

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Metodologia de Monitoramento de Descargas
Parciais Utilizando Sensores Piezoelétricos
em Cuba de Óleo

Gabriel Guedes Ramalho

João Pessoa, Paraíba
Dezembro de 2024

GABRIEL GUEDES RAMALHO

Metodologia de Monitoramento de Descargas Parciais Utilizando Sensores Piezoelétricos em Cuba de Óleo

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Cicero da Rocha Souto

João Pessoa, Paraíba

Dezembro de 2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

R165m Ramalho, Gabriel Guedes.

Metodologia de monitoramento de descargas parciais
utilizando sensores piezoelétricos em cuba de óleo /
Gabriel Guedes Ramalho. - João Pessoa, 2024.
78 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Engenharia elétrica. 2. Sensores piezoelétricos.
3. Descargas parciais. 4. Óleo isolante. I. Souto,
Cícero da Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 621.3(043)



ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TRABALHO FINAL DE MESTRADO

Aos 17 dias do mês de dezembro de 2024, no horário de 14:00 às 16:30 horas, foi realizada, no Auditório do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, a defesa pública de Trabalho Final de Mestrado do PPGE/UFPB, do mestrando GABRIEL GUEDES RAMALHO, que se intitula: *Metodologia para monitoramento de Descargas parciais utilizando sensores piezoelétricos em cuba de óleo*.

A Banca Examinadora, constituída pelo Professor Orientador, Cícero da Rocha Souto (Presidente - PPGE/UFPB), e pelos professores Ramon Alves Torquato (Coorientador/UFPB), Juan Moises Mauricio Villanueva (Examinador Interno – PPGE/UFPB) e Alfredo Gomes Neto (Examinador Externo/IFPB), emitiu o seguinte parecer:

O trabalho está aprovado devendo o aluno seguir fortemente as orientações de correções no texto recomendada pelos examinadores. Por essa razão foi dado um prazo de 30 dias para que o aluno concluísse a adequação do texto.

Resultado final – Conceito:

(X) Aprovado.

() Insuficiente

() Reprovado.



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Eu, Cícero da Rocha Souto, Orientador do Trabalho, lavrei a presente Ata que segue por mim assinada e pelos demais membros da Banca Examinadora.

Documento assinado digitalmente
 **Cícero da Rocha Souto**
Data: 18/12/2024 12:52:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

Documento assinado digitalmente
 **RAMON ALVES TORQUATO**
Data: 18/12/2024 13:44:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ramon Alves Torquato

Documento assinado digitalmente
 **JUAN MOISES MAURICIO VILLANUEVA**
Data: 24/02/2025 13:55:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Juan Moises Mauricio Villanueva

Documento assinado digitalmente
 **ALFREDO GOMES NETO**
Data: 20/12/2024 12:07:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alfredo Gomes Neto

Resumo

Esta dissertação apresenta uma metodologia experimental para monitoramento de descargas parciais (DP) usando sensores piezoelétricos fora e dentro do óleo vislumbrando aplicação em transformadores. A abordagem envolve o uso de uma cuba de óleo equipada com eletrodos ponta-plano para geração de DP e sensores piezoelétricos posicionados estrategicamente para captar sinais associados às descargas. Para aumentar a sensibilidade na detecção, foi desenvolvido um circuito eletrônico amplificador, permitindo o condicionamento dos sinais mesmo em condições de baixa intensidade. Os testes em laboratório demonstraram que a amplitude dos sinais detectados depende diretamente da posição dos sensores em relação à fonte de DP, evidenciando a importância do posicionamento estratégico para o desempenho do sistema. A metodologia foi validada como uma solução possível para monitoramento contínuo, contribuindo para a manutenção preditiva e a confiabilidade operacional de transformadores alta de potência. O estudo conclui que a aplicação de sensores piezoelétricos é viável e promissora para detecção de DP, com potencial para ser integrada a sistemas de monitoramento de alta tensão. A proposta abre caminho para a evolução de ferramentas de manutenção preventiva no setor elétrico, aumentando a confiabilidade de ativos críticos e reduzindo riscos de falhas catastróficas.

Palavras-chave: Descargas parciais, sensores piezoelétricos, óleo isolante.

Abstract

The study presents an experimental methodology for monitoring partial discharges (PD) using piezoelectric sensors placed both inside and outside the oil, aiming at applications in transformers. The approach involves the use of an oil tank equipped with point-plane electrodes for PD generation and strategically positioned piezoelectric sensors to capture signals associated with the discharges. To enhance detection sensitivity, an electronic amplifier circuit was developed, allowing signal conditioning even under low-intensity conditions. Laboratory tests demonstrated that the amplitude of the detected signals directly depends on the position of the sensors relative to the PD source, highlighting the importance of strategic placement for system performance. The methodology was validated as a viable solution for continuous monitoring, contributing to predictive maintenance and the operational reliability of high-power transformers. The study concludes that the application of piezoelectric sensors is feasible and promising for PD detection, with potential for integration into high-voltage monitoring systems. This proposal paves the way for the advancement of preventive maintenance tools in the electrical sector, enhancing the reliability of critical assets and reducing the risks of catastrophic failures.

Keywords: Partial discharges, piezoelectric sensors, insulating oil.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.	10
Figura 2 – Esquemático da montagem experimental da sonda óptica.	18
Figura 3 – Posicionamento dos sensores acústicos.	20
Figura 4 – Esquemático de fibra óptica de Sagnac e desenho experimental.	22
Figura 5 – Montagem experimental em um transformador de 3 fases com 10 MVA de potência. PT - Transdutor piezoelétrico, DUT - sistema de baixo custo proposto e MS - referência de monitoramento portátil de descargas parciais.	23
Figura 6 – Curva de Paschen.	25
Figura 7 – Tipos de descargas parciais.	26
Figura 8 – Tamanhos típicos de compartimentos gasosos em dielétricos sólidos.	27
Figura 9 – Posicionamento dos sensores acústicos.	28
Figura 10 – Sistema experimental para detecção e medição óptica de DP.	30
Figura 11 – Espectro óptico para ruptura dielétrica em gás SF ₆	30
Figura 12 – Efeito da piezoelectricidade.	32
Figura 13 – Fluxograma geral dos procedimentos adotados no trabalho.	34
Figura 14 – Cuba com os sensores colados	35
Figura 15 – Sensor piezoelétrico utilizado	36
Figura 16 – Bancada analisador de impedância	38
Figura 17 – Esquemático do circuito condicionador de sinal.	39
Figura 18 – Circuito condicionador de sinal.	40
Figura 19 – Arranjo de medição para detecção de DP em laboratório com HFCT.	41
Figura 20 – Arranjo de medição para detecção de DP em laboratório com LDIC.	41
Figura 21 – Montagem do <i>setup</i> experimental com HFCT	42
Figura 22 – Processo de ocorrência de descarga parciais.	43
Figura 23 – Montagem do <i>setup</i> experimental com LDIC	44
Figura 24 – Cuba com eletrodos ponta-plano	44
Figura 25 – Equipamentos de captura dos sinais	45
Figura 26 – Análise de impedância em frequência	47
Figura 27 – Junção de pontos de ionização de DP na configuração plano - plano.	48
Figura 28 – Detecção de descargas parciais utilizando HFCT como referência e sensores externos fixos.	49
Figura 29 – Comparativo de descargas parciais olhando somente para os sensores externos fixos.	49

Figura 30 – Medição de tensão no tempo EF LDIC.	50
Figura 31 – Medição de tensão no tempo IF LDIC.	51
Figura 32 – Medição de tensão no tempo IL dentro da cuba LDIC.	51
Figura 33 – Medição de tensão no tempo IL fora da cuba LDIC.	52
Figura 34 – Medição de frequência no tempo EF LDIC.	53
Figura 35 – Medição de frequência no tempo IF LDIC.	54
Figura 36 – Medição de frequência no tempo IL dentro da cuba LDIC.	54
Figura 37 – Medição de frequência no tempo IL fora da cuba LDIC.	55
Figura 38 – Medição de baixas frequência no tempo EF LDIC.	56
Figura 39 – Medição de baixas frequência no tempo IF LDIC.	56
Figura 40 – Medição de baixa frequência no tempo IL dentro da cuba LDIC. . . .	57
Figura 41 – Medição de baixa frequência no tempo IL fora da cuba LDIC. . . .	57
Figura 42 – Medição de alta frequência no tempo EF LDIC.	58
Figura 43 – Medição de alta frequência no tempo IF LDIC.	58
Figura 44 – Medição de alta frequência no tempo IL dentro da cuba LDIC. . . .	59
Figura 45 – Medição de alta frequência no tempo IL fora da cuba LDIC. . . .	59
Figura 46 – Medição de tensão no tempo EF LDIC com menor df.	60
Figura 47 – Medição de tensão no tempo EF LDIC com 5 kHz.	61
Figura 48 – Medição de tensão no tempo IF LDIC com 5 kHz.	61
Figura 49 – Medição de tensão no tempo IL dentro da cuba LDIC com 5 kHz . .	62
Figura 50 – Medição de tensão no tempo IL fora da cuba LDIC com 5 kHz . . .	62
Figura 51 – Medição de frequência EF com passo de 5 kHz.	63
Figura 52 – Medição de frequência IF com passo de 5 kHz.	63
Figura 53 – Medição de frequência IL dentro da cuba com passo de 5 kHz. . . .	64
Figura 54 – Medição de frequência IL fora da cuba com passo de 5 kHz. . . .	64
Figura 55 – Medição de baixas frequência EF.	65
Figura 56 – Medição de baixas frequência IF.	65
Figura 57 – Medição de baixa frequência IL dentro da cuba.	66
Figura 58 – Medição de baixa frequência IL fora da cuba.	66
Figura 59 – Medição em mais alta frequência EF LDIC.	67
Figura 60 – Medição em mais alta frequência IF LDIC.	67
Figura 61 – Medição em mais alta frequência IL dentro da cuba LDIC.	68
Figura 62 – Medição em mais alta frequência IL fora da cuba LDIC.	68
Figura 63 – Classificação do sinal experimental com o LDIC.	69

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades do sensor piezoelétrico utilizado.	36
Tabela 2 – Composição dos sensores alocados.	37
Tabela 3 – Nomenclatura da posição dos sensores 1 MHz	50
Tabela 4 – Nomenclatura da posição dos sensores 5 kHz	60

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Contextualização	9
1.2	Relevância	10
1.3	Motivação	11
1.4	Contribuição científica	12
1.5	Objetivos	12
1.5.1	Objetivo geral	12
1.5.2	Objetivos específicos	12
1.6	Organização do texto	13
2	ESTADO DA ARTE	14
2.1	Trabalhos relacionados ao tema de descargas parciais (DP).	14
2.2	Monitoramento de descargas parciais (DP) utilizando sensores piezoelétricos.	19
2.3	Resumo do capítulo.	23
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
3.1	Descarga parcial	24
3.1.1	Condições necessárias para a ocorrência de descarga parcial	25
3.1.2	Classificação das descargas	25
3.1.2.1	Externas ou corona	26
3.1.2.2	Interna	26
3.1.3	Método de detecção de DP	27
3.1.3.1	Método elétrico convencional	27
3.1.3.2	Método HF/VHF/UHF	28
3.1.3.3	Método químico	29
3.1.3.4	Método óptico e opto-acústico	29
3.1.3.5	Método acústico	30
3.2	Piezoelétricos	31
3.2.1	História da piezoelectricidade	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	Projeto e instrumentação do protótipo	34
4.1.1	Construção da cuba	35
4.1.2	Sensores piezoelétricos	36
4.1.2.1	Posicionamento dos sensores piezoelétricos na cuba de óleo	36

4.1.3	Análise de impedância	38
4.1.4	Condicionamento de sinais dos sensores	39
4.2	Ensaio em alta tensão	40
4.2.1	Deteção de DP em um arranjo utilizando HFCT como referência	42
4.2.2	Deteção de DP em um arranjo utilizando LDIC como referência	42
4.3	Aquisição e processamento dos resultados	45
4.4	Resumo do capítulo	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1	Resultados da análise de impedância	47
5.2	Experimento utilizando HFCT como referência	48
5.3	Experimento utilizando LDIC como referência	49
6	CONCLUSÕES	70
6.1	Continuação do trabalho	70
	REFERÊNCIAS	72

1 Introdução

1.1 Contextualização

A energia elétrica se tornou um bem de consumo indispensável no cotidiano do mundo atual e para garantir a necessidade de ampliar a capacidade de geração, transmissão e distribuição de energia, o monitoramento e diagnóstico das condições operacionais dos ativos têm sido objetivo das empresas concessionárias do setor elétrico, motivadas pelas exigências dos consumidores e pelas resoluções dos agentes reguladores, Aneel e ONS.

A brochura do (International Council on Large Electric Systems, 1983) do CIGRE e os artigos de (CHEN, 2013) e do (Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 2015) descrevem que uma parcela significativa das interrupções no fornecimento de energia elétrica é causada por falhas nos equipamentos de alta tensão. Pelo exposto, a exposição contínua a condições de estresse, incluindo campos elétricos intensos, esforços eletromecânicos, variações de temperatura, sobretensões, curtos-circuitos e fatores ambientais, pode acelerar o envelhecimento e, conseqüentemente, ocasionar falhas dielétricas prematuras. Neste contexto, não conformidades e falhas podem comprometer a eficiência, a disponibilidade e a confiabilidade.

As descargas parciais se caracterizam como eventos elétricos localizados e temporários, que ocorrem em regiões de alta intensidade de campo elétrico em equipamentos e sistemas de isolamento. Elas são causadas por estresses elétricos excessivos localizados, resultantes de fatores como: tensões continuamente aplicadas, sobretensões transitórias decorrentes de faltas no sistema (curto-circuito), elevações dos níveis de tensão natural devido à regulação em horário de carga leve, falhas no processo de fabricação, aplicação de material não adequado, presença de cavidades e impurezas.

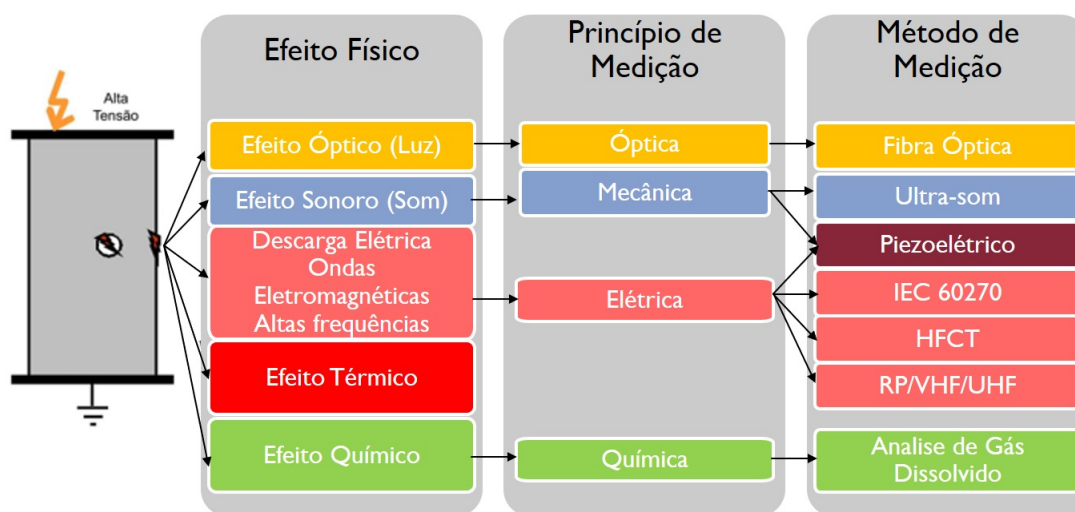
Segundo (NATRASS, 1988) e a (International Electrotechnical Commission, 2000), IEC (60270), as falhas de isolamento em equipamentos de alta tensão podem estar associadas ao surgimento de descargas de baixa intensidade que curto-circuitam parcialmente os materiais isolantes, denominadas descargas parciais. Mesmo sendo de pequena intensidade, as descargas internas podem causar deterioração progressiva e provocar falhas no equipamento.

Neste contexto, com o intuito de manter a confiabilidade e a disponibilidade, como também a aplicação da manutenção baseada no estado operacional do equipamento, o monitoramento dos isolamentos por descargas parciais é um procedimento que vem sendo utilizado pelas empresas do setor elétrico na gestão dos seus ativos (NETO, 2014); (RODRIGUES, 2019)

1.2 Relevância

Durante a ocorrência de descargas parciais, fenômenos como emissão de calor, luz, pulsos de corrente, ondas de ultrassom e irradiação eletromagnética (SARATHI; SINGH; DANIKAS, 2007) são observados. Com base na identificação desses fenômenos, foram desenvolvidos métodos de detecção de descargas parciais. Na Figura 1 são mostradas as representações gráficas que associam os fenômenos à ocorrência das descargas parciais.

Figura 1 – Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.



Fonte: Autoria própria

Dentre os principais métodos empregados na detecção de descargas parciais, o método elétrico é amplamente reconhecido por ter alta sensibilidade e confiabilidade. Neste sentido, normas internacionais específicas, como a IEC 60270 (2015), foram estabelecidas para definir os procedimentos experimentais relacionados à medição de descargas parciais em equipamentos de alta tensão utilizando o método elétrico. O método elétrico é largamente usado por ser reproduzível e calibrável.

Por outro lado, o método convencional definido pela norma IEC 60270 (2015), apresenta limitações para aplicação em campo devido ao uso invasivo pela necessidade do uso de um capacitor de acoplamento, a indefinição da fonte geradora das descargas parciais e a presença de ruído de alta intensidade. Em tensões elevadas, o capacitor de acoplamento, por necessitar de grandes dimensões físicas, pode ser extremamente invasivo. Por esta razão, o método definido pela norma IEC 60270 (2015) não é amplamente empregado para o monitoramento de equipamentos de alta tensão em campo (STONE, 1991). Sua aplicação é tipicamente restrita a ensaios laboratoriais, nos quais apresenta a vantagem de ser um método padronizado, reproduzível e calibrável.

Com o intuito de contornar as limitações práticas enfrentadas para aplicação em campo do método definido pela norma IEC 60270 (2015), pesquisadores têm procurado

alternativas para a medição de descargas parciais. O objetivo dessas investigações é encontrar técnicas de medição que ofereçam alta sensibilidade de detecção de forma menos invasiva, possibilitando o monitoramento contínuo dos equipamentos em campo.

Nesse contexto, um monitoramento utilizando sensores piezoelétricos seria muito útil, pois podem ser considerados pouco invasivo e mesmo tendo conexão direta com o equipamento de teste, ele pode ser aplicado, em muitos casos, em uma localização não invasiva. O sensor seria acoplado ao equipamento e o sinal captado seria relacionado à resposta do equipamento durante sua utilização em alta tensão, captando a descarga interna no caso da sua manifestação ou ocorrência.

1.3 Motivação

Atualmente, diversos métodos de detecção e classificação de descargas parciais (DP) são amplamente estudados e aplicados em equipamentos de alta tensão. Entre essas técnicas, a utilização de sensores piezoelétricos tem se destacado como uma solução promissora, principalmente por sua característica não invasiva (STONE, 1991) (PALITO *et al.*, 2014). Esta abordagem representa uma inovação significativa, pois possibilita a captação de sinais acústicos relacionados às descargas parciais sem a necessidade de intervenções que exijam o desligamento prolongado ou a descontinuidade no fornecimento de energia elétrica.

A eficiência dessa metodologia depende da capacidade dos sensores piezoelétricos de registrar sinais na frequência adequada, exigindo um sistema de aquisição que amplifique esses sinais, que geralmente possuem amplitudes muito baixas (ASSAGRA, 2013) (GUTNIK, 2014). Para isso, é necessário um condicionamento eletrônico eficaz que permita a leitura precisa dos fenômenos acústicos gerados pelas descargas. Além disso, uma vantagem crítica dos sensores piezoelétricos é sua imunidade a interferências eletromagnéticas comuns em ambientes de alta tensão, o que minimiza o impacto de ruídos indesejados no sinal detectado (SMITH, 2021).

A motivação principal deste trabalho está associada à necessidade urgente de implementar sistemas de monitoramento preditivo eficientes e de baixo custo para a indústria de energia elétrica. Tais sistemas são fundamentais em locais estratégicos, como subestações e usinas, onde a integridade dos ativos precisa ser constantemente garantida sem comprometer a operação contínua da rede (IEC 60270, 2000) (SIKORSKI, 2023). Dessa forma, a pesquisa propõe o uso de sensores piezoelétricos para detectar descargas parciais em um arranjo experimental que simula um transformador imerso em óleo isolante.

Neste contexto, o presente estudo visa desenvolver e validar um sistema inovador que, além de ser econômico, oferece a possibilidade de monitoramento contínuo e sem a necessidade de interrupções operacionais significativas. O trabalho é concebido como uma prova de conceito, evidenciando que os sensores piezoelétricos e o sistema de me-

dição desenvolvido têm potencial para se tornarem ferramentas robustas na detecção e monitoramento de descargas parciais em equipamentos de alta tensão.

1.4 Contribuição científica

Um fato consolidado é que a descarga parcial é fenômeno físico nocivo para os dispositivos isolantes de sistemas de energia elétrica e, precisa de soluções que possam detectá-las antes do colapso do componente elétrico. Este trabalho de pesquisa, dentro deste cenário, aponta como contribuição científica o uso sensores piezoelétricos para detectar as descargas parciais dentro e fora de óleo isolante de transformadores com o propósito de tentar identificar se existem ressonâncias oriundas do próprio isolante.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo geral

Objetivo geral da pesquisa consiste em uma prova de conceito de detecção de descargas parciais utilizando somente os sensores piezoelétricos e não os transdutores como sensor aplicados em equipamentos elétricos de potência.

1.5.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo desta dissertação, são destacados os seguintes objetivos específicos:

- Estudar características específicas das descargas parciais e os meios de detecção (tarefa);
- Definir e conceber uma estrutura que permita a ocorrência de descargas parciais para melhor detecção (objetivo);
- Determinar as posições estratégicas dos piezoelétricos que possam evidenciar a DP com clareza (objetivo);
- Projetar o condicionador de sinal para os sensores piezoelétricos com possibilidade de ajuste de ganhos (tarefa);
- Determinar o arranjo experimental de captura dos sinais de descargas parciais (tarefa);
- Conceber variações magnéticas no sensor piezoelétrico e avaliar o comportamento na detecção das descargas parciais (objetivo);

- Avaliar os sinais de descargas parciais para encontrar relações com a posição do sensor no experimento (objetivo);
- Avaliar os sinais de descargas parciais para encontrar relações de sensibilidades entre blocos de sensores (objetivo);

1.6 Organização do texto

Esta dissertação possui seis capítulos distintos. No Capítulo 2 é apresentado o Estado da Arte, que consiste numa revisão bibliográfica direcionada às pesquisas mais significativas no campo do monitoramento de descargas parciais em equipamentos de alta tensão, utilizando sensores piezoelétricos.

Na sequência, no Capítulo 3 é introduzido o arcabouço teórico que fundamenta o desenvolvimento do trabalho, abordando tópicos como descargas parciais e suas principais técnicas de medição. Nele também é descrito o funcionamento dos sensores piezoelétricos e como eles são inseridos dentro da alta tensão para captar descargas parciais.

No Capítulo 4 são detalhados os procedimentos computacionais e práticos empregados para a realização das simulações e experimentos, tanto em laboratório quanto em campo, necessários para alcançar os objetivos específicos e geral estabelecidos nesta dissertação.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos, juntamente com as respectivas análises e discussões, abrangendo os testes computacionais e os ensaios realizados em laboratório e em campo.

Finalmente, no Capítulo 6 é apresentada a conclusão e as sugestões de trabalhos a serem realizadas para a continuidade da pesquisa.

2 Estado da arte

Neste capítulo, apresenta-se uma breve Revisão Bibliográfica das pesquisas mais relevantes relacionadas aos seguintes temas: detecções, medições, monitoramento diagnóstico e localização de descargas parciais (DP) em equipamentos elétricos e subestações de alta tensão. Em um segundo momento e de forma mais específica, a utilização de sensores piezoelétricos na detecção, monitoramento e localização de descargas parciais em equipamentos elétricos de potência.

Na primeira seção são apresentadas algumas pesquisas que promoveram a evolução das pesquisas relacionadas às detecções, medições, monitoramento diagnóstico e localização de descargas parciais (DP) em equipamentos elétricos e subestações de alta tensão.

