



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas a Separação de
Dados e Análise em Frequência de Sinais UHF Emitidos por
Falhas de Transformadores**

Karl Schiewaldt

Bauru
2024



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas a Separação de
Dados e Análise em Frequência de Sinais UHF Emitidos por Falhas
de Transformadores”

KARL SCHIEWALDT

Qualificação apresentada à Faculdade de Engenharia
– UNESP – Campus de Bauru, para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro
Coorientador: Prof. Dr. Jorge Alfredo Ardila-Rey

Bauru
2024

Schiewaldt, Karl.

Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas a
Separação de Dados e Análise em Frequência de Sinais
UHF Emitidos por Falhas de Transformadores / Karl
Schiewaldt, 2024
62 p.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Alfredo Ardila-Rey

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2024

1. Transformadores. 2. Processamento de Sinais. 3.
Diagnóstico de Falhas. 4. Descargas Totais. 5.
Descargas Parciais. 6. UHF. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE KARL SCHIEWALDT, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de janeiro do ano de 2024, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de KARL SCHIEWALDT, intitulada **TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS APLICADAS A SEPARAÇÃO DE DADOS E ANÁLISE EM FREQUÊNCIA DE SINAIS UHF EMITIDOS POR FALHAS DE TRANSFORMADORES**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. MARCO AURÉLIO ROCHA (Participação Virtual) do(a) Engenharia Elétrica / Faculdade de Botucatu - UNIBR, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Centro Universitário de Lins - UNILINS. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO



IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

Essa pesquisa tem como objetivo propor métodos de diagnóstico e classificação de falhas em transformadores por meio de sinais de UHF. A implementação de sistemas de monitoramento busca evitar com que falhas totais nessas máquinas elétricas prejudiquem o sistema elétrico nacional, evitando paradas repentinas da produção de bens do país. Esse estudo contribui para o planejamento de manutenção e pode evitar colapsos totais, uma vez que discute quais são as melhores faixas de frequência para se diferenciar falhas em transformadores por meio de sensoriamento de UHF.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research aims to propose methods for diagnosing and classifying faults in transformers using UHF signals. The implementation of monitoring systems aims to prevent total failures in these electrical machines from harming the national electrical system, avoiding sudden stops in the production of goods in the country. This study contributes to maintenance planning and can prevent total collapses, as it discusses the best frequency ranges to identify transformer failures through UHF sensing.

Dedico este trabalho a minha família e ao meu orientador: minha família, por sempre estarem comigo, e ao meu orientador, pela parceria neste projeto.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais, Marcos e Katia, e minha esposa, Melissa, que desde o começo me apoiaram e me deram o suporte que precisei durante esta jornada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro, pela formidável orientação, apoio, suporte, ensinamentos, paciência, e acima de tudo, uma parceria imensa durante o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio foi fundamental para meu desenvolvimento e crescimento, não apenas profissional, mas também pessoal, sendo, para mim, uma referência de profissional que um dia busco ser.

Ao meu coorientador, o estimado Prof. Dr. Jorge Alfredo Ardila-Rey, pelo suporte durante a pesquisa.

À Faculdade de Engenharia de Bauru, instituição que me acompanha e me desenvolve desde o Colégio Técnico Industrial, e me proporcionou inúmeras oportunidades de crescimento ao longo destes 15 anos. Foi graças à Faculdade de Engenharia que hoje sou a pessoa e o profissional que sou, despertando minha curiosidade e fomentando minha busca por conhecimento.

A todos os docentes da Faculdade de Engenharia de Bauru, que me acompanharam durante a graduação e a pós-graduação, e que puderam compartilhar comigo uma parte de seu conhecimento, apoiando no meu desenvolvimento pessoal e profissional.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

Sistemas de monitoramento de transformadores de potência visam realizar o diagnóstico de falhas incipientes e evitar o colapso total da máquina. Tal fato tem extrema importância para o adequado planejamento de manutenção como também evitar o ônus de cobranças pelo não fornecimento de energia elétrica. A degradação dielétrica causada por operações em sobrecarga, contaminação dos materiais isolantes ou mesmo defeitos oriundos da fabricação ou transporte do transformador, podem dar início a falhas como descargas parciais e arcos elétricos. Esses últimos também podem ser conhecidos como descargas totais. Diversos são os métodos para se diagnosticar descargas sendo a detecção de ondas de ultra alta frequência, ou método UHF, um dos mais promissores. Neste contexto, um dos desafios desta análise é estabelecer uma determinada faixa de frequência que caracterize corretamente o espectro emitido pelas falhas oriundas de transformadores. Outro desafio é o desenvolvimento de sistemas de classificação de falhas para se permitir um maior planejamento de manutenção, uma vez que diferentes falhas demandam diferentes ações de manutenção. Todavia, muitos algoritmos de classificação de falhas se valem do próprio espectro de frequência destas, e a limitação espectral da faixa de frequência a ser considerada para o diagnóstico de falhas em transformadores, embora possa auxiliar em projeto de hardwares de sistemas de aquisição de dados, pode limitar algoritmos de classificação. Desta forma, essa dissertação avalia 3 sistemas de classificação de falhas (técnica cromática, análise de componentes principais e análise de forma) em 3 faixas de frequências UHF consolidadas pela literatura técnico-científica (banda total, banda de 100 MHz a 1 GHz e banda de 400 MHz a 900 MHz) considerando descargas totais internas e descargas parciais superficiais em isoladores de um transformador. Os resultados indicam que a análise de componentes principais foi a técnica mais eficaz em classificar as falhas. No mais, a menor banda considerada pelo estudo (400 MHz a 900 MHz) não impacta na eficácia da classificação, o que pode ser fator primordial para sistemas de aquisição de dados mais simples, ou seja, com menores taxas de aquisição para sistemas de identificação e classificação de falhas em transformadores.

Palavras-chave: monitoramento de transformadores, UHF, análise de componentes principais, análise de forma, técnica cromática.

ABSTRACT

Power transformer monitoring systems aim to diagnose incipient faults and prevent the total outage of the machine. This fact is extremely important for adequate maintenance planning and to avoid charges due to non-supply electricity. Dielectric degradation caused by overload operations, contamination of insulating materials or even defects arising from the manufacturing or transportation of the transformer, can start partial discharges and electric arcs (full discharges) activity. There are several methods for diagnosing discharges, and UHF technologies are one of the most promising. In this context, the challenge of UHF systems is to establish the correct frequency range that may characterize the spectrum emitted by transformer faults. Another challenge is the development of failure classification systems to allow for better maintenance planning since different failures require different maintenance actions. However, many fault classification algorithms depend on the frequency spectrum content. In this context, this work evaluates 3 fault classification systems (chromatic technique, principal component analysis and shape analysis) in 3 UHF frequency bands consolidated by techno-scientific literature (total band, band from 100 MHz to 1 GHz and band from 400 MHz to 900 MHz) by considering internal discharges and partial discharges on transformer insulators. The results indicate that principal component analysis was the most effective technique in classifying failures. Furthermore, the smallest band considered by the study (400 MHz to 900 MHz) does not impact the effectiveness of classification, which may be a key factor for the development of simpler data acquisition systems applied to power transformer failure identification and classification.

Keywords: transformer monitoring, UHF, principal component analysis, shape analysis, chromatic technique.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Falhas em transformadores	19
Figura 2.2 – Descargas e curtos-circuitos entre espiras devido à falha de isolamento	23
Figura 2.3 – Falha em isolador.....	24
Figura 3.1 – Faixas de frequência emitidas por diversas topologias de transformadores	29
Figura 5.1 – Detalhes do ensaio experimental	38
Figura 5.2 – Parâmetro de reflexão (S_{11}) da antena de Vivaldi utilizada	38
Figura 5.3 – Resumo da metodologia de processamento de sinais	39
Figura 6.1 – Sinal UHF de descarga parcial em isolador	41
Figura 6.2 – Sinal UHF de descarga interna	42
Figura 6.3 – Espectro das falhas estudadas para sinal sem filtragem	43
Figura 6.4 – Espectro das falhas para sinais filtrados digitalmente entre 100 MHz e 1GHz	44
Figura 6.5 – Espectro das falhas para sinais filtrados digitalmente entre 400 MHz e 900 MHz	44
Figura 6.6 – Espectro do ruído de fundo das medições.....	45
Figura 6.7 – TC para sinais processados sem filtragem.....	47
Figura 6.8 – TC para sinais com banda de 100 MHz a 1 GHz (CIGRÈ, 2022)	48
Figura 6.9 – TC para sinais com banda de 400 MHz a 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023)	49
Figura 6.10 – ACP para sinais processados sem filtragem	50
Figura 6.11 – ACP para sinais com banda de 100 MHz a 1 GHz (CIGRÈ, 2022)	51
Figura 6.12 – ACP para sinais com banda de 400 MHz a 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023)	51
Figura 6.13 – AF para sinais processados sem filtragem	52
Figura 6.14 – AF para sinais com banda de 100 MHz a 1 GHz (CIGRÈ, 2022)	53
Figura 6.15 – AF para sinais com banda de 400 MHz a 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Falhas em transformadores.....	20
Tabela 2 – Faixas de frequência em transformadores	29
Tabela 3 – Distâncias euclidianas	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
K	<i>Estatística de achatamento ou Kurtosis</i>	<i>Adimensional</i>
S	<i>Estatística de assimetria ou Skewness</i>	<i>Adimensional</i>
μ	<i>Média espectral das amplitudes</i>	<i>Adimensional</i>
σ	<i>Desvio padrão do espectro</i>	<i>Adimensional</i>
$E(f)$	<i>Campo Elétrico incidente na antena</i>	<i>V / m</i>
$U(f)$	<i>Tensão nos terminais da antena</i>	<i>V</i>
ϵ_r	<i>Permissividade dielétrica relativa</i>	<i>F / m</i>
μ_r	<i>Permeabilidade magnética relativa</i>	<i>H / m</i>
c_0	<i>Velocidade da luz no vácuo</i>	<i>m / s</i>
f	<i>Frequência</i>	<i>Hz</i>
N	<i>Número de amostras de um sinal</i>	<i>Adimensional</i>
X_n	<i>Transformada de Fourier discreta de um sinal $x[n]$</i>	<i>Adimensional</i>
$x[n]$	<i>Sinal amostrado</i>	<i>V</i>
E	<i>Energia de uma sequência discreta</i>	<i>J</i>
ω_c	<i>Banda média</i>	<i>Hz</i>
B	<i>Largura de banda eficaz</i>	<i>Hz</i>
$\mathbf{M}$	<i>Matriz Espectral</i>	<i>Adimensional</i>
$\mathbf{Cov}$	<i>Matriz covariância</i>	<i>Adimensional</i>
$\mathbf{U}$	<i>Matriz ortonormal de autovetores de Cov</i>	<i>Adimensional</i>
$\mathbf{S}$	<i>Matriz diagonal de autovalores de Cov</i>	<i>Adimensional</i>
ACP	<i>Análise de Componentes Principais</i>	<i>Adimensional</i>
TC	<i>Técnica Cromática</i>	<i>Adimensional</i>
AF	<i>Análise de Forma</i>	<i>Adimensional</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	16
1.1. Considerações Iniciais e Objetivos.....	16
1.2. Organização do Trabalho Acadêmico	18
CAPÍTULO II – FALHAS EM TRANSFORMADORES.....	19
2.1 Falhas em transformadores.....	19
2.2 Falhas nos enrolamentos.....	22
2.3 Falhas nas buchas.....	23
2.4 Falhas na isolação.....	24
2.5 Demais Falhas.....	24
CAPÍTULO III – DETECÇÃO DE FALHAS POR UHF	26
3.1. Introdução.....	26
3.2. Análise do espectro de frequências e tipos de descargas parciais.....	27
3.3. Sensibilidade dos equipamentos.....	30
3.4. Atenuação do sinal UHF	30
CAPÍTULO IV – TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS	33
4.1. Análise de Sinais no Domínio da Frequência e Técnicas de Classificação	33
CAPÍTULO V – METODOLOGIA	37
5.1. Método de Ensaio Laboratorial	37
5.2. Processamento de Sinais	39
CAPÍTULO VI – RESULTADOS	41
6.1. Sinais e espectros das falhas estudadas	41
6.2. Técnicas de Classificação de Falhas	46
6.2.1 Técnica Cromática	46

6.2.2 Análise de Componentes Principais (ACP)	49
6.2.3 Análise de Forma (AF)	52
6.2.4 Estudo Comparativo entre as Técnicas	54
CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO	57
Referências	59

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os objetivos deste trabalho bem como a motivação para o desenvolvimento desta pesquisa.

1.1. Considerações Iniciais e Objetivos

O monitoramento de falhas em transformadores por meio de sistemas de UHF (ultra alta frequência) vem crescendo. O objetivo é acoplar antenas para capturar sinais eletromagnéticos e, desta forma, localizar, classificar ou mesmo identificar falhas incipientes que acometem estes equipamentos elétricas (JANGJOO et al., 2023; LIRA et al., 2022; SIKORSKI; WIELEWSKI, 2023; TENBOHLEN et al., 2023; ARDILA-REY et al., 2023). A importância em se diagnosticar falhas em transformadores está relacionada ao alto custo deste ativo, facilitando a transmissão e a distribuição de energia do país. Vale destacar que uma falha total deste dispositivo pode ocasionar, além do prejuízo financeiro pela perda deste ativo, multas a concessionárias de energia pelo não fornecimento de energia elétrica.

Nos estágios antecedentes a uma falha total é muito comum a ocorrência de descargas parciais ou mesmo arcos elétricos, também conhecidos como descargas totais. Essas falhas se relacionam com a perda das características físico-químicas dos materiais que compõe a isolamento do transformador, e esta degradação geralmente acontece devido a operações de sobrecarga, contaminação dos materiais dielétricos por partículas, umidade, ar, por falhas no processo de fabricação, dentre outros (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; DE CASTRO et al., 2022).

Uma descarga parcial é definida como uma descarga elétrica que não preenche completamente o espaço entre dois condutores. Sendo assim, ela ocorre devido a degradação dielétrica de materiais que estão sujeitos a campos eletromagnéticos (IEC 60270, 2000; THIVIYANATHAN et al., 2023). Já as descargas totais ou arcos elétricos possuem uma maior energia pois são descargas que preenchem completamente o espaço entre dois eletrodos

condutores (ZHOU; IANNUZZI, 2019; SUWARNO; SANTOSH, 2012). Essas falhas, quando ocorrem, emitem radiação eletromagnética, ondas acústicas, calor, radiação ultravioleta e, desta forma, intensificam a degradação da isolamento do transformador. Uma das formas de se diagnosticar essas falhas é capturar as ondas eletromagnéticas emitidas por elas e, desta forma, localizar, identificar e classificar a avaria. Outras formas descritas na literatura para a avaliação dos defeitos inseridos no equipamento, faz-se através do uso de transdutores piezoelétricos para a captação das emissões acústicas (BINOTTO et al., 2020; BINOTTO et al., 2021; BARRETO, 2023), ou até mesmo, a análise de gases chave dissolvidos no óleo isolante do transformador (DUVAL, 2002).

