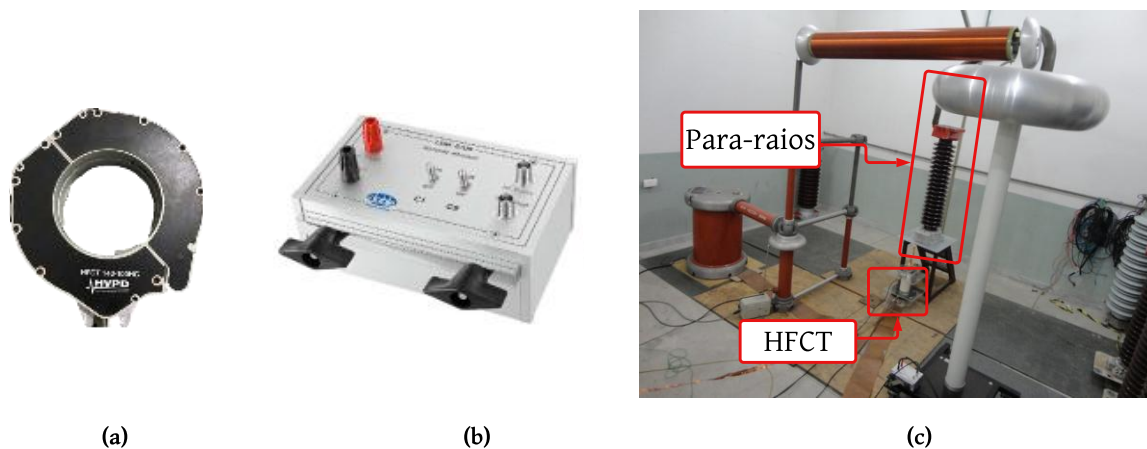
Esta seção detalha a metodologia adotada neste trabalho, a qual foi estruturada em duas subseções: Visão Geral e Processamento Digital.

3.1 Visão Geral

Este trabalho utilizou uma base de dados consolidada disponibilizada pelo professor Luiz Augusto do laboratório de alta tensão da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O arranjo experimental foi composto pelo HFCT e pelo método elétrico normatizado pela IEC 60270, empregado para garantir a confiabilidade dos pulsos medidos, sendo constituído por um capacitor de acoplamento de 1000 pF, um indutor de 15 mH para bloqueio de ruídos de alta frequência e o impededor de medição LDM-5, da fabricante Doble Lemke.

Para a calibração do sistema, seguindo as recomendações da IEC 60270, utilizou-se um calibrador capaz de fornecer cargas de 5, 20, 100 e 500 pC, com tempo de subida inferior a 60 ns e operação baseada em um trem de pulsos com frequência de 650 Hz. Adicionalmente, foi empregado o HFCT modelo 140-100HC, que apresenta resposta em frequência na faixa de 100 kHz a 12 MHz e sensibilidade de 3,2 mV/mA, mostrado na Figura 4, bem como o arranjo experimental concretizado com o indicativo dos equipamentos. Os sinais adquiridos foram visualizados e armazenados por meio de um osciloscópio digital com 4 canais, largura de banda de 1 GHz e 5 GS/s de taxa de amostragem.

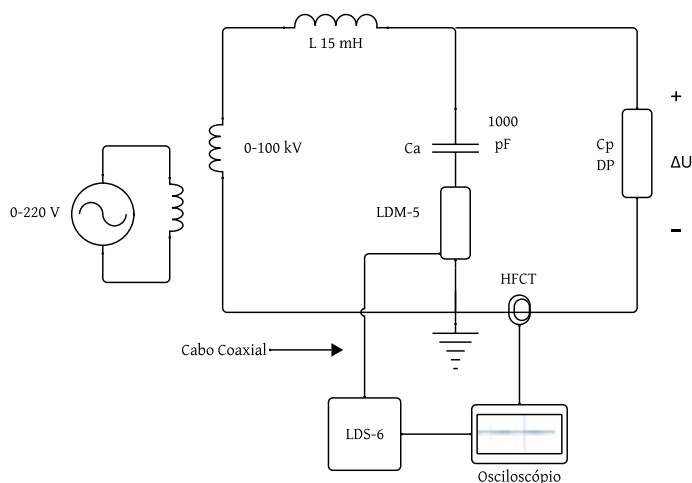
Figura 4 – Componentes do Arranjo Experimental: (a) HFCT. (b) Impedor LDM-5. (c) Arranjo experimental.



Fonte: (a) Acervo do orientador (2023). (b) Ishak (2017). (c) Nobrega (2016).

A Figura 5 apresenta o diagrama referente às medições de DP realizadas, evidenciando a utilização simultânea do HFCT 140-100HC e do arranjo experimental definido pela norma IEC 60270.

Figura 5 – Arranjo de medição para detecção de DP.

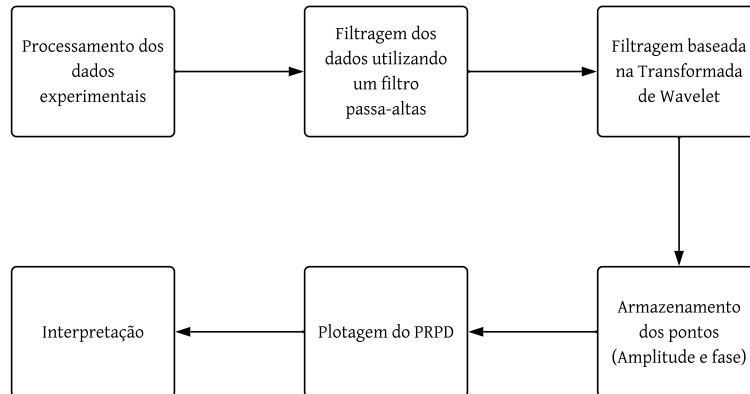


Fonte: Figura do autor (2026).