Na segunda seção são reportados e comentados os principais trabalhos que utilizaram os sensores piezoelétricos na detecção, monitoramento e localização de descargas parciais em equipamentos elétricos de potência.

Por fim, a última seção compreende um resumo, com as contribuições dos principais trabalhos que aplicaram a técnica com sensores piezoelétricos e as contribuições que essa pesquisa tem alcançado.

2.1 Trabalhos relacionados ao tema de descargas parciais (DP).

(MACEDO *et al.*, 2013) analisa como diferentes configurações de cavidades afetam os parâmetros estatísticos de sinais de DP. O objetivo é estudar o comportamento de DP em várias disposições de defeitos de isolamento, usando simulações por elementos finitos para prever a distribuição do campo elétrico. A metodologia incluiu a reprodução física de cavidades em amostras de isolamento e a geração de DP usando um sistema de medição clássico. Parâmetros estatísticos, como carga aparente e frequências de ocorrência, foram calculados para cada configuração, revelando que a geometria das cavidades tem um impacto significativo na intensidade e frequência de DP.

(MACEDO *et al.*, 2015) desenvolve uma metodologia experimental para a geração de sinais de DP com diferentes características, visando facilitar a classificação automática de defeitos usando técnicas de inteligência artificial. O objetivo é criar padrões de DP que possam ser usados para treinar sistemas de classificação, como redes neurais e lógica *fuzzy*. A metodologia incluiu o desenvolvimento de células de DP que permitem gerar pulsos de DP bem definidos, associados a diferentes tipos de defeitos de isolamento, e a aplicação de técnicas de filtragem de ruído para melhorar a precisão dos sinais capturados. Os padrões gerados foram testados com sucesso, mostrando que a abordagem pode melhorar

a identificação de fontes de DP em equipamentos de alta tensão.

Em (WU, 2015) foi feita uma revisão abrangente das técnicas de análise de DP para monitoramento de condições em sistemas elétricos. Ele aborda os avanços em tecnologia de sensoriamento, representação de características dos sinais de DP, e técnicas de reconhecimento de padrões para diferenciar DP de ruídos. O artigo explora o efeito da dissipação de cargas superficiais na variação da localização das descargas parciais. O objetivo é entender como a distribuição e a densidade de carga residual afetam as características da DP em diferentes ciclos de tensão. Usando um sistema baseado no efeito *Pockels*, a pesquisa analisou a localização de DP sob diferentes condições de eletrodo, observando que cargas positivas se dissipam mais rapidamente que cargas negativas. Os resultados indicaram que a localização de DP é significativamente influenciada pelo tempo de dissipação de cargas, especialmente em eletrodos assimétricos.

O trabalho de (HANG *et al.*, 2016) investiga descargas parciais em cerâmicas piezoelétricas, comparando-as com materiais epóxicos. O objetivo é entender como a permissividade relativa elevada em cerâmicas piezoelétricas influencia o campo elétrico intensificado nas falhas, como microfissuras, e a subsequente ocorrência de DP. A metodologia incluiu testes de DP sob campos elétricos AC de 50 Hz, analisando padrões PRPD em cerâmicas piezoelétricas "duras" e "macias". Os resultados mostraram que as cerâmicas piezoelétricas iniciam DP em campos elétricos mais baixos em comparação ao epóxi, e que as cerâmicas macias exibem maior intensificação de DP devido a processos de comutação de domínios.

(GOTZ *et al.*, 2016) explora a importância de padrões PRPD localizados para o reconhecimento de defeitos em cabos de média e alta tensão. O objetivo é desenvolver métodos para identificar tipos de defeitos e avaliar sua severidade, diferenciando entre falhas que exigem substituição imediata e aquelas que podem ser monitoradas a longo prazo. A metodologia utiliza algoritmos de localização de DP que analisam a diferença de tempo entre pulsos de DP e suas reflexões, correlacionando com padrões PRPD específicos. Os resultados sugerem que padrões PRPD localizados podem oferecer uma maneira mais precisa de classificar a gravidade de falhas, permitindo decisões de manutenção mais informadas.

(SUKMA *et al.*, 2018) propõe o uso de redes neurais artificiais (ANN) para a classificação de fontes de DP com base em parâmetros de forma de onda e padrões PRPD (*Phase Resolved Partial Discharge*). O objetivo foi melhorar a precisão na identificação de defeitos em equipamentos de alta tensão. A metodologia incluiu a coleta de dados de DP de quatro fontes artificiais e a utilização de três sensores diferentes, com análise de parâmetros como amplitude de pico e tempo de subida. As redes ANN_WP e ANN_PR alcançaram taxas de reconhecimento acima de 90%, demonstrando que ambos os conjuntos de dados são eficazes para a classificação de DP.

(NOBREGA *et al.*, 2019) apresenta o design e desenvolvimento de um sensor de UHF bio-inspirado para a detecção de descargas parciais (DP) em transformadores de potência. O objetivo era criar uma antena eficiente, compacta e robusta, baseada na geometria da folha da planta *Jatropha mollissima*, para uso em janelas dielétricas de transformadores. A metodologia incluiu a fabricação de uma antena *microstrip* com proteção em epóxi e invólucro de alumínio para resistência mecânica e imunidade a ruídos externos. Testes em câmara anecoica avaliaram parâmetros como ganho e coeficiente de reflexão. O sensor foi comparado com o método padrão IEC 60270 em um *setup* de DP com eletrodos agulha-plano, mostrando alta sensibilidade para cargas aparentes acima de 35 pC, destacando-se pela maior eficácia na detecção de DP em comparação com transdutores convencionais.

O estudo de (AN *et al.*, 2020) foca na análise do impacto da eliminação de ruídos de fundo e fenômenos de defasagem de fase na precisão da classificação de padrões de descargas parciais (DP) em sistemas de cabos de alta tensão. O objetivo principal é melhorar o reconhecimento de padrões de DP, comparando redes neurais com máquinas de vetor de suporte (SVM) para analisar dados de descargas simuladas. A metodologia envolve a extração de características estatísticas de padrões PRPD (*Phase Resolved Partial Discharge*) e a aplicação de dois métodos distintos de eliminação de ruído, avaliando como cada um afeta a precisão do reconhecimento. Os resultados revelaram que a remoção excessiva de ruído pode comprometer os dados de DP, levando a uma menor precisão de reconhecimento, sendo que as SVM são mais sensíveis a erros induzidos por defasagem de fase do que as redes neurais.

O artigo de (XAVIER *et al.*, 2021a) apresenta a aplicação da Transformada *Wavelet* Discreta Estacionária (SDWT) em sinais de DP medidos por antenas monopolo impressas bio-inspiradas. O objetivo é melhorar a precisão na localização de DP sob condições de baixo SNR. A metodologia incluiu testes em um ambiente de laboratório com sinais de DP gerados em uma célula de óleo, utilizando SDWT para processar e filtrar ruídos de fundo. Os resultados demonstraram que a metodologia proposta é eficaz na localização de DP, mesmo em ambientes ruidosos, aumentando a confiabilidade dos sistemas de monitoramento.

Em um segundo estudo, (XAVIER *et al.*, 2021b) realiza uma revisão abrangente sobre o método radiométrico de ultra-alta frequência (UHF) para detecção, classificação e localização de fontes de DP. O objetivo é destacar os avanços no uso de antenas UHF, descrevendo as contribuições de pesquisas recentes. A metodologia envolve a análise de estudos que aplicam antenas para detecção de DP, mostrando como essas técnicas são eficazes para mitigar interferências eletromagnéticas. O artigo sugere que o método UHF pode melhorar significativamente o diagnóstico de equipamentos de alta tensão, sendo uma ferramenta essencial para manutenção preditiva.

(MOREIRA *et al.*, 2021) fornecem uma introdução aos piezoelétricos, destacando suas propriedades como sensores de alta sensibilidade. O objetivo é discutir os avanços na fabricação desses materiais, incluindo o uso de impressão 3D para controle geométrico preciso das cavidades internas, melhorando as respostas piezoelétricas. A metodologia inclui uma revisão dos métodos de produção de piezoelétricos, desde filmes porosos convencionais até técnicas modernas que utilizam polímeros fluorados para maior estabilidade térmica. O estudo destaca o potencial de aplicações em sensores de alta sensibilidade para monitoramento estrutural e acústico.

O trabalho de (BORGHEI, 2021) apresenta um modelo de análise por elementos finitos (FEA) para descargas parciais internas (DP) em uma cavidade cilíndrica preenchida com ar, dentro de um dielétrico sólido, sob tensão senoidal de 60 Hz. O modelo é baseado em dados experimentais, onde uma cavidade cilíndrica foi artificialmente criada em um bloco de ácido polilático (PLA) impresso em 3D. O objetivo é entender o comportamento de DP em dielétricos sólidos e verificar a precisão do modelo em prever padrões de DP em diferentes configurações de cavidades. A metodologia incluiu a construção de cavidades cilíndricas de vários tamanhos dentro dos blocos de PLA e a medição de padrões PRPD, comparando-os com as previsões do modelo FEA. Os resultados indicaram uma boa concordância entre os padrões simulados e medidos, destacando a eficácia do modelo como uma abordagem econômica para prever a confiabilidade de sistemas de isolamento.

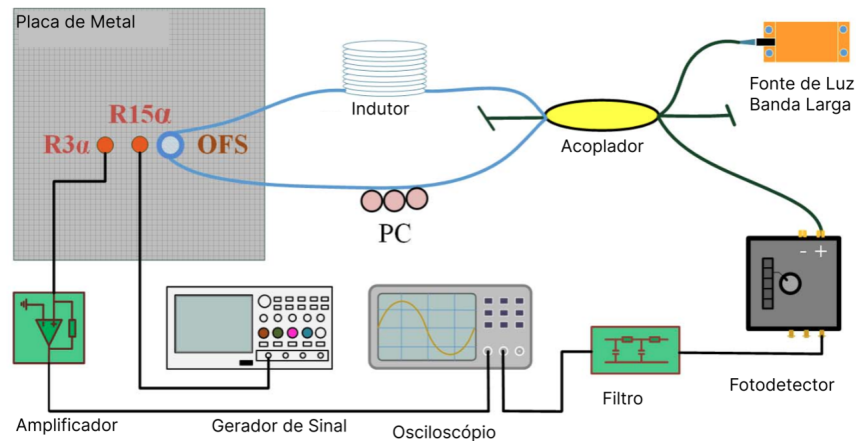
(RAGHAVAN *et al.*, 2021) desenvolve um sistema de monitoramento óptico de baixo custo para transformadores de distribuição, com foco na medição de vibração, temperatura e corrosão. O objetivo foi criar uma solução acessível para o monitoramento em tempo real de ativos de rede, especialmente em áreas urbanas. A metodologia envolveu a instalação de sensores de fibra óptica em transformadores de 500 kVA, com monitoramento remoto via algoritmos de extração de características. O sistema mostrou correlações promissoras com os ciclos de carga e detectou eventos críticos como energização primária, demonstrando potencial para manutenção preditiva da rede elétrica.

(SONG *et al.*, 2022) apresenta uma sonda óptica otimizada para detecção de DP baseada na interferência Sagnac. O objetivo foi desenvolver uma sonda de fibra esqueleto 3D para melhorar a sensibilidade na detecção de sinais acústicos extremamente fracos induzidos por DP. A metodologia envolveu modelagem teórica, simulações matemáticas e calibração da sensibilidade, com testes comparativos entre a sonda óptica desenvolvida e transdutores piezoelétricos comerciais. A sonda óptica teve uma amplitude de detecção 1,27 vezes maior, mostrando-se altamente eficaz e flexível para detectar DP internas, especialmente em condições onde a interferência EMI é problemática.

O artigo de (SONG, 2022) investiga uma sonda óptica otimizada para a detecção de DP baseada em interferometria Sagnac. O objetivo é capturar sinais acústicos extremamente fracos, com um modelo de sensibilidade que considera parâmetros como altura

e comprimento da fibra. A metodologia incluiu a calibração da sensibilidade da sonda e testes comparativos com transdutores piezoelétricos comerciais, conforme apresentado na Figura 2. Os resultados revelaram que a sonda óptica tinha uma amplitude de detecção 1,27 vezes maior, tornando-se uma abordagem eficiente e flexível para detectar DP em equipamentos de alta tensão.

Figura 2 – Esquemático da montagem experimental da sonda óptica.



Fonte: Modificado de Song (2022)

O trabalho de (CRUZ *et al.*, 2023) avalia a aplicação prática de uma antena bio-inspirada para a detecção de DP em equipamentos de alta tensão. O objetivo é validar a eficácia dessa tecnologia em medições de campo em transformadores de potencial de 69 kV, utilizando a antena para identificar frequências específicas de atividade de DP. A metodologia incluiu testes em uma subestação e medições laboratoriais seguindo a norma IEC 60270. Os resultados mostraram que a antena bio-inspirada detectou DPs com precisão, e as frequências captadas em campo coincidiram com as observadas em laboratório, indicando potencial para aplicações futuras com inteligência artificial na classificação de defeitos.

(JUNIOR *et al.*, 2024) propõe uma metodologia para a geração e classificação de padrões de DP resolvidos em fase (PRPD) *phase-resolved partial discharge* usando antenas UHF e circuitos de condicionamento de sinal. O objetivo é reduzir os requisitos de hardware e melhorar a classificação de DP utilizando técnicas de aprendizado de máquina, como redes neurais e máquinas de vetor de suporte. A metodologia incluiu testes com barras de hidrôgeradores, discos dielétricos com cavidades internas e transformadores de potencial, obtendo precisões superiores a 84% na classificação de diferentes tipos de DP.

O estudo de (MAJID *et al.*, 2024) aplica a análise de padrões PRPD para monitorar descargas parciais em máquinas rotativas de alta tensão. O objetivo é detectar precocemente a degradação do isolamento e otimizar as estratégias de manutenção. Sensores indutivos foram instalados nos terminais de uma máquina assíncrona de 11 kV, e os sinais de DP foram analisados para identificar diferentes tipos de descargas, como internas e de

extremidade de enrolamento. A metodologia demonstrou que a análise de padrões PRPD fornece informações valiosas sobre a condição do isolamento, permitindo o planejamento de manutenções preventivas mais eficazes.

(MELO *et al.*, 2024) propõe uma nova metodologia para a classificação de fontes de DP usando aprendizado de máquina e padrões PRPD. O objetivo é diferenciar DP de fontes de interferência ambiental, como sinais de rádio, por meio de múltiplas camadas de processamento de sinal. A metodologia utilizou dados de transformadores de corrente em uma subestação da Eletrobras, aplicando técnicas de extração de características e modelagem de *clusters* para separar pulsos de DP de ruídos. Os testes confirmaram que a abordagem é eficaz na distinção de fontes de DP, melhorando a confiabilidade das análises de estado de equipamentos de alta tensão.

2.2 Monitoramento de descargas parciais (DP) utilizando sensores piezoelétricos.

Em (ASSAGRA, 2013) foram comparadas duas estruturas piezoelétricas diferentes, feitas de materiais piezoelétricos, para a detecção acústica de descargas parciais do tipo impulso e corona. Foram produzidos piezoelétricos com canais abertos de FEP (fluoroetileno propileno) e com cavidades fechadas regulares de PP (polipropileno). Eles realizaram uma análise comparativa da eficácia dessas estruturas na detecção de DP. O estudo revelou que ambas as estruturas são eficazes, com respostas diferentes dependendo da configuração estrutural, oferecendo uma solução de baixo custo para a detecção de DPs em transformadores de distribuição. Os resultados indicaram que as estruturas piezoelétricas com canais abertos foram mais eficazes para captar sinais acústicos em altas frequências, enquanto as estruturas fechadas apresentaram maior sensibilidade global. Este trabalho destaca a viabilidade de usar piezoelétricos econômicos para aplicações em transformadores de distribuição.

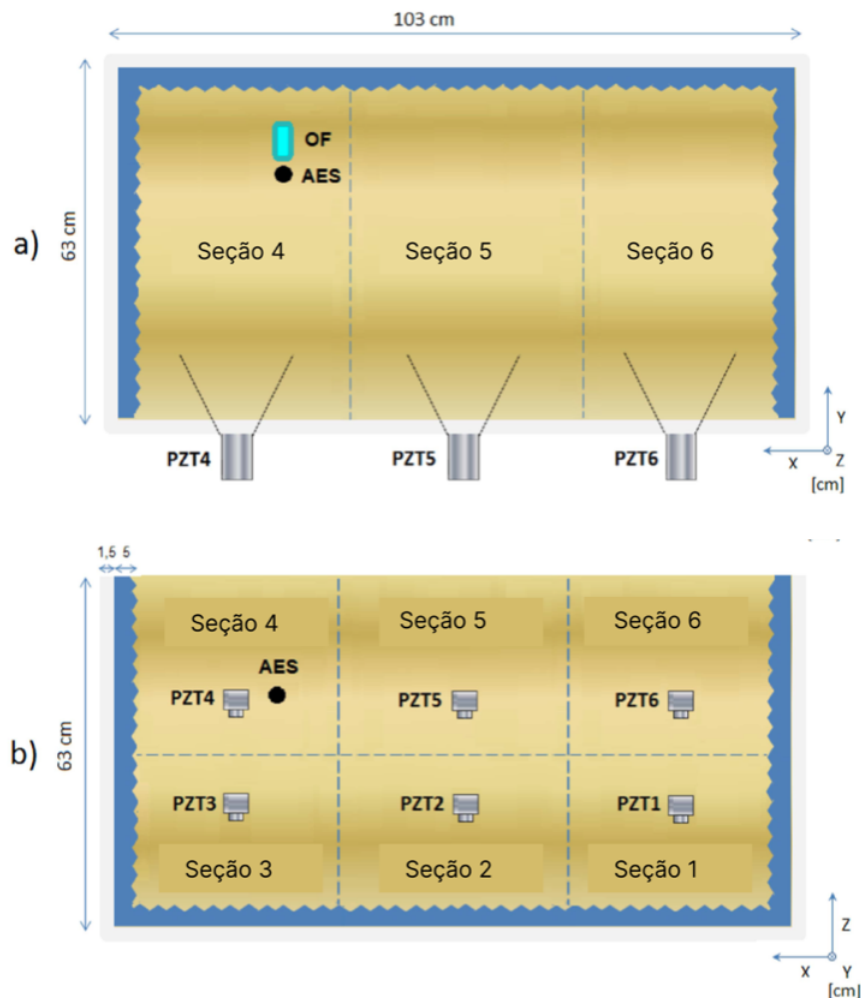
A detecção acústica de descargas parciais (DP) utilizando transdutores piezoelétricos também foi investigada por (PALITO *et al.*, 2014). A cuba possuía 70mm x 70mm x 50mm, e foi submetida a tensões senoidais de 2,5 kV a 10kV. Na pesquisa os autores realizaram experimentos visando avaliar a capacidade dos transdutores em detectar DPs em amostras que se caracterizavam por terem espaços (*gaps*) de ar entre eletrodos. A metodologia consistiu na montagem de um sistema experimental com sensores piezoelétricos captando sinais acústicos gerados por configurações de eletrodos em lacunas de ar de diferentes tamanhos. Os sinais registrados foram correlacionados com a distância da lacuna e a amplitude da tensão. O estudo revelou que os transdutores piezoelétricos são eficazes na detecção de DP, sendo uma opção viável para aplicações em equipamentos de distribuição elétrica, devido ao seu baixo custo e simplicidade.

Considerando a relevância da localização da área onde se encontra o defeito ou a não conformidade, com ocorrência de descargas parciais em grandes equipamentos de potência, e que essa localização pode definir ou não a remoção do equipamento de serviço ou mesmo direcionar as ações da equipe de manutenção nos trabalhos de reparo, (BUA-NUNEZ, 2014) utilizou a detecção acústica para localizar e identificar no interior de uma cuba com óleo onde ocorriam as descargas parciais utilizando PZT instalado no exterior de um tanque. O autor fez a separação do ambiente interno da cuba em 6 seções, como está representado na Figura 3, e PZTs foram alocados em cada um desses locais. Dentro da cuba também foi posicionado um sensor de fibra óptica, que ao detectar alta intensidade de DP, acionava os PZT, para que utilizando método TOA (*time of arrival*) fosse possível prever a região onde estava ocorrendo as DPs.

Figura 3 – Posicionamento dos sensores acústicos.

(a) Vista Superior.

(b) Vista Frontal.



Fonte: Modificado de Búa-Núñez (2014)

(REIS *et al.*, 2014) investiga o uso de piezoelétricos na detecção acústica de DP em transformadores, propondo uma abordagem inovadora baseada na tecnologia brasileira. O objetivo era desenvolver um sensor acústico piezoelétricos e um circuito amplificador,

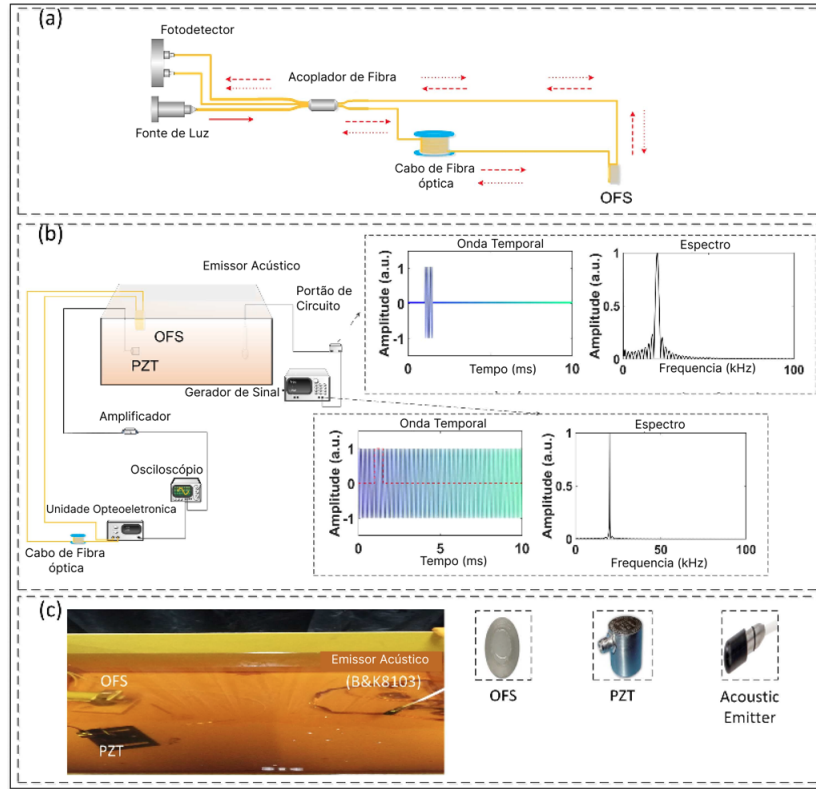
ambos protegidos por um invólucro metálico. A pesquisa envolveu a criação de um gerador autônomo de alta tensão e a aplicação de deconvolução homomórfica para processar os sinais acústicos, removendo ecos e reconstruindo o sinal original. A metodologia mostrou que a deconvolução é eficaz na melhoria da qualidade do sinal, indicando que os sensores piezoelétricos são promissores para aplicações em transformadores.

(CASTRO *et al.*, 2016) destaca uma solução promissora com sensores piezoelétricos de baixo custo, potencialmente revolucionando o monitoramento de DPs pela sua acessibilidade e eficiência. Este avanço representa um passo importante para a manutenção preventiva e a melhoria contínua da infraestrutura de energia elétrica. O monitoramento de descargas parciais é essencial para garantir a confiabilidade dos transformadores de potência. Embora métodos tradicionais ofereçam soluções eficazes, seu alto custo e invasividade limitam a adoção generalizada.

(CHOU, 2018) explora a medição e análise de DP em equipamentos de média e alta tensão, usando transformadores de corrente de alta frequência (HFCT). O objetivo é identificar e classificar diferentes tipos de DP, como descargas internas, superficiais e de ponta. A metodologia incluiu a análise das características de distribuição de fase dos sinais de DP, comparando os resultados com padrões laboratoriais. A pesquisa destaca a importância de um banco de dados de DP para desenvolver sistemas de identificação automática, proporcionando uma base para melhorar o diagnóstico de equipamentos de alta tensão em campo.

