

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

**Desenvolvimento de Solução Técnica com Integração
de *Software* e *Hardware* para Medição, Separação e
Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos
Elétricos**

Jansen Paula Villibor

Itajubá, 11 de Abril de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

Jansen Paula Villibor

**Desenvolvimento de Solução Técnica com Integração
de *Software* e *Hardware* para Medição, Separação e
Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos
Elétricos**

**Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para
obtenção do título de Doutor em Ciências em
Engenharia Elétrica**

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes

Itajubá, 11 de Abril de 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

Jansen Paula Villibor

**Desenvolvimento de Solução Técnica com Integração
de *Software* e *Hardware* para Medição, Separação e
Identificação de Descargas Parciais em Equipamentos
Elétricos**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto

Prof. Dr. Gustavo Paiva Lopes

Prof. Dr. Ivan Paulo de Faria

Prof. Dr. Tarso Vilela Ferreira

Prof. Dr. José Feliciano Adami

Abril de 2025

Itajubá

Dedicatória

Dedico esta tese à minha família, e não tinha como ser de outra maneira. Quando crescemos em um ambiente que nutre o amor pela família, com pessoas que se dedicam em fazer o melhor pelos que amamos, fica fácil entender os sacrifícios pelos quais minha família passou e pelos quais tenho que passar. É por isso que dedico este trabalho ao meu pai, Mauricio, e minha mãe, Dorotea, que sacrificaram de suas vontades para fazer o melhor por mim e minha irmã. Dedico também à minha irmã Geice, que sempre foi um grande exemplo em minha vida. E dedico, em especial, à família que eu e minha esposa construímos. Gi Simões, obrigado por me apoiar em seguir em frente, com seu amor incondicional a mim e aos nossos filhos; obrigado aos meus filhos, Breno Mauricio e Jansen Pedro, os verdadeiros motivos de minha busca pelo aperfeiçoamento e por um futuro melhor. Fazer o melhor para vocês é o que dá sentido a esta vida.

Agradecimentos

- A Deus, por me dar saúde e serenidade para enfrentar os desafios e finalizar este trabalho.
- Aos meus pais, Mauricio e Dorotea, pelo amor em cada conversa, em suas visitas e pela confiança depositada em mim em todos estes anos.
- À minha esposa Gislene Simões, pela parceria ao longo destes 20 anos juntos, pelo amor e dedicação com nossa família, por me aturar nos momentos de estresse, compreender as dificuldades cotidianas e pelo amor que sempre demonstrou ao fazer o melhor pela nossa família.
- Aos meus filhos Breno Mauricio e Jansen Pedro, por entenderem a minha ausência em alguns momentos, sem cobrar nada de mim, além de amor.
- À minha irmã Geice, pela forte amizade entre nós, pelos conselhos, pelo apoio e por ser um guia em minha vida.
- Aos professores Estácio Tavares Wanderley Neto e Gustavo Paiva Lopes, pela orientação, pelos ensinamentos, e, principalmente, pela confiança conferida a mim durante o desenvolvimento do meu doutoramento.
- Aos meus amigos do LAT-EFEI, Gabriel e Matheus, pelas discussões técnicas, pela amizade e parceria.
- À PSI, por disponibilizar alguns dos equipamentos para realização deste trabalho.
- À CAPES, pelo suporte financeiro concedido para realização desta pesquisa.

Resumo

Os custos provenientes de falhas de equipamentos elétricos e da indisponibilidade de fornecimento de energia têm impactos diretos sobre o resultado operacional das concessionárias e, portanto, melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica é uma das razões técnicas para a realização de investimentos no sistema elétrico, e, principalmente, em subestações. Investimentos em sistemas de medição e monitoramento permitem realizar o diagnóstico mais assertivo da isolação de equipamentos e são essenciais para melhorar os protocolos de manutenção baseados na condição do equipamento, e, assim, aumentar a confiabilidade e reduzir a ocorrência de falhas. Neste contexto, o diagnóstico da qualidade da isolação de equipamentos por meio da medição de descargas parciais (DP) é um recurso valioso e que tem sido amplamente empregado. Entretanto, existem dificuldades em analisar os sinais medidos, pois, durante medições de DP, é comum, que mais de um fenômeno ocorra simultaneamente, sejam eles ruídos ou múltiplas fontes de descargas parcial, prejudicando a análise e a posterior classificação dos fenômenos encontrados. Para contribuir com a resolução deste problema, objetiva-se o desenvolvimento de uma solução que permita realizar assertivamente a medição, separação e classificação dos tipos básicos de descargas parciais, geralmente, encontrados durante medições de DP em equipamentos elétricos, que são: descargas tipo corona, superficial e interna. A solução proposta é composta por um *Hardware* integrado a um *software* capaz de medir, separar e classificar descargas parciais. A solução conta com um hardware digitalizador adequado para medições e que possui flexibilidade para ser utilizado com o método convencional (IEC 60270) e métodos não-convencionais. O *software* permite o controle das configurações de medição com a aplicação de técnicas de mitigação de ruído e extração de pulsos de DP, além de permitir separação dos fenômenos medidos em diferentes padrões PRPD (*Phase Resolved Partial Discharges*) com um mapa de Tempo-Frequência (*T-F Map*). Por último, o *software* possui um mecanismo de identificação baseado em Aprendizado de Máquinas (*Machine Learning*), conhecido como Sistema de Inferência *Fuzzy*. A validação das medições foi realizada com um simulador de DP, com seus resultados comparados com um sistema comercial. A separação de descargas parciais foi avaliada com os pulsos de DP medidos no estator de um gerador e medições de fontes de descargas parciais simultâneas fornecidas pelo simulador. Finalmente, o mecanismo de identificação foi validado para as categorias de DP: corona, superficial e interna, com um conjunto de dados de teste proveniente do banco de dados desenvolvido. Os resultados obtidos indicam que a solução proposta foi capaz de medir adequadamente os sinais de descargas parciais, produzindo padrões PRPD equivalentes aos obtidos com os sistemas comerciais com diferenças percentuais menores que 4% para os parâmetros avaliados, inclusive, na medição de carga aparente na qual o erro médio foi de 1,3%. A separação com o *T-F Map*, apesar de ter limitações, teve desempenho satisfatório e conseguiu separar os fenômenos sobrepostos. O mecanismo de identificação conseguiu identificar e classificar os três tipos básicos de DP com acurácia de 95,4%.

Palavras-Chave: Descargas Parciais, Diagnóstico da Isolação, Medição de Descargas Parciais, Separação de Descargas Parciais, Classificação de Descargas Parciais, Aprendizado de Máquinas, Sistema de Inferência Fuzzy

Abstract

The costs from electrical equipment failures and the unavailability of the power supply directly impact the utilities' operational results. Therefore, improving the reliability of the electricity supply is one of the technical reasons for investing in the electrical power system, especially power substations. Investments in measurement and monitoring systems allow a more assertive diagnosis of equipment insulation and are essential to improve condition-based maintenance protocols, increasing reliability and minimizing fault occurrence. In this context, diagnosing the equipment insulation quality with partial discharges (PD) measurements is a valuable resource that is widely used. However, there are difficulties in analyzing the measured signals since, during PD measurements, it is common for more than one phenomenon to co-occur, whether noise or multiple PD sources, compromising the analysis and subsequent identification and classification of the PD activities. In this light, to contribute to solving this problem, the objective is to develop a cost-effective solution that allows for assertively measuring, separating, and classifying the basic types of partial discharges found during PD measurements in electrical equipment: corona, superficial, and internal. The proposed solution consists of hardware integrated with software capable of measuring, separating, and classifying partial discharges. The solution has digitizing hardware suitable for PD measurements and flexibility to work with conventional (IEC 60270) and non-conventional methods. The software allows the control of measurement settings by applying noise mitigation techniques and PD pulse extraction; it also allows the separation of the measured phenomena in different PRPD (Phase Resolved Partial Discharges) patterns with a Time-Frequency Map (T-F Map). The measurement validation process, which includes measurements with a PD simulator, demonstrates the solution's reliability. The work evaluated the separation of partial discharges with the PD pulses measured in the stator of a generator and measurements of simultaneous partial discharge sources provided by the PD simulator. Finally, this work validates the results of the identification mechanism for PD categories, corona, surface, and internal, with a test dataset extracted from the general database developed. The results indicate that the proposed solution could adequately measure the partial discharge signals, producing PRPD patterns equivalent to those obtained with the commercial system, with deviations of less than 4% for the parameters evaluated, as well as for the measurement of apparent charge, in which the average error was 1.3%. Despite its limitations, the separation provided by the T-F Map was satisfactory and could separate overlapping PD. The identification mechanism classified the three basic PD types with an accuracy of 95.4%.

Keywords: Partial Discharges, Insulation Diagnosis, Partial Discharges Measurements, Partial Discharges Classification, Partial Discharges Identification, Machine Learning, Fuzzy Inference System.

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo capacitivo representativo de DP. Fonte: adaptada de [1].	26
Figura 2 - Circuito equivalente capacitivo - modelo abc. Fonte: adaptada de [1].	26
Figura 3 - Modelo de dipolo representativo de DP. Fonte: adaptada de [1].	27
Figura 4 - Elementos do circuito equivalente do modelo de dipolo. Fonte: adaptada de [1].	27
Figura 5 – Fotografias de canais de descarga: (a) ar ambiente, (b) óleo isolante e (c) PMMA. Fonte: [1].	29
Figura 6 – Circuito equivalente representativo de descargas parciais, com base no modelo capacitivo [6].	29
Figura 7 – Comportamento das descargas parciais em um material isolante sólido [6].	31
Figura 8 – Subsistemas de um sistema de medição de descargas parciais convencional. Fonte: adaptada de [11].	32
Figura 9 – Sistema de medição de descargas parciais convencional do LAT-EFEI.	35
Figura 10 – Exemplo de padrão PRPD de uma descarga parcial do tipo corona com eletrodos tipo ponta (alta tensão) e plano (terra) com um sistema de medição convencional. Fonte: Adaptada de [45].	45
Figura 11 – Exemplo de gráfico $\varphi-q-n$.	45
Figura 12 – (a) Padrão PRPD; (b) <i>T-F Map</i> correspondente ao padrão PRPD da Figura 12 (a). Adaptada de [42].	47
Figura 13 – (a) Padrão PRPD completo; (b) <i>T-F Map</i> correspondente ao padrão PRPD da Figura 13 (a); (c) Padrão PRPD para os pulsos na região A; Padrão PRPD para os pulsos na região B. Adaptada de [48].	48
Figura 14 – Fluxograma de um Sistema de Inferência Fuzzy.	53
Figura 15 – Exemplo de fuzzyficação de um parâmetro P, relacionado à atividade de DP, com atributos linguísticos BAIXA (B), MÉDIA (M), ALTA (A).	54
Figura 16 - Placa de aquisição <i>PicoScope</i> , modelo 2208B. Fonte: [87]	64
Figura 17 - (1) Capacitor de Acoplamento, (2) Quadripolo.	64
Figura 18 - Circuito de medição com o método convencional.	65
Figura 19 - (a) HFCT, (b) LFCT. Fonte: [88] e [89].	65
Figura 20 – Circuito de medição com o método não-convencional empregando HFCT e LFCT.	66
Figura 21 - Interface de medição do <i>software</i> PDM.	69
Figura 22 - Interface de separação de DP do <i>software</i> PDM (antes da seleção de <i>clusters</i>).	71

Figura 23 - Interface de separação de DP do <i>software</i> PDM (após a seleção de <i>clusters</i>)......	71
Figura 24 - Interface de classificação/identificação de DP do <i>software</i> PDM.....	73
Figura 25 - Fluxograma simplificado de integração entre <i>hardware</i> e <i>software</i> e interfaces do PDM	75
Figura 26 – Procedimento de eliminação e extração de pulsos de DP: (a) Sinal de PD completo com ruído; (b) Sinal de PD completo sem ruído; (c) Ampliação da região próxima a 10 μ s; (d) Pulso de DP extraído.....	82
Figura 27 – Separação de Sinais no Pós-Processamento: (a) Padrão PRPD completo de uma medição de DP; (b) <i>T-F Map</i> do padrão PRPD completo; (c) <i>T-F Map</i> com separação dos grupos distintos nas cores verde e vermelho; (d) Sub-Padrão PRPD para o grupo de pulsos em vermelho Figura 27 (c); (e) Sub-Padrão PRPD para o grupo de pulsos em verde Figura 27 (c).....	84
Figura 28 – Representação esquemática da designação de polaridade com base no campo elétrico local e do sinal da amplitude com base no tipo de medição: (a) Circuito de medição direto; (b) Circuito de medição indireto.....	85
Figura 29 – Representação esquemática da designação sequencial do intervalo de fase com base na polaridade e circuito de medição: (a) Circuito de medição direto; (b) Circuito de medição indireto.	86
Figura 30 - Exemplo de padrão PRPD de DP tipo interna com medição direta (não-convencional).....	92
Figura 31 – Exemplo de padrão PRPD de DP do tipo superficial com medição direta (não-convencional).....	94
Figura 32 – Exemplo de padrão PRPD de DP tipo corona com eletrodos tipo ponta (alta tensão) e plano (terra), sem sobretensão, com medição direta (não-convencional).....	95
Figura 33 – Representação esquemática simplificada do FIS.	98
Figura 34 - Exemplo de saída do algoritmo de identificação do PDM.	98
Figura 35 – <i>PD Simulator</i>	100
Figura 36 – (a) Detalhe interno do <i>PD Simulator</i> ; (b) Conexão do HFCT ao eletrodo aterrado.	100
Figura 37 – (a) Parte superior do <i>Aquila</i> ; (b) Canais de medição do <i>Aquila</i>	101
Figura 38 – Imagem representativa da conexão entre <i>PD Simulator</i> , <i>Aquila</i> e <i>PDPro</i>	101
Figura 39 – Sistema de medição <i>Haefely</i> : (a) Capacitor de acoplamento; (b) Vista frontal do DDX 9121b.....	102
Figura 40 – Calibrador de DP do sistema <i>Haefely</i>	103

- Figura 41 – Circuito de medição do PDM: (1) Canal de medição tensão; (2) Canal de medição de DP, (3) Cabo de comunicação USB; (4) *Software* PDM. 103
- Figura 42 - Padrões PRPD medidos para DP tipo corona: (a) Padrão PRPD medido com sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_CORONA 01) ; (b) Padrão PRPD medido com a solução proposta (ref. PDM_CORONA 01). 104
- Figura 43 – Superposição dos padrões PRPD para DP tipo corona medidos com o sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_CORONA 01) e com a solução proposta (ref. PDM_CORONA 01). 104
- Figura 44 - Padrões PRPD medidos para DP tipo superficial: (a) Padrão PRPD medido com sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_SUP 01) ; (b) Padrão PRPD medido com a solução proposta (ref. PDM_SUP 01). 106
- Figura 45 – Superposição dos padrões PRPD para DP tipo superficial medidos com o *TechImp* (ref. TECHIMP_SUP 01) e com a solução proposta (ref. PDM_SUP 01). 106
- Figura 46 – Padrões PRPD medidos para DP tipo interna: (a) Padrão PRPD medido com sistema *TechImp*; (b) Padrão PRPD medido com a solução proposta. 108
- Figura 47 – Superposição dos padrões PRPD para DP tipo interna medidos com o *TechImp* (ref. TECHIMP_INT 01) e com a solução proposta (ref. PDM_INT 01). 108
- Figura 48 - Conexão do calibrador de DP ao capacitor de acoplamento do sistema *Haefely*. 110
- Figura 49 – Estator e sistema de medição: (a) Visão parcial do estator; (b): (1) Medidor de descargas parciais (*Aquila*); (2) Capacitor de acoplamento; (3) Quadripolo. Adaptado de [91]. 113
- Figura 50 – Padrão PRPD e *T-F Map*: (a) Padrão PRPD completo, adaptada de [91]; (b) *T-F Map* construído com o PDM, relativo ao padrão PRPD da Figura 50 (a). 113
- Figura 51 – Separação de *clusters* e sub-padrões PRPD: (a) *T-F Map* com separação de *clusters* nas cores vermelho, azul e verde; (b) Sub-padrão PRPD do *cluster* vermelho; (c) Sub-padrão PRPD do *cluster* azul; (d) Sub-padrão PRPD do *cluster* verde. 114
- Figura 52 - Separação de DP na presença descargas tipo interna e corona; (a) Padrão PRPD completo; (b) *T-F Map* referente ao padrão PRPD completo; (c) *T-F Map* com separação de *clusters* nas cores verde e vermelho; (d) Sub-padrão PRPD do *cluster* de cor verde (DP tipo corona); (e) Sub-padrão PRPD do *cluster* de cor vermelho (DP tipo interna). 116
- Figura 53 - Matriz de confusão para os resultados de identificação do conjunto de teste. 119

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Faixa de frequência recomendada pela IEC 60270 para os parâmetros de frequência de instrumentos de medição em banda larga. Fonte: [11].	33
Tabela 2 – Faixa de frequência recomendada pela IEC 60270 para os parâmetros de frequência de instrumentos de medição em banda estreita. Fonte: [11].	33
Tabela 3 – Valores dos parâmetros φ_{min_neg} , φ_{max_neg} e DP_{max_neg} dos padrões PRPD gerados com os dois sistemas para DP tipo corona.	105
Tabela 4 – Média dos valores de φ_{min_neg} , φ_{max_neg} e DP_{max_neg} e desvio percentual dos valores médios para DP tipo corona.	105
Tabela 5 – Valores dos parâmetros φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} dos pulsos de polaridade positiva e negativa dos padrões PRPD obtidos com os dois sistemas para DP tipo superficial.	107
Tabela 6 – Média dos valores de φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} , para os pulsos de polaridade positiva e negativa, e desvio percentual dos valores médios para DP tipo superficial.	107
Tabela 7 – Valores dos parâmetros φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} dos pulsos de polaridade positiva e negativa dos padrões PRPD obtidos com os dois sistemas para DP tipo interna.	109
Tabela 8 – Média dos valores de φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} , para os pulsos de polaridade positiva e negativa, e desvio percentual dos valores médios para DP tipo interna.	110
Tabela 9 – Valores de carga aparente medidos e erro percentual.	111
Tabela 10 - Parâmetros estatísticos obtidos com os resultados de identificação do conjunto de teste.	119

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACF	Autocorrelation Function (Função de Autocorrelação)
AE	Autoencoder (Codificador Automático)
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANN	Artificial Neural Network (Rede Neural Artificial)
BPNN	Backpropagation Neural Network (Rede Neural de Retropropagação)
CIGRE	Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos
CNN	Convolutional Neural Network (Rede Neural Convolutiva)
DAE	De-Noise Autoencoder (Codificador Automático Sem Ruído)
DL	Deep Learning (Aprendizado Profundo)
DP	Descargas Parciais
DWT	Discrete Wavelet Transform (Transformada Wavelet Discreta)
EMD	Empirical Mode Decomposition (Decomposição Modal Empírica)
EEMD	Ensemble Empirical Mode Decomposition (Decomposição Modal Empírica de Conjunto)
EMI	Electromagnetic Interference (Interferência Eletromagnética)
ENN	Ensemble Neural Network (Rede Neural de Conjunto)
FDAF	Frequency Domain Adaptive Filter (Filtro Adaptativo no Domínio da Frequência)
FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
FIS	Fuzzy Inference System (Sistema de Inferência Fuzzy)
FL	Fuzzy Logic (Lógica Fuzzy)
GIS	Gas Insulated Substation (Subestação Isolada a Gás)
HF	High Frequency (Alta Frequência)

HFCT	High Frequency Current Transformer (Transformador de Corrente de Alta Frequência)
HPF	High Pass Filter (Filtro Passa Alta)
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IMF	Intrinsic Mode Function (Função Modal Intrínseca)
LAT-EFEI	Laboratório de Alta Tensão Prof. Manuel Luís Bandeira Martinez da UNIFEI
LPF	Low Pass Filter (Filtro Passa Baixa)
LSTM	Long Short-Term Memory (Memória de Curto Prazo Longa)
ML	Machine Learning (Aprendizado de Máquinas)
MM	Mathematical Morphology (Morfologia Matemática)
NBR	Norma Brasileira aprovada pela ABNT
PDM	Partial Discharges Meter (Medidor de Descargas Parciais)
PMMA	Polymethyl Methacrylate (Polimetilmetacrilato)
PRPD	Phase-Resolved Partial Discharges (Padrão de Descargas Parciais em Resolução de Fase)
RF	Radio Frequency (Rádio Frequência)
RNN	Recurrent Neural Network (Rede Neural Recorrente)
SAE	Sparse Autoencoder (Auto Codificador Esperso)
SDAE	Stacked De-Noise Autoencoder (Codificador Automático Sem Ruído Empilhado)
SNR	Signal to Noise Ratio (Relação Sinal por Ruído)
SVM	Support Vector Machine (Máquina de Suporte de Vetores)
TDR	Time Domain Reflectometry (Reflectometria no Domínio do Tempo)
UHF	Ultra High Frequency (Ultra Alta Frequência)

UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
VAE	Variational Autoencoder (Codificador Automático Variacional)
VHF	Very High Frequency (Frequência Muito Alta)
VLD	Valor Limiar de Descarga
WT	Wavelet Transform (Transformada Wavelet)
XLPE	Cross-Linked Polyethylene (Polietileno Reticulado)
VP	Verdadeiro-Positivo
FP	Falso-Positivo
VN	Verdadeiro-Negativo
FN	Falso-Negativo

Lista de Símbolos

C_A - Capacitância entre os eletrodos do objeto sob ensaio

C_{B1}, C_{B2} - capacitâncias representativas da porção sem DP localizada entre a cavidade e os eletrodos

C_C - Capacitância da cavidade

F_c - Centelhador (*Spark Gap*)

U - Tensão aplicada em frequência industrial

C_1 - Capacitor representativo de uma cavidade na isolação

C_2 - Capacitor que representa o material isolante em torno da cavidade

C_3 - Capacitor que representa o material isolante restante

S - Centelhador que representa as descargas parciais do capacitor C_1

U_1 - Tensão sob do capacitor C_1

Q_2 - Carga do capacitor C_2 antes da ocorrência da descarga

$Q_{2_após}$ - Carga do capacitor C_2 após da ocorrência da descarga

ΔQ - Diferença de carga

$u(t)$ - Tensão aplicada em frequência industrial

$u_{10}(t)$ - Tensão sob o capacitor C_1 sem a ocorrência de DP

$u_1(t)$ - Tensão sobre o capacitor C_1 com a ocorrência de DP

u_z - Tensão de início das descargas parciais

t_i - Instante de tempo no qual ocorre a descarga parcial.

U_{\sim} - Tensão representativa da fonte de alta tensão

C_a - Capacitor representativo da capacitância do objeto sob ensaio

C_k - Capacitor de acoplamento

Z_{mi} - Impedância de medição

CD - Dispositivo de acoplamento

CC - Cabos de conexão

MI - Instrumento de medição

Z - Filtro de alta tensão

f_1 - Frequência de corte inferior

f_2 - Frequência de corte superior

Δ_f - Largura de banda

f_m - Frequência central de um instrumento de banda estreita

k - Fator de calibração para medição em valores de carga aparente

$p(t)$ - Pulso de DP no domínio do tempo

t - Tempo

T - Tempo máximo de t

$p_n(t)$ - Pulso $p(t)$ normalizado

t_0 - Referência de tempo

T_{eq} - Tempo de duração equivalente do pulso

F_{eq} - Largura de banda equivalente do pulso

$S_n(f)$ - Transformada de Fourier de $p_n(t)$

f - Frequência

$H_n(\Phi)$ - Distribuição por contagem de pulsos em relação ao ângulo de fase

$H_{qn}(\Phi)$ - Distribuição com base na altura média dos pulsos de DP em relação ao ângulo de fase

$H_{qm}(\Phi)$ - Distribuição com base na altura máxima dos pulsos de DP em relação ao ângulo de fase

Φ_{med} - Valor médio da distribuição dos ângulos de fases dos pulsos

S_k - Assimetria

K_u - Fator de Kurtosis

α - Fator de escala da função de Weibull

β - Fator de forma da função de Weibull

β_{pos} - Fator de forma da função de Weibull relacionado à distribuição das amplitudes dos pulsos de polaridade positiva

β_{neg} - Fator de forma da função de Weibull relacionado à distribuição das amplitudes dos pulsos de polaridade negativa

φ_{pos} - Ângulo de fase dos pulsos de polaridade positiva

φ_{neg} - Ângulo de fase dos pulsos de polaridade negativa

φ_{min} - Ângulo de fase mínimo

φ_{med} - Ângulo de fase médio

$IDAF$ - Intervalo de distribuição dos ângulos de fase

$IDAF_{pos}$ - Intervalo de distribuição dos ângulos de fase dos pulsos de polaridade positiva

$IDAF_{neg}$ - Intervalo de distribuição dos ângulos de fase dos pulsos de polaridade negativa

N_{pos} - Quantidade de pulsos de polaridade positiva

N_{neg} - Quantidade de pulsos de polaridade negativa

$RPNP$ - Razão entre a quantidade de pulsos de polaridade positiva e negativa, normalizado entre 0 e 1

$S_{k_{pos}}$ - Assimetria da distribuição das amplitudes dos pulsos de polaridade positiva

$S_{k_{neg}}$ - Assimetria da distribuição das amplitudes dos pulsos de polaridade negativa

$\varphi_{min_{pos}}$ - Ângulo de fase mínimo dos pulsos de polaridade positiva

$\varphi_{min_{neg}}$ - Ângulo de fase mínimo dos pulsos de polaridade negativa

$\varphi_{med_{pos}}$ - Ângulo de fase médio dos pulsos de polaridade positiva

$\varphi_{med_{neg}}$ - Ângulo de fase médio dos pulsos de polaridade negativa

Sumário

Dedicatória	III
Agradecimentos	IV
Sumário	XVII
1. Introdução	20
1.1. Objetivos	22
1.2. Estrutura do Texto da Tese.....	22
2. Revisão Bibliográfica e o Estado da Arte.....	24
2.1. Descargas Parciais e Seus Modelos Representativos.....	24
2.2. Medição de Descargas Parciais	28
2.2.1. Sistemas de Medição de Descargas Parciais Convencional (IEC 60270).....	31
2.2.2. Procedimento de Calibração para Medição de Carga Aparente.....	35
2.2.3. Métodos Não-Convencionais de Medição de DP e Análise Comparativa Entre Método Convencional e Não-Convencional	37
2.3. Processamento de Sinais de Descargas Parciais	40
2.3.1. Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas à Sinais de DP	40
2.4. Separação de Descargas Parciais.....	42
2.4.1. Técnicas de Separação de Sinais de Descargas Parciais	43
2.4.2. O Padrão PRPD.....	44
2.4.3. Mapa de Tempo-Frequência (<i>T-F Map</i>).....	46
2.4.4. Considerações Sobre os Métodos de Separação de DP.....	48
2.5. Classificação de Descargas Parciais.....	49
2.5.1. Técnicas de Inteligência Artificial para Classificação de Descargas Parciais	49
2.5.2. Sistema de Inferência Fuzzy	53
2.5.3. Marcadores de Identificação	55
2.6. Estado da Arte	56
2.6.1. Métodos de Medição de Descargas Parciais	57

2.6.2.	Eliminação e Mitigação de Ruídos.....	58
2.6.3.	Separação de Descargas Parciais.....	59
2.6.4.	Classificação de Descargas Parciais.....	60
3.	Solução Técnica para Medição, Separação e Classificação de Descargas Parciais.....	62
3.1.	Solução Proposta	62
3.1.1.	Digitalizador.....	62
3.1.2.	Dispositivos de Medição	64
3.1.3.	<i>Software</i> PDM.....	66
3.1.4.	Funcionamento da Solução Proposta	74
3.2.	Redução de Ruído e Extração de Pulsos de DP	80
3.2.1.	Estratégia Adotada para Eliminação de Ruído e Extração de Pulsos de DP.....	80
3.2.2.	Redução de Ruído e Extração de Pulsos de DP por Valor Limiar de Descarga .	81
3.2.3.	Eliminação de Ruído e Sinais Indesejados Pós-Medição.....	83
3.3.	Designação de Polaridade, Padronização dos Ângulos de Fase e Banco de Dados de Identificação	85
3.3.1.	Designação de Polaridade	85
3.3.2.	Padronização dos Ângulos de Fase	85
3.3.3.	Banco de Dados de Identificação	87
3.4.	Classificação dos Tipos Básicos de Descargas Parciais.....	88
3.4.1.	Estratégia para Classificação de Descargas Parciais.....	88
3.4.2.	Marcadores de Identificação Utilizados como Parâmetros de Entrada do Algoritmo de Identificação.....	89
3.4.3.	Critério de Interpretação para DP tipo Interna	91
3.4.4.	Critério de Interpretação para DP tipo Superficial.....	93
3.4.5.	Critério de Interpretação para DP tipo Corona.....	94
3.4.6.	Sistema de Inferência Fuzzy	95
4.	Análise de Resultados e Validação da Solução Proposta	99
4.1.	Simulador de DP e Sistemas de Medição da Validação das Medições de DP	99

4.1.1.	Sistemas de Medição e Simulador de DP.....	99
4.1.2.	Medição de DP Tipo Corona.....	104
4.1.3.	Medição de DP Tipo Superficial.....	106
4.1.4.	Medição de DP Tipo Interna.....	108
4.1.5.	Medição de DP em Valores de Carga Aparente.....	110
4.1.6.	Considerações Sobre a Medição de DP.....	111
4.2.	Validação da Separação de DP.....	112
4.2.1.	Separação de DP Medidas no Estator de um Gerador Síncrono.....	112
4.2.2.	Separação de DP Medidas com o Simulador.....	115
4.2.3.	Considerações Sobre a Separação de DP.....	117
4.3.	Análise de Resultados e Validação da Classificação de DP.....	117
5.	Conclusões.....	121
5.1.	Produção Bibliográfica.....	123
	Referências.....	124
	Apêndice A - Resultados de Classificação do PDM.....	135

1. Introdução

Há pelo menos cinco décadas a medição de descargas parciais (DP) pelo método elétrico tem sido amplamente aceita como um mecanismo de avaliação da isolação de equipamentos elétricos [1]. Seja em ensaios de aceitação, durante o comissionamento de subestações, ou em equipamentos em operação, avaliar a qualidade da isolação de equipamentos elétricos é uma questão essencial para estabelecimento de procedimento de manutenção preditiva e para garantir confiabilidade ao sistema elétrico.

Os custos provenientes de falhas de equipamentos elétricos e da indisponibilidade de fornecimento de energia têm impactos diretos sobre o resultado operacional das concessionárias e, portanto, melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica é uma das razões técnicas para a realização de investimentos.

A título de exemplo, apesar de não estar correlacionado diretamente à DP, no Amapá em 2020, uma sequência de acontecimentos levou à perda de dois transformadores da subestação Macapá e o conseqüente desligamento de praticamente todo o estado por 21 dias, causando prejuízos intangíveis, significativos, à população afetada [2]. A empresa responsável pela subestação, além dos custos de aquisição dos novos transformadores e das penalizações relativas à impossibilidade do fornecimento de energia, foi multada pelo apagão em mais de 3,5 milhões de reais [3].

De acordo com [4], 31% das falhas em grandes transformadores de potência estão relacionadas à presença de DP na isolação dos enrolamentos e nas buchas de alta tensão. Portanto, investimentos em sistemas de medição e monitoramento permitem realizar o diagnóstico mais assertivo da isolação de equipamentos e são essenciais para melhorar os protocolos de manutenção baseados na condição do equipamento, e assim aumentar a confiabilidade do sistema e reduzir a ocorrência de falhas.

É neste contexto que as medições de DP se tornam um recurso valioso para realizar o diagnóstico da qualidade da isolação de equipamentos ao correlacionar à atividade de DP e sua severidade para a isolação do equipamento. Entretanto, atingir uma classificação robusta de DP e determinar sua natureza não é trivial e depende de uma conjunção de requisitos.

Estes englobam desde a utilização de instrumentos adequados, conhecimento e experiência de medição de DP e dos fenômenos envolvidos, como os tipos de DP existentes, os ruídos e perturbações característicos de medições de DP. Também englobam a capacidade de

separar as múltiplas fontes de DP de uma mesma medição para poder extrair adequadamente as características de cada tipo de DP. Sem atender estes requisitos, não é possível garantir a qualidade dos dados obtidos e das análises realizadas, inviabilizando a implementação de um sistema de classificação capaz de fornecer diagnósticos com confiabilidade.

Para contribuir com a resolução deste problema, objetiva-se o desenvolvimento de uma solução técnica com integração de *hardware* e *software* que permita realizar assertivamente a medição, a separação e a classificação dos tipos básicos de DP em equipamentos elétricos: descargas tipo corona, superficial e interna.

No âmbito da UNIFEI, isso permitirá aos alunos de graduação e pós-graduação, conhecer e aplicar técnicas de separação e classificação de DP. Por último, permitir ao LAT-EFEI fornecer ao setor elétrico e à sociedade, um serviço mais sofisticado no ambiente laboratorial e possivelmente na avaliação de equipamentos em operação.

No âmbito nacional e internacional, a solução técnica tem potencial para contribuir com a área de estudos, principalmente no campo da pesquisa e desenvolvimento, ao permitir que novas pesquisas relacionadas às DP possam ser realizadas com sua utilização, ampliando a capacidade de diagnóstico da isolação de equipamentos elétricos.

Finalmente, a solução proposta com esta tese poderá contribuir nos âmbitos local, nacional e internacional, relacionados à melhoria dos diagnósticos de DP e da qualidade da isolação, além de auxiliar o estabelecimento de procedimentos de manutenções preditivas de equipamentos e contribuir para o aumento da confiabilidade de sistemas elétricos.

1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma solução integrada de *hardware* e *software* para medição, separação e classificação de DP. Os objetivos secundários estão nos tópicos a seguir:

- Medir DP com confiabilidade e repetitividade;
- Medir DP em valores de carga aparente em atendimento à IEC 60270;
- Medir DP de maneira equivalente aos sistemas comerciais que atendem normas relacionadas à medição de DP;
- Separar satisfatoriamente os fenômenos simultâneos encontrados durante a medição;
- Classificar com robustez e acurácia os tipos básicos de DP: corona, superficial e interna;
- Contribuir para nacionalizar uma solução tecnológica para medição, separação e classificação de DP;
- Contribuir com o setor industrial e do setor elétrico ao fornecer uma solução tecnológica, para uso geral, que permita melhorar os procedimentos de manutenção preditiva de equipamentos elétricos;
- Contribuir com a sociedade ao desenvolver uma solução tecnológica que ajude na mitigação de falhas críticas em equipamentos de alta tensão e, conseqüentemente, na redução de eventos que possam levar à indisponibilidade no fornecimento de energia elétrica.

1.2. Estrutura do Texto da Tese

Esta tese de doutoramento é composta de cinco capítulos. No Capítulo 1 estão presentes, a introdução e os objetivos do desenvolvimento deste trabalho.

No Capítulo 2, é apresentada a revisão bibliográfica composta pela descrição do fenômeno de descargas parciais e seus modelos, como medir DP de um equipamento, as vantagens e desvantagens dos sistemas de medição convencional e não-convencional. Além disso, estão presentes técnicas de processamento de sinais de DP para mitigar/reduzir ruídos e extrair pulsos de DP; técnicas de separação dos diferentes fenômenos presentes na mesma medição; os recursos disponíveis para identificar e classificar descargas parciais e por último, o estado da arte de medição, separação e classificação de DP.

No Capítulo 3, é apresentada a solução proposta para medição, separação e identificar/classificar descargas parciais, desde os *hardwares* utilizados (digitalizador e dispositivos de medição) até a integração com o *software* desenvolvido, chamado PDM. O fluxo de dados, desde a medição dos sinais analógicos até a identificação da DP, também está descrito neste capítulo. Por último estão os recursos empregados na solução proposta para realizar o processamento de sinais, extrair pulsos, separar e identificar/classificar DP.

No Capítulo 4, estão presentes as validações das etapas de medição, separação e identificação de DP. Foram realizadas comparações entre as medições realizadas com a solução desenvolvida e equipamentos comerciais de medição convencionais e não convencionais, além de avaliar desempenho da separação de DP realizada. Por último, são apresentados os resultados da obtidos com o algoritmo de identificação da solução desenvolvida.

No Capítulo 5, finalmente, são apresentadas as conclusões do trabalho e as produções bibliográficas relacionadas ao tema.

2. Revisão Bibliográfica e o Estado da Arte

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica e estado da arte relativo à medição, separação e identificação de descargas parciais. O capítulo compreende desde o entendimento do conceito de descargas parciais e seus modelos representativos, os métodos de medição de DP convencional (IEC 60270) e não-convencional, as principais técnicas de processamento de sinais de DP, técnicas de separação de atividades de DP simultâneas, até as por último, as técnicas de classificação de descargas parciais.

2.1. Descargas Parciais e Seus Modelos Representativos

A norma ABNT NBR IEC 60270 – Técnicas de Ensaio em Alta Tensão – Medições de Descargas Parciais [5], define como descarga parcial uma descarga elétrica localizada que curto-circuita parcialmente a isolação entre condutores e que pode, ou não, ocorrer nas adjacências de um condutor. Em geral, as descargas parciais são consequência da concentração do campo elétrico dentro da isolação ou em sua superfície.

As descargas parciais estão presentes em locais onde a solitação elétrica sobre a isolação supera os limites de suportabilidade dielétrica do material isolante. Estes limites são altamente influenciados por fatores como o tipo do material isolante, a pureza do material, sua temperatura de operação, pressão, e a duração da solitação, entre outros fatores [6].

A presença de atividades de descargas parciais em sistemas isolantes é sintoma de degradação da isolação. Em sistemas isolantes, independentemente do mecanismo de degradação (elétrico, mecânico, térmico, químico ou ambiental), esse processo é geralmente acompanhado pela geração de descargas parciais [7].

As descargas parciais em equipamentos elétricos podem ser divididas em dois tipos principais [8]:

- DP do tipo corona: são descargas que ocorrem no ar e em meios gasosos, e produzem principalmente hidrogênio, ozônio e metano.
- DP do tipo centelha: são descargas que ocorrem em meios líquidos, como o óleo, e em meios sólidos, como o papel, ou polietileno, caracterizando-se por pequenos arcos elétricos. Estas descargas produzem, em sua maior parte, acetileno e hidrogênio, causando danos ao material isolante, como carbonização e trilhamentos em materiais sólidos, além, da decomposição e dissolução de gases em meios líquidos como o óleo.

A longo prazo, a presença de DP na isolação de equipamentos elétricos, pode levar ao rompimento total desta isolação, com perda total do ativo e a indisponibilidade no fornecimento de energia elétrica.

- **Modelos Representativos:**

Desde da década de 1930, modelos têm sido desenvolvidos para melhorar a representação física do fenômeno de descargas parciais [9]. Os dois modelos mais utilizados para representação do fenômeno são: o modelo capacitivo e o de dipolo [1].

O modelo mais popular e amplamente aceito é o modelo capacitivo com 3 capacitores. Este permite uma fácil compreensão do fenômeno de descargas parciais, representando o defeito como um capacitor concentrado [9]. O modelo de dipolo foi desenvolvido na década de 1980, agrupando no modelo capacitivo, a física de ocorrência das descargas parciais e a física dos gases [10].

