



**Metodologia Baseada em Atributos Cromáticos de Sinais HFCT para
Classificação de Fontes de Descargas Parciais**
*Methodology Based on Chromatic Features of HFCT Signals for Partial
Discharge Source Classification*

Igor M.A Santos^{1,*}, Pablo B. Vilar²

¹ Aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, campus Campina Grande, PB, Brasil

² Professor do Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, campus Campina Grande, PB, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: igor.santos@ee.ufcg.edu.br

Received: 23 June 2028 | Accepted: 31 August 2026 | Published online: 02 September 2026

Resumo: As descargas parciais (DPs) constituem importantes indicadores da degradação do isolamento em equipamentos de alta tensão, incluindo cabos de potência, transformadores e máquinas elétricas. A identificação confiável das fontes de DP é essencial para a avaliação da condição do isolamento e o diagnóstico precoce de falhas; entretanto, técnicas convencionais de medição podem exigir instalações invasivas e apresentar limitações em aplicações de campo sujeitas a interferências eletromagnéticas e ruído. Este trabalho investiga a aplicabilidade do processamento cromático de sinais para a discriminação e classificação de fontes de descargas parciais medidas por transformadores de corrente de alta frequência (HFCTs). A metodologia proposta contempla filtragem baseada em wavelets, detecção e segmentação dos pulsos de DP e extração de atributos cromáticos. Para cada pulso, são calculados três atributos: energia normalizada do sinal, frequência característica e largura de banda quadrática média. Os atributos extraídos são representados em um espaço tridimensional e empregados como variáveis de entrada para classificadores baseados em Árvore de Decisão e Máquina de Vetores de Suporte. Dados experimentais obtidos a partir de fontes de DP geradas em laboratório apresentaram padrões cromáticos distinguíveis para descargas corona, internas e superficiais. Os classificadores alcançaram elevado desempenho nas condições experimentais adotadas, indicando que os atributos cromáticos selecionados contêm informações relevantes para a identificação das fontes de DP. A metodologia baseada em HFCT demonstrou potencial como uma abordagem compacta e não invasiva para a discriminação e classificação de fontes de descargas parciais, contribuindo para atividades de monitoramento e diagnóstico de sistemas de isolamento de alta tensão.

Palavras-chave: Aprendizado de Máquina; Classificação de fontes de DP; Descargas Parciais (DP); Método Cromático; Separação de fontes de DP.

Abstract: Partial discharges (PDs) are relevant indicators of insulation degradation in high-voltage equipment, including power cables, transformers, and electrical machines. Reliable identification of PD sources is essential for condition assessment and early fault diagnosis; however, conventional measurement techniques may require intrusive installation and can be difficult to apply in field environments affected by electromagnetic interference and noise. This study investigates the applicability of chromatic signal processing for the discrimination and classification of partial discharge sources measured using high-frequency current transformers (HFCTs). The proposed approach includes wavelet-based denoising, PD pulse detection and segmentation, and chromatic feature extraction. Three features are calculated for each pulse: normalized signal energy, characteristic frequency, and root mean square bandwidth. The extracted features are represented in a three-dimensional space and used as input variables for Decision Tree and Support Vector Machine classifiers. Experimental data obtained from laboratory-generated PD sources showed distinguishable chromatic patterns for corona, internal, and surface discharges. The classifiers achieved high performance under the adopted experimental conditions, indicating that the selected chromatic features contain relevant information for PD source identification.

The proposed HFCT-based workflow demonstrated potential as a compact and non-intrusive approach for the discrimination and classification of PD sources, supporting its application as an auxiliary tool for insulation monitoring and diagnostic activities in high-voltage systems.

Keywords: Classification of PD sources; Chromatic Method; Machine Learning; Partial Discharges (PD); Separation of PD sources.

1 Introdução

Os sistemas de isolamento elétrico empregados em equipamentos de alta tensão estão continuamente submetidos a esforços elétricos, térmicos, mecânicos e ambientais ao longo de sua vida útil. Embora essas solicitações não provoquem necessariamente falhas imediatas, sua ação cumulativa acelera o envelhecimento dos materiais isolantes e pode resultar em mecanismos de degradação, tais como oxidação, fissuramento, erosão, delaminação e formação de defeitos localizados. A progressão desses mecanismos reduz a rigidez dielétrica do sistema e aumenta a probabilidade de falhas, podendo comprometer a confiabilidade operacional, a continuidade do fornecimento de energia e os custos de manutenção dos ativos elétricos.

Nesse contexto, as descargas parciais (DPs) constituem importantes indicadores da condição do isolamento. As DPs são descargas elétricas localizadas que ocorrem no interior ou na superfície de um sistema isolante sem que haja a ruptura completa do meio dielétrico entre dois condutores submetidos a uma diferença de potencial. Sua ocorrência está frequentemente associada à presença de cavidades internas, interfaces entre materiais, contaminação superficial, defeitos de fabricação, geometrias que intensificam o campo elétrico e processos progressivos de degradação do isolamento. Como a atividade de DP pode anteceder falhas dielétricas mais severas, sua detecção e interpretação são amplamente utilizadas na avaliação da condição e no diagnóstico precoce de equipamentos de alta tensão, tais como transformadores, cabos de potência, máquinas elétricas rotativas e equipamentos de manobra (De Castro et al., 2017; Arora e Mosch, 2011).