No estudo de (QIAN *et al.*, 2018), os autores exploram um sensor óptico Sagnac desenvolvido para melhorar a detecção acústica de descargas parciais (DP) em transformadores de potência. O objetivo era aumentar a sensibilidade na detecção de emissões acústicas originadas dentro dos enrolamentos, onde a atenuação do sinal é um problema significativo. A metodologia incluiu o uso de sensores de fibra óptica implantados dentro de um transformador de 50 kV, comparando o desempenho com transdutores piezoelétricos convencionais. Os resultados demonstraram que o sensor Sagnac, conforme Figura 4, possui maior sensibilidade para detectar ondas acústicas internas, oferecendo uma solução promissora para monitoramento preciso de DP.

Figura 4 – Esquemático de fibra óptica de Sagnac e desenho experimental.



Fonte: Modificado de Qian (2018)

O estudo de (ZHANG, 2022) investiga o processo de transição de descargas parciais (DP) para arco elétrico em sistemas de isolamento óleo-papel, destacando a importância de entender como os parâmetros físicos mudam durante essa transição. O objetivo é desenvolver um modelo experimental usando sensores de fibra óptica para detectar ultrassom, temperatura e pressão, além de sensores elétricos tradicionais. A metodologia incluiu cinco modelos de descarga diferentes, como descarga de agulha-placa e de placa-placa. Os resultados mostraram que a amplitude e a frequência das ondas acústicas caem significativamente após a ruptura por arco. A pressão causada pelo arco mostrou uma relação com o tipo de descarga, e as mudanças de temperatura no óleo foram mínimas e difíceis de detectar. Este trabalho demonstra o potencial dos sensores ópticos em ambientes com forte interferência eletromagnética.

(WANG, 2023) propõe um modelo de circuito otimizado para simular DP em lacunas de ar, abordando as limitações de modelos anteriores. O objetivo é representar com mais precisão os processos físicos da DP, incluindo a variação da resistência da lacuna e o impacto das cargas induzidas. Usando simulações no *Matlab/Simulink*, o estudo demonstrou que o modelo melhorado reproduz fielmente as características de DP, oferecendo *insights* importantes para o desenvolvimento de sistemas de monitoramento online de DP.

(SIKORSKI, 2023) desenvolveu um sistema de baixo custo visando monitorar as descargas parciais que ocorrem dentro de um transformador, como apresenta a Figura

5. Foi criado um sistema de aquisição de baixo custo, usando transdutores piezoelétricos e a técnica de emissão acústica (AE). O objetivo é fornecer uma solução econômica e portátil para monitoramento de transformadores em subestações, especialmente em países em desenvolvimento. A metodologia utilizou um microcontrolador *Teensy 3.2* para contar pulsos acústicos, com dados armazenados em um cartão de memória para fácil análise. O sistema mostrou ser altamente eficaz na detecção de DP, com instalação simplificada e custo reduzido, promovendo maior acessibilidade a tecnologias de diagnóstico. O sistema seguiu a norma IEC TS 62478 e conseguiu resultados que comprovam a alta capacidade de detecção do método acústico quando otimizado para as frequências características.

Figura 5 – Montagem experimental em um transformador de 3 fases com 10 MVA de potência. PT - Transdutor piezoelétrico, DUT - sistema de baixo custo proposto e MS - referência de monitoramento portátil de descargas parciais.



Fonte: Modificado de Sikorski (2023)

2.3 Resumo do capítulo.

Neste capítulo, foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre as pesquisas mais relevantes no campo do monitoramento de descargas parciais em equipamentos de alta tensão, empregando sensores piezoelétricos. Na revisão, foram apresentadas as principais contribuições dos trabalhos pesquisados, destacando-se as características dos sensores e ensaios realizados.

3 Fundamentação teórica

Neste capítulo, buscou-se apresentar, de forma concisa, conceitos teóricos relevantes relacionados às descargas parciais e aos piezoelétricos, visando fornecer ao leitor os elementos necessários para compreender a pesquisa desenvolvida. São abordados os tópicos básicos relacionados às descargas parciais, funcionamento básico dos materiais piezoelétricos e métodos de medição de descargas parciais gerais, com foco nos com utilização de piezoelétrico.

3.1 Descarga parcial

A descarga parcial (DP) é definida pelas normas IEC 60270 (2000) e NBR (1981) como uma descarga elétrica localizada que curto circuita parcialmente um meio isolante entre dois condutores, podendo ou não ocorrer adjacientemente ao eletrodo ou a outra parte de isolamento. Ela também pode ser descrita como um pulso parcial de tensão ou corrente que ocorreu em determinado isolamento durante um teste, IEC 60270 (2000).

Em (BARTNIKAS, 1979) define-se as descargas como sinais elétricos pulsantes incompletos, intermitentes e rápidos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de eletricidade em um meio isolante. As descargas ocorrem devido às imperfeições presentes nos materiais isolantes, que geram intensos campos elétricos tanto na superfície como internamente nestes materiais. Assim, é possível relacionar que a ocorrência da descarga parcial depende da intensidade do campo nas proximidades destas imperfeições, bem como do tipo de corrente elétrica aplicada, seja ela alternada (CA) ou contínua (CC). Logo, as DPs só irão ocorrer quando um campo elétrico conseguir romper a rigidez dielétrica, ou seja, submeter o dielétrico a tensões que excedam os seus níveis de suportabilidade. (LEMKE, 2008).

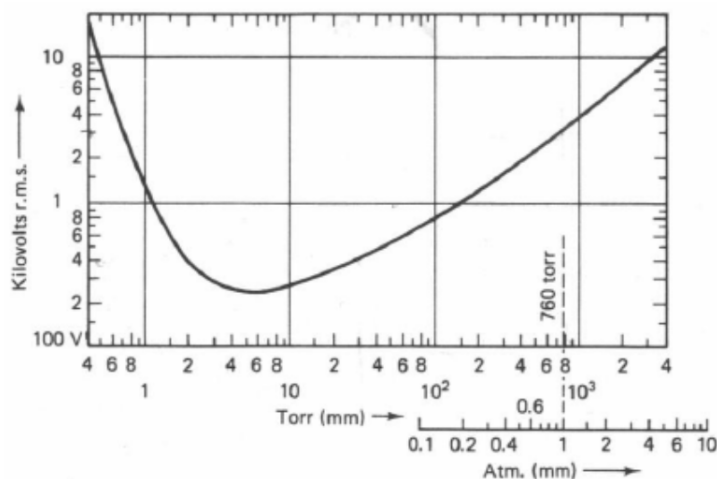
(NIEMAYER, 1995) classificou a ocorrência das descargas em sistemas isolantes por meio da sua intensidade: baixa, média ou alta. Do ponto de vista físico, a criação de uma avalanche de elétrons que se sustente só iria ocorrer em gases. Assim, as DPs em outros meios, sólidos e líquidos, só irão ocorrer em vacúolos gasosos, como vazios ou fissuras em sólidos, assim como bolhas de ar em líquidos. O fenômeno das descargas que ocorre em ar ambiente, como *glow*, o *streamer* e a *leader discharge*, também podem ocorrer em compartimentos gasosos fechados. O pulso de carga criado pela descarga *glow* é na ordem de poucos pC (baixa intensidade), a descarga *streamer* cria pulsos de 10 pC a 100 pC (média intensidade) e a *leader discharge* gera pulsos que ultrapassam 1000 pC (alta intensidade) (LEMKE, 2008).

3.1.1 Condições necessárias para a ocorrência de descarga parcial

Para que a descarga parcial possa acontecer, algumas condições precisam ser satisfeitas. Uma condição seria a presença de um campo elétrico intenso o suficiente para acelerar as cargas livres, fazendo assim uma avalanche. Outro requisito seria a presença de cargas livres, elétrons e/ou íons positivos, em um vácuo preenchido com algum tipo de gás. Essas magnitudes são chamadas de E_i , campo no interior da cavidade, E_r , campo mínimo de ruptura e E_e campo de extinção. E_i deve ser maior ou igual a E_r para que as descargas se iniciem e para que a DP pare ela precisa ficar abaixo de E_e (BOGGS, 1990), (FUJIMOTO *et al.*, 1992), (MORSUIS, 1995).

Essas magnitudes dependem de parâmetros relacionados aos materiais existentes na montagem e aos fatores do ambiente que ele está sendo exposto, como: temperatura e pressão, também da geometria e tamanho da cavidade (DISSADO, 1992), (FUJIMOTO *et al.*, 1992), (MORSUIS, 1993), (NIEMEYER, 1991). Se houver a possibilidade de relacionar o valor de E_i com a tensão aplicada, levando-se em consideração a forma e a localização da cavidade, bem como a presença de cargas superficiais, a tensão de início da descarga, PDIV ou V_i , pode ser estimada (FUJIMOTO *et al.*, 1992)(BRAUN, 1991). De maneira similar, é possível relacionar e estimar a tensão de extinção, PDEV, com E_e . Essa correlação é apresentada na Figura 6, descrevendo a curva de Paschen utilizando os valores de E_r e a tensão de ruptura V_r , apresentando uma curva típica para o ar.

Figura 6 – Curva de Paschen.



Fonte: Modificado de Kreuger (1989)

3.1.2 Classificação das descargas

As descargas parciais podem ser classificadas de acordo com sua origem, podendo ocorrer superficialmente, externamente, ou em cavidades internas de um material sólido, devido a contaminantes em líquidos isolantes, ou a bolhas, entre outras situações (REIS *et al.*, 2014)(KUMAR, 1997). De maneira geral, (MASON, 1995) aborda três tipos de

descargas: a superficial, a externa e a interna. A Figura 7 apresenta as classificações básicas de uma descarga.

Figura 7 – Tipos de descargas parciais.



Fonte: Modificado de Kreuger (1989)

Estas descargas ocorrem em gases, líquidos ou na superfície de um material dielétrico. Para que haja essa descarga, é preciso que o componente de campo elétrico tangente a superfície exceda um certo valor crítico. Dessa forma, o processo de descarga é iniciado (GULSKI, 1995). Com a existência dessas descargas, o material dielétrico sofre algumas deformações ao longo do tempo, fazendo com que sejam criados alguns caminhos condutores ao longo da direção do campo elétrico. Esse fenômeno é conhecido como trilhamento, e pode ocasionar a ruptura total do material dielétrico (MASON, 1995).

3.1.2.1 Externas ou corona

As descargas externas que ocorrem em ar ambiente geralmente são conhecidas como “descarga corona”. Essa situação é muito comum em eletrodos do tipo ponta ou que possuam pequena curvatura na sua extremidade. Quando o campo supera a rigidez dielétrica do gás presente ao redor desta extremidade, a descarga se inicia. As descargas externas desencadeiam processos químicos tais que podem ser prejudiciais ou não aos materiais isolantes. O efeito corona no ar produz ozônio, e esse gás pode causar fissuras nas isolações poliméricas. Além disso, óxidos de nitrogênio em conjunto com vapor d’água geralmente corroem os metais. Considerando os sistemas de isolamento, as descargas externas reversíveis no ar são importantes para classificação de anéis de isoladores, por exemplo, para que esses possam ser utilizados em linhas de transmissão de alta tensão (LEMKE, 2008).

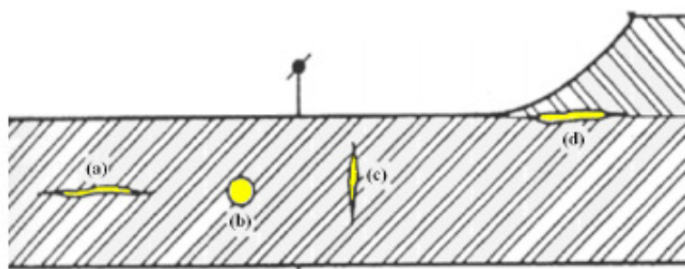
3.1.2.2 Interna

Para que as descargas aconteçam, algumas condições devem ser satisfeitas, como apontado no início dessa seção. No caso de sólidos e líquidos, assim como nos outros tipos de descargas, ela irá ser autossustentada, ocorrendo somente em gás ou em compartimentos gasosos fechados. Assim, em ambientes sólidos, a descarga só será iniciada em cavidades que contenham ar, como algum defeito da estrutura molecular deste material sólido. Além de fatores relacionados ao processo de manufatura do isolante sólido, a variedade de estresse

que o material é submetido ao longo de sua vida contribui para aparecimento de cavidades gasosas (BOGGS, 1990), (GJAERDE, 1997).

Já em líquidos, de acordo com (LEMKE, 2008), essas cavidades são oriundas de bolhas gasosas, que são geradas a partir de fenômenos térmicos e elétricos devido à presença de vapor d'água. Essas regiões podem ser geradas em ambientes com campo elétrico concentrado, conforme é apresentado na Figura 8. A DP interna também pode acontecer numa região totalmente inserida no dielétrico ou entre o dielétrico e o eletrodo (KRUEGER, 1989). Em componentes isolantes, as DP internas geralmente acontecem em instrumentos que utilizam resina isolante fundida, transformadores e cabos; podendo se propagar de maneira muito lenta ou rápida, ou seja, pode ser que demore alguns segundos ou até anos para que o dielétrico seja totalmente rompido (DISSADO, 1992) (KRUEGER, 1989).

Figura 8 – Tamanhos típicos de compartimentos gasosos em dielétricos sólidos.



Fonte: Modificado de Kreuger (1989)

Outro ponto importante é que as descargas internas também poderão aparecer na interface de dielétricos sólidos e líquidos, sendo que, nesse tipo de situação, pode ser prejudicial ao dielétrico se houver criação de um “delta” ao longo deste. Adicionalmente, há o caso das descargas em subestações isoladas a gás (GIS). Nesse caso a descarga se inicia por partículas livres ou fixas e pode ser prejudicial, devido à possibilidade da dissociação do gás. Consequentemente, podendo gerar uma deterioração do material sólido isolante ou a criação de substâncias perigosas que podem levar ao início da ruptura dielétrica total, caso ocorra uma sobretensão (LEMKE, 2008).

3.1.3 Método de detecção de DP

3.1.3.1 Método elétrico convencional

Para o método elétrico convencional existem 3 circuitos básicos, apresentados na Figura 9, para medição de DP, possuindo algumas diferenças entre si na montagem da impedância Z_m , sendo estes circuitos oriundos da norma IEC 60270. A ideia consiste na medição da queda de tensão sobre uma determinada impedância que pode ser observada pelos impulsos de corrente no circuito exterior à amostra. Geralmente, a impedância

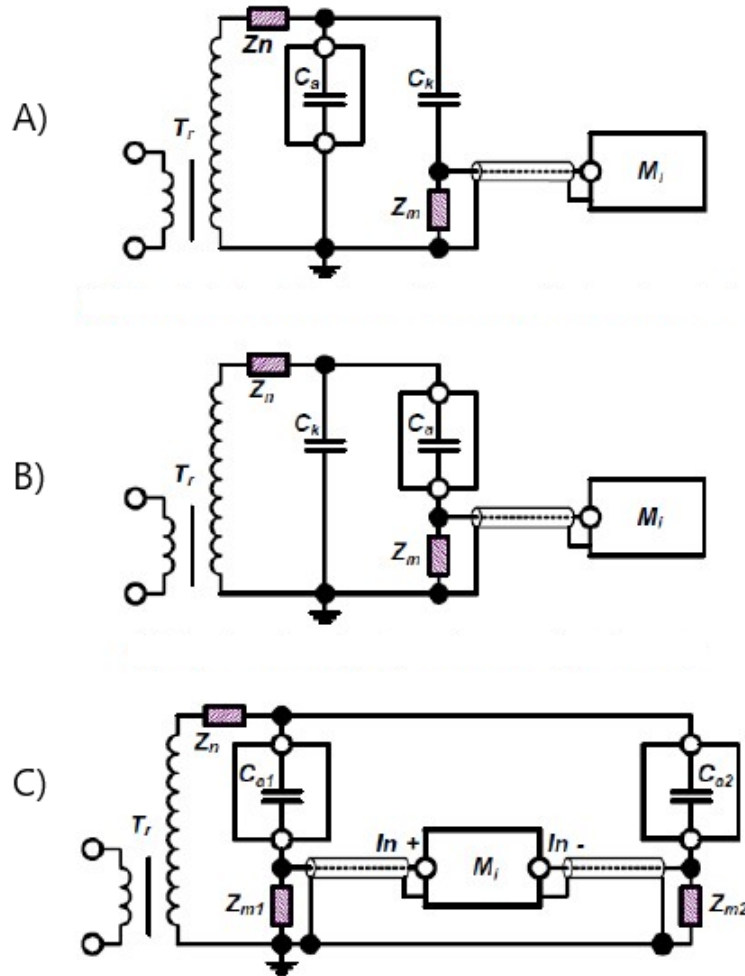
de medição consiste num resistor de medição, um indutor para filtrar as correntes de determinadas frequências e um capacitor de medição.

Figura 9 – Posicionamento dos sensores acústicos.

- (a) Impedância de medição Z_m em série com o capacitor de acoplamento C_r .

- (b) Impedância de medição Z_m em série com objeto de teste Ca .

- (c) Ponte balanceada utilizando o braço $(Ca2, Zm2)$ como referência em paralelo com o braço de teste $(Ca1, Zm1)$.



Fonte: Modificado de Lemke (2008)

3.1.3.2 Método HF/VHF/UHF

Com frequências que vão de 0,3 MHz a 30 MHz (HF) e 30 MHz a 300 MHz (VHF), o objetivo deste método é a captação de sinais elétricos oriundos de descargas, como, por exemplo, as descargas que acontecem nos isoladores poliméricos, que apresentam duração

de nano segundos no ponto da origem. Deste modo, é preciso o uso de sensores indutivos e capacitivos para a captação desse sinal (MUHR *et al.*, 2005).

Para pulsos de descarga com duração ainda menor que nano segundos, o método utilizado para captação é o UHF, visto que a frequência do sinal chega a GHz. Existem dois tipos de sistemas para esse tipo de detecção: banda estreita, com intervalo de alguns mega-hertz, e banda larga, chegando a 2 GHz (GUTNIK, 2014).

3.1.3.3 Método químico

O método químico é um dos mais tradicionais e consiste em uma análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo isolante do transformador. A quantidade e tipos de gases que se encontram ali dissolvidos fornecem indícios de sua normalidade ou do provável tipo de ocorrência de defeito ou de dano interno (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991*), (IEEE C57.104-1991).

A análise cromatográfica de gases em óleo isolante constitui num dos principais métodos para detectar e avaliar as condições de operação que possam estar ocorrendo internamente ao transformador de potência. Os gases gerados no óleo, depois de identificados, se transformam na primeira indicação do mau funcionamento do equipamento (IEEE, 1999)(IEEE 60599-1999). Os métodos mais famosos na literatura para esse tipo de ensaio são:

- Rogers na revisão da NBR 7274/IEC 60599-1999
- Rogers previsto na IEEE C57.140-1991
- Rogers versão 1975 modificada (ROGERS, 1995)
- Doernenburg previsto na IEEE C57.104-1991
- Doernenburg 1991 (DOERNENBURG, 1991)
- Proposto pelo (*Laboratoire Central des Industries Électriques, (LCIE)*)
- Triângulo de Duval (DUVAL, 1989)

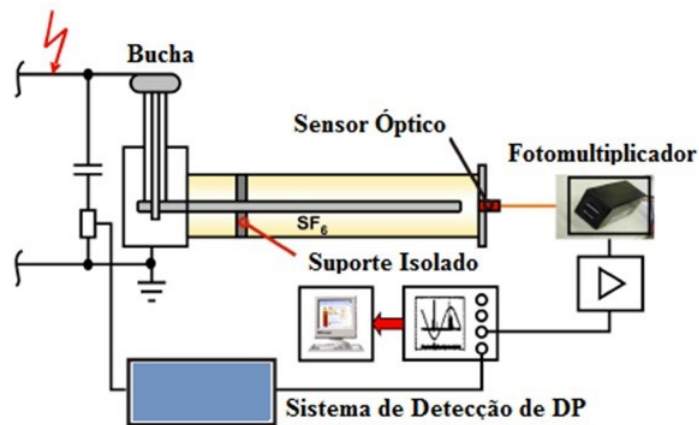
3.1.3.4 Método óptico e opto-acústico

Na detecção óptica, existem basicamente dois métodos fundamentais para captar a DP. Um dos métodos é a detecção direta do sinal que é produzido durante o impulso da DP e o outro método, que também é conhecido por método opto-acústico, é baseado nos efeitos acústicos de uma DP, nesse caso, a onda acústica causada pela DP influencia fibras ópticas que existem no interior do equipamento. O sinal é transmitido através de uma fibra, entretanto não há grande uso desse método pois ela necessita de contato visual para

que a DP possa ser visualizada. Entretanto, a fibra tem sido bem utilizada para a medição e monitoramento de linhas aéreas por meio desse método (SCHWARZ *et al.*, 2007).

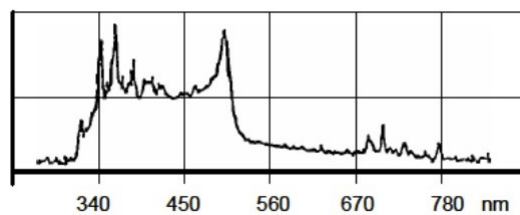
A detecção de DP por sensores ópticos é utilizada também para medição de equipamentos isolados a gás, conforme é apresentado na Figura 10 . Essa configuração possibilita a detecção óptica de modo que as interferências causadas por outras fontes de luz possam ser negligenciadas, sendo apresentado na Figura 11 um espectro óptico típico de uma descarga em gás SF₆.

Figura 10 – Sistema experimental para detecção e medição óptica de DP.



Fonte: Modificado de Schwarz (2008)

Figura 11 – Espectro óptico para ruptura dielétrica em gás SF₆.



Fonte: Modificado de Schwarz (2007)

3.1.3.5 Método acústico

A detecção da descarga pelo método acústico consiste na utilização de um sensor que possa “escutar” uma descarga. Essa técnica é antiga e ficou conhecida no século primeiro quando Lucretius utilizava este método para relacionar relâmpagos e seu som vindo de um trovão. Sabia-se que a luz vinha primeiro e pouco tempo depois o trovão, e, depois, com Marsenne (1588-1648) veio a descoberta que a velocidade do som é de 316,46 m/s utilizando um pêndulo (MONRO, 1952), (BERANEK, 1949).

A velocidade de propagação da onda no meio depende de como aquele meio absorve a propagação sonora. No gás a velocidade é determinada pela equação de estado para

transformações adiabáticas, no sólido pela lei de Hooke e no líquido pelas propriedades elásticas do líquido (LUNDGAARD, 1992).

Na detecção de DPs pelo método acústico, através da captação de ondas mecânicas oriundas dessas descargas, é possível afirmar que o som gerado é proveniente, na maioria das vezes, de canais de corrente (*streamers*) para o caso de transformadores imersos em óleo isolantes. Estes são formados dentro de cavidades preenchidas com gás. Na presença de calor, estas cavidades se expandem provocando micro explosões que se propagam por meio do óleo isolante do transformador, na categoria de ondas de pressão. Esta situação é semelhante à formação de trovões depois de uma descarga atmosférica (LAZAREVICH, 2003).

Para o caso do óleo dentro do transformador, é adotado o valor de 1413 m/s a 20°C para a velocidade do som no óleo. Dessa forma, é possível calcular a distância entre o detector e a fonte da descarga (IEEE C57.127-2007). Com relação à localização da origem das descargas no interior do equipamento, como por exemplo num tanque de transformador, para um sistema puramente acústico, é possível detectar a diferença no tempo de chegada da onda sonora de um sensor em relação ao outro. Para sistemas puramente acústicos ou procedimentos mesclados, a localização da fonte de descarga é distinta (IEEE C57.127-2007).

Os principais pontos negativos na captação acústica segundo (ELEFTHERION, 1995) são: a propagação das ondas sonoras não é perfeitamente esférica; há ocorrência de diversas reflexões sofridas pelas ondas sonoras, provocando múltiplos caminhos de propagação e enfraquecimento do sinal acústico; e perturbações, como absorção e dispersão, que o óleo mineral provoca nas ondas sonoras. Outro problema descrito pela (IEEE C57.127-2007) é que a origem da onda sonora, para o caso do transformador, pode ser mecânica, térmica ou da descarga propriamente dita.

3.2 Piezoelétricos

Neste tópico são apresentados conceitos relacionados ao funcionamento dos piezoelétricos, para que seja possível uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido, que consiste no monitoramento de descargas parciais em uma cuba com óleo, simulando um tanque de transformador. Para isso será apresentado o efeito piezoelétrico e alguns conceitos que o envolvem.