O modelo capacitivo foi sistematicamente investigado por *Gemant e Philippof*, para estimar as perdas elétricas em cabos de potência causadas por descargas em cavidades (*apud HAUSCHILD & LEMKE [1], 2014, p.161*). Para calcular a razão entre a carga de DP externa detectável e carga de DP interna fluindo através da cavidade, *Whitehead* assim como *Kreuger*, realizaram algumas modificações que culminaram no modelo representativo de descargas parciais capacitivo apresentado na Figura 1 (*apud HAUSCHILD & LEMKE [1], 2014, p.161*).

Na Figura 1, C_A é a capacitância entre os eletrodos do objeto sob ensaio, C_{B1} e C_{B2} são as capacitâncias representativas da porção sem DP localizada entre a cavidade e os eletrodos e C_C , é a capacitância da cavidade em paralelo com um centelhador (*spark gap*) F_C . Dada estas capacitâncias características, o circuito equivalente apresentado na Figura 2, é tradicionalmente conhecido como modelo abc.

Do modelo capacitivo e de suas premissas (dielétrico cilíndrico de diâmetro constante), a carga de DP externa detectável, comumente conhecida como carga aparente pode ser encontrada. A carga aparente de um pulso de DP é a carga, que se injetada dentro de um tempo muito curto entre os terminais do objeto sob ensaio em um circuito de teste especificado, forneceria a mesma leitura no instrumento de medição que um pulso de DP de mesma intensidade oriundo do objeto sob ensaio [11].

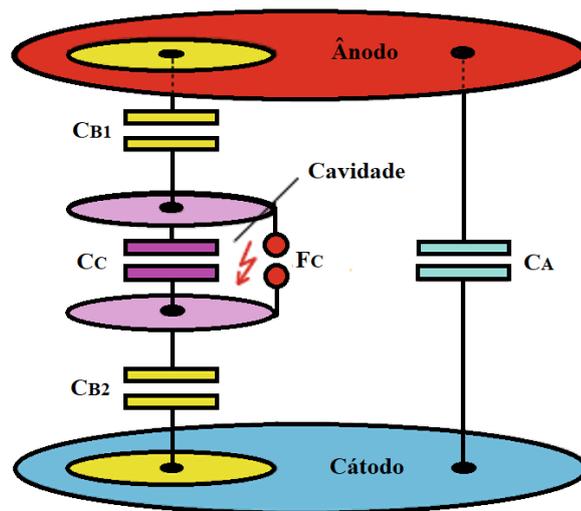


Figura 1 - Modelo capacitivo representativo de DP. Fonte: adaptada de [1].

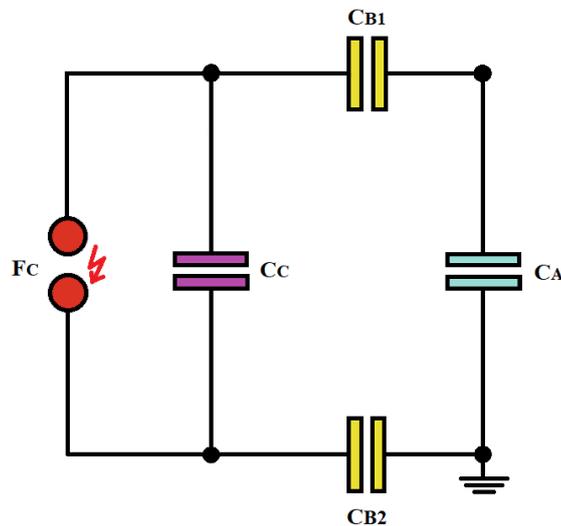


Figura 2 - Circuito equivalente capacitivo - modelo abc. Fonte: adaptada de [1].

Apesar de fornecer uma ideia geral, simples e direta do fluxo de carga devido às descargas parciais na isolação, algumas das premissas utilizadas no modelo capacitivo não permitem afirmar que a carga externa de DP medida é uma pequena fração da verdadeira carga da DP dentro da isolação. Além disso, o fato de assumir que carga interna de DP é produzida antes do início do evento de DP entra em desacordo com a física dos gases [1]. O circuito representativo do modelo capacitivo foi analisado com mais detalhes no item 2.2.1.

O modelo de dipolo se baseia na criação de portadores de carga, formados pela ionização do gás presente no interior da cavidade. Como os portadores de carga de ambas polaridades se depositam nos extremos da cavidade, no lado do cátodo e ânodo, um momento de dipolo é estabelecido, conforme ilustra a Figura 3.

Neste modelo, a carga da cavidade não é descarregada através de um *spark gap*, mas sim carregada através dos portadores de carga criados pelo processo de ionização. O campo no interior da cavidade (campo de Poisson) se opõe ao campo Laplaciano gerado pela tensão aplicada, levando à uma extinção da ionização das moléculas de gás logo após o início do evento de DP, em intervalos de tempo da ordem de nanosegundos.

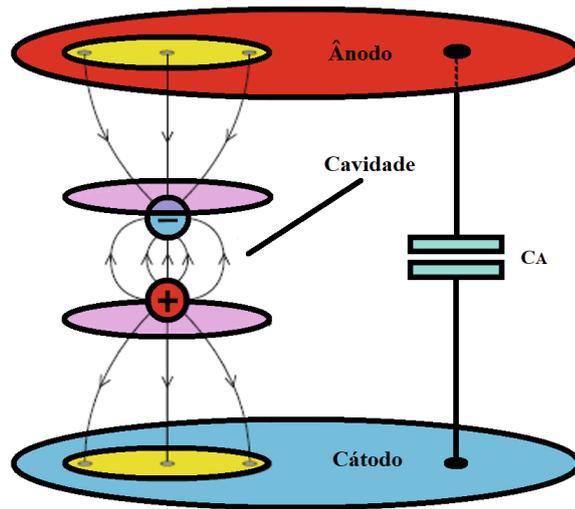


Figura 3 - Modelo de dipolo representativo de DP. Fonte: adaptada de [1].

O respectivo circuito equivalente para o modelo de dipolo é mostrado na Figura 4.

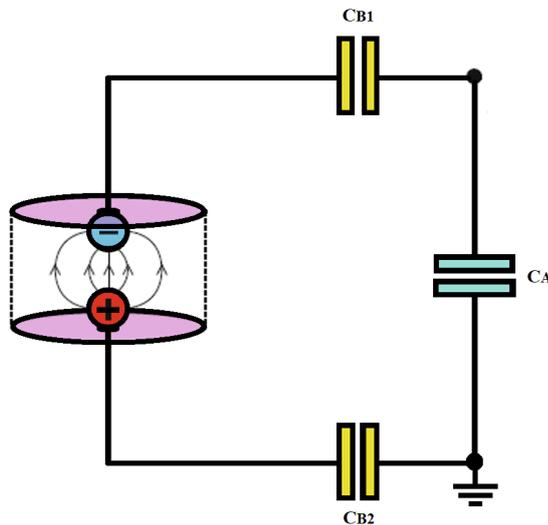


Figura 4 - Elementos do circuito equivalente do modelo de dipolo. Fonte: adaptada de [1]

Apesar do modelo de dipolo conseguir incluir a física de ocorrência das descargas parciais e a física dos gases, este modelo tem sido deixado de lado pela sua complexidade, já que o modelo abc consegue explicar facilmente a transferência de carga devido às descargas

parciais, sem utilizar teorias de campo complexas, como as teorias baseadas nas equações de Maxwell.

2.2. Medição de Descargas Parciais

A medição de descargas parciais se tornou um método aceito globalmente para diagnóstico da isolação e um dos critérios de aceitação de equipamentos elétricos para a maioria dos equipamentos de média e alta tensão. Com base na presença ou na ausência de atividades de descargas parciais, seja durante ensaios de rotina, medições em campo, ou uma verificação periódica durante a vida útil do equipamento, defeitos na isolação podem ser encontrados, podendo, assim, fornecer um diagnóstico do estado atual do sistema isolante do equipamento de maneira a permitir que ações possam ser tomadas antes que o colapso total da isolação ocorra [12].

O primeiro método experimental aplicado para reconhecimento de descargas elétricas remete ao ano de 1777, com *Lichtenberg*, quando ele verificou a formação de figuras parecidas com estrelas e círculos formadas por poeira, após uma superfície de âmbar ser atingida por descargas de cerca de 40 cm de comprimento [1].

Desde o começo do século XX com o aumento da utilização de equipamentos de alta tensão para transmissão de energia elétrica, tem-se a ideia de que descargas parciais em vazios preenchidos por gás em isolações sólidas, podem ser consideradas como precursoras de um colapso total da isolação [1].

As descargas parciais estão associadas com a ionização das moléculas de gás, não somente no ar ambiente, mas, também, em cavidades preenchidas por gás em isolações sólidas ou bolhas de ar em dielétricos líquidos, como o óleo.

Fotografias típicas de canais de descarga no ar ambiente, óleo isolante, e no polimetilmetacrilato (PMMA), podem ser vistas na Figura 5.

Os pulsos de DP geralmente têm uma duração inferior a 1 μ s. Em objetos sob ensaio, as descargas parciais produzem pulsos de corrente, que podem ser detectados com instrumentos adequados, produzindo um sinal de corrente ou tensão em sua saída [11].

Em 1967, *Bailey* determinou que o tempo de subida de um pulso de DP seria da ordem de nanosegundos, inclusive 1 ns [13]. Estes valores foram confirmados pelas pesquisas

experimentais de *Boggs e Fujimoto*, e também por *Boggs e Stone*, no início da década de 1980 [14, 15].

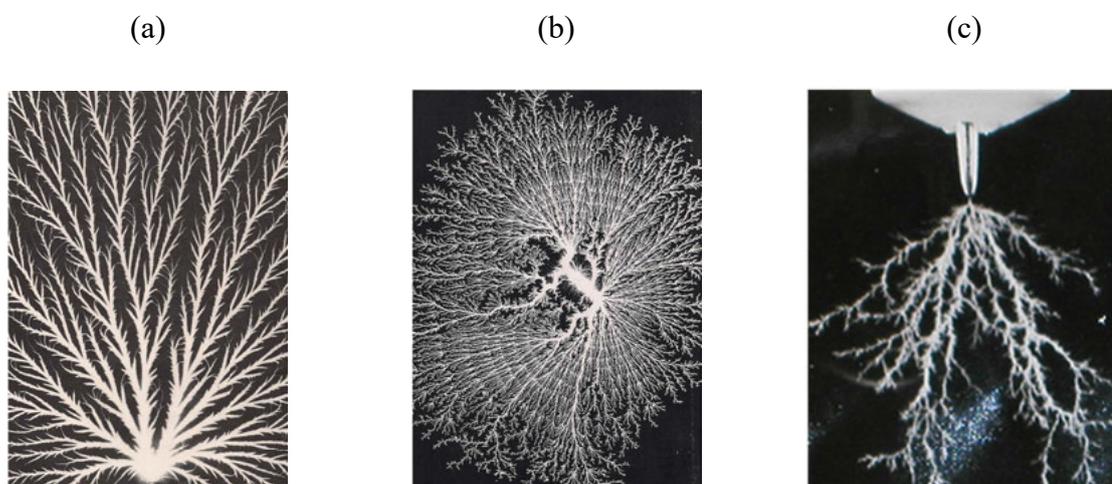


Figura 5 – Fotografias de canais de descarga: (a) ar ambiente, (b) óleo isolante e (c) PMMA. Fonte: [1].

Como os defeitos que causam as descargas parciais não podem ser acessados diretamente, via instrumentos de medição, a verdadeira forma do pulso de corrente no local do defeito não pode ser medida. Assim, a única forma de medir os pulsos de DP é desacoplar os transitórios causados pelas descargas parciais nos terminais do objeto sob medição. Porém, é preciso ter em conta que há uma significativa atenuação dos sinais de DP ao se propagar da localização física da fonte de DP na isolação até o ponto de medição, devido às altas frequências contidas no sinal de DP [1].

A Figura 6 contém um circuito equivalente simplificado que permite explicar o fenômeno das descargas parciais na isolação, com base no modelo capacitivo apresentado no item 2.1. No circuito da Figura 6, U , é a tensão em frequência industrial aplicada, C_1 é o capacitor representativo de uma cavidade na isolação, C_2 é capacitor que representa o material isolante em torno da cavidade, C_3 é o capacitor que representa o material isolante restante, e, por último, S é um centelhador que representa as descargas parciais do capacitor C_1 .

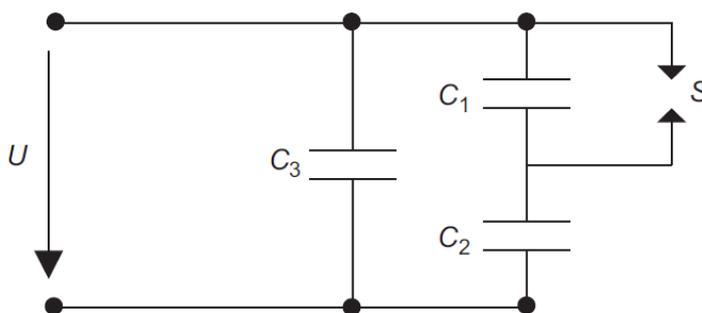


Figura 6 – Circuito equivalente representativo de descargas parciais, com base no modelo capacitivo [6].

A tensão através do capacitor C_1 é determinada através da equação (1):

$$U_1 = U \cdot \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (1)$$

A descarga através do centelhador só ocorre quando a tensão sobre o capacitor C_1 atinge o nível da tensão de início das descargas parciais. Em condições reais o tempo de descarga através do centelhador é extremamente rápido quando comparado com a frequência da tensão aplicada, fato este que não permite contabilizar o tempo relativo à descarga através de S .

Devido ao descarregamento do capacitor C_1 , o capacitor C_2 passa, agora, a ser solicitado pela tensão aplicada U , causando uma mudança nas cargas elétricas do circuito. Porém, antes da ocorrência da descarga de C_1 através de S , a carga do capacitor C_2 era determinada pela equação (2), e, após a descarga, pela equação (3).

$$Q_2 = U_2 \cdot C_2 = U \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

$$Q_{2_após} = U \cdot C_2 \quad (3)$$

Com a mudança nas cargas elétricas, a diferença deve, então, agora ser fornecida pelo capacitor C_3 ou pela fonte de tensão, porém como a constante de tempo de C_3 é menor, a carga será fornecida por C_3 através de um pulso de corrente de curta-duração. O pulso reduz a tensão sobre os capacitores C_2 e C_3 , de tal maneira que a fonte de tensão reage subindo a tensão para o valor anterior, equivalente à tensão U , carregando, assim, todos os capacitores.

Quase que ao mesmo tempo, o centelhador S já se recuperou e o capacitor C_1 será carregado novamente até atingir a tensão de início de descarga e descarregar através de S . Para calcular a diferença de carga, basta utilizar a equação (4):

$$\Delta Q = U \cdot \frac{C_1^2}{C_1 + C_2} \quad (4)$$

Como o valor das capacitâncias de C_1 e C_2 são desconhecidos, apenas o pulso de corrente pode ser medido, e isso é realizado com a utilização de um dispositivo de acoplamento ou uma impedância de medição.

Na Figura 7, é mostrado o comportamento em função do tempo das descargas parciais em um material isolante sólido, do modelo capacitivo e seu respectivo circuito equivalente, presente na Figura 6. A tensão aplicada em frequência industrial pela fonte é $u(t)$, $u_{10}(t)$ é a tensão sobre o capacitor C_1 sem a ocorrência de descargas parciais, $u_1(t)$ é a tensão sobre o capacitor C_1 com a ocorrência de descargas parciais, u_z é a tensão de início das descargas parciais, e, por último, t_i é o instante de tempo no qual ocorre a descarga parcial.

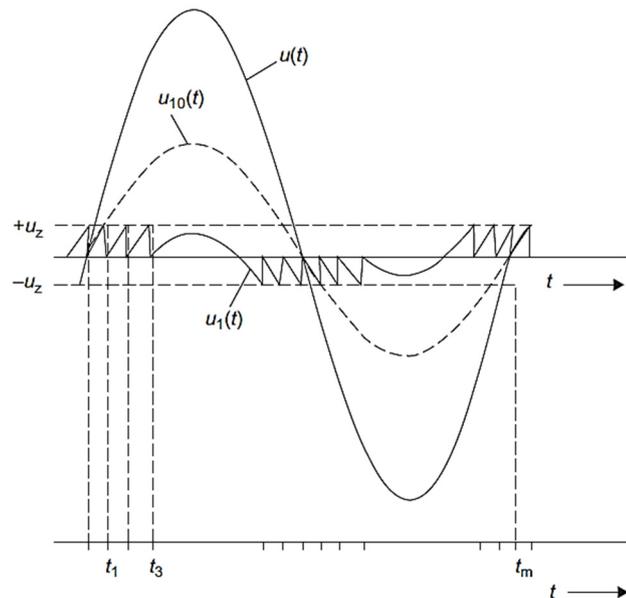


Figura 7 – Comportamento das descargas parciais em um material isolante sólido [6].

Nas medições padronizadas de acordo com a norma IEC 60270 [11], um capacitor de acoplamento é adicionado e as capacitâncias C_1 , C_2 e C_3 são representadas como uma única capacitância, representativa do objeto sob ensaio.

No item 2.2.1, mais detalhes sobre os sistemas de medição convencionais descritos na norma IEC 60270 [11] são apresentados e discutidos.

2.2.1. Sistemas de Medição de Descargas Parciais Convencional (IEC 60270)

Na seção anterior, uma breve descrição de como são medidos os pulsos de descargas parciais foi apresentada baseada no modelo capacitivo. A necessidade de desacoplar os sinais de DP nos terminais do equipamento e o fato de os valores das capacitâncias C_1 e C_2 serem desconhecidas, implicam na necessidade de inserir no circuito de medição novos elementos, um capacitor de acoplamento e uma impedância de medição.

Os sistemas de medição convencionais baseados na IEC 60270 [11] também conhecidos como sistemas de medição para carga aparente, baseiam-se no modelo capacitivo e são divididos basicamente em três subsistemas, apresentados na Figura 8: A) dispositivo de acoplamento (capacitor de acoplamento e impedância de medição), B) sistema de transmissão (cabos de conexão) e C) instrumento de medição.

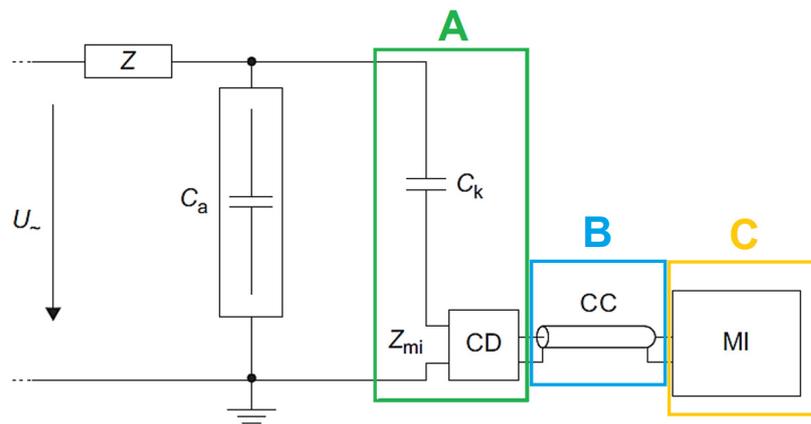


Figura 8 – Subsistemas de um sistema de medição de descargas parciais convencional. Fonte: adaptada de [11].

No circuito básico de medição de descargas parciais da Figura 8, U_{\sim} é a fonte de alta tensão, C_a é a capacitância do objeto sob ensaio, C_k representa o capacitor de acoplamento, Z_{mi} é a impedância de medição, CD é o dispositivo de acoplamento (quadripolo), CC representa os cabos de conexão, MI o instrumento de medição e Z é um filtro de alta tensão.

O dispositivo de acoplamento é parte integrante do sistema de medição e do circuito de ensaio, e, é composto por componentes especificamente projetados para obter uma ótima sensibilidade de medição. O capacitor de acoplamento é conectado em paralelo com o objeto sob ensaio funcionando como um divisor de tensão, e a sua saída é conectada à impedância de medição, que, usualmente, é um quadripolo. O quadripolo é uma rede de duas portas que recebe o sinal do capacitor, convertendo a corrente medida em sua entrada em sinais de tensão na sua saída.

A impedância de medição atua bloqueando e separando o sinal de excitação, assegurando que sinais na frequência de excitação e seus harmônicos, não estejam presentes no sinal de descargas parciais medido [9].

O sistema de transmissão é composto pelos cabos de conexão que levam o sinal da saída do quadripolo até a entrada do instrumento de medição, geralmente são compostos por cabos coaxiais ou por meio de cabos de fibra ótica.

O instrumento de medição pode ser do tipo banda larga, banda larga com integrador ativo e de banda estreita.

Os instrumentos de medição em banda larga são caracterizados por uma impedância de transferência (impedância em função da frequência), com valores fixos de frequências inferior (f_1) e superior (f_2), com uma atenuação adequada, abaixo de f_1 e acima de f_2 . A Tabela 1 resume as recomendações da IEC 60270 [11], com relação às faixas de frequências inferior e superior, e para a largura banda (Δf).

Tabela 1 – Faixa de frequência recomendada pela IEC 60270 para os parâmetros de frequência de instrumentos de medição em banda larga. Fonte: [11].

Parâmetro	Faixa Recomendada
f_1	Entre 30 kHz e 100 kHz
f_2	Menor que 1 MHz
Δf	Entre 100 kHz e 900 kHz

Os instrumentos de medição de banda larga com integrador ativo consistem em um amplificador de banda larga em conjunto com integrador eletrônico, com constante de tempo caracterizada pelo capacitor de integração e pelas resistências de sua rede. Dessa maneira, a amplitude do sinal de DP é proporcional à carga total, assumindo que a constante de tempo do integrador é suficientemente maior que a duração do pulso de DP.

Os instrumentos de medição de banda estreita são caracterizados por uma pequena largura de banda e uma frequência central (f_m), que pode variar sobre uma larga faixa de frequências, tal que a amplitude do espectro de frequências dos pulsos de DP seja praticamente constante.

A Tabela 2 resume as recomendações da IEC 60270 [11], com relação à largura banda e frequência central para instrumentos de banda estreita.

Tabela 2 – Faixa de frequência recomendada pela IEC 60270 para os parâmetros de frequência de instrumentos de medição em banda estreita. Fonte: [11].

Parâmetro	Faixa Recomendada
Δf	Entre 9 kHz e 30 kHz
f_m	Entre 50 kHz e 1 MHz

Devido às numerosas fontes de ruído que podem estar presentes durante a medição de descargas parciais, essa deve ser realizada em um faixa de frequência, na qual, o ruído seja o menor possível. Além disso, os pulsos de corrente não podem ser distorcidos pela frequência da tensão aplicada e seus harmônicos.

Além das recomendações dos parágrafos anteriores, a IEC 60270 [11] alerta para a necessidade de que o circuito de medição completo seja livre de descargas parciais, em outras palavras, que, no nível da tensão aplicada no ensaio, os níveis de descargas parciais do circuito de medição sejam significativamente menores que a amplitude de descargas parciais estabelecida como critério de avaliação da conformidade.

Para atingir estes requisitos, são necessários equipamentos de ensaio adequados, boas conexões de alta tensão e também de aterramento adequado para todos os equipamentos na vizinhança do circuito de ensaio. Em alguns casos, onde é necessária uma medição mais sensível, uma blindagem adequada pode ser necessária para evitar interferências eletromagnéticas [6].

O circuito da Figura 8 é conhecido como circuito de acoplamento série, pois o dispositivo de acoplamento e as capacitâncias estão conectadas em série, com respeito ao fluxo do pulso de corrente gerado pelas descargas parciais.

No circuito da Figura 8, adiciona-se o capacitor de acoplamento C_k e C_a representa toda isolação composta pelos capacitores (C_1 , C_2 e C_3) na Figura 6. Assim, correlacionando os dois circuitos (Figura 6 e Figura 8), a descarga parcial resultante do descarregamento de C_1 gera um pulso de corrente através do objeto sob ensaio C_a até chegar ao capacitor de acoplamento C_k e seguir para a impedância de medição. A carga aparente é obtida integrando esta corrente.

A carga aparente é o parâmetro mais importante relacionado à medição de descargas parciais com sistemas de medição convencionais, pois fornece um valor de referência para o circuito de ensaio especificado e para o objeto sob ensaio.

Os principais componentes de um sistema de medição de DP convencional estão presentes na Figura 9.

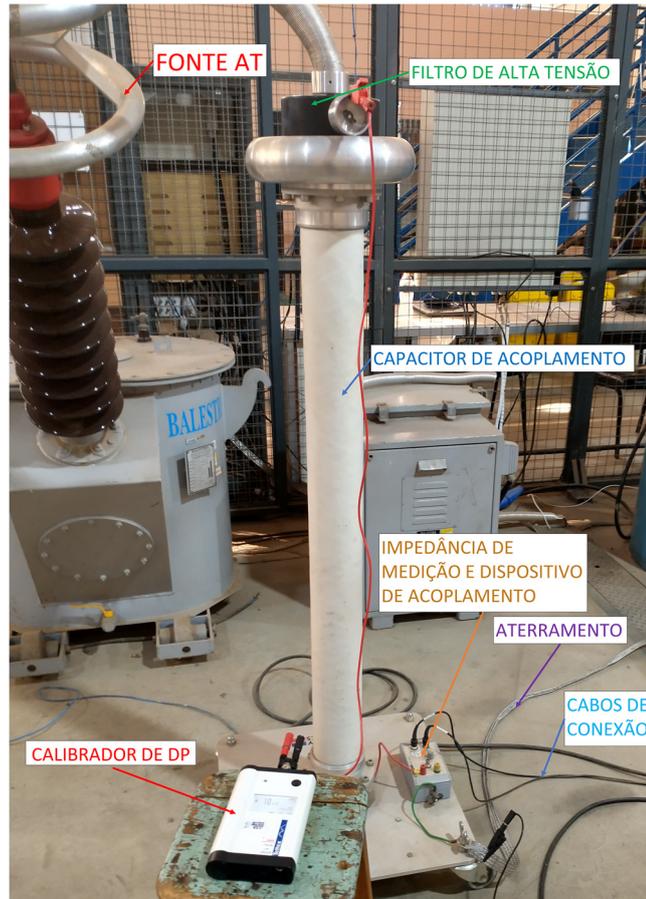


Figura 9 – Sistema de medição de descargas parciais convencional do LAT-EFEI.

2.2.2. Procedimento de Calibração para Medição de Carga Aparente

Para quantificar descargas parciais em termos da carga, é utilizado o conceito de carga aparente, geralmente expressa em Coulomb (C), na escala de picoCoulomb (pC). A carga aparente é uma carga que, se injetada entre os terminais do objeto sob ensaio, em um intervalo de tempo suficientemente curto, fornece o mesmo valor de leitura no instrumento de medição que o pulso de corrente da DP. Entretanto, o valor de carga aparente medido não é igual à quantidade de carga no local da descarga, pois não é possível medir a carga diretamente no local de descarga, apenas nos terminais do objeto [11].

A amplitude dos pulsos medidos é proporcional à carga aparente associada a eles, normalmente por um fator de escala, e, para determiná-lo, é preciso realizar o procedimento de calibração. O procedimento de calibração consiste na injeção de pulsos de corrente de carga e de curta-duração nos terminais do objeto sob medição.

O procedimento de calibração é uma das etapas mais importantes para medição da carga aparente com sistemas de medição convencionais. Os objetivos da calibração são obter uma

estimativa quantitativa da carga de DP, independente do circuito de ensaios (capacitância do objeto sob ensaio, capacitor de acoplamento, impedância de medição, instrumento de medição) além de verificar se o sistema de medição é capaz de medir adequadamente um valor especificado de DP.

Ao realizar a calibração do sistema de medição, com o circuito completo (incluindo o objeto sob ensaio), pode-se determinar o fator de escala, que, neste trabalho é chamado de fator de calibração (k). O fator de calibração normaliza a amplitude dos pulsos em relação à magnitude da carga dos pulsos, fornecendo, assim, os valores de carga aparente.

Apesar do procedimento de calibração levar em conta a atenuação do sinal medido entre os terminais do objeto e o instrumento de medição, caso o local onde está localizada a DP esteja distante do ponto de medição, ocorrerá atenuação e distorção na propagação do sinal. Isto deve ser levado em conta no caso de equipamentos de grandes dimensões como transformadores e geradores de grande porte.

Um dos requisitos para calibradores de descargas parciais, descrito na IEC 60270 [11], é que os pulsos gerados pelo calibrador possuam tempo de subida da ordem de um pulso real de DP (ordem de nanosegundos), sem exceder o valor de 60 ns.

Destaca-se que é extremamente importante que o calibrador utilizado esteja com sua bateria em bom estado e carregada, com tensão próxima ao valor nominal de operação. A queda de tensão na bateria do calibrador em relação ao valor nominal de operação influencia diretamente na amplitude dos pulsos gerados pelo calibrador, fato que pode influenciar significativamente as medições obtidas, já que afetará o fator de calibração. Se isso ocorrer, os pulsos utilizados como referência terão amplitude menor que a esperada, fazendo com que valores inferiores de carga aparente sejam lidos.

Abaixo estão listados alguns pontos importantes necessários para realização do procedimento de calibração [9]:

- Sempre injetar o pulso de calibração nos terminais do equipamento e não sobre o capacitor de acoplamento;
- Assegurar que todos os componentes do circuito estejam conectados e em sua forma final;
- É necessário realizar a calibração novamente para qualquer alteração realizada no circuito de ensaio, como por exemplo, a troca de terminais do equipamento sob ensaio;

- Se mudanças forem realizadas no medidor de descargas parciais, como por exemplo, alterar as configurações de frequência, alterações nas ligações entre os elementos do circuito, como cabos de conexão, entre outros, é necessário realizar novamente a calibração;
- Para evitar erros durante a calibração, remover o aterramento temporário da fonte de alta tensão;
- Se disponível no *software* de medição, antes da calibração, é recomendável realizar uma avaliação do espectro de frequências de maneira a garantir que as medições sejam realizadas em uma região linear do espectro;
- Avaliar a linearidade da calibração, injetando pulsos que são múltiplos do valor de carga injetado originalmente;
- Verificar o nível de ruído com uma tensão aplicada em torno 10% a 20% da tensão a ser aplicada, pois o ruído pode se alterar com a aplicação da tensão de ensaio.

2.2.3. Métodos Não-Convencionais de Medição de DP e Análise Comparativa Entre Método Convencional e Não-Convencional

Os métodos convencionais utilizados em fábricas e laboratórios, geralmente não são adequados para medições em campo, dessa maneira, outros métodos têm sido introduzidos [12].

A principal limitação da utilização de métodos convencionais em campo é o fato de que o circuito de medição necessita de uma relação elevada entre o sinal e o ruído (SNR), suficiente para realizar a calibração. Em campo, esta relação é reduzida, pois o nível do ruído é elevado, e o pulso de calibração injetado por um calibrador pode não ser distinguido pelo sistema de medição.

Para melhorar a sensibilidade das medições de descargas parciais, diferentes técnicas e métodos têm sido desenvolvidos e aplicados em medições em laboratório, e, principalmente, em campo. Estes métodos são conhecidos como métodos não-convencionais.

Nas medições em campo, os métodos não-convencionais de medição têm-se mostrado como sendo a melhor opção quando na presença de altos níveis de ruído ambiente, sendo capazes de obter um alto valor de relação SNR.

Os métodos não-convencionais de medição de DP utilizam diferentes características físicas e propriedades relacionadas ao fenômeno de descargas parciais. Em geral, os métodos elétricos não-convencionais são baseados na medição de sinais elétricos nas faixas de

frequência de rádio (RF), como alta frequência (HF), frequência muito alta (VHF) e ultra alta frequência (UHF).

Os métodos não-convencionais se baseiam na detecção de ondas eletromagnéticas emitidas pelas descargas parciais. Como as ondas eletromagnéticas dependem do tipo da descarga parcial e sua localização no equipamento, do tipo e localização do sensor utilizado, do tamanho e geometria do objeto sob medição, não existe uma correlação entre as medições com métodos não-convencionais e métodos convencionais, e isso inclui a medição da carga aparente [12].

A seguir, é apresentada uma comparação entre métodos convencionais e não-convencionais, para diferentes tipos de equipamentos elétricos, apontando as principais vantagens e desvantagens de sua utilização, baseado na brochura 662, produzida pelo grupo de trabalho D1.37 do CIGRE [12]. Este documento é um dos mais atuais do CIGRE sobre esta temática e uma excelente referência bibliográfica teórica e prática, relacionada à aplicação de métodos não-convencionais em medições de DP.

As principais vantagens gerais da utilização de métodos convencionais de medição de DP remetem principalmente ao amplo conhecimento do método desde o início da década de 1960. Com décadas de aplicação e experiência, o método convencional possui procedimentos padronizados para ensaios de tipo, ensaios em fábrica e medições em campo, permitindo leituras de carga aparente com o procedimento de calibração. Outro ponto extremamente vantajoso é a ampla disponibilidade de padrões PRPD, para descargas parciais causadas por diferentes tipos de defeito e para diferentes equipamentos.

As principais desvantagens gerais do método convencional estão relacionadas principalmente à vulnerabilidade a interferências eletromagnéticas (EMI) e valores reduzidos de SNR, que dificultam ou inviabilizam a realização de medições em campo. O tamanho do objeto e a sua complexidade também influenciam a sensibilidade das medições, principalmente quando a capacitância do capacitor de acoplamento é menor, se comparada à capacitância do objeto sob medição.

Outra desvantagem do método convencional é a impossibilidade de localização da fonte de descarga parcial, além disso, em casos de equipamentos de grandes dimensões, como por exemplo, cabos, o método convencional sofre uma influência significativa da posição do defeito no valor de carga aparente medido.

As principais vantagens gerais da utilização de métodos não-convencionais são:

- Melhor rejeição de EMI;
- Permitir a realização de medições distribuídas e conseqüentemente a avaliação síncrona dos padrões PRPD medidos em diferentes pontos;
- Na maioria dos casos, pode ser aplicada em medições on-line, sem necessidade de desligamento;
- Os padrões PRPD obtidos com métodos não convencionais são bastante similares aos padrões obtidos em medições com métodos convencionais.
- Equipamentos de HF como os transformadores de corrente de alta frequência (HFCT - *High Frequency Current Transformers*) são aplicáveis em medições on-line e off-line, além disso, permitem a localização de fonte de DP em acessórios de cabos e cabos completos através da técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR - *Time Domain Reflectometry*).

A principal desvantagem da utilização de métodos não-convencionais é a impossibilidade de realização de leituras em valores de carga aparente.

Para equipamentos que trabalham em HF como o HFCT, as principais desvantagens são:

- A instalação de sensores nem sempre é possível;
- A localização de descargas parciais em acessórios de cabos só é possível se os sensores puderem ser instalados;
- O tipo e a posição de instalação do sensor influenciam a sensibilidade da medição;
- A comparação entre medições de diferentes sistemas de detecção não é possível.

Portanto, a aplicação de métodos convencionais ou não-convencionais está intimamente relacionada ao local da medição (nível de ruído), ao tipo da medição (on-line ou off-line), às características físicas e dimensões do equipamento sob medição, e também, ao tipo de tecnologia dos sensores utilizados.

Em geral, os métodos convencionais são mais indicados em ambientes laboratoriais e fabris, enquanto que métodos não-convencionais são claramente a melhor opção para realização de medições em campo.

2.3. Processamento de Sinais de Descargas Parciais

Durante as medições de DP, é comum que interferências do ambiente e ruídos prejudiquem as medições e, conseqüentemente, a análise dos dados obtidos, principalmente durante medições realizadas em ambientes industriais ou em campo (por exemplo: subestações). Os ruídos podem ser divididos em duas categorias principais:

- Ruídos que ocorrem mesmo quando o circuito não está energizado.
- Ruídos correlacionados à tensão quando o circuito está energizado.

Neste contexto, a utilização de técnicas de processamento de sinais pode ser na maioria das vezes, um recurso capaz de mitigar a presença de sinais indesejados ao reduzir ou eliminar os ruídos presentes nas medições, e, assim, permitir uma melhor análise dos sinais de descargas parciais.

A estratégia empregada no processamento de sinais descrita no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

De qualquer maneira, algumas das principais técnicas de processamento de sinais disponíveis, descritas no item 2.3.1.

2.3.1. Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas à Sinais de DP

Nas últimas décadas diversas técnicas de redução de ruído foram propostas, como a Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*), Filtro Passa-Baixa (LPF – *Low-Pass Filter*), Filtro Adaptativo no Domínio da Frequência (FDAF – *Frequency Domain Adaptive Filter*), Método dos Mínimos Quadrados, Filtro Notch e Auto-Decomposição [16, 17], cada uma delas com suas vantagens e desvantagens.

Mais recentemente surgiram outras técnicas como a Transformada Wavelet (WT – *Wavelet Transform*) [18-21] e a Transformada Wavelet Discreta (DWT) [18, 19], a Decomposição Modal Empírica (EMD – *Empirical Mode Decomposition*) [22, 23] e a Decomposição Modal Empírica de Conjunto (EEMD - *Ensemble Empirical Mode Decomposition*) [24].

A WT é um método que trabalha com a decomposição dos sinais medidos em uma série de componentes (coeficientes) através da convolução do sinal original com o tipo da WT selecionada, preservando as informações de tempo e frequência na representação dos sinais de descarga parcial [18-21].

Ma et. al (2002) propôs um método para separação dos sinais de DP do ruído elétrico utilizando a Transformada Wavelet para seleção automática do valor limiar de separação do ruído e do sinal de DP [25]. Hang et. al (1997) aplicou a WT para extrair os pulsos de DP de interferências de banda estreita [26]. Zhang et. al (2004) também utilizou a WT para retirar ruídos de banda estreita e o ruído de fundo em medições online de descargas parciais em cabos [27].

A DWT é amplamente adotada para rejeição de ruído de medições de descargas parciais [24] [28]. O funcionamento da DWT pode ser representado por uma série de filtros compostos por filtros passa-baixa (LPF – *Low Pass Filter*) e filtros passa-alta (HPF – *High Pass Filter*) com a decomposição sobre os sinais que atravessam os filtros passa-baixa [29] e a redução da quantidade de amostras pela metade a cada etapa de filtragem.

A maior limitação da utilização da Transformada Wavelet Discreta é que o desempenho da rejeição de ruído está intimamente ligado à família de WT escolhida, em outras palavras, para alcançar uma melhor decomposição do sinal, a família de WT escolhida deve ter uma alta correlação com o sinal verdadeiro. Além disso, famílias fixas de WT podem não corresponder a todos os diferentes tipos de DP presentes no sinal medido [28].

A decomposição modal empírica é uma técnica adaptativa de decomposição de sinais. A EMD decompõe um sinal em uma série de coeficientes chamados IMFs (*Intrinsic Mode Functions*) de diferentes escalas de frequência, permitindo uma reconstrução do sinal após a decomposição [22].

Entretanto, devido à problemas de mixagem modal no processo de peneiramento, um IMF frequentemente engloba componentes de sinais de escalas de frequência consideravelmente diferentes, assim como componentes de frequência similar podem estar dentro de um mesmo IMF [24].