Cabe destacar que, durante a pesquisa, foi realizado o acompanhamento remoto de uma medição de DP no laboratório da UFCG, ocasião em que foram apresentados os instrumentos empregados e os arranjos experimentais.

A Figura 6 apresenta a sequência metodológica adotada na etapa de PDS, desenvolvida em linguagem de programação Python. Inicialmente, realizou-se o processamento dos dados experimentais, obtidos em formato de arquivos de dados MATLAB. Em seguida, os sinais foram submetidos a uma etapa de filtragem digital composta por dois estágios: um filtro passa-altas com aproximação elíptica de ordem 4, seguido por um filtro baseado na Transformada Wavelet.

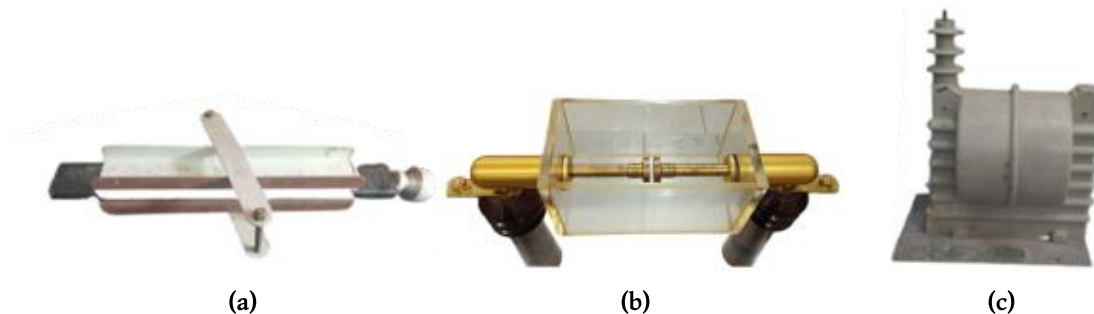
Figura 6 – Fluxograma do PDS.



Fonte: Figura do autor (2026).

Após o pré-processamento, extraíram-se amplitude e fase. Esses dados viabilizaram a geração dos gráficos PRPD, posteriormente interpretados para fins de diagnóstico. Neste estudo foram analisados gráficos PRPD de quatro diferentes arranjos experimentais, ilustrados na Figura 7: um transformador de potencial (TP) de 36 kV, uma barra de hidrogerador e duas configurações de eletrodos ponta-plano.

Figura 7 – Objetos teste: (a) Barra de hidrogerador. (b) Cuba com eletrodos ponta-plano. (c) TP 36 kV.



Fonte: Acervo do orientador (2023).

3.2 Processamento Digital

Para extrair os pulsos de DP, realizou-se inicialmente a filtragem de componentes de baixa frequência e ruídos de fundo. Para isso, programou-se um filtro passa-altas do tipo elíptico. A escolha dessa topologia justifica-se pela elevada taxa de atenuação entre a banda de rejeição e a banda de passagem, quando comparada a outras aproximações clássicas, como Butterworth e Chebyshev (PROAKIS, 2006).

O filtro foi projetado com as seguintes especificações: ordem 4, frequência de corte de 1 MHz, ondulação máxima de 1 dB na banda de passagem e atenuação mínima de 40 dB na banda de rejeição. O sinal resultante dessa etapa correspondeu à versão pré-filtrada das descargas parciais, preparada para a aplicação das técnicas de remoção de ruído baseadas em Transformada Wavelet.

Para maximizar a extração dos pulsos de DP, implementou-se o algoritmo SNRBWS

(*Signal-to-Noise Ratio Based Wavelet Selection*), proposto por CUNHA *et al.* (2013). O método foi adotado por apresentar desempenho superior aos algoritmos EBWS e CBWS na seleção da wavelet-mãe para a filtragem.

O algoritmo utiliza wavelets mãe candidatas, incluindo famílias como Db, Symlets e Coiflets. Em seguida, o sinal é decomposto em níveis sucessivos, produzindo coeficientes de aproximação e detalhe. A SNR é então calculada para cada wavelet candidata, sendo selecionada aquela que maximiza a separação entre sinal útil e ruído. A SNR é calculada pela Equação (8):

$$SNR = 10 \cdot \log \left(\frac{\text{pico máximo do sinal}}{\text{pico máximo do ruído}} \right). \quad (8)$$

Em seguida, aplicou-se a técnica de *Hard Thresholding*, na qual coeficientes com magnitude inferior ao limiar de corte λ_j são excluídos, enquanto os demais são preservados para a reconstrução do sinal útil por meio da Transformada Wavelet Inversa (TWI).

Os níveis de decomposição (J) foram definidos de forma adaptativa, permitindo que o algoritmo alcançasse apenas as faixas de frequência relevantes para análise das DP, evitando decomposições desnecessárias em bandas sem interesse para o fenômeno analisado. O número de níveis foi calculado pela Equação (9):

$$J = \text{fix} \left[\log_2 \left(\frac{f_s}{f_{\min}} \right) \right]. \quad (9)$$

O limiar de corte utilizado foi calculado pela Equação (10), em que σ_j corresponde ao Desvio Absoluto da Mediana (MAD) dos coeficientes de detalhe:

$$\lambda_j = \sigma_j \sqrt{2 \ln(N)}. \quad (10)$$

Após a etapa de filtragem os pulsos são separados e a fase é corrigida de acordo com a senoide de tensão de referência, em seguida os valores de amplitude e fase são armazenados para a posterior representação nos gráficos PRPD.

