

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU – FEB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS GOES CRIVELARO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA EXPERIMENTAL
PARA ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS:**
Estudo da Influência de Arranjos de Multiaterramento e Ruído em Laboratório
de Alta Tensão.

BAURU/SP
Novembro/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU – FEB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MATHEUS GOES CRIVELARO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA EXPERIMENTAL
PARA ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS:**

Estudo da Influência de Arranjos de Multiaterramento e Ruído em Laboratório
de Alta Tensão.

Dissertação apresentada como requisito à
obtenção do título de mestre em Engenharia
Elétrica, pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia
de Bauru, da Universidade Estadual Paulista.

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza
Coorientador: Prof. Dr. André Gifalli

BAURU/SP
Novembro/2025

Crivelaro, Matheus Goes

C936d DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA EXPERIMENTAL
PARA ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS : Estudo da influência de
arranjos de multiterramento e ruído em laboratório de alta tensão.

Matheus Goes Crivelaro. -- Bauru, 2025
59 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade
de Engenharia, Bauru.

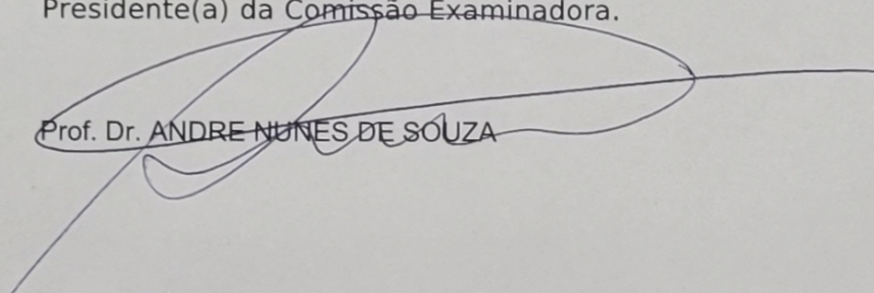
Orientador: André Nunes de Souza

Coorientador: André Gifalli

1. Descargas Parciais. 2. Manutenção. 3. Confiabilidade. 4.
Sensores. 5. Subestações de Energia. I. Título.

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

Aos 29 dias do mês de setembro do ano de 2025, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MATHEUS GOES CRIVELARO, intitulada **DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE DESCARGAS PARCIAIS: ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ARRANJOS DE MULTIATERRAMENTO E RUÍDO EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. PEDRO DA COSTA JUNIOR (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. DANILO SINKITI GASTALDELLO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia / Universidade de Marília - Unimar. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. ANDRE NUNES DE SOUZA

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

Esta pesquisa foi viabilizada pela parceria público-privada entre o Laboratório de Sistemas de Potência e Técnicas Inteligentes (LSISPOTI), da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), e a ISA Energia Brasil, por meio do projeto de Pesquisa, Desenvolvimento & Inovação (PD&I) PD-00068-0060/2022.

A metodologia proposta contribui para a gestão de ativos do tipo transformadores de instrumento, permitindo a identificação de anomalias com base em critérios técnicos e operacionais. Os impactos abrangem desde o aumento da confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, essencial para a sociedade, até a otimização de recursos financeiros, promovendo a sustentabilidade econômica e ambiental. Ademais, considerando que a falha de um equipamento sistêmico desse porte pode acarretar riscos de interrupção generalizada no fornecimento — inclusive hipóteses de *blackout* —, a adoção de métodos de monitoramento e diagnóstico precoce torna-se ainda mais estratégica para a segurança energética.

De modo geral, os resultados impulsionam avanços nas práticas de gestão de ativos baseadas em dados, promovendo decisões mais assertivas e fundamentadas. Além disso, consolidam a cooperação entre a universidade e a indústria, gerando benefícios diretos para a sociedade e para o setor elétrico.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research was made possible through a public-private partnership between the Power Systems and Intelligent Techniques Laboratory (LSISPOTI) of the School of Engineering of Bauru (FEB) at São Paulo State University (UNESP) and ISA Energia Brasil, under the Research, Development & Innovation (R&D&I) project PD-00068-0060/2022.

The proposed methodology contributes to the management of instrument transformer assets by enabling the identification of anomalies based on technical and operational criteria. The impacts range from enhancing the reliability of electricity supply—an essential service for society—to optimizing financial resources, thus promoting both economic and environmental sustainability. Moreover, given that the failure of a systemic equipment of this nature may lead to widespread service interruptions—even raising the hypothesis of a blackout—the adoption of monitoring and early diagnostic methods becomes even more strategic for energy security.

In general, the results drive advances in data-based asset management practices, promoting more assertive and informed decisions. In addition, they consolidate cooperation between the university and industry, generating direct benefits for society and the electricity sector.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, que guia meu caminho e Nossa Senhora Aparecida, que sempre me acolheu e cuidou do meu coração nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Célio e Maria, que me ensinaram os valores e princípios dessa vida, sempre me apoiando e me dando força para superar os desafios.

A minha querida esposa Tatiane, pelo companheirismo, paciência e força, me fazendo sempre acreditar nos meus sonhos.

Aos meus finados avós, Ivo e Maria, que me ensinaram que é possível vencer qualquer desafio na vida quando se tem Deus como guia.

Ao Professores Dr. André Nunes de Souza e Dr. André Gifalli, orientador e coorientador respectivamente, pela oportunidade, confiança e paciência, durante a orientação e condução deste trabalho.

Aos companheiros de pesquisa Erasmo Silveira Neto e demais colegas do laboratório LSISPOTI, aos companheiros do Laboratório de Alta Tensão da ISA ENERGIA, Carlos Guilherme Gonzales, Leonardo Andrade, Luis Fernando Bertonha e Fernando Madia, pela amizade e disposição em ajudar sempre que necessário.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da FEB Faculdade de Engenharia de Bauru, que contribuiu com a realização deste trabalho e proporciona o desenvolvimento de muitos pesquisadores.

“Não importa que você vá devagar, contanto que você não pare.”
(Confúcio)