Uma outra limitação da EMD é o Efeito Final (*End Effect*), que pode gerar IMFs de baixa frequência, sem sentido prático, devido à decomposição excessiva da EMD, que corrompe os IMFs ao propagar oscilações geradas nas extremidades dos sinais em direção a toda a extensão do sinal [30].

O EEMD se diferencia do EMD ao injetar um ruído branco ao sinal original, para forçar o processo de peneiramento a fazer diferentes escalas de frequência se agrupar nos IMFs

apropriados. Após adicionar o ruído branco, o EEMD realiza a extração do IMF, assim como o EMD. Após a primeira extração, é gerado um conjunto de IMFs com ruído. Em seguida, outro ruído branco com amplitude de desvio padrão igual ao anterior é adicionado e o processo de decomposição é continuado neste novo sinal.

Os IMFs resultantes ao final do processo são o valor médio dos conjuntos de cada IMF. Como o ruído branco injetado é um ruído aleatório de média igual a zero, o valor médio cancela os erros introduzidos pela injeção do ruído branco [30].

A MM (*Mathematical Morphology*) foi originalmente projetada para aplicação em processamento de imagens, tendo sua aplicação sido estendida para a extração de características e diagnóstico de falha em máquinas [31-34].

A teoria de MM é baseada em operadores matemáticos que são aplicados entre sinais e elementos estruturais. Os elementos estruturais possuem forma pré-definida e comprimento finito. A extração de pulsos através de MM pode ser definida como a extração de características morfológicas locais, através da interseção entre elementos estruturais e o sinal.

Existem dois operadores básicos na MM, a erosão e a dilatação. Através da combinação destes dois operadores básicos, outros dois operadores são criados: abertura e fechamento. Escolhendo adequadamente os operadores, os pulsos de DP podem ser evidenciados.

Outro método, proposto por *Chan et. al* é uma versão que combina o EEMD, um critério de seleção de Kurtosis e MM, criando, assim, um método híbrido de processamento de sinais de DP, para rejeição de ruído e extração de pulsos de DP [35].

2.4. Separação de Descargas Parciais

Conforme descrito na seção 2.3, a presença de ruídos e/ou perturbações podem ocultar atividades de DP, e prejudicar o processo de medição e avaliação do sinal medido, inclusive, levar à interpretação errônea de que tais sinais possam ser interpretados como atividades de DP. Além disso, a ocorrência de múltiplos fenômenos de DP, durante a medição, dificulta ainda mais a análise das informações obtidas.

Portanto, é essencial separar os diferentes fenômenos de uma medição para reduzir a complexidade da identificação, bem como, permitir uma análise clara dos sinais de DP medidos para atingir uma identificação mais assertiva dos fenômenos de descargas parciais presentes.

Por necessidade de brevidade, o foco principal desta seção são os recursos que foram efetivamente empregados na separação dos sinais medidos, descritos nos itens 2.4.2 e 2.4.3. Entretanto, no item 2.4.1 estão descritas outras técnicas já utilizadas na separação de sinais de descargas parciais.

2.4.1. Técnicas de Separação de Sinais de Descargas Parciais

- Transformada de Fourier:

Alguns métodos de separação de descargas parciais utilizam a Transformada de Fourier para transformar os sinais de DP do domínio do tempo para o domínio da frequência [36, 37]. A Transformada de Fourier transforma sinais entre o domínio do tempo e o da frequência, representando o sinal através da utilização de combinações das funções seno e cosseno.

Uma vez que os pulsos de DP, originados de diferentes tipos de fontes DP, têm espectros de frequência distintos, a transformada de Fourier é utilizada para separar fontes de DP ao examinar as particularidades das bandas de frequência de cada sinal [36].

- Transformada de Wavelet:

Outros métodos de separação de descargas parciais utilizam a Transformada Wavelet, que decompõe o sinal em diferentes bandas de frequência [38, 39]. A Transformada Wavelet pode revelar componentes intrínsecos dos pulsos DP nos seus coeficientes, e, dessa maneira, os valores de energia e/ou parâmetros estatísticos derivados dos coeficientes são utilizados para representar os pulsos de DP, e, assim, separar os diferentes fenômenos [36, 38-39].

- Função de Auto Correlação:

A análise individual dos pulsos de DP medidos é outro método utilizado para separar múltiplas fontes de descargas parciais [38-40]. Estes métodos se baseiam no conceito de que diferentes tipos DP possuem formas impulsivas diferentes. Um destes métodos é chamado de Função de Auto Correlação (ACF – *Auto Correlation Function*) e foi proposto por *Alfredo Contin e Stefano Pastore* [40].

O ACF possui bom desempenho em sintetizar as características dependentes do tempo e frequência dos sinais de DP. O método compara as funções de autocorrelação das diferentes fontes de DP registradas durante as medições de descargas parciais e se baseia na premissa de que diferentes sinais de DP possuem funções ACF diferentes [40].

- Mapa de Esparsidade de Tempo-Frequência:

Com o objetivo de melhorar o *T-F Map*, Chan et.al [41] propôs um novo método de mapeamento conhecido como Mapa de Esparsidade de Tempo-Frequência (*T-F Sparsity Map*). Este método também utiliza o conceito de que diferentes formas de DP possuem formas impulsivas diferentes.

Após extrair os pulsos de DP e decompor estes sinais em uma série componentes no domínio do tempo e da frequência são calculados valores de esparsidade (no domínio do tempo e da frequência) que descrevem a distribuição dos picos dos pulsos de DP.

Para cada pulso, as variações dos valores de esparsidade são calculadas e denominadas tendências de esparsidade, sendo o valor médio dos valores absolutos da tendência de esparsidade denominado valor de irregularidade, que, em outras palavras, representa a natureza variável das tendências de esparsidade.

Com os valores de irregularidade no domínio do tempo e da frequência, é construído um plano bidimensional de tempo e frequência, que permite separar as múltiplas fontes de descargas parciais.

2.4.2. O Padrão PRPD

Os métodos convencionais de separação e interpretação de descargas parciais baseiam-se na utilização do padrão PRPD [42, 43]. O padrão PRPD foi proposto primeiramente em 1990, baseado na premissa que diferentes tipos de descargas parciais apresentam padrões PRPD diferentes [44].

O padrão PRPD é um gráfico bidimensional, que relaciona a amplitude dos pulsos de DP medidos, em picocoulomb, ou milivolts, em relação ao ângulo de fase da tensão alternada de excitação, conforme ilustrado na Figura 10.

Os padrões PRPD estão amplamente disponíveis para diferentes tipos de defeitos relacionados a descargas parciais e também para diferentes tipos de equipamentos, principalmente para o método convencional (IEC 60270) de medição de descargas parciais.

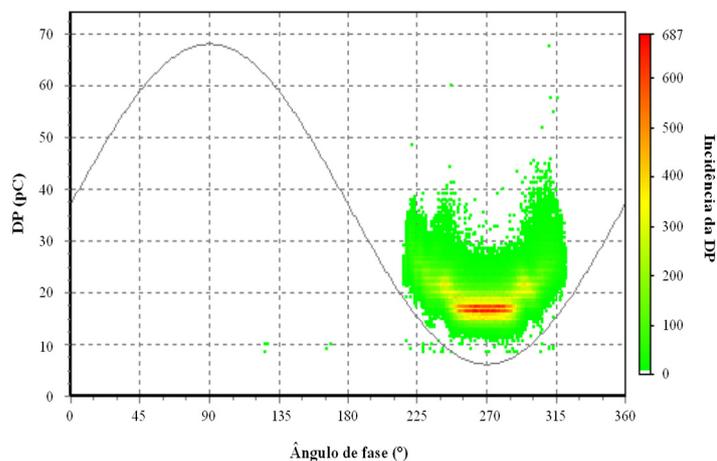


Figura 10 – Exemplo de padrão PRPD de uma descarga parcial do tipo corona com eletrodos tipo ponta (alta tensão) e plano (terra) com um sistema de medição convencional. Fonte: Adaptada de [45].

O documento técnico *Partial Discharges in Transformers*, de número 676, produzido pelo grupo de trabalho D1.29 do Cigre, apresenta, em seu Anexo 10, uma coletânea de variações de padrões PRPD [8].

Em uma outra abordagem o padrão PRPD também pode agregar informações relativas à quantidade de pulsos medidos em uma nova dimensão, tornando-se assim, um gráfico tridimensional, conhecido como gráfico $\varphi-q-n$ [7]. Um exemplo de gráfico $\varphi-q-n$ é mostrado na Figura 11.

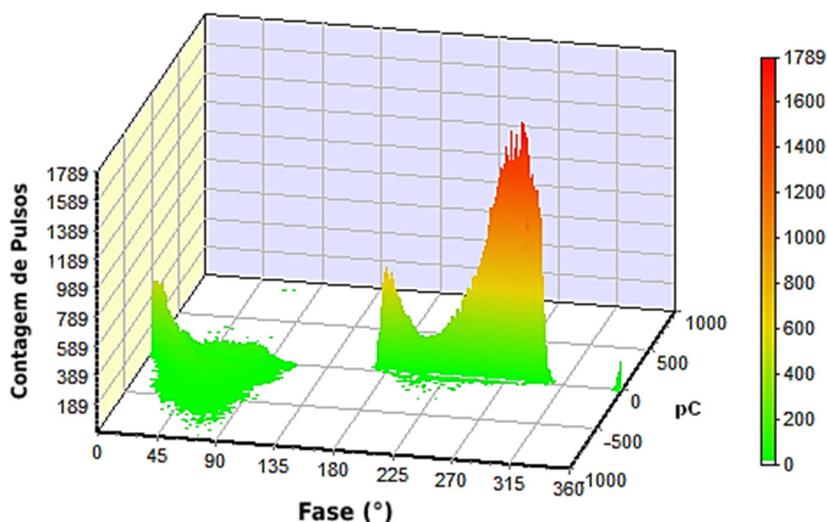


Figura 11 – Exemplo de gráfico $\varphi-q-n$.

Porém, como mencionado anteriormente, a separação de diferentes fenômenos relacionados a descargas parciais pode ficar prejudicada na presença de múltiplas fontes de DP, na qual, diferentes fenômenos podem estar sobrepostos no padrão PRPD, de tal maneira, que o padrão PRPD observável de uma fonte de DP pode estar imerso no padrão PRPD de outra fonte de DP [46, 47].

2.4.3. Mapa de Tempo-Frequência (*T-F Map*)

Um dos primeiros métodos de separação de descargas parciais propostos na literatura é o mapa de Tempo-Frequência, desenvolvido por *Andrea Cavallini*, que após a sua criação, tem sido amplamente utilizado para separar múltiplas fontes de DP [48-52].

O *T-F Map* é uma abordagem utilizada para separar múltiplas fontes de descargas parciais que utiliza o tempo de duração equivalente dos pulsos e a sua largura de banda. Este método também se baseia no conceito de que diferentes fontes de DP possuem formas impulsivas diferentes [49-51].

Para um pulso de DP $p(t)$, em que, t representa o tempo, o primeiro passo é normalizar o pulso, através da equação (5), na qual, $p_n(t)$ é o valor normalizado de $p(t)$.

$$p_n(t) = \frac{p(t)}{\sqrt{\int_0^T p(t)^2 dt}} \quad (5)$$

Para definir a referência de tempo (t_0) ou em outras palavras, o “centro de gravidade” do sinal normalizado, é possível aplicar a equação (6):

$$t_0 = \int_0^T t \cdot p_n(t)^2 dt \quad (6)$$

Após normalizar o pulso $p(t)$ em $p_n(t)$ e determinar a referência de tempo t_0 é possível encontrar o tempo de duração equivalente do pulso (T_{eq}) e a sua largura de banda equivalente (F_{eq}), por meio das equações (8) e (9), nas quais, $S_n(f)$ é a transformada de Fourier do sinal normalizado $p_n(t)$.

$$T_{eq} = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \cdot p_n(t)^2 dt} \quad (7)$$

$$F_{eq} = \sqrt{\int_0^\infty (f)^2 \cdot |S_n(f)|^2 df} \quad (8)$$

O *T-F Map* é construído projetando T_{eq} e F_{eq} de cada pulso de DP em um plano bidimensional. Neste plano, os pontos projetados que pertencem a formas impulsivas semelhantes se agruparão para formar um grupo (*cluster*) distinto. Assim, vários grupos podem ser formados e cada grupo corresponde a uma única fonte de descarga parcial.

Na Figura 12 está um padrão PRPD (Figura 12 (a)) e o seu correspondente *T-F Map* (Figura 12 (b)), na qual é possível visualizar que, enquanto no padrão PRPD, os sinais estão próximos e em alguns casos, sobrepostos, no *T-F Map*, ocorre uma separação em grupos distintos.

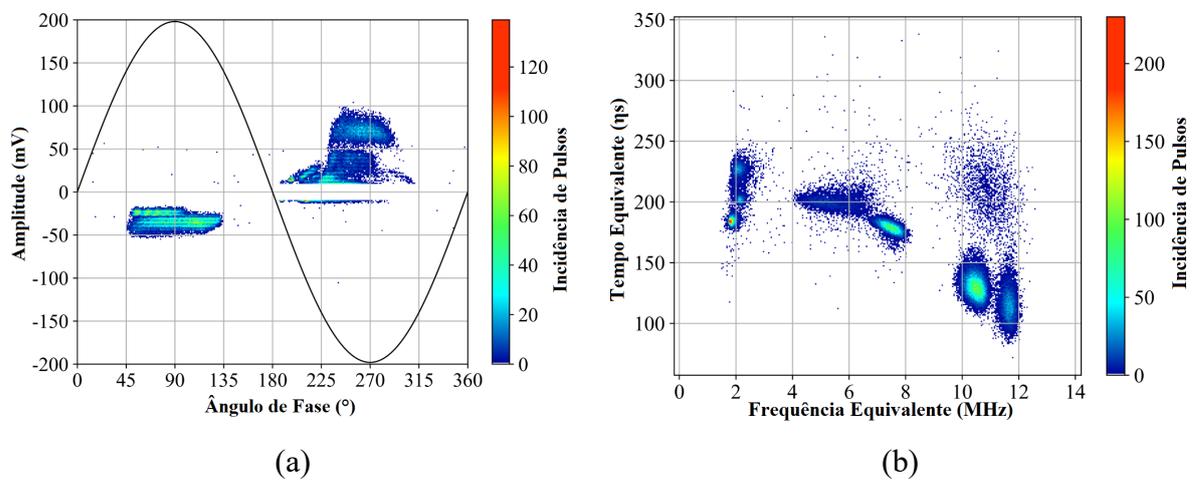


Figura 12 – (a) Padrão PRPD; (b) *T-F Map* correspondente ao padrão PRPD da Figura 12 (a). Adaptada de [53].

Um exemplo da separação de DP realizada com o *T-F Map* por [49] está representada nas imagens a seguir. Na Figura 13 (a) está o padrão PRPD completo da medição e na Figura 13 (b), o respectivo *T-F Map*, onde duas regiões (A e B) demarcam dois *clusters*. Com os dados do *cluster* da região A, foi reconstruído o padrão PRPD da Figura 13 (c). Já, com o *cluster* da região B, o padrão PRPD da Figura 13 (d).

Apesar do *T-F Map* conseguir obter uma separação dos pulsos diferentes fenômenos de DP, nem sempre a forma dos pulsos pode ser representada com precisão apenas com os parâmetros T_{eq} e F_{eq} . Consequentemente, em alguns casos, diferentes fontes de DP podem ser mapeadas com os mesmos valores de T_{eq} e F_{eq} [41].

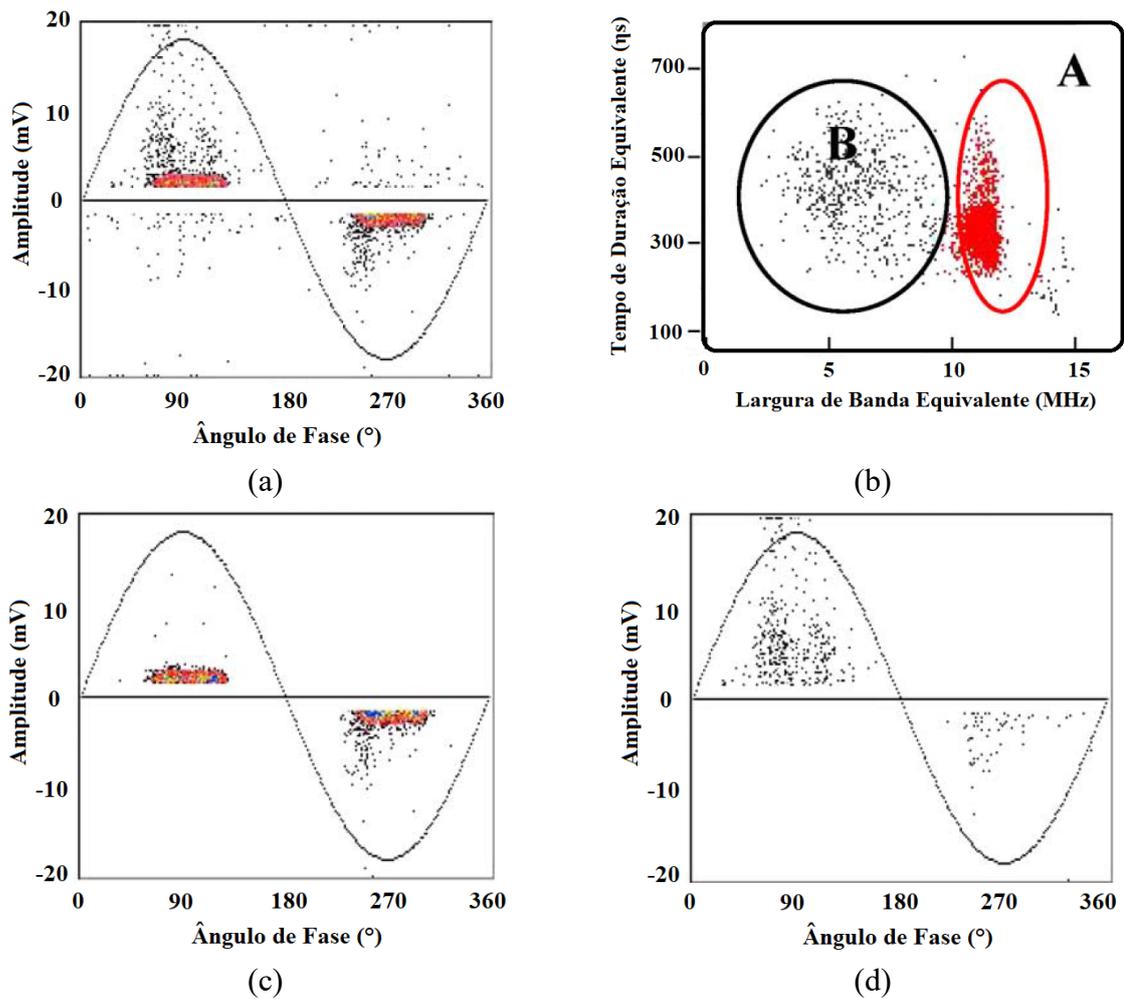


Figura 13 – (a) Padrão PRPD completo; (b) *T-F Map* correspondente ao padrão PRPD da Figura 13 (a); (c) Padrão PRPD para os pulsos na região A; Padrão PRPD para os pulsos na região B. Adaptada de [49].

2.4.4. Considerações Sobre os Métodos de Separação de DP

O método da Função de Auto Correlação possui bom desempenho em sintetizar as características dependentes do tempo e da frequência dos sinais de DP, porém, em alguns casos pode ser gerado mais de um padrão PRPD, associado com o mesmo tipo de defeito [40].

Com relação aos métodos de separação (*T-F Map* e *TF Sparsity Map*), ambos possuem bom desempenho em realizar a separação de múltiplas fontes de descargas parciais, inclusive, o estudo de caso realizado em [41], mostrou que o *TF Sparsity Map* obteve resultados melhores na separação de diferentes fontes de descargas parciais que o *T-F Map*.

Entretanto, o *TF Sparsity Map* precisa calcular o valor de irregularidade de tempo e frequência através de uma tendência de esparsidade obtida de vários pulsos, o que exige um

tempo de processamento maior, prejudicando a sua utilização em aplicações que necessitam de atualização de informações sem atrasos significativos.

O *T-F Map*, por sua vez, trabalha sobre as informações individuais de cada pulso e não sobre a tendência de esparsidade de pulsos semelhantes. Isso gera um esforço computacional significativamente menor e conseqüentemente, um tempo de processamento menor, o que faz com que *T-F Map* possa ser atualizado de maneira satisfatória, acompanhando a velocidade de medição e do processamento de sinais.

2.5. Classificação de Descargas Parciais

O objetivo principal da classificação de descargas parciais é poder entender a natureza do defeito presente na isolação, e, assim, compreender o quão danosa esta atividade de DP é para a isolação do equipamento. Por exemplo, descargas parciais internas na isolação sólida de equipamentos são substancialmente mais severas que descargas superficiais ou do tipo corona.

Portanto, identificar e classificar atividades de DP, e, conseqüentemente, estabelecer uma correlação de severidade, permite realizar um diagnóstico mais assertivo da isolação, possibilitando que os protocolos de manutenção necessários sejam acionados antes da ocorrência de uma falha severa que pode comprometer o equipamento em operação e levar à indisponibilidade no fornecimento de energia elétrica.

Classificar defeitos na isolação é um requisito fundamental para programas de manutenção baseados na condição do equipamento, contribuindo diretamente para a garantir a operacionalidade dos equipamentos elétricos e, conseqüentemente, da confiabilidade do sistema elétrico em geral.

No item 2.5.1, são apresentadas algumas técnicas que já foram utilizadas na classificação de descargas parciais em equipamentos elétricos, e, no item 2.5.2, é apresentado o Sistema de Inferência Fuzzy (FIS – *Fuzzy Inference System*) que foi utilizado neste trabalho para identificar os três tipos básicos de descargas parciais: interna, superficial e corona.

2.5.1. Técnicas de Inteligência Artificial para Classificação de Descargas Parciais

Com avanço das técnicas de processamento de sinais e dos métodos convencionais de Aprendizado de Máquinas (ML - *Machine Learning*), estes recursos foram gradualmente

empregados para classificar descargas parciais, seja através de Redes Neurais Artificiais (ANN - *Artificial Neural Network*), Máquina de Suporte de Vetores (SVM - *Support Vector Machine*) ou Sistemas de Inferência Fuzzy (FIS - *Fuzzy Inference System*).

Recentemente, com o avanço técnico do desempenho de *hardwares* e da computação como um todo, as técnicas de Aprendizado Profundo (DL - *Deep Learning*), derivada do ML, tem recebido uma considerável atenção da indústria, e, principalmente, da academia para aplicação de DL na identificação de descargas parciais.

Com estruturas mais complexas, os modelos de DL são capazes de extrair recursos hierárquicos dos dados de entrada e obter resultados precisos e confiáveis. Entre estes métodos pode-se citar o Codificador Automático (AE - *Autoencoder*), a Rede Neural Convolucional (CNN - *Convolutional Neural Network*) e a Rede Neural Recorrente (RNN - *Recurrent Neural Network*), que serão brevemente descritos a seguir.

A seguir, são apresentadas algumas das principais técnicas de ML e DL aplicadas à classificação de descargas parciais.

- Redes Neurais Artificiais:

A ANN é inspirada nas redes neurais biológicas e têm sido utilizadas no diagnóstico de descargas parciais há pelo menos duas décadas. Os neurônios estão conectados entre si através de um *link* (ligação). Cada ligação está relacionada à uma informação de peso, que fornece os dados e as informações mais valiosas sobre o neurônio para realizar diferentes aplicações. Cada neurônio tem um sinal de ativação em seu estado interno, e a combinação do sinal de entrada e este sinal de ativação fornece o sinal de saída, que é posteriormente transferido para outras unidades de processamento [54].

Uma ANN possui três camadas construtivas principais, a de entrada, a oculta e a de saída. A camada de entrada é composta por nós que distribuem os dados e informações para a camada oculta, sem realizar nenhum tipo de processamento. Os nós da camada oculta são capazes de mapear e resolver problemas não-lineares. Já os nós da camada de saída fornecem a saída para as outras unidades.

Existem diversos tipos de ANN, como a Rede Neural de Retropropagação (BPNN – *Backpropagation Neural Network*) que é treinada com um algoritmo de retropropagação amplamente utilizado em redes neurais, nas quais, o fluxo de informações é sempre em uma única direção (*feedforward*) [55]. Em geral, as redes neurais do tipo BPNN são as mais

utilizadas para realizar o diagnóstico de descargas parciais [55, 56, 57]. Em conjunto com informações estatísticas do PRPD, a BPNN consegue melhorar os resultados de classificação de DP [58].

Outro tipo de rede neural é a Rede Neural de Conjunto (ENN - *Emsemble Neural Network*) que combina múltiplos modelos de ANN, aplicando técnicas de aprendizado conjunto conhecidas como *bagging* e *boosting*. O *bagging* tenta reduzir a variância dos resultados ao normalizar os modelos treinados pela média, sendo adequado para mitigar os problemas de sobre ajuste (*overfitting*) enquanto o *boosting* tenta reduzir a variância dos resultados, colocando um peso sobre o desempenho dos modelos treinados [59, 60].

Apesar da ENN apresentar melhorias na taxa de assertividade de classificação de DP e ser mais estável, ela não obtém bons resultados com dados simples provenientes de um processo linear, além de exigir um grande esforço computacional e de memória [55].

- Máquina de Suporte de Vetores:

A SVM é um grupo de aprendizado de máquinas supervisionado que possui capacidade de lidar com problemas altamente complexos de classificação. De maneira simplificada, é uma ferramenta de aprendizado que cria planos de separação para cada classe de dados. Na classificação de descargas parciais, a SVM utiliza características não lineares das descargas parciais, mapeando-as com uma função de mapeamento não linear [61].

As características obtidas das informações estatísticas dos fenômenos de descargas parciais podem incluir: média, variância, valor de curtose, assimetria da distribuição, fator de correlação cruzada, assimetria das amplitudes de descarga, assimetria com relação ao ângulo de fase, taxa de repetição dos pulsos, carga aparente média, entre outras informações [61, 62].

O tipo de SVM utilizado possui grande impacto sobre o processo de classificação do SVM, sendo os tipos mais comuns utilizados, a SVM linear, a polinomial (cúbico ou quadrático), a SVM Gaussiano e o tipo *Kullback-Leibler*. A solução para um SVM típico é um problema de otimização convexa, que sempre pode encontrar uma solução ótima global sem problemas de sobre ajuste, se comparada com a ANN [55].

A principal desvantagem é a sensibilidade da resposta com base no tipo de SVM escolhida. Além desta desvantagem, elas são computacionalmente ineficientes com um grande conjunto de dados [55].

- Codificador Automático:

Um codificador automático (AE) é uma rede neural artificial não supervisionada que aprende a compactar, codificar e a reconstruir dados de maneira eficiente. O tipo mais simples de AE é composto por duas partes principais, o codificador e o decodificador [55].

Para alcançar melhores desempenhos na classificação de descargas parciais, algumas variantes do AE foram propostas, como o AE Esparso (SAE – *Sparse Autoencoder*) [63, 64], AE Sem Ruído (DAE – *Denosing Autoencoder*) [65], o AE Variacional (VAE – *Variational Autoencoder*) [66] e o Codificador Automático Empilhado Sem Ruído (SDAE - *Stacked Denosing Autoencoder*).

O SDAE proposto por [65], conseguiu obter taxas de classificação de aproximadamente 92 %, com um melhoramento de 5,3 % sobre o SVM e 6,1 % sobre o BPNN [55].

- Redes Neurais Convolucionais:

As Redes Neurais Convolucionais (RNN) também já foram aplicadas no diagnóstico de equipamentos elétricos para detecção de faltas, como corona, envelhecimento, ponto mais quente local, em equipamentos do sistema elétrico de potência [67]; em imagens de sinais de descargas parciais no domínio do tempo através de imagens bidimensionais para classificação de DP [68]; para reconhecimento de descargas parciais em GIS [69]; em cabos com isolamento em XLPE, com aplicação de métodos acústicos [70]; classificação de descargas parciais em chaves seccionadoras [71], entre outras aplicações.

- Redes Neurais Recorrentes:

Nas Redes Neurais Recorrentes (RNN – *Recurrent Neural Network*), as ligações entre os nós formam um gráfico com direção ao longo de uma sequência temporal, tornando a RNN capaz de explorar o comportamento dinâmico de dados de séries temporais. Um dos tipos mais populares e de melhor desempenho de RNN são os chamados modelos Memória de Curto Prazo Longa (LSTM – *Long Short-Term Memory*).

Além das recorrências externas, comuns em RNNs tradicionais, o LSTM introduz uma recorrência interna, que facilita o treinamento do modelo, ao permitir que o gradiente flua por longas durações [55]. As RNN do tipo LSTM já foram aplicadas na classificação de descargas

parciais em transformadores, com a utilização de informações do padrão PRPD e das formas impulsivas de DP [72, 73] e em GIS com padrão PRPD e sinais de UHF [74, 75].

2.5.2. Sistema de Inferência Fuzzy

O Sistema de Inferência Fuzzy (FIS – *Fuzzy Inference System*) é um sistema lógico baseado em conhecimentos que utilizam a Teoria de Lógica Fuzzy (FL) e consiste em um mapeamento não-linear simples do espaço de entrada para o espaço de saída, estabelecendo diferentes padrões e regras de decisão para fornecer uma saída definitiva [54].

No fluxograma, da Figura 14, estão de maneira simplificada, as principais etapas do processo de classificação com um Sistema de Inferência Fuzzy.

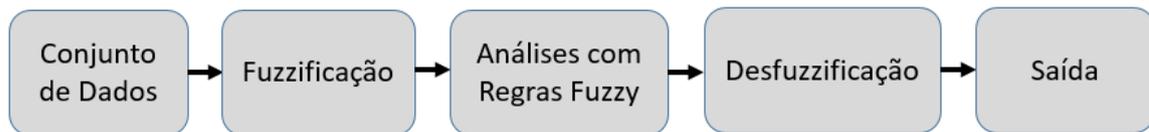


Figura 14 – Fluxograma de um Sistema de Inferência Fuzzy.

Após receber um conjunto de dados de entrada, é realizada a fuzzyficação dos dados através de funções de pertinência, transformando assim, as entradas reais em um conjunto de informações no domínio Fuzzy. Após a fuzzyficação, o sistema de inferência é aplicado com base em regras e operadores Fuzzy. Por último, é realizada a desfuzzyficação, novamente com a utilização de funções de pertinência, obtendo-se assim, um conjunto de dados de saída [55].

As maiores vantagens da utilização de FIS dizem respeito a flexibilidade, facilidade de desenvolvimento e reconhecimento e habilidade de fornecer uma solução para problemas complexos.

A utilização de FIS para classificação de descargas parciais tem sido amplamente utilizada [51, 76-79]. A FL possui boa adaptação com ambiguidades, incertezas e complexidade. Uma característica atrativa de sistema FIS é a conexão direta entre os parâmetros do FIS e o raciocínio humano, permitindo ajustar melhor o sistema FIS conforme o conhecimento do operador aumenta [79].

Para estabelecer os marcadores de identificação que são utilizados como parâmetros de entrada do FIS, devem ser selecionados apenas parâmetros que possuam faixas de variação em intervalos distintos e bem definidos, relevante a cada tipo de fonte específico de descargas

parciais. Além disso, estes intervalos devem permanecer praticamente constantes com base em cada tipo de equipamento, circuito de medição, variação da tensão aplicada, local do defeito, condições ambientais e tempo de operação [79].

Após definir adequadamente os marcadores de identificação, é possível realizar a fuzzyficação do conjunto de dados de entrada. Para cada marcador, é estabelecido um intervalo de variação subdividido em um número pré-estabelecido de intervalos, entre o valor mínimo e o valor máximo. Cada um destes intervalos está associado a um atributo linguístico, por exemplo, uma faixa de variação com três intervalos, estabelecidos com base na atividade de descargas parciais, e pode ter os atributos linguísticos: BAIXA (B), MÉDIA (M) e ALTA (A).

Estabelecidos os intervalos e atributos linguísticos, a fuzzyficação é realizada através das funções de pertinência, que convertem um conjunto discreto de dados de entrada para valores de pertinência Fuzzy, relacionando estas entradas com os atributos linguísticos. O grau de pertinência de uma dada função varia de 0 a 1, e a soma de todos os graus de dependências dos diferentes atributos de um intervalo de variação é sempre igual a 1.

Na Figura 15, está um exemplo de fuzzyficação de um parâmetro P , relacionado à atividade de DP, com atributos linguísticos BAIXA (B), MÉDIA (M), ALTA (A), com funções de pertinência u_1 e u_3 do tipo trapezoidal e u_2 do tipo triangular.

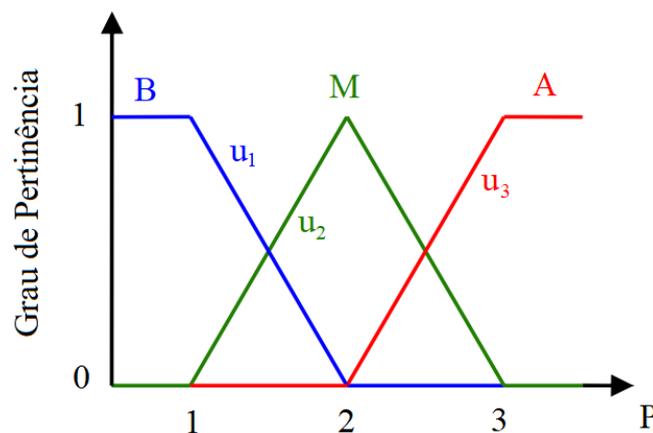


Figura 15 – Exemplo de fuzzyficação de um parâmetro P , relacionado à atividade de DP, com atributos linguísticos BAIXA (B), MÉDIA (M), ALTA (A).

Depois da fuzzyficação, o FIS utiliza as regras de decisão e operadores Fuzzy para associar o universo de entrada de dados com o universo de saída de dados. Alguns exemplos de operadores Fuzzy são E, OU, SE, ENTÃO.

Um exemplo de aplicação de uma regra de decisão, com operadores Fuzzy e com base na Figura 15, é mostrada na equação (9):

$$SE ((u_1 = 0) E (u_2 = 1) E (u_3 = 0)), ENTÃO: \quad (9)$$

$$Saída = MÉDIA$$

Comparativamente, a principal vantagem da utilização do FIS, ao invés de ANN, é que o FIS não necessita de um grande conjunto de dados entrada para tomar uma decisão. O FIS consegue fornecer uma classificação para as descargas parciais com base em probabilidade, enquanto que a ANN consegue classificar as descargas parciais de geometria semelhante [55].

2.5.3. Marcadores de Identificação

Após o processamento de sinais e a separação dos diferentes fenômenos, que podem estar presentes na medição, diversos parâmetros podem ser utilizados como marcadores de identificação, os parâmetros mais frequentes estão listados a seguir [51, 79-81]:

- Tensão de início das descargas parciais;
- Tensão de extinção das descargas parciais;
- Ângulo de fase de início das descargas parciais;
- Ângulo de fase de extinção das descargas parciais;
- Intervalo de fase, definido como a diferença absoluta entre o ângulo de fase de extinção e o ângulo de fase de início das descargas parciais;
- Valores máximo e mínimo das amplitudes medidas de descargas parciais;
- Valor médio de descargas parciais por ciclo da tensão aplicada;
- Valor médio da carga aparente por ciclo;
- Valor médio de um pulso de DP;
- Valor médio de energia das descargas parciais.
- Razão entre a quantidade de pulsos positivos e negativos.

Algumas distribuições podem ser obtidas do agrupamento de características dos pulsos de DP no domínio do tempo com relação ao ângulo de fase [80, 82-83]:

- A distribuição por contagem de pulsos, que representa o número de descargas parciais observadas em função do ângulo de fase ($H_n(\Phi)$);

- A distribuição com base na altura média dos pulsos de DP, que representa o valor médio da amplitude das descargas parciais em função do ângulo de fase, em cada janela de observação ($H_{qn}(\Phi)$);
- A distribuição com base na altura máxima dos pulsos de DP, que representa o valor máximo da amplitude das descargas parciais em função do ângulo de fase, em cada janela de observação ($H_{qm}(\Phi)$).

Operadores estatísticos também podem ser utilizados para analisar as distribuições em função do ângulo de fase e das características de sua forma [51, 80, 82-83]:

- Valor médio da distribuição (Φ_m);
- Assimetria da distribuição (S_k);
- Fator de Kurtosis (K_u).

Outros operadores estatísticos relacionados à distribuição de Weibull também podem ser aplicados para analisar as distribuições em função da altura das amplitudes das descargas parciais [84, 85]. A principal vantagem da utilização dos parâmetros da função de Weibull é que através de apenas dois parâmetros, α (parâmetro de escala) e β (parâmetro de forma), as amplitudes dos pulsos de DP podem ser descritas. Enquanto α é proporcional à integral da média da altura das amplitudes de DP [85], β está relacionado à dispersão da altura dos pulsos de DP, que está intimamente ligada ao tipo do fenômeno de DP [84].

2.6. Estado da Arte

A medição de descargas parciais é uma ferramenta consolidada há décadas para o diagnóstico da qualidade da isolação de equipamentos elétricos. As atividades de DP estão relacionadas à defeitos na isolação e à consequente deterioração do sistema isolante. Sua natureza serve como indicador da severidade do defeito e suas implicações, que, em alguns casos, podem levar ao colapso total da isolação dos equipamentos.

O desafio, entretanto, não está em apenas medir adequadamente os pulsos de DP, mas também em separar os ruídos e os múltiplos fenômenos de DP dos dados de medição, e, por último, classificar os diferentes tipos de DP.

2.6.1. Métodos de Medição de Descargas Parciais

O método convencional é o método normalizado aceito por fabricantes e clientes para mensurar o nível de DP em equipamentos elétricos. O método convencional permite mediar DP em valores de carga aparente e, normalmente, os comitês técnicos responsáveis relativos à cada tipologia de equipamento, estabelece os critérios de avaliação da conformidade em cima de um limite aceitável de DP.

O método convencional de medição de DP se baseia nos requisitos de medição da norma IEC 60270 [11], que define os procedimentos e critérios para sistemas de medição de DP em valores de aparente. O método convencional é amplamente reconhecido e aplicado na avaliação da conformidade de equipamentos elétricos em ambientes laboratoriais e industriais.

Porém, a medição convencional tem limitações de aplicação fora destes ambientes, ou seja, na medição de DP em ambientes como subestações, devido à alta suscetibilidade a interferências eletromagnéticas e à reduzida relação SNR. Essas limitações, incentivaram a busca por alternativas capazes de realizar a medição nestas condições, e, que, oferecessem sensibilidade e confiabilidade em ambientes com nível elevado de ruído [12].

Essas alternativas são os métodos não-convencionais de medição de DP, baseadas na detecção de sinais na faixa de HF, VHF e UHF, através de acoplamento eletromagnético dos sinais de DP, como o HFCT, e equipamentos de medição acústica, como antenas e sensores UHF.