Os sistemas convencionais de medição de DP, fundamentados na norma IEC 60270, apresentam elevada sensibilidade e permitem quantificar a carga aparente associada aos eventos de descarga. Entretanto, sua aplicação geralmente requer capacitores de acoplamento, impedâncias de medição e conexões elétricas diretas ao equipamento sob ensaio. Essas exigências podem restringir o uso do método em aplicações de campo, especialmente em situações nas quais o desligamento do equipamento, a modificação do circuito ou a instalação de elementos adicionais não são viáveis.

Como alternativa, técnicas não invasivas baseadas em transformadores de corrente de alta frequência, conhecidos como *High-Frequency Current Transformers* (HFCTs), têm sido empregadas para a aquisição de pulsos de DP por meio dos condutores de aterramento dos equipamentos monitorados. Esses sensores permitem detectar componentes de alta frequência associadas às descargas sem a necessidade de conexão direta ao circuito de alta tensão, ampliando seu potencial de aplicação em atividades de monitoramento e diagnóstico em campo.

Apesar dessas vantagens, a identificação confiável das fontes de DP ainda representa um desafio relevante. Os sinais medidos podem ser influenciados por ruído eletromagnético, interferências externas, efeitos de propagação, variações nas condições operacionais e diferentes mecanismos de descarga. Além disso, sinais associados a corona, descargas internas, descargas superficiais e perturbações externas podem apresentar características parcialmente semelhantes, dificultando a interpretação visual e a classificação baseada apenas em parâmetros convencionais. Dessa forma, tornam-se necessários métodos de processamento capazes de extrair atributos discriminantes dos pulsos de DP e apoiar a identificação automatizada de suas fontes.

Diversas abordagens têm sido propostas para a análise de DP, incluindo padrões fase-resolvidos, parâmetros nos domínios do tempo e da frequência, técnicas baseadas em wavelets e métodos de aprendizado de máquina (Committee, 2007; James e Su, 2008; Han e Song, 2003). Entre essas abordagens, o processamento cromático de sinais apresenta interesse por permitir a representação compacta de sinais de banda larga a partir de parâmetros relacionados à distribuição de energia, à frequência característica e à largura de banda espectral. Essa representação reduzida pode facilitar a visualização de padrões associados a diferentes mecanismos de descarga e fornecer variáveis adequadas para técnicas de classificação supervisionada.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade de atributos cromáticos extraídos de sinais de descargas parciais medidos por sensores do tipo *High-Frequency Current Transformer* (HFCT) para a discriminação e classificação de diferentes fontes de descarga parcial.

Especificamente, busca-se: (i) aplicar técnicas de filtragem baseada em wavelets para redução de ruídos nos sinais adquiridos; (ii) detectar e segmentar pulsos de descargas parciais; (iii) extrair atributos cromáticos relacionados à energia normalizada, à frequência característica e à largura de banda RMS; (iv) analisar a separação das fontes de descarga em um espaço tridimensional de atributos; e (v) avaliar o desempenho de classificadores baseados em Árvore de Decisão e Máquina de Vetores de Suporte na identificação das classes de descarga investigadas.

A contribuição do estudo consiste em avaliar o potencial desses atributos compactos para distinguir padrões associados a fontes de descargas parciais geradas em condições laboratoriais controladas. O foco não é estabelecer um método definitivo para diagnóstico em campo, mas analisar a capacidade discriminante da representação cromática em sinais adquiridos por HFCT. Dessa forma, os resultados devem ser interpretados como uma etapa experimental para o desenvolvimento futuro de ferramentas de apoio ao monitoramento e ao diagnóstico de sistemas de isolamento de alta tensão.

1.2 Medição de descargas parciais

As descargas parciais (DP) são descargas elétricas localizadas que não percorrem completamente o isolamento entre condutores sob diferença de potencial, gerando pulsos de alta frequência. Elas ocorrem devido a um campo elétrico intenso nas imperfeições do dielétrico, que ultrapassa um limite crítico, gerando elétrons livres e resultando em descargas repetitivas. As DP podem surgir em junções de materiais ou próximas a condutores e estão associadas a fenômenos elétricos, radiação, luz, variações térmicas e mecânicas, sendo detectáveis por diversos instrumentos. A norma IEC 60270/2000 define configurações e procedimentos para medição das DP, utilizando capacitores de acoplamento conectados em paralelo com o equipamento a ser medido, conforme ilustrado na Figura 1.

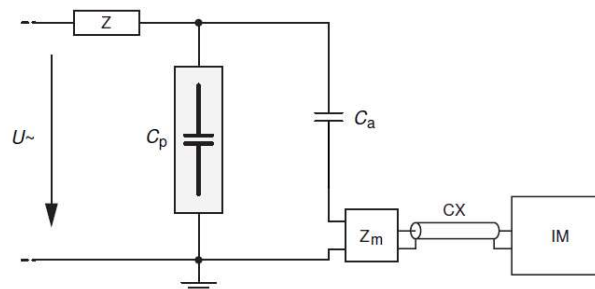


Figura 1 - Arranjo de medição apresentado na IEC 60270.

Os elementos da Figura 1 incluem: uma fonte de alta tensão alternada U ; uma impedância Z que filtra ruídos; um capacitor de acoplamento C_a que facilita impulsos de alta frequência; o objeto de teste C_p , que apresenta descargas parciais; uma impedância de medição Z_m , que amplifica a queda de tensão dos impulsos de DP; e um instrumento de medição IM conectado via cabo coaxial CX, como um osciloscópio com alta taxa de aquisição. O método IEC 60270 opera nas bandas LF e MF (até 3 MHz), sendo a faixa HF (3 a 30 MHz) mais precisa para classificar sinais de DP. A faixa VHF (30 a 300 MHz) é usada por sua imunidade ao ruído, registrando apenas o pulso da frente de onda, enquanto medições UHF (300 a 3000 MHz) utilizam antenas (IEC60270, 2000).