À luz desta questão, diversos trabalhos têm dado enfoque na faixa de frequência ideal para a detecção de falhas por UHF, uma vez que um dos principais desafios científicos e tecnológicos é se projetar sistemas de aquisição de dados compatíveis com faixas de frequência de UHF. Portanto, a limitação de banda de frequência pode favorecer projetos de sistemas digitais dedicados ao diagnóstico de falhas em transformadores. Neste contexto, muito trabalhos como o de Rutgers e Fu (1997), citado por Tenbohlen et al. (2023), sugerem que a emissões notáveis na faixa UHF para diagnóstico de falhas em transformadores abrange de 300 MHz a 3 GHz. Entretanto, estudos mais recentes como a Brochura Técnica 861 do Cigrè (CIGRÈ, 2022) e um estudo conduzido por Tenbohlen et al. (2023) atestam, respectivamente, que as faixas de frequências suficientes para se diagnosticar falhas nestes equipamentos elétricos ficam entre 100 MHz e 1GHz (CIGRÈ, 2022) e entre 400 MHz e 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023).

Um dos desafios científicos da área de monitoramento de transformadores é o desenvolvimento de sistemas que permitem classificação de falhas, uma vez que cada tipo de avaria requer diferentes ações de manutenção. Neste sentido, várias técnicas de classificação de falhas dependem do conteúdo em frequência do sinal de UHF e, desta forma, surge a necessidade de se estudar como a limitação da banda pode interferir os sistemas de classificação

de falhas (TENBOHLEN et al., 2023).

Baseado nesta problemática, esta dissertação propõe o estudo de três faixas de frequência de sinais UHF, aplicadas em duas falhas em transformadores, considerando três técnicas de classificação de falhas. Foram escolhidas como faixas de frequência o sinal sem filtragem, e faixas segundo a Brochura Técnica 861 do Cigrè (100 MHz a 1 GHz) e faixa entre 400 MHz e 900 MHz indicada por Tenbohlen et al. (2023). Foram emuladas descargas totais no núcleo de um transformador bem como descargas superficiais nas buchas isolantes de um transformador. De posse dos sinais foram aplicadas as técnicas de classificação de falhas baseadas em Análise de Componentes Principais, Técnica Cromática e Análise de Forma. O intuito foi avaliar se a banda de frequência interfere na classificação, além de comparar três técnicas de classificação de falhas em transformadores.

1.2. Organização do Trabalho Acadêmico

Esta dissertação se inicia apresentando as falhas que acometem transformadores e, na sequência, discorre sobre problemáticas sobre diagnóstico de falhas por UHF. Em seguida, técnicas de processamento de sinais são apresentadas. A metodologia é apresentada no Capítulo 5 e, em seguida, no Capítulo 6, os resultados são discutidos. O trabalho é concluído no Capítulo 7.

CAPÍTULO II – FALHAS EM TRANSFORMADORES

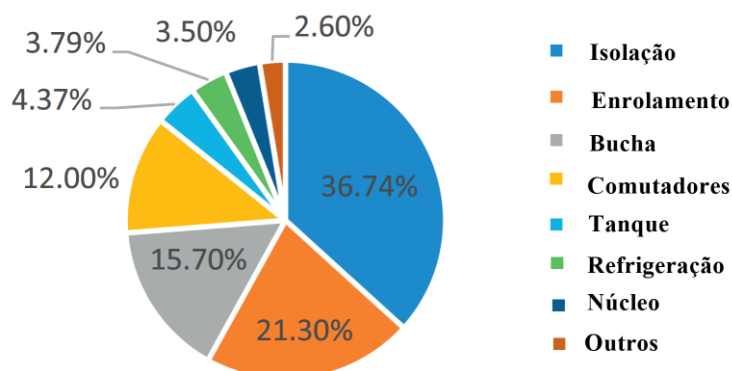
Neste capítulo apresenta-se as principais falhas acometidas em transformadores de potência, dando enfoque às falhas estudadas por esse trabalho.

2.1 Falhas em transformadores

Apesar dos transformadores de potência serem equipamentos extremamente confiáveis para operação contínua, ao longo da operação estes equipamentos se tornam suscetíveis à degradação devido ao estresse operacional. A degradação dos componentes internos do transformador pode levar a falhas irreversíveis, gerando perda de receita devido a interrupção do serviço e a necessidade de substituição de um ativo com alto custo de aquisição (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

Sendo assim, o trabalho apresentado por Murugan e Ramasamy (2019) discute as principais falhas encontradas nos componentes dos transformadores de potência, a partir de uma análise estatística. Esta análise mostra que a maioria das falhas são encontradas no sistema de isolamento (36,74%), nos enrolamentos (21,30%) e nas buchas (15,70%), representando mais de 70% de todas as falhas observadas em transformadores, conforme a Figura 2.1.

Figura 2.1 – Falhas em transformadores.



Fonte: MURUGAN; RAMASAMY, 2019.

Ao observar a natureza destas falhas, destaca-se que elas podem ter origens elétricas, mecânicas ou químicas. Por exemplo, falhas mecânicas em transformadores podem ocorrer devido a deformação dos enrolamentos, alterações no núcleo resultando em fluxo disperso não conforme, fissuras nas buchas ou no compartimento, entre outras. Já as falhas elétricas, que são o foco deste trabalho, podem ocorrer devido a curto-circuito entre espiras, descargas completas, curto-circuito entre camadas das buchas, entre outras. Os problemas de origem química estão associados à contaminação de materiais isolantes devido à presença de umidade, ar, sujeira ou substâncias oriundas de reações químicas originadas por descargas ao longo do período de uso do equipamento (SIKORSKI, 2019; MURUGAN; RAMASAMY, 2019; BARRETO, 2023). Abaixo, a Tabela 1 ilustra os principais modos de falha encontrados nos componentes do transformador.

Tabela 1 – Falhas em transformadores.

Componentes	Natureza da falha	Falha
Enrolamento	Elétrica	Curto-circuito entre espiras
		Curto-circuito entre cabos
		Curto-circuito à terra
		Descargas totais
	Térmica	Sobrecarga Térmica do transformador, falha no sistema de refrigeração, Arco elétrico, centelhamento de baixa energia, descarga parcial, pontos quentes
	Mecânica	Inclinação mecânica de condutor
		Dobra de condutor
		Movimento do enrolamento
		Instabilidade axial
Núcleo	Elétrica	Estrutura de aperto frouxa
		Deformação interna do enrolamento
		Laminações de núcleo em curto-circuito

		Aterramento de vários núcleos
		Núcleo não aterrado
	Mecânica	Deformação Mecânica do Núcleo
Bucha	Elétrica	Curto-circuito entre as camadas
	Térmica	Sobrecarga da rede, centelhamento de baixa energia, descarga parcial, superaquecimento local do isolante da bucha, pontos quentes.
	Mecânica	Danos mecânicos à porcelana devido a descarga elétrica, raios, força externa de curto-circuito e rachaduras na parte externa do revestimento da bucha.
Comutador	Elétrica	Contatos de circuito aberto elétricos do comutador
	Térmica	Coqueamento térmico de contatos
	Mecânica	Falhas do mecanismo de acionamento mecânico
Isolação	Química	Água em óleo
		Água em Papel
		Alta temperatura de óleo e papel
		Envelhecimento do óleo e do papel devido à decomposição térmica do isolamento do óleo e do papel e contaminação por umidade.
Refrigeração	Elétrica/Mecânica	Bomba Elétrica/Mecânica do Sistema de Arrefecimento
		Ventilador
		Radiador
Tanque		Vazamento
Outros	Outras	Erros operacionais
		Falta de manutenção
		Falha do sistema de proteção

Fonte: MURUGAN; RAMASAMY, 2019.

Portanto, nas seções a seguir serão discutidas as principais falhas em transformadores que serão os objetos de estudo deste trabalho, além de uma seção que irá tratar, de forma resumida, as demais falhas que podem acometer o equipamento.

2.2 Falhas nos enrolamentos

Os enrolamentos são formados por condutores revestidos de papel isolante, dispostos ao redor de um núcleo ferromagnético. Logo, é essencial que os enrolamentos e condutores sejam corretamente isolados, sustentados e resfriados para suportar as demandas operacionais do equipamento (MURUGAN; RAMASAMY, 2019). De acordo com o estudo de Murugan e Ramasamy (2019), os problemas nos enrolamentos representaram a segunda principal causa de falhas em transformadores, representando 21% do total apresentado. Uma das principais razões de falhas nos enrolamentos identificadas na pesquisa foi, principalmente, o curto-circuito entre espiras, que ocorre entre dois pontos com a isolação degradada. Estes curtos-circuitos são descargas entre dois pontos, preenchendo o espaço entre os condutores. Quando essas falhas ocorrem, constata-se a emissão de radiação UV, calor, ondas acústicas, pulsos de corrente e ondas eletromagnéticas (IEC 60270, 2000, TEOPALD et al., 2023). Conforme Murugan e Ramasamy (2019) e Barreto (2023), este tipo de falha pode ocorrer devido a operação do transformador em sobrecarga, degradando a isolação dielétrica das espiras por meio da intensificação do calor nos materiais isolantes. Na Figura 2.2, ilustram-se descargas totais entre espiras.

Além do curto-circuito entre espiras, é importante citar que outros fatores, como curtos-circuitos externos, sobrecarga e curto-circuito com a terra, podem levar à deterioração do isolamento. Por fim, outros modos de falhas podem ocorrer, como desalinhamento ou dobra dos condutores, deformação, deslocamento/deformação dos enrolamentos, causados por transporte inadequado ou operação sob elevadas cargas (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; BARRETO, 2023).

Figura 2.2 – Descargas e curtos-circuitos entre espiras devido à falha de isolamento.



Fonte: Adaptado de Murugan; Ramasamy, 2019, Sikorski, 2019 e Barreto, 2023.

2.3 Falhas nas buchas

A bucha é um componente isolante responsável por guiar um condutor energizado, permitindo que a corrente passe pelo tanque aterrado do transformador. As buchas se dividem em dois tipos principais: sólidas, que são empregadas em tensões de até 25 kV, e de capacitância variável, para tensões superiores a 25 kV. Nas buchas sólidas, o óleo mineral age como isolante entre o condutor e o isolador. Para buchas de capacitância variável, utiliza-se papel impregnado com óleo (OIP), papel saturado com resina (RIP) e papel aderido com resina (RBP) como isolantes padrão (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; BARRETO, 2023).

As falhas em buchas, de acordo com o estudo de Murugan e Ramasamy (2019), são as terceiras em quantidade de ocorrências analisadas. Sua falha mais comumente apresentada é a descarga superficial. Este tipo de falha ocorre quando há alterações na capacitância das camadas da bucha devido à distribuição desigual do campo elétrico. Também, a sujeira causada pela poluição e dejetos de animais fazem com que as propriedades de isolamento superficial se distanciem das propriedades de fábrica, resultando em descargas (BINOTTO et al., 2021), como observado na Figura 2.3.

2.4 Falhas na isolação

Como visto em Murugan e Ramasamy (2019), a isolação dos transformadores é composta por materiais sólidos, como papel e óleo. O isolamento principal abrange espaçadores, barreiras e grampos, enquanto o secundário envolve o isolamento das bobinas. O papel é responsável pelo isolamento mecânico e dielétrico, enquanto o óleo garante resfriamento, resistência dielétrica e protege contra a oxidação. O elemento mais impactado é o isolamento óleo-papel (36,74%). As principais falhas neste isolamento originaram-se com o acúmulo de água, seja durante a fabricação, manutenção ou devido à oxidação, ou também, com a degradação térmica, causada por circulação inadequada de óleo ou superaquecimento. Por fim, o envelhecimento do isolamento, resultante de falhas internas e externas, sobrecargas ou operação em ambientes adversos (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

Figura 2.3 – Falha em isolador.



Fonte: Ardila-Rey et al., 2020.

2.5 Demais Falhas

O trabalho de Murugan e Ramasamy (2019) aborda também outras falhas em Transformadores de Potência como, por exemplo, falhas em comutadores de derivação, cujo componente é responsável pela regulação de tensão, atuando em carga (OLTC) ou desenergizado (DETC), e que pode apresentar falhas nos contatos abertos devido a deterioração

ou pontos quentes. Outra falha descrita é aquela que acomete o tanque do equipamento, representando 4,37% do total. O tanque serve como recipiente para o óleo e estrutura de suporte, e possui como falhas frequentes as rupturas internas e vazamentos devido à corrosão ou degradação das vedações.

Além disso, pode-se citar as falhas no Sistema de Resfriamento, representando 3,79% do total, o que inclui problemas na bomba, ventilador de resfriamento e radiador. E, por fim, as falhas no núcleo do equipamento, responsável pelo fluxo magnético, sendo 3,50% do total, e suas cujas falhas podem ser originadas por laminações em curto-circuito, múltiplos aterramentos, núcleo não aterrado e deformações (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

Portanto, baseado nos problemas expostos acima, este trabalho busca analisar o diagnóstico de descargas internas ao transformador, caracterizado pelo curto-circuito entre espiras, descargas nas buchas do equipamento por meio de técnicas de diagnóstico por UHF, e técnicas de processamento de sinais, que serão detalhadas no capítulo a seguir.

CAPÍTULO III – DETECÇÃO DE FALHAS POR UHF

Neste capítulo apresenta-se os princípios de diagnóstico de falhas em transformadores por meio de técnicas de UHF (Ultra-high Frequency).

3.1. Introdução

A avaliação da qualidade do sistema de isolamento dos transformadores de potência pode ser realizada através da medição de descargas parciais (DP) em ultra alta frequência (UHF), sendo fundamental que os sistemas estejam adaptados para capturar os sinais esperados. O estudo de Tenbohlen et al. (2023) mostra que, apesar de estudos anteriores terem identificado emissões significativas na faixa UHF que abrange 300 MHz a 3 GHz para DPs em óleo (RUTGERS; FU, 1997), ainda se trata de uma temática sem consenso quando se diz respeito às frequências exatas que deveriam ser analisadas, uma vez que, ao compilar e comparar estudos realizados ao redor do globo, foi demonstrado que as faixas de frequência onde se detecta emissões de UHF são diversas (KUPPUSWAMY; DEVAUX; LELAIDIER, 2003; LI et al., 2004; TENBOHLEN et al., 2008; SIEGEL et al., 2019).

Conforme exposto no trabalho de Tenbohlen et al. (2023), para dispositivos como equipamentos de comutação isolados a gás (GIS), o método de detecção de descargas parciais em ondas UHF já é um padrão nos testes de validação devido à sua eficácia e capacidade de localizar e categorizar tais falhas. Porém, diferentemente dos equipamentos GIS, os transformadores têm descargas parciais ocorrendo em um sistema isolado com óleo-papel, ao invés de gases isolantes como o hexafluoreto de enxofre (SF₆). A configuração dos transformadores, incluindo o núcleo, enrolamentos e o tanque de óleo, também é mais complexa do que a de um GIS. Isso, em algumas ocasiões, gerou equívocos, sugerindo que as DPs em óleo não são detectáveis usando métodos UHF (TENBOHLEN et al., 2023).

Portanto, diante do exposto, as seções a seguir têm como objetivo a revisão da bibliografia existente que descreve as faixas de frequências adequadas para a medição de UHF oriundo de descargas parciais.