RESUMO

O diagnóstico de falhas em transformadores de corrente de alta tensão é essencial para garantir a confiabilidade e a continuidade dos serviços no setor elétrico. A análise de sinais de descargas parciais se destaca como uma técnica sensível para a detecção precoce de defeitos nesses equipamentos. No entanto, a realização de ensaios em campo enfrenta limitações significativas, pois as infraestruturas das subestações podem impactar diretamente a captura e a interpretação dos sinais. A ausência de tecnologias e metodologias consolidadas para medições em equipamentos energizados, associada às dificuldades decorrentes das condições de instalação, das características dos instrumentos de medição, de sistemas com multaterramento e de interferências eletromagnéticas, reforça a necessidade de estudos mais aprofundados em ambientes controlados de laboratório. Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo desenvolver uma metodologia de análise de sinais de descargas parciais em laboratório de alta tensão, simulando diferentes arranjos experimentais que representem as principais condições observadas em subestações de transmissão. A metodologia proposta envolve a aplicação de alta tensão em transformadores de corrente e a captura dos sinais de descarga parcial — que apresentam componentes de alta frequência — utilizando transformadores de corrente de alta frequência (*High Frequency Current Transformer – HFCT*). Diferentes topologias são avaliadas, para avaliar os efeitos de multaterramento, a presença de efeito corona e fontes de ruído eletromagnético. Os resultados parciais obtidos indicam que diferentes configurações de instalação impactam significativamente a detecção e a interpretação dos sinais de descargas parciais, influenciando parâmetros como forma de onda, amplitude e conteúdo espectral dos pulsos capturados. Verificou-se que fatores como o tipo e o posicionamento do *HFCT*, o diâmetro interno do sensor, o comprimento dos cabos coaxiais, a presença de multaterramentos e as interferências eletromagnéticas contribuem para a degradação da relação sinal-ruído, dificultando a identificação precisa das descargas. Além disso, observou-se que a introdução de amplificadores e técnicas de casamento de impedância pode mitigar parte dessas limitações. Esses resultados reforçam a necessidade de metodologias específicas para diferentes topologias e indicam que a abordagem proposta contribui diretamente para o aprimoramento das práticas de medição, manutenção preditiva e gestão de ativos no setor elétrico.

Palavras-chave: Descargas Parciais, Manutenção, Confiabilidade, Sensores, Subestações de Energia e Transmissão de Energia.

ABSTRACT

The diagnosis of faults in high-voltage current transformers is essential to ensure reliability and continuity of services in the electric power sector. The analysis of partial discharge signals stands out as a sensitive technique for the early detection of defects in these devices. However, conducting field tests still faces limitations, as substation infrastructures can directly impact the acquisition and interpretation of signals. The lack of consolidated technologies and methodologies for measurements in energized equipment within substations, combined with challenges related to installation conditions, measurement equipment characteristics, multi-grounding systems, and electromagnetic interference, underscores the need for more in-depth studies under controlled laboratory conditions. In this context, this dissertation aims to develop a methodology for analyzing partial discharge signals in a high-voltage laboratory, simulating different experimental setups that replicate the main conditions found in transmission substations. The proposed methodology involves applying high voltage to current transformer samples and acquiring partial discharge signals — which exhibit high-frequency components — using High-Frequency Current Transformers (HFCTs). Different topologies will be assessed, including the effects of multi-grounding, corona discharge, and electromagnetic noise sources. Preliminary results indicate that installation configurations significantly affect the detection and interpretation of partial discharge signals, influencing the waveform shape, amplitude, and spectral content of the captured pulses. It was observed that factors such as the type and positioning of the HFCT, the sensor's internal diameter, coaxial cable length, presence of multi-grounding, and electromagnetic interference contribute to the degradation of the signal-to-noise ratio, hindering accurate PD identification. Additionally, the use of amplifiers and impedance matching techniques has shown potential to mitigate some of these limitations. These findings reinforce the need for tailored methodologies for each specific topology and demonstrate that the proposed approach directly contributes to improving measurement practices, predictive maintenance, and asset management in the electric power sector.

Keywords: Partial Discharges, Maintenance, Reliability, Sensors, Power Substations and Power Transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Material Isolante com uma cavidade.	18
Figura 2 - Recorrência das descargas internas.....	18
Figura 3 - Ocorrência de descargas internas em níveis de tensão inferiores à tensão de início	19
Figura 4 - Circuito RLC para detecção de descargas parciais do tipo elétricas.	21
Figura 5 - Circuito básico de medição de DP com Impedância RC de Medição.	22
Figura 6 - DP em uma cavidade em um osciloscópio de base elíptica.....	23
Figura 7 - Descargas do tipo Corona no osciloscópio de base elíptica.	23
Figura 8 - Perturbações mais comuns apresentadas no osciloscópio de base elíptica; a) distorção harmônica; b) objeto flutuante ao redor; c) motores elétricos; d) lâmpadas fluorescentes, e) mau contato; f) retificador.	24
Figura 9 - Circuito utilizado para geração e detecção de DPs.....	26
Figura 10 - Circuito utilizado no experimento.	26
Figura 11 - Fonte Ressonante de 600 KV - Laboratório de AT da ISA ENERGIA BRASIL.	28
Figura 12 - Capacitor de Acoplamento Laboratório de AT da ISA ENERGIA BRASIL.....	28
Figura 13 - Ponte Schering para medição de capacitância e perdas dielétricas em frequência industrial.....	29
Figura 14 - Instrumentos Utilizados para Levantamento de Dados Iniciais em Laboratório...	30
Figura 15 - Sinal de Ruído captado no dia 1.	31
Figura 16 - FFT do Sinal de Ruído do Laboratório do dia 1.....	32
Figura 17 - Sinal de Ruído do Laboratório no dia 2.....	32
Figura 18 - FFT do Sinal de Ruído do Laboratório no dia 2.....	33
Figura 19 - Sinal de DP de 200 ρ C e 120 Hz.	33
Figura 20 - Sinal de DP de 200 ρ C e 100 Hz.	34
Figura 21 - Sinal de DP de 200 ρ C depois de Filtrado em 50 a 70 Hz e o FFT.....	34
Figura 22 - Sinal de DP de 50 ρ C e 120 Hz.	35
Figura 23 - Sinal de DP de 500 ρ C e 120 Hz.	36
Figura 24 - Modelo de Pulso de Descarga Parcial.....	37
Figura 25 - Sinal de Pulso e FFT do Calibrador 1.....	37
Figura 26 - Sinal de DP Calibrador 1.	38
Figura 27 - Sinal de Pulso e FFT do Calibrador 2.....	38
Figura 28 - Sinal de DP Calibrador 2.	39
Figura 29 - Resposta combinada: gerador e circuito buffer discreto.....	41
Figura 30 - Resposta HFCT Techimp.....	42
Figura 31 - Resposta HFCT HVPD.	42
Figura 32 - Resposta HFCT Ohmicron.....	43
Figura 33 - Resposta HFCT Person 8585C.	43
Figura 34 - Comparação entre dois Person 8585C.....	44
Figura 35 - Resposta HFCT Person 8705C.	44
Figura 36 - Comparação entre dois Person 8705C.....	45
Figura 37 - Efeito do comprimento do cabo - Techimp.	45
Figura 38 - Efeito do comprimento do cabo - HVPD.....	46
Figura 39 - Efeito do comprimento do cabo - Ohmicron.	46

Figura 40 - Efeito do comprimento do cabo – 8585C.	47
Figura 41 - Efeito do comprimento do cabo – 8705C.	47
Figura 42 - Comparação de respostas em frequência entre os HFCTs.	48
Figura 43 - Distorção causada pelo contato da carcaça do HFCT com o cabo de aterramento.	53
Figura 44 - Sinal do HFCT após a carcaça ser isolada do cabo.	53
Figura 45 - Ensaio de DP no laboratório com HFCT's da Pearson 8705C, 8585C e 8590C – sinal de DP com 80pC com alta intensidade de ruído.	54
Figura 46 - Resultado do ensaio de sensibilidade e caracterização dos sinais de DP, corona e chaveamento de cargas.	55