Entretanto, a utilização do arranjo apresentado na Figura 1 é inviável devido à necessidade de um capacitor de acoplamento de alta tensão, que deve ser conectado ao objeto de teste, tornando esse método invasivo. Uma forma alternativa para medição em campo de DP é baseada na conexão não-invasiva de um sensor indutivo de alta frequência (do inglês, *High Frequency Current Transformer*) e alta permeabilidade magnética ao cabo que liga o equipamento sob teste a malha de terra (Hao et al., 2008). A Figura 2 apresenta o arranjo de montagem utilizando o HFCT.

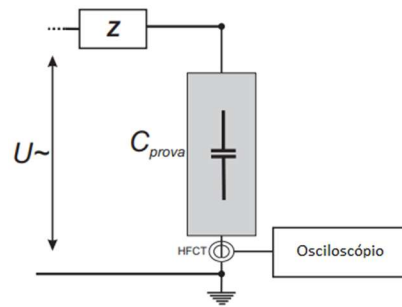


Figura 2 - Arranjo de medição de descargas parciais utilizando um sensor de corrente indutivo.

Neste arranjo de medição, o HFCT é conectado de forma não invasiva ao cabo de conexão a terra do equipamento sob teste C_{prova} , ou seja, não há necessidade de desligamento do equipamento ou de abertura do mesmo para instalação do HFCT. Neste caso, o nível de segurança da equipe responsável pela medição é maximizado, pois, caso haja a falha do equipamento sob teste, o sensor de corrente irá saturar e ele não conduzirá alta tensão aos equipamentos de medição (Macedo et al., 2014).

1.3 Método cromático de separação de descargas

O método de monitoramento cromático, inicialmente proposto por Jones e Russell (Jones et al., 1993) para superar dificuldades em sensores ópticos, foi expandido para processar uma gama diversificada de sinais de sensores ópticos no monitoramento de plasma de arco elétrico. Posteriormente, foi aplicado para identificar sinais optoacústicos de disjuntores de alta tensão (Cosgrave et al., 1997) e para extrair informações espectrais bidimensionais de membranas deformadas (Ahmed et al., 1994), e posteriormente foi proposto para o tratamento de sinais de DP em transformadores de Alta Tensão (Zhang et al., 2005).

O método cromático utiliza três filtros (R, G e B) para analisar sinais em frequências distintas. A sobreposição de suas respostas permite correlacionar sinais complexos, facilitando a separação das fontes de DP por meio da extração de parâmetros como frequência angular, energia do sinal e largura de banda RMS (Raiz Média Quadrática, do inglês, *Root Mean Square*), conforme mostrado na Figura 3.

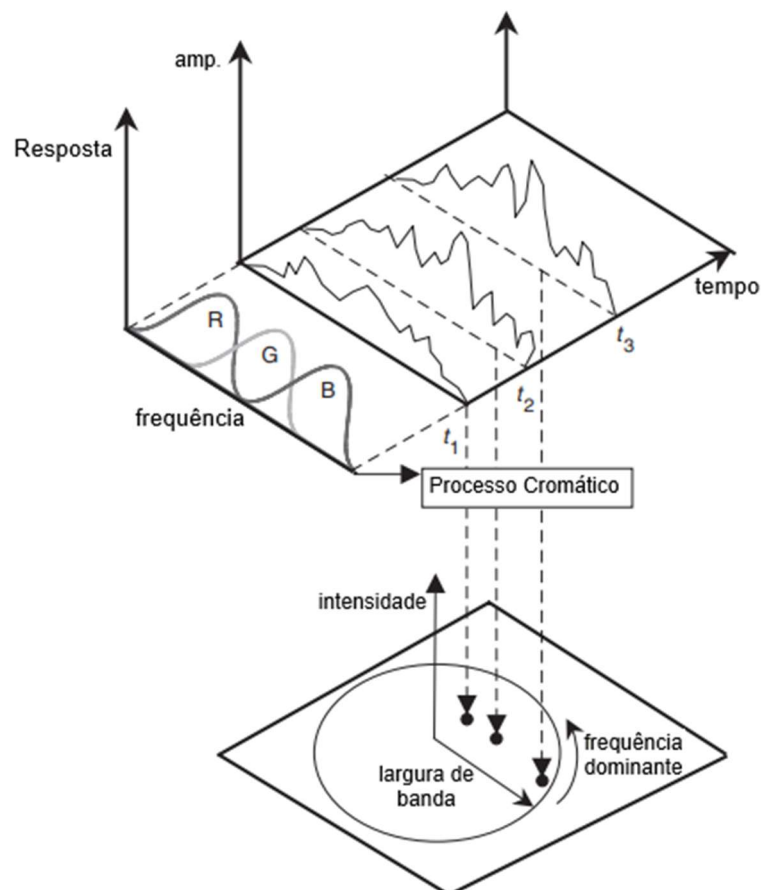


Figura 3. Esquema do Processamento de sinais pelo Método Cromático.

O propósito do processamento de sinais é identificar parâmetros genéricos do sinal $f(t)$ em termos de algumas propriedades do sinal fundamental (Weiss et al., 1994). Neste trabalho, para aplicação do método cromático na separação de fontes de DP, os três parâmetros escolhidos são:

- H, frequência angular característica (ω_c);
- L, energia do sinal (E_b);
- S, largura de banda RMS do sinal (B).