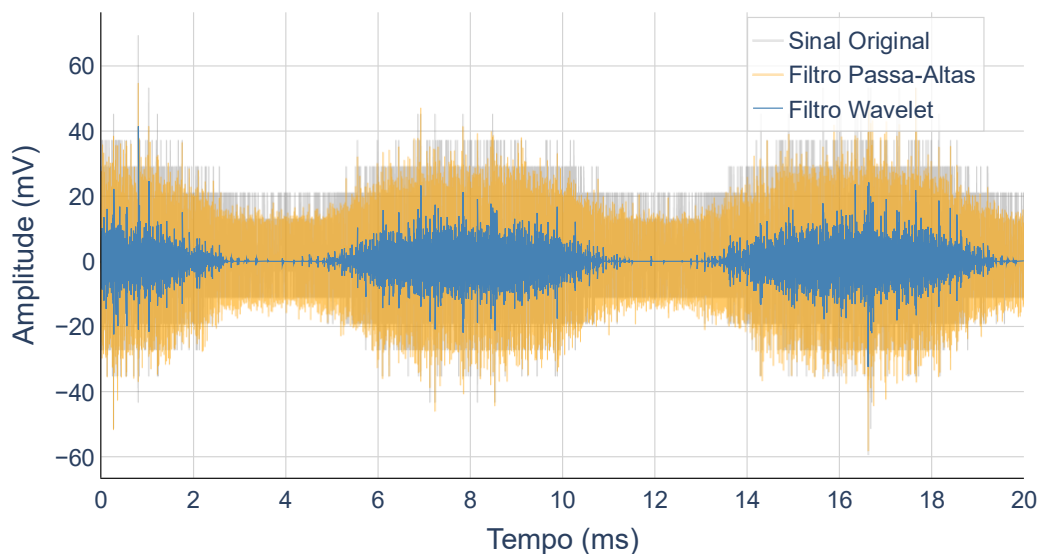
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia proposta, implementada em linguagem Python para a geração dos gráficos PRPD. O conteúdo está estruturado em duas subseções: Filtragem dos Sinais e Geração e Interpretação dos Gráficos PRPD.

4.1 Filtragem dos Sinais

Como apresentado na metodologia, a filtragem consistiu em uma etapa inicial de pré-filtragem utilizando um filtro passa-altas elíptico com frequência de corte de 1 MHz, destinado à remoção de ruídos e componentes de baixa frequência, aliada a uma etapa de filtragem baseada na Transformada Wavelet. Um exemplo da filtragem do sinal do TP é ilustrado na Figura 8 e 9.

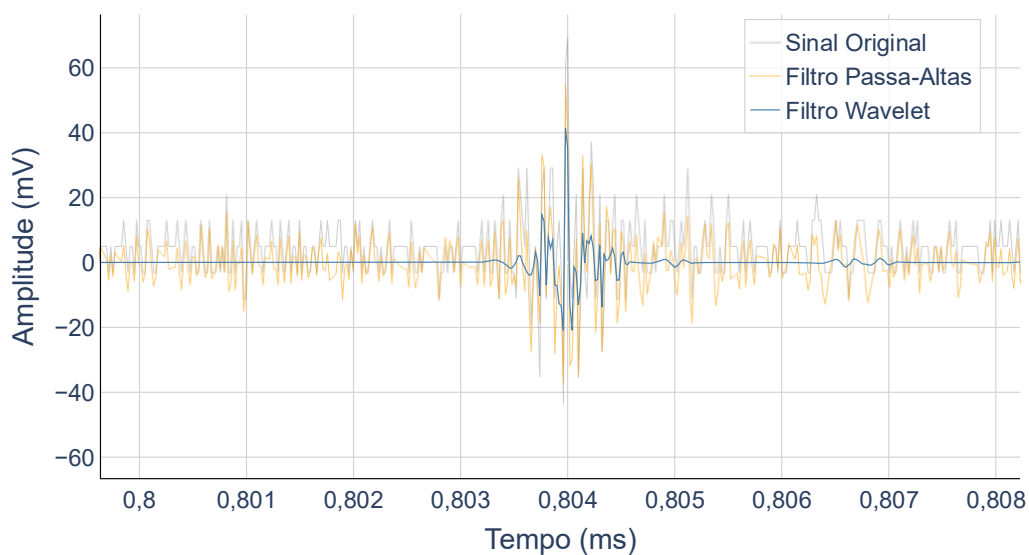
Figura 8 – Resultado da Filtragem para o TP 36 kV.



Fonte: Figura do autor (2026).

O sinal original é apresentado em cinza, enquanto a curva em laranja corresponde ao resultado obtido após a aplicação do filtro passa-altas. Por sua vez, a linha em azul representa o sinal processado pelo algoritmo de filtragem baseado na Transformada Wavelet.

Figura 9 – Detalhes da Filtragem para o TP 36 kV.



Fonte: Figura do autor (2026).

Observa-se que o procedimento de filtragem eliminou componentes associadas à componente de 60 Hz e o ruído de fundo, evidenciando o sinal de DP. Nota-se, ainda, a preservação do comportamento oscilatório amortecido do sinal, o qual constitui a assinatura típica da resposta de HFCT para sinais impulsivos.

A SNR do sinal original foi calculada visando observar o comportamento original dos pulsos em relação ao ruído e a posterior validação do SNR pós a implementação das etapas de filtragem.

Tabela 1 – SNR do sinal original.

Objeto Teste	SNR (dB)
Ponta Aterrada	4,86
Plano Aterrado	4,63
Barra	5,19
TP de 36 kV	4,69

Os valores baixos de SNR evidenciam a necessidade da aplicação das técnicas de PDS para remoção dos ruídos. Os valores referentes a SNR calculada pós as etapas de filtragem estão agrupados na Tabela 2.

Tabela 2 – SNR Calculado.