LISTA DE SIGLAS

A – Ampère

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADC – Conversor Analógico-Digital (*Analog-to-Digital Converter*)

AE – Emissão Acústica (*Acoustic Emission*)

ARF – Análise de Resposta em Frequência (*Frequency Response Analysis*)

dBm – Decibel-miliwatt

DP – Descargas Parciais (*Partial Discharge*)

FFT – *Fast Fourier Transform* (Transformada Rápida de Fourier)

HFCT – *High Frequency Current Transformer*

IEC – *International Electrotechnical Commission*

kVA – Quilo-volt-ampère

LPFT – *Local Polynomial Fourier Transform* (Transformada Polinomial Local de Fourier)

LPP – *Local Polynomial Period* (Período Polinomial Local)

MHz – Megahertz

ms – Milissegundos

PDMS – *Partial Discharge Measurement Software*

RFCT – *Radio-Frequency Current Transformer*

RLC – Circuito RLC (*resistor–inductor–capacitor*)

RMS – *Root Mean Square* (Valor Quadrático Médio)

SE – Subestação de Energia

TC – Transformador de Corrente

TR – Transformador de Potência

UHF – *Ultra-high Frequency*

V – Volts

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	14
1.1 Relevância e Motivação.....	14
1.2 Justificativa.....	15
1.3 Objetivos.....	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Especificos	15
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 Descargas Parciais	16
2.2 Métodos de Medição de Descargas Parciais.....	20
2.2.1Métodos não elétricos de Medição de Descargas Parciais	20
2.2.2Métodos elétricos de Medição de Descargas Parciais	21
2.2.3Transformadores de Corrente de Alta Frequência.....	24
CAPÍTULO 3 – ESTRUTURAÇÃO DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO	27
3.1Laboratório de Alta Tensão da ISA ENERGIA BRASIL.	28
3.2Segregação das DP's e dos ruídos	30
CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESCARGAS PARCIAIS EM AMBIENTE CONTROLADO.....	31
4.1Comparativo de Pulsos de DP's.....	33
4.2Comparativo de Amplitude de DP's.	35
4.3Característica dos Pulsos de Calibração DP.	36
4.4Respostas dos HFCTs.....	39
4.6Considerações sobre os testes realizados.....	48
CAPÍTULO 5 – INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE INSTALAÇÃO NA MEDIÇÃO NÃO INVASIVA DE DESCARGAS PARCIAIS	51
5.1 Impacto do tamanho do HFCT e posicionamento durante os ensaios.....	51
5.2Análise da Sensibilidade e Características dos Sinais Medidos	54
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES.....	56
6.1 Aspectos Gerais	56
6.2 Publicação Aprovada sobre a Pesquisa	57
6.3 Continuação da Pesquisa.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a relevância do diagnóstico de falhas em transformadores de corrente, destacando como a evolução e a complexidade do setor elétrico demandam métodos mais precisos de avaliação do estado dos equipamentos. São discutidas as limitações das medições de descargas parciais em campo, a motivação para estudos em laboratório e a justificativa baseada na literatura sobre a importância do monitoramento do isolamento elétrico. Por fim, o capítulo descreve o objetivo geral do trabalho e detalha os objetivos específicos, que abrangem a revisão teórica, a metodologia experimental, a definição dos equipamentos, a análise do desempenho de diferentes *HFCTs* e a discussão dos resultados.

1.1 Relevância e Motivação

O setor elétrico, em vista de sua rápida expansão tanto em extensão quanto em complexidade, vem demandando o uso de novas tecnologias que possam lidar com essa situação de forma eficiente e robusta. Diante da falta de monitoramento e de suas reais condições, os equipamentos elétricos usados na geração, transmissão e distribuição, podem ser solicitados a operar sob condições adversas que podem comprometer a vida útil do ativo e levá-lo a falha em curto, médio ou à longo prazo, frequentemente causando altos custos de manutenção corretiva e elevados prejuízos causados por sua saída de operação.

Diante deste fato, são necessárias medidas que visem a migração da manutenção preventiva para a manutenção preditiva e da manutenção baseada no tempo para a manutenção baseada no estado real do ativo. Os prejuízos decorrentes de qualquer tipo de interrupção de energia, ocasionada pela saída de operação de ativos, reforçam a necessidade de implantação de processos e ferramentas que possam realizar a avaliação das condições reais desses equipamentos, através do diagnóstico preditivo e seguro.

Ressalta-se que, os ensaios de descargas parciais são comumente utilizados pelas concessionárias de energia elétrica para avaliar as condições dos materiais dielétricos dos ativos, já que possui a característica de ser um ensaio não invasivo. No entanto, os diferentes arranjos e parâmetros das subestações podem influenciar nas medições, uma vez que ocorrem atenuações do sinal medido, ocasionando erros de diagnóstico através deste tipo de ensaio.

Deste modo, neste trabalho foi realizada a análise dos sinais de ensaios de descargas parciais, considerando os diferentes arranjos (tipos de conexões, aterramentos múltiplos,

proximidade de equipamentos que interferem nas medições, tais como: para-raios, bobina de bloqueio, entre outros) e parâmetros que influenciam diretamente nos resultados das medições.

1.2 Justificativa

Estudos conduzidos por (W. McDermid & T. Black, 2012) destacam que a degradação do isolamento elétrico é uma das principais causas de falhas nos equipamentos empregados em Subestações de Energia. Essa conclusão é reforçada pelo levantamento internacional apresentado no *CIGRÉ Technical Brochure 512* (CIGRÉ, 2012), o qual analisou a confiabilidade de transformadores de instrumento e identificou que grande parte das falhas severas estava associada a defeitos no sistema de isolamento. Nesses equipamentos, o principal indicativo precoce de degradação do meio isolante é a ocorrência de descargas parciais, que representam um sinal crítico para o diagnóstico antecipado de falhas incipientes (McDermid & Black, 2012).

As DP são descargas elétricas de baixa intensidade que ocorrem em meio isolante e resultam na degradação gradual do sistema de isolamento do equipamento elétrico (IEC 60270, 2000). Portanto, monitorar os padrões de DP pode possibilitar o diagnóstico precoce da presença de falhas nos equipamentos, tornando-se uma das técnicas mais promissoras de manutenção preditiva aplicáveis às subestações.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia experimental para análise dos sinais de descargas parciais considerando diferentes arranjos em laboratório de alta tensão.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a. **Realizar uma revisão bibliográfica** acerca do fenômeno de descargas parciais, suas principais características, métodos de detecção e aplicações no monitoramento de equipamentos elétricos.