2 Metodologia

A metodologia seguiu o fluxograma apresentado na Figura 4, começando com a obtenção dos dados através de medições de DP usando o HFCT. Após a obtenção dos dados, é realizada toda uma etapa de processamento dos sinais, que inicialmente vai desde a Filtragem Wavelet até a extração de atributos via método cromático. O processo de separação das fontes é apresentado exclusivamente por meio de gráficos em três dimensões, gerados com as características extraídas. O processo de classificação, por sua vez, é realizado aplicando dois modelos de aprendizado de máquina utilizando como dados de treinamento as variáveis extraídas do método cromático.

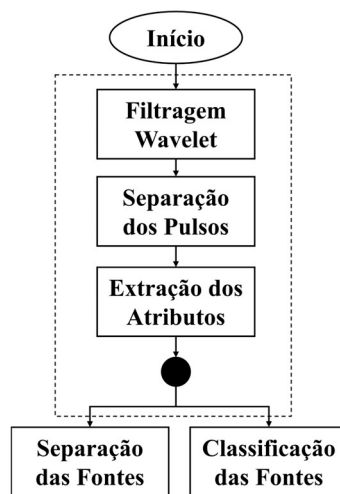


Figura 4. Metodologia desenvolvida.

Os dados utilizados neste projeto são oriundos de medições de DP realizadas em um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em execução no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). As medições realizadas envolvem a detecção de DP em vários cenários de equipamentos de Alta Tensão. As medições de DP, são realizadas no osciloscópio com uma taxa de amostragem de 125 Ms/s, e uma janela de tempo de cada aquisição de 35 ms. Essa janela de tempo corresponde a dois ciclos de senoides, onde há a presença de vários pulsos de DP nesta janela de tempo.

O esquemático que representa a aquisição de padrões de sinais de descargas parciais e a subsequente geração de padrões PRPD a partir da utilização do método HFCT é apresentado na Figura 5.

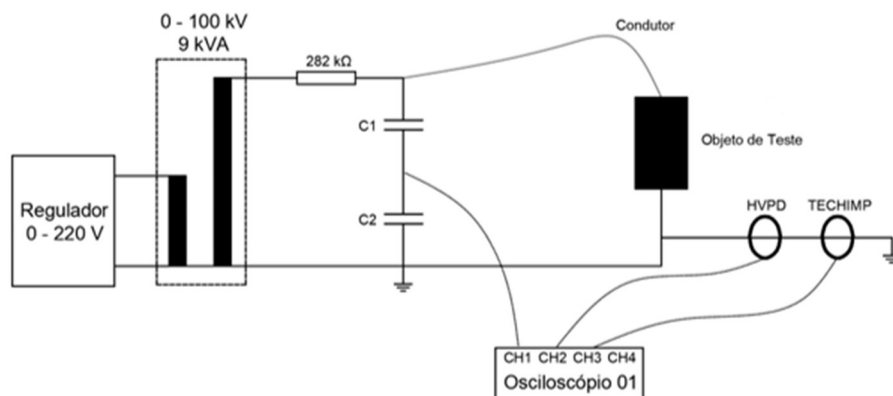


Figura 5. Diagrama genérico dos ensaios elétricos realizados.

O método apresentado na Figura 5 mostra o circuito onde a tensão aplicada ao objeto de teste é originada por meio de um transformador para ensaio com tensão máxima de 100 kV e potência de 9 kVA. Além disso, em série ao transformador, um resistor limitador de corrente de 282 k Ω é inserido no circuito visando evitar que uma possível falha danifique o objeto sob teste. Já a medição da tensão aplicada ao objeto sob ensaio é realizada por meio de um divisor capacitivo com uma relação de transformação de 1704,00. No osciloscópio 01 foram inseridos os sinais dos sensores HFCT e o sinal da tensão aplicada ao objeto de teste adquirida por meio do divisor capacitivo.

A forma de onda da tensão aplicada ao objeto de teste, obtida via divisor capacitivo, e os pulsos de tensão advindos da impedância de medição são adquiridos pelo osciloscópio. A aquisição dos sinais do osciloscópio é realizada automaticamente utilizando um algoritmo. A medição de DP utilizando HFCT é realizada simultaneamente com o método padrão, previsto na IEC 60270 (2000), para ser avaliada a sensibilidade do HFCT em termos de pC. Destaca-se ainda que os procedimentos de calibração do sistema, estabelecidos pela IEC 60270 (2000), são executados toda vez que é alterado o objeto de teste, pois a cada ensaio a capacitância total do arranjo de medição é alterada, resultando em modificações na sensibilidade do sistema de medição. Conforme a calibração realizada via IEC 60270 (2000) é possível estabelecer uma correlação entre as medições via HFCT, em mV, e as medições via IEC 60270 (2000), em pC.

Utilizando o arranjo de medição apresentado na Figura 5, quatro objetos de teste foram ensaiados para garantir que fontes de DP com diferentes magnitudes pudessem ser adquiridos e, dessa forma, as análises de correlação e sensibilidade serem realizadas considerando-se estas nuances. Além das medições por meio dos quatro objetos teste, foram obtidos dados de DP superficial em câmara de trilhamento.

2.1 Arranjo ponta-plano - Geração de corona

O objetivo do ensaio com o arranjo ponta-plano consistiu em gerar descargas corona e coletar sinais por meio de sensores HFCT. Desse modo, foram utilizados dois ensaios elétricos com o arranjo ponta-plano: arranjo ponta-plano com a fase na ponta e o plano aterrado e arranjo ponta-plano com a fase no plano e a ponta aterrada. Para cada arranjo foram realizadas 400 aquisições de ciclos da tensão aplicada com os pulsos de descargas adquiridos em cada HFCT. O arranjo do ensaio elétrico utilizado é apresentado na Figura 6.