Objeto Teste	SNR (dB)
Ponta Aterrada	9,15
Plano Aterrado	9,14
Barra	15,83
TP de 36 kV	10,69

Fonte: Tabela do autor (2026).

As medições da barra de hidrogerador obtiveram o melhor valor de SNR global, atingindo 15,83 dB, demonstrando a eficácia da filtragem, com pulsos de DP com amplitudes bem superiores aos ruídos. A medição do TP de 36 kV atingiu um SNR de 10,69 dB, indicando um sinal aproximadamente 10 vezes mais potente que o ruído residual.

Para as medições da cuba com ponta aterrada e com plano aterrado foram obtidos SNR de 9,15 dB e 9,14 dB respectivamente, o valor inferior mostra que os sinais extraídos estavam mais próximos a amplitude dos ruídos, comportamento esperado para essas configurações em decorrência da energia das descargas ser inferior. Todos os valores de SNR foram superiores após a filtragem, confirmando a eficácia das etapas de PDS aplicadas.

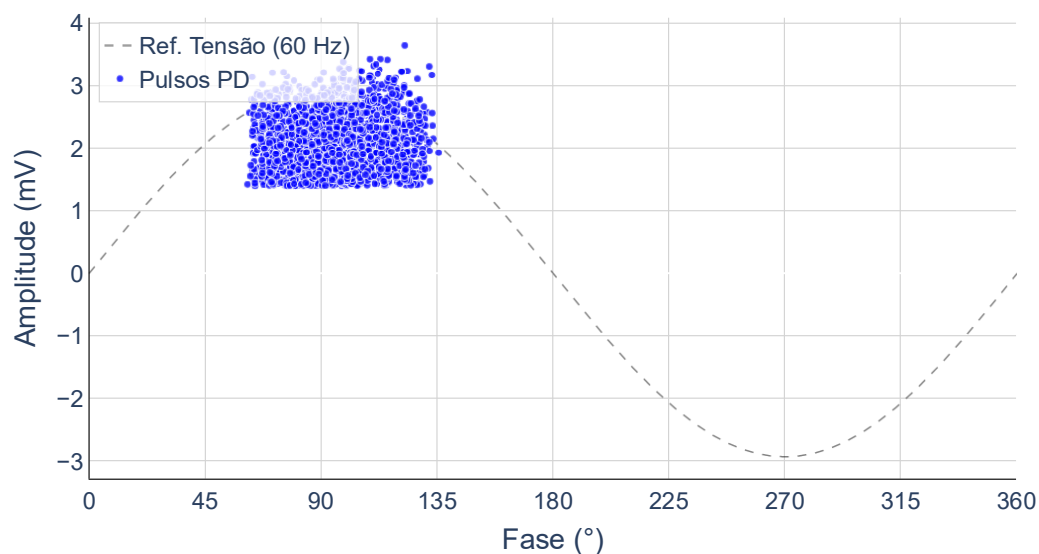
4.3 Geração e Interpretação dos Gráficos PRPD

Os diagramas PRPD foram gerados a partir de dados experimentais coletados em um TP, a barra estatórica de um hidrogerador e duas configurações distintas de eletrodos ponta-plano. Foram gerados gráficos utilizando pulsos provenientes de HFCT e do método elétrico por contato, padronizado pela IEC 60270, adicionando maior confiabilidade aos sinais medidos. A análise e a interpretação dos padrões de DP foram baseadas em Natrass (1988).

Foram detectados 889 pulsos de DP para as medições da barra com eletrodo do tipo ponta aterrado, 1462 para a cuba com o eletrodo do tipo plano aterrado, 2927 pulsos para a barra de hidrogerador e 457 pulsos para o TP de 36 kV. Apesar dos valores divergentes, os gráficos gerados para os quatro geraram padrões característicos e coerentes com àqueles reportados por Natrass (1988).

A Figura 10 apresenta o diagrama PRPD referente à cuba na configuração ponta-plano, com ponta aterrada, cujos dados foram adquiridos via HFCT.

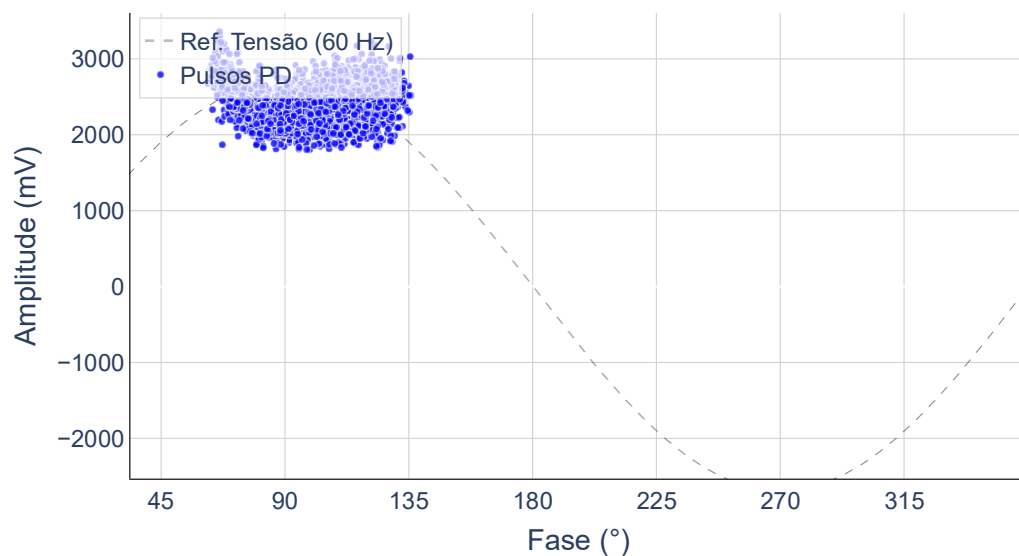
Figura 10 – PRPD referente à configuração Ponta Plano – Ponta Aterrada (HFCT).