- b. **Desenvolver e estruturar uma metodologia de medição** de descargas parciais em ambiente controlado de laboratório de alta tensão, assegurando a reprodutibilidade dos ensaios.
- c. **Selecionar e caracterizar os equipamentos a serem ensaiados**, definindo parâmetros elétricos e construtivos relevantes para a análise.
- d. **Comparar o desempenho de diferentes sensores HFCTs**, avaliando sua sensibilidade, linearidade e resposta em medições de descargas parciais.
- e. **Analisar os resultados obtidos nos ensaios** de forma crítica, identificando limitações, influências dos arranjos de medição e potenciais melhorias na aplicação da técnica.
- f. **Propor recomendações técnicas** para a utilização dos sensores HFCT na gestão de ativos elétricos, contribuindo para diagnósticos mais precisos e confiáveis.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura relacionada às descargas parciais, às técnicas de medição e aos métodos de análise aplicados aos transformadores de corrente.

2.1 Descargas Parciais

As descargas parciais (DP) são eventos elétricos localizados que ocorrem em equipamentos de alta tensão devido a falhas na isolação ou elevados gradientes elétricos na isolação (BACEGA et al, 2017).

O fenômeno das descargas parciais ocorre em cavidades ou inclusões existentes no corpo do material isolante. Essas cavidades são compostas de materiais com constante dielétrica diferente do restante do corpo. Quando se submete este material a um campo elétrico, este se distribui pelo material, submetendo a cavidade ou inclusão a um gradiente de tensão em excesso ao gradiente máximo suportável (U. FUANGSOONGNERN, 2014). Consequentemente, ocorrerá pequenas descargas disruptivas no interior da cavidade, acarretando um processo temporal de deterioração progressivo do material e eventualmente a falha do equipamento. (Wang, X., Zhu, D., Li, F., & Gao, S., 1998).

Quando a constante dielétrica do material presente em uma cavidade ou inclusão é menor que a do sistema isolante, ocorre uma redistribuição do campo elétrico, concentrando maior tensão na cavidade. Caso esta cavidade esteja preenchida por ar, a probabilidade de disrupção elétrica aumenta significativamente. Esse fenômeno é frequente, considerando que a

maioria dos sistemas isolantes são compostos por materiais como plásticos extrudados, resinas ou papel impregnado com resina. Em algumas situações, as cavidades podem estar preenchidas com óleo, como ocorre entre camadas de papel impregnado em enrolamentos de transformadores e cabos. Já as inclusões, por sua vez, correspondem à presença de impurezas sólidas — como partículas de sujeira, fibras de papel ou têxteis — comumente encontradas em materiais isolantes produzidos a partir de plásticos extrudados e resinas moldadas.

Nas cavidades preenchidas com óleo, a suportabilidade, além de depender do tipo de óleo e das dimensões físicas da cavidade, dependerá também do grau de contaminação (H. E. ROJAS, 2017). Após o processo de descarga se iniciar, há a formação de bolhas de ar dentro do óleo, as quais poderão também dar origem a descargas, uma vez que, os líquidos são capazes de absorver gases, haverá um equilíbrio entre a formação de bolhas pelas descargas e a absorção das bolhas pelo líquido. Como consequência as descargas podem aumentar, diminuir ou cessar completamente.

Nas cavidades preenchidas com gás, P. RAPISARDA (2017) diz que a suportabilidade depende do tipo de gás, da pressão do mesmo e das dimensões da cavidade. Em alguns casos, pode-se calcular o gradiente de tensão na cavidade, como exemplo, numa cavidade achatada, perpendicular ao campo elétrico, o gradiente de tensão será ϵ vezes o gradiente de tensão no material, sendo ϵ a constante dielétrica no material isolante. Já para uma cavidade esférica, este fator será de $3\epsilon/(1+2\epsilon)$, tendendo a 1,5 se ϵ for grande. Se a cavidade for longa e paralela ao campo elétrico, o gradiente de tensão na cavidade tende a ser igual ao do material isolante.

Nas inclusões, os corpos estranhos possuem suportabilidade menor que o resto do material. Quando existe descargas nestes elementos, gases são produzidos e cavidades preenchidas com gás são formadas, propiciando novas descargas. Partículas metálicas agudas imersas em um material isolante podem dar origem a uma região onde o gradiente de tensão é muito grande, causando descargas no material isolante em sua volta, o que causará a formação de gases e a criação de cavidades preenchidas com gás.

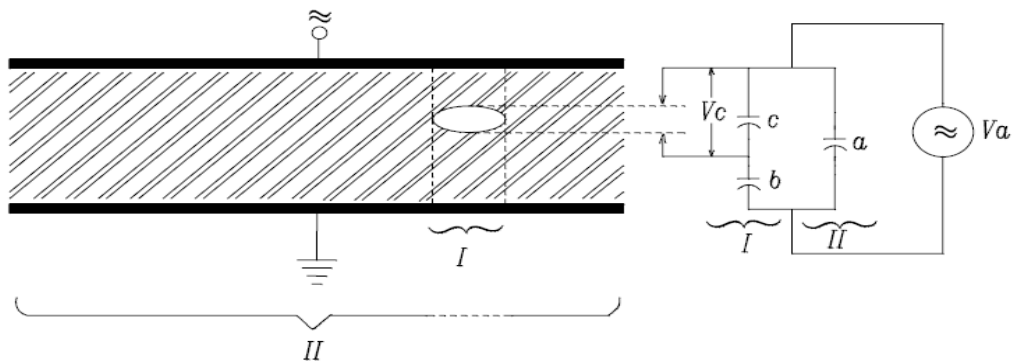
Em ABNT NBR IEC 60270, define que as descargas parciais podem ocorrer em diferentes partes do transformador, como bobinas, isoladores, e outras áreas de isolamento. Os sinais são tipicamente fracos e podem ser mascarados por ruídos elétricos oriundos do ambiente em que estão instalados, ou mesmo pelos ruídos intrínsecos do equipamento de medição, em especial nos casos em que cabos longos são necessários ou mesmo em virtude da interação imprevisível entre os diversos instrumentos que compõem o sistema.

Os sistemas de detecção de descargas parciais precisam ser altamente sensíveis para detectar eventos de baixa intensidade (Klüss; Elg, 2020) (XU et al., 2016). No entanto, também

é crucial que sejam seletivos o suficiente para distinguir entre descargas parciais e outros ruídos elétricos comuns.

Através do circuito equivalente simplificado de uma seção de material isolante possuindo uma cavidade preenchida com gás, podemos compreender o comportamento das descargas parciais internas em materiais submetidos a uma tensão alternada senoidal. No circuito da Figura 1 a seguir, a capacitância da cavidade é representada por c e a capacitância do material isolante em série por b . O resto do material é representado pela capacitância a .

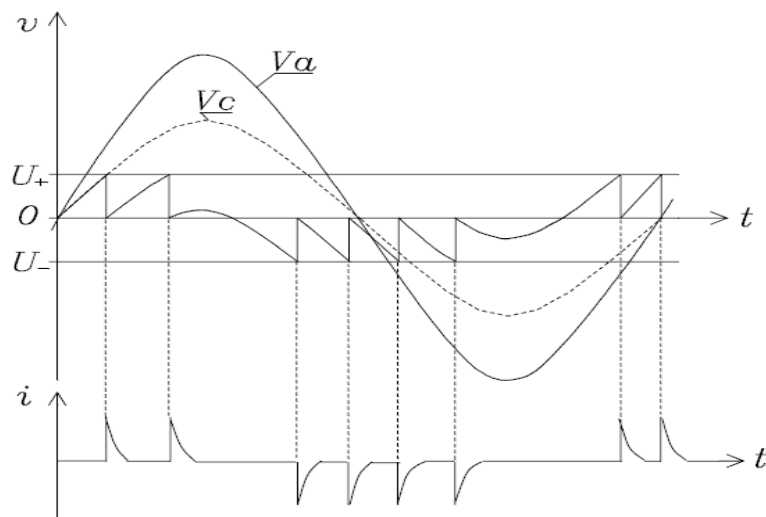
Figura 1 - Material Isolante com uma cavidade.