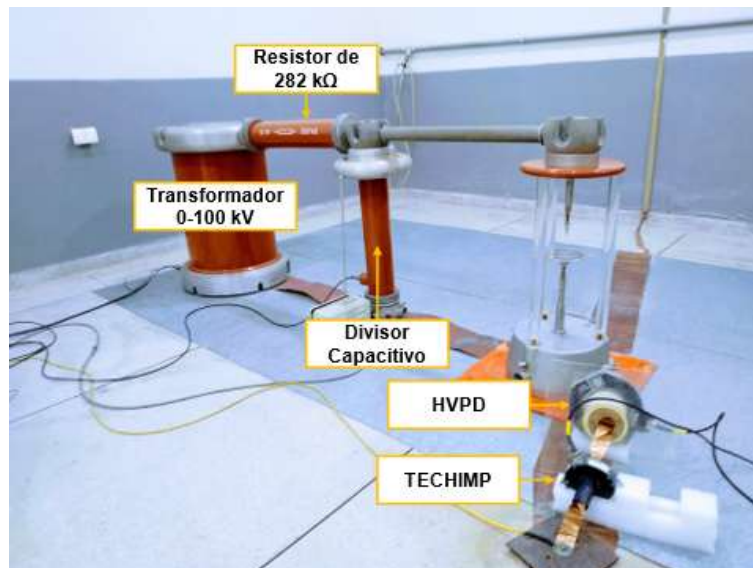


Figura 6. Arranjo do ensaio elétrico ponta-plano.

2.2 Arranjo plano-plano imerso em óleo

Para gerar sinais de descargas parciais com características definidas, foi utilizada uma célula com eletrodos desenvolvida por Macedo et al. (2014), composta por eletrodos plano-plano e dielétrico de fenolite com cavidades, imersos em óleo mineral de transformador. A célula é selada por um tubo de acrílico e preenchida com óleo mineral isolante, garantindo a geração de descargas parciais internas. Foram utilizadas amostras de fenolite com três camadas, sendo a amostra 01 com uma cavidade centralizada de 1 mm e a amostra 02 com duas cavidades. A tensão aplicada foi de 14 kV, suficiente para gerar descargas parciais puras, e foram realizadas 100 aquisições de ciclos de tensão com pulsos de descarga para cada amostra. O

dielétrico de fenolite utilizado no experimento possuía duas topologias diferentes, conforme mostrado na Figura 7.



Figura 7. Configuração dos defeitos utilizados no fenolite.

2.3 Arranjo com cabo isolado

O arranjo experimental apresentado na Figura 8 utilizou um cabo protegido por condutor de aterramento, gerando descargas parciais que foram captadas por sensores HFCT. Essa configuração permitiu a coleta de dados consistentes para análise das fontes de DP.

Como pode ser observado na Figura 8, o mesmo arranjo para aplicação de tensão das seções anteriores é utilizado. Para geração de descargas parciais, na região central do cabo protegido, um condutor proveniente do aterramento é inserido. Na extremidade do cabo protegido é alocado uma esfera para evitar a geração de corona.

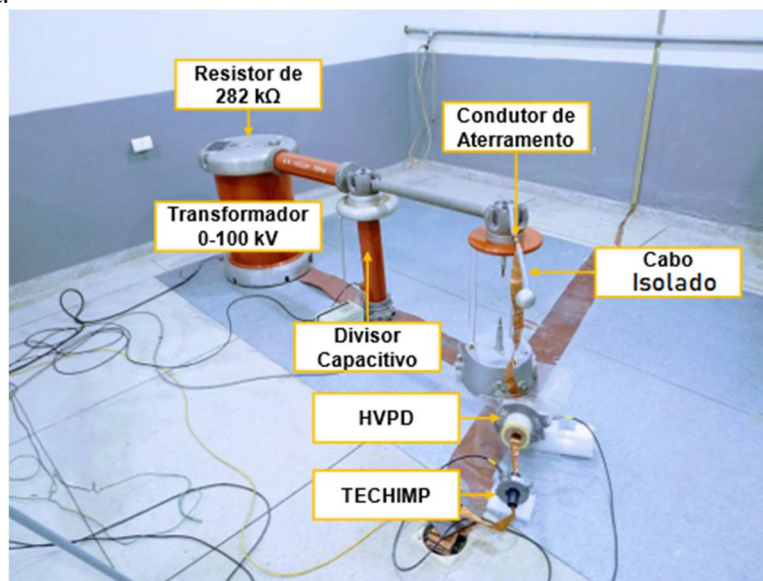


Figura 8. Arranjo para geração de Descargas Parciais no cabo isolado.

Na configuração do cabo protegido foram realizadas 200 aquisições de ciclos da tensão aplicada com os pulsos de descargas adquiridos em cada HFCT.

2.4 Filtragem wavelet

Uma das principais dificuldades no diagnóstico por DP é o ruído, especialmente em medições online. Segundo Carvalho et al. (2015), o Domínio Wavelet é o mais eficaz para separar sinais pulsantes do ruído branco, utilizado neste trabalho. A filtragem via Transformada Wavelet (TW) depende da escolha da wavelet adequada. Neste estudo, foi utilizado o filtro ótimo baseado em seleção de wavelet por energia (EBWS), com 8 níveis, apresentando menor distorção, como ilustrado na Figura 9.