Contudo, cada método de medição tem suas vantagens e desvantagens. Pelo longo de tempo de utilização, as principais vantagens do método convencional é a disponibilidade na literatura de padrões PRDP de diferentes defeitos na isolação e a possibilidade de medir em valores de carga aparente. Já, os métodos não-convencionais oferecem melhor rejeição de interferências e maior relação SNR, com maior aplicação em ambientes ruidosos, inclusive, sem o desligamento de equipamentos.

Portanto, o método convencional é a referência para medições em ambientes controlados e os métodos não convencionais, para medições em ambientes ruidosos, como subestações, e, portanto, o mais adequado seria uma solução híbrida, que permita flexibilidade entre os diferentes métodos de medição.

2.6.2. Eliminação e Mitigação de Ruídos

Na medição de descargas parciais, é comum a presença de ruídos e perturbações que podem prejudicar a análise dos dados medidos. O objetivo da aplicação de técnicas de processamento de sinais sobre os dados medidos é mitigar e/ou eliminar ruídos e perturbações sem comprometer a forma dos pulsos de DP. Entretanto, atualmente, ainda não há uma técnica capaz de atingir este objetivo para todos os tipos de ruído existentes.

O processamento de sinais com a utilização de filtro passa-baixa (LPF) tem desempenho prejudicado na presença de sinais de baixa frequência. A FFT tem boa capacidade de remover ruídos senoidais, assim, como, o filtro *Notch*, porém, com um tempo de processamento maior [17].

A Transformada Wavelet (WT) tem sido utilizadas para eliminação do ruído de fundo, extração de pulsos de DP e seleção automática do valor limiar de descarga, entretanto, apesar do bom desempenho, é dependente da família Wavelet escolhida, extraindo apenas sinais semelhantes à família escolhida [19, 25-27]. A versão discreta da WT, a DWT [28], é mais rápida no processamento, com desempenho um pouco superior a WT, porém, também é dependente da família Wavelet escolhida.

Técnicas adaptativas [16, 30, 86] também já foram empregadas como o FDAF, a EMD e a EEMD. O FDAF, e, a EMD, utilização decomposições dos sinais no domínio da frequência, porém, há limitações em separar sinais de frequência semelhantes. O EEMD melhora o desempenho da separação de sinais do EMD, ao injetar um ruído branco de média igual a zero e decompor os sinais conjuntamente.

Por último, operadores matemáticos e elementos estruturais provenientes da teoria de morfologia matemática, também já foram utilizados por [30, 33-34] no diagnóstico de falhas em máquinas. O método possui bom desempenho selecionando os operadores adequados.

Portanto, apesar do bom resultado de algumas das técnicas existentes, há uma lacuna a ser preenchida em relação ao processamento de sinais com a finalidade de mitigação e eliminação de ruído, especificamente, uma técnica que consiga ser generalizada, e, possua tempo computacional reduzido para ser aplicada durante a medição.

2.6.3. Separação de Descargas Parciais

Separar adequadamente as múltiplas fontes de DP que ocorrem simultaneamente durante a medição é a meta principal dos métodos de separação. A separação dos fenômenos é uma etapa essencial e anterior à extração de marcadores de identificação utilizados para classificar DP. Portanto, uma separação não-satisfatória prejudica a análise dos dados medidos e, conseqüentemente, a classificação dos fenômenos.

Assim como para a mitigar e eliminar ruídos, a FFT, a WT, e, a DWT já foram utilizadas na separação de DP. A FFT utilizada de maneira isolada não é tão eficaz para separar sinais de natureza diferente da senoidal, a WT, e, a DWT possuem as mesmas limitações descritas no item 2.6.2, com a diferença que na separação dos fenômenos, o tempo de processamento não é tão relevante, pois a separação pode ser realizada na etapa de pós-processamento.

Em [40], é proposto uma função de auto correlação (ACF) para correlacionar os pulsos que possuam formas semelhantes, a técnica obteve bom desempenho no estudo de caso realizado, porém, em alguns desses, pode gerar mais de um padrão PRPD associado ao mesmo defeito, além de exigir uma alta taxa de amostragem dos sinais, o que, limita a sua utilização em soluções que possuam a premissa de atualizar as informações, conforme os dados são adquiridos.

O *T-F Map* [48, 78] consegue obter a separação de diferentes tipos de DP presentes na mesma medição. O baixo tempo de processamento da técnica permite atualizar o mapa concomitantemente à entrada de dados. Entretanto, possui limitações relacionadas ao mapeamento de pulsos na mesma região do mapa.

Em [41], o mapa de esparsidade proposto, calculado sobre as tendências de esparsidade dos sinais medidos consegue uma boa separação dos fenômenos de DP simultâneos. Os resultados do estudo de caso se mostram melhores que o *T-F Map*, entretanto, é preciso que a técnica seja avaliada para outros casos. Além disso, exige um tempo de processamento maior, limitando a sua utilização ao pós-processamento.

Portanto, é necessário balancear a qualidade da separação em relação ao tempo de processamento do método de separação. É importante que durante a medição seja possível ter, pelo menos, uma ideia, da quantidade de fenômenos presentes na medição, e, assim, ajustar adequadamente as configurações de medição, como o fundo de escala do canal que DP e o valor limiar de descarga, para assim, medir adequadamente os fenômenos presentes.

2.6.4. Classificação de Descargas Parciais

Classificar as DP em suas categorias básicas, com robustez e eficácia, só é possível com a extração adequada de marcadores de identificação. Um ponto positivo do estado da arte de classificação de DP é que muitas técnicas de ML, DL, e suas variações, têm sido utilizadas. Entretanto, na maioria das vezes, grandes bancos de dados são necessários e dificultam a implementação destas técnicas com bancos de dados em estágio de desenvolvimento inicial/intermediário.

As redes neurais artificiais (ANN) e suas variações (BPNN e ENN) [56-57, 59-60, 87] já foram amplamente utilizadas no reconhecimento e interpretação de padrões e na classificação de DP, sendo a BPNN a variação mais utilizada no diagnóstico de DP [58]. No geral, as ANN possuem facilidade em resolver problemas de classificação multiclasse, gerenciamento de grandes quantidades de dados, entretanto, possuem baixa interpretabilidade devido a sua natureza de caixa preta.

A Máquina de Suporte de Vetores SVM [61] cria planos de separação das classes de dados utilizando características não-lineares de DP, tendo menos problemas de sobreajuste (*overfitting*), porém, possui uma sensibilidade dependente do tipo de SVM escolhida.

O Sistema de Inferência Fuzzy (FIS) [54] possui flexibilidade e facilidade de desenvolvimento, com boa capacidade de resolução de problemas complexos de classificação, adaptando-se as ambiguidades e incertezas da classificação. A principal vantagem é a capacidade de tomar decisões e fornecer um diagnóstico sem a necessidade de um grande banco de dados.

Os codificadores automáticos (AE) e suas variações [63-65] alcançam bons desempenhos na classificação de DP, maiores que 90%, em relação a SVM e BPNN.

As CNN [68-69, 71, 74] também já foram utilizadas no reconhecimento de DP em GIS, cabos e chaves seccionadores de maneira satisfatória.

As RNN já foram utilizadas com bom desempenho na classificação de DP de transformadores e GIS [72, 75].

Portanto, diversas técnicas já foram empregadas na classificação de DP, porém, é preciso considerar que muitas delas necessitam de um grande banco de dados para a sua implementação, ao contrário do FIS.

3. Solução Técnica para Medição, Separação e Classificação de Descargas Parciais

Este capítulo descreve a solução proposta, detalhando os seus principais componentes e como eles estão relacionados. No fluxograma apresentado, está presente todo o fluxo de informações, desde a medição dos sinais analógicos, até a execução do algoritmo de identificação. Na sequência, são apresentadas as técnicas de redução/eliminação de ruído e extração de pulsos de DP.

No presente capítulo também se apresenta como é determinada a polaridade dos pulsos de DP, o procedimento de padronização dos ângulos de fase e da construção do banco de dados de identificação. Também estão presentes, os marcadores de identificação utilizados e os critérios de interpretação dos tipos básicos de DP: corona, superficial e interna. Por último, é descrito o sistema de inferência utilizado para classificar DP.

3.1. Solução Proposta

A solução proposta para medição, separação e classificação/identificação de descargas parciais é composta por três componentes principais: - digitalizador, dispositivos de medição e *software*.

3.1.1. Digitalizador

Existem diversos tipos de digitalizadores no mercado, as principais diferenças técnicas entre estas placas são a quantidade de canais disponíveis, taxa de amostragem, tempo de subida, resolução vertical, memória de captura, largura de banda, entre outras características menos importantes. Entretanto, quanto maior a qualidade técnica e a quantidade de recursos do digitalizador, maiores são os custos para adquirir o produto.

Portanto, para que não ocorra subdimensionamento ou superdimensionamento do digitalizador é preciso saber exatamente as características dos fenômenos que se deseja medir. Por exemplo, sinais de descargas parciais são sinais rápidos, com tempo de subida da ordem de dezenas de nanosegundos e compostos por altas frequências.

Com base nestas características técnicas e da necessidade de medir tanto os sinais de DP, quanto a tensão aplicada (para construir o padrão PRPD), um digitalizador adequado para

medir descargas parciais precisa ter pelo menos dois canais, com taxa de amostragem, tempo de subida e a largura de banda compatíveis com estas características.

Existem digitalizadores com uma variedade de taxas de amostragem que variam de 1 a 200 GA/s, e normalmente, quanto maior a taxa de aquisição maior o custo envolvido. Para que os sinais medidos com o digitalizador percam o mínimo de informação possível e representem mais fielmente os sinais medidos, é recomendável uma taxa de amostragem pelo menos cinco vezes maior que a maior frequência que será medida. É importante destacar que com uma maior taxa de amostragem, maior serão os requisitos para a memória interna de captura do digitalizador.

É recomendável que o tempo de subida do digitalizador seja pelo menos cinco vezes menor que o tempo de subida do sinal mais rápido que se deseja medir. Quanto menor o tempo de subida do digitalizador, mais precisos são os detalhes do sinal em transições rápidas. Menores valores de tempo de subida, podem deslocar o pulso no domínio do tempo e fornecer informações errôneas. Por exemplo, para sinais com tempo de subida de 50 ns, é aconselhável que o digitalizador possua um tempo de subida de pelo menos 5 ns.

O mesmo critério da taxa de amostragem pode ser utilizado para determinar a largura de banda necessária para o digitalizador, ou seja, a largura de banda do digitalizador deve ser pelo menos cinco vezes maior que a máxima largura de banda do sinal para uma mínima degradação da amplitude do sinal de DP.

Com base nestas características, optou-se por um digitalizador que possuísse taxa de amostragem mínima de 100 MSa/s para medir adequadamente sinais com frequência de até 20 MHz, largura de banda mínima de 100 MHz, capaz de medir sinais de DP de até 20 MHz de largura de banda e com tempo de subida de até 4 ns para que seja possível medir sinais de DP de tempo de subida de pelo menos 40 ns.

Com base nos requisitos técnicos estabelecidos, o digitalizador escolhido é o que possui uma excelente relação custo-benefício, o modelo 2208B, produzido pela fabricante *Pico Technology*, que conta com dois canais de medição, taxa de amostragem de 500 MSa/s por canal, largura de banda de 100 MHz e tempo de subida 3,5 ns. Atualmente, esse digitalizador tem um custo de importação em torno de US\$ 2.000,00. Na Figura 16, encontra-se uma imagem do digitalizador 2208B.



Figura 16 - Placa de aquisição *PicoScope*, modelo 2208B. Fonte: [88]

3.1.2. Dispositivos de Medição

Conforme citado no Capítulo 2, as medições de descargas parciais podem ser realizadas através dos métodos convencionais e não-convencionais, para permitir uma maior flexibilidade de aplicação para a solução proposta, e, diferentes dispositivos de medição podem ser utilizados:

A) Medição Indireta com Método Convencional: o capacitor de acoplamento atua como um divisor capacitivo, que, em conjunto com um quadripolo, pode fornecer tanto os sinais de DP, como o sinal de tensão de sincronismo. Na Figura 17, está um capacitor de acoplamento (1) em conjunto com um quadripolo (2) fabricado pela empresa *TechImp*. Já, na Figura 18, há o circuito de medição com o Método Convencional.



Figura 17 - (1) Capacitor de Acoplamento, (2) Quadripolo.

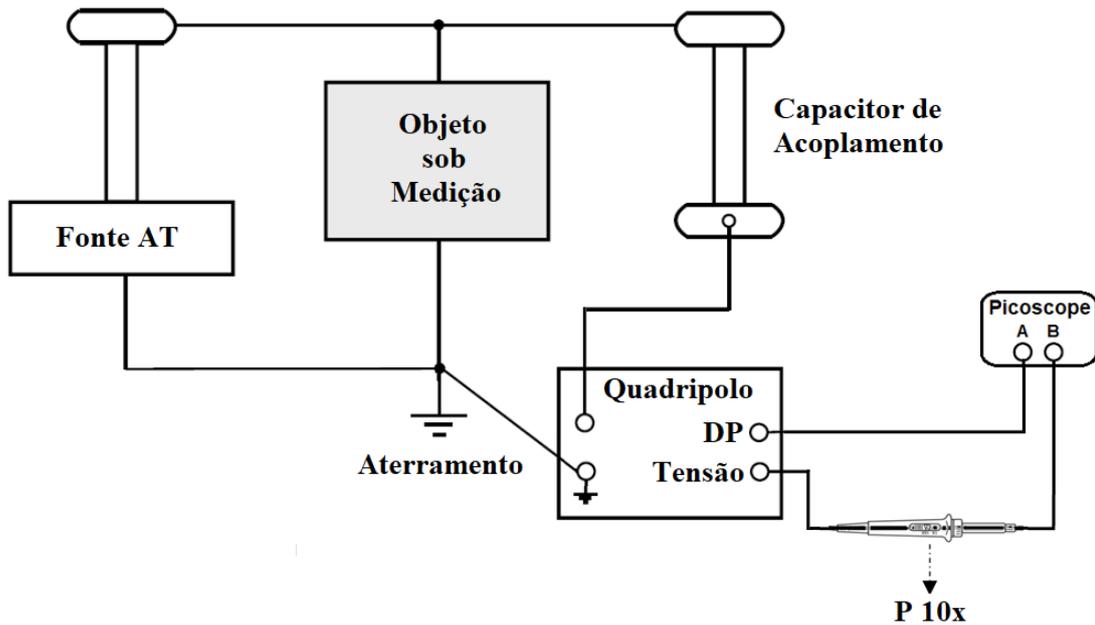


Figura 18 - Circuito de medição com o método convencional.

B) Medição Direta com Método Não-Convencional - HFCT + LFCT (*Low Frequency Current Transformer*): nesta configuração, os sinais de DP medidos são obtidos através do acoplamento magnético do HFCT, conectado ao ponto de aterramento do equipamento sob medição. O sinal da tensão de referência é obtido pelo LFCT, que é um transformador de corrente de baixa frequência e que também pode ser conectado ao ponto de aterramento do equipamento. Na Figura 19 há um HFCT (a) fabricado pela *TechImp* e um LFCT (b) fabricado pela *Fluke*, já na Figura 20 encontra-se o circuito de medição com Método Não-Convencional.



Figura 19 - (a) HFCT, (b) LFCT. Fonte: [89] e [90].

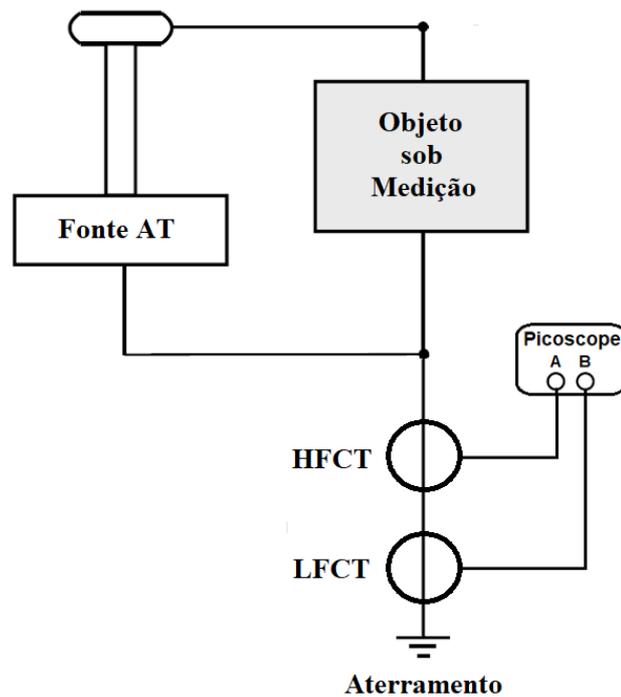


Figura 20 – Circuito de medição com o método não-convencional empregando HFCT e LFCT.

Com a configuração A) é possível realizar medições através do método convencional em um ambiente típico de laboratório, já a configuração B) além da utilização em laboratório, é possível realizar medições em campo com boa relação SNR, discutida anteriormente no item 2.2.3.

Os dispositivos de medição propostos permitem medir descargas parciais em laboratório e em campo com o digitalizador escolhido, sem problemas de compatibilidade com dispositivos de medição de diferentes fabricantes, desde que respeitados os limites de tensão dos canais do digitalizador.

3.1.3. Software PDM

O PDM possui três interfaces principais para o usuário, cada uma delas com uma função específica. A primeira é a interface de medição, em que as configurações de medição podem ser realizadas, a segunda é interface de separação de DP, na qual o usuário pode selecionar os *clusters* no *T-F Map*, e, por último, a interface de identificação/classificação de DP. A atualização.

Na Figura 21, está representada a interface de medição do PDM, com os botões e funcionalidades gráficas. Os itens numerados da Figura 21 estão descritos a seguir:

- 1) Submenu Configurações: onde são inseridas informações da relação das pontas de prova e da relação de divisão do capacitor de acoplamento, se necessário.
Submenu Analisar: leva a uma nova janela gráfica, na qual, o arquivo de dados escolhido passará pela etapa de separação de sinais de DP e ruídos, com o recurso *T-F Map*.
Submenu Sobre: descrição do PDM.
- 2) Botão Conectar: utilizado para conectar o PDM com o digitalizador.
- 3) Botão Desconectar: utilizado para desconectar o PDM do digitalizador.
- 4) Banda: informa ao usuário o tipo de banda da medição em IEC 60270 ou personalizável.
- 5) Frequência Central: permite ao usuário escolher a frequência central da medição. Se a escolha da banda for IEC 60270, o valor de 550 kHz é inserido automaticamente.
- 6) Largura de Banda: permite ao usuário escolher a largura de banda da medição. Se a escolha da banda for IEC 60270, o valor de 900 kHz é inserido automaticamente.
- 7) Calibrar com: em medições pelo método convencional, permite ao usuário inserir o valor em picocoulomb no qual a etapa de calibração será realizada.
- 8) Fator de Calibração: valor adimensional de fator de calibração durante a calibração e utilizado para corrigir as amplitudes dos pulsos medidos.
- 9) Botão Calibrar: botão para iniciar o procedimento de calibração.
- 10) Método de Medição: permite escolher medir em picocoulomb (IEC 60270) ou volts (métodos não-convencionais e medição indireta com capacitor de acoplamento).
- 11) Botões: Iniciar / Parar / Salvar: o botão Iniciar permite que os sinais comecem a ser medidos e começa a salvar um arquivo .CSV com os dados medidos; o botão Parar tem a função de parar a medição e salvar o arquivo .CSV com os dados medidos; o botão Salvar salva uma imagem em formato .PNG da interface de medição do PDM.
- 12) Campo Alerta e Avisos: informa ao usuário o estado atual da medição, como por exemplo, se o software está conectado à placa de aquisição, se a medição foi parada pelo usuário, entre outras informações.
- 13) Oscilograma Instantâneo: apresenta graficamente um oscilograma com os pulsos de DP capturados no último bloco de medição. Sua escala vertical é sempre apresentada em volts ou milivolts, para permitir ao usuário ajustar adequadamente o fundo de escala do canal de DP (ver descrição do item 15).
- 14) FFT: apresenta graficamente a Transformada Rápida de Fourier do sinal medido do último bloco de medição.

- 15) Escala (DP): permite realizar o ajuste do fundo de escala do canal que mede os sinais de descargas parciais.
- 16) Escala (U): permite realizar o ajuste do fundo de escala do canal que mede o sinal de tensão. Ao selecionar a opção Auto, este ajuste é feito automaticamente.
- 17) Trigger: permite ao usuário ajustar o valor limiar de descarga (VLD). É apresentado em valores percentuais do fundo de escala do canal de medição de descargas parciais (Escala (DP)).
- 18) Tensão RMS: apresenta em RMS o valor da tensão aplicada no equipamento sob ensaio.
- 19) DP MAX: apresenta o valor máximo de descarga parcial medido para o último bloco de medição.
- 20) Taxa de Repetição: apresenta a taxa de repetição calculada para o último bloco de medição.
- 21) Botão PRPD e *T-F Map*: abre uma nova janela, onde são apresentados graficamente padrão PRPD e o correspondente *T-F Map* com as informações obtidas e calculadas de todos os blocos de medição.
- 22) Submenus Reiniciar e Salvar Imagem: o submenu Reiniciar permite ao usuário excluir todos os dados de medição e reiniciar a construção do padrão PRPD e *T-F Map*; o submenu Salvar Imagem salva um arquivo .PNG do padrão PRPD e do *T-F Map*.
- 23) PRPD: padrão PRPD com as informações de amplitude e ângulo de fase de cada pulso medido. A barra de cores a direita, fornece informações da quantidade de pulsos em determinada região do padrão PRPD, sendo a cor vermelha, o local de maior incidência dos pulsos de DP.
- 24) *T-F Map*: mapa de tempo x frequência com o tempo de duração equivalente e largura de banda equivalente de cada pulso medido. A barra de cores à direita, fornece informações da quantidade de pulsos em determinada região do *T-F Map*, sendo a cor vermelha o local de maior incidência dos pulsos de DP.

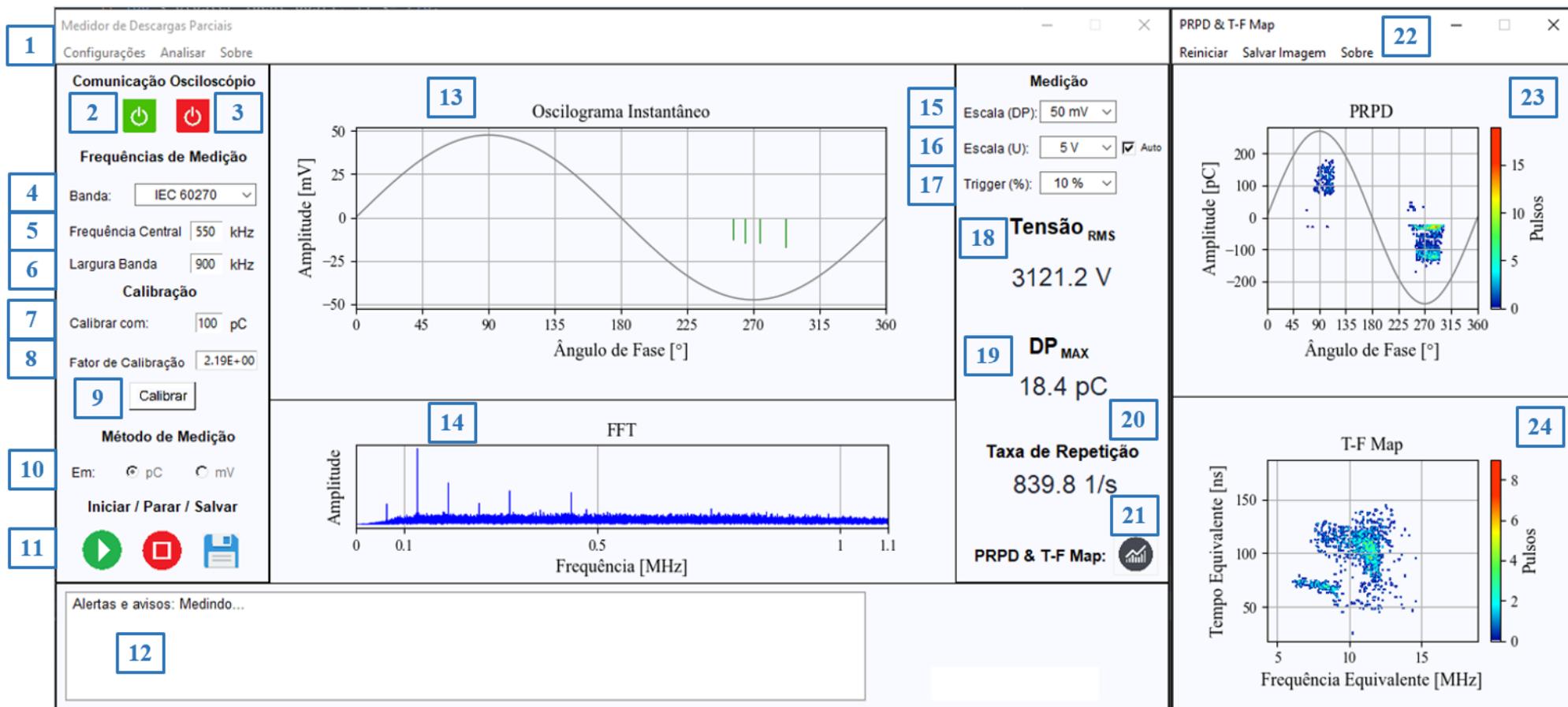


Figura 21 - Interface de medição do *software* PDM.

Na Figura 22, está a interface de separação de DP do PDM, com os botões e funcionalidades gráficas, já, na Figura 23, está uma versão atualizada da interface de separação após a seleção de alguns *clusters*. Os itens numerados da Figura 22 estão descritos a seguir:

- 1) Submenu Identificar: leva a uma nova janela gráfica onde os *clusters* podem ser identificados.
- 2) Seleção de Cluster: o PDM disponibiliza a separação de DP em até seis *clusters* que podem ser selecionados nas cores: vermelho, azul, verde, amarelo, roxo e laranja. Após selecionar a cor desejada o usuário vai para a região do item 6) e seleciona os dados desejados.
- 3) Botão Excluir: permite ao usuário excluir um *cluster* que já havia sido pré-selecionado no *T-F Map* do item 6), basta escolher a cor do *cluster* e clicar em excluir.
- 4) Botão Reiniciar: permite apagar todos os *clusters* já selecionados e reiniciar o processo de seleção de *cluster* no *T-F Map* do item 6).
- 5) Botão PRPD: transforma os *clusters* selecionados no *T-F Map* do item 6) em padrões PRPD distintos, que serão inseridos nas regiões gráficas dos itens, 8), 9), 10), 11), 12) e 13).
- 6) *T-F Map*: Região gráfica interativa que permite ao usuário selecionar os *clusters* que serão separados em novos padrões PRPD.
- 7) PRPD - Completo: padrão PRPD completo importado do arquivo de dados obtido da medição, serve de referência para o processo de separação de DP.
- 8) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD do *cluster* vermelho, caso selecionado.
- 9) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD do *cluster* azul, caso selecionado.
- 10) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD do *cluster* verde, caso selecionado.
- 11) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD do *cluster* amarelo, caso selecionado.
- 12) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD do *cluster* roxo, caso selecionado.
- 13) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD do *cluster* laranja, caso selecionado.
- 14) Região gráfica onde será inserido o padrão PRPD dos dados que não foram selecionados em nenhum outro *cluster* selecionado anteriormente.

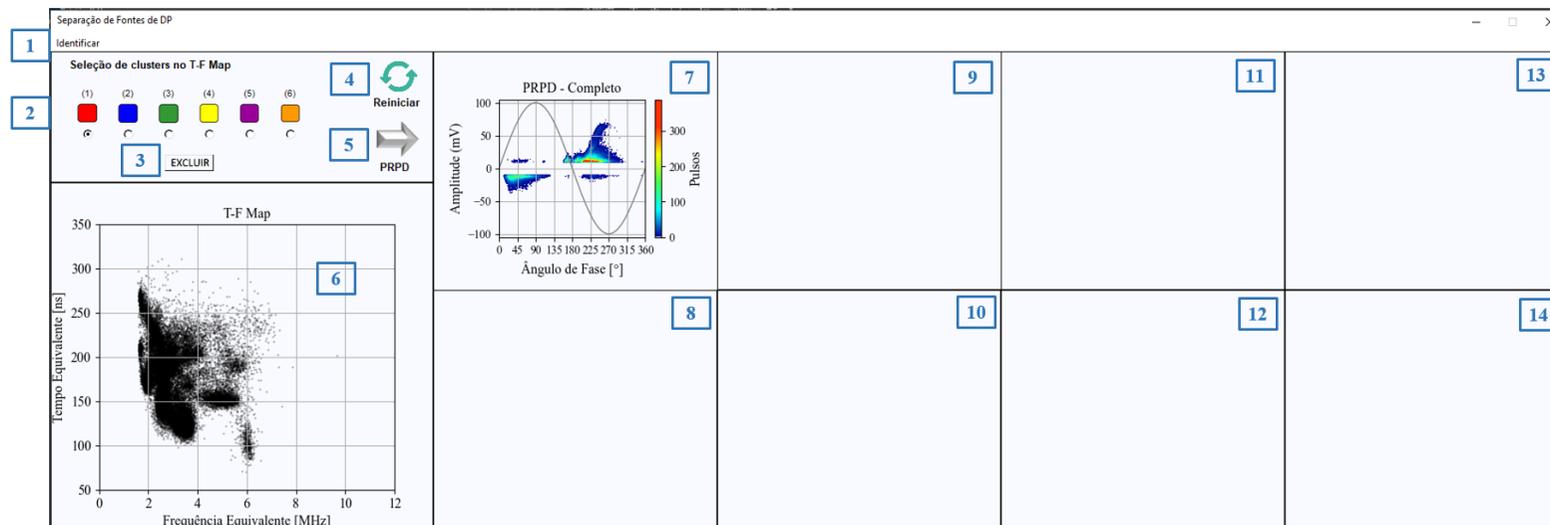


Figura 22 - Interface de separação de DP do *software* PDM (antes da seleção de *clusters*).

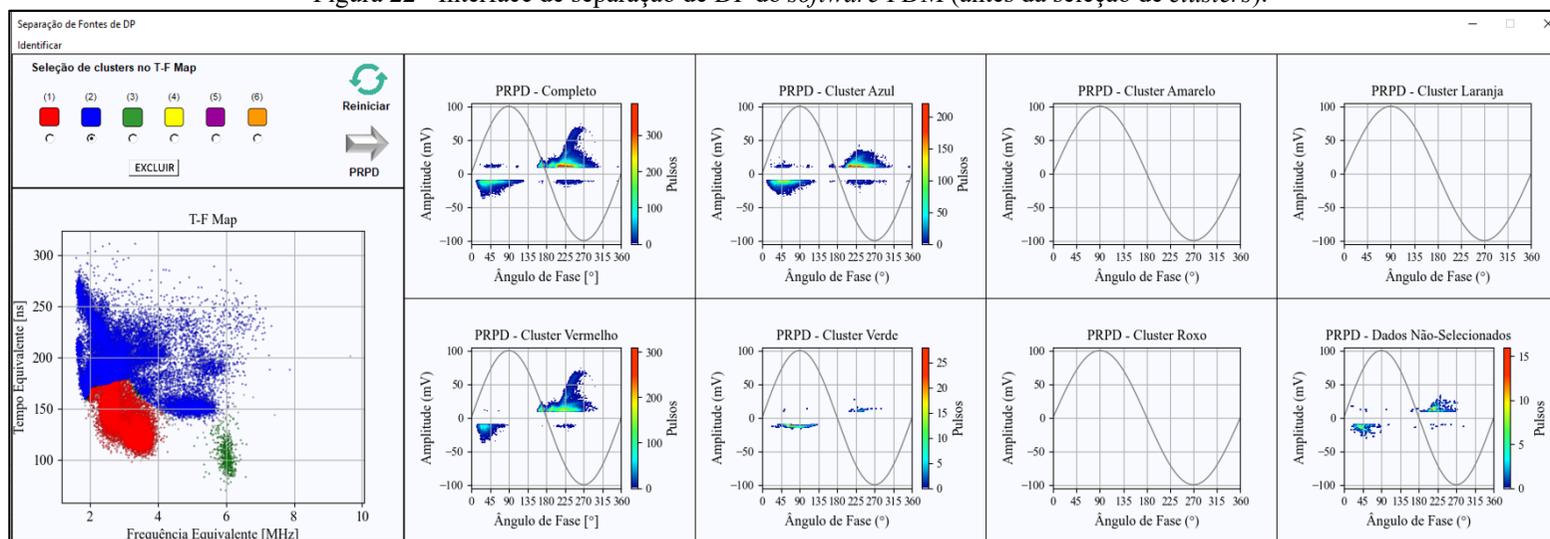


Figura 23 - Interface de separação de DP do *software* PDM (após a seleção de *clusters*.)

NOTA: em cada uma das regiões gráficas, ao clicar com o botão direito é possível salvar um arquivo .PNG da representação gráfica ou um arquivo .CSV com os dados que compõem a representação gráfica

Na Figura 24, está a interface de identificação de DP do PDM, com os botões e funcionalidades gráficas. Os itens numerados da Figura 24 estão descritos a seguir:

- 1) Escolha de *Cluster* para a identificação: permite ao usuário escolher o *cluster* que irá passar pelo algoritmo de identificação.
- 2) Botão Identificar: aplica o algoritmo de identificação sobre o *cluster* selecionado no item 1).
- 3) Campo Alerta e Avisos: informa ao usuário o status da execução do algoritmo de identificação e se o *cluster* sob avaliação foi classificado como ruído ou não identificado como DP.
- 4) Padrão PRPD Interativo (sem cores): região gráfica interativa que permite ao usuário excluir dados indesejáveis de cada *cluster* antes de aplicar o algoritmo de identificação.
- 5) Padrão PRPD com barra de cores: padrão PRPD do *cluster* sob avaliação com barra de cores relativa à incidência de pulsos.
- 6) Resultados da identificação: informa ao usuário o resultado obtido com o algoritmo de identificação em três tipos de DP: corona, superficial e interna. Informa, também, o *likelihood* do processo de identificação.
NOTA: o valor de *likelihood*, indica o quanto o resultado da identificação é conhecido por esse algoritmo, por exemplo, quanto mais próximo o valor de *likelihood* é de 100%, mais os dados da avaliação já fazem parte do conhecimento do algoritmo de identificação. Valores baixos de *likelihood* indicam que os dados sob avaliação são parcialmente novos para o conhecimento do algoritmo de identificação.
- 7) Parâmetros: região da interface de identificação do PDM, onde são mostrados parâmetros de amplitude, ângulo de fase e outras informações relativas aos dados do *cluster* que passou pelo algoritmo de identificação.

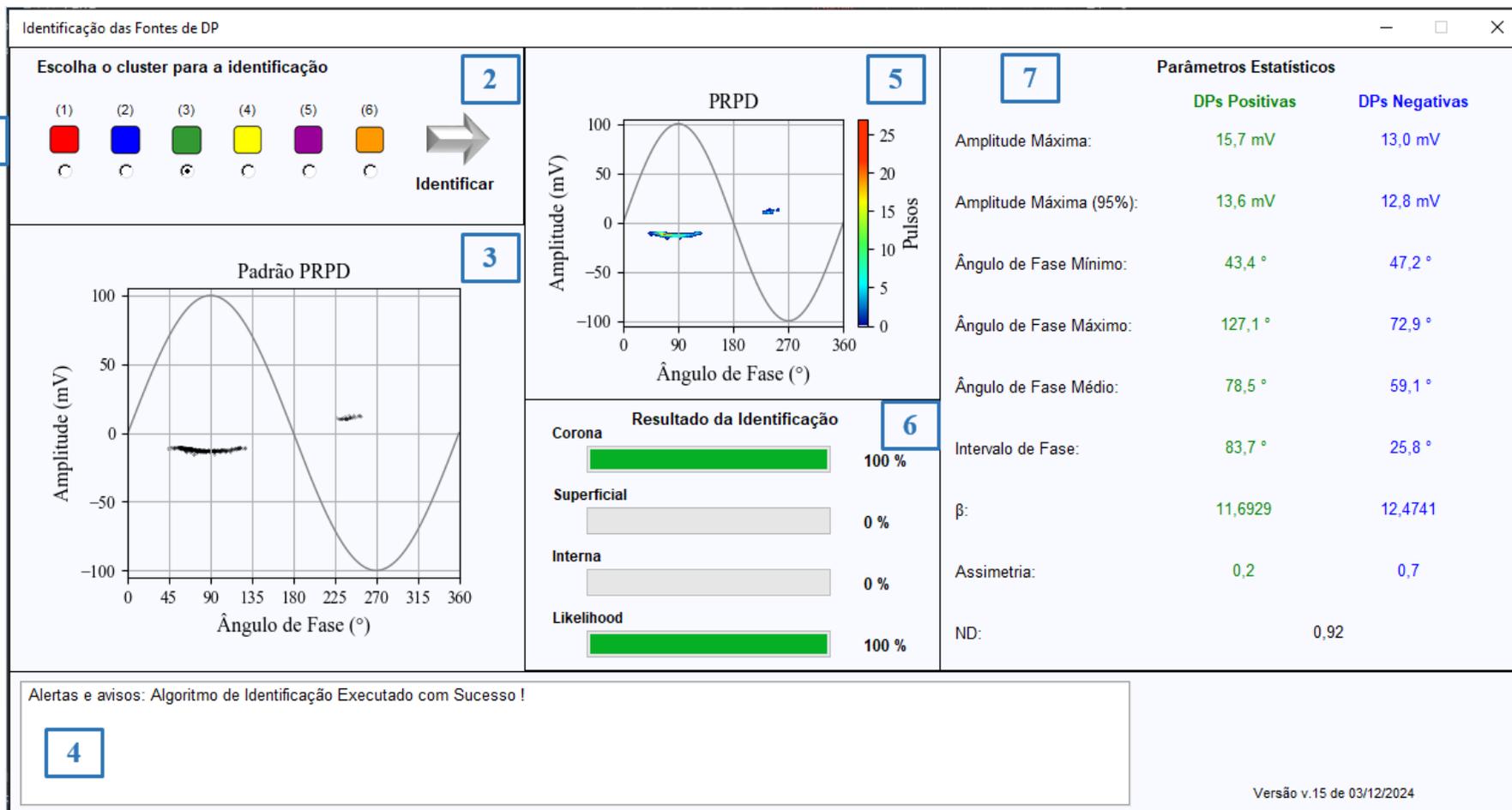


Figura 24 - Interface de classificação/identificação de DP do *software* PDM.

3.1.4. Funcionamento da Solução Proposta

Na seção 3.1, foram apresentados os principais componentes da solução proposta: digitalizador, dispositivos de medição e *software*. Nos próximos parágrafos é apresentado o funcionamento da solução proposta, integrando desde a medição dos sinais analógicos até processo de identificação do tipo de DP com o PDM.

Na Figura 25, está um fluxograma simplificado com o fluxo de informações dentro da solução proposta, e como é realizada a integração entre o conjunto de *hardware* (dispositivos de medição e digitalizador) e o *software* PDM. Neste, também está representada a interligação entre as diferentes camadas da interface do *software* (interfaces de medição, separação e classificação/identificação de DP).