3.2. Análise do espectro de frequências e tipos de descargas parciais

Medir DPs em transformadores de potência pode ser uma tarefa complexa. Segundo a IEC 60270, a técnica de medição elétrica indicada para medição de DP apresenta-se vulnerável a interrupções de fontes externas. Logo, se o objetivo é desenvolver um sistema para monitoramento *online* e contínuo destes equipamentos, este tipo de medição pode ser inadequado, devido à sensibilidade requerida (CIGRÈ, 2023; TENBOHLEN et al., 2023). Para que se tenha um sistema que funcione adequadamente, de acordo com Tenbohlen et al. (2023), é necessário lidar com desafios como ruídos e interferências. Contudo, o uso de sensores UHF para monitoramento de DP supera muitas dessas limitações, pois oferece vantagens como resistência a ruídos e capacidade de identificar a fonte de DP tridimensionalmente.

O monitoramento UHF de DPs baseia-se na ideia de que os pulsos de DP são rápidos e passam pelo enrolamento do transformador, resultando em emissão de radiação eletromagnética na faixa UHF. Esta radiação eletromagnética propagada no interior do tanque do transformador pode ser detectada por sensores e antenas UHF acoplados no equipamento. Diversos fatores influenciam as medições de DPs nos transformadores, incluindo a natureza e localização da fonte de DP, a degradação do sinal, a precisão do sistema de captura e processamento do sinal, entre outros (KUPPUSWAMY; DEVAUX; LELAIDIER, 2003).

Portanto, a complexidade para obtenção de análises precisas dos pulsos de DP, tanto em medições elétricas quanto em UHF, evidencia a necessidade da revisão das faixas de frequência descritas na literatura. Tenbohlen et al. (2023), em seu estudo, compilou diversos artigos onde as emissões UHF de DPs são analisadas, comparando a antena utilizada para detecção, o

equipamento utilizado no teste e as faixas de frequência detectadas. O resultado pode ser visto na tabela 2.

Tabela 2 – Faixas de frequência de falhas em transformadores (TENBOHLEN et al., 2023)

Ref.	Tipo de DP	Frequência de pulso da DP (MHz)	Frequência de pico (MHz)	Objeto de teste	Tipo da Antena	Largura de banda da Antena (MHz)
Rutgers; Fu (1997)	Eletrodo flutuante	100-1200	700	Tanque de metal	N/A	300-1200
Kuppuswamy; Devaux; Lelaidier (2002)	Agulha em óleo Descarga superficial Descarga rastejante Descarga entre espiras	230-1380 380-1170 200-1300 1040-1300	211 643 200 1059	Tanque de metal	N/A	200-1500
Li et al. (2004)	Agulha em óleo Descarga superficial DP em cunha de óleo Descarga em vazio Partícula metálica flutuante	250-1100 450-930 320-1050 250-680 260-850	490 465 575 425 290	Tanque de metal	Antena espiral arquimediana	500-1500
Jongen et al. (2005)	Agulha em óleo Descarga superficial Partícula metálica flutuante	5-960 150-1440 0-1000	35 378 370	Câmara de teste dielétrica	N/A	N/A
Ishikura et al. (2008)	Agulha em óleo Descarga em vazio	25-200 5-150	35 88	Câmara de teste dielétrica	Antena bi-cônica/log-periódica	30-2000
Hikita; Ohtsuka; Matsumoto (2007)	DP em cunha de óleo	20-480	396/408 ⁽¹⁾	Tanque de metal	N/A	N/A
Tenbohlen et al. (2008)	Agulha em óleo Descarga superficial	370-2540 275-1700	450 450/700	Tanque de metal ⁽²⁾	Antena em formato de cone	N/A
Jiang et al. (2011)	Agulha em óleo Descarga superficial Partícula metálica flutuante Descarga em vazio	260-775 260-760 260-765 260-400	349 518 525 302	Tanque de metal	Antena fractal Peano de múltiplas bandas	480-520 800-850 1100-1150
Li et al (2012)	Agulha em óleo Descarga superficial Partícula metálica flutuante Descarga em vazio	270-955 265-810 270-725 255-530	368 332 341 286	Câmara de teste dielétrica	Antena fractal Hilbert multi-ressonante	300-1000
Li; Guo; Peng (2014)	Descarga superficial Descarga em vazio	300-950 310-940	370 425	Câmara de teste dielétrica	Antena meandro	300-1000
Sinaga; Phung; Blackburn (2014)	Partícula metálica flutuante Descarga em vazio	400-735 270-620	370 425	Tanque de metal	Antena espiral logarítmica de duplo braço	100-2000
Ye et al (2014)	Descarga superficial Partícula metálica flutuante	125-700 190-580	210 500	Câmara de teste dielétrica	Antena de laço meandro de múltiplas bandas	480-520 800-850 1100-1150
Koziol et al. (2019)	Descarga superficial	260-580	311 ⁽³⁾	Tanque de metal	Antena em formato de disco	150-1000
Chai; Phung; Zhang (2018)	Agulha em óleo	20-1680	1140	Câmara de teste dielétrica	Antena monopolo elíptica planar alimentada por microtira de banda larga	1200-3000
Li et al. (2013)	Descarga superficial Descarga em vazio	265-980 265-1000	900 605	Câmara de teste dielétrica	Arranjo de antenas Hilbert empilhadas multi-banda	339-375 395-440 450-1000
Babnik et al. (2003)	DP em óleo Partícula metálica flutuante	20-300 25-620	50 ⁽⁴⁾ 172	Câmara de teste dielétrica	Antena helicoidal de banda larga	N/A

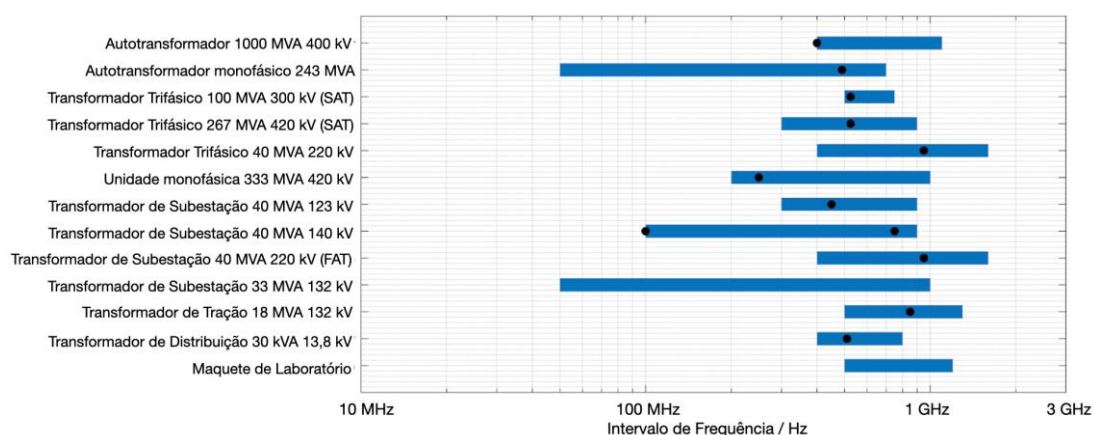
⁽¹⁾ depende da posição da antena; ⁽³⁾ sem cobertura metálica; ⁽⁴⁾ depende do valor de tensão (311 MHz a 22 kV, 442 MHz a 26 kV e 445 MHz a 30 kV); ⁽⁵⁾ primeira frequência de pico (os próximos picos correspondem às frequências de 65 MHz, 112 MHz, e 127 MHz).

Além das frequências discutidas acima, Tenbohlen et al. (2023) mostra que discussões técnicas do Cigré, que resultaram na Brochura Técnica 861 (CIGRÉ, 2022), demonstram que é comum a detecção de sinais UHF em faixas de frequência a partir 100 MHz até aproximadamente 1 GHz. Entretanto, a presença de uma maior largura de banda pode ser vantajosa em casos particulares onde há a presença de sinais acima de 1 GHz.

Por fim, o trabalho de Tenbohlen et al. (2023) também analisou 13 tipos de transformadores em ensaios espalhados por diversas partes do mundo. Constatou-se no estudo que a faixa de frequência de 400 MHz a 900 MHz é suficiente para cobrir a identificação das falhas em, no mínimo, 13 topologias de transformadores conforme Figura 3.1.

Neste contexto, a seleção de uma menor faixa de frequência que cobriu uma vasta área de topologias de transformadores se torna uma significativa contribuição para projetos de sistemas de aquisição de dados mais baratos. Todavia, sabe-se que muitos sistemas e algoritmos de classificação de falhas em transformadores se valem do uso do conteúdo em frequência para a execução da classificação dessas características. Assim, surge a necessidade de averiguação de técnicas de classificação de falhas para as faixas de frequências que a literatura técnico-científica apresenta.

Figura 3.1 – Faixas de frequência emitidas por diversas topologias de transformadores.



Fonte: Adaptado de Tenbohlen et al., 2023.

3.3. Sensibilidade dos equipamentos

Além da escolha correta da faixa de frequência a ser analisada, é de fundamental importância a análise da sensibilidade dos equipamentos envolvidos na medição. De acordo com Tenbohlen et al. (2023), os sensores UHF para detecção de DPs em transformadores são categorizados em sensores inseridos via válvula de drenagem e sensores tipo janela. O primeiro é colocado no óleo do transformador através de válvulas, enquanto o segundo é montado em uma janela dielétrica na parede do tanque, permanecendo fora do óleo. A profundidade de inserção pode ser ajustada para o primeiro tipo, mas é estática para o segundo. Também, existem diversas antenas utilizadas nestes sensores, sendo mais comuns o monopolo, a espiral arquimediana e a fractal de Hilbert.

Na prática, antenas do tipo monopolo são predominantemente adotadas, pois atuam como um ressonador para ondas UHF, com seu tamanho definido pela frequência desejada (TENBOHLEN et al., 2023). Estes sensores possuem diversas características, como o ganho ou a abertura da antena. Já para as antenas que não possuem uma área física definida, como monopolos ou dipolos, a altura efetiva H_e ou o fator de antena (AF) podem ser utilizados. O AF é determinado, no estudo, em relação à frequência do sinal f :

$$AF(f) = \frac{E(f)}{U(f)}, \quad (1)$$

com $U(f)$ sendo a tensão nos terminais da antena (com carga de 50Ω), e $E(f)$ é a intensidade do campo elétrico incidente na antena (com o vetor de campo elétrico alinhado à direção do sensor).

3.4. Atenuação do sinal UHF

Tenbohlen et al. (2023) também mostram que, para além da emissão inerente da descarga parcial, o espectro UHF observável da falha em um transformador é influenciado pelas

diversas funções de transferência que fazem parte do trajeto desde a origem até o equipamento de medição. Como descrito no trabalho de Tenbohlen et al. (2008), e citado por Tenbohlen et al. (2023), os atributos do sensor e do cabo, em conjunto com os materiais e objetos ao redor, com suas respectivas características de transmissão, dispersão e reflexão, impactam significativamente no sinal de DP UHF capturado. Além disso, o tanque de óleo de um transformador, sem componentes ativos, pode ser visto como um compartimento ressonante de formato retangular. As ondas UHF que ali circulam são refletidas inúmeras vezes, dando origem a ondas estacionárias, tanto magnéticas transversais (TM) quanto elétricas transversais (TE), entre as superfícies condutivas, resultando no surgimento da ressonância. As frequências de ressonância para os modos TM e TE nesse tipo de compartimento são estabelecidas como:

$$f_{r(mnp)} = \frac{c_0}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{c}\right)^2}, \quad (2)$$

onde f_r é a frequência de ressonância de um compartimento retangular de dimensões $a \times b \times c$, c_0 é a velocidade da luz no vácuo, μ_r e ϵ_r são, respectivamente, a permeabilidade relativa e a permissividade relativa do meio de preenchimento da cavidade. Já as variáveis m , n e p , seu valor varia conforme a transversal estudada. No caso da transversal elétrica (TE_{mnp}), $m \wedge n \in \{0, 1, 2, \dots\}$, $p \in \{1, 2, 3, \dots\}$, e pelo menos dois modos devem ser diferentes de zero. E no caso das transversais magnéticas (TM_{mnp}), $m \wedge n \in \{1, 2, 3, \dots\}$ e $p \in \{0, 1, 2, \dots\}$. No caso de transformadores reais, este tipo de análise possui menos relevância, devido à quantidade de estruturas internas (TENBOHLEN et al., 2008; TENBOHLEN et al., 2023).

Em um estudo prático, Beura et al. (2022) avaliaram a redução do sinal em função da distância entre emissor e receptor para dois transformadores de 300 MVA, nomeados Tr A e Tr B. Para isso, antenas do tipo monopolo foram posicionadas nas paredes dos dois equipamentos, e empregadas para transmissão e captação de sinais UHF de DP artificiais. O estudo segmentou

o comportamento do sinal em três modalidades de transmissão, sendo elas direta, indireta e lateral:

- Se o emissor e receptor estivessem no mesmo lado do tanque do transformador, a transmissão era rotulada como direta, pois estavam suscetíveis a poucos obstáculos;
- Quando emissor e receptor estavam em lados contrários, a transmissão era classificada como indireta, já que as ondas precisavam contornar a parte ativa do equipamento;
- Por fim, a categoria lateral aplicava-se quando emissor e receptor estavam dispostos nas faces laterais do equipamento.

Os dados coletados através das medições de ambos os equipamentos (Tr A e Tr B) foram agrupados com base no tipo de caminho da propagação do sinal. Ambos os transformadores apresentaram conclusões similares, revelando que a atenuação do sinal é mais acentuada em distâncias semelhantes de linha de visada durante propagação indireta, evidenciando o impacto da parte ativa na diminuição do sinal (BEURA et al., 2022).

CAPÍTULO IV – TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

Neste capítulo apresenta-se técnicas de processamento digital de sinais que foram utilizadas no presente trabalho.

4.1. Análise de Sinais no Domínio da Frequência e Técnicas de Classificação

O espectro de frequências X_n de um sinal amostrado $x[n]$, dado pela Transformada Discreta de Fourier é dado por (OPPENHEIN; VERGHESE, 2017):

$$X_n = \sum_{k=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad (3)$$

$$f_n = \frac{2\pi k}{N}, k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

em que N é o número de amostras de $x[n]$ e X_n é o vetor da transformada discreta de Fourier com conteúdo em frequência f_n .

Muitas técnicas de classificação de dados utilizam as sequências X_n e f_n como meios para construção de mapas bidimensionais para a caracterização de falhas. Embora eficazes, surge a necessidade de se analisar como a banda de frequência pode limitar ou não a eficácia do sistema de classificação de falhas, uma vez que a restrição de faixas de frequência pode fazer com que o espectro perca informações e capacidade de diferenciação.

Por exemplo, a Técnica Cromática que foi proposta por Zhang et al. (2005) tem como coordenadas tridimensionais parâmetros estatísticos como a energia, banda média e largura de banda eficaz dos sinais, sendo utilizada para diagnóstico de falhas em transformadores por meio do sensoreamento de corrente e acústico (JONES et al. 2000; ZHANG et al., 2005; WANG et al., 2017; ARDILA-REY et al. 2018; BARRETO, 2023).