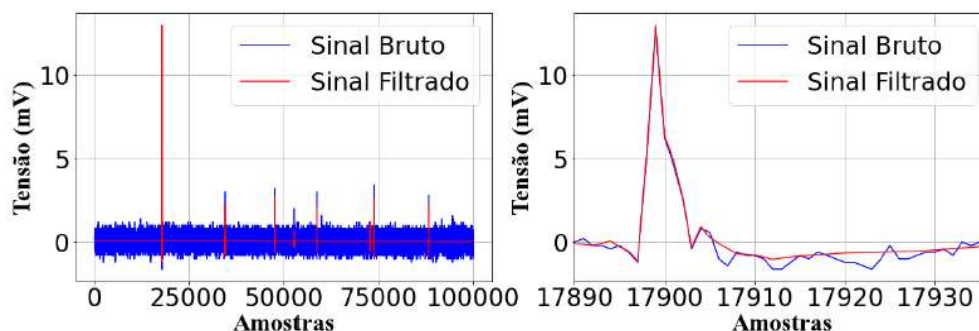


Figura 9. Filtragem com a WM selecionada pelo método EBWS.

2.5 Separação dos pulsos

Na etapa de preparação dos dados é necessário identificar e extrair os pulsos de descarga. Para isso, o nível de ruído da medição deve ser identificado e os pulsos que excederem esse nível devem ser armazenados em vetores de dados, que serão utilizados posteriormente na extração de características e nos treinamentos dos modelos.

O algoritmo implementado tem como objetivo percorrer toda a aquisição, verificando a amplitude do sinal. Ao identificar uma elevação abrupta nesta amplitude (caracterizando a ocorrência de um pulso), o algoritmo salva então uma janela de 100 pontos anteriores até a ocorrência do pulso e 500 pontos após a ocorrência, totalizando assim uma janela de 600 pontos para cada pulso. Sendo a aquisição realizada com 125 Ms/s, a janela de tempo é então de 8ns, resultando em um tempo de 4.8μs, caracterizado como suficiente para detecção completa do pulso de DP.

2.6 Extração dos atributos e separação das fontes

O método cromático realiza um agrupamento de fontes de descargas parciais em 3D a partir de um centroide relacionado com a energia do sinal (E_b), a frequência angular característica (ω_c) e a largura de banda RMS (B). O algoritmo de separação cromático foi então implementado para extração de atributos conforme o método HLS. A extração de atributos foi realizada por meio da implementação das Eqs. 1, 2 e 4. Como os pulsos estão no domínio do tempo, aplicou-se a Transformada Rápida de Fourier para tornar o sinal aplicável no domínio da frequência.

$$E_b = \int |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int |F(\omega)|^2 d\omega \quad (1)$$

onde $F(\omega)$ é a transformada de Fourier de $f(t)$, ω é a frequência e t o tempo.

$$\omega_c = \frac{\int \omega |F(\omega)|^2 d\omega}{E_b} \quad (2)$$

que é a energia normalizada em relação a E_b . Dividindo por 2π , encontra-se a frequência angular característica em Hz.

$$\omega_c = \frac{\int \omega |F(\omega)|^2 d\omega}{2\pi E_b} \quad (3)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{E_b} \int (\omega - \omega_c)^2 |F(\omega)|^2 d\omega} \quad (4)$$

2.7 Classificação das fontes

Antes do treinamento, os atributos cromáticos foram padronizados, conforme apresentado na Tabela 1, com base exclusivamente nos dados de treinamento, evitando que informações estatísticas do conjunto de teste influenciassem o ajuste dos modelos. Para reduzir o risco de vazamento de dados, a divisão entre treinamento e teste foi realizada por aquisição experimental, e não por pulsos individuais. Dessa forma, pulsos provenientes de uma mesma aquisição permanecem integralmente no mesmo subconjunto. Essa estratégia torna a avaliação mais rigorosa, pois evita que sinais altamente semelhantes, obtidos sob a mesma condição experimental, sejam utilizados simultaneamente no treinamento e no teste.

Tabela 1. Entradas padronizadas e rotuladas.

Variáveis	Rótulo gerado
Corona: 6 amostras + cabo isolado	Corona (0)
Cuba de óleo: Amostra 1 + Amostra	Cuba (1)
DP Interna: Amostra 1 + Amostra 2	DP Interna (2)
DP Superficial: Amostra 1 + Amostra 2	DP Superficial (3)

O desempenho dos classificadores foi avaliado por meio de matriz de confusão para visualização melhor por classe.

3 Resultados e discussões

3.1 Separação das fontes

As fontes foram separadas usando o método cromático apresentado no gráfico da Figura 10. Embora haja sobreposição entre alguns grupos, o método permitiu a separação das fontes de DP.

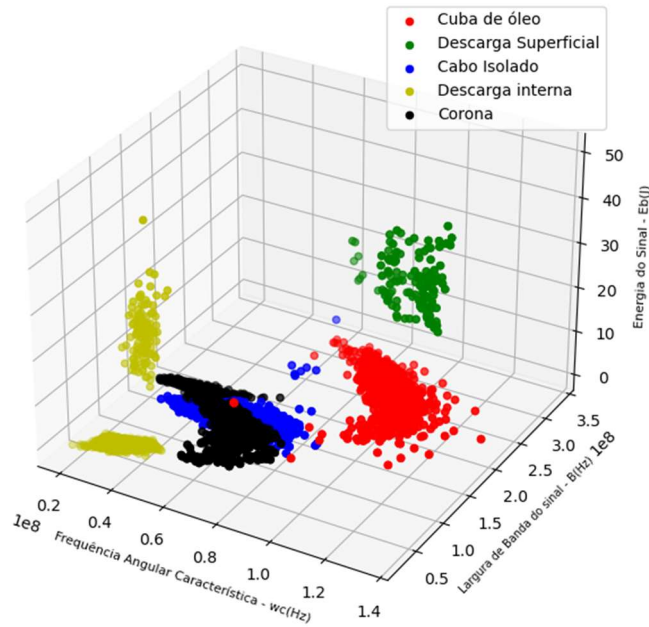


Figura 10. Separação das fontes de Descargas Parciais utilizando o método cromático.