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

Na Figura 2 ilustra-se a representação de um material isolante com uma cavidade em seu interior. A parte I representa a seção onde existe a cavidade e a parte II corresponde a parte não afetada do material. V_a é a tensão aplicada nos terminais do material e V_c é a tensão sobre a cavidade.

Figura 2 - Recorrência das descargas internas.



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

Com auxílio da Figura 2, ilustra-se que quando V_c atinge o valor da tensão de descarga da cavidade U_+ , uma descarga disruptiva ocorre na cavidade. A tensão então cai quase a zero (existe uma pequena tensão residual não considerada no desenho da Figura 1). Esta queda de tensão leva cerca de menos que $0,1 \mu s$.

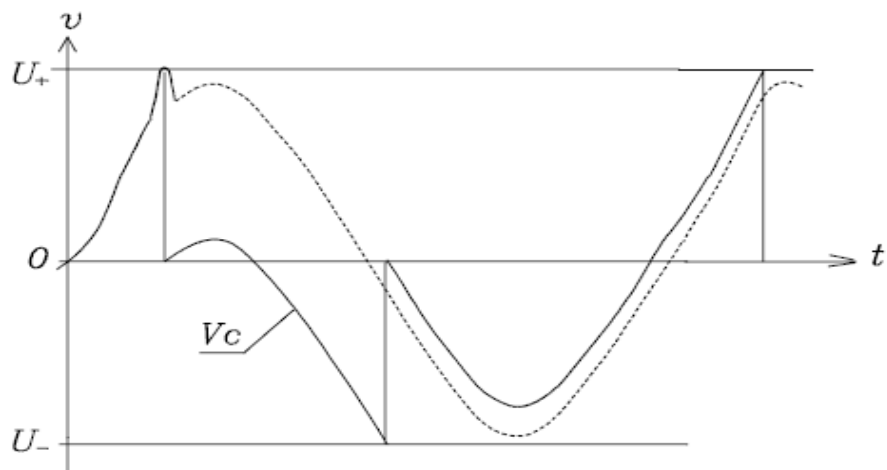
Após a descarga ter sido extinta, a tensão volta a crescer na cavidade, e quando este atinge novamente o valor U_+ uma nova descarga ocorre. Isto ocorre várias vezes, até que a tensão V_c seja inferior a U_+ .

Após a tensão V_c ter atingido seu valor de crista positivo, ela diminui até atingir o valor U_- onde uma nova descarga ocorre. Assim sucessivamente tem-se a recorrência das descargas parciais internas.

As descargas na cavidade produzem um corrente impulsiva nos terminais do material submetido a tensão CA, como podemos ver na parte inferior da Figura 2. Pode-se constatar que as descargas aparecem nas regiões onde a variação da tensão é maior. A tensão na qual inicia-se as descargas parciais é conhecida como *tensão de início* e a tensão onde as descargas cessam de *tensão de extinção*.

Após a descarga na cavidade ter-se iniciado, descargas podem continuar ocorrendo mesmo quando a tensão impressa na cavidade é inferior a tensão de início de DP. Na Figura 3 a seguir admite-se que a primeira descarga ocorre devido a uma sobretensão devido a um transitório qualquer. A tensão V_c , geralmente menor que a tensão de início de descarga, atinge um valor superior a U_+ dando origem a primeira descarga, que se repetirá a cada meio-ciclo.

Figura 3 - Ocorrência de descargas internas em níveis de tensão inferiores à tensão de início



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

A tensão de extinção das descargas parciais (tensão de crista) pode ser calculada como sendo aproximadamente menor que $U_{+}/2$, contudo na prática, a tensão de extinção varia entre 0 a 25% menor que a tensão de início. Em materiais isolantes compostos de papel impregnado a tensão de extinção é frequentemente muito menor devido a rápida formação de gases.

Outros padrões de recorrência de descargas existem, dependendo do tipo de cavidade. Tem-se um padrão de descargas *intermitente* sempre que as cavidades possuem grande assimetria com $U_{+} \neq U_{-}$, formando um padrão de descargas intermitentes. Outro tipo de ocorrência é a descarga *transversa*, a qual ocorre em cavidades cujo formato físico propicia descargas em mais de um ponto. Este comportamento pode levar a um padrão de descargas onde amplitudes pequenas e grandes se sucedem.

De modo geral, um material pode apresentar diversas cavidades, com formatos distintos e diferentes tensões de início e extinção. Assim, ao se observar as descargas produzidas por essas cavidades em um osciloscópio, obtém-se uma figura complexa, na qual os pulsos provenientes das várias cavidades se sobrepõem entre si (Wang, X.; Zhu, D.; Li, F.; Gao, S., 1998).

2.2 Métodos de Medição de Descargas Parciais

As descargas parciais dão origem a uma série de fenômenos físicos e químicos. Esses fenômenos, por sua vez, podem ser utilizados para detectar a presença dessas descargas. Em ABNT NBR IEC 60270 - 2017, define que estes fenômenos são caracterizados por elétricos (perdas dielétricas e impulsos elétricos) e não elétricos (radiação eletromagnética, luz, calor, ruído acústico, pressão de gases e transformações químicas).

2.2.1 Métodos não elétricos de Medição de Descargas Parciais

A seguir são apresentados os métodos de detecção de DPs considerados não elétricos.

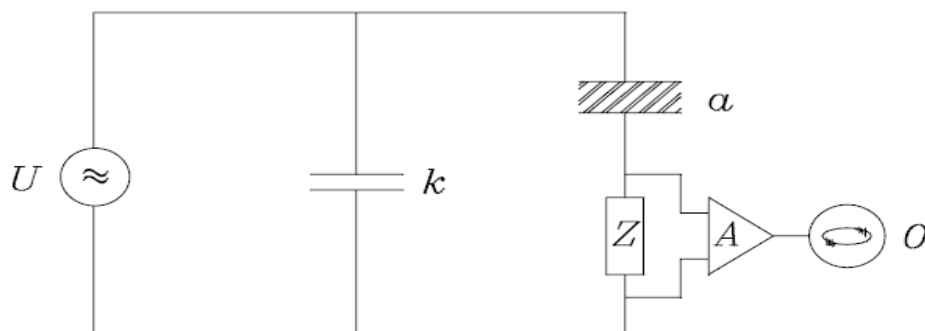
- Por luz: As descargas parciais internas podem ser vistas se o material isolante for translúcido. A radiação é muito tênue, contudo, esta pode ser intensificada pelo aumento da frequência da tensão aplicada. Com este método é possível observar descargas parciais superficiais e externas (Corona).
- Por Calor: O aumento da temperatura provocado pelas DPs pode ser medido por termo acopladores dispostos ao longo do dielétrico. É possível também detectar o aumento da temperatura na superfície de cabos e buchas submetidos a ensaios de alta tensão por contato manual. Este método é bastante mínimo a magnitude das descargas não pode ser medida.