3.2.1 História da piezoelectricidade

A piezoelectricidade pode ser definida como sendo “a propriedade exibida por alguns materiais cristalinos assimétricos quando estão sujeitos a uma deformação mecânica, em

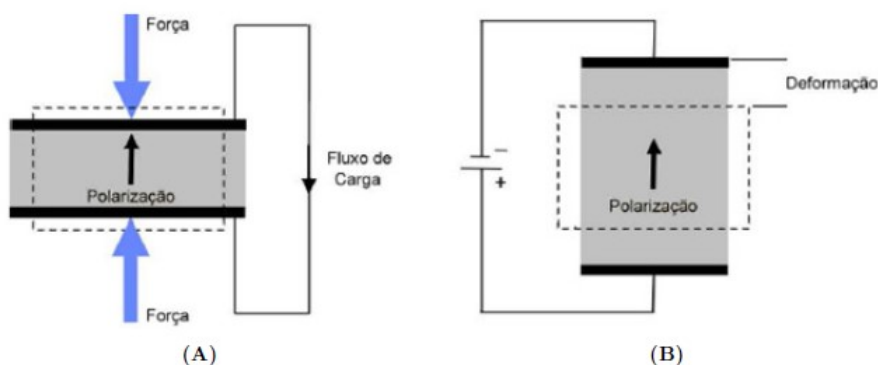
direção apropriada, de apresentar uma polarização elétrica proporcional à pressão”, segundo o dicionário da (NASA) *National Aeronautics and Space Administration*.

A piezoelectricidade foi descoberta pelos irmãos Pierre e Jaques Curie em 1880, quando esses observaram o aparecimento de cargas superficiais em alguns materiais com estrutura cristalina (BOTTOM, 1968). Notaram que estas estruturas apresentavam uma geometria molecular bipolar com alinhamento assimétrico. Com a polarização, cargas elétricas são induzidas nas superfícies desses materiais, o que mantém a estrutura em equilíbrio elétrico. Assim, quando o material é submetido a uma força externa ou tensão elétrica, esse equilíbrio é perturbado ocasionando uma movimentação das cargas (LANG, 2005) (TRAINER, 2003). Para o caso da excitação mecânica gerar uma resposta elétrica, denomina-se piezoelectricidade direta; já quando uma excitação elétrica gera uma resposta mecânica se nomeia de piezoelectricidade indireta (BALLATO, 1996) (BASSO *et al.*, 2001) (KRESSMANN, 2001). Na Figura 12 está apresentado um esquemático de como se dá o efeito da piezoelectricidade.

Figura 12 – Efeito da piezoelectricidade.

(a) **Efeito Direto**

(b) **Efeito Indireto**



Fonte: Modificado de Falconi (2010)

Em 1881, Gabriel Lippmann, um físico francês, formulou a teoria matemática da piezoelectricidade, que previa o efeito inverso. Ele demonstrou teoricamente que a aplicação de um campo elétrico a um cristal piezoelétrico resultaria em uma deformação mecânica. Esta teoria foi confirmada experimentalmente pelos irmãos Curie, consolidando a base teórica do efeito piezoelétrico. "A teoria da piezoelectricidade prevê que a aplicação de um campo elétrico a um cristal piezoelétrico resulta em uma deformação mecânica correspondente." (LIPPMANN, 1881).

No início do século XX, a piezoelectricidade começou a ser explorada em aplicações práticas, como a criação de transdutores ultrassônicos. Um dos primeiros usos foi na detecção de submarinos durante a Primeira Guerra Mundial, onde os transdutores piezoelétricos eram usados para gerar e detectar ondas ultrassônicas.

Na década de 1940, com a Segunda Guerra Mundial, houve um aumento significativo na pesquisa e desenvolvimento de materiais piezoelétricos sintéticos, como o titanato de bário e as cerâmicas piezoelétricas. Esses materiais mostraram-se superiores aos cristais naturais em muitas aplicações.

Em 1952, o PZT foi descoberto e rapidamente se tornou um dos materiais piezoelétricos mais utilizados devido as suas excelentes propriedades piezoelétricas e facilidade de fabricação. O PZT é amplamente utilizado em sensores, atuadores, e transdutores. "O desenvolvimento do titano-zirconato de chumbo (PZT) marcou uma revolução na aplicação de materiais piezoelétricos devido as suas propriedades superiores e versatilidade de uso." (JAFFE *et al.*, 1952).

Na segunda metade do século XX, os cristais piezoelétricos, especialmente o quartzo, tornaram-se fundamentais em dispositivos eletrônicos, como osciladores de frequência, filtros de rádio e relógios de quartzo. A piezoeletricidade também encontrou aplicações em microfones, alto-falantes, sensores de pressão, e dispositivos médicos, como ultrassons.

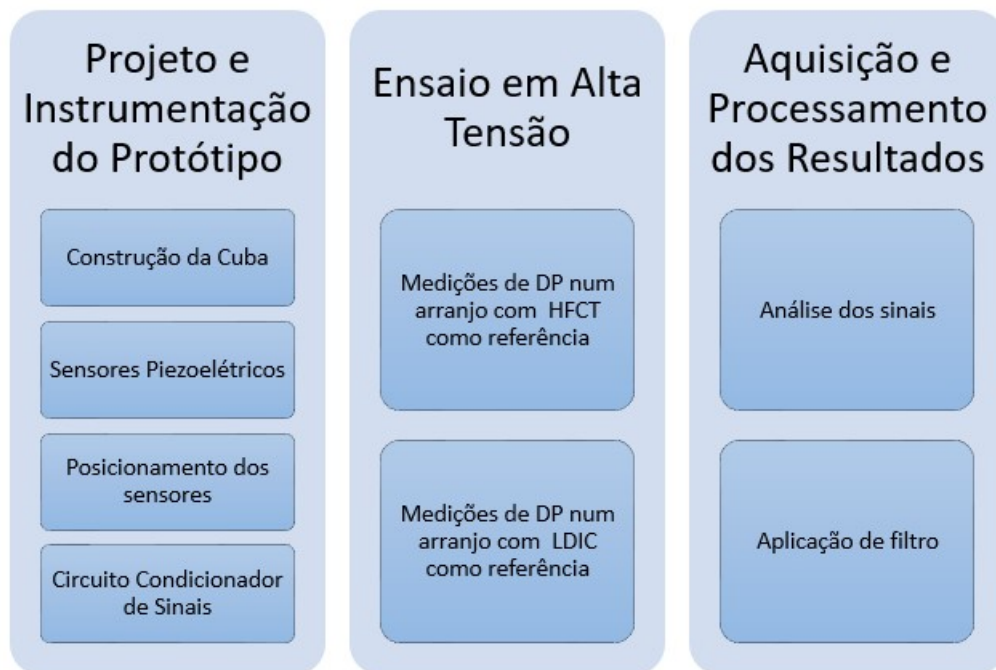
No século XXI, a pesquisa em piezoeletricidade se expandiu para incluir nanotecnologia e novos materiais, como nanofios piezoelétricos e filmes finos. Esses avanços permitiram o desenvolvimento de dispositivos menores e mais eficientes. A piezoeletricidade também está sendo explorada em tecnologias de energia, como a colheita de energia (*energy harvesting*) para alimentar pequenos dispositivos eletrônicos a partir de vibrações ambientais.

"A piezoeletricidade não é apenas um fenômeno físico, mas uma ponte vital entre a energia mecânica e a elétrica, com aplicações que vão desde sensores simples, até dispositivos médicos complexos." (HEYWANG; LUBITZ; WERSING, 2008).

4 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritas as metodologias utilizadas, a instrumentação eletrônica dos sensores e a composição experimental. Na primeira seção, serão descritos os processos necessários para a construção do protótipo, desde a escolha de materiais até a escolha de posicionamento dos sensores. Na segunda seção, são apresentados os arranjos montados e quais equipamentos foram utilizados em conjunto para validar os testes. Na terceira seção, serão apresentados os procedimentos utilizados para aquisição e processamento dos resultados. O fluxograma geral dos procedimentos adotados no trabalho é apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma geral dos procedimentos adotados no trabalho.



Fonte: Autoria própria

4.1 Projeto e instrumentação do protótipo

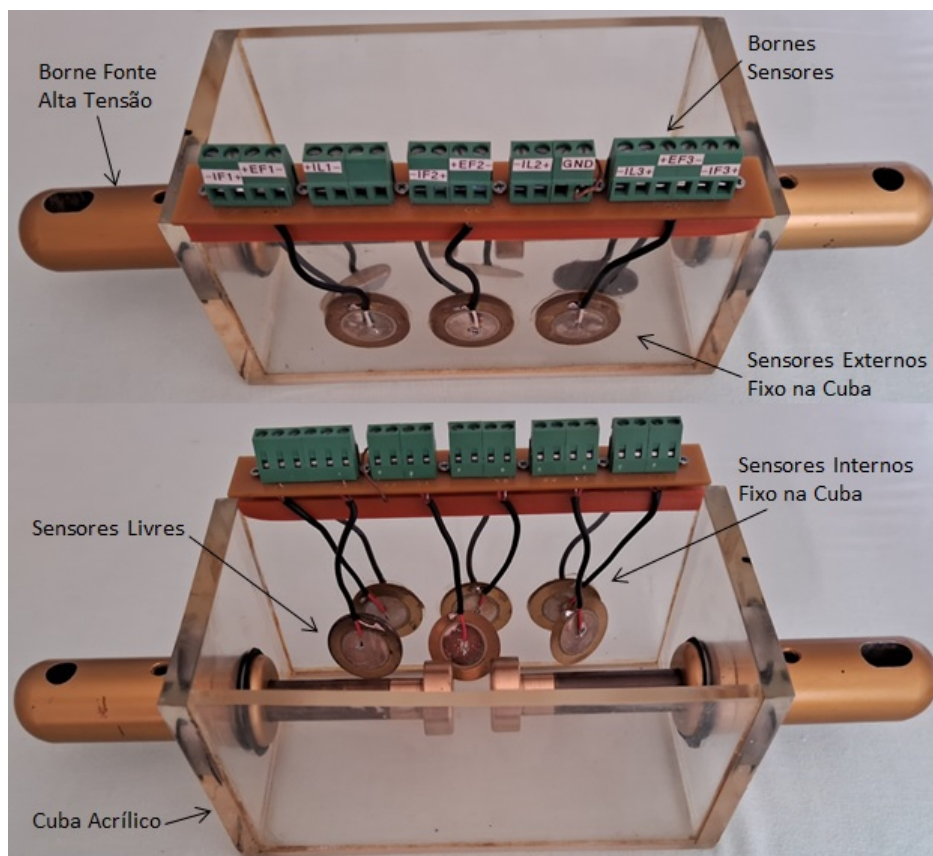
Os procedimentos aplicados nesta etapa do trabalho podem ser divididos em duas etapas distintas: projeto e desenvolvimento da estrutura, e instrumentação e testes em laboratório dos sensores vislumbrando o monitoramento de descargas parciais em equipamentos de alta tensão com sensores piezoelétricos.

4.1.1 Construção da cuba

A cuba foi construída visando desenvolver uma estrutura que permita a ocorrência de descargas parciais e tenha o uso de um isolante comercial que é o óleo de transformador. O arranjo considerou também ter um dispositivo que tivesse um isolamento para tensões de aproximadamente 15 kV. Na Figura 14 é mostrada a imagem da cuba fabricada em acrílico com dimensões internas 150 x 75 x 80 mm³ e espessura de parede de 8 mm. Dois eletrodos metálicos foram fixados na paredes de menor dimensão da cuba para serem conectados aos polos de tensão elétrica. O sistema mecânico de fixação dos eletrodos permite o ajuste do espaçamento entre eletrodos.

Para a isolação elétrica, foi utilizado o óleo de transformador comercial. Sabendo que cavidades seriam formadas ao energizar o sistema, os eletrodos foram posicionados a 7 mm de distância entre si. A cuba foi preenchida com óleo de transformador para evitar descargas superficiais ou laterais indevidas. O volume de óleo utilizado foi de aproximadamente 800 ml capaz de cobrir os eletrodos.

Figura 14 – Cuba com os sensores colados



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Sensores piezoelétricos

O sensor utilizado é constituído de uma cerâmica piezoelétrica de Zirconato Titanato de Chumbo (PZT). Por apresentar as características contidas na Tabela 1 é usada comercialmente como gatilho de balança, sensor de força, sensor de pressão, sensor de aceleração, sistema de som e microfone.

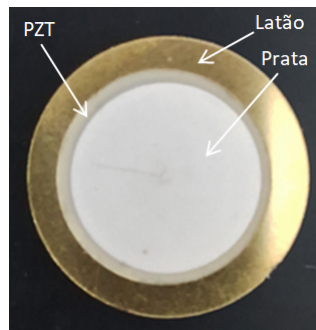
Tabela 1 – Propriedades do sensor piezoelétrico utilizado.

Propriedades	Valores
K	1600 (1 kHz)
tan	0,02(δ)
E_c	11,8 (kV/cm)
PR	23,0(μ C/cm ²)
P_{sat}	27,7(μ C/cm ²)
kef	0,50
kp	0,56
d_{31}	190 ($\times 10^{-12}$)(Vm/N)
d_{33}	350 ($\times 10^{-12}$)(Vm/N)
g_{31}	13,7 ($\times 10^{-3}$)(Vm/N)
g_{33}	16,6 ($\times 10^{-3}$)(Vm/N)
k_{31}	0,40
k_{33}	0,53

Fonte: Autoria própria

O sensor tem um formato circular e é composto por dois terminais, sendo um de latão e outro de prata, e a cerâmica localizada entre os eletrodos. Do ponto de vista eletrônico, o piezoelétrico tem o modelo de um capacitor, pois a cerâmica apresenta propriedade dielétrica, como também propriedades piezoelétricas. Na Figura 15 pode ser visto o PZT utilizado.

Figura 15 – Sensor piezoelétrico utilizado



Fonte: Autoria própria

4.1.2.1 Posicionamento dos sensores piezoelétricos na cuba de óleo

A cuba foi instrumentada com 9 sensores conforme destacado na Figura 14. Os sensores piezoelétricos foram estrategicamente posicionados e são classificados como EF

– Externo Fixos, IF – Interno Fixo e IL – Interno Livre. O posicionamento permite identificar o sensor que adquire o sinal mais intenso considerando a distância do sensor e fonte geradora da descarga parcial. Os sensores foram numerados de maneira crescente da esquerda para a direita da cuba.

Os bornes que alimentam os eletrodos foram fixados nas laterais menores da cuba, e foram alimentados com uma tensão elétrica entre 8-10 kV. Os eletrodos utilizados são o reto e o eletrodos de ponta cônica, o que possibilita melhor descarga parcial, ou seja, conduz a descarga para um ponto. Os eletrodos podem ter suas distâncias relativas ajustadas por um sistema de molas e parafusos internos aos bornes.

Os sensores piezoelétricos que foram fixados internamente e externamente na cuba não tiveram nenhuma modificação estrutural. Considerando a necessidade da obtenção de vários pontos de medição e a possibilidade da detecção da diferença dos níveis de sinais capturados, com relação à distância do sensor para o ponto da fonte da descarga parcial. Os sensores foram posicionados e fixados por meio de colagem com o terminal de latão apoiado na superfície do acrílico da cuba.

Considerando que o mecanismo de excitação da descarga parcial pode estar associado às perturbações de campos, foram usados alguns sensores com material ferro magnético com e sem campo constante. Nesse caso, pode existir a possibilidade de aumento de sensibilidade desses sensores submetidos à descarga parcial. Sendo assim, foram realizadas modificações em dois sensores dos que estavam livres. A ideia de colocar os sensores livres vem da premissa que a descarga parcial é um fenômeno físico elétrico que movimenta campos. Já o piezoelétrico é um sensor que possui dipolos elétricos e é sensível à movimentação de campos elétricos, magnéticos, mecânicos e térmicos. A Tabela 2 apresenta os sensores utilizados e suas variações.

Tabela 2 – Composição dos sensores alocados.

Localização		Composição
EF ₁		Zirconato Titanato de Chumbo
EF ₂		Zirconato Titanato de Chumbo
EF ₃		Zirconato Titanato de Chumbo
IF ₁		Zirconato Titanato de Chumbo
IF ₂		Zirconato Titanato de Chumbo
IF ₃		Zirconato Titanato de Chumbo
IL ₁	Zirconato Titanato de Chumbo + Ímã de Neodímio	
IL ₂		Zirconato Titanato de Chumbo
IL ₃	Zirconato Titanato de Chumbo + Disco de Aço Carbono	

Fonte: Autoria própria

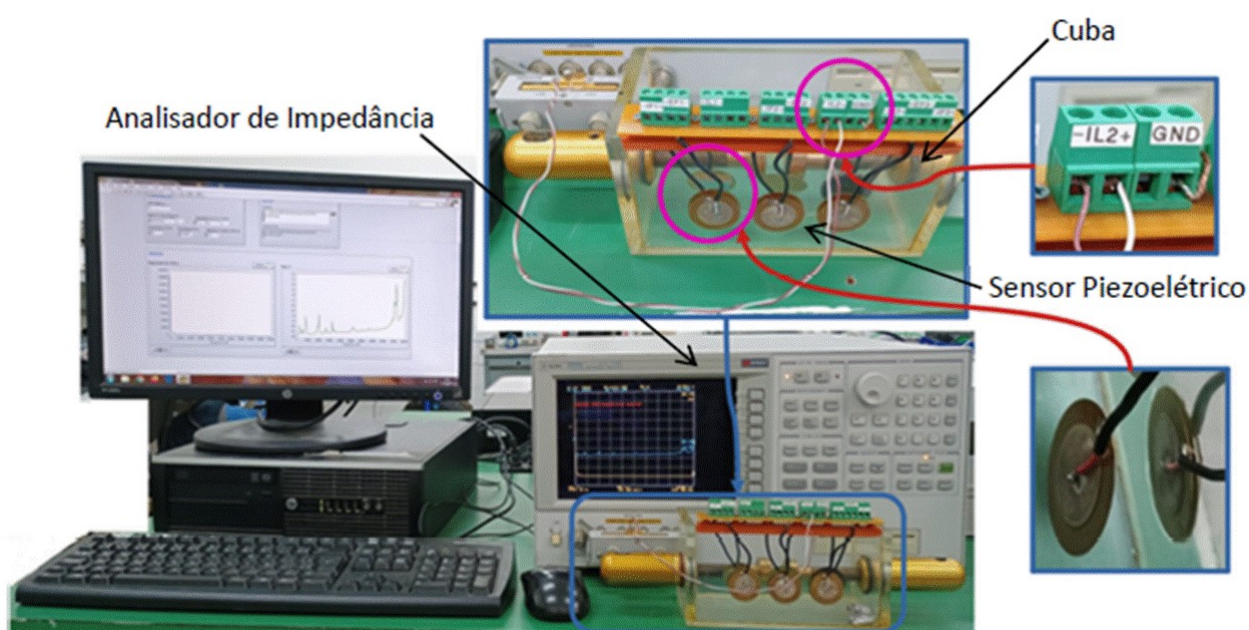
Diante disso, foi definido que um sensor ficaria na sua forma original, ou seja, latão-PZT-prata, o outro ficaria ferro/latão-PZT-prata e, por fim, ímã/latão-PZT-prata. De maneira resumida, um sensor recebeu um material ferromagnético e outro um ímã,

colados ao terminal de latão. O conceito é que esses sensores mostrem resultados diferentes entre si para que se possa ter uma ideia do que de fato está excitando o piezoelétrico. Outra possibilidade é de verificar se existe aumento de sensibilidade do sensor com essas variações de ferro e ímã acoplados. Além disso, os sensores livres podem ser lidos fora da cuba ou mergulhados no óleo. Estando mergulhado no óleo, se entende que existe interação fluido viscoso-estrutura PZT e a transmissão do sinal de descarga pode vir por ondas de movimento do fluido impactando o PZT. No ar também acontece a interação fluido-estrutura, mas com dois tipos de fluidos até chegar no sensor. Por outro lado, como o PZT é sensível a campos magnéticos, pode ser possível pensar que ele possa estar funcionando como um sensor também para as ondas eletromagnéticas. Neste caso, uma antena sensível ao impacto da onda e não necessariamente sintonizada.

4.1.3 Análise de impedância

Para este estudo de detecção de descargas parciais foram utilizados os sensores piezoelétricos como dito anteriormente, motivando a necessidade de determinar a resposta em frequência desses sensores. Desta maneira, se constata que o elemento piezoelétrico é sensível a mudanças na faixa de frequência do estudo. Como o elemento piezoelétrico é capacitivo então sua impedância eletromecânica varia em função da frequência do sinal recebido por ele ou aplicado nele. Sendo assim, foi verificado a sua resposta em frequência em função da variação da impedância de cada sensor piezoelétrico instalado na cuba de óleo. Para este experimento foi utilizado um esquema experimental como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Bancada analisador de impedância



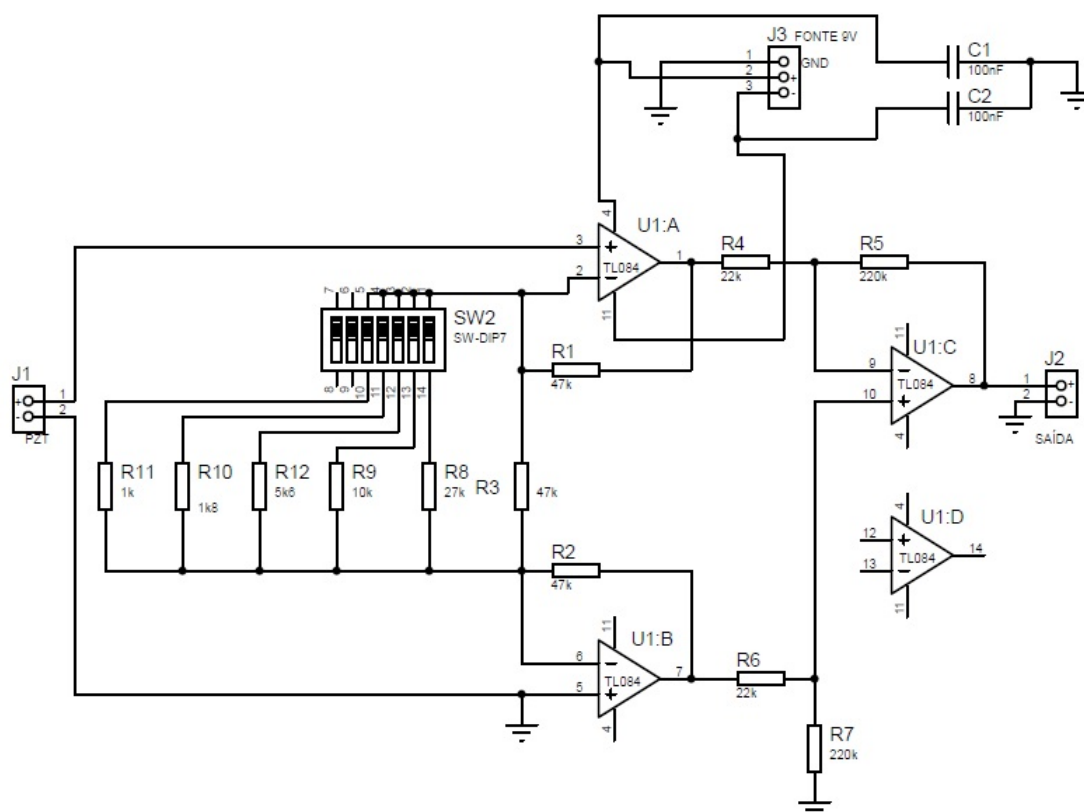
Fonte: Autoria própria

Na montagem de medição da resposta em frequência foi utilizado um analisador de impedância modelo Agilent 4294A com faixa de variação de frequência entre 40 Hz e 110 MHz. O analisador de impedância foi conectado a um computador para que os dados de medição da impedância fossem armazenados e posteriormente analisados. Foi configurado com os seguintes parâmetros: Faixa de Frequência de 40 Hz até 110 MHz e 201 amostra (esse foram os valores máximos padrão do equipamento). Neste experimento foi conectado o analisador ao sensor piezoelétrico individualmente realizando a varredura de frequência, ou seja, foram lidos os sensores internos e externos colados na cuba e os sensores piezoelétricos livres um de cada vez em toda a faixa de frequência.