Assim, os parâmetros de energia (E), banda média (ω_c) e largura de banda eficaz (B) são definidos por (ARDILA-REY et al. 2018; CASTRO et al., 2023; BARRETO, 2023):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |X_n|^2, \quad (5)$$

$$\omega_c = \frac{\sum_{n=0}^{N-1} f_n |X_n|^2}{NE}, \quad (6)$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{NE} \sum_{n=0}^{N-1} (f_n)^2 |X_n|^2}, \quad (7)$$

Uma outra técnica se vale da análise da forma espectral do sinal. Neste contexto, as estatísticas de *Skewness* (S), também conhecida como estatística de assimetria, e *Kurtosis* (K), também conhecido como estatística de achatamento, formam pontos cartesianos que são utilizados para a obtenção de mapas de agrupamento que buscam estabelecer diferenças entre um conjunto de dados. Os parâmetros são definidos por:

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\left(\frac{X_n - \mu}{\sigma} \right)^3 \right], \quad (8)$$

$$K = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\left(\frac{X_n - \mu}{\sigma} \right)^4 \right], \quad (9)$$

Em que μ é a média espectral das amplitudes e σ o desvio padrão do espectro.

S mede a assimetria de uma distribuição. Quando a estatística é 0, significa que a distribuição é normal e simétrica. Quando S tem valores negativos, o espectro de frequências tem distribuição à esquerda, mostrando mais dados à esquerda da distribuição de probabilidade. Já quando o valor de S é positivo, indica que o espectro tem tendência a maiores frequências, isto é, está mais à direita da distribuição de probabilidade. Já o *Kurtosis* mede o grau de achatamento de uma sequência. Valores positivos indicam distribuição pontiaguda e valores

negativos distribuição mais achatada. A distribuição normal é caracterizada por K tendendo a zero (SHARMA; OJHA, 2020).

Devido às características destas estatísticas, é possível mensurar o formato do espectro de frequências. Desta maneira, aplicou-se essas estatísticas para avaliar a forma do espectro de sinais UHF para avaliar as diferenças entre as falhas estudadas.

Já a técnica da Análise de Componentes Principais, conforme explicado por Fávero e Belfiore (2017), é uma técnica exploratória dentro da análise fatorial, valiosa quando se trabalha com variáveis altamente correlacionadas. Essa abordagem busca criar variáveis, chamadas fatores, que representam o comportamento conjunto das variáveis originais. O método de componentes principais busca extrair fatores não correlacionados através de combinações lineares das variáveis originais, permitindo a criação de um novo conjunto de variáveis (fatores) a partir do conjunto inicialmente correlacionado. A análise por componentes principais possui quatro objetivos principais (FÁVERO; BELFIORE, 2017):

- identificar correlações entre variáveis originais para reduzir a dimensionalidade dos dados (redução estrutural);
- validar constructos predefinidos;
- criar rankings usando os fatores;
- extrair fatores ortogonais para técnicas multivariadas que exigem ausência de multicolinearidade.

Apesar do poder desta técnica para identificação de correlações, é fundamental notar que se trata de uma abordagem exploratória e não preditiva para novas observações, sendo necessário reanalisar os fatores ao incluir novos dados (FÁVERO; BELFIORE, 2017).

A Análise de Componentes Principais como ferramenta de classificação, proposta por Castro et al. (2023), pode ser utilizada para identificação de falhas em transformadores por meio de sinais acústicos. A técnica, que ainda não foi validada para sinais UHF, se baseia na extração das duas primeiras componentes principais de uma matriz formada por um conjunto de dados

de espectros. Assim, considerando uma matriz espectral $\mathbf{M}$, generalizada por $\mathbf{M}_i = (\mathbf{M}_{i1}, \mathbf{M}_{i2}, \mathbf{M}_{i3}, \dots, \mathbf{M}_{ip})$, a extração das componentes principais se dá pelo cálculo da matriz covariância de $\mathbf{M}_i$ e, posteriormente, a decomposição da matriz covariância em valores singulares por meio do cálculo dos autovalores da matriz covariância (BARRETO, 2023; CASTRO et al., 2023; GRANATO et al., 2018; WANG et al., 2018).

Define-se a matriz covariância $\mathbf{Cov}$ como:

$$\mathbf{Cov} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\mathbf{M}_i - \bar{\mathbf{M}})(\mathbf{M}_i - \bar{\mathbf{M}})^T, \quad (10)$$

em que, $\bar{\mathbf{M}}$ é a média dos dados matriciais e T representa operação de transposição.

Após esse cálculo tem-se a extração dos autovalores de $\mathbf{Cov}$ por meio da decomposição em valores singulares dada por:

$$\mathbf{Cov} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{U}^T, \quad (11)$$

em que $\mathbf{U}$ é matriz ortonormal que possui os autovetores de $\mathbf{Cov}$, e, $\mathbf{S}$ é uma matriz diagonal de autovalores de $\mathbf{Cov}$. As três primeiras colunas da matriz $\mathbf{U}$ retém 90 % das informações originais de $\mathbf{M}_i$ segundo Wang et al. (2018). Neste contexto, mapas bidimensionais foram formados com a primeira e segunda componente principal com a finalidade de se analisar a eficácia desta técnica na classificação de falhas em transformadores com sinais UHF.

CAPÍTULO V – METODOLOGIA

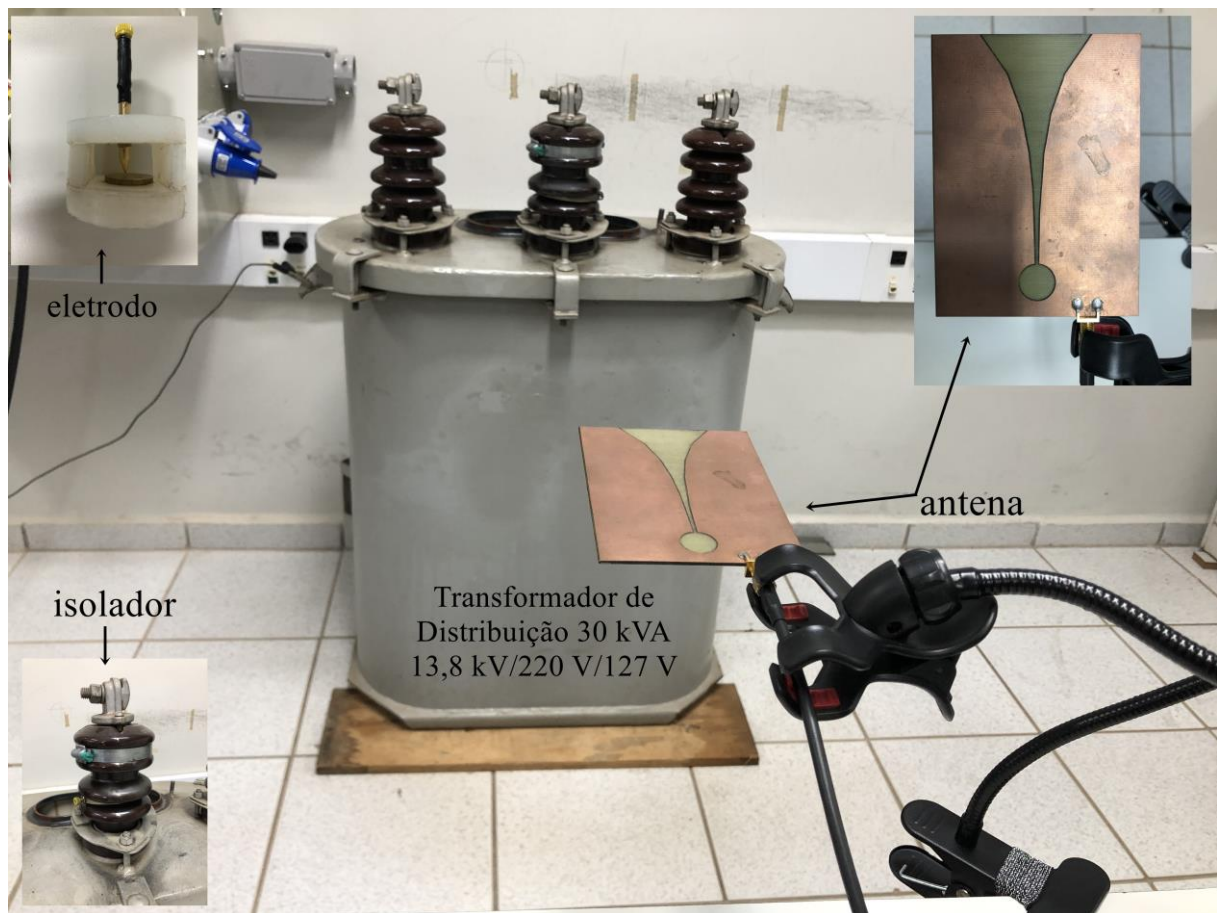
Neste capítulo apresenta-se a metodologia realizada para o estudo das técnicas de caracterização de falhas em transformadores por meio de sinais UHF.

5.1. Método de Ensaio Laboratorial

Com um transformador de distribuição isolado a óleo de 30 kVA com tensões nominais de 13,8 kV de primário e 127 V/220 V de secundário foram geradas 100 descargas parciais superficiais em um de seus isoladores e mais 100 descargas totais em seu óleo mineral. Para a geração da primeira falha, foi depositado pó de grafite sobre o isolador com intuito de emular uma contaminação superficial em suas buchas. Já para a formação das descargas totais no óleo mineral do transformador, um eletrodo a base de cobre e com um vão de 2 mm foi mergulhado no tanque do transformador. As buchas foram alimentadas com a tensão nominal do transformador (13,8 kV) e o eletrodo com uma tensão de 3 kV. Uma antena de Vivaldi foi posicionada a 1 metro do transformador de distribuição e seus sinais foram adquiridos utilizando um conversor analógico digital dedicado para sistema de aquisição de dados modelo M4i.2233-x8 da SPECTRUM Instrumentation ®. Na Figura 5.1 ilustra-se a parte experimental do teste. A taxa de aquisição foi ajustada para 4 GHz obedecendo o teorema de *Nyquist*, uma vez o espectro de frequência das falhas de transformadores não ultrapassa 1,8 GHz, tendo seus valores de pico inferiores a 1 GHz de acordo com Tenbohlen et al. (2023). O parâmetro de reflexão S_{11} da antena de Vivaldi utilizada é ilustrada na Figura 5.2. Verifica-se que a antena possui picos de ressonância em 1,6 GHz e em 2,4 GHz. Em 250 MHz o valor do coeficiente é -3 dB, o que indica que a antena pode ser sensível a sinais acima desse valor de frequência.

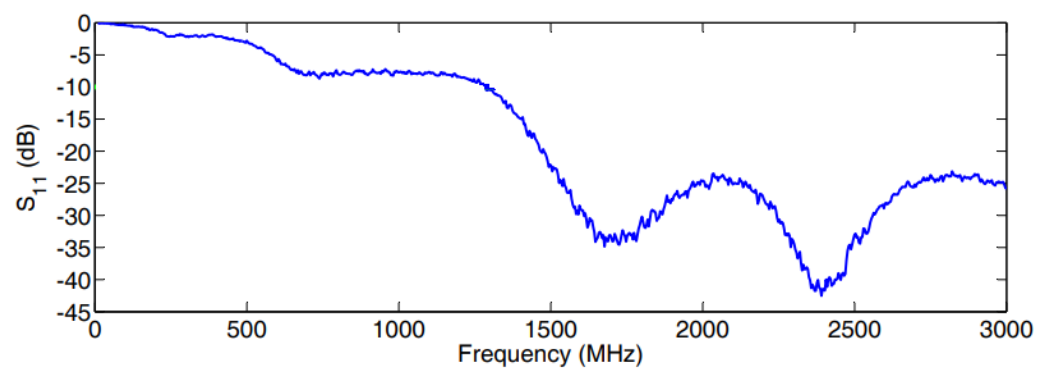
Neste contexto foram realizadas 150 medições de descargas nos isoladores, 150 de descargas internas como também 150 medições de ruído de fundo. O intuito foi verificar como o ruído pode interferir na classificação das falhas estudadas.

Figura 5.1 – Detalhes do ensaio experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.2 – Parâmetro de reflexão (S_{11}) da antena de Vivaldi utilizada.



Fonte: Albarracín et al. (2015).

5.2. Processamento de Sinais

Como o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência de três faixas de frequência na classificação de descargas no isolador e descargas totais, os sinais foram processados digitalmente com filtros passa-faixa com a utilização do software *Matlab*®. Desta forma, para todos os ensaios realizados, os sinais foram processados de três formas: sem filtragem, com filtro passa banda digital de 100 MHz a 1 GHz (de acordo com a brochura técnica 861 do Cigrè (CIGRÈ, 2022)) e com filtro de 400 MHz a 900 MHz (de acordo com Tenbohlen et al. (2023)). Para cada sinal, extraiu-se a transformada de Fourier, formando, então, uma matriz de espectros das três condições estudadas: transformador com descarga interna, transformador com descarga no isolador, transformador sem falha, mas com a antena fazendo a leitura de ruído de fundo. De posse dessa matriz, aplicou-se a Técnica Cromática. Cada espectro foi sumarizado em um sistema de coordenadas bidimensionais formado pelas estatísticas de banda equivalente e banda média. Após, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (ACP) em toda matriz de espectro extraíndo-se as duas primeiras componentes principais como sistema de coordenadas. Por fim, para cada linha de espectro da matriz, extraiu-se as estatísticas *Kurtosis* e *Skewness*, que também formaram um sistema de coordenadas. Na Figura 5.3 ilustra-se os passos aplicados.

Figura 5.3 – Resumo da metodologia de processamento de sinais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O intuito da elaboração dos sistemas de coordenadas foi formar mapas bidimensionais para se avaliar a capacidade de classificação de cada metodologia de processamento de sinais considerando as três faixas de frequência estudadas.