- **Ruído acústico:** A detecção aural é um método bastante antigo e é possível escutar descargas superficiais em buchas e cabos. A sensibilidade deste método é em torno de 50 a 80 pF¹. Utiliza-se, no caso de transformadores de potência, subestações blindadas e cabos isolados de alta tensão. A sensibilidade deste método é limitada pelo fenômeno de magnetostrição, que gera ruído na mesma faixa de frequência. Em ensaios em cabos é possível utilizar microfones de contato fixados na superfície do cabo. Deste modo, com auxílio de amplificadores e osciloscópios determinar a localização de descargas ao longo do cabo.
- **Pressão de gás:** Pode medir a pressão do ar na cavidade onde ocorre a descarga. Devido às reações químicas a pressão do gás decresce logo que as descargas ocorrem. Este método é muito restrito e a sensibilidade não é conhecida.
- **Reações químicas:** A ocorrência de produtos químicos e trilhamentos produzidos pelas descargas podem ser utilizados para detecção e localização. Descargas em óleo isolante geram gases específicos. A detecção da presença desses gases pode ser utilizada na medição de descargas parciais.

2.2.2 Métodos elétricos de Medição de Descargas Parciais

A detecção dos impulsos elétricos causados pelas descargas parciais é um dos métodos mais populares e existe uma grande variedade de circuitos em uso para detectar estas descargas, estes circuitos são baseados em um modelo básico (W. R. et al, 2017), que apresentamos na Figura 4 a seguir:

Figura 4 - Circuito RLC para detecção de descargas parciais do tipo elétricas.



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

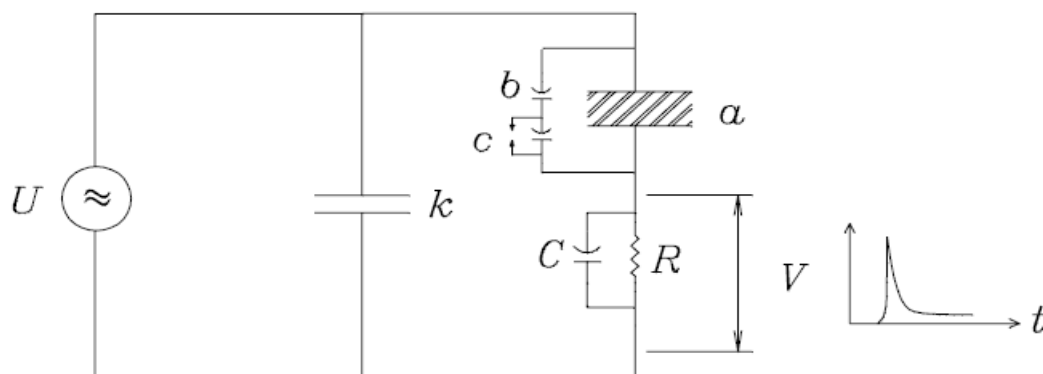
¹ A unidade pF (picofarad) corresponde a 10^{-12} farads e está associada à capacitância mínima que pode ser detectada pelo método em questão. No contexto de ensaios de descargas parciais, valores de 50 a 80 pF indicam a faixa de sensibilidade da técnica de detecção aural, ou seja, a menor capacitância equivalente da descarga que ainda pode ser percebida acusticamente.

Os elementos básicos do circuito da Figura 4 são : uma fonte de alta tensão alternada U , um capacitor de acoplamento k , isento de descargas parciais na tensão de ensaio e que facilitará a circulação dos impulsos de corrente de alta frequência, o objeto de teste a , apresentando descargas parciais, uma impedância de medição Z por onde os impulsos de corrente gerarão um queda de tensão que será amplificada pelo amplificador A e visualizada no osciloscópios O .

A impedância de detecção Z pode ser conectada tanto em série com o objeto de teste quanto em série com o capacitor de acoplamento. Do ponto de vista da queda de tensão causada pelos impulsos de corrente, a posição de Z é irrelevante. Contudo, na prática, sua localização pode ser determinante. Frequentemente, Z é posicionada em série com o capacitor de acoplamento k , cuja capacitância é bem definida. Isso ocorre porque, muitas vezes, o objeto de teste apresenta uma capacitância elevada, o que poderia fazer com que a corrente em frequência fundamental excedesse a capacidade de suporte da impedância de medição.

Geralmente a impedância de medição é um circuito RC, dando origem a impulsos de tensão unidirecionais ou é um circuito RLC, com resposta oscilatória. A resposta oferecida por estes circuitos pode ser determinada com auxílio da transformada de Laplace. Na Figura 5 a seguir tem-se o circuito básico de medição de DP utilizando uma impedância de medição do tipo RC.

Figura 5 - Circuito básico de medição de DP com Impedância RC de Medição.

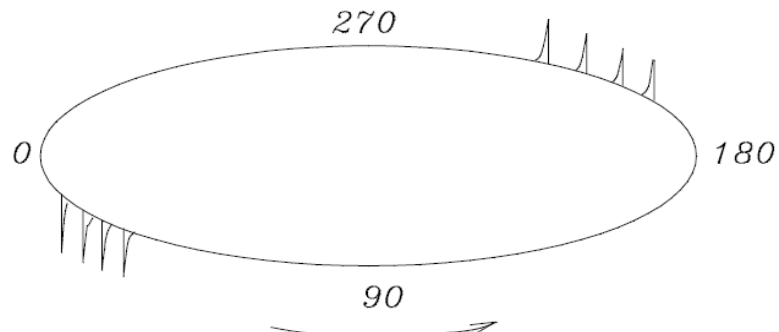


Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

Através da tela do detector de DP é possível localizar e algumas vezes identificar a origem dos pulsos apresentados na tela pela análise do padrão formado. Sabemos que as descargas parciais internas em uma cavidade ocorrem em regiões particulares da onda de impulso senoidal, como podemos ver na Figura 5, com formações entre as regiões de maior ingremidade da onda de tensão, ou seja, na região em torno de 0° e de 180° graus elétricos. Nos

detectores atuais é possível sincronizar os pulsos de DP com a alta tensão aplicada ao objeto de teste, permitindo assim mais um recurso na identificação da ocorrência das DP. Num osciloscópio de base elíptica o seguinte padrão de descargas parciais internas a uma cavidade no dielétrico fica conforme Figura 6 a seguir.