- **Integração entre digitalizador, dispositivos de medição e o *software* PDM**

Os sinais analógicos de tensão e DP provenientes dos dispositivos de medição são acoplados ao digitalizador através cabos coaxiais com terminações tipo BNC. O digitalizador por sua vez, converte os sinais analógicos recebidos em sinais digitais, que servem dados de entrada para a interface de medição do PDM.

- **Comunicação e Linguagem de Programação**

A conexão física que permite a transferência dos dados do digitalizador *Picoscope 2208B* para o digitalizador é realizada através de um cabo de dados tipo USB. Para se comunicar com o digitalizador, o PDM utiliza os chamados *C Wrappers*, que são funções que traduzem comandos em Python para linguagem C. O motivo da utilização de *C Wrappers* se dá pelo fato de que os equipamentos da fabricante *Pico Technology* não fornecem suporte para comunicação direta entre digitalizador e linguagem Python.

A escolha pelo Python como linguagem de programação utilizada no desenvolvimento do PDM é devida a dois motivos principais: o Python é uma linguagem de programação *open-source*, ou seja, é um código de fonte aberta e sem necessidade de utilização de uma licença paga. Além disso, é uma linguagem de uso geral, que pode ser utilizada em análise de dados, aprendizado de máquinas, entre outras aplicações. Além disso, o Python possui bibliotecas específicas para utilização de aprendizado de máquinas como *Pytorch*, *TensorFlow* e *Keras*, e uma comunidade engajada em desenvolvimentos com Python nos fóruns e comunidades online, como *GitHub* e *Stack Overflow*.

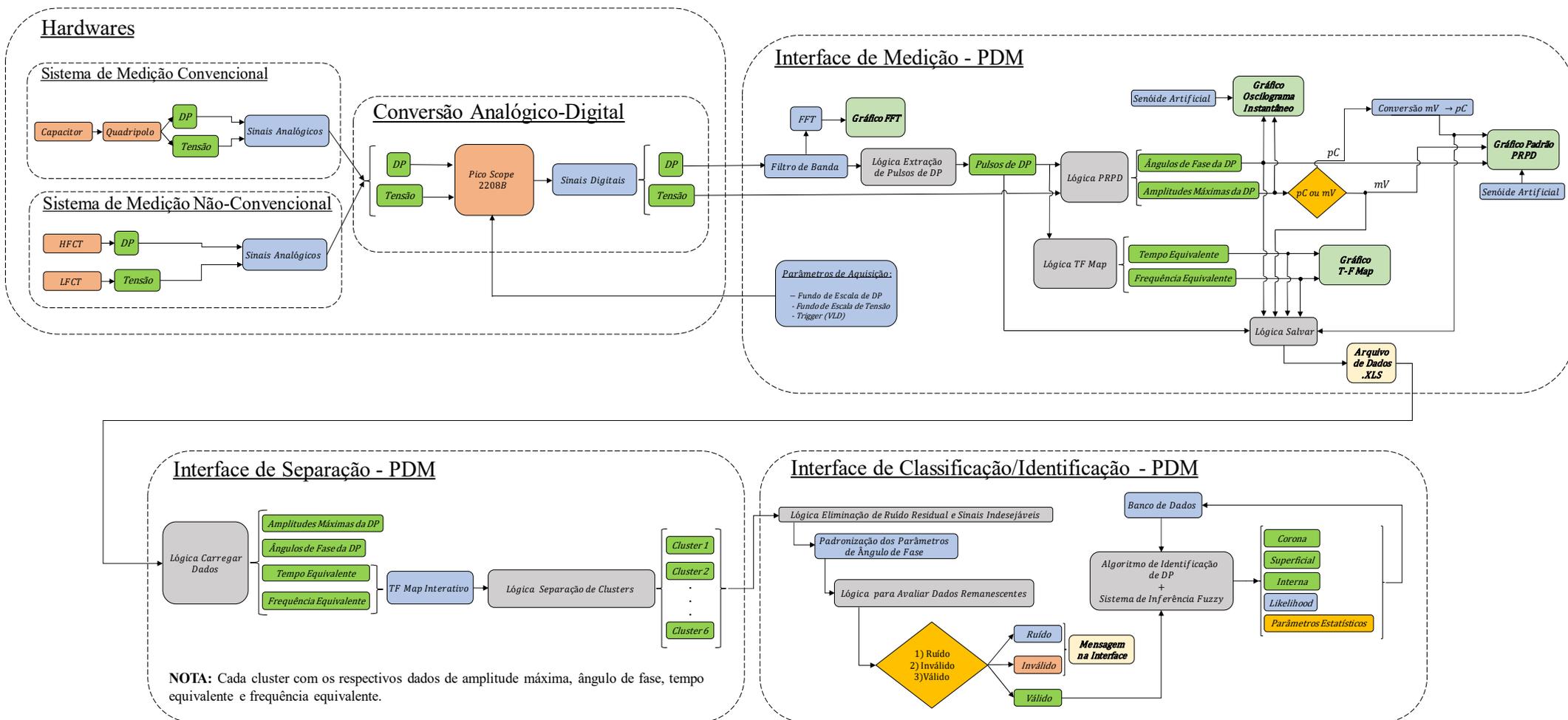


Figura 25 - Fluxograma simplificado de integração entre *hardware* e *software* e interfaces do PDM .

- **Importação de Dados do Digitalizador**

Durante o desenvolvimento do PDM, diversas janelas de tempo foram avaliadas, porém uma das premissas do desenvolvimento do PDM é de ele ser um *software* para medição em tempo real, ou seja, em que os dados medidos são atualizados rapidamente na interface a cada medição e processamento, assim, uma janela de tempo grande tornaria a aplicação inviável em termos de velocidade.

O PDM importa os sinais digitais do digitalizador em formato de blocos, com uma janela de medição correspondente ao período de um ciclo de tensão alternada em frequência industrial, assim, para cada bloco de dados importado do digitalizador, os sinais digitais de tensão e DP são transferidos para o PDM.

A integração entre o digitalizador e o PDM também tem um caminho inverso, que permite ao usuário ajustar adequadamente o Fundo de Escala dos canais de tensão e DP do digitalizador e também o *trigger*, que nada mais é que o valor limiar de descarga (VLD). Com estes três parâmetros de aquisição (os dois fundos de escala e o *trigger*), o usuário consegue configurar adequadamente as configurações do digitalizador para obter uma condição adequada de extração dos blocos de dados e também eliminar o ruído de fundo da medição do canal de DP.

As informações dos valores medidos e dos gráficos dinâmicos são atualizadas na interface com um tempo de processamento entre 800 ms e 1100 ms, atingindo o requisito de medição em tempo real estabelecido.

- **Filtro Passa-Banda Digital**

Após receber o sinal digital de DP do digitalizador, o PDM aplica um filtro passa-banda configurado pelo usuário na interface de medição. Diferentes configurações de filtro podem ser ajustadas no PDM, que além da configuração disponibilizada de medição convencional (IEC 60270), permite a personalização da frequência central e largura de banda do filtro.

Após aplicar o filtro passa-banda sobre o sinal de DP, este sinal passa pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) e sua representação gráfica é apresentada na interface do PDM.

- **Extração dos Pulsos de DP**

Após a aplicação do filtro de banda digital o sinal de DP passa pela lógica de extração dos pulsos de DP baseada no conceito do VLD, ou seja, os sinais que superam o VLD são considerados como pulsos de DP, e, então, uma lógica de extração é aplicada e avalia os dados do pulso antes de sua amplitude máxima até próximo a zero e também a sua acomodação próxima de zero após passar pelo valor máximo de amplitude, extraindo, assim, cada pulso de DP de maneira individual.

- **Lógica PRPD**

A Lógica PRPD é aplicada sobre o sinal digital de tensão e aos pulsos extraídos anteriormente. O objetivo desta lógica é obter o ângulo de fase de ocorrência do pulso de DP em relação ao sinal de tensão. Com estas informações e com uma tensão senoidal artificial representativa da tensão aplicada é possível construir graficamente um oscilograma instantâneo com os sinais de DP verificados no bloco de medição em questão.

Após determinar os ângulos de fase e as amplitudes máximas correspondentes de cada pulso de DP, é feita uma avaliação se a medição está sendo realizada pelo método convencional ou não, e caso seja pelo método convencional, os valores de amplitude máxima são corrigidos com o fator de calibração da medição, e as amplitudes, agora, são descritas em Coulomb (geralmente, na escala de pC).

Finalizada a etapa de determinação das amplitudes máximas, os ângulos de fase correspondentes e a aplicação o ou não do fator de calibração, é possível construir graficamente o padrão PRPD, que é atualizado na interface de medição do PDM a cada iteração completa do algoritmo de medição do PDM. A cada iteração, as informações são concatenadas, e, assim, a representação gráfica do padrão PRPD é atualizada para o usuário com todos dados já medidos desde o início da medição.

- **Lógica T-F Map**

A Lógica *T-F Map* é utilizada para determinar o tempo de duração equivalente e a largura de banda de cada pulso extraído com a lógica de extração de pulsos de DP. Com estas informações, é possível construir graficamente o mapa de tempo-frequência, que é atualizado na interface de medição do PDM a cada iteração completa do algoritmo de medição do PDM.

A cada bloco de pulsos que passa pela lógica *T-F Map* tem suas informações concatenadas, e assim, a representação gráfica do *T-F Map*, é atualizada para o usuário com todos dados já medidos desde o início da medição.

- **Lógica Salvar**

A Lógica Salvar é utilizada para armazenar a cada iteração, as informações extraídas dos sinais digitais de tensão e DP. Na primeira aba, são armazenados cada pulso extraído; na segunda aba, a data e hora da medição, a tensão aplicada medida e a amplitude máxima de DP correspondente. Por último, uma terceira aba armazena a amplitude máxima, ângulo de fase, tempo equivalente e frequência equivalente de cada pulso extraído.

- **Lógica Carregar Dados**

Esta lógica permite carregar as informações armazenadas no arquivo .XLS, extraindo os valores de amplitude máxima, ângulo de fase, tempo e frequência equivalentes de cada pulso. Ao clicar em Analisar, na interface de medição do PDM, uma janela é aberta para selecionar o arquivo .XLS desejado, e, então, após selecionar o arquivo, é aberta a interface de separação de DP do PDM.

- **T-F Map Interativo**

O *T-F Map* interativo é uma ferramenta do PDM presente na interface de separação (Figura 22), que permite ao usuário selecionar o *clusters* no *T-F Map*. O usuário seleciona uma cor para o *cluster* e faz a seleção utilizando os botões do mouse para selecionar uma região. O PDM disponibiliza seis cores, ou seja, o usuário pode selecionar até seis *clusters* no *T-F Map* interativo.

- **Lógica Separação de Clusters**

Finalizada a seleção de *clusters* no *T-F Map* interativo, o usuário pode verificar o resultado da separação, clicando na seta de cor prata (etiqueta: PRPD) da interface de separação (Figura 22). Ao clicar na seta, a lógica de separação de *clusters* separa os dados dos *clusters* selecionados e cria novos sub-padrões PRPD para cada *cluster* (Figura 23). Caso deseje reiniciar o processo de seleção, o usuário clica em Reiniciar.

- **Lógica Eliminação de Ruído Residual e Sinais Indesejáveis**

Através do PRPD Interativo, da Figura 24, é possível excluir ruídos e sinais indesejáveis com os botões do mouse, selecionando a região em que aqueles se encontram. É uma ferramenta valiosa, que permite levar um padrão PRPD mais nítido e limpo para o algoritmo de classificação/identificação de DP.

- **Padronização dos Parâmetros de Ângulo de Fase**

Para que o algoritmo de classificação/identificação funcione de maneira adequada é preciso que seja realizada uma padronização dos parâmetros de ângulo de fase. Este processo é realizado com base na polaridade do pulso de DP e do tipo de medição empregado (direta ou indireta). Maiores detalhes da aplicação desta padronização estão descritos no item 3.3.

- **Lógica para Avaliar Dados Remanescentes, Identificar Ruídos e Dados Inválidos ou sem Significado Físico**

Esta lógica avalia a pertinência dos dados remanescentes em duas etapas: a primeira, avalia, através de ferramentas estatísticas, se os dados remanescentes podem ser identificados como ruído e, caso seja confirmado como ruído, uma mensagem aparece na interface de identificação do PDM.

Na segunda etapa, os dados remanescentes já são assumidos como não sendo ruído, e, portanto, podem ser classificados como Dados Válidos, que são os dados que possuem potencial quantitativo para identificação nas categorias básicas de DP (corona, superficial e interna) ou Dados Inválidos (uma mensagem aparece na interface de identificação do PDM).

Dados Inválidos podem ser separados em duas categorias:

- Dados absurdos: que não possuem significado físico. Por exemplo: ângulo de fase médio menor que o ângulo de fase mínimo, ou qualquer outro marcador de identificação sem sentido físico.

- Dados irrelevantes: que não possuem informações suficientes para serem processadas estatisticamente e/ou passar pelo algoritmo de identificação. Por exemplo: quantidade de pulsos menor que 100 pulsos.

Os dados classificados como válidos são levados para o algoritmo de identificação.

- **Algoritmo de Identificação + Sistema de Inferência Fuzzy + Banco de Dados**

É o processo mais importante para identificar e classificar as descargas parciais. O algoritmo de identificação de DP extrai os marcadores de identificação dos dados de entrada e, através das regras de decisão do Sistema de Inferência Fuzzy e criadas com o banco de dados do PDM, identifica-se o fenômeno sob avaliação nas três categorias básicas de DP: corona, superficial e interna, além de apresentar o *likelihood*, resultante da avaliação e transformar os marcadores de identificação e os resultados de cada avaliação realizada em parâmetros que retroalimentam o banco de dados do PDM.

3.2. Redução de Ruído e Extração de Pulsos de DP

3.2.1. Estratégia Adotada para Eliminação de Ruído e Extração de Pulsos de DP

A eliminação de ruídos pode utilizar duas diferentes estratégias:

- Evitar a aquisição dos sinais de ruído durante a medição.
- Rejeição do ruído medido em uma etapa de pós-processamento.

Neste trabalho, as duas estratégias foram empregadas:

- Durante a etapa de medição, o ruído de fundo é eliminado ao estabelecer um valor limiar de descarga (VLD), ou seja, são considerados sinais de DP apenas sinais que em que amplitude máxima supera o VLD. A aplicação do VLD está descrita no item 3.2.2.
- Na etapa de pós-processamento: outras fontes de ruído podem ser separadas dos sinais de DP medidos com a aplicação do Mapa de Tempo-Frequência (*T-F Map*) [48] detalhado anteriormente no item 2.4.3, que utiliza o tempo de duração e a largura de banda equivalentes dos pulsos para separar diferentes fenômenos presentes na medição. O procedimento de eliminação pós medição está descrita no item 3.2.3.

A escolha por esta estratégia se dá principalmente devido ao fato de que a maioria das técnicas descritas anteriormente causam um esforço computacional significativo, aumentando o tempo de processamento dos sinais, limitando, assim, a sua utilização em aplicações de medição em tempo real, em outras palavras, aplicações com capacidade de permitir o acesso aos dados e informações da medição, sem atrasos significativos, com taxa de atualização, considerada neste trabalho como superior a 700 ms e inferior a 1400 ms.

Esta estratégia se mostrou eficiente na maioria dos casos avaliados, a única situação crítica encontrada ocorre quando os sinais de ruído excedem significativamente os sinais de DP tanto em termos de amplitude como em taxa de repetição.

Casos em que o sinal de ruído tem uma alta taxa de repetição, mas possui amplitude reduzida (como no de ruídos que ocorrem mesmo com o circuito desenergizado) podem ser evitados ao aumentar o valor limiar de descarga durante a medição e os sinais que ainda permanecerem podem ser eliminados na etapa de pós-processamento.

Casos em que o sinal de ruído tem uma baixa taxa de repetição, independentemente de sua amplitude, normalmente, são aqueles que o sinal de ruído possui correlação com a tensão do circuito e podem ser eliminados na etapa de pós-processamento.

Além da eliminação do ruído sem circuito energizado, a extração dos pulsos de DP também utiliza o valor limiar de descarga para estabelecer os sinais que são considerados como efetivamente como descargas parciais. Durante a medição, após estabelecer o VLD, os pulsos de polaridade positiva e negativa, que superam o VLD, são considerados como pulsos de descargas parciais, e, assim, uma determinada quantidade de pontos do pulso é coletada antes e após atingir o VLD.

3.2.2. Redução de Ruído e Extração de Pulsos de DP por Valor Limiar de Descarga

Em aplicações que necessitam de um processamento de sinais rápido com o objetivo de obter uma atualização de dados e informações sem atrasos significativos, o estabelecimento de um valor limiar de descarga (VLD) é um recurso que pode ser utilizado de maneira satisfatória para atingir os requisitos de velocidade de atualização de informações.

Ao determinar, durante a medição, o valor limiar de descarga adequado, os sinais de amplitude menores que o VLD não serão considerados como pulsos de descargas parciais, e assim, apenas os pulsos que superem o VLD serão extraídos do sinal original. Desse modo, é possível eliminar os ruídos presentes de circuito desenergizado, como o ruído de fundo, e também identificar os pulsos de polaridades positiva e negativa que serão considerados como DP.

Para visualizar o procedimento de eliminação de ruído do sinal de DP medido, incluindo a extração dos pulsos de DP, apresenta-se na Figura 26 (a) um sinal de DP, ainda com ruído

presente, representado com a cor azul, o valor de VLD (representado na cor verde), ajustado para 10% do valor do fundo de escala, ou seja, 5 mV, e o VLD representado graficamente pelas retas horizontais em verde. A referência de tensão está na cor cinza e os pontos representados com um ‘X’ são os valores máximos de cada pulso extraído.

Na Figura 26 (b), o sinal de DP já teve o ruído retirado. Assim como na Figura 26 (a), os valores máximos dos pulsos de DP do sinal estão marcados em vermelho com um ‘X’. Uma ampliação da região onde se iniciam os pulsos de DP de polaridade negativa (próxima a 10 μ s) está na Figura 26 (c). Por último, na Figura 26 (d) o pulso de polaridade negativa de maior amplitude extraído do sinal de DP é mostrado.

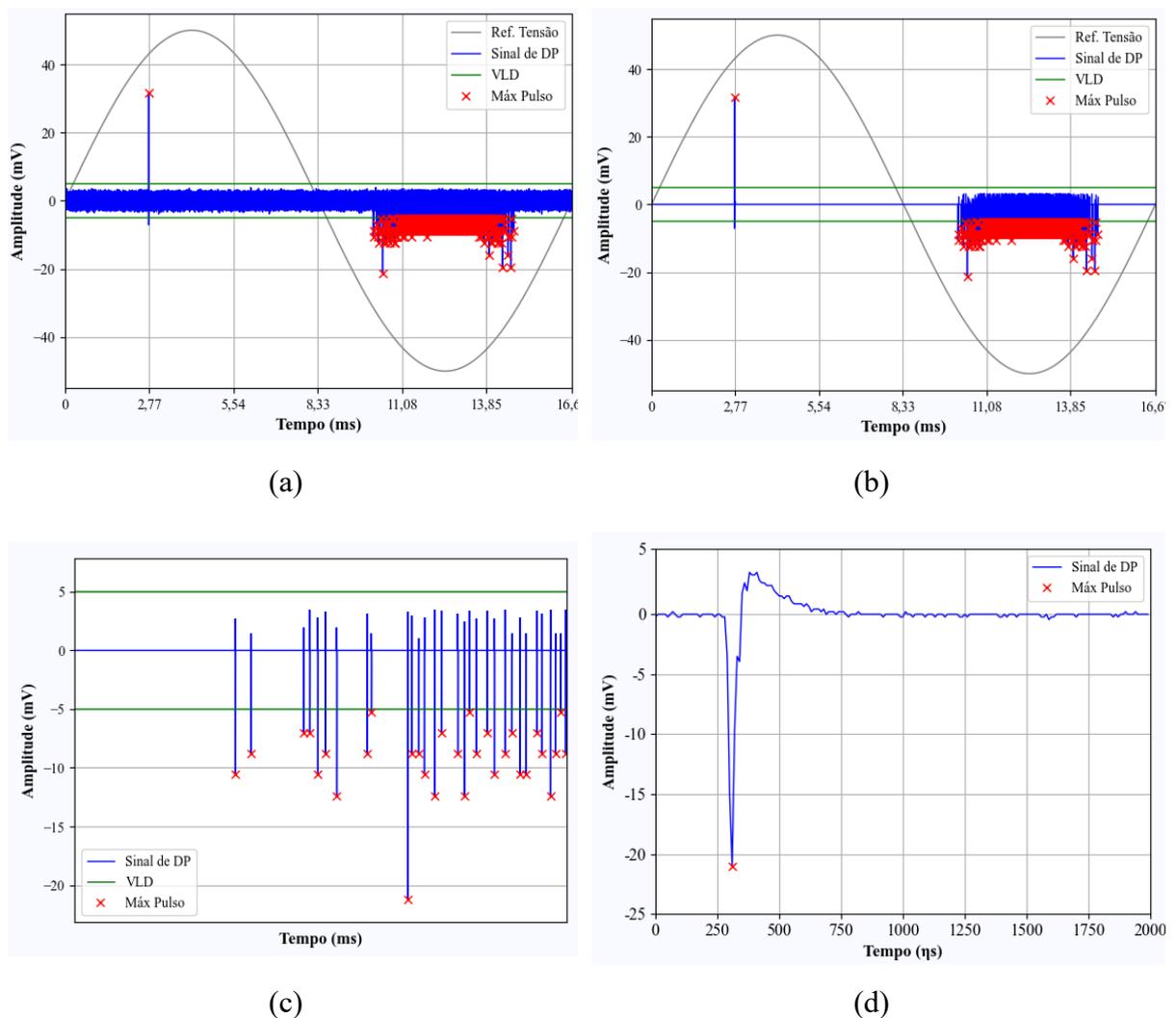


Figura 26 – Procedimento de eliminação e extração de pulsos de DP: (a) Sinal de PD completo com ruído; (b) Sinal de PD completo sem ruído; (c) Ampliação da região próxima a 10 μ s; (d) Pulso de DP extraído.

3.2.3. Eliminação de Ruído e Sinais Indesejados Pós-Medição

Conforme informado no item 3.2.1, alguns sinais de ruído, entre outros indesejáveis podem permanecer mesmo após utilizar o VLD durante a medição. Estes sinais podem ser separados em uma etapa de pós-processamento após o término da medição.

Esta etapa de pós-processamento se baseia na premissa de que pulsos provenientes de ruídos e outras fontes, como pulsos de descargas parciais possuem formas impulsivas diferentes. Isso permite utilizar as informações associadas a forma impulsiva de cada pulso medido, mais precisamente, as informações relativas ao tempo de duração do pulso e as diferentes frequências que compõe este sinal. Estas informações são, então, confrontadas, em um mapa de tempo x frequência, no qual, pulsos de características tendem a se agrupar, formando um grupo distinto de pulsos.

No item 2.4.3, é apresentada com detalhes como obter os parâmetros de tempo (tempo de duração equivalente) e frequência (largura de banda equivalente) de cada pulso extraído e a construção do *T-F Map*. Na Figura 27, o procedimento de separação de sinais após a medição é apresentado.

Na Figura 27 (a) está um padrão PRPD de uma medição de descarga parcial. Ao extrair o tempo de duração equivalente e a largura de banda de cada pulso mostrado na Figura 27 (a) é possível construir o *T-F Map* da Figura 27 (b), na qual, observam-se dois grupos de pulsos distintos, destacados em verde e vermelho na Figura 27 (c).

Esta separação entre grupos, permite reconstruir o padrão PRPD da Figura 27 (a) em dois sub-padrões PRPD, um para o grupo em verde (Figura 27 (d)) e outro para o grupo em vermelho (Figura 27 (e)) e possibilitam, agora, analisar estes grupos separadamente.

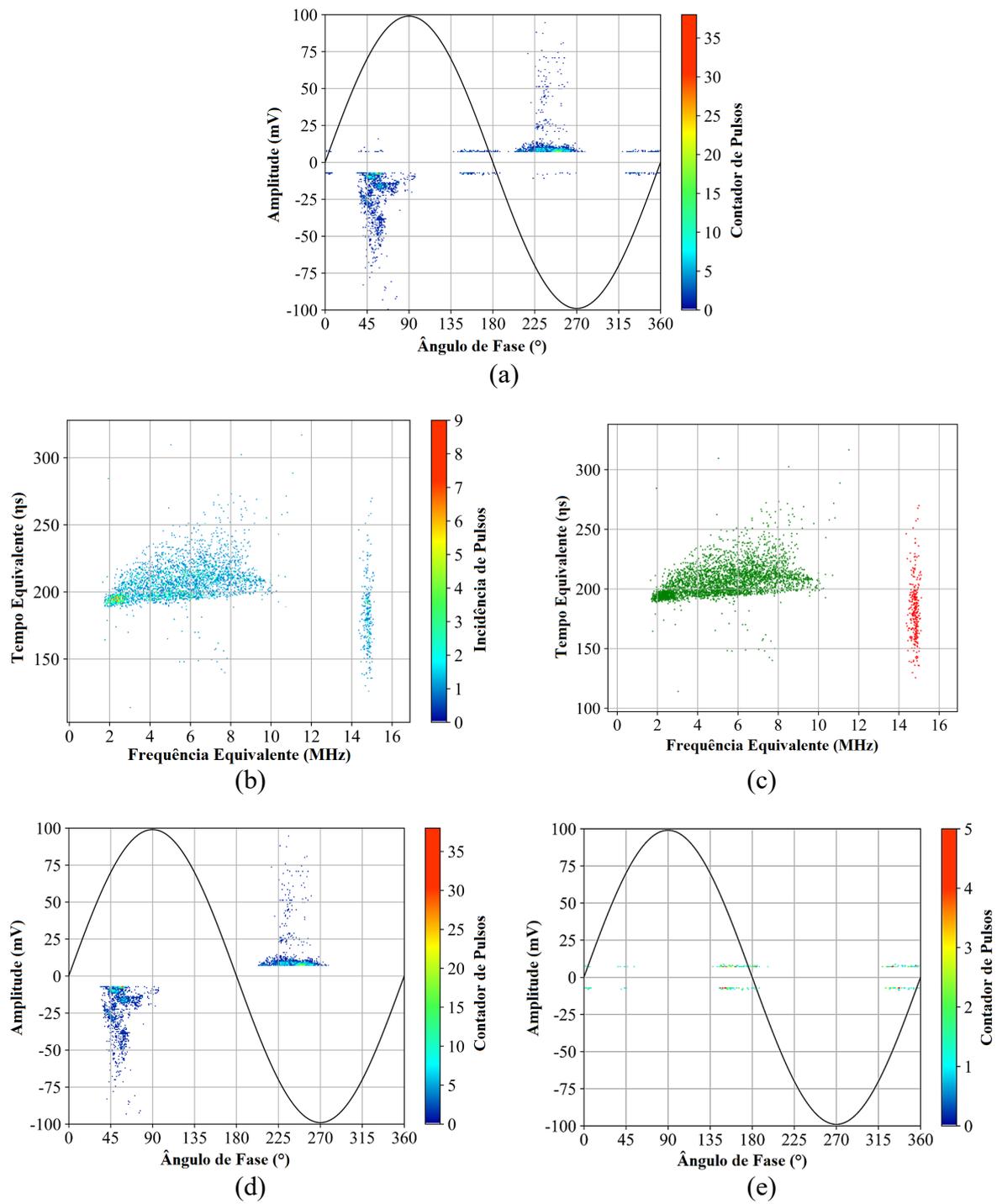


Figura 27 – Separação de Sinais no Pós-Processamento: (a) Padrão PRPD completo de uma medição de DP; (b) *T-F Map* do padrão PRPD completo; (c) *T-F Map* com separação dos grupos distintos nas cores verde e vermelho; (d) Sub-Padrão PRPD para o grupo de pulsos em vermelho Figura 27 (c); (e) Sub-Padrão PRPD para o grupo de pulsos em verde Figura 27 (c).

3.3. Designação de Polaridade, Padronização dos Ângulos de Fase e Banco de Dados de Identificação

3.3.1. Designação de Polaridade

Um conceito importante para avaliar as descargas parciais medidas em tensão alternada é a designação da polaridade da DP. Essa polaridade é determinada pelo sinal do campo elétrico local, pelo qual a descarga é produzida, ou seja, está diretamente relacionado à polaridade da tensão alternada aplicada, já o sinal (valores positivos ou negativos de amplitude) depende do método de medição aplicado (direto ou indireto).

A convenção adotada para designação de polaridade é: se a DP é produzida por um campo elétrico local positivo, então sua polaridade é positiva, se a DP é produzida por um campo elétrico local negativo, então, sua polaridade é negativa.

Na Figura 28, há uma representação gráfica do conceito descrito no parágrafo anterior: polaridade da DP determinada pelo campo elétrico no local da DP e amplitudes positivas ou negativas dependentes do método de medição utilizado.

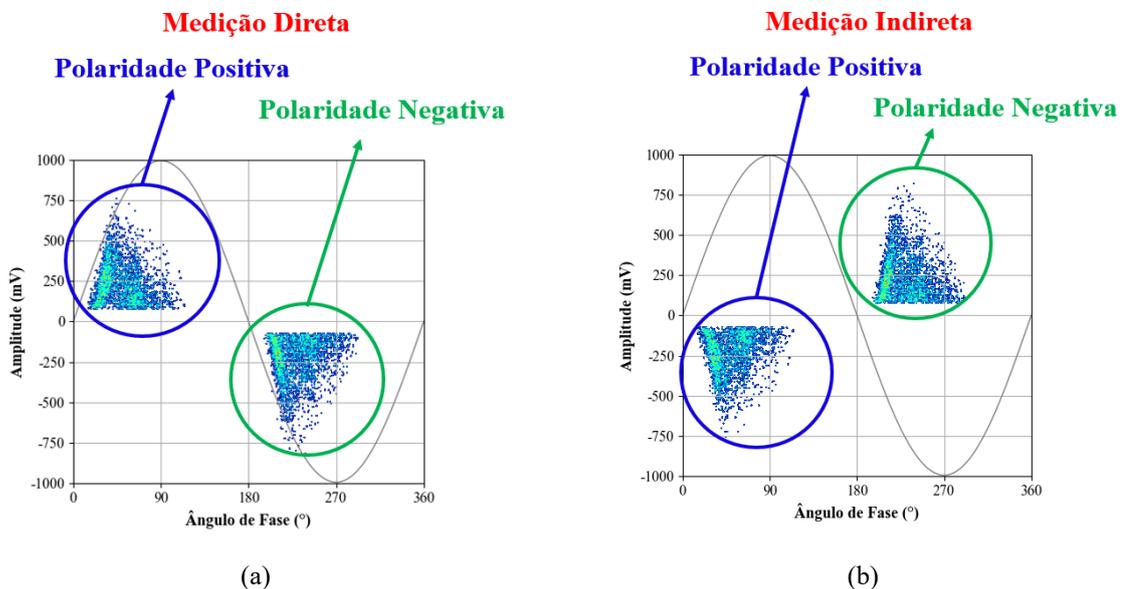


Figura 28 – Representação esquemática da designação de polaridade com base no campo elétrico local e do sinal da amplitude com base no tipo de medição: (a) Circuito de medição direto; (b) Circuito de medição indireto.

3.3.2. Padronização dos Ângulos de Fase

Devido à presença de efeito memória [91], descargas conduzidas por um campo elétrico local positivo, podem estar presentes 90° antes de 0° e 90° após 180°. O mesmo efeito pode ser

verificado para um campo elétrico local negativo. Entretanto, a distribuição de DP com relação ao ângulo de fase pode se espalhar por todo espectro de 360° de ângulo de fase.

Dessa maneira, ao dividir o intervalo de fase de 0° a 360° em quatro seções, e considerando o emprego do método de medição direto, as DP presentes na seção entre 270° e 360° , precedem DP presentes na seção entre 0° e 90° . Assim, é possível que as quatro seções do intervalo de fase possam ser numeradas de acordo com uma ordem sequencial, distinguindo a polaridade da DP.

Além disso, assume-se que DP positivas são mais prováveis de ocorrer em torno de 45° , enquanto as DP negativas, em torno de 225° , conforme pode ser visto na Figura 28. Os valores de ângulo de fase de 45° e 225° são considerados como referências de fase para as descargas de polaridade positiva e negativa. Embora, seja uma aproximação, estes valores são aceitáveis na maioria das situações de medição de DP.

Para exemplificar a designação sequencial das seções do intervalo de fase com respeito à polaridade e do método de medição utilizado (direto ou indireto), um exemplo deste procedimento está nas Figura 29 (a) e Figura 29 (b).

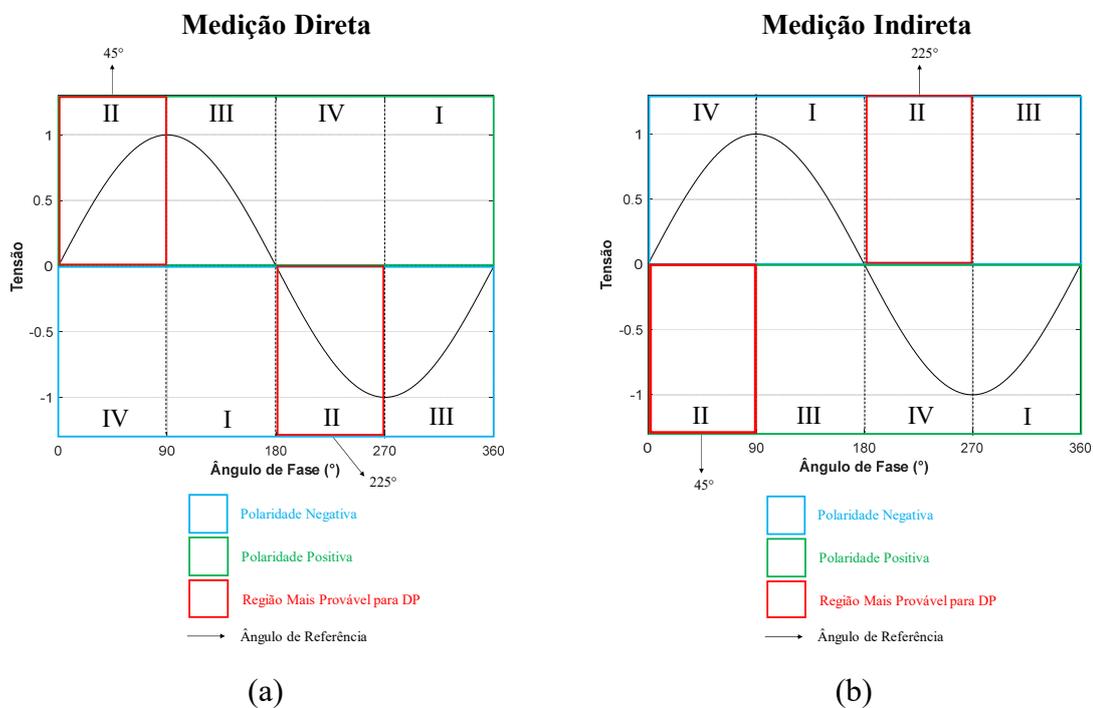


Figura 29 – Representação esquemática da designação sequencial do intervalo de fase com base na polaridade e circuito de medição: (a) Circuito de medição direto; (b) Circuito de medição indireto.

Assim, com o propósito de tornar os parâmetros derivados da distribuição dos ângulos de fase das DP medidas coerentes entre as duas polaridades dos pulsos, é preciso realizar uma

padronização do ângulo de fase, pois, normalmente, descargas de polaridade negativa possuem uma defasagem de 180° em relação às descargas de polaridade positiva, com respeito à tensão aplicada.

Considerando isto, para padronizar a análise sobre a distribuição dos ângulos de fase de ambas polaridades, os ângulos de fase (em graus) dos pulsos devem ser ajustados de acordo com as equações (10), (11) e (12).

- Pulsos de polaridade positiva:

$$\varphi_{pos} = \varphi_{pos} \quad \text{se } \varphi_{pos} \leq 270^\circ \quad (10)$$

$$\varphi_{pos} = \varphi_{pos} - 360^\circ, \quad \text{se } \varphi_{pos} > 270^\circ \quad (11)$$

- Pulsos de polaridade negativa:

$$\varphi_{neg} = \varphi_{neg} - 180^\circ \quad (12)$$

Por exemplo, se o ângulo de fase de um pulso de DP for 160° , com amplitude negativa, considerando que o método de medição é direto, e a designação de polaridade é idêntica a apresentada anteriormente e com a ordem sequencial da Figura 29 (a), o valor do ângulo de fase deste pulso deve ser corrigido de acordo com a equação (12), resultado em um ângulo de fase ajustado de -20° .

3.3.3. Banco de Dados de Identificação

O desenvolvimento de um banco de dados em estruturas bem organizadas é essencial para classificar os diferentes tipos de DP. Particularmente, a interpretação e a consequente identificação dos tipos de DP estão fortemente baseadas no conhecimento prévio obtido de dados de medição. Portanto, é essencial para um mecanismo de identificação ter a capacidade de recuperar e analisar os dados obtidos anteriormente.

Um banco de dados relacionado ao diagnóstico de DP tem dois propósitos principais:

- Armazenar todos os dados de medições possíveis, permitindo a recuperação de dados para análise e comparações;

- Prover informações sobre dados conhecidos, permitindo a utilização deste conhecimento adquirido na identificação de DP e na avaliação do desempenho do procedimento de identificação.

O banco de dados criado neste trabalho é composto pelos registros de medições e análises realizadas, sendo atualizado a cada execução do procedimento de identificação. Neste banco de dados, estão presentes a identificação (ID) do registro, os valores numéricos de entrada dos marcadores de identificação, valores fuzzyficados dos marcadores de identificação em relação às categorias/intervalos no qual o marcador foi discretizado, além da categoria de saída do processo de identificação (indicando o resultado da identificação), do grau de pertinência de cada categoria de DP (interna, superficial e corona), e, o *likelihood* da identificação realizada.

O banco de dados foi construído com medições realizadas em motores de indução trifásico, gerador síncrono, transformador a seco, simulador de DP, gerador de corona na configuração ponta-plano, incluindo a inversão de cátodo e ânodo, e, cabos de média tensão.

3.4. Classificação dos Tipos Básicos de Descargas Parciais

Uma das propostas do trabalho é classificar DP nas três categorias básicas de DP (interna, superficial e corona) com base na direção do campo elétrico local em relação à superfície de descarga. Além disso, é preciso determinar os marcadores de identificação que serão utilizados como parâmetros de entrada do algoritmo de identificação, e entender como o campo elétrico local se relaciona com as superfícies de descarga.

3.4.1. Estratégia para Classificação de Descargas Parciais

O processo de classificação de descargas parciais neste trabalho se concentra em identificar os três tipos básicos (categorias) de DP, que são descargas parciais do tipo interna, superficial ou corona. Esta escolha justifica-se basicamente por duas razões principais:

- A primeira consiste na variedade de categorias de DP existentes em equipamentos elétricos de alta tensão, ou seja, cada tipologia de equipamento, como cabos de média tensão, máquinas rotativas ou transformadores, possuem diferentes tipos de defeito na isolação, implicando em várias categorias de defeito na isolação diferentes.
- A segundo é que os pulsos de descarga parcial medidos dependem das condições locais do defeito, como o campo elétrico local e a natureza das superfícies de

descarga. Este fato permite que seja possível determinar, de maneira simplificada, a natureza do defeito, independentemente das diferentes tipologias dos equipamentos de alta tensão.