4.1.4 Condicionamento de sinais dos sensores

O circuito condicionador, apresentado na Figura 17, foi desenvolvido com a finalidade de amplificar o sinal do sensor piezoelétrico, visando tornar o valor de tensão elétrica factível para leitura. Cada um dos sensores teve um canal de condicionamento próprio. Por essa razão, uma placa de circuito foi fabricada com 6 condicionadores para que fossem capturados até 6 sinais de sensores simultaneamente. Foi adotada uma configuração de amplificador de instrumentação com a possibilidade de ganhos variáveis para que fossem ajustados no momento da medição.

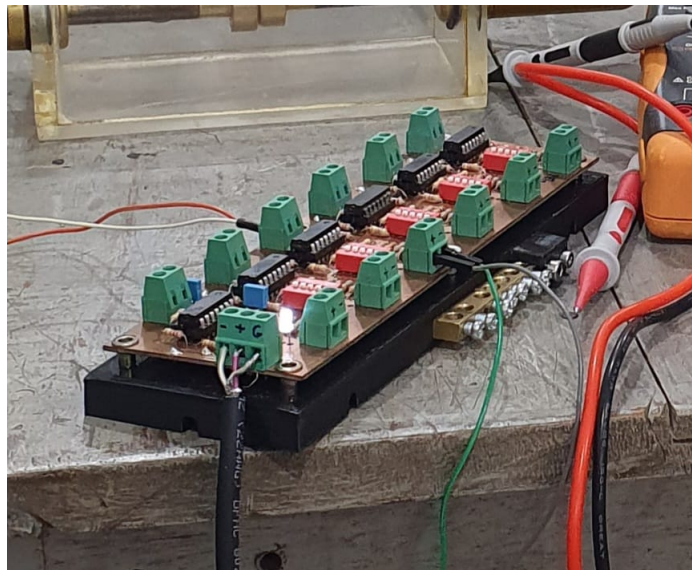
Figura 17 – Esquemático do circuito condicionador de sinal.



Fonte: Autoria própria

Essa topologia de amplificador de instrumentação garante alta impedância de entrada e a possibilidade de ter dois estágios de amplificação que minimiza os ruídos inerentes de altos ganhos. No estágio de amplificação de saída foi fixado um valor de amplificação. No estágio de entrada foram colocados resistores em paralelo que entram no circuito a partir de uma chave *dip*. Essa possibilidade foi para garantir que ganhos poderiam ser necessário no momento dos ensaios. Na Figura 18 está mostrada a placa de circuito fabricada com 6 amplificadores.

Figura 18 – Circuito condicionador de sinal.



Fonte: Autoria própria

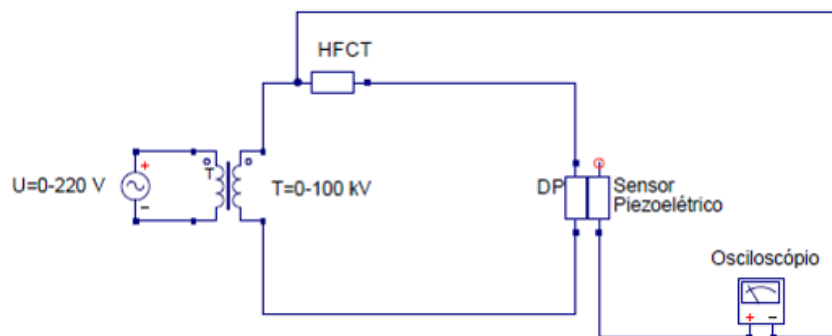
Os ensaios na placa condicionadora de sinais foram realizados no LaSEA da UFPB com o objetivo de testar os sinais recebidos dos sensores. A placa foi alimentada e com um gerador de sinais foram realizados os teste de amplificação. Todos os 9 sensores acoplados na cuba também foram testados aplicando-se pequenos impactos mecânicos próximos. Os ganhos dos amplificadores foram modificados e valores de saída obtidos foram analisados no osciloscópio. Esses testes foram realizados para assegurar que quando os sensores fossem submetidos a testes em alta tensão, o sistema estivesse funcionando corretamente.

4.2 Ensaios em alta tensão

Os ensaios realizados nesta etapa tiveram como objetivo avaliar o desempenho dos sensores piezoelétricos na detecção dos sinais de DP em laboratório, como parte da análise realizada neste trabalho. Para isso, foram realizadas medições em um transformador de potencial com isolamento de epóxi, usando o arranjo plano-plano e ponta-plano, na cuba submetida à alta tensão. Os ensaios para detecção de sinais de descargas parciais foram realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT) da UFCG.

O procedimento aplicado para a geração e detecção de DP no laboratório consistiu em um aumento gradual da tensão, por meio de um transformador regulador (0 kV – 100 kV), até que a atividade de DP fosse originada no objeto de teste e detectada simultaneamente pelos sensores piezolétricos e pelo sistema de medição comercial LDS-6 da *Double Lemke*, que implementa o método padrão da IEC 60270 e por um HFCT. O esquemático do arranjo de geração e medição utilizado para a realização dos ensaios no laboratório é apresentado na Figura 19.

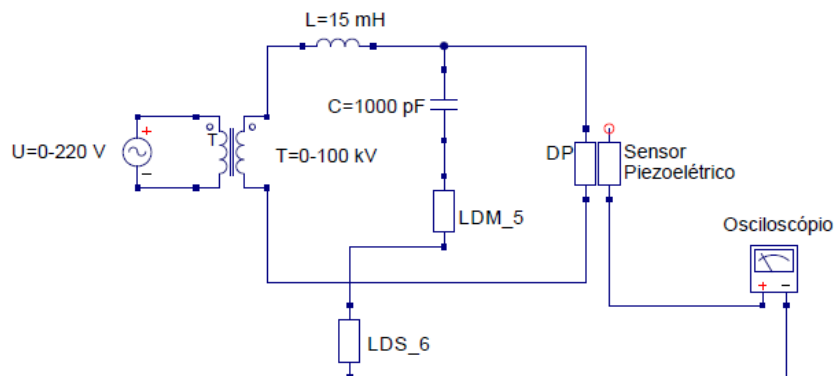
Figura 19 – Arranjo de medição para detecção de DP em laboratório com HFCT.



Fonte: Autoria própria

Na Figura 20, o método convencional de detecção de descargas parciais é representado por um capacitor de acoplamento de 1000 pF e uma impedância de medição (LDM-5). O LDM-5 é um circuito ressonante que prolonga pulsos de corrente no domínio do tempo, tornando sua detecção mais fácil. Para a aquisição de sinais com a maior rejeição possível de ruídos provenientes da rede, um indutor de 15 mH foi inserido à entrada do circuito.

Figura 20 – Arranjo de medição para detecção de DP em laboratório com LDIC.



Fonte: Autoria própria

A utilização do HFCT durante as medições no laboratório teve como objetivo permitir a validação da detecção de DP pelo sensor piezoelétrico, ou seja, se o sensor

piezoelétrico detectou, o HFCT confirma a detecção.

Por fim, a aquisição dos sinais foi realizada por meio de um osciloscópio da *Keysight*, modelo DSOX3014T, com largura de banda de 1 GHz, taxa de amostragem máxima de 5GSa/s e quatro canais analógicos.

4.2.1 Detecção de DP em um arranjo utilizando HFCT como referência

Para geração e medição de DP em laboratório foi montado um arranjo experimental composto por eletrodos dispostos em uma configuração plano-plano, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Montagem do *setup* experimental com HFCT



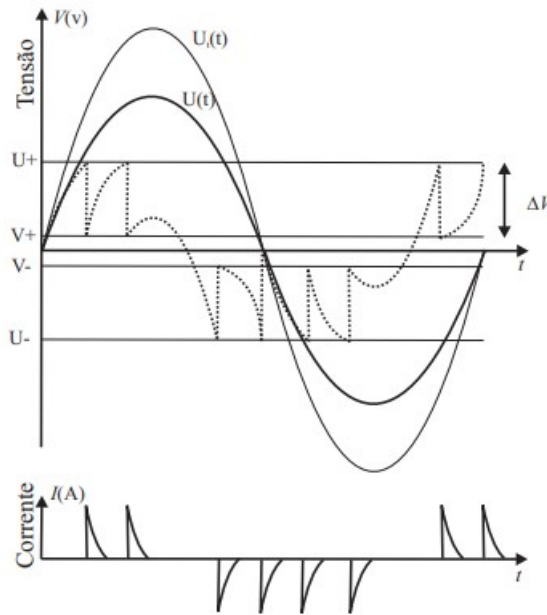
Fonte: Autoria própria

No arranjo, o eletrodo tipo plano, localizado mais próximo ao transformador, foi submetido à alta tensão entre 8 - 10 kV, enquanto o eletrodo tipo plano, localizado mais próximo ao HFCT, foi aterrado. A distância de separação utilizada entre os eletrodos foi de 7 mm no interior da cuba com óleo de transformador. Diante da configuração de eletrodos utilizada, condições favoráveis para a geração de DP foram criadas.

4.2.2 Detecção de DP em um arranjo utilizando LDIC como referência

O LDIC é um instrumento de medição regulamentado pela norma IEC 60270, que faz a captação da descarga pela mudança de capacitância. Por ser um grande capacitor, o equipamento é montado em paralelo com o objeto de teste, sendo capaz de avaliar se houve perda de energia por corona, descarga parcial ou outra eventualidade, entregando um resultado como mostrado na imagem ilustrada na Figura 22. Os picos das descargas aparecem na subida ou descida do sinal senoidal antes de atingir os máximos.

Figura 22 – Processo de ocorrência de descarga parciais.



Fonte: Modificado de (MACEDO, 2014)

Para utilização do LDIC, primeiramente foi realizada uma calibração para que seu funcionamento pudesse ser atestado. Após calibrado, o sistema de monitoramento é montado em paralelo com o objeto de teste (cuba) e com sua malha de aterramento devidamente aterrada. Essa malha de aterramento foi suspensa com ajuda de alguns isoladores, visando garantir que os sinais ficassem livres de interferência oriundas do piso do laboratório.

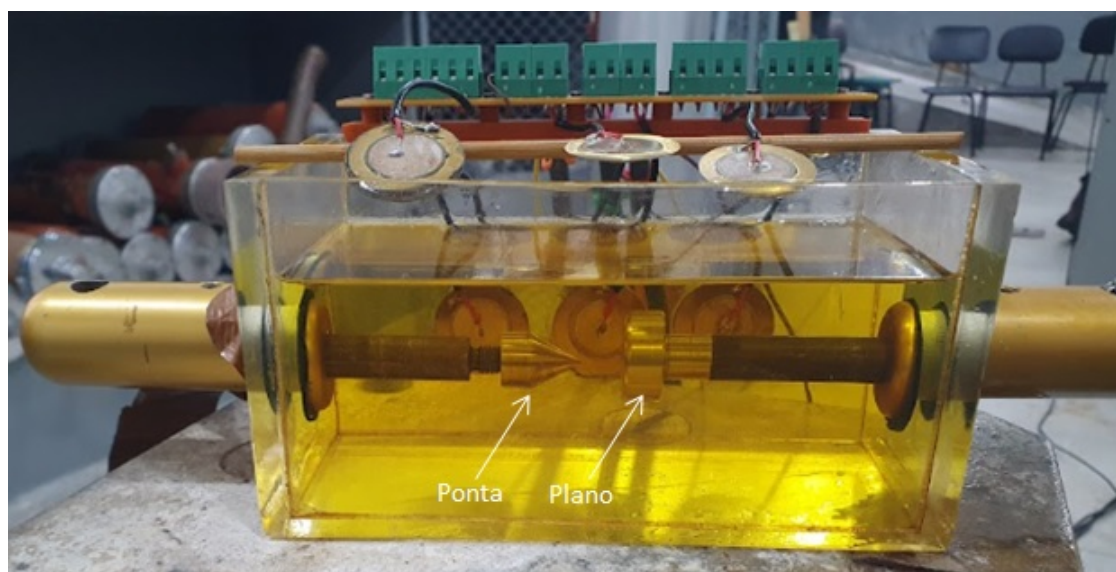
Para geração e medição de DP no laboratório foi montado um arranjo experimental composto por eletrodos dispostos em uma configuração ponta-plano, conforme apresentado na Figura 23. A Figura 24 representa a cuba com os eletrodos ponta e plano.

No arranjo, o eletrodo tipo ponta foi submetido a alta tensão, enquanto o eletrodo tipo plano foi aterrado. A distância de separação utilizada entre os eletrodos foi de 7 mm entre a ponta e o plano. Diante da configuração de eletrodos utilizada, condições favoráveis para a geração de DP foram criadas. O LDIC, considerando que foi realizado inicialmente o processo de calibração, registrou valores de carga aparente compreendidos na faixa de 50pC – 100pC.

Figura 23 – Montagem do *setup* experimental com LDIC

Fonte: Autoria própria

Figura 24 – Cuba com eletrodos ponta-plano



Fonte: Autoria própria

As medições foram realizadas em duas etapas: Na primeira as medições alternaram entre HFCT e LDIC, como referência, ambos utilizando 6.000 como número de pontos. Em virtude dessa quantidade de número de pontos o sinal no domínio da frequência apresentou baixa resolução devido o passo de frequência (df) estar grande em aproximadamente 1MHz. Visando solucionar este problema ao realizar a segunda medição foi selecionado o maior número de pontos que mantivesse a taxa de amostragem máxima do osciloscópio. O número de pontos adotado foi de 500.000, assim o df ficou em 5 kHz, possibilitando que o sinal pudesse ser melhor visualizado em frequência.

4.3 Aquisição e processamento dos resultados

Inicialmente foi avaliada a efetividade da aplicação dos sensores piezoelétricos na detecção de descargas parciais em ambiente de laboratório. Tal validação se deu por meio da comparação dos sinais detectados pelos sensores com os pulsos de DP detectados pelo método padronizado da IEC 60270 e pelo HFCT.

Para a coleta dos sinais experimentais foi utilizada uma rotina no *Matlab* que, sincronizada com o osciloscópio, consegue realizar várias medições de uma só vez quando o *trigger* é ajustado. Neste caso, foram realizadas 500 medições. Foram utilizados 4 canais simultaneamente para a captura dos sinais, sendo o primeiro da referência a partir métodos padronizados da IEC 60270 ou pela utilização do HFCT, e os três últimos sinais a partir dos sensores piezoelétricos propostos nesse trabalho. A montagem do sistema de aquisição está representada na Figura 25.

Figura 25 – Equipamentos de captura dos sinais



Fonte: Autoria própria

Na sequência, com o objetivo de avaliar a faixa de frequência dos pulsos de DP detectados pelos sensores, foi realizada uma análise dos sinais adquiridos no domínio da frequência. Para tanto, foram escolhidos 10 sinais de cada amostragem para ser feita uma média vislumbrando diminuir as possíveis interferências.

Por fim, foi calculada a FFT (*Fast Fourier Transform*) dos sinais adquiridos, considerando uma janela de tempo de 2 μ s e uma taxa de amostragem de 625 MSa/s. Para destacar as frequências nas quais ocorrem as descargas, o ruído de fundo no ambiente de medição também foi analisado.

4.4 Resumo do capítulo

Neste capítulo foram descritos os procedimentos computacionais e práticos aplicados para o cumprimento dos objetivos traçados nesta proposta de dissertação. Para uma organização mais clara, inicialmente foram descritos os procedimentos computacionais e práticos adotados para o projeto, e a caracterização em laboratório do protótipo desenvolvido. Na sequência, foram apresentados os ensaios experimentais realizados em laboratório, bem como os procedimentos adotados para processamento e análise dos sinais adquiridos durante os ensaios.

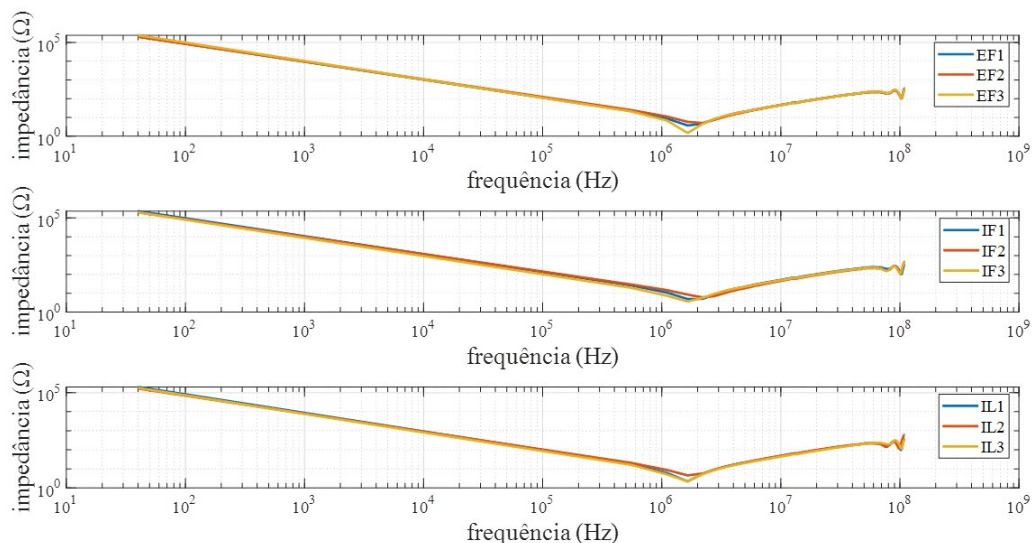
5 Resultados e discussões

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados desta dissertação. Serão apresentados os resultados que demonstrem que a metodologia está adequada para a pesquisa, e que os resultados de detecção de descargas parciais, usando o piezoelétrico na sua forma original, pode ser uma opção.

5.1 Resultados da análise de impedância

A análise de impedância foi realizada para comprovar que o sensor piezoelétrico apresenta sensibilidade na faixa de frequência de interesse da pesquisa. Como foi usado um equipamento de detecção de referência, se tinha um parâmetro como limite de faixa de frequência em 20 MHz, pois a resposta do LDIC finalizava neste limite. Entretanto, foi escolhido o limite de frequência do analisador de impedância que é em 110 MHz para ver a resposta dos sensores piezoelétricos. Na Figura 26 estão mostradas as respostas em frequência dos sensores piezoelétricos externos fixos (EFs), internos fixos (IFs) e internos livres (ILs). Em todos os gráficos é possível observar que os sensores piezoelétricos responderam na faixa de frequência entre 40 Hz e 110 MHz como era esperado. Foi visto que existe uma ante ressonância entre 1 MHz e 10 MHz, mas ainda sim os sensores respondem neste intervalo de frequência. No final da faixa de 110 MHz também aparecem ressonâncias que não são consideradas nesta análise por estarem no final da faixa do analisador de impedância.

Figura 26 – Análise de impedância em frequência

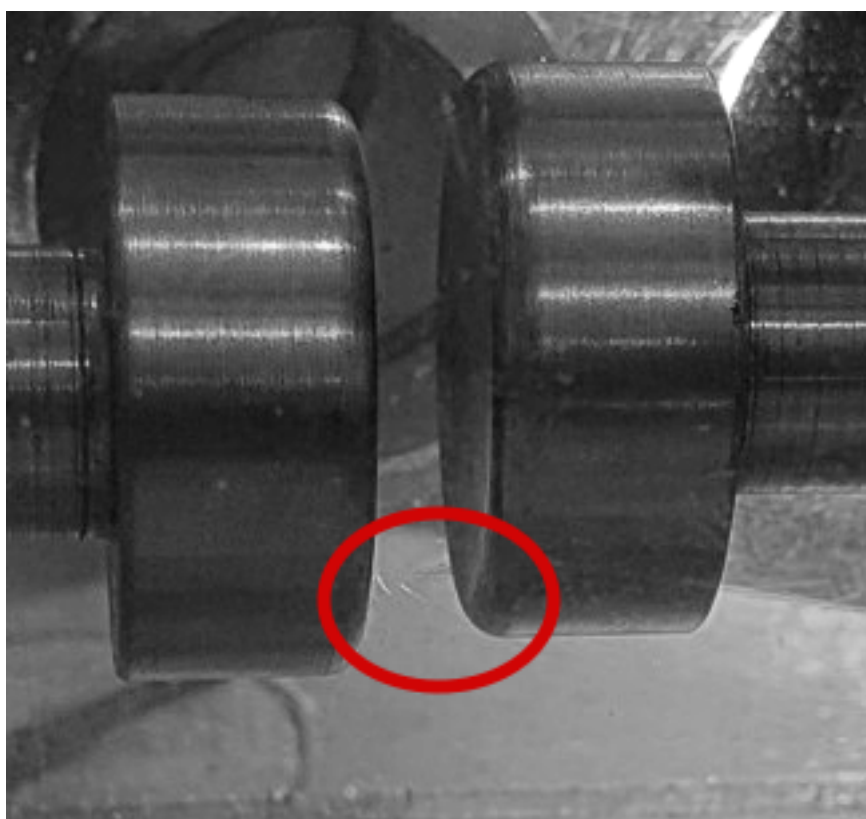


Fonte: Autoria própria

5.2 Experimento utilizando HFCT como referência

Como primeiro ensaio experimental foi usados na cuba os eletrodos na configuração Plano–Plano. Este teste foi para observar a existência das descargas na expectativa de que os sensores piezoelétricos iriam conseguir detectar. Neste ensaio, foi possível perceber que as cavidades formadas entre as pontas de prova (eletrodos), estavam formando um “caminho” (Figura 27), sendo assim, uma hipótese era que em vez de descargas parciais estavam ocorrendo descargas completas. Nesse caso, seria necessário uma mudança no experimento para garantir que de fato estaria ocorrendo a descarga parcial.

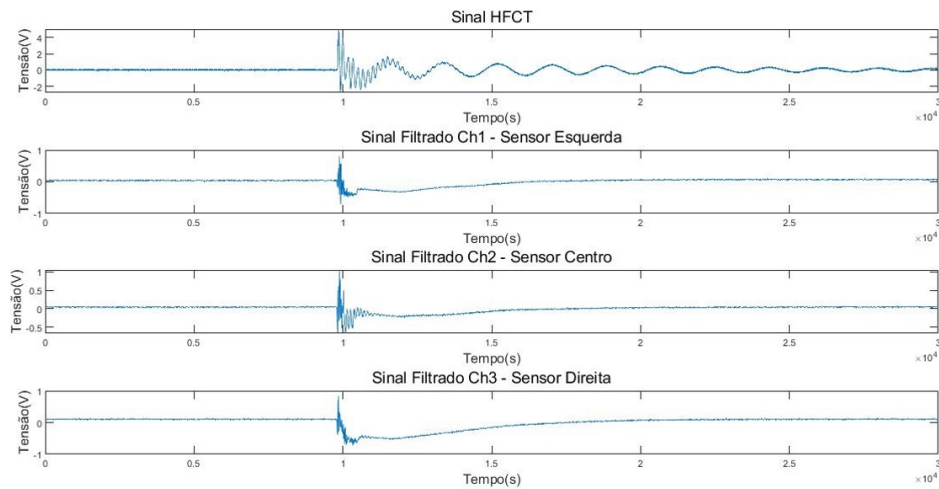
Figura 27 – Junção de pontos de ionização de DP na configuração plano - plano.



Fonte: Autoria própria

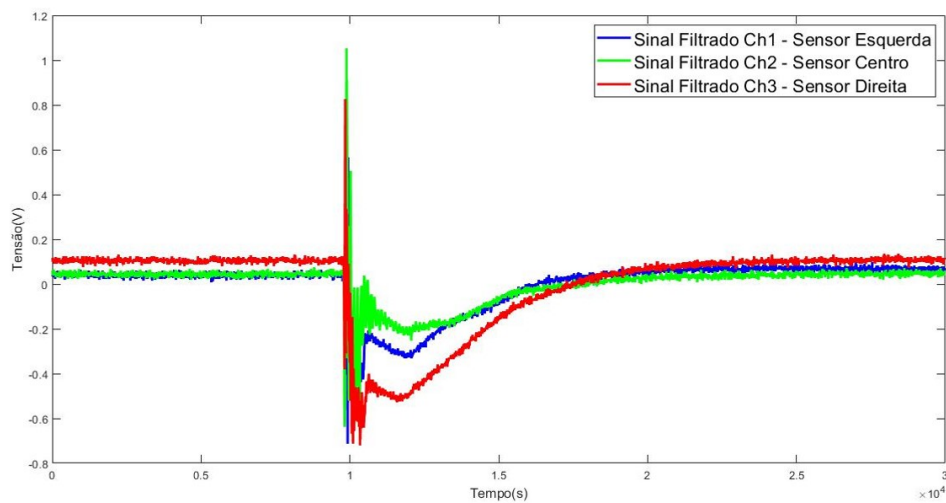
Os resultados apresentados nas Figuras 28 e 29 mostram a captura da descarga pelos sensores piezoelétricos sincronizados com a detecção do HFCT. Os sinais dos sensores em seu momento de pico chegaram a atingir um valor de quase 2 V de pico a pico, após ser amplificado com um ganho de 30 vezes no sinal de entrada. Portanto, esse experimento mostrou que de fato os sensores piezoelétricos sentiram a descarga acontecendo. Isso demonstrou um bom resultado para a técnica, mas precisaria comprovar de fato se o sinal era da descarga parcial mesmo. Por essa razão foi decidido por usar o LDIC que consegue mostrar se é uma descarga parcial ou total. Além disso, poderia ser melhorada a descarga usando a ponta cônica com a plana ao invés das duas planas. Na Figura 29 os sinais dos sensores piezoelétricos ficaram bem expressivos mostrando a semelhança do sinal capturado com um impacto convencional, oscilando no início sendo amortecido posteriormente.