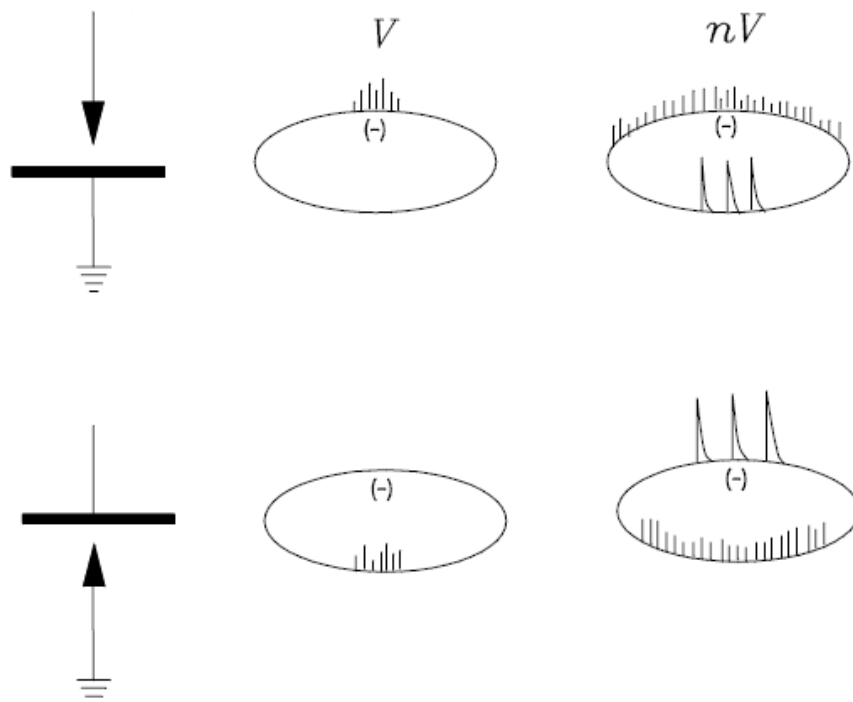
Figura 6 - DP em uma cavidade em um osciloscópio de base elíptica.



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

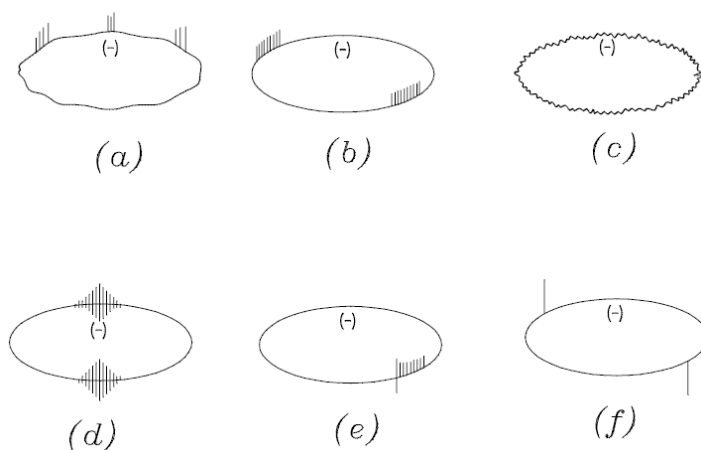
Alguns tipos de perturbação possuem também um padrão ou assinatura bastante conhecida, principalmente o fenômeno corona, como podemos ver na Figura 6. Outros tipos de ruídos encontrados na literatura foram compilados nas Figuras 7 e 8.

Figura 7 - Descargas do tipo Corona no osciloscópio de base elíptica.



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

Figura 8 - Perturbações mais comuns apresentadas no osciloscópio de base elíptica; a) distorção harmônica; b) objeto flutuante ao redor; c) motores elétricos; d) lâmpadas fluorescentes; e) mau contato; f) retificador.



Fonte: Adaptado de (KREUGER, 1989).

2.2.3 Transformadores de Corrente de Alta Frequência

A utilização de transformadores de corrente (TCs) para detecção não invasiva de descargas parciais é uma abordagem comum e eficaz, e os *High-Frequency Current Transformers* (HFCTs) são projetados especificamente para trabalhar em frequências associadas às descargas parciais. Os HFCTs são projetados para capturar sinais de alta frequência, na faixa de MHz, típica das descargas parciais. Posicioná-los no cabo de aterramento é uma forma efetiva de detecção, pois os sinais das DP se propagam pelo isolamento e são descarregados para o solo através desse caminho.

O uso de HFCT para medição de descargas parciais foi abordado por FUANGSOONGNERN, PLUEKSAWAN, & TIKAKOSOL (2014) e propõem uma técnica para medição e localização no sistema de isolamento dos transformadores de distribuição imersos em óleo e a seco. Para isso, os autores utilizaram o monitoramento on-line, para que a operação do transformador no sistema elétrico não fosse prejudicada. Relataram que fizeram uso de técnicas de Emissão Acústica (AE) e de Transformador de Corrente de Alta Tensão (HFCT). Na realização dos testes no estudo realizado pelos autores, foi utilizado um transformador trifásico, imerso em óleo de potência nominal 2000 kVA, e tensões nominais de 22kV/400-230V, 50 Hz. Também fizeram uso de quatro sensores AE, um sensor HFCT e um *hardware* para leitura e detecção das descargas. Os autores destacaram que o uso desses equipamentos permitiu detectar, analisar e relatar a gravidade dos problemas que ocorrem dentro do transformador já no estado inicial.

Destacaram ainda que a metodologia é capaz de indicar se o problema é causado por descargas parciais, problemas mecânicos, arcos ou partes soltas dentro do transformador. A

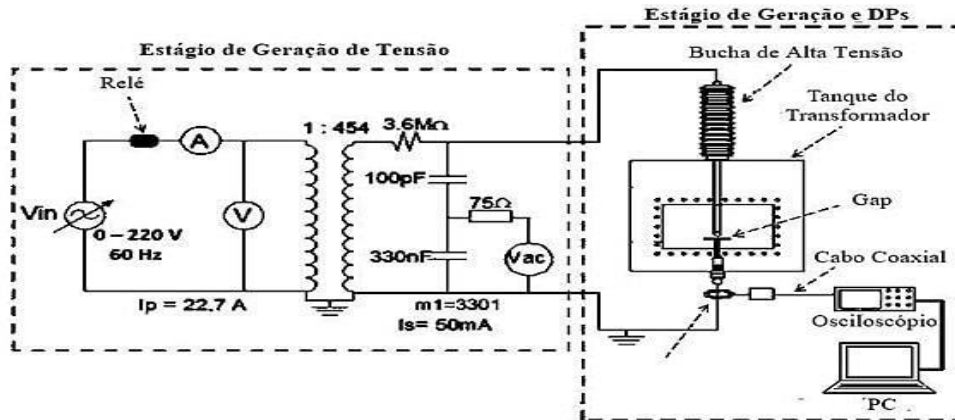
técnica de medição proposta se mostrou eficiente em detectar e localizar a presença de descargas parciais possibilitando melhor diagnóstico para tratamento do defeito na isolamento e, consequentemente, reduzindo o custo com eventuais falhas.