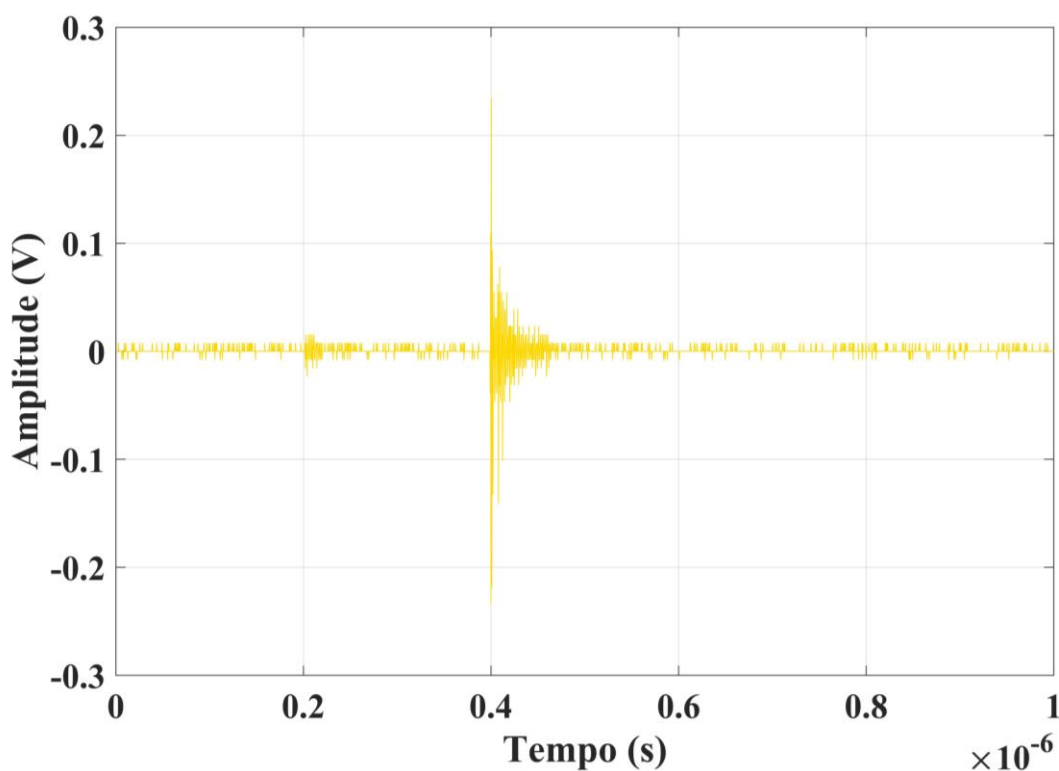
CAPÍTULO VI – RESULTADOS

Primeiramente, discute-se a análise em frequência de cada fenômeno, considerando as três bandas de frequência. Em seguida, apresenta-se as três técnicas de separação de dados, estabelecendo um estudo comparativo entre elas.

6.1. Sinais e espectros das falhas estudadas

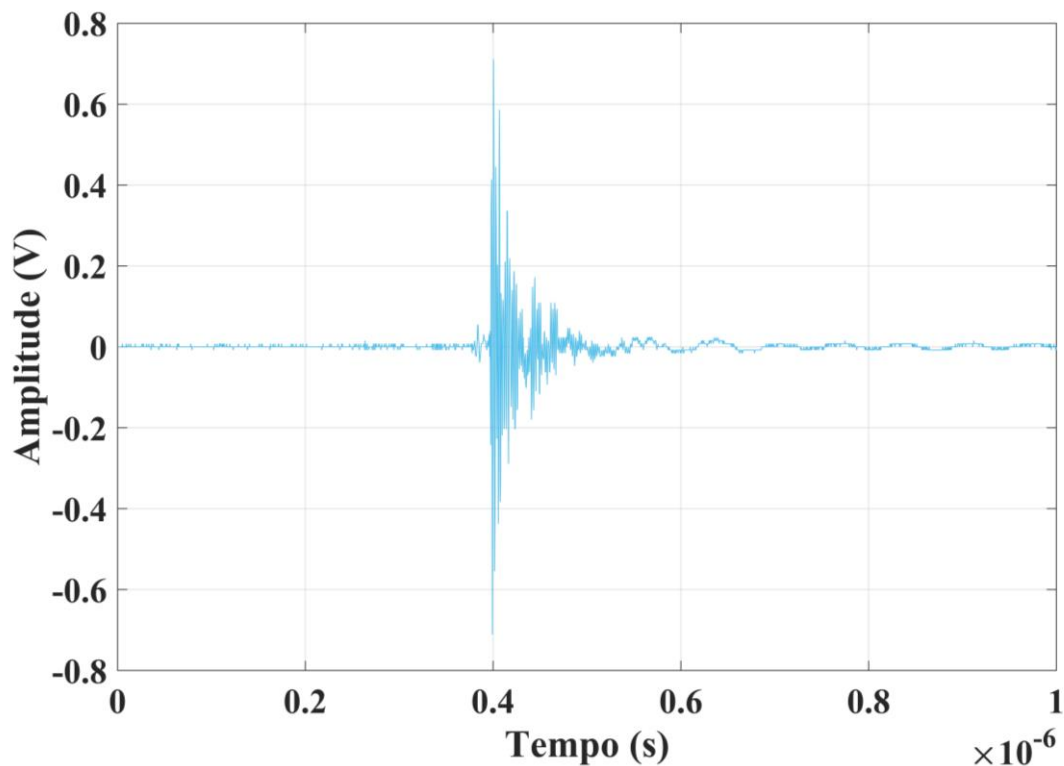
Nas Figuras 6.1 e 6.2 são apresentados os sinais no domínio do tempo da falha no isolador e na falha interna.

Figura 6.1 – Sinal UHF de descarga parcial em isolador.



Fonte: Elaborado pelo autor.

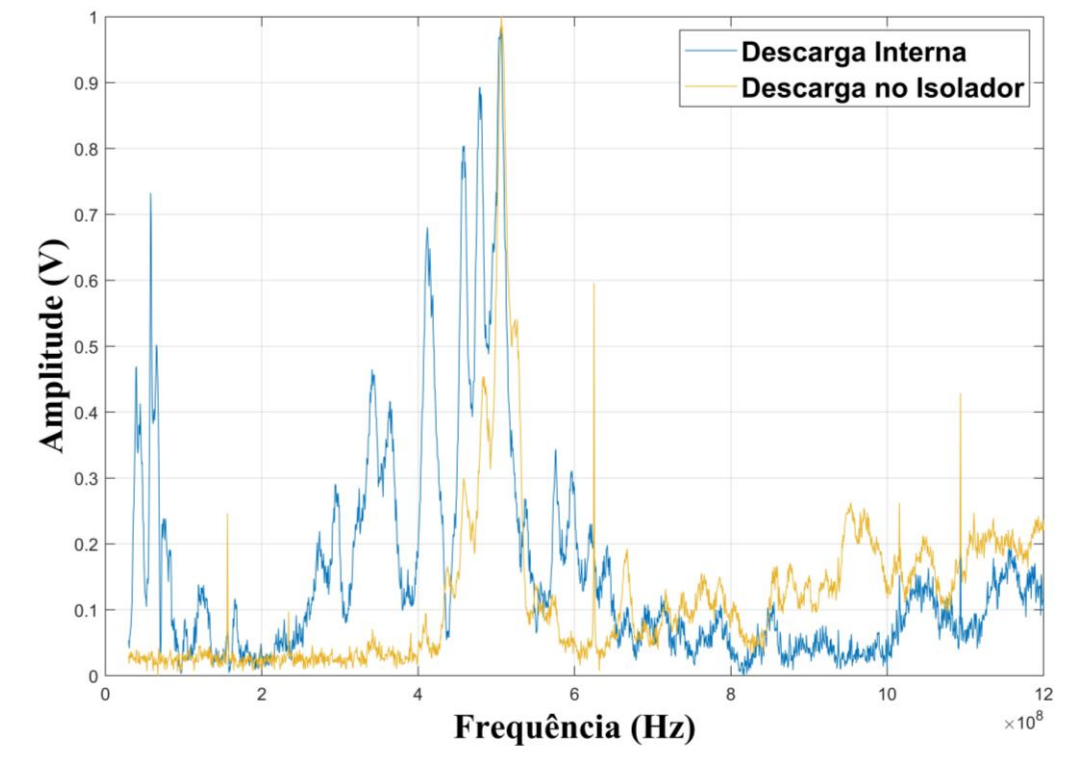
Figura 6.2 – Sinal UHF de descarga interna.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio da análise dos sinais no domínio do tempo verifica-se que ambas as falhas possuem caráter impulsivo e com decaimento que perdura cerca de 0,2 us. O valor de pico para a descarga no isolador foi de 0,23 V e, para a descarga interna, 0,7 V. Para uma melhor análise, o conteúdo espectral das duas falhas é apresentado na Figura 6.3. Tomou-se a média espectral do conjunto de 100 sinais de cada falha e normalizou-se os dois resultados. Observa-se que, tanto a falha no isolador quanto a falha interna obtiveram picos na frequência de 500 MHz. Entretanto, para a descarga interna o espectro de frequência possui significância entre 300 MHz e 600 MHz, além de apresentar amplitudes de 0 a 100 MHz. Já para a falha no isolador, os picos são concentrados entre 420 MHz e 600 MHz. Verificou-se picos em 620 MHz e 1,1 GHz.

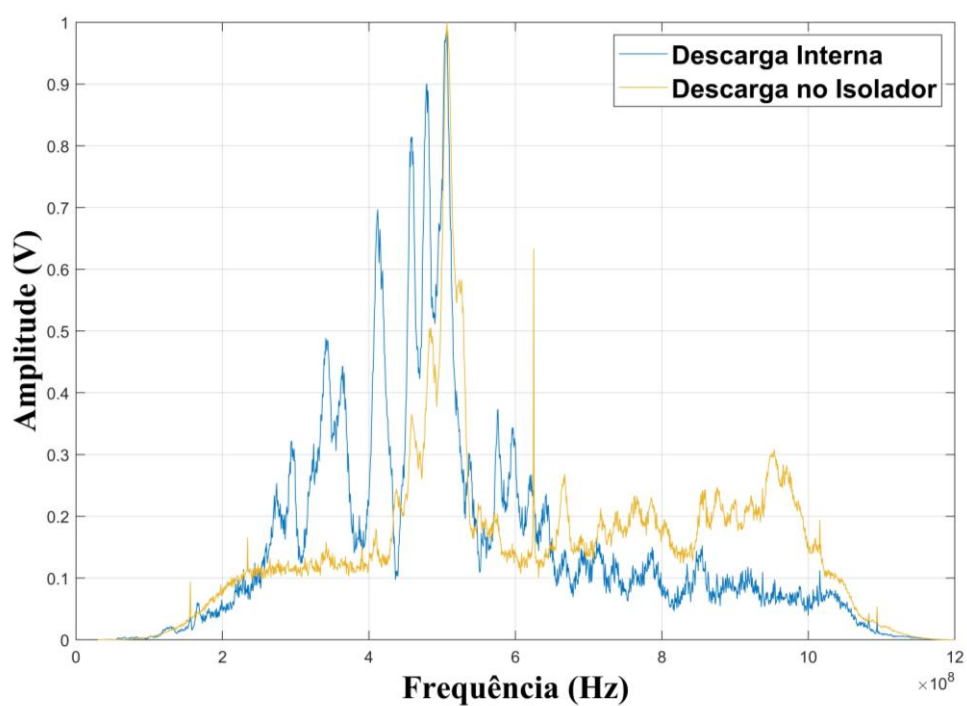
Figura 6.3 – Espectro das falhas estudadas para sinal sem filtragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

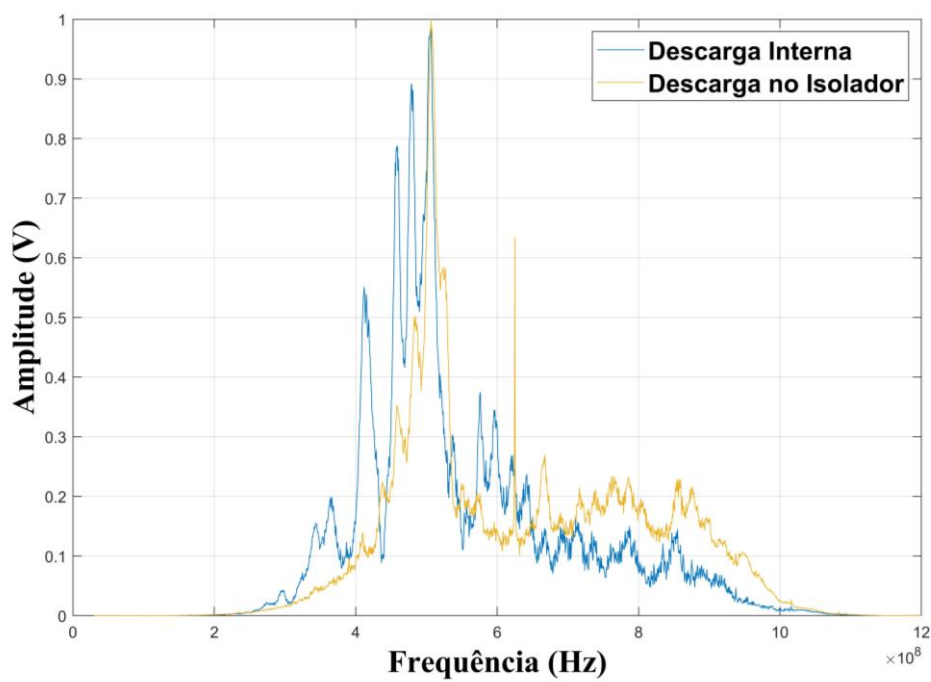
Considerando o espectro de frequências do sinal puro, isto é, sem filtragem, observa-se similaridades entre as duas falhas. Sendo assim, é de extrema importância o desenvolvimento de técnicas de reconhecimento de padrões para essas avarias, uma vez que elas demandam diferentes ações de manutenção. Além disso, conforme mencionado, a literatura técnico-científica amplia a discussão no que condiz à melhor faixa de frequência em UHF necessária para captar sinais de descargas em transformadores. Neste sentido, o uso de filtros digitais e analógicos com a finalidade de aliviar os sistemas de aquisição, pode, no entanto, limitar as informações em frequência e, assim, tornar mais custosa a diferenciação entre falhas. Portanto, esta dissertação faz a análise de três bandas que a literatura técnico-científica apresenta como adequadas para a identificação de falhas em transformadores: a banda total do sinal (sem filtragem), espectros entre 100 MHz e 1 GHz (Figura 6.4) e entre 400 MHz e 900 MHz (Figura 6.5).