O gráfico da Figura 10 mostra que os grupos de DP podem ser diferenciados com pouca sobreposição usando o método cromático. Ao analisar as variáveis extraídas, observou-se que as medições em cabo isolado possuem atributos semelhantes aos de corona, indicando que essas medições representam descargas do tipo corona. A Figura 11 ilustra a separação das fontes, considerando as medições em cabo isolado como coronas.

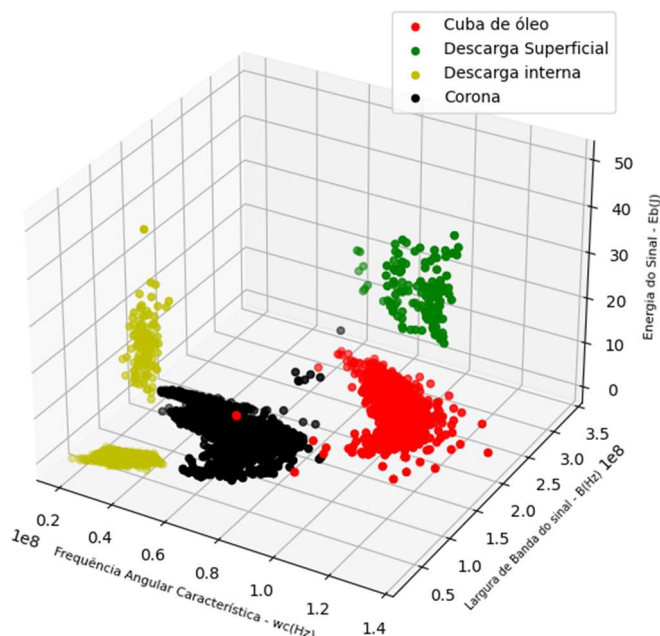


Figura 11. Separação das fontes de Descargas Parciais utilizando o método cromático (cabo isolado = corona).

A representação tridimensional dos atributos cromáticos evidenciou a formação de agrupamentos associados às fontes de descarga investigadas. As classes apresentaram padrões distintos principalmente em função da distribuição de energia e da frequência característica dos pulsos, indicando que os atributos extraídos preservam informações relevantes sobre os mecanismos de descarga.

As descargas internas apresentaram diferenças principalmente relacionadas à energia dos pulsos. Em particular, a amostra com dois defeitos no dielétrico exibiu valores de energia superiores aos observados para a amostra com um defeito, sugerindo influência da configuração do defeito na intensidade e na distribuição espectral da atividade de descarga.

3.2 Classificação das fontes

As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados de cada classificador, onde pode-se observar que ambos obtiveram uma precisão máxima no processo de classificação de fontes, tendo como entrada os parâmetros extraídos utilizando o método cromático.

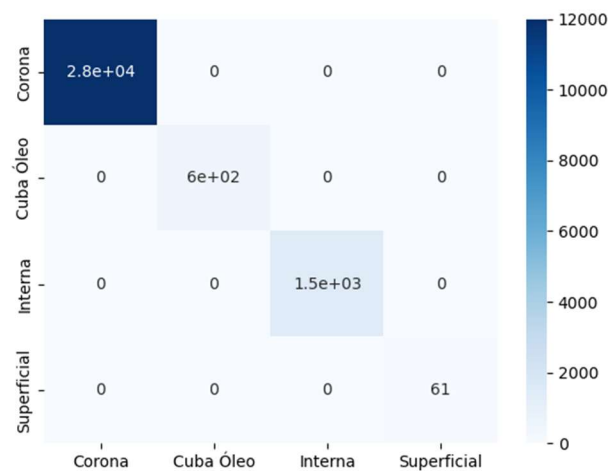


Figura 12. Matriz de confusão (Árvore de Decisão).

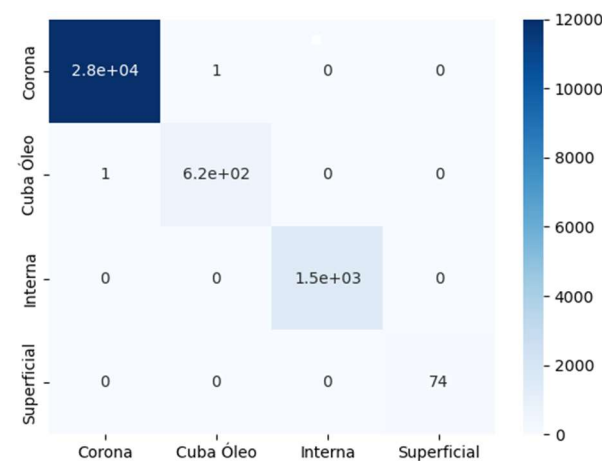


Figura 13. Matriz de confusão (SVM).