Por ser genérica e poder ser utilizada para equipamentos elétricos de diferentes tipologias, este tipo de mecanismo de identificação/classificação pode ser entendido como um nível geral de classificação e que depende apenas da natureza do defeito.

Para realizar a identificação dos tipos básicos de DP o mecanismo de identificação escolhido foi o FIS. Conforme descrito no item 2.5.2, sistemas de identificação baseados em FL tem boa adaptação para lidar com ambiguidades e como algumas características dos tipos básicos de DP podem ser semelhantes, a utilização de FL nas zonas de confusão é um recurso importante para simplificar a interpretação e fornecer um diagnóstico para uma categoria de DP.

Por ser um sistema que possui uma conexão direta entre os parâmetros de entrada, as regras de decisão, as funções de pertinência e o conhecimento técnico humano, o aperfeiçoamento do mecanismo de identificação pode ser realizado conforme mais dados são coletados e analisados.

A utilização de regras linguísticas permite entender de maneira mais direta como o algoritmo forneceu determinada saída, ou seja, há um melhor entendimento da interpretabilidade do algoritmo de identificação e da percepção de transparência sobre o resultado de identificação, características importantes, e, que são perdidas em ANN, devido à sua natureza de “caixa preta”.

Além do exposto, a capacidade de obter um bom desempenho sem um banco de dados extenso é altamente atrativa para sistemas de identificação que estão em estágio inicial/intermediário, podendo realizar um diagnóstico com boa acurácia mesmo sem dispor de um banco de dados extenso.

3.4.2. Marcadores de Identificação Utilizados como Parâmetros de Entrada do Algoritmo de Identificação

Na seção 2.5.3 foram apresentados os marcadores de identificação mais utilizados na tarefa de identificar descargas parciais. Para as categorias de identificação objetivadas neste trabalho, três marcadores de identificação estão relacionados com o ângulo de fase: - ângulo de

fase mínimo (φ_{min}), ângulo de fase médio (φ_{med}) e intervalo de distribuição dos ângulos de fase ($IDAF$), dois marcadores com a distribuição da amplitude: - assimetria da distribuição de amplitude (S_k), fator de forma da função de Weibull (β) e um parâmetro geral relacionado à quantidade de pulsos positivos e negativos ($RPNP$).

Os marcadores de identificação relacionados à distribuição de amplitude são fatores de forma, e assim, não estão associados com os valores absolutos das amplitudes dos pulsos de DP. Os valores absolutos das amplitudes são dependentes do tamanho do defeito, de sua localização e do dispositivo de acoplamento utilizado e, portanto, não são relevantes para determinar a natureza básica do defeito.

Com exceção de $RPNP$, que é um marcador de identificação que combina a quantidade de pulsos de DP positiva e negativa, todos os marcadores de identificação devem ser calculados para as distribuições de DP positiva e negativa.

Definições dos marcadores de identificação utilizados:

- Ângulo de fase mínimo (φ_{min}): valor mínimo de ângulo de fase, em graus, para os pulsos de polaridade positiva ($\varphi_{min_{pos}}$) e negativa ($\varphi_{min_{neg}}$).

- Ângulo de fase médio (φ_{med}): valor médio de ângulo de fase, em graus, para os pulsos de polaridade positiva ($\varphi_{med_{pos}}$) e negativa ($\varphi_{med_{neg}}$).

- Intervalo de distribuição dos ângulos de fase ($IDAF$): intervalo de fase, em graus, entre o valor mínimo e máximo de ângulo de fase para as distribuições de DP positiva ($IDAF_{pos}$) e negativa ($IDAF_{neg}$).

- Assimetria da distribuição de amplitude (S_k): valor de assimetria para as distribuições de amplitude positiva ($S_{k_{pos}}$) e negativa ($S_{k_{neg}}$). É uma grandeza adimensional.

- Fator de Forma (β): fator de forma da função de Weibull que se ajusta as distribuições de amplitude positiva (β_{pos}) e negativa (β_{neg}). É uma grandeza adimensional.

- $RPNP$: é a razão entre a quantidade de pulsos positivos (N_{pos}) e negativos (N_{neg}), normalizada para ficar entre 0 e 1 e pode ser calculada através da equação (13):

$$RPNP = 1 - \frac{1}{1 + \frac{N_{pos}}{N_{neg}}} \quad (13)$$

No caso do *RPNP*, se o seu valor é igual a zero, isso quer dizer, que apenas pulsos de DP negativos estão presentes, enquanto que se o valor de *RPNP* é igual a um, apenas pulsos de DP positivos estão presentes.

Desse modo, ao todo, são utilizados seis marcadores de identificação, sendo cinco deles calculados para as duas polaridades, e, o marcador *RPNP*, que é um parâmetro global calculado com as distribuições de pulsos de ambas polaridades, totalizando assim, 11 parâmetros de entrada.

3.4.3. Critério de Interpretação para DP tipo Interna

Atividades de DP do tipo interna são bastante comuns e relevantes para uma ampla variedade de defeitos possíveis. Nenhuma característica específica pode ser atribuída a DP do tipo interna como um todo, por exemplo, DP do tipo superficial ou corona, podem exibir características típicas de DP do tipo interna o que faz com que a sua identificação seja realizada através de uma conjunção de fatores. Na maioria dos casos, o campo elétrico local tem uma componente ortogonal à superfície de descarga, que não pode ser desprezada, contribuindo para a natureza “interna” do defeito.

Para obter os critérios de interpretação para descarga tipo interna, pode ser utilizado o funcionamento simplificado do mecanismo de DP em vazios na isolação, considerando uma cavidade compacta embutidas na isolação sólida. Este tipo de cavidade, geralmente, possui duas características básicas:

- O campo elétrico local é quase homogêneo no volume da cavidade.
- A distância entre as superfícies de descarga na direção do campo elétrico é fixa, ou seja, não depende do campo aplicado ou das condições ambientais. Dessa maneira, a amplitude da DP depende principalmente do desenvolvimento do canal de descarga, que, por sua vez, depende do campo elétrico local.

A distribuição das cargas implantadas pelas DP na superfície de descarga da cavidade tem um tempo de duração finito, o qual introduz uma memória do evento de DP, e, por isso, é conhecido como Efeito Memória. Este efeito causa um deslocamento de fase entre o campo elétrico local e o campo elétrico aplicado e uma de suas principais consequências é a possibilidade de que os eventos de DP antecipem a inversão de polaridade do campo aplicado [91].

Portanto, há uma probabilidade razoável de que a antecipação de fase causada por tal Efeito, esteja evidente no padrão PRPD, indicando assim, que o defeito está embutido em material sólido. Na Figura 30, está um padrão PRPD correspondente a uma descarga do tipo interna onde é possível notar a presença de efeito memória.

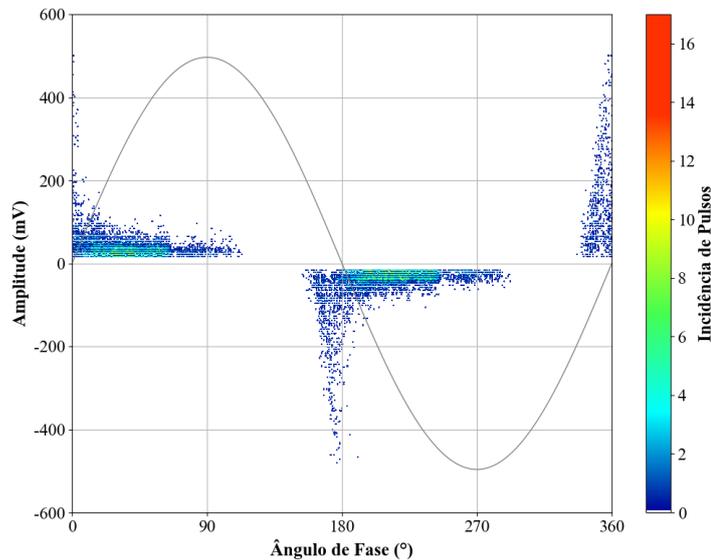


Figura 30 - Exemplo de padrão PRPD de DP tipo interna com medição direta (não-convencional).

Quando o efeito memória é evidente, ou seja, com efeitos de adiantamento e atraso do ângulo de fase, as descargas do tipo interna apresentam valores de φ_{min} menores que zero e valores elevados de $IDAF$ (maior que 180°), nestes casos, é comum uma dispersão significativa da amplitude, e, em alguns casos, essa dispersão se assemelha ao formato de uma “orelha de coelho”, com valores reduzidos de β e valores elevados de assimetria (S_k).

Mesmo que o efeito memória não seja significativamente evidente, o campo elétrico local varia no tempo com aproximadamente a mesma frequência do período da tensão alternada aplicada, em outras palavras, o tempo de decaimento da carga de DP sobre a superfície de descarga é comparável ao período da tensão senoidal aplicada. Além disso, é mais provável a ocorrência de atividades de DP enquanto a tensão aumenta com uma taxa maior, ou seja, para os ângulos de fase menores. Portanto, o φ_{med} está normalmente entre 40° e 60° .

Há outros casos em que o φ_{min} é baixo, mas não menor que zero e o $IDAF$ reduzido (menor que 80°), aqui β tem valores elevados e a assimetria S_k tem valores reduzidos.

Uma característica típica de descargas parciais do tipo interna com cavidades compactas e de formato regular, é que o contorno do padrão PRPD é regular, em outras palavras, assemelha-se significativamente a um perfil senoidal.

Por último, na maioria das situações encontradas, a atividade de DP do tipo interna é razoavelmente simétrica em relação à quantidade de descargas, ou seja, as atividades de DP de polaridade positiva e negativa, possuem, na maioria das vezes, uma quantidade de pulsos semelhante, na qual, o parâmetro $RPNP$ está relativamente próximo a 0,5.

3.4.4. Critério de Interpretação para DP tipo Superficial

As descargas do tipo superficial normalmente são externas ao equipamento, no entanto, podem ocorrer situações extremamente prejudiciais capazes de levar ao colapso da isolamento. A forte degradação da superfície com a criação de caminhos condutores, a qual pode gerar uma falha completa da isolamento é conhecida como trilhamento. O trilhamento ocorre quando um campo elétrico tangencial à superfície supera um determinado valor de campo elétrico crítico.

É comum que um defeito tenha uma natureza intermediária entre descargas parciais do tipo superficial e interna, como por exemplo, no caso em que uma cavidade achatada está na presença de um campo elétrico com componentes paralela e ortogonal em relação à superfície definida pelo defeito.

No caso em que o condutor e o material isolante estão alinhados, a distância entre as duas superfícies de descarga na direção do campo elétrico local é significativamente pequena, reduzindo o valor do campo crítico associado à ocorrência de DP e consequentemente levando a uma maior ocorrência de DP de amplitude reduzida. Como não há um canal de descarga fixo, quanto maior o campo elétrico aplicado, mais longo o canal de descarga pode ser, implicando na ocorrência de DP de maior amplitude. Entretanto, a probabilidade de ocorrência de DP em canais menores é significativamente maior que a ocorrência de DP em canais maiores.

Para descargas do tipo superficial também pode ocorrer efeito memória, mas, em média, o tempo de decaimento das cargas é normalmente menor que metade do período da tensão senoidal aplicada. Como o efeito memória não é tão marcante para DP superficial, como relatado para de DP interna, φ_{min} não pode ser significativamente menor que zero, e como o valor do campo crítico é reduzido, φ_{min} é normalmente menor que 40°.

A característica principal de atividades de DP relacionadas ao tipo superficial consiste em uma dispersão considerável da distribuição de amplitude, implicando em valores reduzidos de β e elevados de S_k . Além disso, conforme descrito anteriormente, a maior parte dos eventos de DP são compostos por descargas de baixa amplitude, porém, podem ocorrer com menor probabilidade, eventos de DP com amplitude elevada.

Outra característica de DP superficial é a ocorrência de grupos de DP dentro do meio período da tensão aplicada, com cada grupo ocorrendo regularmente a cada inversão de polaridade da tensão alternada, normalmente com $(\varphi_{min} + IDAF)$ não muito superior a 90° , com uma faixa de variação para o $IDAF$ entre 60° e 100° .

Por último, o valor de φ_{med} fica em torno de 45° na maioria dos casos e a distribuição entre pulsos positivos e negativos é, na maior parte dos casos, simétrica, ou seja, $RPNP$ está próximo de 0,5. Na Figura 31 está um padrão PRPD correspondente a DP do tipo superficial.

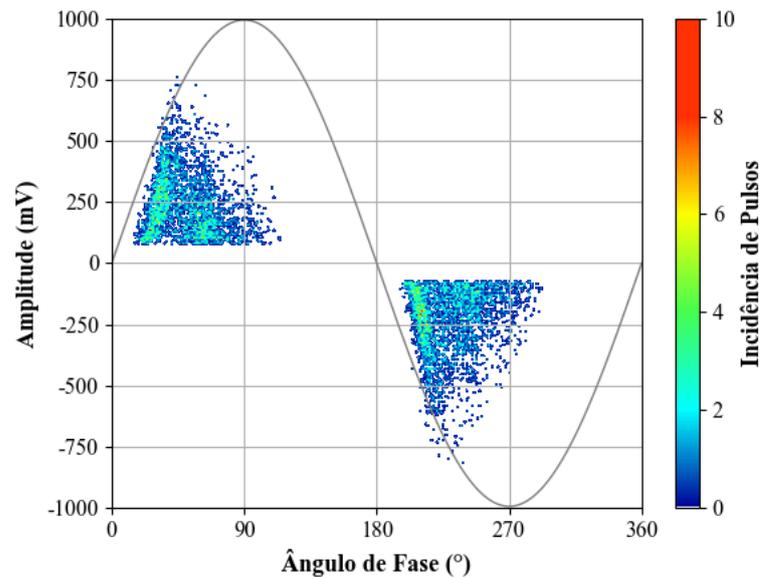


Figura 31 – Exemplo de padrão PRPD de DP do tipo superficial com medição direta (não-convencional).

3.4.5. Critério de Interpretação para DP tipo Corona

DP tipo corona são descargas externas e ocorrem em linhas de transmissão, terminais de equipamentos de alta tensão, entre condutores inseridos em um meio gasoso (geralmente, ar ambiente), entre condutor e terra, etc. Essas descargas são consequência da ionização das partículas do gás ao redor de regiões onde os raios de curvatura de um condutor são pequenos, ocorrendo uma concentração de campo elétrico que excede o campo crítico.

A configuração mais comum de descargas tipo corona é a ponta-plano quando o plano tem papel desprezável e a tensão aplicada está próxima da tensão de início das descargas parciais (em outras palavras, sem sobretensão). Nesse caso, apenas uma polaridade de DP está presente, particularmente, a negativa, considerando o eletrodo plano aterrado e a ponta conectada à alta tensão. A dispersão dos valores das amplitudes é baixa e os ângulos de fase estão distribuídos principalmente em fase com os valores máximos de campo elétrico, e consequentemente, da tensão aplicada.

Este tipo de distribuição de DP com reduzida dispersão dos valores de amplitude, tem β elevado (por exemplo, maior que sete) e S_k próximo de zero. Como ocorre em correspondência aos valores máximo da tensão senoidal aplicada, implica em valores de φ_{med} elevados, próximo de 90° , $IDAF$ reduzido (em torno de 50°) e, conseqüentemente, o φ_{min} também é mais elevado (em torno de 65°).

Se a tensão aplicada é maior que a tensão de início das DP, ou seja, com sobretensão, as duas polaridades estarão presentes, com o valor de $RPNP$ se aproximando de 0,5.

Nas atividades de DP relativos ao eletrodo tipo ponta, quando este é o catodo, o valor de $IDAF$ é maior, implicando em uma queda do valor de φ_{min} , enquanto o φ_{med} é praticamente constante e a dispersão dos valores de amplitude é baixa. Já, nas atividades de DP relativos ao eletrodo plano, com respeito ao eletrodo tipo ponta, apresentam amplitudes notavelmente mais elevadas, menores valores de $IDAF$ e maior dispersão da distribuição de amplitude. Se há a presença de uma camada isolante entre os eletrodos, em contato com o eletrodo plano, haverá a presença de efeito memória e, portanto, ocorrerá uma redução do valor de φ_{med} e mais ainda do valor de φ_{min} .

Na Figura 32, está um padrão PRPD correspondente a DP do tipo corona.

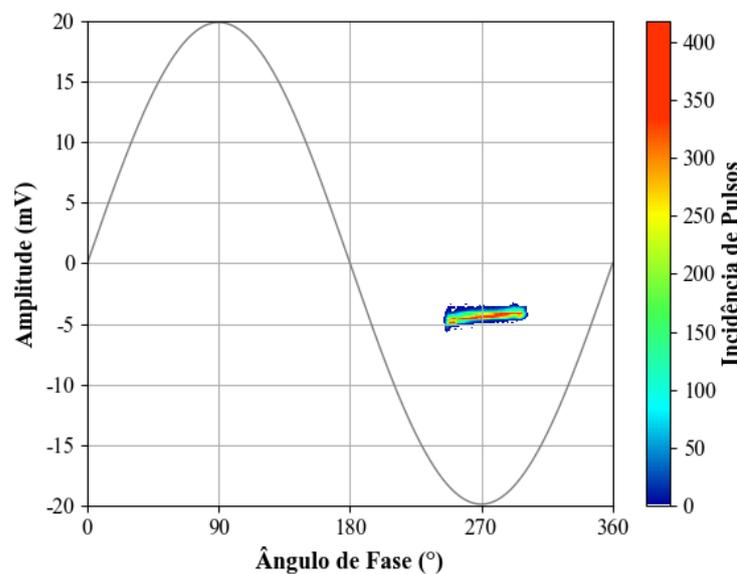


Figura 32 – Exemplo de padrão PRPD de DP tipo corona com eletrodos tipo ponta (alta tensão) e plano (terra), sem sobretensão, com medição direta (não-convencional).

3.4.6. Sistema de Inferência Fuzzy

A seguir estão as principais etapas utilizadas na implementação do FIS.

O princípio fundamental de um FIS é mapear o espaço de entrada para associar sucessivamente as porções deste mapa com as categorias de saída, mas sem conhecimento prévio e um banco de dados diversificado, esta tarefa é inviável.

O primeiro passo é desenvolver um banco de dados, que, neste trabalho, é chamado como banco de dados de identificação ou conjunto de dados de referência. Este conjunto de dados de referência é construído com as informações provenientes de medições de DP. É importante ter uma variabilidade de dados que englobem desde medições de DP em equipamentos elétricos, medições realizadas em modelos representativos de DP, como por exemplo, as obtidas com um simulador de DP.

É através deste conjunto de dados de referência que é possível entender como os parâmetros de entrada se relacionam com os diferentes tipos de DP, e, assim, definir as regras de decisão Fuzzy que serão utilizadas para associar os dados fuzzyficados nas categorias de saída. As funções de pertinência de cada parâmetro de entrada também são definidas com base nos dados de referência e devem ser escolhidas de acordo com a natureza de cada parâmetro de entrada.

Os parâmetros de entrada que possuem uma transição bem definida entre os subdomínios mapeados, como o ângulo de fase mínimo, podem utilizar funções de pertinência do tipo triangular. Em outros casos, como no do parâmetro *RPNP*, pode ser necessário utilizar funções de pertinência que possuam um intervalo estável antes das regiões de transição e que permitam criar regiões de transições mais amplas, assim, funções de pertinência do tipo trapezoidal podem ser mais adequadas.

Para obter os dados fuzzyficados, o primeiro passo, é mapear o espaço de entrada de cada marcador de identificação (parâmetros de entrada). Este processo consiste em discretizar os parâmetros de entrada, dividindo cada domínio em um número finito de subdomínios (conjuntos Fuzzy), por exemplo: baixo, médio e alto.

Com os subdomínios mapeados (conjuntos Fuzzy) e com as funções de pertinência designadas para cada parâmetro de entrada, é possível realizar a fuzzyficação dos dados de entrada, atribuindo graus de pertinência para cada dado de entrada. O resultado da fuzzyficação é um conjunto de valores, que variam entre 0 e 1, e, indicam, o quanto um dado de entrada pertence à cada conjunto Fuzzy.

Com base nos dados de entrada fuzzyficados, o FIS determina quais regras de decisão Fuzzy, construídas com os argumentos linguísticos “E”, “OU”, “SE ... ENTÃO”, são ativadas, e, calcula o seu grau de ativação, que varia entre 0 e 1. Por exemplo, se para uma regra de decisão composta por dois argumentos, em outras palavras, “SE *RPNP* é **ALTO** E β é **MÉDIO**, ENTÃO a DP é **CORONA**”, e o grau de pertinência do primeiro argumento é 0,9 e do segundo é 0,6, se utilizarmos o operador Fuzzy, mínimo, o grau de ativação desta regra será 0,6.

Após determinar o grau de ativação da regra é realizada a aplicação da implicação (“ENTÃO a DP é **CORONA**”) da regra, em outras palavras, relacionar o grau de ativação da regra com a sua conclusão. Cada categoria de saída possui uma função de pertinência associada. Se a função de pertinência associada à categoria corona é do tipo triangular, com valor máximo igual a 1 (pertencimento total à categoria corona) é feito o escalonamento dessa função de pertinência com base no grau de ativação de 0,6, assim, cria-se uma função de pertinência modificada com valor máximo de $0,6 \times 1,0$, ou seja, a função de pertinência triangular modificada terá valor máximo de 0,6.

Após realizar a implicação, cada regra tem uma função de pertinência modificada que reflete a contribuição da regra para a saída relacionada. Então, essas saídas Fuzzy são combinadas com o operador máximo para obter um conjunto de saída Fuzzy global.

Porém, este conjunto de saída ainda pertence ao universo Fuzzy, assim, é preciso realizar a defuzzyficação e obter um conjunto de valores de grau de pertinência que representa as categorias de saída (corona, interna e superficial) de maneira proporcional.

Por último, é determinado o *likelihood* dos dados de entrada em relação ao banco de dados de referência, fornecendo uma avaliação de quanto os dados avaliados já fazem parte do conhecimento prévio do mecanismo de identificação.

Uma representação esquemática simplificada das entradas e saídas do FIS está na Figura 33.

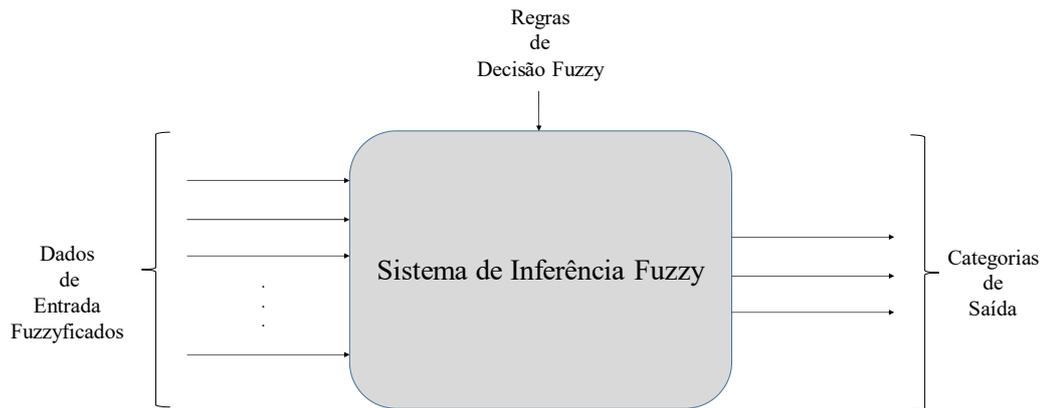


Figura 33 – Representação esquemática simplificada do FIS.

Na Figura 34, há um exemplo de saída do algoritmo de identificação apresentado na interface de identificação do PDM.

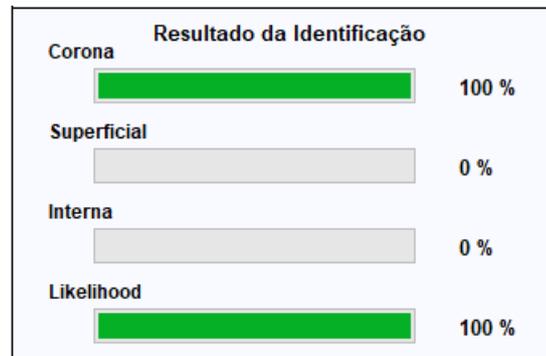


Figura 34 - Exemplo de saída do algoritmo de identificação do PDM.

4. Análise de Resultados e Validação da Solução Proposta

Este capítulo está dividido em quatro seções principais:

- Apresentação do simulador de DP e dos sistemas de medição utilizados para comparar e validar as medições realizadas.
- Análise comparativa de medições entre a solução proposta e o sistema de medição comercial *TechImp*, para diferentes fontes de descargas parciais (corona, superfície e interna); validação da medição de DP em valores de carga aparente com o sistema comercial *Haefely*.
- Validação do procedimento de separação de DP com as medições realizadas em um estator de gerador síncrono de tensão nominal 11 kV e com a separação de descargas tipo interna e corona, medidas simultaneamente, provenientes do simulador de DP.
- Avaliação e validação do desempenho da classificação DP com a solução proposta, através de uma matriz de confusão proveniente dos resultados de classificação obtidos de um conjunto de dados de teste.

4.1. Simulador de DP e Sistemas de Medição da Validação das Medições de DP

4.1.1. Sistemas de Medição e Simulador de DP

- **Simulador de DP:**

Algumas das validações realizadas neste trabalho utilizaram um simulador de DP, chamado *PD Simulator*. O simulador é um equipamento compacto e portátil que foi desenvolvido pela empresa italiana *TechImp*. Há uma foto do *PD Simulator* na Figura 35. Este instrumento é capaz de gerar três diferentes tipos de DP: corona, superficial e interna. Detalhes internos do simulador estão ilustrados na Figura 36 (a), já na Figura 36 (b), está uma foto da conexão do HFCT ao aterramento do simulador.



Figura 35 – *PD Simulator*.

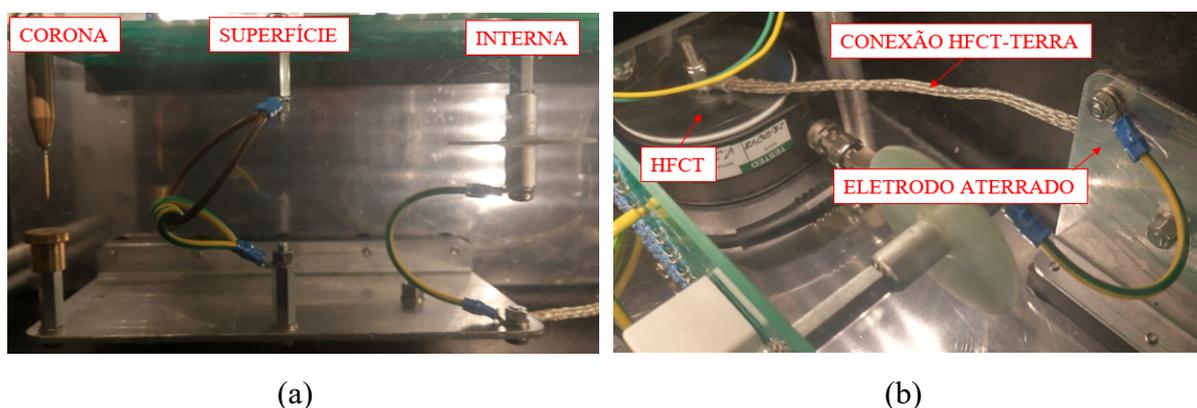


Figura 36 – (a) Detalhe interno do *PD Simulator*; (b) Conexão do HFCT ao eletrodo aterrado.

O *PD Simulator* possui dois canais de saída, um deles é uma saída de tensão, na qual, é possível coletar o sinal da tensão de referência utilizada para correlacionar as DP com os ângulos de fase da tensão e o outro canal fornece o sinal de DP medido com o HFCT, conectado ao eletrodo aterrado.

- **Sistema de Medição *TechImp*:**

O instrumento de medição da *TechImp*, chamado *Aquila*, é um dispositivo portátil de alto desempenho, que permite realizar medições trifásicas com uma taxa de amostragem de 100 MSa/s, por canal. O *Aquila* possui uma rede *wifi* própria que permite sua conexão com o *software* de medição *PDPro*. Uma foto da parte superior do *Aquila* está na Figura 37 (a), já os canais de medição, na foto da Figura 37 (b).

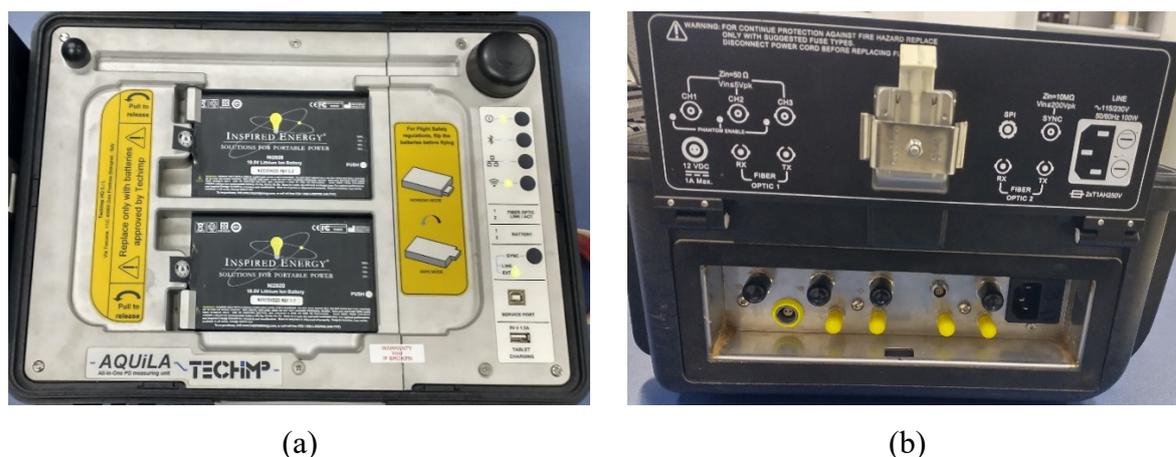


Figura 37 – (a) Parte superior do *Aquila*; (b) Canais de medição do *Aquila*.

O *PDPro* conta com um algoritmo de identificação e classificação de DP baseado em inteligência artificial, que permite identificar e classificar DP para diversos tipos de equipamentos, como, máquinas rotativas, cabos, transformadores, subestações isoladas a gás e chaves seccionadoras.

Além das conexões dos sinais de DP e tensão, é necessário conectar à terra os dois instrumentos. Todas as conexões são realizadas através de cabos BNC. Na Figura 38 está uma representação esquemática da conexão entre *PD Simulator* e *Aquila*.

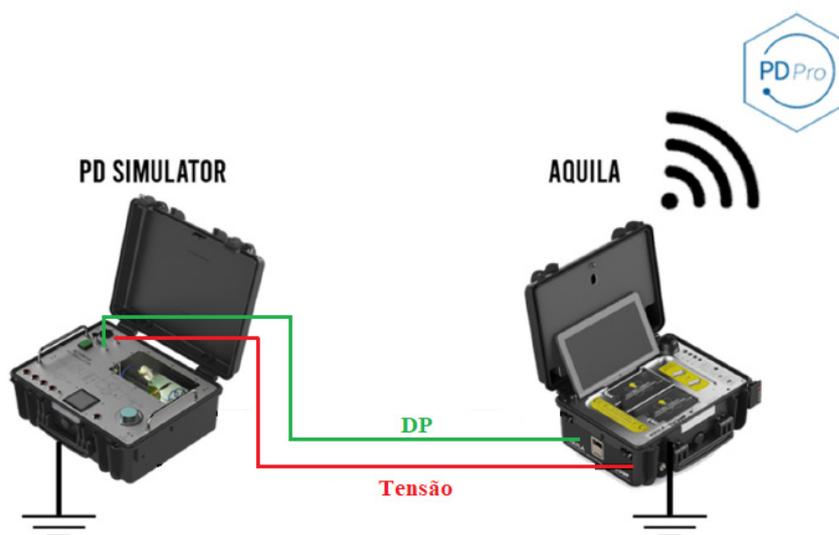


Figura 38 – Imagem representativa da conexão entre *PD Simulator*, *Aquila* e *PDPro*.

- **Sistema de Medição *Haefely*:**

Para validar a medição de DP em valores de carga aparente, com método convencional, foi utilizado um sistema de medição de DP comercial fabricado pela *Haefely*. Esse sistema

possui dois canais de medição, um para a tensão de referência, e outro para o sinal de DP. Cada canal possui uma taxa de amostragem de 100 MSa/s. Este sistema de medição é do tipo convencional e possui capacitor de acoplamento, quadripolo, sistema de transmissão (cabos) e dispositivo de medição (DDX 9121b).

Na Figura 39 está o sistema de medição *Haefely*. Nas Figura 39 (a) e Figura 39 (b) estão o capacitor de acoplamento e a vista frontal do DDX 9121b. Este sistema de medição é utilizado em ensaios de diversos equipamentos no LAT-EFEI, como: cabos de média tensão, transformadores de distribuição, transformadores de potencial e de corrente. O calibrador de DP deste sistema está na Figura 40.



(a)



(b)

Figura 39 – Sistema de medição *Haefely*: (a) Capacitor de acoplamento; (b) Vista frontal do DDX 9121b.



Figura 40 – Calibrador de DP do sistema *Haefely*.

- **Solução Desenvolvida:**

A solução proposta de medição, separação e identificação/classificação de DP já foi descrita no Capítulo 3. Na Figura 41 está a conexão realizada entre a solução e o simulador de DP.

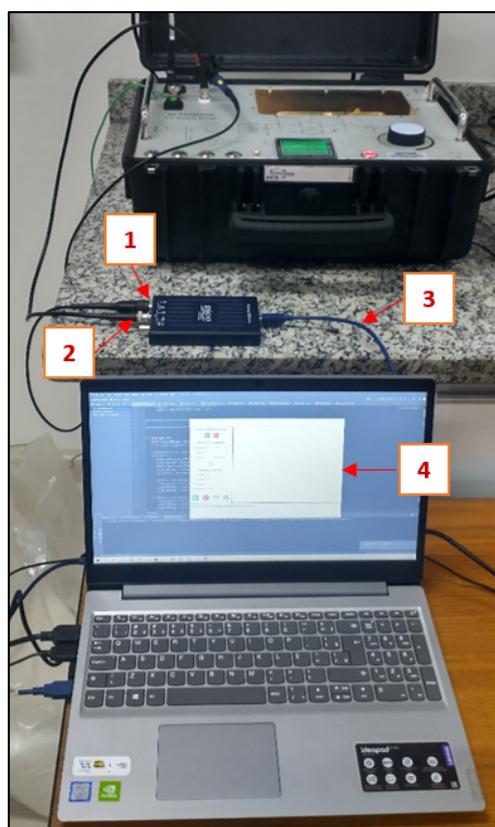


Figura 41 – Circuito de medição do PDM: (1) Canal de medição tensão; (2) Canal de medição de DP, (3) Cabo de comunicação USB; (4) *Software PDM*.

4.1.2. Medição de DP Tipo Corona

Para analisar quantitativamente as medições realizadas com o PDM em relação ao sistema *TechImp*, foram comparadas cinco medições obtidas dos sistemas para o simulador configurado para geração de DP tipo corona, sem sobretensão. Na Figura 42 (a), está um dos padrões PRPD medido com o sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_CORONA 01) e na Figura 42 (b) com a solução desenvolvida (ref. PDM_CORONA 01).

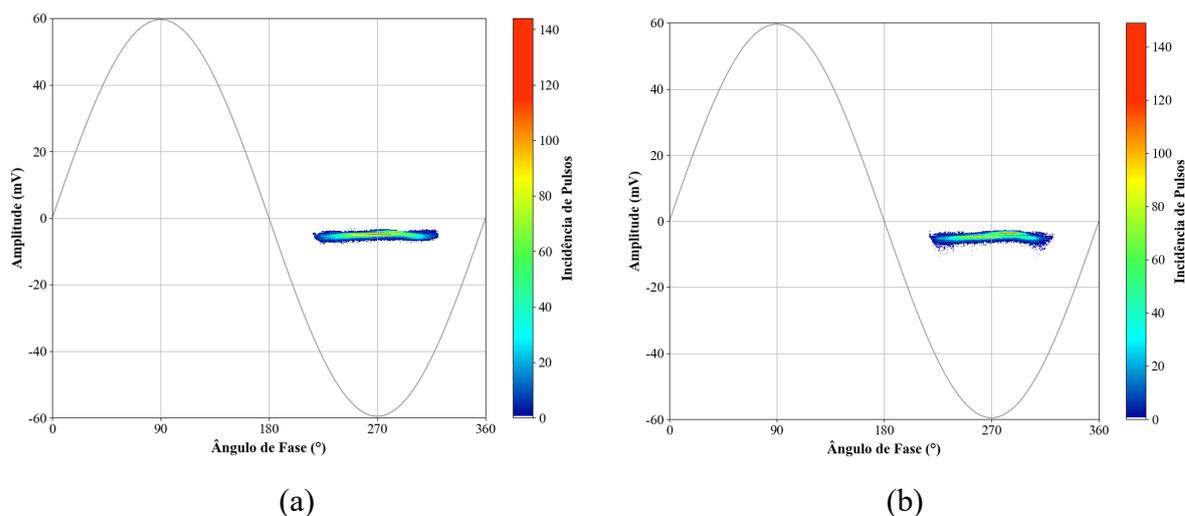


Figura 42 - Padrões PRPD medidos para DP tipo corona: (a) Padrão PRPD medido com sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_CORONA 01) ; (b) Padrão PRPD medido com a solução proposta (ref. PDM_CORONA 01).

Na Figura 43, os padrões PRPD mostrados anteriormente foram superpostos para avaliar qualitativamente a semelhança entre os padrões PRPD construídos.

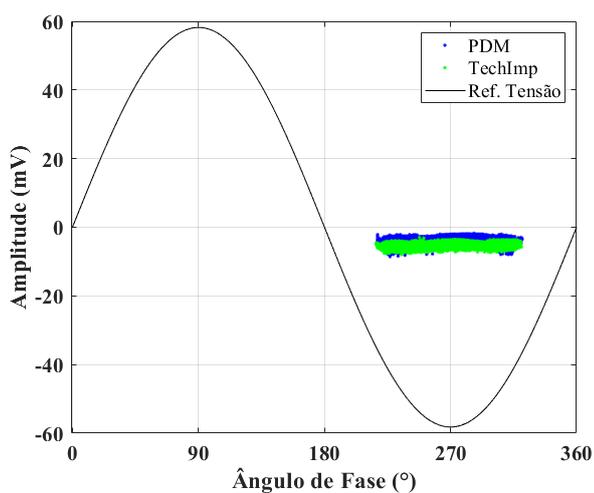


Figura 43 – Superposição dos padrões PRPD para DP tipo corona medidos com o sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_CORONA 01) e com a solução proposta (ref. PDM_CORONA 01).

Na Figura 43, é possível notar que a distribuição dos ângulos de fase dos pulsos medidos com o PDM acompanhou a distribuição dos ângulos de fase medidos com o sistema *TechImp*, com ângulos de fase mínimo e máximo semelhantes e distribuição dos pulsos em torno de 270° .