Figura 6.4 – Espectro das falhas para sinais filtrados digitalmente entre 100 MHz e 1GHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

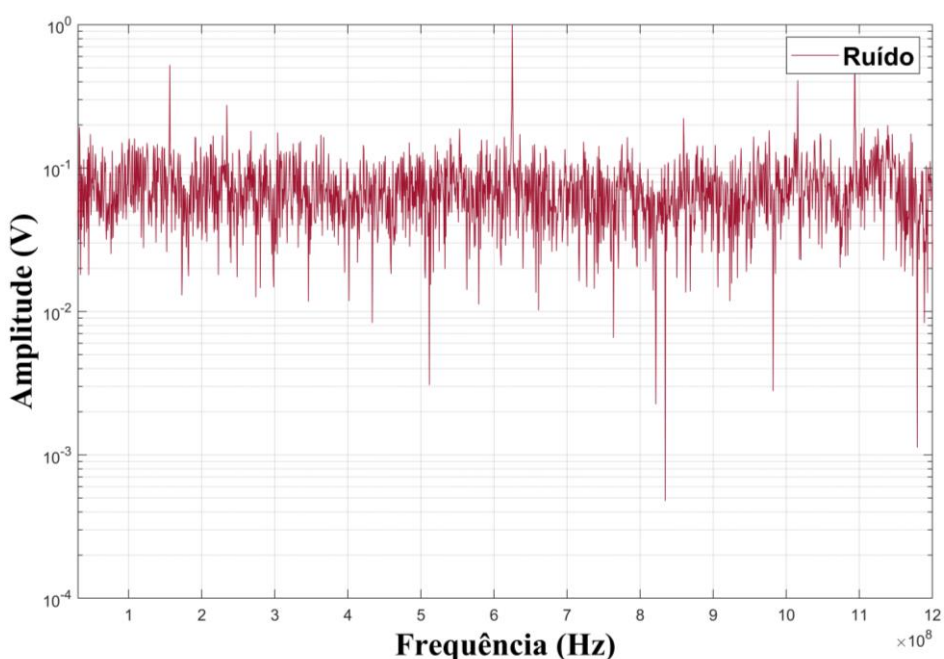
Figura 6.5 – Espectro das falhas para sinais filtrados digitalmente entre 400 MHz e 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, após a filtragem digital segundo recomenda a Brochura Técnica 861 do Cigrè (CIGRÈ, 2022), o espectro da Figura 6.4 continuou apresentar seu pico em 500 MHz, com a descarga interna tendo bandas mais dispersas que a falha no isolador. Entretanto, considerando o espectro de 400 MHz a 900 MHz, recomendado por Tenbohlen et al. (2023), observa-se sinais em frequências com significativa similaridade. Desta forma, cabe-se avaliar como a diminuição da largura de banda do sinal pode influenciar na classificação das falhas, uma vez que, para isso, se emprega técnicas que tem como finalidade detectar as diferenças entre as sequências. Desta forma, esse trabalho avaliou três metodologias de diferenciação: a Técnica Cromática (TC), a Análise de Componentes Principais (ACP) e a Análise de Forma (AF). Considerou-se também o estudo das técnicas de separação de dados para as medições de ruído de fundo, ou seja, quando uma medição for realizada sem a ocorrência de falha, o que pode ocorrer em condições práticas. O intuito foi avaliar se o ruído pode produzir falsos diagnósticos. O espectro do ruído de fundo é apresentado na Figura 6.6.

Figura 6.6 – Espectro do ruído de fundo das medições.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que o ruído perdura de uma forma constante em toda faixa de frequência, inclusive nas faixas onde as falhas são caracterizadas, tendo característica do ruído branco uniforme. Além disso, é importante salientar que as medições realizadas no espectro eletromagnético em UHF podem conter sinais oriundos de outras fontes emissoras, como por exemplo transmissões de rádio e televisão. Portanto, estes sinais detectados no ambiente podem explicar os picos detectados no ruído mostrado na figura 6.6, e estão presentes em todas as medições. Sendo assim, torna-se necessário o estudo da influência do ruído na classificação de falhas em transformadores.

6.2. Técnicas de Classificação de Falhas

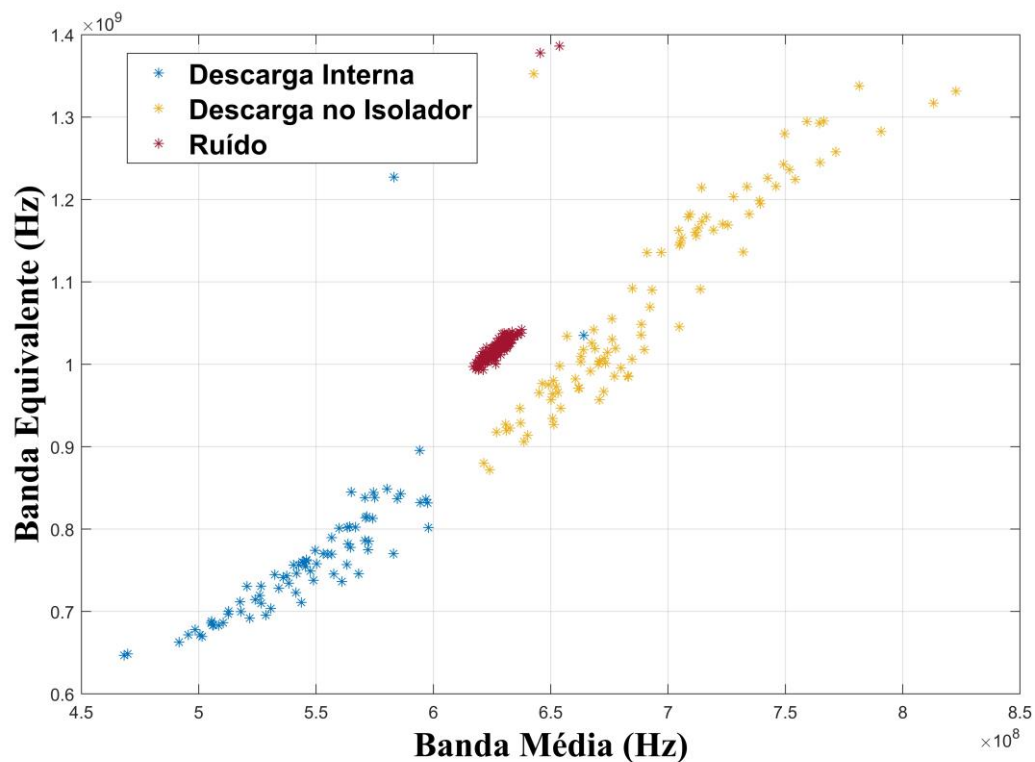
O aprimoramento de sistemas de monitoramento de transformadores está intimamente relacionado com a capacidade dos sistemas em classificar as falhas, uma vez que diferentes tipos de falhas demandam ações de manutenção diferentes. Deste modo, a limitação da banda, embora alivie o sistema de aquisição de dados, pode limitar a distinção e a caracterização, uma vez que o uso de filtros digitais e analógicos podem impor uma assinatura em frequência à falha. As técnicas de classificação analisadas por este trabalho dependem do espectro em frequência das falhas. Sendo assim, é de extrema importância a análise da influência de como a limitação de banda pode influenciar a Técnica Cromática (TC), Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise de Forma (AF).

6.2.1 Técnica Cromática

A Figura 6.7 apresenta a Técnica Cromática (TC) aplicada ao sinal puro, sem filtragem. Assim, a partir da análise deste resultado verifica-se que a técnica cromática é eficaz em se classificar as falhas estudadas tendo em vista as três regiões bem definidas que relacionaram a descarga interna, descarga no isolador e as medições sem falha (que mediram apenas o ruído do sensor). Portanto, para a descarga interna, a banda média ficou entre 460 MHz e 600 MHz

e a banda equivalente entre 600 MHz e 900 MHz. Já para a falha no isolador a banda média ficou entre 630 MHz e 830 MHz e a banda equivalente entre 700 MHz e 1,4 GHz. Com relação às medições onde não ocorreram falha e apenas o ruído de fundo foi aquisitado, a TC externou valores médios de 360 MHz para a banda média e 1,05 GHz para a banda equivalente. 1,6 % dos pontos resultaram em falsos diagnósticos, ou seja, se apresentaram fora de seu agrupamento característico.

Figura 6.7 – TC para sinais processados sem filtragem.



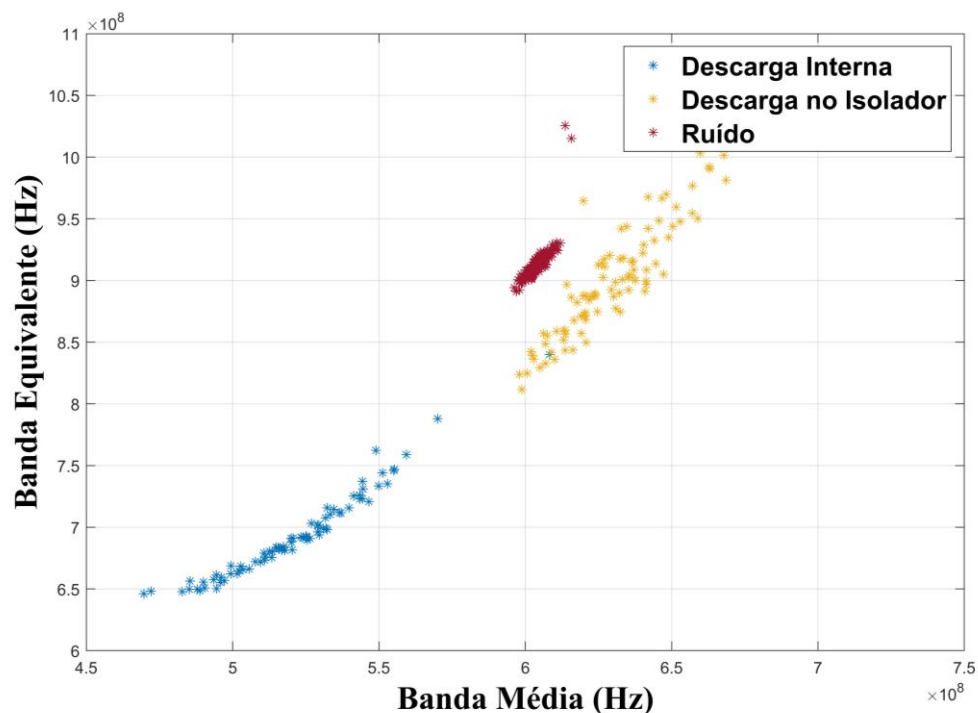
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.8 se apresenta a TC para sinais filtrados entre 100 MHz e 1 GHz. A técnica cromática também foi eficaz em se classificar as falhas estudadas tendo em vista a formação de três regiões bem definidas. 1,3 % dos pontos externaram falsos diagnósticos, ou seja, se apresentaram fora de seu agrupamento característico. Para a descarga interna, a banda média ficou entre 460 MHz e 580 MHz e a banda equivalente entre 650 MHz e 800 MHz. Já para a falha no isolador a banda média ficou entre 600 MHz e 680 MHz e a banda equivalente entre

800 MHz e 1,1 GHz. Com relação às medições onde não ocorreram falhas e apenas o ruído de fundo foi adquirido, a TC externou valores de 610 MHz para a banda média e 910 MHz para a banda equivalente. A TC aplicada a sinais segundo a banda de frequência de 400 MHz a 900 MHz é apresentada na Figura 6.9.

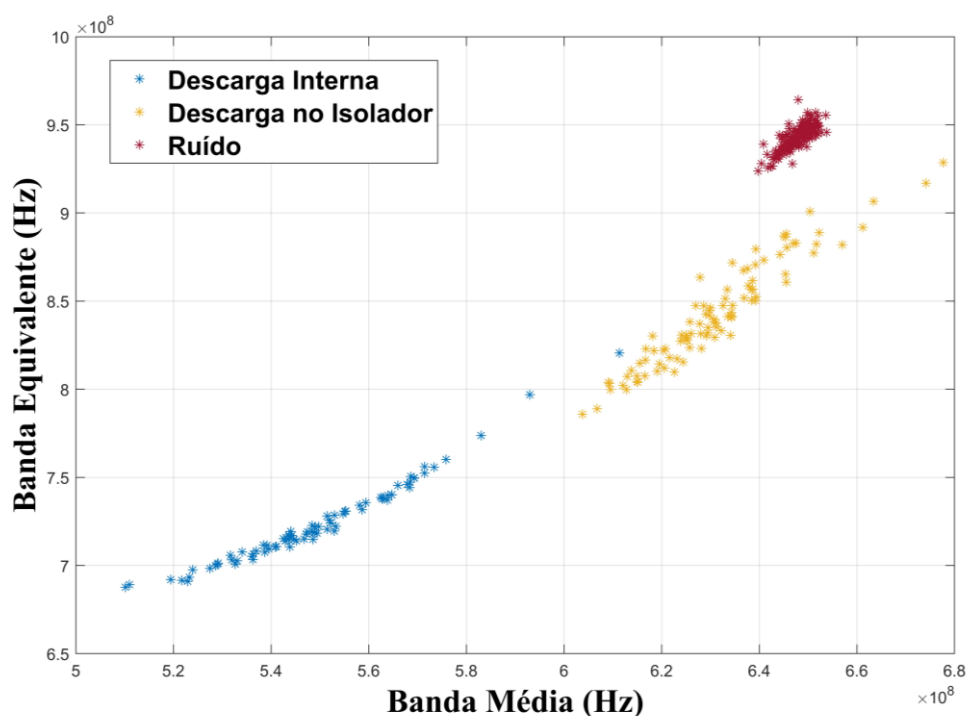
Pela análise gráfica, tem-se três regiões bem definidas que separam as condições de falha e ruído. Falsos diagnósticos representaram 0,66 % dos testes. Para as descargas internas os valores de banda média ficaram entre 510 MHz e 590 MHz e entre 680 MHz e 730 para a banda equivalente. Já para as descargas no isolador os valores foram de 600 MHz a 660 MHz para a banda média e de 800 MHz a 1 GHz para a banda equivalente. O ruído externou valores em média de 610 MHz para a banda média e 910 MHz para a banda equivalente. Conclui-se que a técnica cromática é eficaz em se classificar descargas totais de descargas superficiais e que a banda não possui influência na formação de hiperplanos que auxiliem a diferenciação das condições.

Figura 6.8 – TC para sinais com banda de 100 MHz a 1 GHz (CIGRÈ, 2022).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.9 – TC para sinais com banda de 400 MHz a 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023).

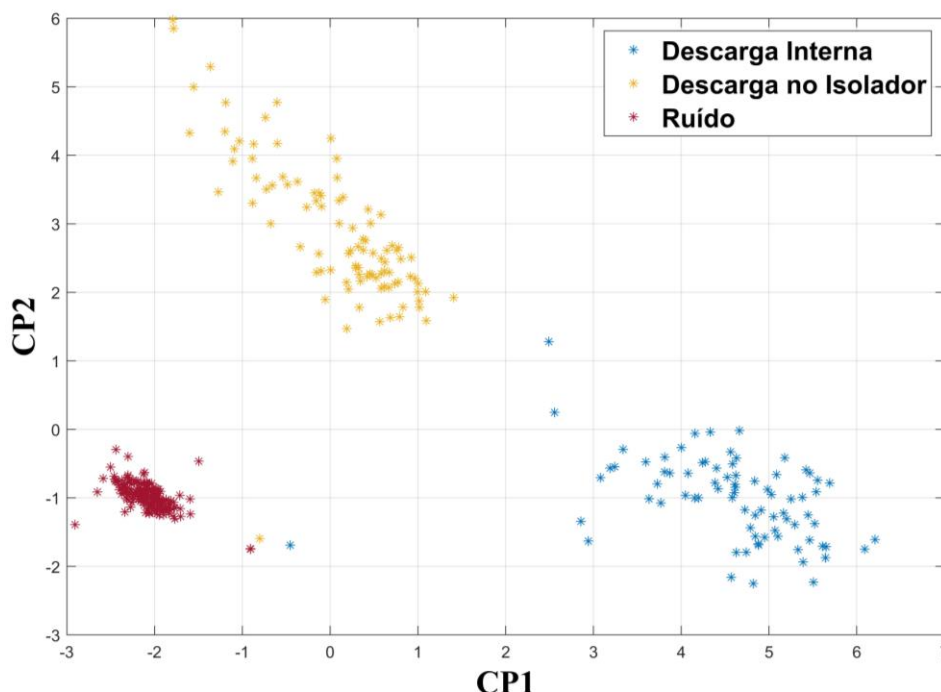


Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada à matriz de espectros. A partir das componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2) formou-se mapas bidimensionais com intuito de classificar as três condições estudadas por este trabalho. Na Figura 6.10 é apresentada a ACP para o sinal puro. Pela análise dos resultados pode-se concluir que a metodologia também foi eficaz em realizar a classificação das falhas uma vez que a figura em questão apresentou três regiões distintas, caracterizadas pela descarga no isolador, descarga interna e medições de ruído de fundo. Para as descargas internas, a componente principal 1 variou de 2,5 a 6,5 e a componente principal 2 de -2,5 a 0. Para as descargas no isolador CP1 e CP2 ficaram entre, respectivamente, -2 e 1,5 e 1,5 e 6. O agrupamento de medições sem falha, representados por medições de ruído de fundo, teve seu centro em -2 e 1 para CP1 e CP2, respectivamente. 1,3 % dos pontos resultaram em falsos diagnósticos, ou seja, se apresentaram fora de seu agrupamento característico.