As Figuras 12 e 13 apresentam as matrizes de confusão obtidas pelos classificadores Árvore de Decisão e Máquina de Vetores de Suporte, respectivamente. Para Árvore de decisão, observa-se que todas as amostras foram alocadas na diagonal principal, sem registros de classificações incorretas entre as classes Corona, Cuba de Óleo, Interna e Superficial. Esse resultado indica que, para o conjunto de teste adotado, os atributos cromáticos extraídos dos sinais HFCT apresentaram capacidade discriminante suficiente para separar as fontes de descargas parciais analisadas.

A classe Corona concentrou o maior número de amostras, seguida pelas classes Interna, Cuba de Óleo e superficial. Ainda assim, os dois classificadores identificaram corretamente as ocorrências, errando apenas 1 amostra de corona e cuba de óleo, das classes minoritárias, incluindo a classe Superficial. Dessa forma, as matrizes de confusão evidenciam que a representação baseada em energia normalizada,

frequência característica e largura de banda RMS permitiu distinguir os padrões associados às diferentes fontes de descarga nas condições laboratoriais avaliadas.

4 Conclusões

Este trabalho avaliou a aplicação de atributos cromáticos extraídos de sinais de descargas parciais medidos por sensores HFCT para a discriminação de diferentes fontes de descarga. A metodologia integrou filtragem baseada em wavelets, segmentação de pulsos, extração de energia normalizada, frequência característica e largura de banda RMS, além da aplicação de classificadores baseados em Árvore de Decisão e Máquina de Vetores de Suporte.

Os resultados experimentais indicaram que os atributos cromáticos podem representar diferenças relevantes entre os pulsos associados às fontes de descarga investigadas. A visualização tridimensional evidenciou a formação de agrupamentos com padrões espectrais distintos, enquanto os classificadores demonstraram potencial para a identificação automatizada das classes sob condições laboratoriais controladas.

Entretanto, os resultados devem ser interpretados considerando as limitações do estudo, especialmente a diferença no número de exemplos entre as classes, a necessidade de validação por aquisição experimental e a ausência de dados obtidos em condições reais de operação. A proximidade observada entre os sinais do cabo isolado e os sinais de corona também indica a necessidade de análises complementares para confirmar a natureza física desses eventos.

Como trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a base experimental, incluir diferentes níveis de ruído e condições de operação, validar o método com dados independentes e investigar a aplicação da metodologia em medições de campo. Essas etapas serão necessárias para avaliar a robustez e a capacidade de generalização da abordagem em sistemas reais de monitoramento de isolamento.

Agradecimentos

O(s) autor(es) agradece(m) ao Laboratório de Alta Tensão (LAT) por todo apoio estrutural e técnico e a Universidade Federal de Campina Grande pelo apoio institucional.

Referências bibliográficas

- Ahmed, A (1994) ‘Intelligent remote chromatic processing’. Doctoral thesis, University of Liverpool, Liverpool.
- Arora, R and Mosch, W (2011) ‘High voltage and electrical insulation engineering’. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Carvalho, AT, Lima, ACS, Cunha, CFFC and Petraglia, M (2015) ‘Identification of partial discharges immersed in noise in large hydro-generators based on improved wavelet selection methods’, *Measurement*, v. 75, p. 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.050>
- Cosgrave, JA, Russell, PC, Hall, BSB and Jones, GR (1997) ‘Optoacoustic monitoring of electric arcs in high voltage circuit breakers’. In: *International Conference on Switching Arcs*. Xi’an: Xi’an Jiaotong University, p. 598–605.
- De Castro, BA, Brunini, D, Baptista, FG, Andreoli, AL and Ulson, JAC (2017) ‘Assessment of macro fiber composite sensors for measurement of acoustic partial discharge signals in power transformers’, *IEEE Sensors Journal*, v.17, n.18, p.6090–6099. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2735858>.
- Han, Y and Song, YH (2003) ‘Condition monitoring techniques for electrical equipment: a literature survey’, *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 1, p. 4–13. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2002.801425>
- Hao, L and Lewin, PL (2008) ‘Identification of multiple partial discharge sources’. In: *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. Beijing, China, p. 118–121.
- IEC (2000) *High-voltage test techniques: partial discharge measurements*. Geneva: International Electrotechnical Commission.

IEEE Power Engineering Society Insulated Conductors Committee (2007) IEEE guide for partial discharge testing of shielded power cable systems in a field environment. New York, NY: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

James, RE and Su, Q (2008) ‘Condition assessment of high voltage insulation in power system equipment’. Stevenage: Institution of Engineering and Technology.

Jones, GR, Russell (1993) ‘Plasma monitoring using chromatically processed optical signals’. In: 21st International Conference on Phenomena in Ionised Gases III. Bochum, Germany, p. 24–33.

Jones, GR (1995) Electric arc monitoring utilising intelligent optical fibre systems. In: 11th International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Tokyo, Japan, v. 2, p. 504–512.

Macêdo, ECT (2014) Metodologia para a classificação de descargas parciais utilizando redes neurais artificiais. Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

Russell, JC (1993) ‘Chromatic modulation based metrology’, *Pure and Applied Optics*, v. 2, p. 87–110.

Weiss, LG (1994) ‘Wavelets and wideband correlation processing’, *IEEE Signal Processing Magazine*, p. 13–32.

Zhang, J, Jones, GR, Spencer, JW, Jarman, P, Kemp, IJ, Wang, Z, Lewin, PL and Aggarwal, RK (2005) ‘Chromatic classification of RF signals produced by electrical discharges in HV transformers’, *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, v. 152, n. 5, p. 629–634. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:20045076>