Fonte: Figura do autor (2026).

O padrão PRPD obtido revela o comportamento característico de uma descarga corona com eletrodo do tipo ponta aterrado. Essa constatação se apoia na aglomeração das DP no semiciclo positivo da tensão, em torno de 90°. A Figura 11 apresenta os resultados dessa mesma medição utilizando o método elétrico por contato.

Figura 11 – PRPD referente à configuração Ponta Plano – Ponta Aterrada (IEC 60270).

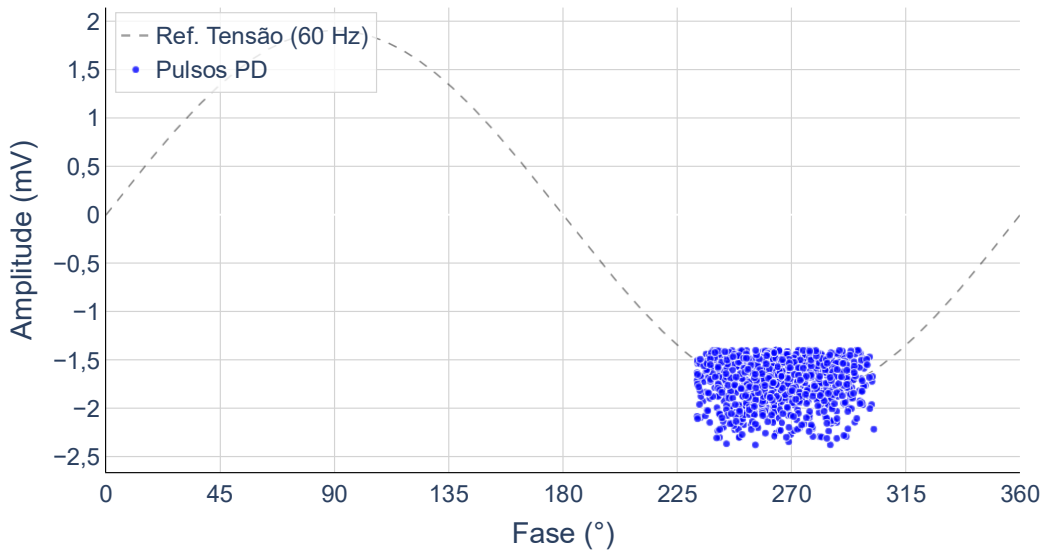


Fonte: Figura do autor (2026).

Na Figura 11, nota-se a manutenção do padrão característico de descargas corona para a configuração com eletrodo do tipo ponta aterrado, ratificando a medição realizada por meio do HFCT.

A Figura 12 apresenta o diagrama PRPD referente à cuba na configuração com o eletrodo plano aterrado, cujos dados foram adquiridos por meio de um sensor HFCT.

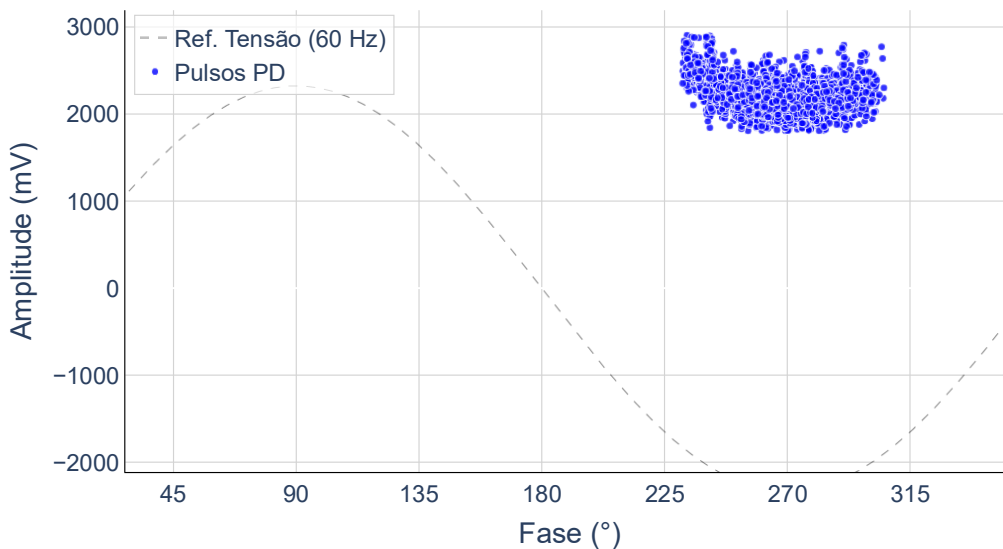
Figura 12 – PRPD referente à configuração Ponta Plano – Plano Aterrado (HFCT).



Fonte: Figura do autor (2026).

Nota-se a concentração de pulsos de DP ocorrendo no pico do semiciclo negativo, próximos aos 270°. Esse padrão é associado a descargas corona em que o eletrodo do tipo ponta está conectado ao maior potencial, típico de subestações. O PRDP para a cuba com eletrodo plano aterrado obtido pela medição elétrica por contato é ilustrado na Figura 13.

Figura 13 – PRPD referente à Ponta Plano – Plano Aterrado (IEC 60270).