Figura 28 – Detecção de descargas parciais utilizando HFCT como referência e sensores externos fixos.



Fonte: Autoria própria

Figura 29 – Comparativo de descargas parciais olhando somente para os sensores externos fixos.



Fonte: Autoria própria

5.3 Experimento utilizando LDIC como referência

Visando garantir que a descarga parcial fosse captada, as pontas de prova foram alteradas para configuração ponta-plano e o monitoramento de referência foi alterado para o LDIC. Os sinais foram capturados em todas as configurações possíveis EFs, IFs e ILs, para que assim fosse possível assegurar que todos eles estavam conseguindo detectar a descarga parcial. Além disso, com o uso do LDIC como sinal de referência foi possível garantir que o que estava sendo detectado era de fato a descarga parcial. Nota-se que as tensões de saída de cada um dos sensores é bem menor do que a que foi observada na configuração com o HFCT na condição de plano-plano.

Nas Figuras 30, 31, 32 e 33 estão mostrados como cada um dos sensores se comportaram ao serem excitados com uma descarga parcial.

Para facilitar a análise dos sinais com relação a posição do eletrodo ponta ou plano foi determinado a nomenclatura conforme Tabela 3.

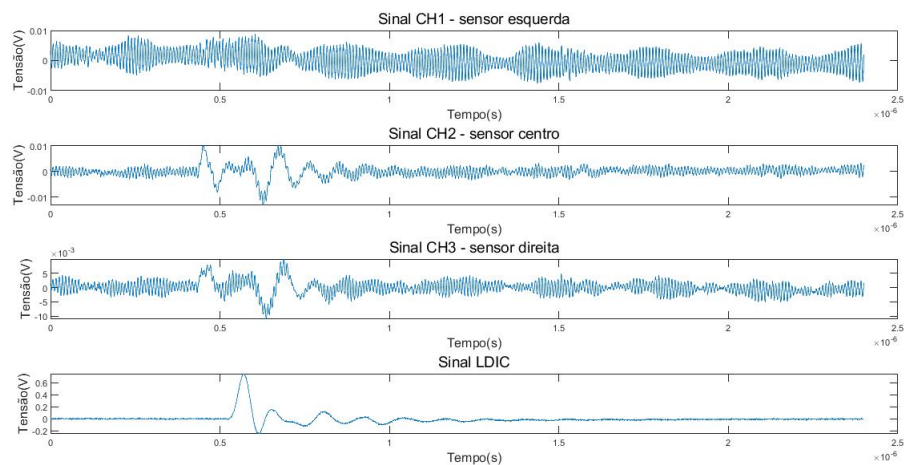
Tabela 3 – Nomenclatura da posição dos sensores 1 MHz

EF, IF e IL	POSIÇÃO NA CUBA
1	próximo ao PLANO (esquerda)
2	entre PLANO e PONTA (centro)
3	próximo a PONTA (direita)

Fonte: Autor.

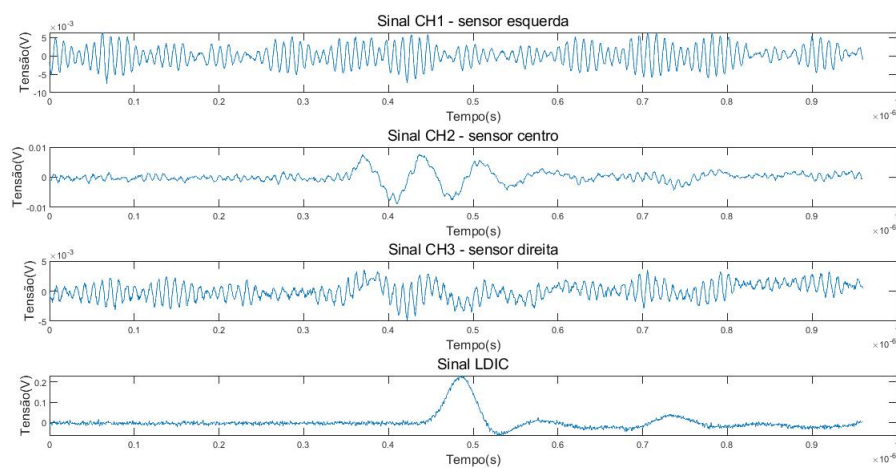
Nos gráficos das Figuras 30, 31, 32 e 33 é possível perceber que o nível do sinal detectado pelos sensores piezoelétricos da esquerda, que ficaram mais próximos do eletrodo plano, foi menor que os sensores nas demais posições. Diante disso, é possível sugerir que o eletrodo plano absorve a maior parte da energia do sinal de descarga. Já os sensores do centro mostraram-se muito próximos do sensores direito (mais próximo da ponta), entretanto, com menor nível de ruído ficando um sinal mais limpo.

Figura 30 – Medição de tensão no tempo EF LDIC.



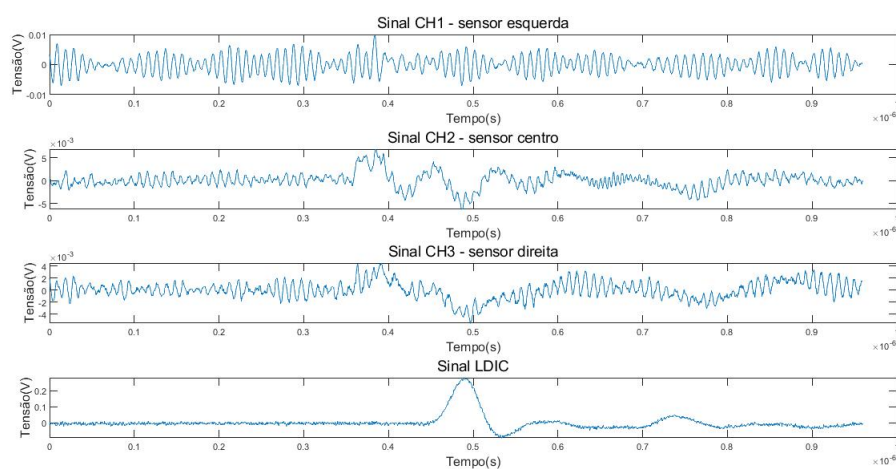
Fonte: Autoria própria

Figura 31 – Medição de tensão no tempo IF LDIC.



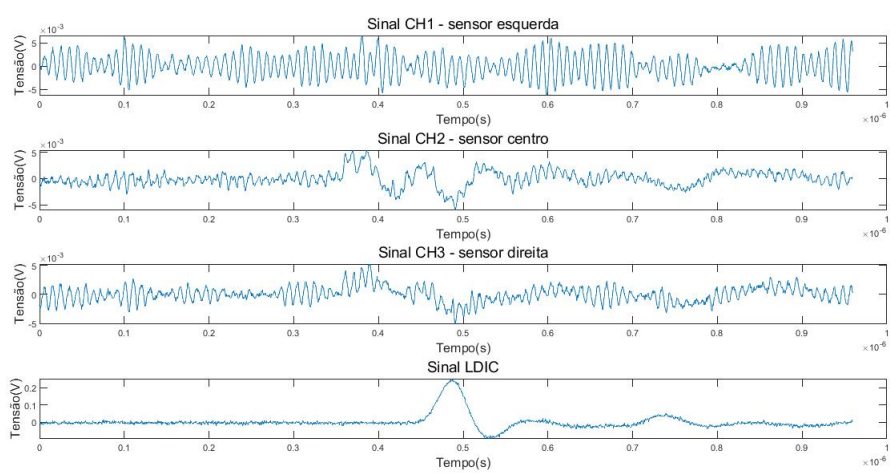
Fonte: Autoria própria

Figura 32 – Medição de tensão no tempo IL dentro da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

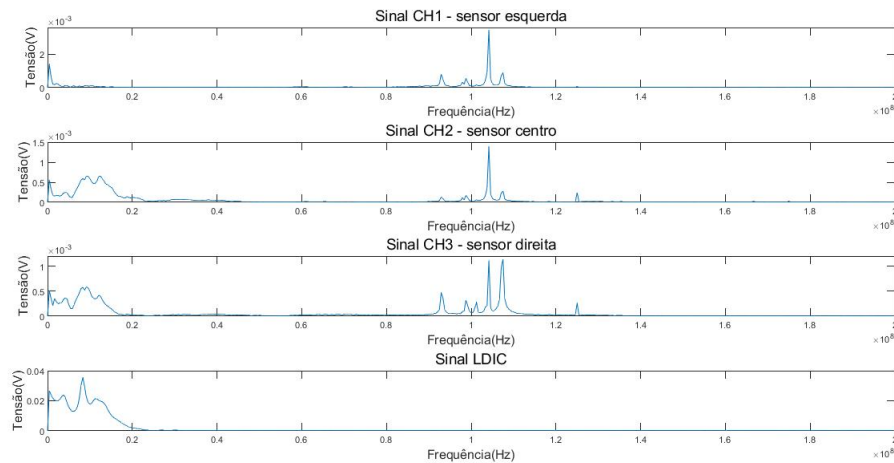
Figura 33 – Medição de tensão no tempo IL fora da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

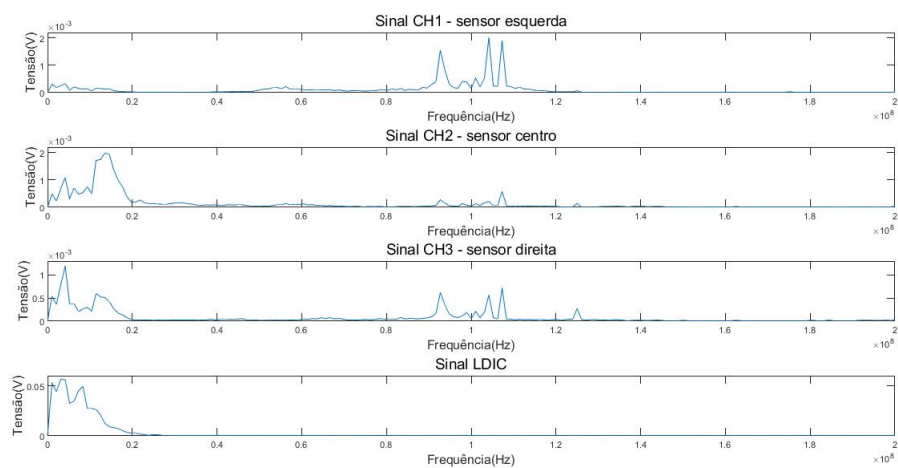
Nos sinais no domínio do tempo foi aplicado a Transformada de Fourier Discreta trazendo a resposta do domínio do tempo para o domínio da frequência a descarga parcial. Na análise espectral mostrada nas Figuras 34, 35, 36 e 37 foi possível destacar a existência de duas regiões de frequências excitadas entre 0 Hz e 20 MHz, e outra entre 60 MHz e 180 MHz aproximadamente. Nota-se que na primeira região todos responderam, ou seja, o LDIC e os sensores piezoelétricos. Um fato interessante desta primeira região é que a resposta em frequência se mostrou excitando toda a banda. Isso significa que os elementos sensores (piezoelétricos e LDIC) estão ressonando na faixa inteira, não tendo ficado tão evidente o do sensor piezoelétrico da esquerda (próximo ao plano) devido ao fato do sinal no tempo ter sido muito baixo. Outro destaque é que os sensores piezoelétricos foram excitados na segunda região enquanto o LDIC não. Com relação ao LDIC era esperado porque ele filtra depois 20 MHz aproximadamente, já os sensores piezoelétricos não porque estão abertos em toda faixa de frequência.

Figura 34 – Medição de frequência no tempo EF LDIC.



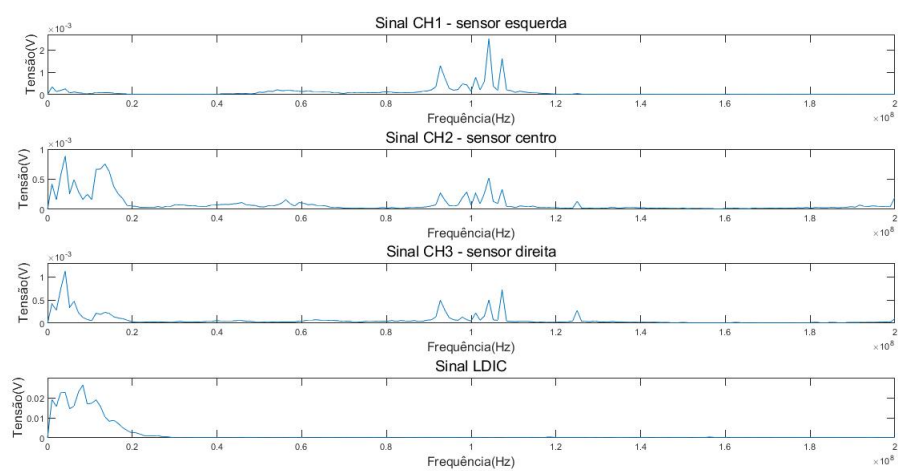
Fonte: Autoria própria

Figura 35 – Medição de frequência no tempo IF LDIC.



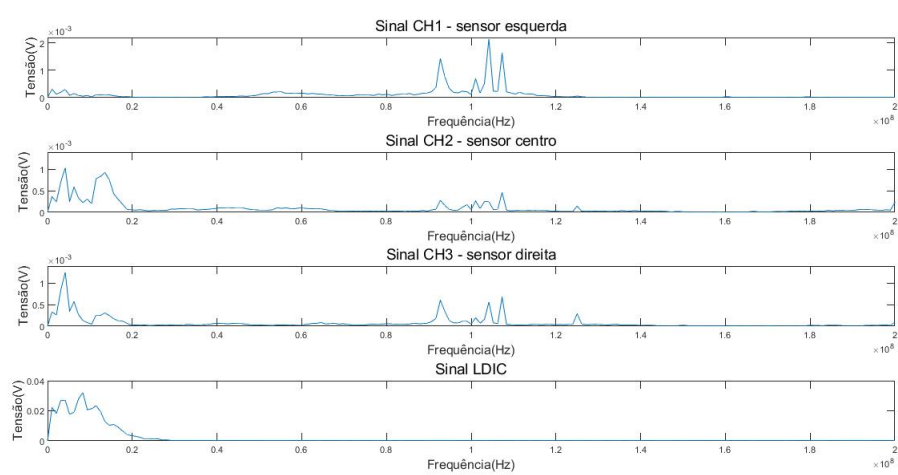
Fonte: Autoria própria

Figura 36 – Medição de frequência no tempo IL dentro da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

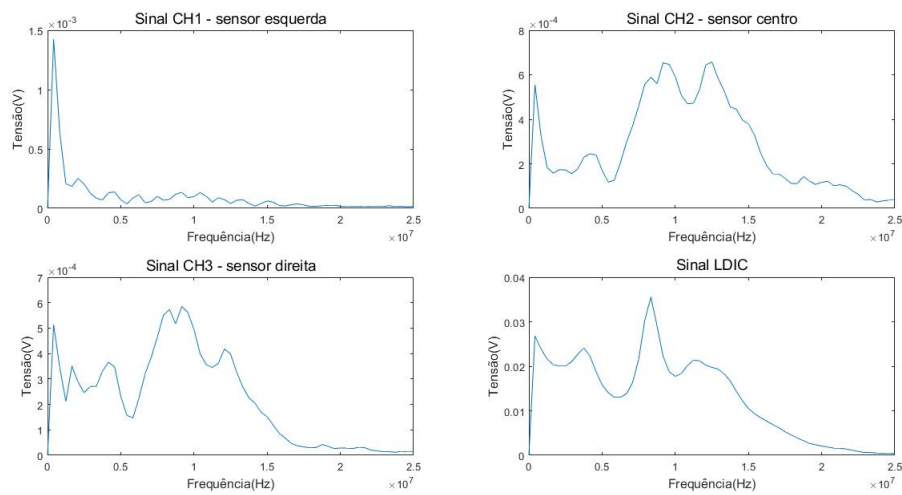
Figura 37 – Medição de frequência no tempo IL fora da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

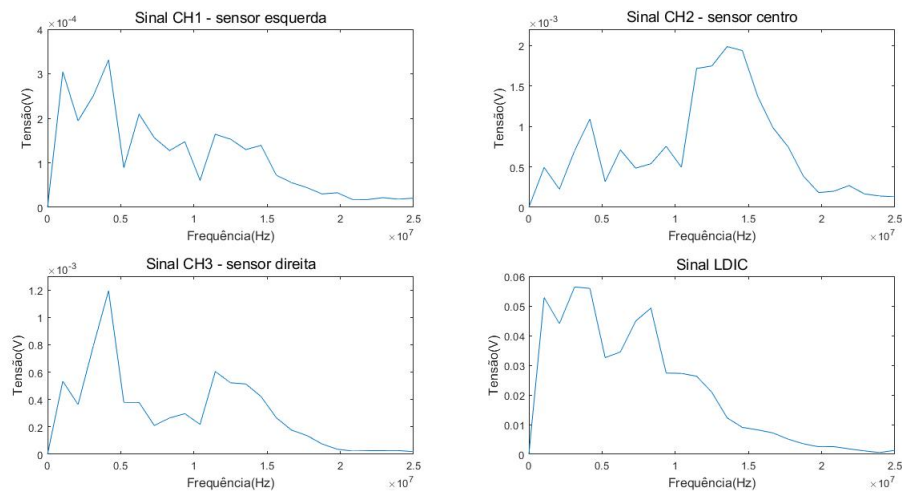
Para visualizar mais claramente as regiões no domínio da frequência os gráficos foram separados e mostrados nas Figuras 38, 39, 40 e 41. Nesse caso, foi levantada a hipótese de estar ocorrendo o fenômeno de *leakage* devido o passo de frequência que foi utilizada ter sido de 1 MHz. Com esse passo relativamente grande pode ser que ocorrências estejam acontecendo dentro do intervalo de 1 MHz e não tenha mostrada nos gráficos mas os sensores pegaram.

Figura 38 – Medição de baixas frequência no tempo EF LDIC.



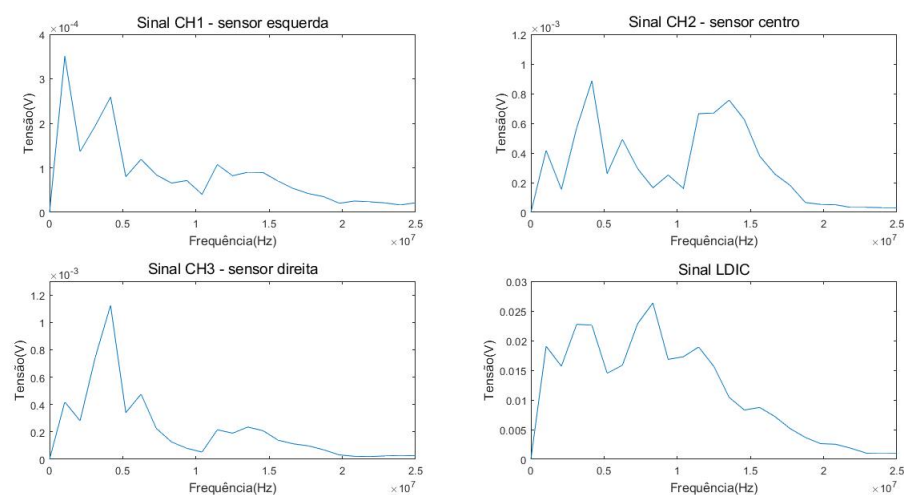
Fonte: Autoria própria

Figura 39 – Medição de baixas frequência no tempo IF LDIC.



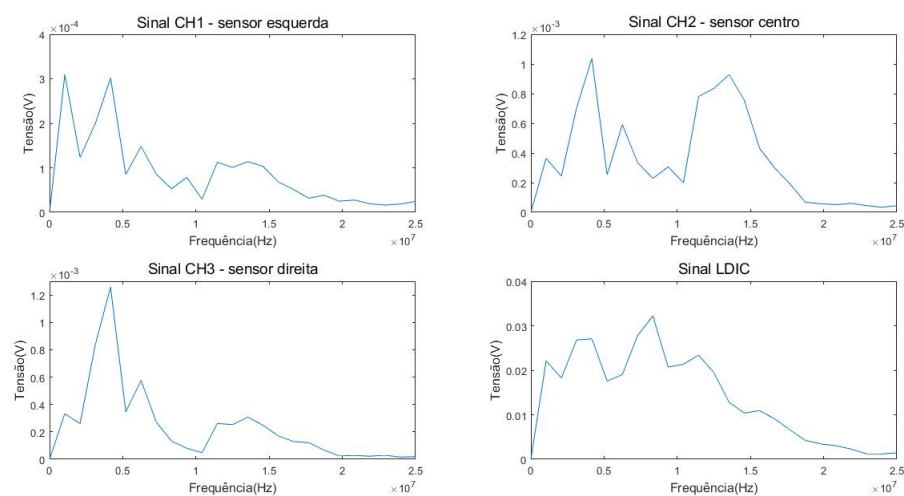
Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Medição de baixa frequência no tempo IL dentro da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

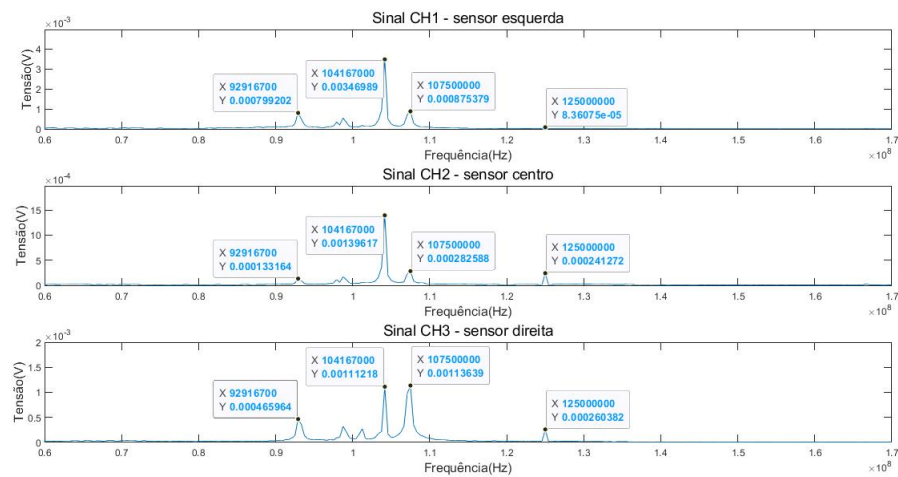
Figura 41 – Medição de baixa frequência no tempo IL fora da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

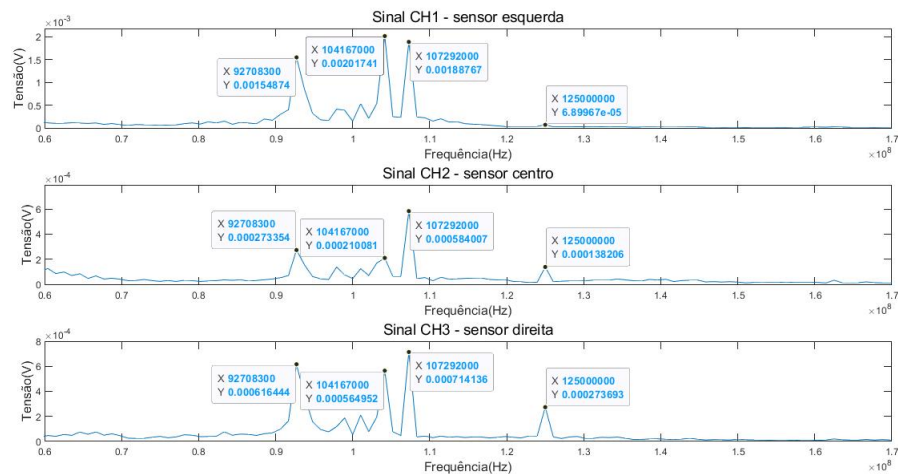
A faixa de frequência entre 80 MHz e 160 MHz mostrou a existência de picos ressonantes coincidentes nos sensores piezoelétricos como destacados nas Figuras 42, 43, 44 e 45. É possível perceber por exemplo que as frequências de 92 MHz, 104 MHz, 107 MHz e 125 MHz aproximadamente estão repetidas em todos os experimentos. Essa informação sugere que essas frequências existem de fato na ocorrência da descarga, que fazem parte dos elementos envolvidos no sistema de estudo e que podem estar relacionadas com esses elementos.