Figura 6.10 – ACP para sinais processados sem filtragem.

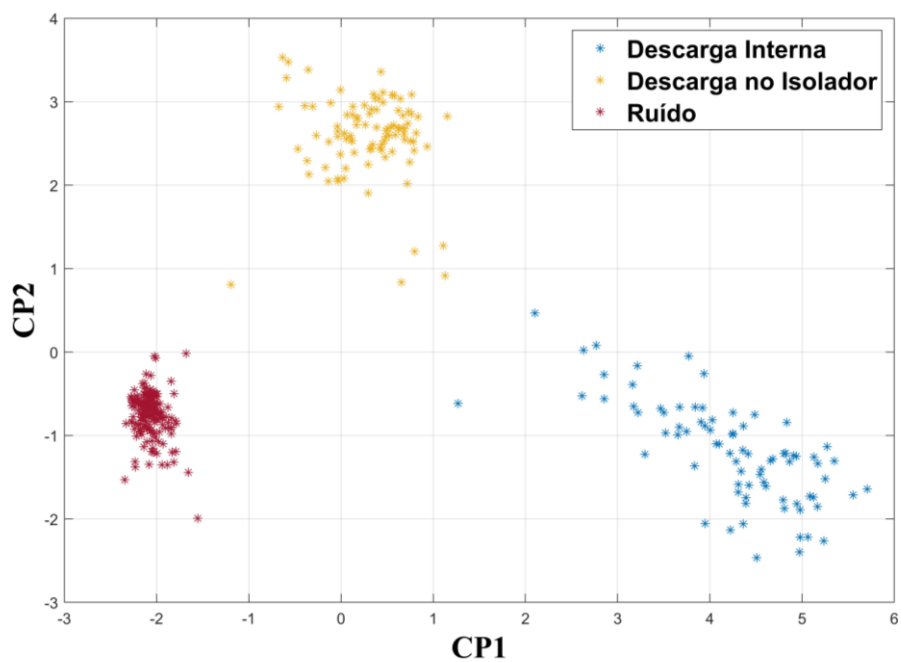


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para sinais filtrados de 100 MHz a 1 GHz, observa-se também a formação de três regiões distintas que caracterizam a descarga no isolador, o ruído e a descarga total. Todos os pontos se apresentaram dentro de um agrupamento característico. Para as descargas internas, a componente principal 1 variou de 1 a 6 e a componente principal 2 de -2,5 a 0,5. Para as descargas no isolador CP1 e CP2 ficaram entre, respectivamente, -1,5 e 1,1 e 0,5 e 3,5. O agrupamento de medições sem falha, representados por medições de ruído de fundo, teve seu centro em -2 e 1,1 para CP1 e CP2, respectivamente.

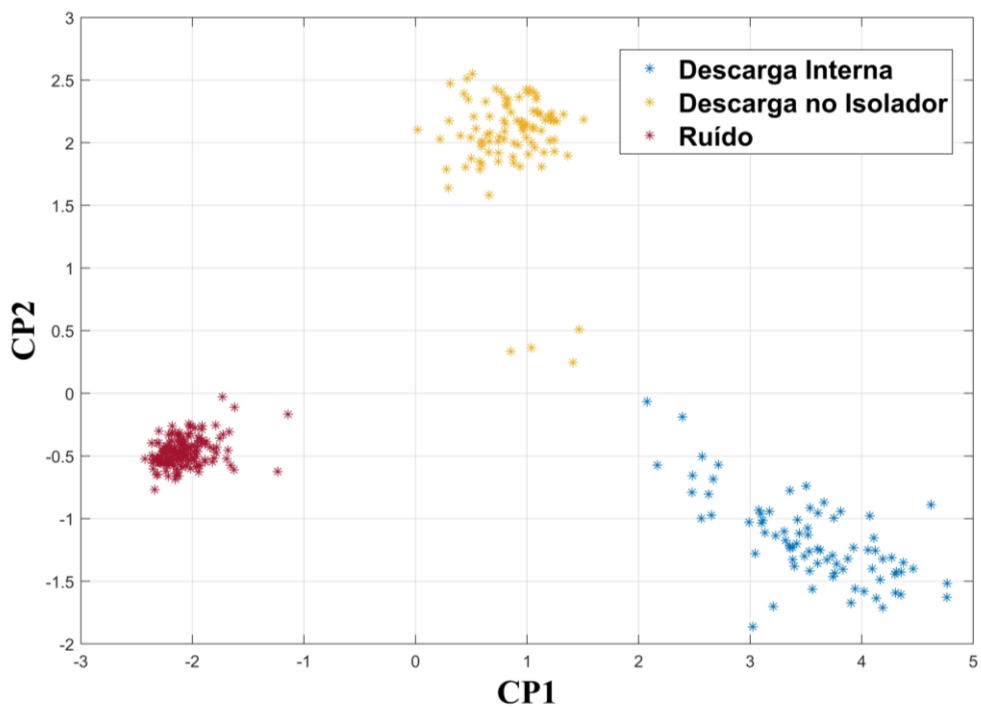
Já a Figura 6.12 apresenta os resultados considerando a banda de 400 MHz a 900 MHz. Observa-se que o padrão de três regiões bem definidas foi mantido. Os pontos de medições de ruído (sem falha) tiveram centro em -2 e -0,5 para CP1 e CP2 respectivamente. Já a descarga no isolador CP1 teve variações entre 0 e 1,5 e CP2 entre 1,5 e 2,6. Para a descarga interna CP1 e CP2 variaram, respectivamente, entre 2 e 5 e entre 0 e -2. Nenhuma medida externou falsos diagnósticos.

Figura 6.11 – ACP para sinais com banda de 100 MHz a 1 GHz (CIGRÈ, 2022).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.12 – ACP para sinais com banda de 400 MHz a 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023).



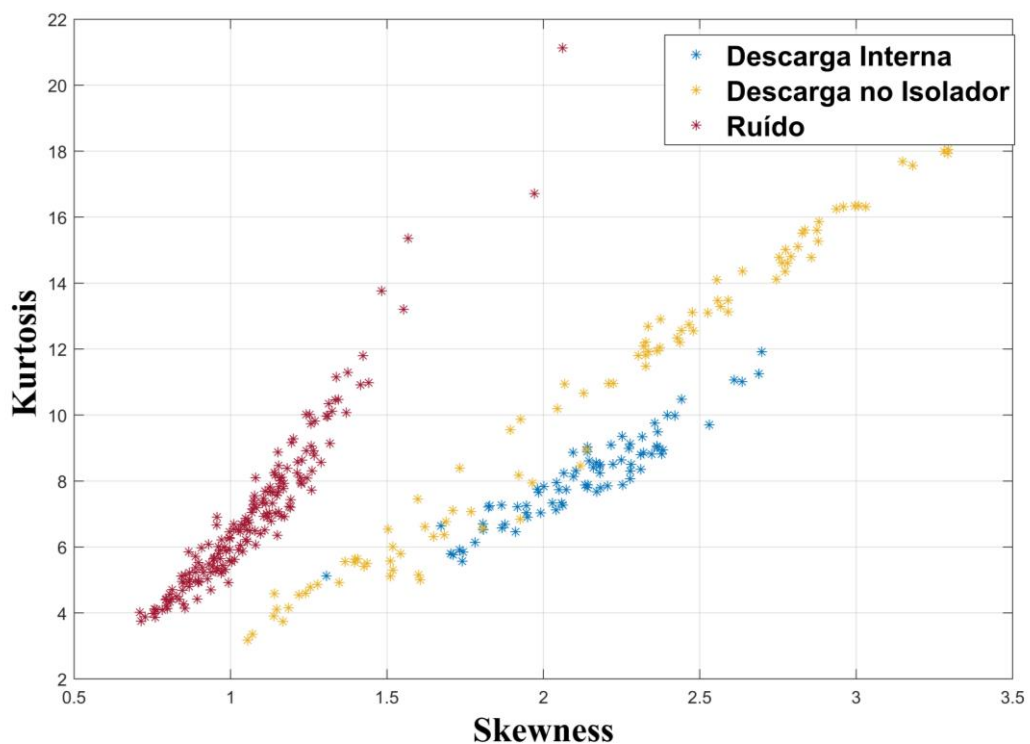
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o padrão de três regiões bem definidas foi mantido. Os pontos de medições de ruído (sem falha) tiveram centro em -2 e $-0,5$ para CP1 e CP2 respectivamente. Já a descarga no isolador CP1 teve variações entre 0 e $1,5$ e CP2 entre $1,5$ e $2,6$. Para a descarga interna CP1 e CP2 variaram, respectivamente, entre 2 e 5 e entre 0 e -2 . Nenhuma medida externou falsos diagnósticos.

6.2.3 Análise de Forma (AF)

A Análise de Forma (AF) foi aplicada por meio das estatísticas *Kurtosis* e *Skewness* que formaram coordenadas bidimensionais com a finalidade de se estudar como o comportamento espectral pode interferir na diferenciação entre os três casos estudados neste trabalho. Na Figura 6.13 é apresentada a AF para o sinal puro.

Figura 6.13 – AF para sinais processados sem filtragem.

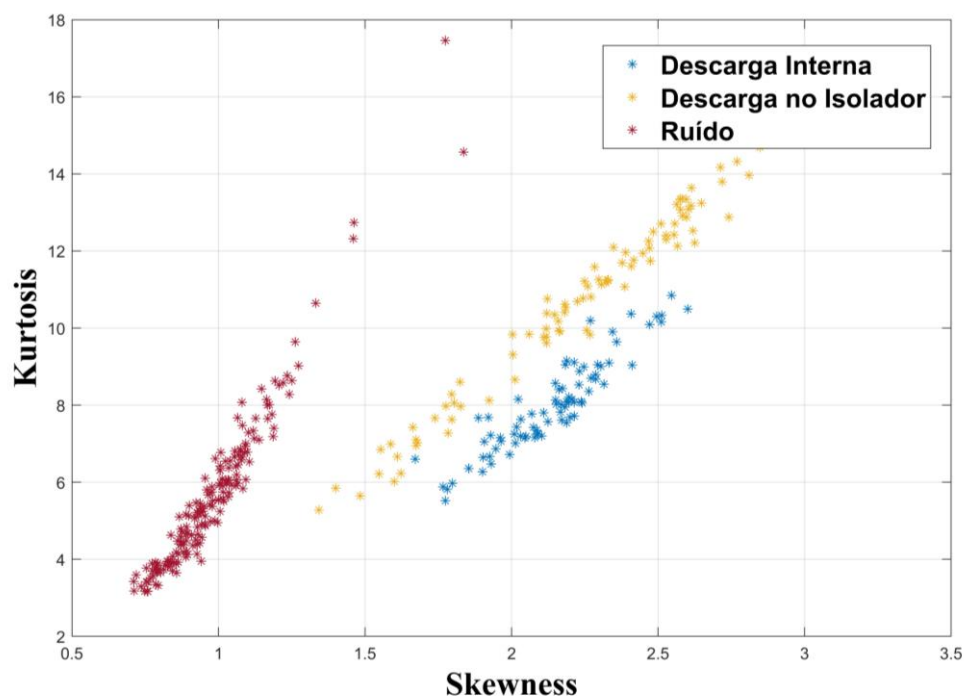


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela análise do resultado, verifica-se que a análise de forma não foi efetiva em caracterizar o ruído da falha no isolador uma vez que as áreas apresentaram pontos em comum quando a estatística *Skewness* ficou entre 1,7 e 2,2 e a estatística *Kurtosis* entre 5 e 8,5. Considerando as medições de falha no isolador e as medições de ruído, esses pontos representaram um percentual de 30 %. As Figuras 6.14 e 6.15 apresentam a técnica AF para as outras duas bandas estudadas.

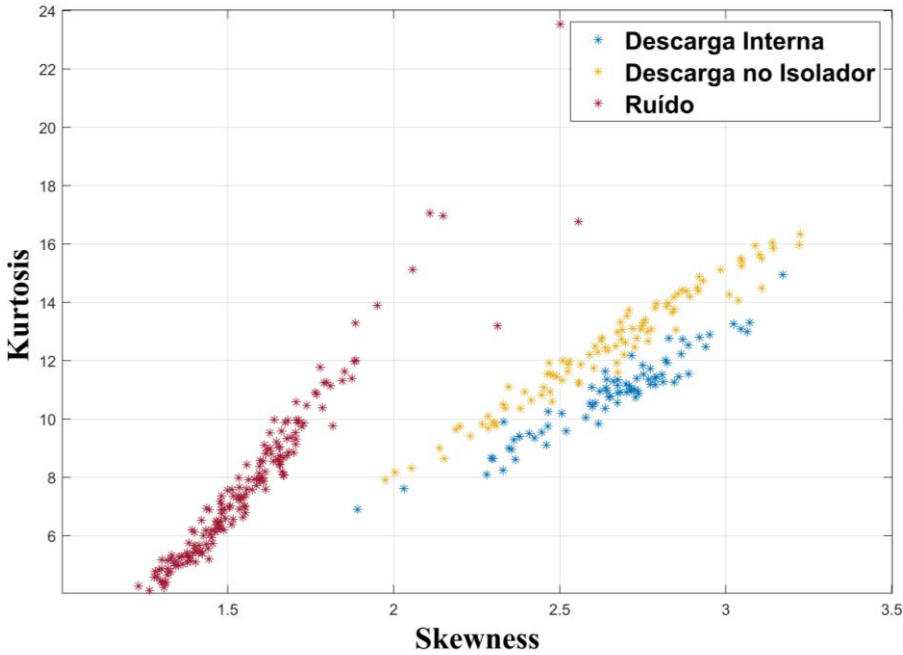
A filtragem dos sinais para as bandas estudadas melhorou essa característica. Observa-se, para as duas bandas de frequência, três regiões bem definidas em relação à condição de sinal puro. Entretanto, as medições de ruído e descarga no isolador produziram regiões com significativa proximidade e com pontos produzindo falsos diagnósticos. Neste contexto, considerando o total de pontos produzidos em condição de falha no isolador e apenas ruído, para a banda de frequência de 100 MHz a 1 GHz 4,5 % dos pontos apresentaram falsos diagnósticos. Esse percentual foi de 5,5 % para a banda de 400 MHz a 900 MHz.