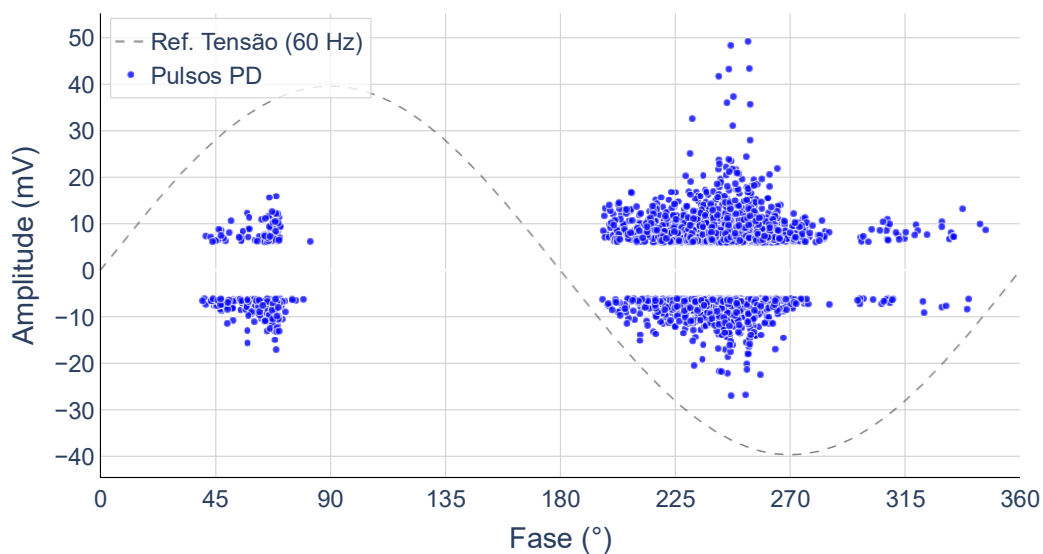


Fonte: Figura do autor (2026).

Como esperado, as DP se concentram no entorno de 270°, evidenciando uma descarga corona com o eletrodo do tipo ponta submetido à alta tensão. Contudo, o gráfico apresenta-se espelhado em relação ao eixo X quando comparado ao ensaio com HFCT. Essa característica ocorre porque as medições realizadas pelo LDS-6 registram sinais retificados.

O padrão PRPD correspondente à atividade de DP da barra de hidrogerador é exibido na Figura 14.

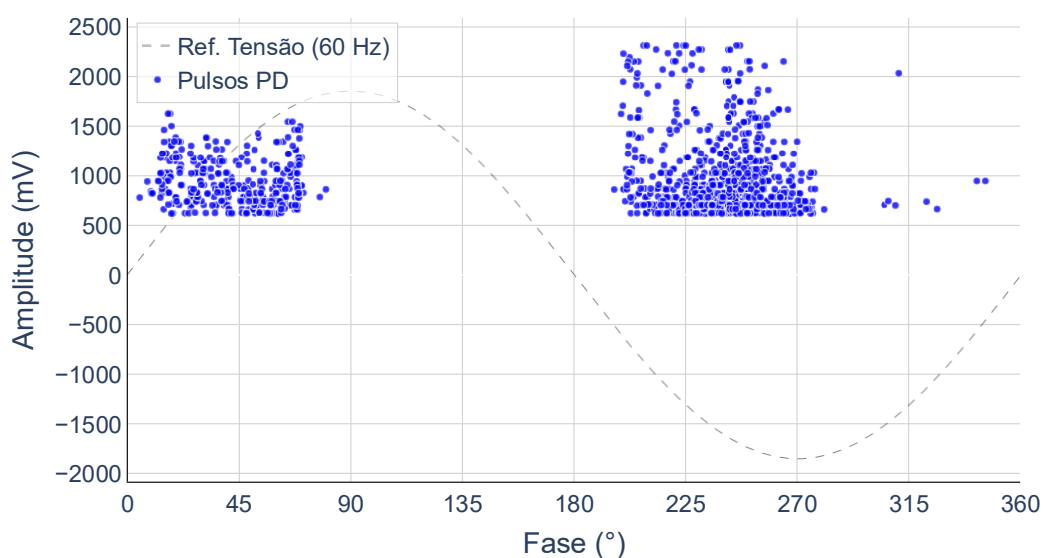
Figura 14 – PRPD referente à barra hidrogerador (HFCT).



Fonte: Figura do autor (2026).

A análise do gráfico apresentado na Figura 14 mostra a atividade de DP em ambos os semicírculos da senoide de referência. O padrão revela uma concentração maior das descargas em um dos semicírculos, resultando em uma assimetria visual, característica de DP superficiais. Embora as DP apresentem amplitudes similares, as superficiais tipicamente apresentam uma disparidade de magnitude na proporção de 3:1 ao se comparar os semicírculos como observado na Figura 14. O PRPD referente à barra do hidrogerador para o método normatizado é observado na Figura 15.

Figura 15 – PRPD referente à barra de hidrogerador (IEC 60270).

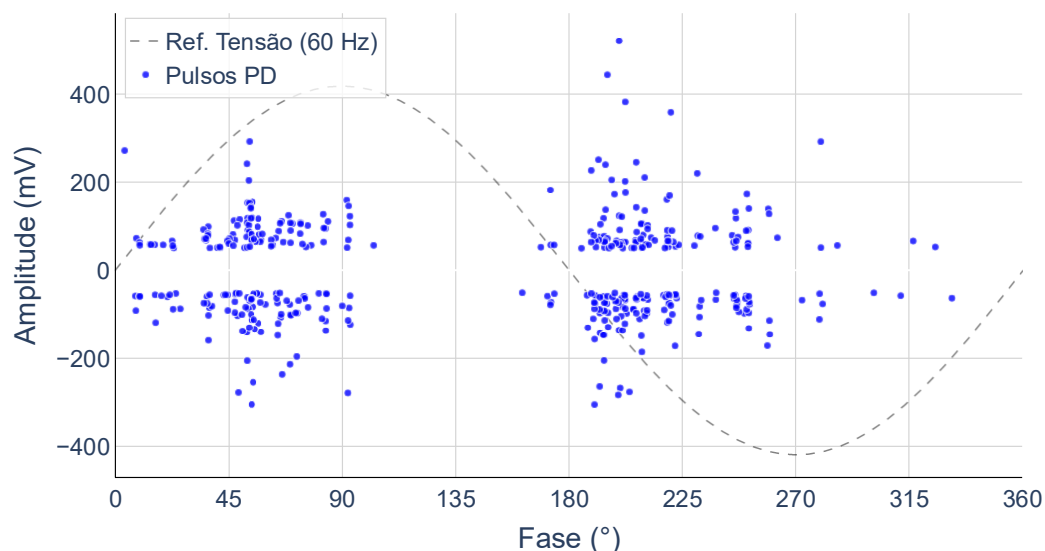


Fonte: Figura do autor (2026).