Na Tabela 3, estão os parâmetros encontrados para as DP das cinco medições realizadas com cada sistema, na qual, φ_{min_neg} , é o ângulo de fase mínimo, φ_{max_neg} , é o ângulo de fase máximo e DP_{max_neg} é o valor máximo de amplitude, dos pulsos de polaridade negativa.

Tabela 3 – Valores dos parâmetros φ_{min_neg} , φ_{max_neg} e DP_{max_neg} dos padrões PRPD gerados com os dois sistemas para DP tipo corona.

Medição	Parâmetros		
	φ_{min_neg} ($^\circ$)	φ_{max_neg} ($^\circ$)	DP_{max_neg} (mV)
PDM_CORONA 01	217,9	321,3	-8,7
PDM_CORONA 02	223,1	322,6	-9,9
PDM_CORONA 03	222,5	323,1	-9,2
PDM_CORONA 04	230,9	310,8	-9,4
PDM_CORONA 05	224,0	322,7	-8,5
TECHIMP_CORONA 01	216,8	320,7	-7,9
TECHIMP_CORONA 02	227,5	310,2	-8,7
TECHIMP_CORONA 03	231,3	305,5	-9,5
TECHIMP_CORONA 04	223,1	315,2	-8,9
TECHIMP_CORONA 05	242,5	300,0	-9,0

Já na Tabela 4, estão os valores médios dos parâmetros para os dois sistemas e o erro percentual cometido para os valores médios considerando o sistema *TechImp* como referência.

Tabela 4 – Média dos valores de φ_{min_neg} , φ_{max_neg} e DP_{max_neg} e desvio percentual dos valores médios para DP tipo corona.

Parâmetros	Valor Médio PDM	Valor Médio TechImp	Desvio Percentual (%)
φ_{min_neg} ($^\circ$)	224,5	229,0	-2,0
φ_{max_neg} ($^\circ$)	330,2	310,0	3,2
DP_{max_neg} (mV)	-9,1	-8,8	3,9

É possível verificar na Tabela 4, que os desvios percentuais entre os dois sistemas foram menores que 3,9% para todos os parâmetros, resultado considerado satisfatório, considerando que as medições não foram realizadas simultaneamente. Portanto, os resultados das medições realizadas com a solução proposta são equivalentes ao sistema de medição *TechImp* para DP tipo corona, sendo possível considerar o padrão PRPD construído como válido para medição de DP tipo corona.

4.1.3. Medição de DP Tipo Superficial

Da mesma maneira que as DP tipo corona, para analisar quantitativamente as medições realizadas com o PDM em relação ao sistema *TechImp*, foram comparadas cinco medições obtidas dos sistemas para o simulador configurado para geração de DP tipo superficial.

Na Figura 43 (a) está um dos padrões PRPD medido com o sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_SUP 01) e na Figura 43 (b) com a solução desenvolvida (ref. PDM_SUP 01).

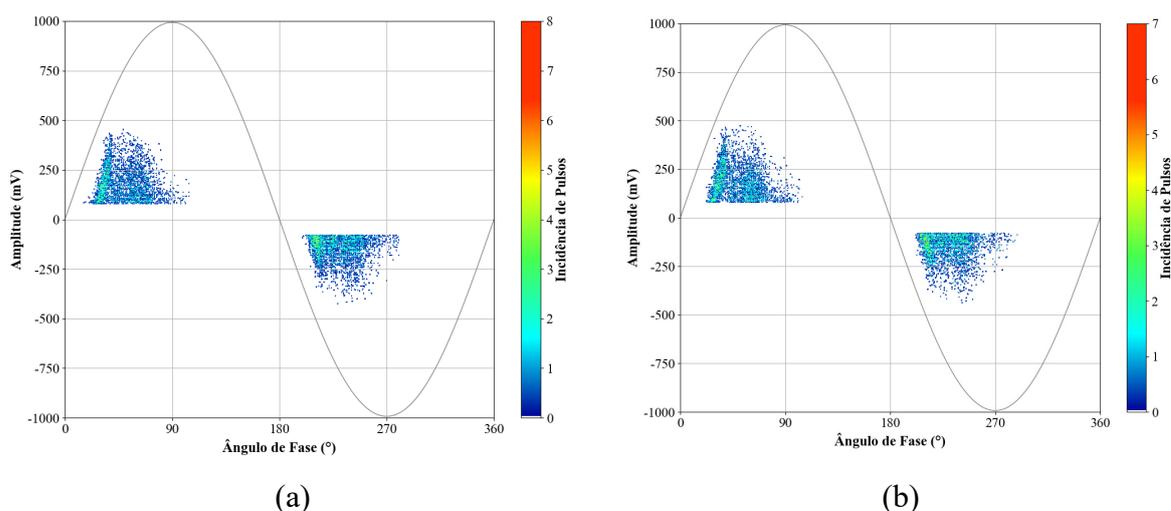


Figura 44 - Padrões PRPD medidos para DP tipo superficial: (a) Padrão PRPD medido com sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_SUP 01) ; (b) Padrão PRPD medido com a solução proposta (ref. PDM_SUP 01).

Na Figura 45, os padrões PRPD mostrados na Figura 44 foram superpostos para avaliar qualitativamente a proximidade entre os padrões PRPD construídos.

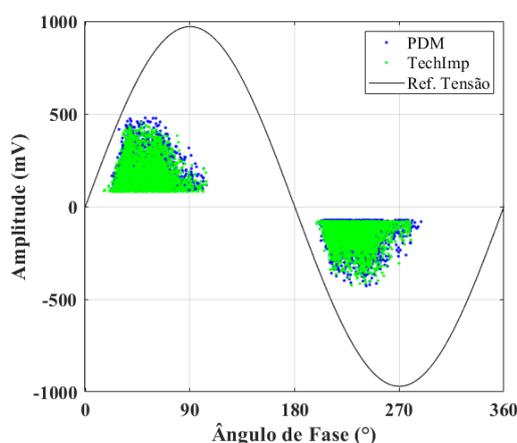


Figura 45 – Superposição dos padrões PRPD para DP tipo superficial medidos com o *TechImp* (ref. TECHIMP_SUP 01) e com a solução proposta (ref. PDM_SUP 01).

Dos padrões PRPD da Figura 45, é possível afirmar que os pulsos medidos com a solução proposta possuem distribuição dos ângulos de fase, nas duas polaridades, semelhantes

ao sistema *TechImp*, com o início dos pulsos em torno de 20° e 200°, e, que se extinguíram próximos a 110° e 285°.

Na Tabela 5, estão os parâmetros para as cinco medições de DP realizadas com cada sistema, na qual, $\varphi_{min-neg}$ é o ângulo de fase mínimo, $\varphi_{max-neg}$, é o ângulo de fase máximo e, $DP_{max-neg}$ é o valor máximo de amplitude, dos pulsos de polaridade negativa. A mesma notação é utilizada para os pulsos de polaridade positiva, com diferença para a polaridade dos pulsos ($\varphi_{min-pos}$, $\varphi_{max-pos}$, e, $DP_{max-pos}$).

Tabela 5 – Valores dos parâmetros φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} dos pulsos de polaridade positiva e negativa dos padrões PRPD obtidos com os dois sistemas para DP tipo superficial.

Medições	Parâmetros					
	φ_{min_pos} (°)	φ_{max_pos} (°)	DP_{max_pos} (mV)	φ_{min_neg} (°)	φ_{max_neg} (°)	DP_{max_neg} (mV)
PDM_SUP 01	16,7	103,8	481,2	201,9	288,7	-428,6
PDM_SUP 02	17,4	105,3	500,1	193,7	252,1	-507,5
PDM_SUP 03	18,3	102,5	478,9	210,1	290,3	-500,6
PDM_SUP 04	20,1	112,3	502,1	204,7	287,9	-495,3
PDM_SUP 05	15,9	109,5	469,9	209,5	287,8	-490,1
TECHIMP_SUP 01	15,9	103,9	458,2	199	279,2	-424,5
TECHIMP_SUP 02	16,9	112,7	483,5	195,7	298,3	-451,2
TECHIMP_SUP 03	17,1	116,2	496,3	206,3	287,6	-512,7
TECHIMP_SUP 04	18,9	117,5	481,2	198,7	281,3	-492,8
TECHIMP_SUP 05	20,6	103,6	472,3	197,6	295,9	-503,9

Na Tabela 6, estão os valores médios dos parâmetros para os dois sistemas e o erro percentual cometido para os valores médios considerando o sistema *TechImp* como referência.

Tabela 6 – Média dos valores de φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} , para os pulsos de polaridade positiva e negativa, e desvio percentual dos valores médios para DP tipo superficial.

Parâmetros	Valor Médio PDM	Valor Médio TechImp	Desvio Percentual (%)
φ_{min_pos} (°)	17,7	17,9	-1,1
φ_{max_pos} (°)	106,7	110,8	-3,7
DP_{max_pos} (mV)	486,4	478,3	1,7
φ_{min_neg} (°)	204,0	199,5	2,3
φ_{max_neg} (°)	281,4	288,5	-2,5
DP_{max_neg} (mV)	-484,4	-477,0	1,6

É possível verificar na Tabela 6, que os desvios percentuais entre os dois sistemas foram menores que 3,7%, para as polaridades positiva e negativa, para todos os parâmetros. Este resultado é considerado satisfatório e as medições realizadas com a solução proposta são equivalentes ao sistema de medição *TechImp* para DP tipo superficial, ou seja, consideram-se

os padrões PRPD provenientes da solução proposta como válidos para medir DP tipo superficial.

4.1.4. Medição de DP Tipo Interna

Da mesma maneira, que para ou outros tipos de DP, para analisar quantitativamente as medições realizadas com o PDM, em relação ao sistema *TechImp*, foram comparadas cinco medições obtidas dos sistemas para o simulador configurado para geração de DP tipo interna.

Na Figura 46 (a) está um dos padrões PRPD medido com o sistema *TechImp* (ref. TECHIMP_INT 01) e na Figura 46 (b) com a solução desenvolvida (ref. PDM_INT 01).

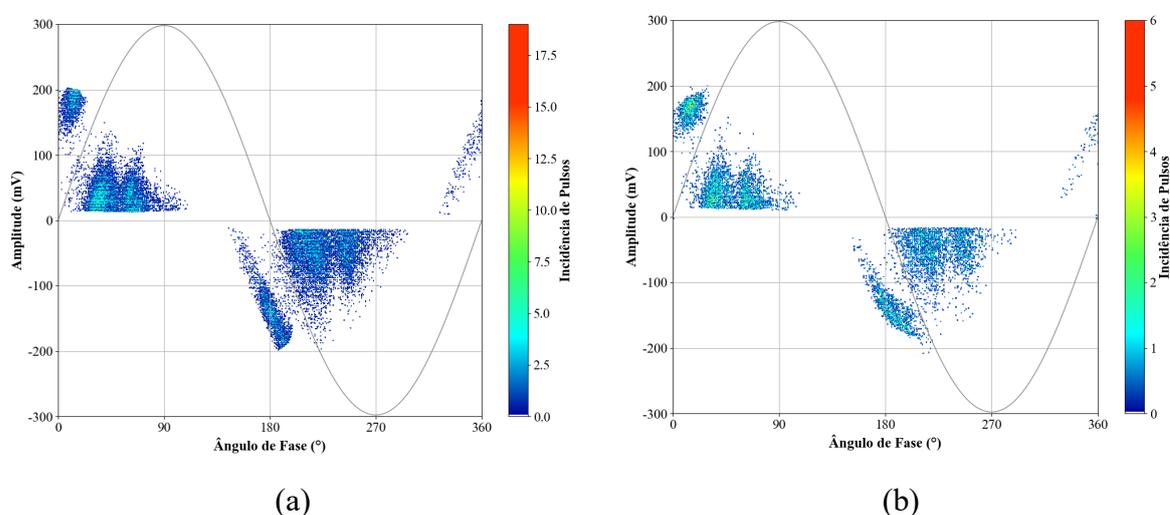


Figura 46 – Padrões PRPD medidos para DP tipo interna: (a) Padrão PRPD medido com sistema *TechImp*; (b) Padrão PRPD medido com a solução proposta.

Na Figura 47, os padrões PRPD, mostrados na Figura 46, foram superpostos para avaliar qualitativamente a proximidade entre os padrões PRPD construídos.

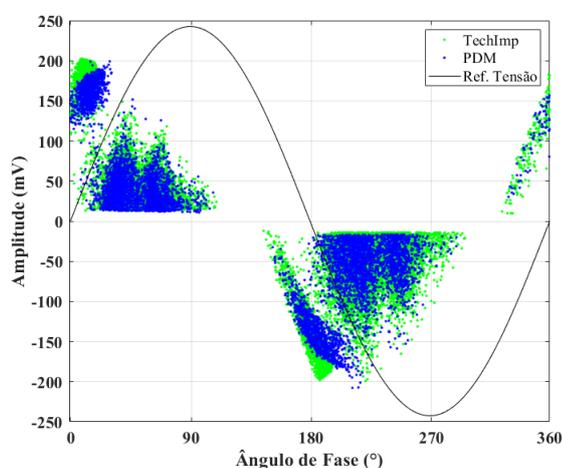


Figura 47 – Superposição dos padrões PRPD para DP tipo interna medidos com o *TechImp* (ref. TECHIMP_INT 01) e com a solução proposta (ref. PDM_INT 01).

Na comparação apresentada na Figura 47, para as duas polaridades dos pulsos, a distribuição dos ângulos de fase da solução proposta acompanhou a distribuição dos ângulos de fase do sistema *TechImp*, com o início dos pulsos antes da inversão de polaridade da tensão, semelhante ao verificado no padrão PRPD produzido pelo sistema comercial da *TechImp*.

Além disso os ângulos de fase das DP se iniciaram em torno de -35° para as duas polaridades, e, se extinguíram próximos a 110° e 290° , para as DP de polaridade positiva e negativa para os dois sistemas. O início das descargas parciais, antes do valor nulo da tensão, é uma característica geralmente encontrada nos padrões típicos de descargas parciais do tipo interna, sendo de fundamental importância para identificar este tipo de DP.

Na Tabela 7, estão os parâmetros para as cinco medições de DP realizadas com cada sistema, na qual, $\varphi_{min-neg}$, é o ângulo de fase mínimo, $\varphi_{max-neg}$, é o ângulo de fase máximo e, $DP_{max-neg}$, é o valor máximo de amplitude, dos pulsos de polaridade negativa. A mesma notação é utilizada para os pulsos de polaridade positiva, com diferença para a polaridade dos pulsos ($\varphi_{min-pos}$, $\varphi_{max-pos}$, e, $DP_{max-pos}$).

Tabela 7 – Valores dos parâmetros φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} dos pulsos de polaridade positiva e negativa dos padrões PRPD obtidos com os dois sistemas para DP tipo interna.

Medições	Parâmetros					
	φ_{min_pos} (°)	φ_{max_pos} (°)	DP_{max_pos} (mV)	φ_{min_neg} (°)	φ_{max_neg} (°)	DP_{max_neg} (mV)
PDM_INT 01	-30,9	107,2	199,1	-28,1	290,1	-211,8
PDM_INT 02	-32,3	108,9	202,2	-33,6	286,7	-205,8
PDM_INT 03	-32,5	106,4	197,5	-34,7	288,9	-197,9
PDM_INT 04	-37,8	112,6	185,4	-36,2	292,3	-207,6
PDM_INT 05	-36,6	109,8	187,6	-35,2	288,4	-195,4
TECHIMP_INT 01	-35,7	109,6	202,4	-34,9	296,3	-197,4
TECHIMP_INT 02	-33,4	110,5	201,6	-35,8	292,1	-200,1
TECHIMP_INT 03	-36,1	112,3	198,5	-31,5	290,5	-198,5
TECHIMP_INT 04	-31,5	108,9	200,7	-35,2	295,6	-204,9
TECHIMP_INT 05	-35,4	110,3	199,7	-32,3	292,8	-198,9

Na Tabela 8, estão os valores médios dos parâmetros para os dois sistemas e o erro percentual cometido para os valores médios considerando o sistema *TechImp* como referência.

Tabela 8 – Média dos valores de φ_{min} , φ_{max} e DP_{max} , para os pulsos de polaridade positiva e negativa, e desvio percentual dos valores médios para DP tipo interna.

Parâmetros	Valor Médio PDM	Valor Médio TechImp	Desvio Percentual (%)
Φ_{min_pos} (°)	-34,0	-34,4	-1,2
Φ_{max_pos} (°)	109,0	110,3	-1,2
DP_{max_pos} (mV)	194,4	200,6	-3,1
Φ_{min_neg} (°)	-33,6	-33,9	-1,1
Φ_{max_neg} (°)	289,3	293,5	-1,4
DP_{max_neg} (mV)	-203,7	-200,0	1,9

É possível verificar na Tabela 8, que os desvios percentuais de todos os parâmetros, calculados entre os dois sistemas, foram menores que 3,1%, nas duas polaridades. Este resultado é considerado satisfatório e as medições realizadas com a solução proposta são equivalentes ao sistema de medição *TechImp* para DP tipo interna, ou seja, considera-se os padrões PRPD provenientes da solução proposta como válidos para medir DP tipo interna.

4.1.5. Medição de DP em Valores de Carga Aparente

Para validar a capacidade da solução desenvolvida de medir DP em valores de carga aparente foi realizada uma comparação entre os valores medidos no PDM e no sistema de medição convencional comercial da *Haefely*. As medições foram realizadas de forma simultânea, com os sistemas calibrados com o calibrador de DP do sistema *Haefely* apenas uma vez, com uma carga aparente de 5 pC. A Figura 48 mostra a conexão do calibrador de DP no capacitor de acoplamento do sistema *Haefely*.



Figura 48 - Conexão do calibrador de DP ao capacitor de acoplamento do sistema *Haefely*.

Para avaliar o erro percentual obtido entre os dois sistemas, variou-se o valor de carga aparente injetada pelo calibrador entre 5 pC e 500 pC. Os valores de carga aparente medidos com os dois sistemas estão na Tabela 9, assim como erro percentual calculado entre a solução proposta e o sistema comercial da *Haefely*, considerado como referência nessa avaliação.

Tabela 9 – Valores de carga aparente medidos e erro percentual.

Injetado (pC)	PDM (pC)	<i>Haefely</i> (pC)	Erro (%)
5	5,0	5,1	-2,0
10	9,7	9,6	1,0
20	19,1	18,9	1,1
40	38,8	37,8	2,6
50	47,7	47,2	1,1
100	95,3	94,2	1,2
200	190,6	189	0,8
400	387,8	380	2,1
500	477,3	476	0,3

Com base nas informações da Tabela 9 é possível verificar que o maior erro percentual encontrado nas medições foi de 2,6%, no nível de 40 pC. Entretanto, o erro percentual médio para os níveis avaliados foi de 1,3%, ou seja, pode-se afirmar, que, para os níveis de carga aparente avaliados, o erro percentual médio é menor que 1,5%. Outro ponto a se destacar, é que os valores de carga aparente medidos com a solução proposta, em relação ao sistema *Haefely*, estão mais próximos do valor nominal de carga aparente injetado pelo calibrador de DP.

4.1.6. Considerações Sobre a Medição de DP

Os resultados das medições comparativas mostraram que a solução proposta obteve um desempenho satisfatório na construção dos padrões PRPD para os diferentes tipos de descargas parciais do *PD Simulator*, conseguindo correlacionar adequadamente a amplitude máxima da DP em relação ao ângulo de fase da tensão aplicada, nos quais, a dispersão dos pulsos de DP ficou localizada em regiões semelhantes ao *TechImp*, com desvios menores que 4%.

As diferenças entre as medições do PDM e sistema *TechImp* são naturais pela natureza estocástica do fenômeno de DP também pela impossibilidade de realização de medições simultâneas com os dois sistemas de medição. Além disso, o item 9 da norma IEC 60270 [11], reforça que as medições de descargas parciais apresentam incertezas maiores que outros tipos de medições em alta tensão.

Apesar da diferença conceitual entre erro e incerteza, levando em consideração que a incerteza aceitável em [11] para os valores de amplitude é de até 10%, e que os desvios

cometidos com a solução proposta para a amplitude foram menores que 4%, considera-se como válida a medição de amplitude. O mesmo pode ser dito para a medição de DP em valores de carga aparente, que teve um erro médio menor que 1,5% para os níveis de carga aparente da avaliação.

Em [11], não há o estabelecimento de um valor de referência para o erro ou incerteza na determinação do ângulo de fase de ocorrência de DP, apenas para a determinação do ângulo de fase da tensão aplicada, que deve ter um desvio menor que 5 graus em relação ao valor verdadeiro, considerando um sistema com taxa de amostragem de pelo menos 100 amostras/ciclo (aproximadamente 6 kSa/s). Como a taxa de amostragem da solução proposta é de 125 MSa/s, é de se esperar que os erros dos valores de ângulo de fase sejam significativamente menores que 5°.

Por último, como a classificação de DP é realizada com os identificadores de marcação extraídos do padrão PRPD, e isto foi realizado de maneira adequada pela solução desenvolvida, e com base nos resultados das medições comparativas, considera-se a solução proposta como adequada para a medição de descargas parciais.

4.2. Validação da Separação de DP

Para validar a separação de DP com a solução proposta, foram realizadas aplicações do mecanismo de separação sobre os dados medidos com o PDM e também com o sistema *TechImp*.

Duas avaliações do processo de separação de DP estão presentes aqui: a separação realizada no estator de um gerador de tensão nominal 11 kV e para uma medição com presença simultânea de DP tipo corona e interna do simulador. Paralelamente, pode-se considerar o procedimento de separação de ruído na etapa de pós processamento (descrito no item 3.2) como equivalentes às descritas nesta seção.

4.2.1. Separação de DP Medidas no Estator de um Gerador Síncrono

Nos próximos parágrafos, são apresentados o estator de tensão nominal 11 kV, o sistema de medição e a separação de fontes de DP realizada. Apesar da medição ter sido realizada com os equipamentos da *TechImp*, todos os cálculos e a separação dos fenômenos foram feitos com o PDM, isto é, os dados dos pulsos extraídos do sistema *TechImp* foram exportados e utilizados no PDM para realizar a separação de DP descrita a seguir.

Uma vista parcial do estator está na Figura 49 (a), já o sistema de medição *TechImp* composto por um medidor de DP (*Aquila*) (1), capacitor de acoplamento (2) e impedância de medição (quadripolo) (3) está na Figura 49 (b).

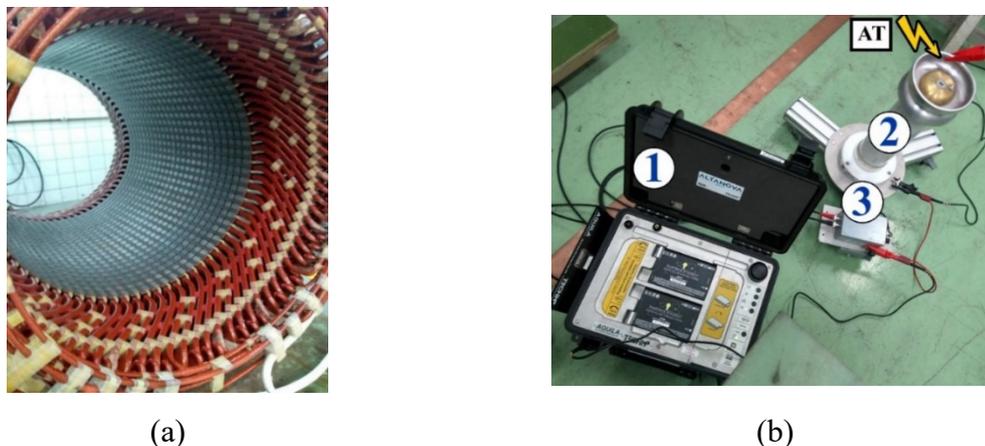


Figura 49 – Estator e sistema de medição: (a) Visão parcial do estator; (b): (1) Medidor de descargas parciais (*Aquila*); (2) Capacitor de acoplamento; (3) Quadripolo. Adaptado de [92].

O padrão PRPD completo obtido da medição e seu respectivo *T-F Map*, construído com as informações de cada pulso de DP medido, está representado na Figura 50 (a) e Figura 50 (b).

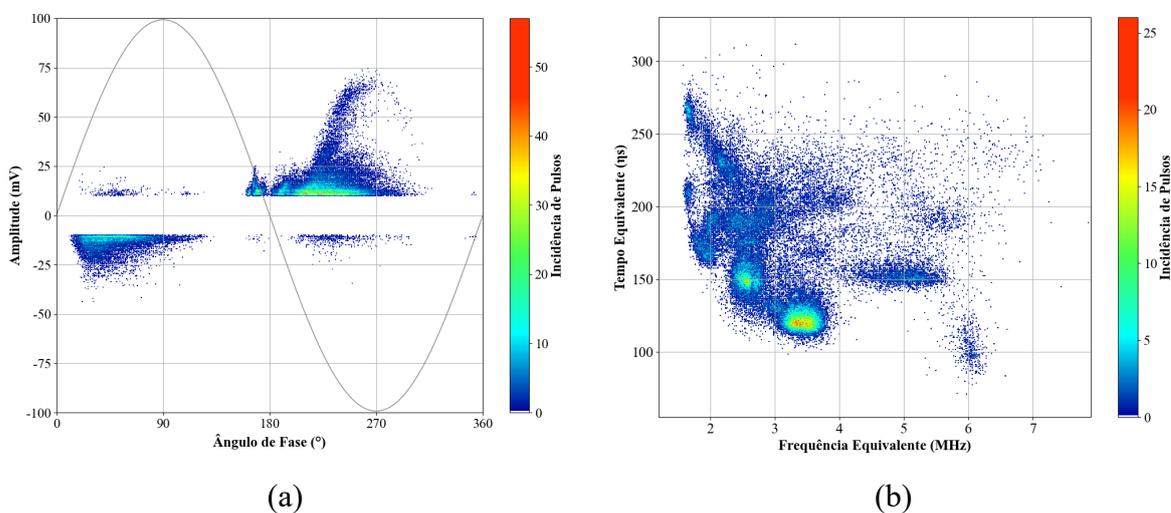


Figura 50 – Padrão PRPD e *T-F Map*: (a) Padrão PRPD completo, adaptada de [92]; (b) *T-F Map* construído com o PDM, relativo ao padrão PRPD da Figura 50 (a).

A seleção dos *clusters* feita no PDM foi realizada, aproximadamente, na mesma região do *T-F Map*, e, com a mesma quantidade de *clusters* utilizados em [92]. Desse modo, é possível avaliar qualitativamente o desempenho da construção do *T-F Map* e do algoritmo de separação de DP do PDM, em relação à separação realizada com o sistema comercial da *TechImp*, que possui o mesmo recurso para separar DP.

Na separação, os três *clusters* selecionados, diferenciados pelas cores azul, vermelho e verde na Figura 51 (a), foram separados nos sub-padrões PRPD presentes na Figura 51 (b), Figura 51 (c), e, Figura 51 (d), respectivamente.

Comparando com [70], o *T-F Map* construído e os sub-padrões PRPD obtidos após a separação, é possível afirmar que o PDM, além de construir corretamente o *T-F Map*, a separação de DP realizada com o PDM conseguiu separar satisfatoriamente as DP sobrepostas no padrão PRPD da Figura 50 (a). O resultado da separação obtido com o PDM teve desempenho qualitativo equiparado à separação realizada com o *software* comercial da *TechImp* descrita em [92].

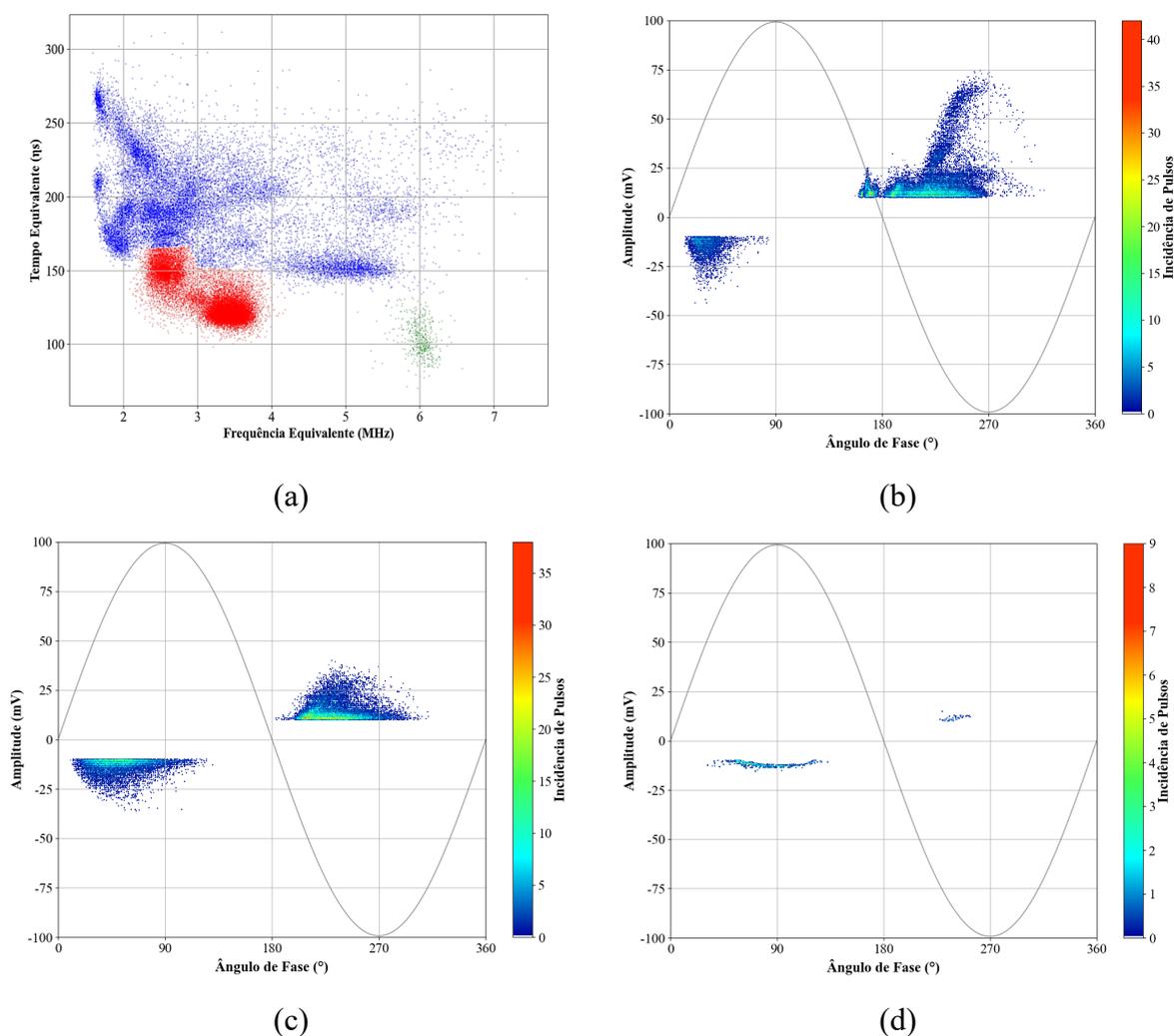


Figura 51 – Separação de *clusters* e sub-padrões PRPD: (a) *T-F Map* com separação de *clusters* nas cores vermelho, azul e verde; (b) Sub-padrão PRPD do *cluster* vermelho; (c) Sub-padrão PRPD do *cluster* azul; (d) Sub-padrão PRPD do *cluster* verde.

Os *clusters* em azul, vermelho e verde foram identificados por [92], respectivamente, como DP em micro cavidades distribuídas pela isolação, prováveis descargas tipo corona incidindo sobre as camadas e/ou ranhuras do revestimento isolante do estator e descarga tipo corona externa. Mais detalhes técnicos sobre DP em máquinas rotativas podem ser encontrados na IEC 60034-27-2 [93].

4.2.2. Separação de DP Medidas com o Simulador

Com uma tensão de aproximadamente 3 kV no simulador, a medição foi realizada com DP do tipo interna e corona ativadas. A medição foi realizada com a solução desenvolvida, através de um HFCT, e, portanto, o tipo de medição é direto. O padrão PRPD completo e *T-F Map* correspondente estão na Figura 52 (a) e na Figura 52 (b).

Selecionando dois *clusters* no *T-F Map*, representados nas cores vermelho e verde da Figura 52 (c), o padrão PRPD completo da Figura 52 (a) foi separado em dois novos sub-padrões PRPD apresentados na Figura 52 (d) e Figura 52 (e).

O padrão PRPD da Figura 52 (d) é típico de DP tipo corona medido pelo método direto. Conforme descrito no item 3.4, para a configuração ponta-plano e sem sobretensão, há presença de DP de apenas uma polaridade (normalmente, polaridade negativa). Para o padrão PRPD da Figura 52 (e) é notável a presença do efeito memória, com eventos de DP presentes antes da inversão de polaridade da tensão aplicada, uma característica típica de DP do tipo interna.

A lógica de separação baseada no *T-F Map* e implementada no PDM, permitiu que o padrão PRPD da Figura 52 (a) fosse reconstruído em dois novos sub-padrões PRPD. Portanto, é possível afirmar que a separação de DP foi realizada de maneira satisfatória pelo PDM na presença de DP dos tipos interna e corona. Esses novos padrões PRPD podem, então, ser levados para o algoritmo de identificação e classificados conforme o tipo da DP.

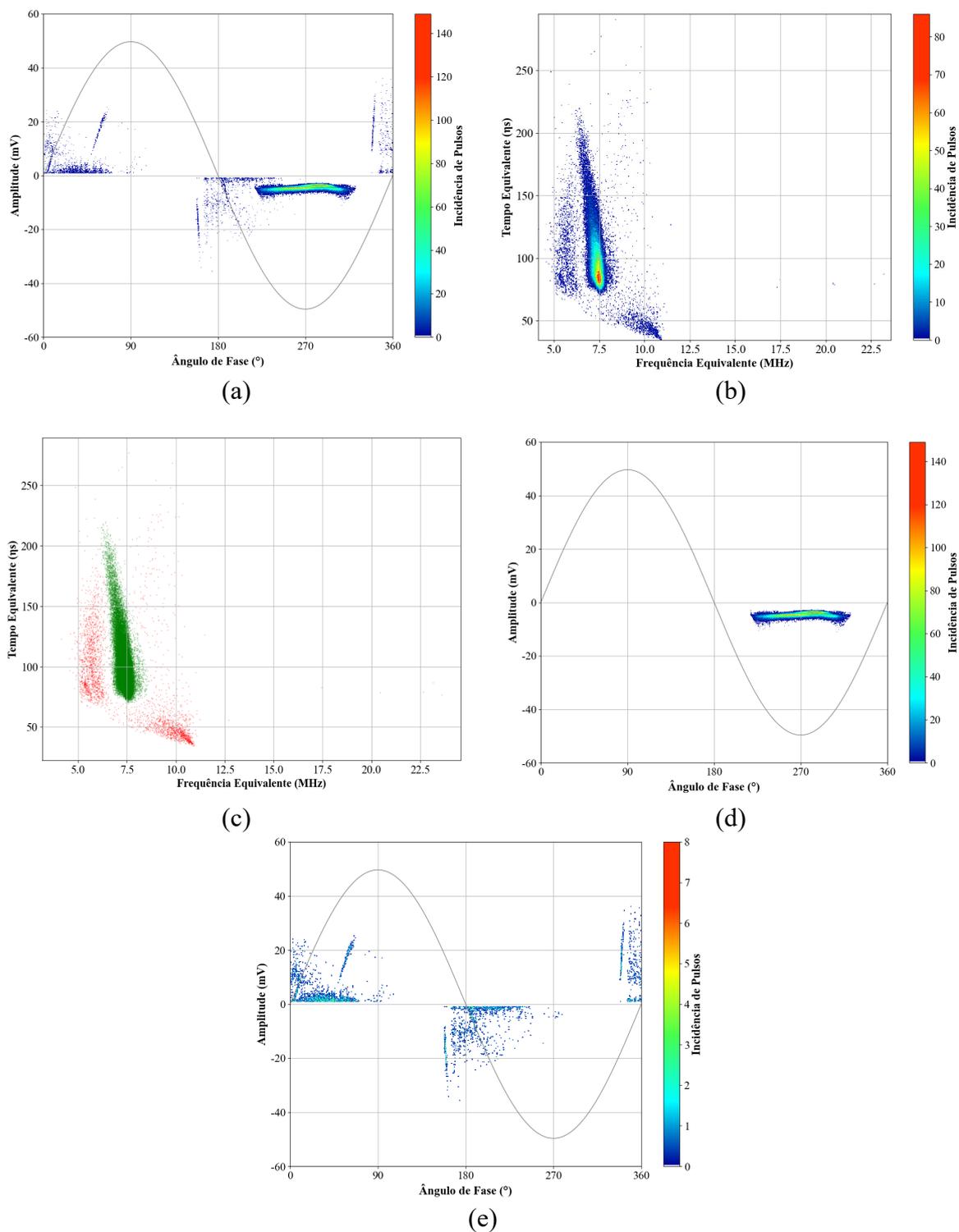


Figura 52 - Separação de DP na presença de descargas tipo interna e corona; (a) Padrão PRPD completo; (b) *T-F Map* referente ao padrão PRPD completo; (c) *T-F Map* com separação de *clusters* nas cores verde e vermelho; (d) Sub-padrão PRPD do *cluster* de cor verde (DP tipo corona); (e) Sub-padrão PRPD do *cluster* de cor vermelho (DP tipo interna).

4.2.3. Considerações Sobre a Separação de DP

O procedimento de separação de DP, mostrado nesta seção, foi avaliado para um caso de medição realizada no estator de um gerador e um caso DP que ocorrem simultaneamente produzidas com o simulador de DP. Os resultados obtidos com a solução proposta permitem afirmar que a construção do *T-F Map* foi realizada adequadamente e que separação de DP fornecida pela solução é válida para separar múltiplos fenômenos de DP presentes em uma mesma medição.

Assim como no item 2.4.3, este autor ressalta que a utilização do *T-F Map* para separar fontes de DP tem suas limitações, pois como os pulsos são representados apenas com base no tempo de duração e largura de banda equivalentes, pulsos semelhantes podem ser mapeados na mesma região do mapa.

4.3. Análise de Resultados e Validação da Classificação de DP

Para realizar a validação do algoritmo de identificação baseado no sistema de inferência Fuzzy, o banco de dados desenvolvido (item 3.3.3) foi separado em 80 % como conjunto de treinamento e 20 % como conjunto de teste. No momento da avaliação dos resultados e da separação dos conjuntos o banco de dados possuía um total de, aproximadamente, 500 medições de DP.

O conjunto de treinamento foi utilizado para entender a relação entre os marcadores de identificação e as categorias de DP, estabelecer as funções de pertinência de cada parâmetro e, por último, definir as regras de decisão Fuzzy, já o conjunto de teste foi utilizado para avaliar os resultados de classificação obtidos com o FIS implementado.

Para avaliar os resultados, foi construída uma matriz de confusão suavizada, criada com os resultados de classificação realizados com o FIS desenvolvido sobre o conjunto de teste. Através da matriz criada é possível calcular parâmetros estatísticos para avaliar os resultados de identificação para o conjunto de dados de teste. Para entender melhor a criação da matriz de confusão e, também, sobre os parâmetros estatísticos utilizados, pode-se utilizar [94].