Figura 42 – Medição de alta frequência no tempo EF LDIC.



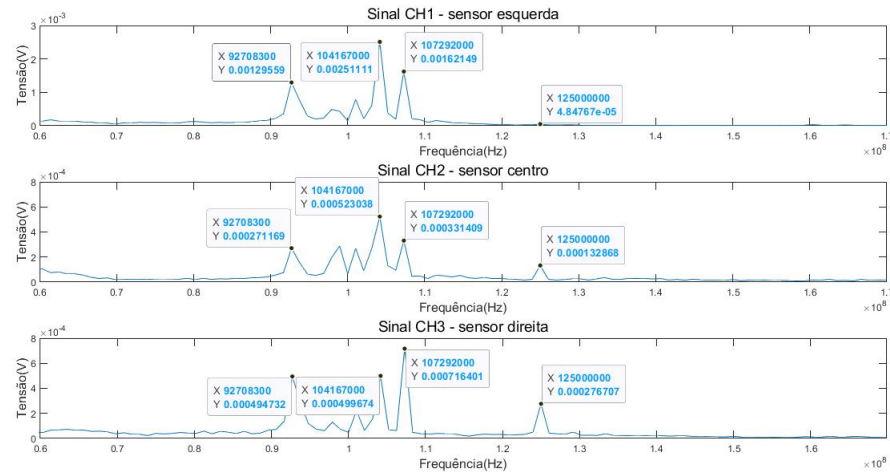
Fonte: Autoria própria

Figura 43 – Medição de alta frequência no tempo IF LDIC.



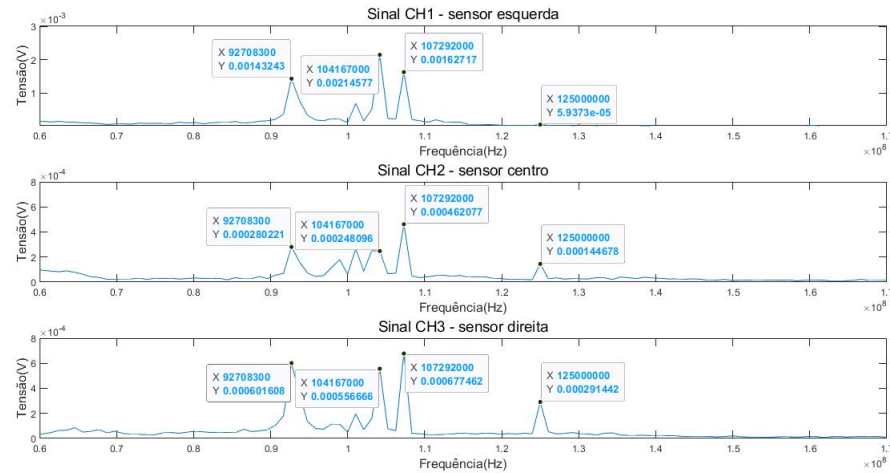
Fonte: Autoria própria

Figura 44 – Medição de alta frequência no tempo IL dentro da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

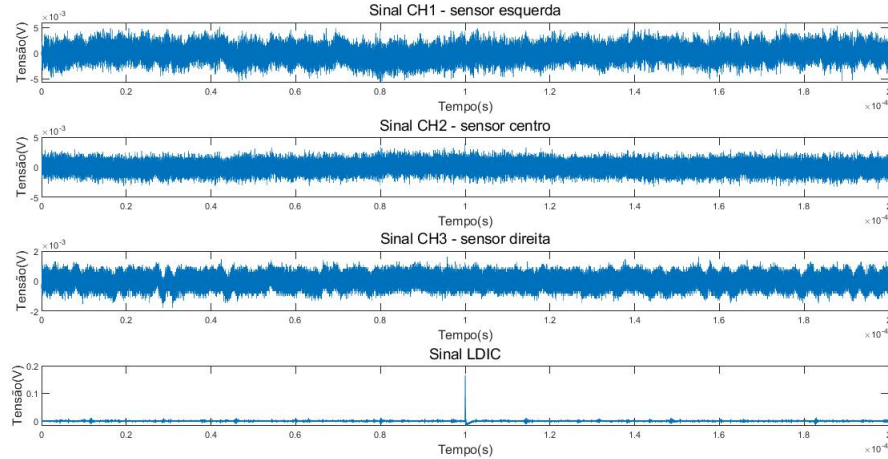
Figura 45 – Medição de alta frequência no tempo IL fora da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

Visando melhorar os sinais no domínio da frequência para verificar se o fenômeno de *leakage* estava ocorrendo o número de pontos de aquisição foi modificado para 5×10^5 , ficando com um passo de frequências, df , de 5 kHz. Com este aumento de número de pontos a janela de aquisição cresceu consequentemente a densidade do sinal no domínio do tempo aumentou como pode ser visualizado em um dos casos na Figura 46.

Figura 46 – Medição de tensão no tempo EF LDIC com menor df .



Fonte: Autoria própria

Por conta desse grande número pontos, os gráficos de tensão no tempo precisaram ser aproximados para análise, conforme mostrados nas Figuras 47, 48, 49 e 50. Neste experimento foi modificada a posição da cuba e os sinais foram coletados baseados no posicionamento conforme a Tabela 4.

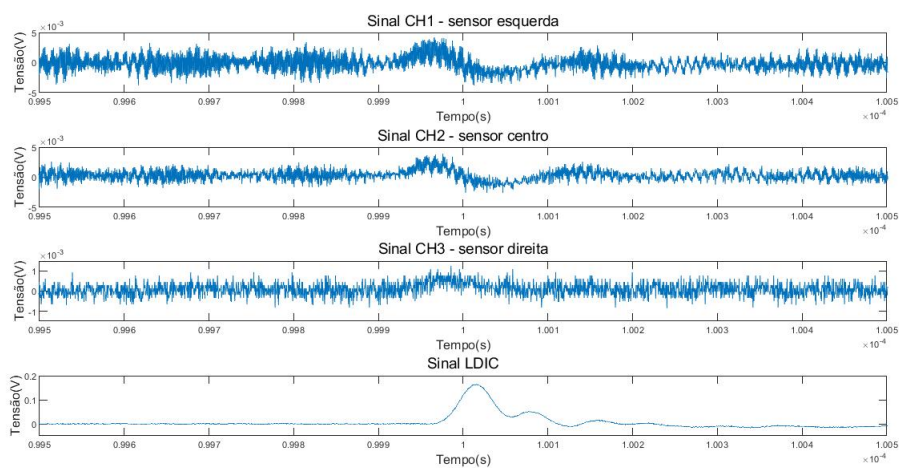
Tabela 4 – Nomenclatura da posição dos sensores 5 kHz

EF, IF e IL	POSIÇÃO NA CUBA
1	próximo a PONTA (esquerda)
2	entre PLANO e PONTA (centro)
3	próximo ao PLANO (direita)

Fonte: Autor.

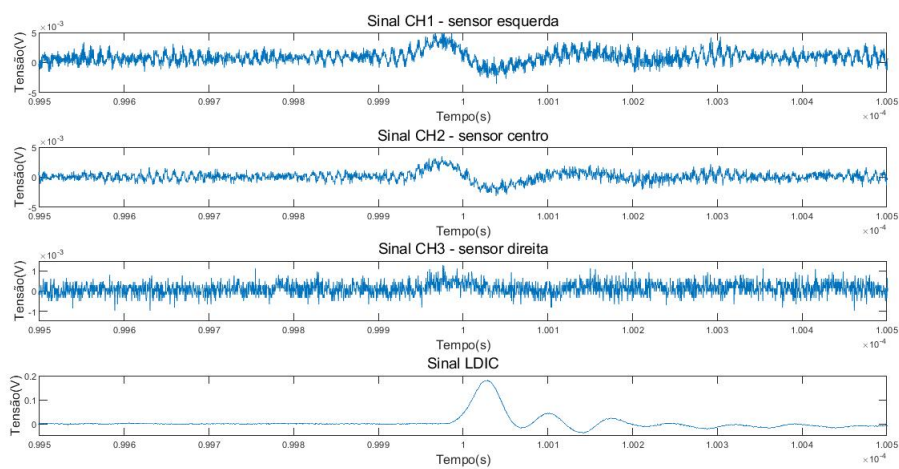
Notadamente, os sensores piezoelétricos capturaram a descarga parcial com amplitudes maiores nos sensores do centro e mais próximo da ponta e amplitude menor no sensor próximo ao plano, como visto no caso anterior.

Figura 47 – Medição de tensão no tempo EF LDIC com 5 kHz.



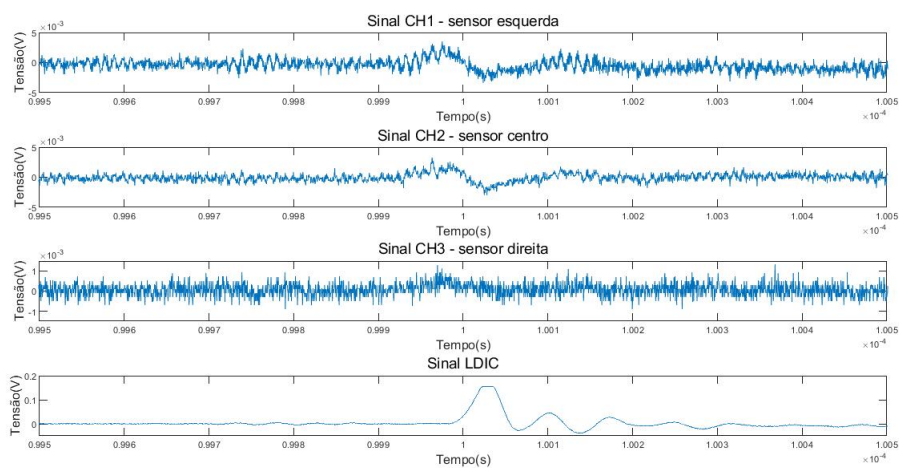
Fonte: Autoria própria

Figura 48 – Medição de tensão no tempo IF LDIC com 5 kHz.



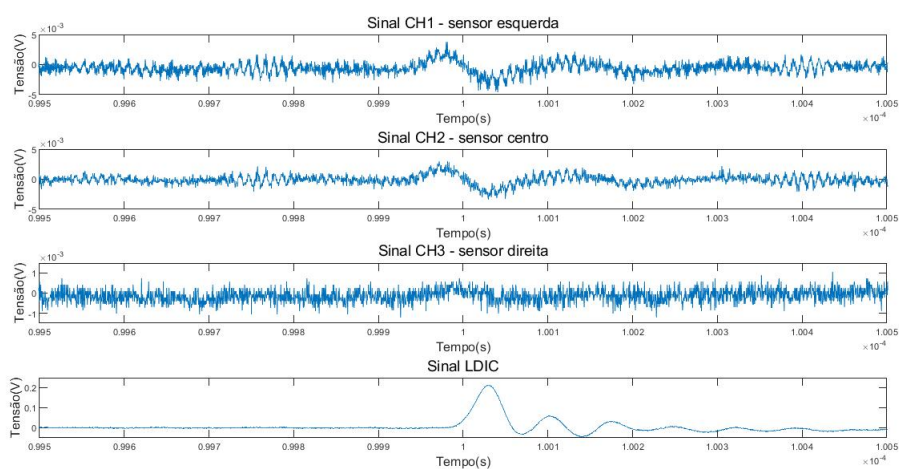
Fonte: Autoria própria

Figura 49 – Medição de tensão no tempo IL dentro da cuba LDIC com 5 kHz



Fonte: Autoria própria

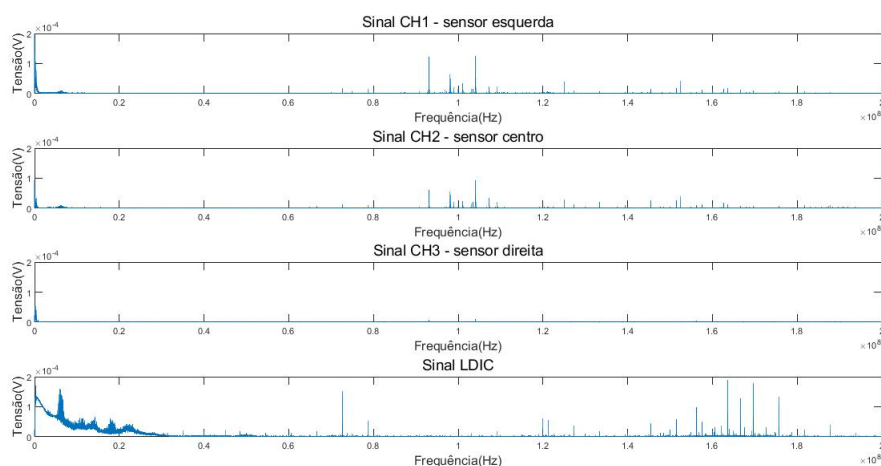
Figura 50 – Medição de tensão no tempo IL fora da cuba LDIC com 5 kHz



Fonte: Autoria própria

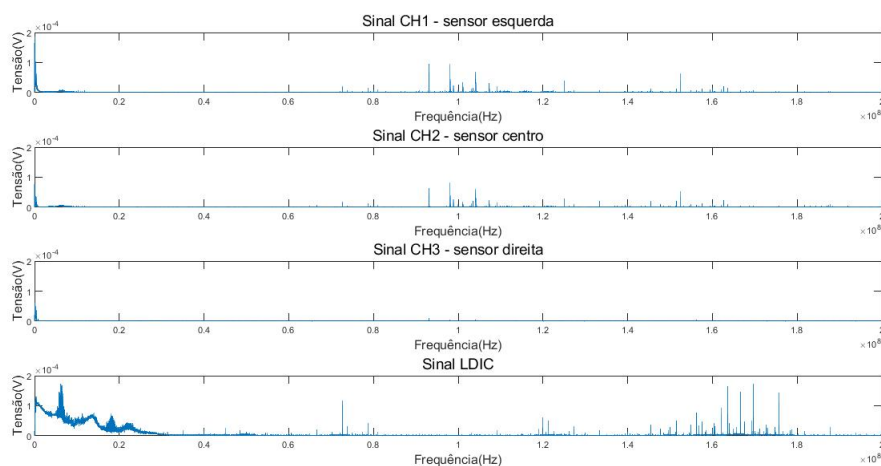
Os gráficos dos espectros de frequência com o passo de frequência de 5 kHz, é mostrado nas Figuras 51, 52, 53 e 54. É possível visualizar que, assim como na medição com o passo de 1MHz, existem duas regiões onde frequências foram excitadas entre 0 Hz e 25 MHz, e entre 60 MHz e 180 MHz aproximadamente. Curiosamente e diferente das medições anteriores o LDIC apresentou frequências em várias outras regiões.

Figura 51 – Medição de frequência EF com passo de 5 kHz.



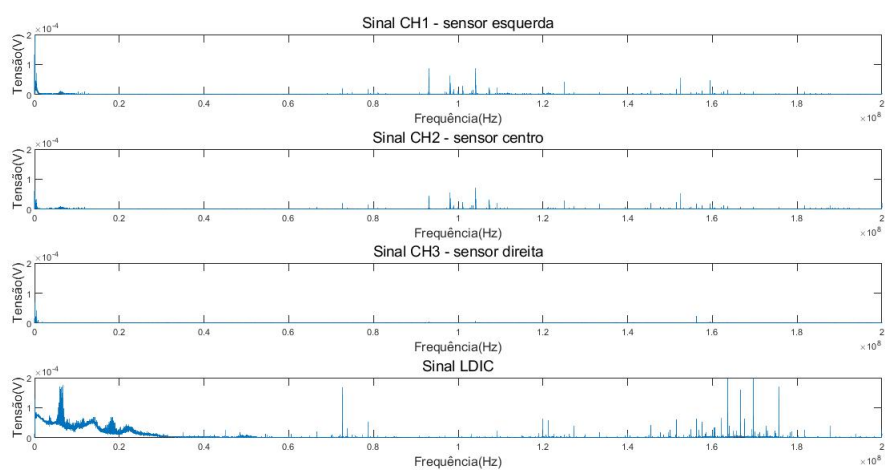
Fonte: Autoria própria

Figura 52 – Medição de frequência IF com passo de 5 kHz.



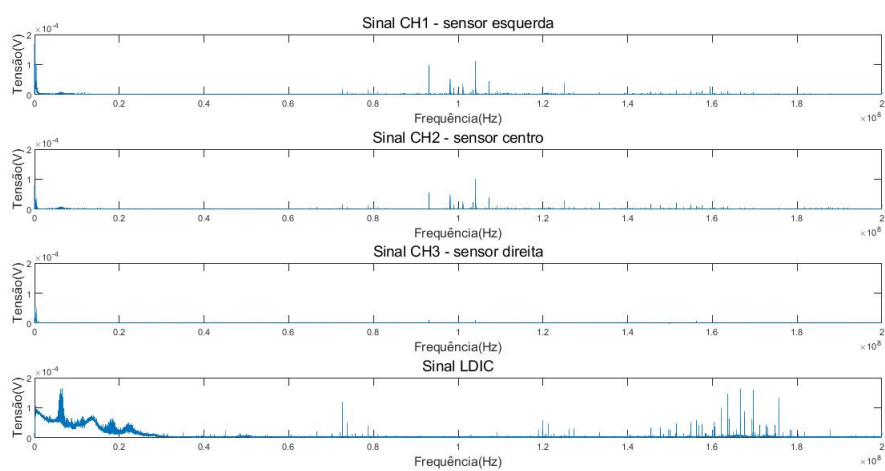
Fonte: Autoria própria

Figura 53 – Medição de frequência IL dentro da cuba com passo de 5 kHz.



Fonte: Autoria própria

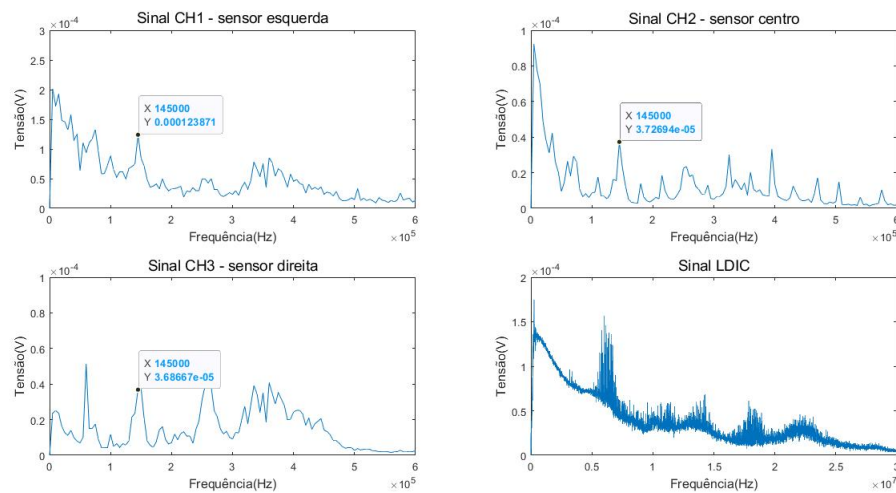
Figura 54 – Medição de frequência IL fora da cuba com passo de 5 kHz.



Fonte: Autoria própria

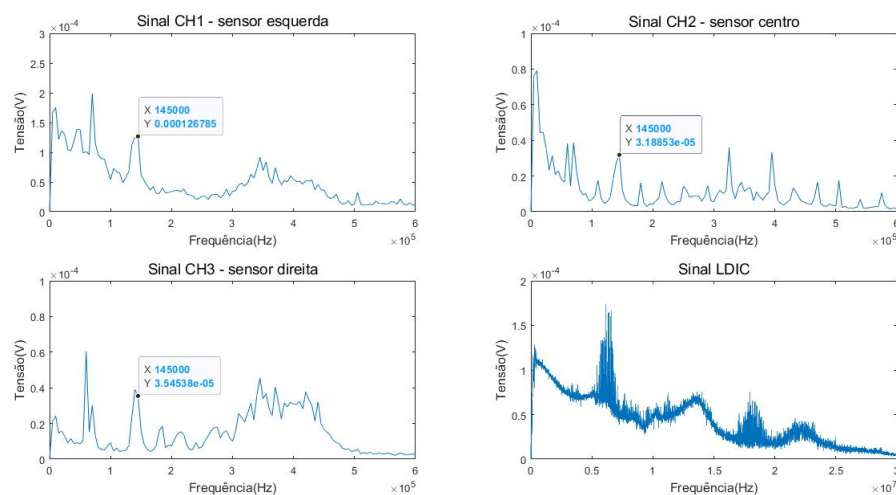
Os gráficos selecionados por regiões são mostrados nas Figuras 55, 56, 57 e 58. Foi observado que a região de maior energia dos sinais dos sensores piezoelétricos ficou entre 0 Hz e 600 kHz evidenciando frequências naturais distintas. O LDIC apresentou evidências de várias outras frequências nas regiões de maiores amplitudes, mas se manteve com a mesma envoltória dos sinais que tiveram passo de frequência em 1 MHz. Já os sensores piezoelétricos destacam mais claramente algumas frequências com é o caso da de 145 kHz. Essa frequência por exemplo foi vista pelo LDIC, pois no gráfico apresentou adensada com outra.

Figura 55 – Medição de baixas frequência EF.



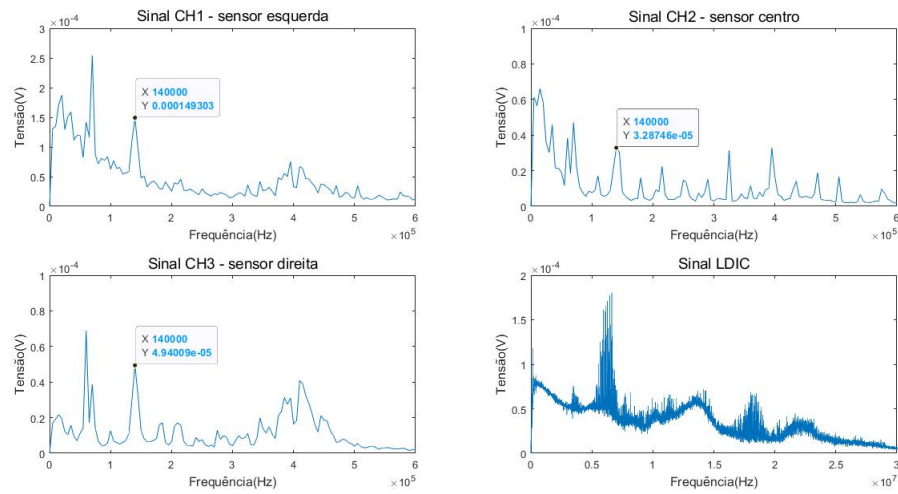
Fonte: Autoria própria

Figura 56 – Medição de baixas frequência IF.