A medição pelo método IEC 60270 ratificou a interpretação obtida pela com HFCT, evidenciando uma assimetria entre os semicírculos.

A Figura 16 mostra o gráfico PRPD para o TP de 36 kV, com medição realizada por HFCT.

Figura 16 – PRPD referente ao TP de 36 kV (HFCT).

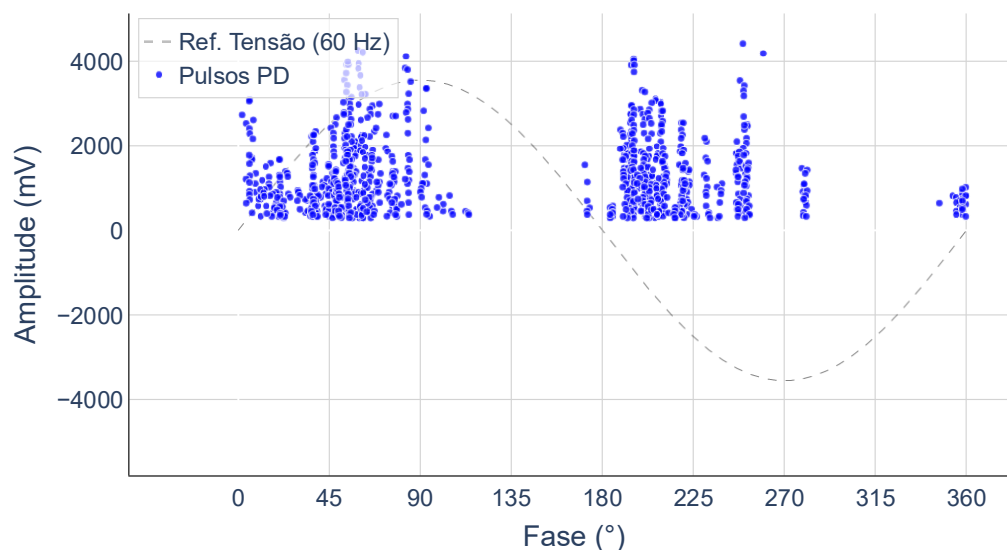


Fonte: Figura do autor (2026).

A análise do diagrama PRPD da Figura 16 revela um padrão característico de descargas internas, comumente associadas à presença de cavidades no interior do isolamento, em que há a ocorrência de descargas em ambos os semiciclos da tensão aplicada. Observa-se que os pulsos se concentram predominantemente nas subidas da onda senoidal de referência, entre 15° e 90° (semiciclo positivo) e entre 180° e 270° (semiciclo negativo). Esse comportamento físico evidencia que as descargas são deflagradas exatamente quando a variação do campo elétrico faz com que a diferença de potencial através da cavidade atinja o limiar de ruptura do gás confinado.

Além da simetria de fase, o gráfico evidencia uma equivalência nas amplitudes dos pulsos medidos pelo sensor HFCT, os quais atingem magnitudes da ordem de ± 400 mV em ambos os semiciclos. Essa uniformidade reforça o diagnóstico de descargas internas. O PRPD gerado para o mesmo transformador pelo método elétrico descrito pela IEC 60270 é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – PRPD referente ao TP de 36 kV (IEC 60270).



Fonte: Figura do autor (2026).

O padrão PRPD, por meio do método elétrico convencional proposto pela norma IEC 60270 corrobora a interpretação via HFCT. Portanto, observa-se que medições com HFCT são capazes de gerar gráficos PRPD equivalentes aos obtidos por meio do ensaio normatizado. Entretanto há a vantagem da medição com HFCT ser pouco invasiva e aplicável em campo.

Adicionalmente, para analisar a distribuição dos sinais de DP em relação à fase correspondente, foram calculados os quartis dos dados, cujos resultados estão sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Quartis dos Dados

Objeto Teste	Q1 (25%)	Q2 (Mediana)	Q3 (75%)	IQR
Ponta Aterrada	80,9°	93,8°	106,5°	25,6°
Plano Aterrado	251,5°	264,5°	278,9°	27,4°
Barra	224,3°	239,1°	251,2°	27,6°
TP de 36 kV	54,9°	190,5°	209,7°	154,8°

Fonte: Tabela do autor (2026).

Os quartis evidenciam padrões na distribuição angular das DP medidas nos arranjos experimentais analisados. Para a configuração ponta-plano com ponta aterrada, observa-se a concentração das DP entre 80° e 106°, com baixa dispersão angular (IQR = 25,6°), indicando ocorrência concentrada em uma região específica do semiciclo da tensão aplicada.

Na configuração ponta-plano com plano aterrado, os pulsos concentraram-se entre 251° e 279°, também apresentando baixa dispersão (IQR = 27,4°), porém deslocados para o semiciclo oposto, comportamento coerente com a inversão da geometria do campo elétrico.