Como descrito no item 3.4.4, descargas parciais podem apresentar uma natureza intermediária entre mais de uma categoria, principalmente, no caso de da categoria interna e superficial, portanto, uma matriz de confusão binária, não conseguiria englobar estes casos. Desta maneira, uma matriz de confusão não binária (suavizada) é mais adequada para

representar os resultados de classificação, sem perder informações sobre a incerteza ou a natureza híbrida da DP.

Uma matriz de confusão binária é formada pelos resultados designados como verdadeiro-positivo (VP), falso-positivo (FP), verdadeiro-negativo (VN) e falso-negativo (FN) [94]. Porém, como a saída do FIS proposto é multiclasse e não binária, ou seja, uma amostra pode pertencer parcialmente a duas (ou mais) classes, o conceito de verdadeiro-negativo se torna confuso, pois não existe um único “negativo”.

Portanto, pela dificuldade de definir claramente o valor de VN, a equação (14), utilizada para calcular a acurácia de uma matriz de confusão binária, é substituída pela equação (15), pois o conceito de acurácia mede o total de acertos sobre o total de amostras:

$$Acurácia = \frac{VP + VN}{FP + FN + VP + VN} \quad (14)$$

$$Acurácia = \frac{\textit{Total de Classificações Corretas}}{\textit{Total de Amostras}} \quad (15)$$

Os parâmetros estatísticos utilizados na avaliação foram calculados para os resultados das três categorias de saída, com exceção, da acurácia, que foi calculada globalmente, para todos os resultados de classificação do conjunto de teste. A partir da matriz de confusão é possível calcular os parâmetros precisão, *recall* e, $F1_{SCORE}$, com as equações (16), (17), (18) [94].

$$Precisão = \frac{VP}{VP + FP} \quad (16)$$

$$Recall = \frac{VP}{VP + FN} \quad (17)$$

$$F1_{SCORE} = 2 \cdot \frac{Precisão \cdot Recall}{Precisão + Recall} \quad (18)$$

A matriz de confusão obtida com os graus de pertinência provenientes das classificações de DP para as categorias corona, superficial e interna está representada na Figura 53.

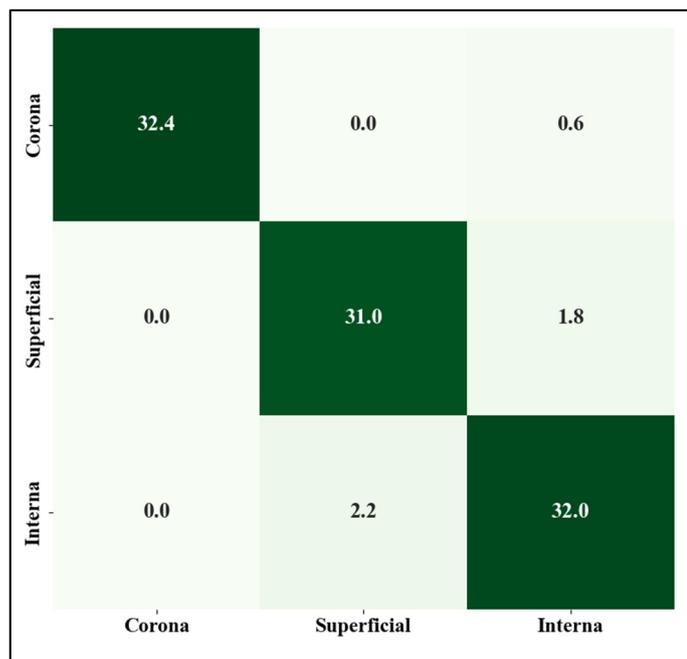


Figura 53 - Matriz de confusão para os resultados de identificação do conjunto de teste.

Com os dados da matriz de confusão, construiu-se a Tabela 10, com os valores encontrados para os parâmetros precisão, recall, $F1_{SCORE}$ e para a acurácia global.

Tabela 10 - Parâmetros estatísticos obtidos com os resultados de identificação do conjunto de teste.

Categoria	Precisão (%)	Recall (%)	$F1_{SCORE}$ (%)	Acurácia (%)
Corona	100,0	97,0	98,5	95,4
Superficial	91,4	94,1	92,7	
Interna	93,9	93,8	93,9	

A categoria de saída que apresentou os melhores valores para os parâmetros da Tabela 10 foi a categoria corona, com valores de precisão, recall e $F1_{SCORE}$ maiores ou iguais a 97%. O valor de 100 % de precisão indica que não ocorreram resultados falso-positivos para esta categoria.

A categoria superficial foi a que apresentou o menor valor de precisão, 91,4%, o que acabou por refletir no pior resultado do parâmetro $F1_{SCORE}$, 92,7%. Como o $F1_{SCORE}$ é a média harmônica dos resultados de precisão e recall, ele faz um balanceamento entre estes dois parâmetros, de tal maneira, que, valores baixos de precisão ou recall, sejam penalizados.

Já o menor valor do parâmetro recall foi para categoria interna, 93,8%. O parâmetro recall depende da quantidade de falso-negativos, ou seja, dados da categoria interna que foram classificados em outra categoria.

De maneira geral, os resultados obtidos para os parâmetros mostram a capacidade do FIS, implementado na solução desenvolvida, realizar a classificação nas categorias básicas de DP, atingindo um acurácia global, de 95,4%, considerada ótima. Dessa maneira, é possível considerar como válida a utilização do FIS proposto para classificar DP em equipamentos elétricos em categorias básicas de DP como: corona, superficial e interna.

É preciso ressaltar que o FIS proposto, apesar dos bons resultados com as categorias básicas de DP, ainda pode ser melhorado. Este autor considera o banco de dados de classificação da solução desenvolvida em um estágio de desenvolvimento de inicial para intermediário.

Para avançar no desenvolvimento da classificação, é preciso aumentar este banco de dados com mais medições de DP, assim como variabilidade de tipologias dos equipamentos sob medição, e, principalmente, ampliar a quantidade de dados de medição feitas em modelos DP em laboratório sobre condições conhecidas com a finalidade de melhorar o entendimento da correlação entre os dados medidos e as características físicas do defeito.

No Apêndice A, estão alguns resultados de identificação obtidos com solução desenvolvida para cada categoria de DP.

5. Conclusões

Este trabalho apresentou uma solução técnica integrada para a medição, separação e classificação de descargas parciais em equipamentos elétricos, com flexibilidade para ser utilizada com diferentes dispositivos de medição e métodos de medição (convencional e não-convencional).

Os resultados das medições comparativas realizadas mostraram que a solução técnica desenvolvida conseguiu:

- Com confiabilidade e repetitividade, medir os tipos básicos de DP: corona, superficial e interna em comparação com um sistema comercial, com desvios menores que 4% para os parâmetros de amplitude e ângulo de fase;
- Medir corretamente as magnitudes de DP em valores de carga aparente, com resultados equivalentes a um sistema comercial validado de acordo com a IEC 60270, com um erro médio menor que 1,5%.

As avaliações sobre a capacidade de separação de múltiplos fenômenos presentes na mesma medição indicaram que:

- A correlação entre os valores de amplitude, ângulo de fase, tempo de duração e largura de banda equivalente de cada pulso de DP, permitiu separar satisfatoriamente os ruídos e os diferentes fenômenos medidos simultaneamente. Essa separação permitiu reconstruir os diferentes fenômenos em novos padrões PRPD, dos quais, podem ser extraídos os marcadores de identificação utilizados na classificação de DP.
- O *T-F Map* tem uma boa capacidade em separar DP, entretanto, tem limitações para medições em que há pulsos semelhantes, porém, provenientes de diferentes defeitos, pois estes podem ser mapeados na mesma região do mapa.

Os resultados dos diagnósticos realizados com o mecanismo de classificação de DP mostraram que:

- O sistema de inferência proposto, conseguiu com robustez e acurácia fornecer diagnósticos assertivos para o conjunto de dados de teste, atingindo uma acurácia de 95,4% na classificação dos tipos básicos de DP;

- Este resultado confirma que a escolha por uma estratégia de classificação geral, independente da tipologia do equipamento, que permite associar a natureza dos defeitos às categorias de saída de DP;
- A estratégia de classificação baseada na natureza do defeito, permite que as três categorias básicas de defeitos relacionados à DP possam ser identificadas com robustez, entretanto, limitada à essas categorias;
- Para uma classificação mais específica dos diferentes tipos de defeito na isolação, é necessária a utilização de mais marcadores de identificação. Estes marcadores devem se relacionar com as características locais do defeito, como a sua forma e a sua localização em relação aos eletrodos;
- Estas limitações sugerem a necessidade de um aprimoramento contínuo da solução, principalmente em relação ao *software*, com a possibilidade de implementar mais técnicas de separação de DP na etapa de pós-processamento, e, a classificação em categorias mais específicas de defeitos.

Por último, este trabalho contribuiu:

- Com a área de estudos ao permitir que novas pesquisas relacionadas a DP possam ser realizadas com a solução desenvolvida;
- Para a nacionalização de uma solução tecnológica integrada capaz de medir, separar e classificar descargas parciais;
- Com o setor industrial e elétrico ao fornecer uma solução tecnológica, de uso geral, que permite melhorar os procedimentos de manutenção preditiva, ao possibilitar a medição, separar de fenômenos e o diagnóstico da natureza básica do defeito;
- Para a sociedade pelo desenvolvimento de uma solução tecnológica que ajuda a mitigar a ocorrência de falhas em equipamentos de alta tensão e, assim, reduzir a quantidade de eventos que possam levar a indisponibilidade no fornecimento de energia elétrica.

5.1. Produção Bibliográfica

Artigos publicados relacionados ao tema do doutorado:

J. P. Villibor, E. T. W. Neto, G. P. Lopes, M. P. Pereira e G. H. Faria, “Software Development for Partial Discharges Separation and Identification in the Presence of Multiple Partial Discharge Activities,” *Revista Científic@ Universitatis*. Publicado no volume 11, nº 2, Dezembro/2024. Qualificação CAPES Engenharias IV: A3.

J. P. Villibor, G. P. Lopes, E. T. W. Neto, M. P. Pereira, P. H. Caixeta e R. Arregalo, “Aplicação Prática da Ferramenta *T-F Map* na Separação de Descargas Parciais em Cabos de Média Tensão Durante Envelhecimento Artificial Monitorado”, XIX ERIAC 2023 – Encontro Regional Ibero-Americano do Cigre, Foz do Iguaçu-PR.

J. P. Villibor, B. P. Marques, G. P. Lopes, R. Arregalo, R. G. O. Junior, P. H. Caixeta, “Aplicação Prática da Ferramenta *T-F Map* na Separação de Descargas Parciais em Máquinas Rotativas e Cabos de Média Tensão”, IX SBSE 2022 - Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Santa Maria-RS.

M. P. Pereira, G. H. Faria, J. P. Villibor, G. P. Lopes, and E. T. W. Neto, “Investigation of High-Frequency Oscillation Discrepancies Presented by Distribution Transformers During Lightning-Impulse Voltage Tests,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Publicado no volume de março/abril de 2021. Qualificação CAPES Engenharias IV: A1.

L. P. S. Petri, E. A. Moutinho, R. P. Silva, R. M. Capelini, R. Salustiano, G. M. F. Ferraz, E. T. W. Neto, J. P. Villibor, S. S. Pinto. “A Portable System for the Evaluation of the Degree of Pollution of Transmission Line Insulators,” *Energies*. MDPI. Publicado em 15/12/2020. Qualificação CAPES Engenharias IV: B1.

Referências

- [1] W. Hauschild e E. Lemke, High Voltage Test and Measuring Techniques, Berlin: Springer, 2014.
- [2] Ministério Público Federal do Amapá, “Site do Ministério Público Federal,” 06 02 2025. [Online]. Available: <https://www.mpf.mp.br/ap/sala-de-imprensa/noticias-ap/mpf-processa-agentes-do-setor-eletrico-responsaveis-pelo-apagao-de-2020-no-amapa-2>. [Acesso em 18 02 2025].
- [3] Wikipedia, “Apagão no Amapá em 2020,” 05 05 2024. [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Apag%C3%A3o_no_Amap%C3%A1_em_2020. [Acesso em 18 02 2025].
- [4] Cigre, “An International Survey on Failures in Large Power Transformers,” Cigre, Paris, 1983.
- [5] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBRIEC 60270 - Técnicas de Ensaios Elétricos de Alta-Tensão - Medição de Descargas Parciais,” ABNT, Rio de Janeiro, 2017.
- [6] H. M. Ryan, High Voltage Engineering and Testing, London: IET - The Institution of Engineering and Technology, 2013.
- [7] A. Haddad e D. Warne, Advances in High Voltage Engineering, London: IET - The Institution of Engineering and Technology, 2007.
- [8] Cigré - Grupo de Trabalho D1.29, “Partial discharges in transformers,” CIGRE Technical Brochure 676, 2017.
- [9] Cigre - JWG A2/D1.51, “Improvements to PD Measurements for Factory and Site Acceptance Tests of Power Transformers,” Cigre, Paris, 2022.

- [10] A. Pedersen, "Partial discharges in voids in solid dielectrics. An alternative approach," em *Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena — Annual Report 1987*, Gaithersburg, MD, USA, 1987.
- [11] IEC - International Electrotechnical Commission, "IEC 60270 - High-Voltage Test Techniques - Partial Discharge Measurements," IEC, Geneva, 2015.
- [12] Cigre Working Group D1.37, "Guidelines for Partial Discharge Measurements Using Conventional (IEC 60270) and Unconventional Methods," Cigré, Paris, 2016.
- [13] C. A. Bailey, "A Study of Internal Discharges in Cable Insulation," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, pp. 155-159, December 1967.
- [14] S. Boggs, G. Ford e R. Madge, "Coupling Devices for the Detection of Partial Discharges in Gas-Insulated Swichgear," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 3969-3973, August 1981.
- [15] S. A. Boggs e G. C. Stone, "Fundamental Limitations in the Measurement of Corona and Partial Discharge," em *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Toronto, 1982.
- [16] T. K. Abdel-Galil, A. H. El-Hag, A. M. Gaouda, M. M. A. Salama e R. Bartnikas, "De-noising of partial discharge signal using eigen-decomposition technique," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 1657-1662, 22 December 2008.
- [17] S. Sriram, S. Nitin, K. Prabhu e M. Bastiaans, "Signal denoising techniques for partial discharge measurements," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 1182-1191, December 2005.
- [18] X. Zhou, C. Zhou e I. Kemp, "An improved methodology for application of wavelet transform to partial discharge measurement denoising," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 586-594, 20 June 2005.
- [19] H. Zhang, T. Blackburn, B. Phung e D. Sen, "A novel wavelet transform technique for on-line partial discharge measurements. 1. WT de-noising

- algorithm,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 3-14, 12 February 2007.
- [20] X. Ma, C. Zhou e I. Kemp, “Automated wavelet selection and thresholding for PD detection,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 37-45, 07 August 2002.
- [21] D. Dey, B. Chatterjee, S. Chakravorti e S. Munshi, “Cross-wavelet transform as a new paradigm for feature extraction from noisy partial discharge pulses,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 157-166, 17 February 2010.
- [22] N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung e H. H. Liu, “The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis,” *The Royal Society*, pp. 903-995, 1998.
- [23] Y. Tang, C. Tai, C. Su, C. Chen e J. Chen, “A correlated empirical mode decomposition method for partial discharge signal denoising,” *Measurement Science and Technology*, 29 June 2010.
- [24] Z. Wu e N. E. Huang, “Ensemble Empirical Mode Decomposition: A Noise-Assisted Data Analysis Method,” *Advances in Adaptive Data Analysis - World Scientific Publishing Company*, vol. 1, pp. 1-41, 2009.
- [25] X. Ma, C. Zhou e I. Kemp, “Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 446-457, 07 August 2002.
- [26] W. Hang, T. Kexiong e Z. Deheng, “Extraction of partial discharge signals using wavelet transform,” em *Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Seoul - South Korea, 1997.
- [27] H. Zhang, T. Blackburn, B. Phung e Z. Liu, “Application of signal processing techniques to on-line partial discharge detection in cables,” em *2004 International Conference on Power System Technology, 2004. PowerCon 2004.*, Singapore, 2004.

- [28] J. C. Chan, H. Ma, T. K. Saha e C. Ekanayake, "A novel level-based automatic wavelet selection scheme for Partial Discharge measurement," em *22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Bali, Indonesia, 2012.
- [29] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine*, vol. 11, pp. 674-693, 1989.
- [30] J. C. Chan, H. Ma, T. K. Saha e C. Ekanayake, "Self-adaptive partial discharge signal de-noising based on ensemble empirical mode decomposition and automatic morphological thresholding," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, pp. 294-303, 20 February 2014.
- [31] Y. Dong, M. Liao, X. Zhang e F. Wang, "Faults diagnosis of rolling element bearings based on modified morphological method," *Mechanical Systems and Signal Processing - Elsevier*, Maio 2011.
- [32] J. Wang, G. Xu, Q. Zhang e L. Liang, "Application of improved morphological filter to the extraction of impulsive attenuation signals," *Mechanical Systems and Signal Processing - Elsevier*, Janeiro 2009.
- [33] N. G. Nikolaou e I. A. Antoniadis, "Application of Morphological Operators as Envelope Extractors for Impulsive-Type Periodic Signals," *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 1147-1162, 2003.
- [34] L. Zhang, J. Xu, J. Yang, D. Yang e D. Wang, "Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis," *Mechanical Systems and Signal Processing - Elsevier*, pp. 597-610, April 2008.
- [35] J. C. Chan, H. Ma, T. K. Saha e C. Ekanayake, "Self-adaptive partial discharge signal de-noising based on ensemble empirical mode decomposition and automatic morphological thresholding," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 294-303, 20 February 2014.

- [36] P. C. Baker, B. Stephen e M. D. Judd, "Compositional Modeling of Partial Discharge Pulse Spectral Characteristics," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 1909-1916, 11 March 2013.
- [37] T. Babnik, R. K. Aggarwal e P. J. Moore, "Principal Component and Hierarchical Cluster Analyses as Applied to Transformer Partial Discharge Data With Particular Reference to Transformer Condition Monitoring," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 2008-2016, 31 March 2008.
- [38] L. Hao, P. L. Lewin, J. A. Hunter, D. J. Swaffield, A. Contin, C. Walton e M. Michel, "Discrimination of multiple PD sources using wavelet decomposition and principal component analysis," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 1702-1711, 10 October 2011.
- [39] C. Chang, J. Jin, C. Chang, T. Hoshino, M. Hanai e N. Kobayashi, "Separation of corona using wavelet packet transform and neural network for detection of partial discharge in gas-insulated substations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1363-1369, 04 April 2005.
- [40] A. Contin e S. Pastore, "Classification and separation of partial discharge signals by means of their auto-correlation function evaluation," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 1609-1622, 28 December 2009.
- [41] J. C. Chan, H. Ma e T. K. Saha, "Time-frequency sparsity map on automatic partial discharge sources separation for power transformer condition assessment," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 2271-2283, 11 August 2015.
- [42] M. Wang, "Partial discharge pattern recognition of current transformers using an ENN," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1984-1990, 27 June 2005.
- [43] L.-J. Chen, W.-M. Lin, T.-P. Tsao e Y.-H. Lin, "Study of Partial Discharge Measurement in Power Equipment Using Acoustic Technique and Wavelet Transform," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1575-1580, 02 July 2007.

- [44] B. Fruth e J. Fuhr, "Partial Discharge Pattern Recognition - A Tool for Diagnosis and Monitoring of Ageing - 15/33-12," em *Cigre Session 1990*, Paris, 1990.
- [45] Haefely Test AG, "Operating Instructions DDX 9121b Partial Discharge Detector," Suíça, 2014.
- [46] S. Venkatesh e S. Gopal, "Orthogonal least square center selection technique - A robust scheme for multiple source partial discharge pattern recognition using radial basis probabilistic neural network," *Elsevier - Expert Systems with Applications*, pp. 8978-8989, 2011.
- [47] K. Wang, R. Liao, L. Yang, J. L. S. Grzybowski e J. Hao, "Optimal features selected by NSGA-II for partial discharge pulses separation based on time-frequency representation and matrix decomposition," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 825 - 838, 24 May 2013.
- [48] A. Cavallini, G. Montanari, A. Contin e F. Puletti, "A New Approach to the Diagnosis of Solid Insulation Systems Based on PD Signal Inference," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, pp. 23-30, 08 April 2003.
- [49] A. Cavallini, X. Chen, G. C. Montanari e F. Ciani, "Diagnosis of EHV and HV Transformers Through an Innovative Partial-Discharge-Based Technique," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 814-824, 13 November 2009.
- [50] A. Cavallini, G. Montanari, F. Puletti e A. Contin, "A new methodology for the identification of PD in electrical apparatus: properties and applications," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 203-215, 16 May 2005.
- [51] A. Contin, A. Cavallini, G. Montanari, G. Pasini e F. Puletti, "Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 335-348, 07 August 2002.
- [52] R. Bartnikas e J. Novak, "On the character of different forms of partial discharge and their related terminologies," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, pp. 956-968, December 1993.

- [53] J. P. Villibor, G. P. Lopes, E. T. W. Neto, M. P. Pereira e G. H. Faria, "Software Development for Partial Discharges Separation and Identification in the Presence of Multiple Partial Discharge Activities," *Revista Cientific@Universitas*, vol. 12, n° 2, pp. 85-96, 2024.
- [54] C. Bhargava e P. K. Sharma, *Artificial Intelligence - Fundamental and Applications*, Boca Raton: CRC, 2021.
- [55] S. Lu, H. Chai, A. Sahoo e B. T. Phung, "S. Lu; H. Chai; A. Sahoo; B. T. Phung," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 1861-1888, 14 December 2020.
- [56] T. R. Sukma, U. Khayam, Suwarno, R. Sugawara, H. Yoshikawa, M. Kozako, M. Hikita, O. Eda, M. Otsuka, H. Kaneko e Y. Shiina, "Classification of Partial Discharge Sources using Waveform Parameters and Phase-Resolved Partial Discharge Pattern as Input for the Artificial Neural Network," em *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Perth, Australia, 2018.
- [57] L. S. Lumba, U. Khayam e R. Maulana, "Design of Pattern Recognition Application of Partial Discharge Signals Using Artificial Neural Networks," em *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, 2019.
- [58] Y. Khan, "Partial discharge pattern analysis using PCA and back-propagation artificial neural network for the estimation of size and position of metallic particle adhering to spacer in GIS," *Electrical Engineering - Springer*, pp. 29-42, March 2016.
- [59] A. A. Mas'ud, B. G. Stewart e S. G. McMeekin, "An investigative study into the sensitivity of different partial discharge ϕ -q-n pattern resolution sizes on statistical neural network pattern classification," *Measurement - Elsevier*, pp. 497-507, October 2016.
- [60] A. A. Mas'ud, J. A. Ardila-Rey e R. Albarracín, "An Ensemble-Boosting Algorithm for Classifying Partial Discharge Defects in Electrical Assets," *Machines - MDPI*, 8 August 2017.

- [61] J. Jineeth, R. Mallepally e T. K. Sindhu, “Classification of Partial Discharges Sources in XLPE Cables by Artificial Neural Networks and Support Vector Machine,” em *2018 IEEE Electrical Insulation Conference*, San Antonio, TX, USA, 2018.
- [62] H. Kumar, M. Shaqif, G. A. Hussain e K. Kauhaniemi, “Comparision of Machine Learning Algorithms for Classification of Partial Discharge Signals in Medium Voltage Components,” em *2021 PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Espoo, Finland, 2021.
- [63] L. Duan, J. Hu, G. Zhao, K. Chen, J. He e S. X. Wang, “Identification of Partial Discharge Defects Based on Deep Learning Method,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1557-1568, 11 April 2019.
- [64] J. Tang, M. Jin, F. Zeng, X. Zhang e R. Huang, “Assessment of PD severity in gas-insulated swithgear with an SSAE,” *IET Science, Measurement & Technology*, pp. 423-430, July 2017.
- [65] W. Ganjun, Y. Fan, P. Xiaosheng, W. Yijiang, L. Taiwei e L. Zibo, “Partial Discharge Pattern Recognition of High Voltage Cables Based on the Stacked Denoising Autoencoder Method,” em *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Guangzhou, China, 2018.
- [66] R. Zemouri, M. Lévesque, N. Amyot, C. Hudon, O. Kokoko e S. A. Tahan, “Deep Convolutional Variational Autoencoder as a 2D-Visualization Tool for Partial Discharge Source Classification in Hydrogenerators,” *IEEE Access*, pp. 5438-5454, 27 December 2019.
- [67] F. Y. Y. Li, Q. Cai, K. Yuan, R. Wan, X. Li, M. Qian, P. Liu, J. Guo, J. Yu, T. Zheng, H. Yan, P. Hou, Y. Feng, S. Wang e L. Ding, “Image fusion of fault detection in power system based on deep learning,” *Cluster Computing - Springer Professional*, 28 February 2018.
- [68] N. Puspitasari, U. Khayam, Suwarno, Y. Kakimoto, H. Yoshikawa, M. Kozako e M. Hikita, “Partial Discharge Waveform Identification using Image with

Convolutional Neural Network,” em *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Bucharest, Romania, 2019.

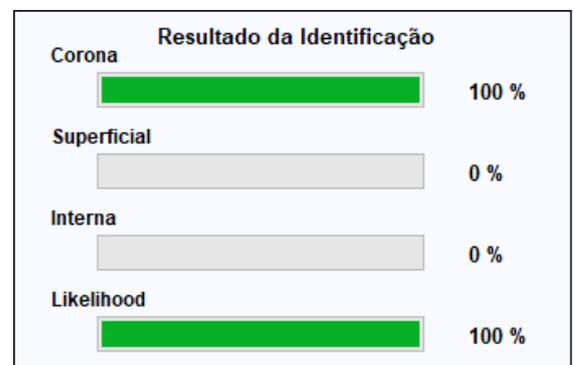
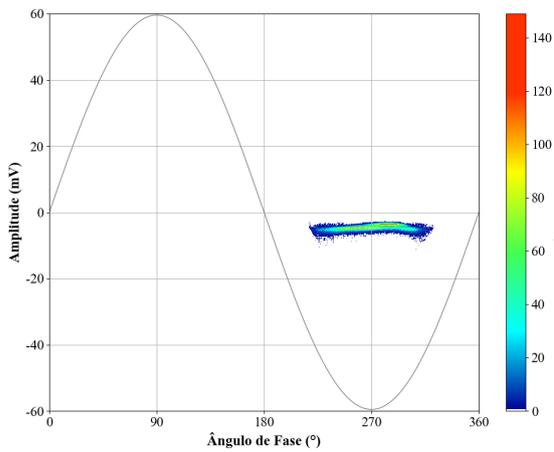
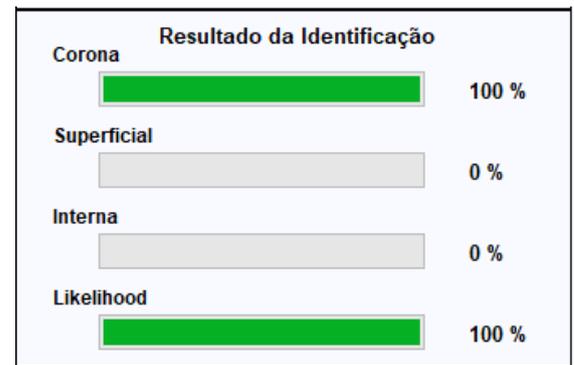
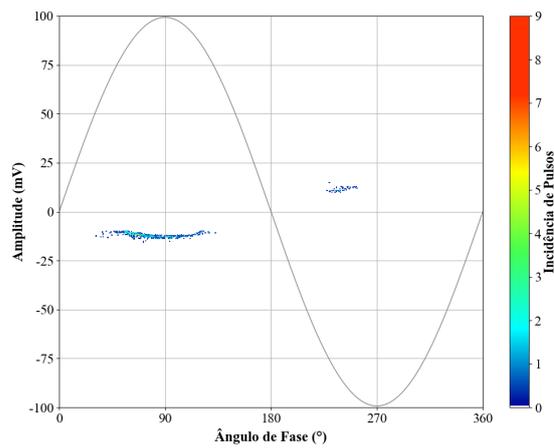
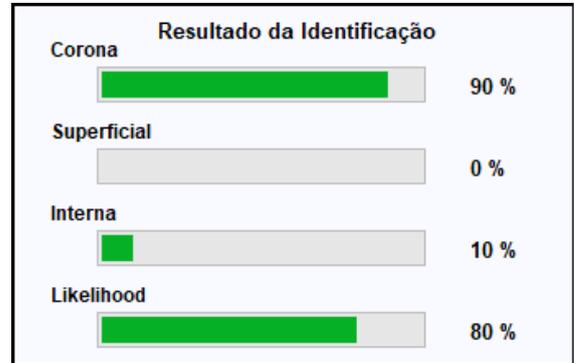
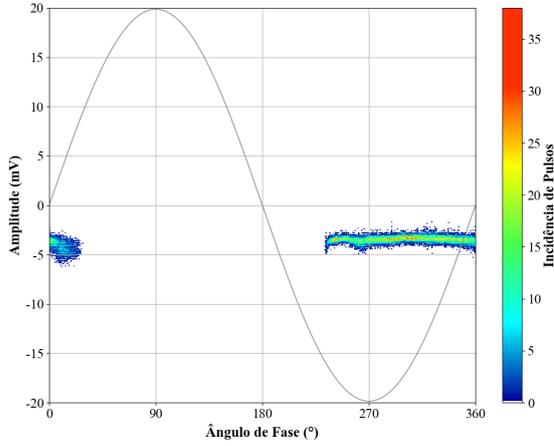
- [69] H. Song, J. Dai, G. Sheng e X. Jiang, “GIS partial discharge pattern recognition via deep convolutional neural network under complex data source,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 678-685, 19 April 2018.
- [70] Q. Che, H. Wen, X. Li, Z. Peng e K. P. Chen, “Partial Discharge Recognition Based on Optical Fiber Distributed Acoustic Sensing and a Convolutional Neural Network,” *IEEE Access*, pp. 101758-101764, 29 July 2019.
- [71] K. Banno, Y. Nakamura, Y. Fujii e T. Takano, “Partial Discharge Source Classification for Switchgears with Transient Earth Voltage Sensor Using Convolutional Neural Network,” em *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Perth, WA, Australia, 2018.
- [72] B. Adam e S. Tenbohlen, “Classification of multiple PD Sources by Signal Features and LSTM Networks,” em *2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Athens, Greece , 2018.
- [73] X. Zhou, X. Wu, P. Ding, X. Li, N. He, G. Zhang e X. Zhang, “Research on Transformer Partial Discharge UHF Pattern Recognition Based on CNN-LSTM,” *Energies - MDPI*, 20 December 2019.
- [74] G. Li, X. Wang, X. Li, A. Yang e M. Rong, “Partial Discharge Recognition with a Multi-Resolution Convolutional Neural Network,” *Sensors - MDPI*, 18 October 2018.
- [75] M.-T. Nguyen, V.-T. Nguen, S.-J. Yun e Y.-H. Kim, “Recurrent Neural Network for Partial Discharge Diagnosis in Gas-Insulated Switchgear,” *Energies - MDPI*, 9 May 2018.
- [76] L. A. Lumba, U. Khayam e L. S. Lumba, “Application of Fuzzy Logic for Partial Discharge Pattern Recognition,” em *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, Indonesia, 2019.

- [77] A. A. Masúd, J. A. Ardila-Rey, R. Albarracín, F. Muhammad-Sukki e N. A. Bani, “Comparison of the Performance of Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic for Recognizing Different Partial Discharges Sources,” *Energies - MDPI*, 21 July 2017.
- [78] A. Cavallini, A. Contin, G. Montanari e F. Puletti, “Advanced PD inference in on-field measurements. I. Noise rejection,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 216-224, 22 April 2003.
- [79] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin e G. Montanari, “Advanced PD inference in on-field measurements. II. Identification of defects in solid insulation systems,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 528-538, 25 June 2003.
- [80] F. Kreuger, E. Gulski e A. Krivda, “Classification of partial discharges,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, pp. 917-931, December 1993.
- [81] IEEE, “IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery,” IEEE, New York, USA, 2014.
- [82] T. Okamoto e T. Tanaka, “Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement Systems,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, pp. 1015-1019, December 1986.
- [83] A. Krivda, “Automated recognition of partial discharges,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 796-821, October 1995.
- [84] A. Contin, G. Montanari e C. Ferraro, “PD source recognition by Weibull processing of pulse height distributions,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 48-58, February 2000.
- [85] M. Cacciari, A. Contin e G. Montanari, “Use of a mixed-Weibull distribution for the identification of PD phenomena (rotating machines),” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 614-627, August 1995.

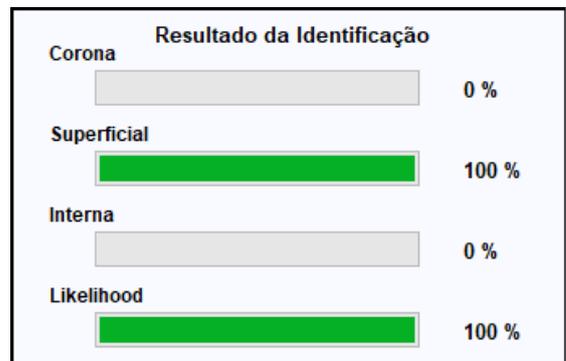
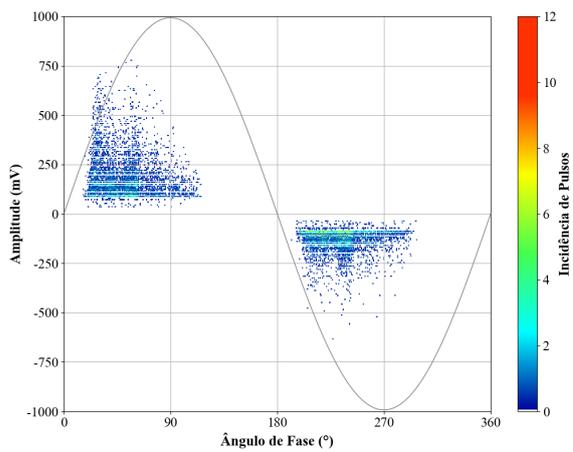
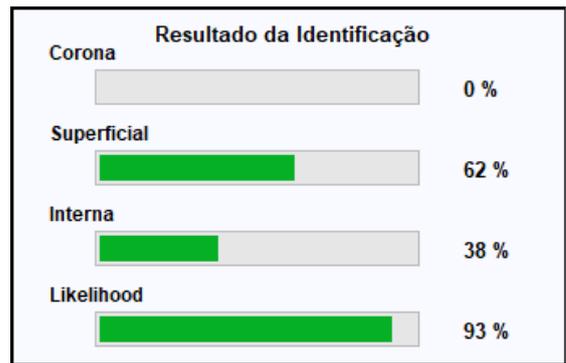
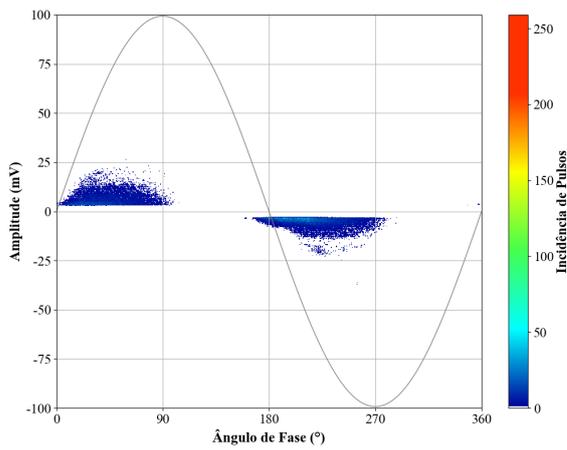
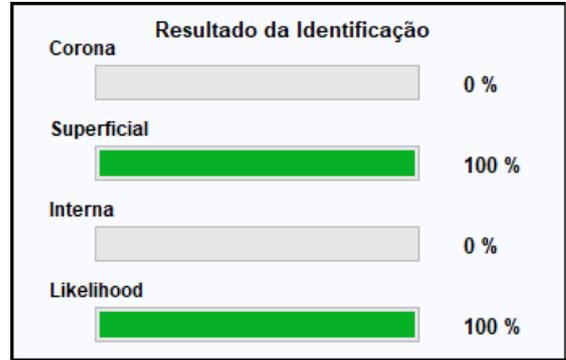
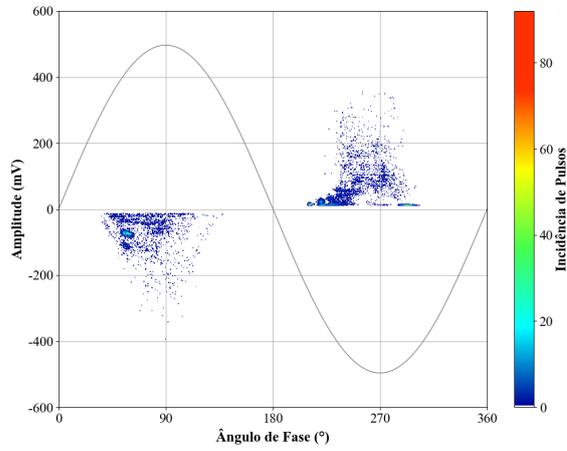
- [86] J. C. Chan e P. W. Tse, “A Novel, Fast, Reliable Data Transmission Algorithm for Wireless Machine Health Monitoring,” *IEEE Transactions on Reliability*, pp. 295-304, 26 May 2009.
- [87] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar e H. Mokhlisa, “Partial discharge classifications: Review of recent progress,” *Measurements - Elsevier*, pp. 164-181, May 2015.
- [88] P. Technology, “PicoTech,” Pico Technology, [Online]. Available: <https://www.picotech.com/oscilloscope/2000/picoscope-2000-overview>. [Acesso em 26 June 2022].
- [89] Altanova, “Sensors and Accessories,” Altanova, [Online]. Available: <https://www.altanova-group.com/en/products/partial-discharge-tests/sensors-and-accessories/hfct-30-50-90-mm>. [Acesso em 26 June 2022].
- [90] Fluke, “Current clamps and probes,” Fluke, 2022. [Online]. Available: <https://www.fluke.com/en-us/product/accessories/current-clamps/fluke-i3000-flex-4pk>. [Acesso em 15 06 2022].
- [91] L. Niemeyer, “A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling,” *IEEE Transactions On Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 2, nº 4, pp. 685-697, August 1995.
- [92] J. P. Villibor, B. P. Marques, R. Arregalo, R. G. O. Junior e C. P. H., “Aplicação prática da ferramenta T-F Map na separação de descargas parciais em máquinas rotativas e cabos de média tensão,” em *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, Santa Maria - RS, 2022.
- [93] International Electrotechnical Commission (IEC), *Rotating electrical machines - Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines*, Genebra: Suíça, 2012.
- [94] D. M. W. Powers, “Evaluation: From Precision, Recall and F-Factor to ROC, Informedness, Markedness & Correlation,” Cambridge University, Cambridge, UK, 2008.

Apêndice A - Resultados de Classificação do PDM

DP tipo Corona



DP tipo Superficial



DP tipo Interna