Fonte: Autoria própria

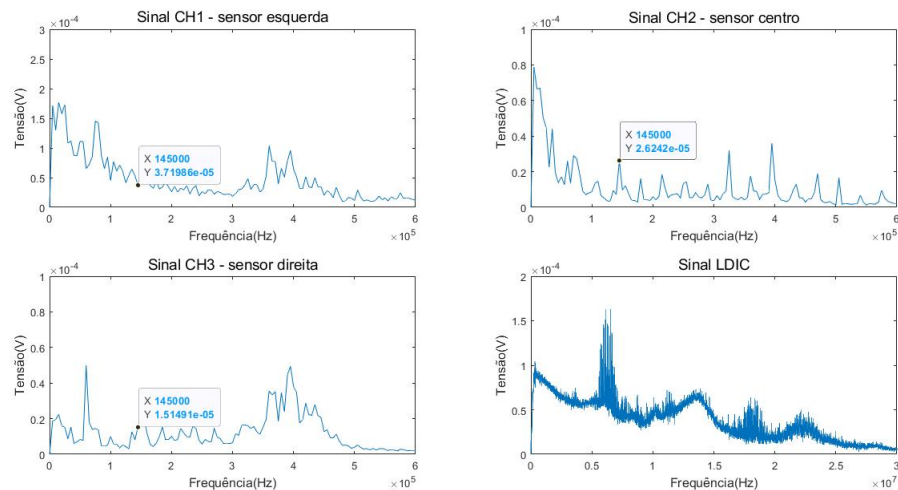
Figura 57 – Medição de baixa frequência IL dentro da cuba.



Fonte: Autoria própria

Foi observado que os sinais capturados pelos sensores piezoelétricos que estavam fora da cuba não tiveram uma boa sensibilidade (Figura 58). Entretanto, não foi ampliado o ganho do amplificador para se ter outra observação, mas essa resposta sugere que a propagação da descarga é mais evidente em um meio diferente do ar, considerando esse estudo de caso.

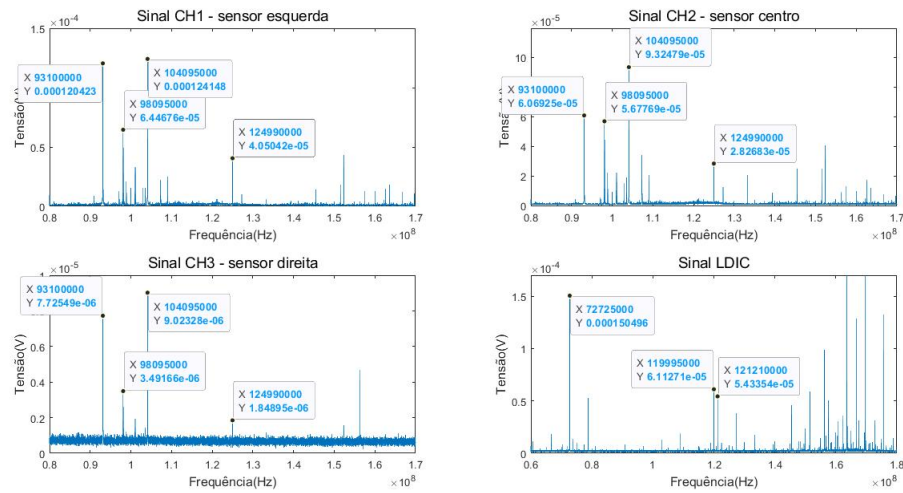
Figura 58 – Medição de baixa frequência IL fora da cuba.



Fonte: Autoria própria

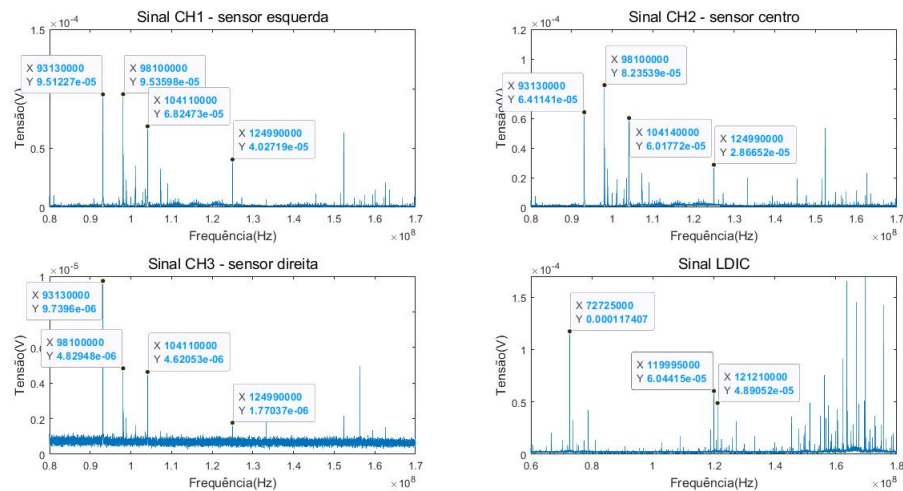
Os gráficos das Figuras 59, 60, 61 e 62 destacam a região de mais altas frequências, dentro da faixa de 80 MHz e 160 MHz, que foram evidenciadas com o passo de 5 kHz. É possível perceber que tem frequências bem evidentes capturadas pelos sensores piezoelétricos que se repetem com é o caso dos picos de 93 MHz, 98 MHz, 104 MHz e 124 MHz aproximadamente. Isso sugere que essas frequências podem estar relacionadas com os elementos envolvidos no sistema de análise que podem identificar precisamente a descarga parcial. Nota-se também que existe uma frequência de 121 MHz aproximadamente que aparece no sinal do LDIC muito próxima de 124 MHz vista pelos sensores piezoelétricos. Considerando que o LDIC é um equipamento com metodologia consolidada é possível sugerir que essas frequências são ressonância existentes no sistema estudado.

Figura 59 – Medição em mais alta frequência EF LDIC.



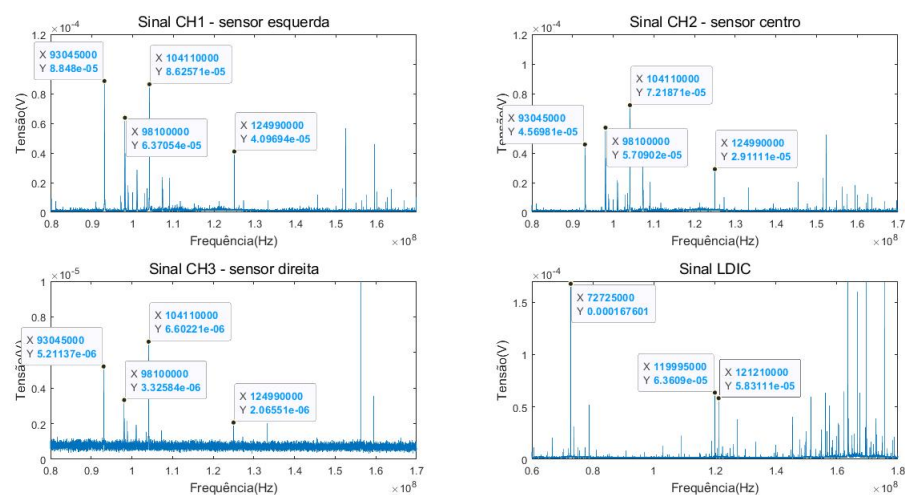
Fonte: Autoria própria

Figura 60 – Medição em mais alta frequência IF LDIC.



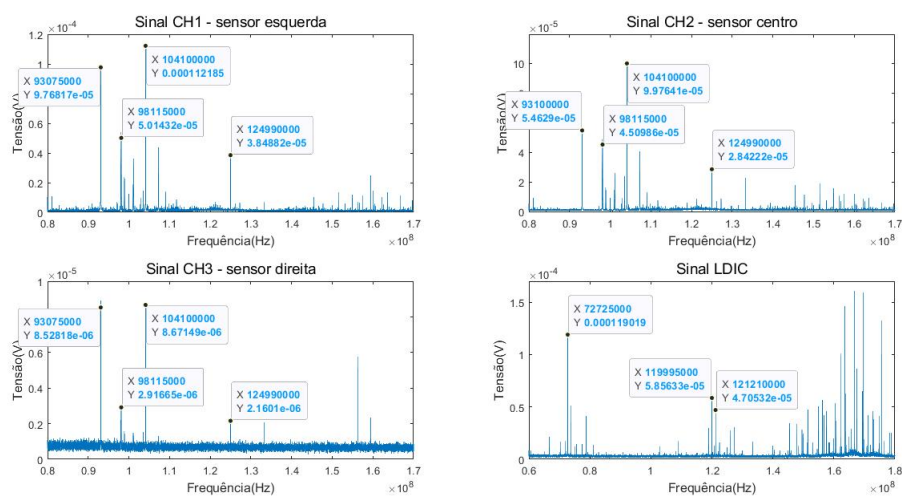
Fonte: Autoria própria

Figura 61 – Medição em mais alta frequência IL dentro da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

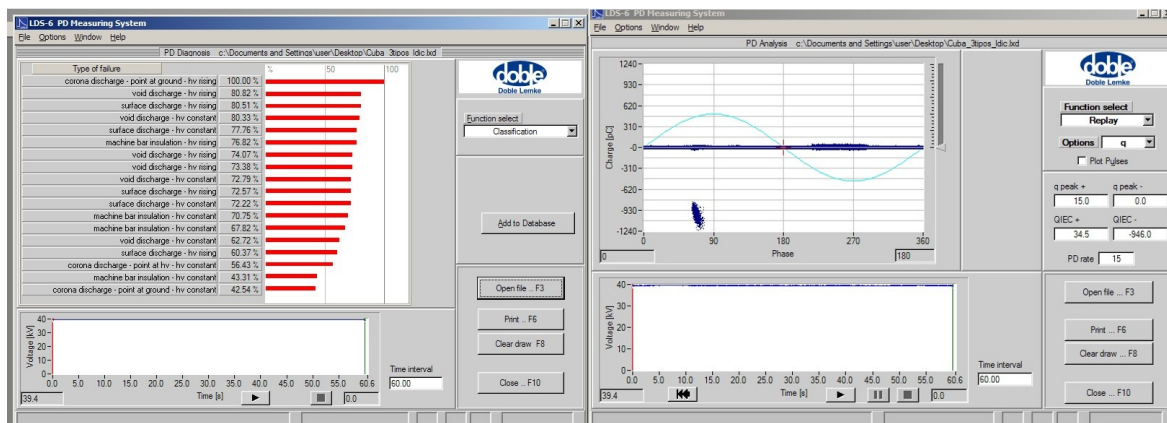
Figura 62 – Medição em mais alta frequência IL fora da cuba LDIC.



Fonte: Autoria própria

Com a utilização do LDIC e geração do gráfico PRPD é possível afirmar se a descarga parcial efetivamente ocorreu e também caracterizar qual a origem desse sinal. O LDIC, por ser um capacitor em paralelo à carga, neste caso a cuba, é capaz de detectar a intensidade e a fase da interferência. Por meio da utilização destes dois fatores, é possível definir se a descarga é parcial, corona ou de outro tipo. Analisando os resultados apresentados na Figura 63, e tendo em vista que as descargas com maiores intensidades não ocorrem nos pontos de defasagem de 90° e 270° (que são os picos da senoide), conclui-se que a descarga analisada é parcial.

Figura 63 – Classificação do sinal experimental com o LDIC.



Fonte: Autoria própria

6 Conclusões

Com base nos objetivos determinados para este trabalho de pesquisa, foi possível confirmar a funcionalidade do conceito do uso de sensores piezoelétricos para a detecção de descargas parciais no estudo de caso da cuba com óleo de transformador. Foi concebida uma estrutura que tivesse semelhança com o dispositivo real de alta potência como é o caso dos transformadores. As estratégias de posicionamento dos sensores foram efetivas mostrando que todos os sensores conseguiram capturar os sinais oriundos das descargas parciais e que existe influência na amplitude do sinal capturado dependente da proximidade e de quão pontual é a descarga. Com relação aos sensores que foram modificados colocando um ímã ou um ferro magnético acoplado não foi notado diferenças destacáveis. O que se leva a concluir que a descarga parcial atua de fato na estrutura do elemento piezoelétrico, ou seja, interagi com os dipolos elétricos existentes na cerâmica piezoelétrica provocando deslocamentos e gerando tensão elétrica proporcional ao impulso da descarga. Como todos os sensores piezoelétricos conseguiram detectar pode ser afirmado que a técnica permite que o sensor seja colado na parede externa ou interna da estrutura de teste, solto fora do óleo a sensibilidade foi bem menor. Como ponto mais científico foi visto várias frequências sendo evidenciadas nos espectros levando a hipótese de que podem estar relacionadas com componentes inerentes ao dispositivo que está tendo as descargas parciais. Como conclusão de menor peso, mas importante para a continuidade do trabalho, pode ser afirmado que a metodologia adotada para os experimentos foi adequada porque a descarga parcial foi detectada com clareza. Além disso, a instrumentação eletrônica desenvolvida se mostrou bastante eficaz para amplificação dos sinais dos sensores piezoelétricos.

6.1 Continuação do trabalho

A descarga parcial é um fenômeno físico complexo que mostra que pode ser captado de diversas maneiras por diferentes princípios. Este trabalho mostrou que o sensor piezoelétrico é capaz de detectar em uma banda de frequência bem ampla, mas que precisa de mais aprofundamento para consolidar a técnica e aplicar com segurança. Diante disso e pensando na continuação de trabalhos para engrandecer este conhecimento pode-se continuar este trabalho da seguinte forma:

- 1 - Do ponto de vista de instrumentação eletrônica otimizar o circuito condicionador de sinal que garanta maior relação sinal ruído e que possa filtrar bandas de frequências selecionáveis. Com isso será possível ter um sinal mais limpo e ainda sim selecionar a faixa de frequência desejada;

- 2 - Na mesma linha da sugestão anterior fazer um estudo e desenvolvimento de

um sistema que possa capturar o sinal usando os sensores piezoelétricos e transmitir de forma remota para que seja possível a instalação e teste em ambiente real como em transformadores;

3 - Desenvolver um trabalho com o mesmo perfil desse só que aplicado em dispositivos reais isolados com outros materiais que não o óleo no intuito de expandir a técnica para outros objetos de teste;

4 - Aplicar a técnica como foi aqui neste trabalho usando outras perturbações como por exemplo produzindo bolhas no óleo e testando a sensibilidade da detecção;

5 - Aplicar a técnica em materiais que se tenha o conhecimento de suas frequências de ressonâncias para que se possa determinar alguma relação direta da descarga com o material onde o teste está sendo realizado.

Referências

- AN, B. *et al.* Effect of background noise discrimination on partial discharge pattern recognition using neural network and support vector machine. *Conference Proceedings of ISEIM*, 2020. Citado na página 16.
- ASSAGRA, J. A. Estudo comparativo entre estruturas piezoelétricas para detecção acústica de descargas parciais. *Journal of Electrical Engineering*, v. 20, n. 3, p. 123–130, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 19.
- BALLATO, A. Partial discharges in electrical insulation: Theory and practice. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1996. Citado na página 32.
- BARTNIKAS, R. Partial discharge: Their mechanism, detection, and measurement. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-9, n. 3, p. 35–45, 1979. Citado na página 24.
- BASSO, F. *et al.* Innovations in partial discharge diagnostics. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001. Citado na página 32.
- BERANEK, L. Dielectric properties of electrical insulation materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1949. Citado na página 30.
- BOGGS, J. Partial discharge measurement techniques. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. [S.l.: s.n.], 1990. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- BORGHEI, M. Diagnostics and monitoring of partial discharge in electrical equipment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021. Citado na página 17.
- BOTTOM, D. The role of partial discharges in insulation systems. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1968. Citado na página 32.
- BRAUN, A. Insulation characteristics and partial discharges in high voltage equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991. Citado na página 25.
- BUA-NUNEZ, P. Instrumentation system for location of partial discharges using acoustic detection with piezoelectric transducers and optical fiber sensors. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 63, 2014. Citado na página 20.
- CASTRO, A. L. *et al.* Monitoramento de descargas parciais com sensores piezoelétricos de baixo custo. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, v. 27, n. 2, p. 89–97, 2016. Citado na página 21.
- CHEN, Y. Impact of high voltage equipment failures on power system operations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013. Citado na página 9.
- CHOU, C. H. Medição de descargas parciais em equipamentos de alta tensão utilizando hfct. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, v. 25, n. 1, p. 45–52, 2018. Citado na página 21.

- CRUZ, J. *et al.* The practical application of bio-inspired pma for the detection of partial discharges in high voltage equipment. *Sensors*, v. 23, n. 23, p. 9307, 2023. Citado na página 18.
- DISSADO, L. Partial discharges in electrical insulation systems. In: *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulation*. [S.l.: s.n.], 1992. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- DOERNENBURG, H. Insulation systems and partial discharge analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1991. Citado na página 29.
- DUVAL, M. The duval triangle for interpretation of dissolved gas analysis in transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1989. Citado na página 29.
- ELEFTHERION, S. Partial discharge detection and analysis in high voltage equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995. Citado na página 31.
- FUJIMOTO, A. *et al.* Analysis of partial discharge in power transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1992. Citado na página 25.
- GJAERDE, J. Advances in partial discharge detection and analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1997. Citado na página 27.
- GOTZ, D. *et al.* Localized prpd pattern for defect recognition on mv and hv cables. In: *IEEE Conference Proceedings*. [S.l.]: IEEE, 2016. Citado na página 15.
- GULSKI, E. Partial discharge monitoring and diagnostics. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1995. Citado na página 26.
- GUTNIK, Y. *Estudo dos Piezoeletretos na Detecção de Descargas Parciais em Transformadores*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, Brasil, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 29.
- HANG, T. *et al.* Investigation of partial discharge in piezoelectric ceramics. *Acta Materialia*, Elsevier, v. 102, p. 284–291, 2016. Citado na página 15.
- HEYWANG, W.; LUBITZ, K.; WERSING, W. *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*. [S.l.]: Springer, 2008. Citado na página 33.
- IEEE. *Standard Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*. [S.l.]: IEEE, 1999. IEEE 60599-1999. Citado na página 29.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. *IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*. [S.l.]: IEEE C57.104-1991, 1991. Citado na página 29.
- International Council on Large Electric Systems. *Brochura técnica*. Paris: [s.n.], 1983. Citado na página 9.
- International Electrotechnical Commission. *High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*. [S.l.]: International Electrotechnical Commission, 2000. Citado na página 9.

- JAFFE, H. *et al.* Piezoelectric ceramics: Their properties and applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 1952. Citado na página 33.
- JUNIOR, A. C. d. S. *et al.* Classification of partial discharge sources in ultra-high frequency using signal conditioning circuit phase-resolved partial discharges and machine learning. *Electronics*, v. 13, p. 2399, 2024. Citado na página 18.
- KRESSMANN, R. Evaluation of partial discharge measurements in high voltage equipment. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 2001. Citado na página 32.
- KRUEGER, J. Partial discharge behavior and measurement techniques. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1989. Citado na página 27.
- KUMAR, R. Partial discharge analysis and measurement techniques. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1997. Citado na página 25.
- Laboratoire Central des Industries Électriques. *Guidelines for Transformer Insulation and Testing*. [S.l.], (LCIE). Citado na página 29.
- LANG, P. Recent advances in partial discharge monitoring and interpretation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005. Citado na página 32.
- LAZAREVICH, A. Advanced techniques in partial discharge monitoring and diagnostics. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003. Citado na página 31.
- LEMKE, E. Partial discharges in electrical power apparatus. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 44, n. 5, p. 27–35, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 24, 26 e 27.
- LIPPMANN, G. Principe de la conservation de l'Électricité et la photographie des couleurs. *Annales de Chimie et de Physique*, 1881. Citado na página 32.
- LUNDGAARD, E. Partial discharge measurement and analysis techniques. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1992. Citado na página 31.
- MACEDO, E. Innovative methods for partial discharge detection and electrical insulation analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014. Citado na página 43.
- MACEDO, E. C. T. *et al.* Design of an experimental methodology for generation of partial discharges signals. In: *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Conference*. [S.l.]: IEEE, 2015. Citado na página 14.
- MACEDO, E. C. T. *et al.* The influence of void configuration in statistical parameters of partial discharge signals. *Proceedings of the IEEE Conference*, IEEE, 2013. Citado na página 14.
- MAJID, M. H. H. A. *et al.* Partial discharge activity analysis in rotating machine using phase resolved partial discharge pattern. In: *2024 IEEE 4th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA)*. [S.l.]: IEEE, 2024. Citado na página 18.
- MASON, G. Partial discharge phenomena in electrical insulation systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

- MELO, J. V. J. de *et al.* Partial discharge source classification based on machine learning and prpd. In: *2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE)*. [S.l.]: IEEE, 2024. Citado na página 19.
- MONRO, M. The electrical breakdown of gases and the role of partial discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1952. Citado na página 30.
- MOREIRA, M. M. A. C. *et al.* Piezoelectrets: A brief introduction. *IEEE Sensors Journal*, IEEE, v. 21, n. 20, p. 22317–22324, 2021. Citado na página 17.
- MORSUIS, A. Insulation coordination and partial discharges in high voltage equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993. Citado na página 25.
- MORSUIS, A. Partial discharge and electrical insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1995. Citado na página 25.
- MUHR, H. *et al.* Innovations in partial discharge measurement and analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2005. Citado na página 29.
- NATRASS, R. Partial discharges in high-voltage equipment. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1988. Citado na página 9.
- NETO, A. G. S. Monitoramento de descargas parciais em equipamentos de alta tensão. *Revista Brasileira de Engenharia Elétrica*, 2014. Citado na página 9.
- NIEMAYER, L. Classification of partial discharges in electrical insulation systems. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 28, n. 6, p. 921–929, 1995. Citado na página 24.
- NIEMEYER, J. Partial discharges and insulation systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991. Citado na página 25.
- NOBREGA, L. A. M. M. *et al.* Design and development of a bio-inspired uhf sensor for partial discharge detection in power transformers. *Sensors*, MDPI, v. 19, n. 653, 2019. Citado na página 16.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). *Relatório de desempenho da transmissão*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015. Citado na página 9.
- PALITO, T. T. C. *et al.* Acoustic detection of single and multiple air-gap partial discharges with piezoelectrets transducers. In: *2014 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*. [S.l.]: IEEE, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 19.
- QIAN, Y. *et al.* Innovations in partial discharge monitoring for power transformers. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 2018. Citado na página 21.
- RAGHAVAN, A. *et al.* Low-cost embedded optical sensing systems for distribution transformer monitoring. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 36, n. 2, p. 1007–1016, 2021. Citado na página 17.
- REIS, C. F. dos *et al.* Comparative analysis between impulsive detection methods applied on partial discharge acoustic signals. In: *IEEE Conference Proceedings*. [S.l.]: IEEE, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.

- RODRIGUES, F. A. Gestão de ativos no setor elétrico utilizando monitoramento de descargas parciais. *Journal of Electrical Engineering*, 2019. Citado na página 9.
- ROGERS, T. Transformer insulation and partial discharge: Guidelines and techniques. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1995. Citado na página 29.
- SARATHI, R.; SINGH, B.; DANIKAS, M. Partial discharge studies and insulation diagnostics in power systems. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007. Citado na página 10.
- SCHWARZ, R. *et al.* Optical detection of partial discharges in sf6 insulated high-voltage equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, n. 4, p. 2017–2023, 2007. Citado na página 30.
- SIKORSKI, P. Cutting-edge techniques in partial discharge detection. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 22.
- SMITH, J. Partial discharge detection: New methods and applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021. Citado na página 11.
- SONG, Y. Recent advances in partial discharge measurement technologies. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022. Citado na página 17.
- SONG, Y. *et al.* Partial discharge detection based on optimization of optical probe and sagnac interference. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 71, p. 9006509, 2022. Citado na página 17.
- STONE, G. Advancements in partial discharge testing of high voltage equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- SUKMA, T. R. *et al.* Classification of partial discharge sources using waveform parameters and phase-resolved partial discharge pattern as input for the artificial neural network. In: *IEEE International Conference Proceedings*. [S.l.]: IEEE, 2018. Citado na página 15.
- TRAINER, M. Partial discharge detection techniques and applications. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2003. Citado na página 32.
- WANG, H. Comprehensive approaches to partial discharge monitoring in power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023. Citado na página 22.
- WU, X. Recent developments in high voltage insulation systems and partial discharge testing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015. Citado na página 15.
- XAVIER, G. V. R. *et al.* Partial discharge location through application of stationary discrete wavelet transform on uhf signals. *IEEE Sensors Journal*, v. 21, n. 21, 2021. Citado na página 16.
- XAVIER, G. V. R. *et al.* Detection, classification and location of sources of partial discharges using the radiometric method: Trends, challenges and open issues. *IEEE Access*, 2021. Citado na página 16.
- ZHANG, L. Trends in partial discharge analysis and high voltage testing. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022. Citado na página 22.