A barra apresentou baixa dispersão angular, com intervalo interquartil (IQR = 27,6°) semelhante às configurações anteriores, indicando que as descargas também se concentram em uma faixa restrita do ciclo de tensão. Resultado oposto foi observado para o TP de 36 kV, cujo IQR atingiu 154,8°, sugerindo maior complexidade dos mecanismos de descarga presentes no sistema.

Os resultados obtidos indicam que os parâmetros estatísticos baseados em quartis podem auxiliar na diferenciação entre padrões PRPD distintos. As diferenças observadas na distribuição angular e na dispersão dos pulsos sugerem que essas métricas apresentam potencial para aplicação em técnicas de inteligência artificial voltadas à classificação automática de defeitos em sistemas de isolamento

5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou a viabilidade da aplicação de técnicas de PDS para o tratamento de sinais de DP obtidos por meio de medições com HFCT. A aplicação da filtragem digital, utilizando um filtro elíptico e técnicas baseadas na Transformada Wavelet permitiu reduzir significativamente os ruídos presentes nos sinais adquiridos, obtendo SNR entre 9,14 dB e 15,83 dB, aumentando a confiabilidade da análise e evitando interpretações incorretas dos gráficos PRPD.

A análise dos resultados permitiu identificar três diferentes classes de DP: descargas internas, descargas superficiais e corona, mostrando que PRPD constituem uma ferramenta de manutenção preditiva para analisar a condição de isolamento de equipamentos de alta tensão, fornecendo subsídios técnicos para a previsão de falhas dielétricas.

A análise comparativa entre os padrões PRPD obtidos por meio de sensores HFCT e aqueles gerados pelo método normatizado comprovou a confiabilidade do HFCT para o

diagnóstico de falhas em equipamentos de alta tensão, destacando-se pela vantagem de ser uma técnica menos invasiva.

Por fim, o trabalho abre perspectivas para futuras aplicações envolvendo técnicas automatizadas de reconhecimento de padrões. A utilização dos quartis extraídos dos dados como atributos de entrada em algoritmos de aprendizado de máquina apresenta potencial para aumentar significativamente a eficácia e a precisão da ferramenta de diagnóstico.

REFERÊNCIAS

- ALBARRACIN, R. et al. Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time-power ratio maps.** *ISA Transactions*, v. 58, p. 389–397, 2015.
- ANTONIOU, Andreas. Digital Filters: Analysis, Design, and Signal Processing Applications.** 2. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2018.
- ARAÚJO, Diego Buriti. Aplicação da transformada wavelet à filtragem de sinais de descargas parciais.** 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- BARTNIKAS, R.; MCMAHON, E. J. (ed.). Engineering Dielectrics, Volume I: Corona Measurement and Interpretation.** Philadelphia: ASTM, 1979. (ASTM Special Technical Publication, 669).
- CARVALHO, Itaiara Felix. Identificação de fontes de descargas parciais por atributos extraídos da envoltória do sinal.** 2024. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.
- CIGRÉ. Technical Brochure 939: Analysis of AC Transformer Reliability.** Paris: CIGRÉ Working Group A2.62, 2024.
- COSTA, Edson Guedes da; NEVES, Washington L. Araújo.**
- COSTA, E. G. da; NEVES, W. L. A. Descargas Parciais.** Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 1996. (Apostila).
- CUNHA, C. F. F. C. et al. A new wavelet selection method for partial discharge denoising.** *Electric Power Systems Research*, v. 125, p. 184–195, 2015.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2026.** Brasília, DF: EPE, 2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60270: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements.** Genebra: IEC, 2025.
- ISHAK, M.; MOHAMAD AMIN, N. A.; ABD HAMID, M.; ABD RAHMAN, M. S. Partial discharge investigation on palm oil using needle — Plane electrode configuration and electric field distribution using Ansys Maxwell.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND POWER SYSTEMS, 1., 2017, Denpasar, Bali. *Proceedings* [...]. Piscataway: IEEE, 2017. DOI: 10.1109/ICHVEPS.2017.8225886.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. High Voltage Engineering: Fundamentals.** 2. ed. Oxford: Newnes, 2000.
- LI, Z. et al. Optical Partial Discharge Detection and Diagnosis Method Based on PHOG Features.** *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, [S. l.], v. 31, n. 6, p. 3040-3048, dez. 2024. DOI: 10.1109/TDEI.2023.3330697.

NATTRASS, D. A. Partial Discharge Measurement and Interpretation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 4, n. 3, p. 10-23, jun. 1988.

NOBREGA, Luiz Augusto Medeiros Martins. **Parametrização de HFCT para medição de descargas parciais em para-raios de ZnO.** 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Processamento em tempo discreto de sinais.** 3. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2012.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. K. **Digital signal processing: principles, algorithms, and applications.** 4. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2006.

QIAN, S.; CHEN, H.; XU, Y.; SU, L. High sensitivity detection of partial discharge acoustic emission within power transformer by Sagnac fiber optic sensor. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, [S. l.], v. 25, n. 6, p. 2313-2320, dez. 2018.

SANTOS JÚNIOR, Almir Carlos dos. **Classificação de descargas parciais no espectro UHF utilizando condicionadores de sinais e aprendizagem de máquina.** 2023. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2023.

SILVA, A. D. C. et al. A Novel Radiometric Device for Monitoring Partial Discharge Sources in the UHF Band. **IEEE Access**, [S. l.], v. 13, p. 203491-203500, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3639046.

SILVA, Allan D. C. et al. Avaliação de técnicas de inteligência artificial na classificação de descargas parciais. **Tecnología en Marcha**, v. 34, n. esp., p. 232-244, 2021.

WALKER, James S. **A Primer on Wavelets and Their Scientific Applications.** Boca Raton: CRC Press, 1999.

WEEKS, Michael. **Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets.** Hingham: Infinity Science Press, 2006.