Figura 6.14 – AF para sinais com banda de 100 MHz a 1 GHz (CIGRÈ, 2022).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6.15 – AF para sinais com banda de 400 MHz a 900 MHz (TENBOHLEN et al., 2023).



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.4 Estudo Comparativo entre as Técnicas

Para o aprofundamento da comparação entre as técnicas de classificação estudadas, foram extraídas as distâncias euclidianas entre o centro geométrico de cada agrupamento (Tabela 3). Os pontos cartesianos foram normalizados para a extração destas estatísticas uma vez que cada técnica possui sua dimensão. O intuito foi analisar de forma quantitativa como a limitação de banda de frequência interfere na classificação.

Tabela 3 – Distâncias Euclidianas.

Falhas/Método de Classificação	Banda Total			100 MHz a 1 GHz			400 MHz a 900 MHz		
	TC	ACP	AF	TC	ACP	AF	TC	ACP	AF
Descarga Interna e no Isolador	0,36	0,45	0,005	0,37	0,47	0,02	0,31	0,52	0,07
Descarga Interna e Ruído	0,09	0,34	0,003	0,37	0,38	0,01	0,51	0,51	0,22
Descarga no Isolador e Ruído	0,36	0,50	0,002	0,05	0,57	0,03	0,22	0,71	0,14

Obs.: 1: TC: técnica cromática; ACP: análise de componentes principais; AF: análise de forma.

Mediante a análise da Tabela 3 verifica-se que o distanciamento entre as regiões das falhas, para a técnica cromática, ficou em 0,36, 0,37 e 0,31 unidades para banda total, banda de 100 MHz a 1GHz e para a banda de 400 MHz a 900 MHz, respectivamente. Tal fato indica que a limitação da banda de frequência, o que pode ser vantajoso para sistemas de aquisição de dados, não limita a classificação entre as falhas. As distâncias entre os agrupamentos de descarga interna e medidas sem falha (ruído) foram de 0,09, 0,37 e 0,51 unidades para, respectivamente, banda total, banda de 100 MHz a 1GHz e para a banda de 400 MHz a 900 MHz. Já para a descarga no isolador e ruído essa distância foi de 0,36 unidades para a banda de total, 0,05 para a banda de 100 MHz a 1 GHz aumentando para 0,22 unidades para o espectro de 400 MHz a 900 MHz. Neste contexto a filtragem dos sinais melhorou a possibilidade de classificação entre a condição de ruído ou falha no isolador.

A ACP externou os maiores valores de distâncias, sendo, portanto, a técnica com maior capacidade de classificação. Assim, o distanciamento entre as regiões das falhas ficou em 0,45, 0,47 e 0,52 unidades para, respectivamente, banda total, banda de 100 MHz a 1GHz e para a banda de 400 MHz a 900 MHz. As distâncias entre os agrupamentos de descarga interna e medidas sem falha foram de 0,34, 0,38 e 0,51 unidades para, respectivamente, banda total, banda de 100 MHz a 1GHz e para a banda de 400 MHz a 900 MHz. Já para a descarga no isolador e ruído essa distância foi de 0,50 unidades para a banda de total, 0,57 para a banda de 100 MHz a 1 GHz aumentando para 0,51 unidades para o espectro de 400 MHz a 900 MHz. Neste contexto a filtragem dos sinais fez com que as distâncias aumentassem e, portanto, melhorassem a eficiência da classificação da técnica da ACP, que foi melhor entre as estudadas.

As distâncias entre os agrupamentos segundo a técnica da Análise de Forma produziram as menores distâncias. Entre as falhas os valores foram de 0,005, 0,02 e 0,07 unidades para, respectivamente, banda total, banda de 100 MHz a 1GHz e para a banda de 400 MHz a 900 MHz. As distâncias entre os agrupamentos de descarga interna e medidas sem falha foram de

0,003, 0,01 e 0,22 unidades para, respectivamente, banda total, banda de 100 MHz a 1GHz e para a banda de 400 MHz a 900 MHz. Já para a descarga no isolador e ruído essa distância foi de 0,002 unidades para a banda de total, 0,03 para a banda de 100 MHz a 1 GHz e 0,14 unidades para o espectro de 400 MHz a 900 MHz.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO

Sistemas de monitoramento de transformadores possuem extrema importância uma vez que falhas podem levar esse ativo de significativo custo a uma falha total. Dentre várias metodologias de diagnóstico de falhas em transformadores, a técnica de detecção de falhas por UHF se destaca como promissora, como observado nos resultados obtidos. Todavia, considerando a ampla faixa de frequência se torna factível o estudo da faixa de frequência que caracterize as falhas em transformadores. A literatura técnico-científica destaca frequências de UHF de até 3 GHz, de 100 MHz a 1 GHz como também, mais recentemente, faixas entre 400 MHz e 900 MHz para a caracterização das falhas em transformadores. Sendo assim, a limitação da banda de frequência é fator primordial para a diminuição do custo de implementação de sistemas de aquisição de dados. Neste sentido, torna-se factível a investigação da eficácia dos algoritmos de classificação de falhas que dependem do conteúdo espectral. Com isso, essa dissertação realizou um estudo de três técnicas de classificação de avarias em transformadores considerando três faixas espectrais: banda total, banda de 100 MHz a 1 GHz e banda de 400 MHz a 900 MHz. O intuito foi avaliar se restrição de banda, o que facilita projeto de sistemas de aquisição de dados, pode limitar a classificação. Portanto, foram considerados três contextos: medidas sem falhas, medidas com falha no isolador e medidas com falhas internas à máquina. Os resultados indicaram que todas as metodologias de processamento de sinais possuem eficácia em classificar as condições de operação do transformador. Dentre as metodologias de classificação de falhas, a que apresentou melhor classificação, considerando a distância entre os agrupamentos de dados formadas, foi a metodologia de Análise de Componentes Principais combinada com a faixa de frequência de 400 MHz a 900 MHz. Além disso, o experimento mostrou que a limitação da faixa de frequência não foi um fator limitante para a classificação e identificação da falha. Logo, a possibilidade de uso de menores faixas de frequência contribui

para o desenvolvimento de projetos de sistemas de aquisição de dados mais acessíveis, sem que haja perda na informação ao se limitar a banda de frequência.

Para trabalhos futuros, surge a possibilidade de aplicar novas topologias de antenas, técnicas de processamento de sinais, bem como, estender as metodologias para a classificação de mais falhas em transformadores. Além disso, surge a possibilidade da averiguação de como o método UHF pode ser sensível ao diagnóstico de evolução das falhas estudadas.

Referências

- ALBARRACÍN, R. et al. Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time–power ratio maps. **ISA transactions**, v. 58, p. 389-397, 2015.
- ARDILA-REY J. A., MONTAÑA J; CASTRO B. A., et al. A Comparison of Inductive Sensors in the Characterization of Partial Discharges and Electrical Noise Using the Chromatic Technique. **Sensors**, v. 18, p. 1021, 2018.
- ARDILA-REY, Jorge Alfredo et al. Separation techniques of partial discharges and electrical noise sources: A review of recent progress. **IEEE Access**, v. 8, p. 199449-199461, 2020.
- ARDILA-REY, Jorge Alfredo et al. Variation in the spectral content of UHF PD signals due to the presence of obstacles in the measurement environment. **IEEE Sensors Journal**, 2023.
- BABNIK, T. et al. Radio frequency measurement of different discharges. In: **2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings**. IEEE, 2003. p. 5 pp. Vol. 3.
- BARRETO, Guilherme Keiti Inoue. Um estudo comparativo sobre a influência da temperatura em transdutores piezelétricos aplicados ao diagnóstico de falhas em transformadores por meio de emissão acústica. 2023. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/9dd318f8-5487-416d-9772-ad48e6a084a4>. Acesso em: 3 de out. 2023
- BEURA, Chandra Prakash et al. Experimental analysis of ultra-high-frequency signal propagation paths in power transformers. **Energies**, v. 15, n. 8, p. 2766, 2022.
- BINOTTO, Amanda et al. A Comparison between piezoelectric sensors applied to multiple partial discharge detection by advanced signal processing analysis. **Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 55, 2020.
- BINOTTO, Amanda et al. Partial discharge detection of transformer bushing based on acoustic emission and current analysis. In: **2021 IEEE XXVIII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)**. IEEE, 2021. p. 1-4.
- CASTRO, Bruno Albuquerque et al. New Algorithm Applied to Transformers' Failures Detection Based on Karhunen-Loève Transform. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2023.
- CHAI, Hua; PHUNG, B. T.; ZHANG, Daming. Development of UHF sensors for partial discharge detection in power transformer. In: **2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)**. IEEE, 2018. p. 1-5.
- Cigrè TB 861 “Improvements to PD Measurements for Factory and Site Acceptance Tests of Power Transformers”. Cigre Technical Brochure 861. 2022. <https://e-cigre.org/publication/861-improvements-to-pd-measurements-for-factory-and-site-acceptance-tests-of-power-transformers>. Acessado em 05 de maio de 2023.
- DE CASTRO, Bruno Albuquerque et al. A comparative analysis applied to the partial discharges identification in dry-type transformers by hall and acoustic emission sensors. **Sensors**, v. 22, n. 5, p. 1716, 2022.

DUVAL, M. A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 17, n° 6, p. 22-27, 2002.

FÁVERO, Luiz Paulo; BELFIORE, Patrícia. **Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®**. Elsevier Brasil, 2017. p.379-381.

GRANATO, D; SANTOS, J. S.; ESCHER, G.B.; FERREIRA, B.L.; MAGGIO, R.M. Use of principal component analysis (PCA) and hierarchical cluster analysis (HCA) for multivariate association between bioactive compounds and functional properties in foods: a critical perspective. *Trends Food Science Technology*, v. 72, pp. 83-90, 2018.

HAI-FENG, Ye et al. Development of multi-band ultra-high-frequency sensor for partial discharge monitoring based on the meandering technique. ***IET Science, Measurement & Technology***, v. 8, n. 5, p. 327-335, 2014.

HIKITA, Masayuki; OHTSUKA, Shinya; MATSUMOTO, Satoshi. Recent trend of the partial discharge measurement technique using the UHF electromagnetic wave detection method. ***IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering***, v. 2, n. 5, p. 504-509, 2007.

IEC 60270 et al. High-voltage test techniques: partial discharge measurements. IEC-60270, p. 13-31, 2000.

ISHIKURA, T. et al. Distinction of the partial discharge source in oil by two frequency correlation method. In: **2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis**. IEEE, 2008. p. 42-45.

JANGJOO, Mohammad Amin; ALLAHBAKHSI, Mehdi; MIRZAEI, Hassan Reza. UHF sensors positioning on the power transformer tank to enhance the partial discharge localization accuracy. *Electric Power Systems Research*, v. 218, p. 109174, 2023.

JIANG, Tianyan et al. Improved bagging algorithm for pattern recognition in UHF signals of partial discharges. ***Energies***, v. 4, n. 7, p. 1087-1101, 2011.

JONGEN, Rogier A. et al. Identification of partial discharge defects in transformer oil. In: **CEIDP'05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005**. IEEE, 2005. p. 565-568.

KOZIOŁ, Michał et al. Radiation in the optical and UHF range emitted by partial discharges. ***Energies***, v. 12, n. 22, p. 4334, 2019.

KUPPUSWAMY, R.; DEVAUX, F.; LELAIDIER, S. Some Fundamental Observations during UHF Partial Discharge Measurement in Transformers. In: **CIGRE Transformer Colloquium; Merida: Yucatan, Mexico**. 2003.

LI, C. R. et al. PD pattern recognition in transformer by using UHF technology. In: **Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. IEEE, 2004. p. 46-49.

LI, Jian et al. Optimization of UHF Hilbert antenna for partial discharge detection of transformers. ***IEEE Transactions on Antennas and Propagation***, v. 60, n. 5, p. 2536-2540,

2012.

LI, Jian et al. UHF stacked Hilbert antenna array for partial discharge detection. **IEEE transactions on antennas and propagation**, v. 61, n. 11, p. 5798-5801, 2013.

LI, Mengjie; GUO, Chuangxin; PENG, Ziping. Design of meander antenna for UHF partial discharge detection of transformers. **Sensors & Transducers**, v. 171, n. 5, p. 232, 2014.

LIRA, Ruann Victor et al. Elliptical UHF sensor for partial discharge detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 113981, 2022.

MURUGAN, R.; RAMASAMY, R. Understanding the power transformer component failures for health index-based maintenance planning in electric utilities. *Engineering Failure Analysis*, v. 96, p. 274-288, 2019.

OPPENHEIN, A.V.; VERGHESE, C. *Signals, Systems & Inference*. 1^a ed. Hoboken: Pearson, 2017.

RAJA, K.; DEVAUX, F.; LELAIDIER, S. Recognition of discharge sources using UHF PD signatures. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 5, p. 8-14, 2002.

RUTGERS, W. R.; FU, Y. H. UHF PD-detection in a power transformer. 1997.

SHARMA, Chetan; OJHA, C. S. P. Statistical parameters of hydrometeorological variables: standard deviation, SNR, skewness and kurtosis. In: **Advances in water resources engineering and management: select proceedings of TRACE 2018**. Springer Singapore, 2020. p. 59-70.

SINAGA, Herman H.; PHUNG, B. T.; BLACKBURN, Trevor R. Recognition of single and multiple partial discharge sources in transformers based on ultra-high frequency signals. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 8, n. 1, p. 160-169, 2014.

SIKORSKI, W. Development of acoustic emission sensor optimized for partial discharge monitoring in power transformers. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 19, n. 8, p. 1865, 2019.

SIKORSKI, Wojciech; WIELEWSKI, Artur. Low-Cost Online Partial Discharge Monitoring System for Power Transformers. *Sensors*, v. 23, n. 7, p. 3405, 2023.

SUWARNO; SANTOSH. Effects of electric arc on discharge inception, combustible gases and chemical structure of transformer oils. In: 2012 International Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE). IEEE, 2012. p. 1-4.

TENBOHLEN, S. et al. Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 15, n. 6, p. 1544-1552, 2008.

TENBOHLEN, Stefan et al. Frequency range of UHF PD measurements in power transformers. **Energies**, v. 16, n. 3, p. 1395, 2023.

TEOPALD, Ana Beatriz Sacco et al. Acoustic Emission and Apparent Charge Measurement Applied to Power Transformer Failures Identification. In: **2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. IEEE, 2023. p. 1269-1273.

THIVIYANATHAN, Vimal Angela et al. Power transformer insulation system: A review on the reactions, fault detection, challenges and future prospects. Alexandria Engineering Journal, v. 61, n. 10, p. 7697-7713, 2022.

WANG, Z.; TIAN, Z; MEO, M; CIAMPA, F. Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography. NDT & Int., v. 99, pp. 93-104, 2018.

ZHANG, J.; JONES, G. R.; SPENCER, J. W.; et al. Chromatic classification of RF signals produced by electrical discharges in HV transformers. IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib. v. 152, p. 629–634, 2005. <http://dx.doi.org/10.1049/ip-gtd:20045076>

ZHOU, Sheng; IANNUZZI, Davide. Immersion photoacoustic spectrometer (iPAS) for arcing fault detection in power transformers. Optics letters, v. 44, n. 15, p. 3741-3744, 2019.