A investigação de H. E. ROJAS, M. C. FORERO e C. A. CORTES (2017) reforça que técnicas de processamento de sinais são necessárias para extrair de maneira confiável as informações das medições de DPs. Estes autores destacam que, embora, as técnicas de Transformada de Fourier, Transformada de Fourier de Curto Tempo, Transformada Wavelet e Transformada de Gabor constituam ferramentas tradicionais para fornecer informações sobre os níveis de amplitude nas bandas de tempo-frequência, não existem, atualmente, novas técnicas propostas para avaliar a frequência instantânea dos sinais de DPs e sua variação em relação ao tempo. Nesse sentido, propõem uma aplicação da Transformada Polinomial Local De Fourier (LPFT) e do cálculo do Período Polinomial Local (LPP) para a análise tempo-frequência de pulsos de DPs gerados em transformadores de distribuição.

A fim de avaliar o desempenho dessas ferramentas, os sinais de DPs foram detectados em laboratório equipado com um tanque de transformador modificado especialmente projetado para pesquisa.

Na Figura 9 é mostrado o esquema utilizado para geração e medida das DPs. Nesse esquema os pulsos de DPs ocorrem em uma lacuna submersa em óleo e a medição destes é realizada através de um transformador de corrente Bergoz (CT E-0.5-B) com uma largura de banda de 48 Hz-200 MHz e uma sensibilidade de 0,25 V / A, conectado a um osciloscópio Tektronix DP07054C, com uma taxa de amostragem de 5 G/s, por meio de um cabo coaxial blindado. Os dados do osciloscópio foram transferidos diretamente ao PC. Ressalta-se que o valor médio da tensão aplicada para obter os pulsos de DPs foi de 18,7 kV rms e especifica-se que a fonte de DP é colocada a 25 cm acima do fundo do tanque e que o nível de óleo tem 45 cm de profundidade.

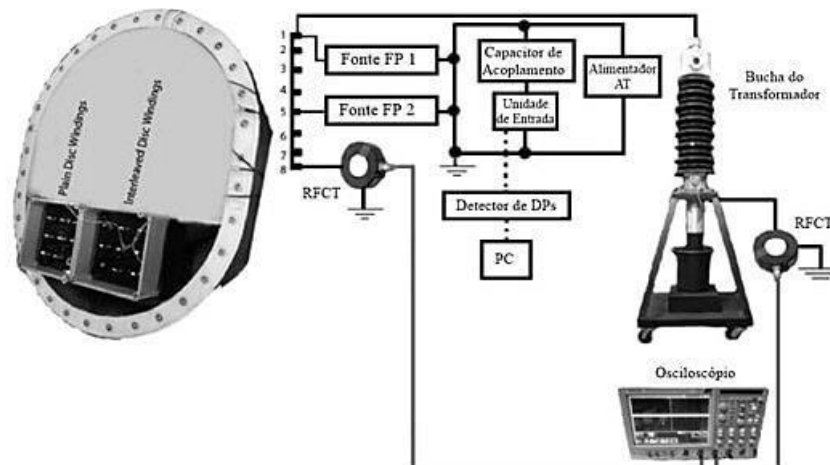
Figura 9 - Circuito utilizado para geração e detecção de DPs



Fonte: Retirado de (ROJAS, FORERO & CORTES, 2017).

N. N. ALI, P. RAPISARDA e P. L. LEWIN (2017) apresentam a viabilidade de localizar, simultaneamente, dois tipos de fontes de descargas parciais no isolamento de transformador de potência que produzem DPs superficiais e DPs vazias simultaneamente em um enrolamento de transformador de alta tensão. No experimento prático utilizou-se uma seção de enrolamento AT de transformador, uma bucha de 60 kV, dois transformadores de corrente de radiofrequência de banda larga (RFCTs), dois tipos de fontes de DPs artificiais e um osciloscópio com taxa de amostragem de 500 M/s, (mega-sample por segundo) como ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Circuito utilizado no experimento.



Fonte: Retirado de (Ali et al., 2017)

Um dos grandes problemas não abordados pelos autores citados é a variação da resposta dos sensores HFCT no domínio da frequência. Esse comportamento ocorre porque cada dispositivo apresenta características construtivas próprias — como geometria do núcleo,

permeabilidade magnética e largura de banda — que afetam diretamente sua sensibilidade em diferentes faixas de frequência. Na prática, busca-se corrigir essas variações por meio de ajustes via software, em um processo análogo a uma calibração, de modo a compensar as diferenças de ganho e resposta em frequência. No entanto, essa correção não elimina totalmente as discrepâncias, pois cada HFCT possui uma assinatura de resposta única, o que dificulta a padronização dos ensaios e a comparabilidade direta entre medições realizadas com sensores distintos. Essa limitação reforça a necessidade de procedimentos normalizados de calibração e de bancos de dados de referência para que os resultados obtidos possam ser avaliados de forma consistente, independentemente do sensor utilizado.

CAPÍTULO 3 – ESTRUTURAÇÃO DA METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO

A metodologia aplicada nesta dissertação, consiste em avaliar os impactos que as diferentes conexões seja de HFCTs ou do laboratório de Alta Tensão, proporcionam na qualidade da análise dos sinais das descargas parciais.

Para alcançar o objetivo proposto, foi utilizado o laboratório de alta tensão da ISA ENERGIA BRASIL como base, juntamente com variados tipos de HFCTs.

Para o desfecho deste trabalho foram aplicadas 6 etapas:

- **Etapas 1:** Coleta de sinais de descargas parciais com e sem ruídos gerados por um calibrador, com o objetivo de levantar dados e compreender estratégias para isolar as DP dos ruídos.
- **Etapas 2:** Analisar em que frequências as cargas utilizadas no laboratório estão atuando e injetando ruído nos experimentos realizados, bem como verificar a intensidade desses ruídos.
- **Etapas 3:** Analisar os pulsos e criar base de dados para experimentos de repetibilidade em análise com fundamental referenciada.
- **Etapas 4:** Com diferentes amplitudes de DP, avaliar a variação do cálculo de calibração;
- **Etapas 5:** Verificar a diferença de medição entre o HFCT e a medida direta, utilizando uma carga *Shunt*.
- **Etapas 6:** Levantamento das curvas de resposta em frequência de diferentes modelos HFCTs, Techimp, HVPD, Omicron, Pearson 8585C e Pearson 8705.

3.1 Laboratório de Alta Tensão da ISA ENERGIA BRASIL.

O laboratório possui uma sala blindada tipo gaiola de Faraday para ensaios elétricos de alta tensão, equipado com uma fonte ressonante de alta tensão (Figura 11), composta de dois reatores montados em cascata, com 2400 KVA de potência e com tensão máxima de 600 KV.

Figura 11 - Fonte Ressonante de 600 KV - Laboratório de AT da ISA ENERGIA BRASIL.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a medição da alta tensão e como acoplamento para a medição de descargas Parciais é utilizado um Divisor Capacitivo formado por dois capacitores de 300 kV, 3300 pF cada um (Figura 12).

Figura 12 - Capacitor de Acoplamento Laboratório de AT da ISA ENERGIA BRASIL.

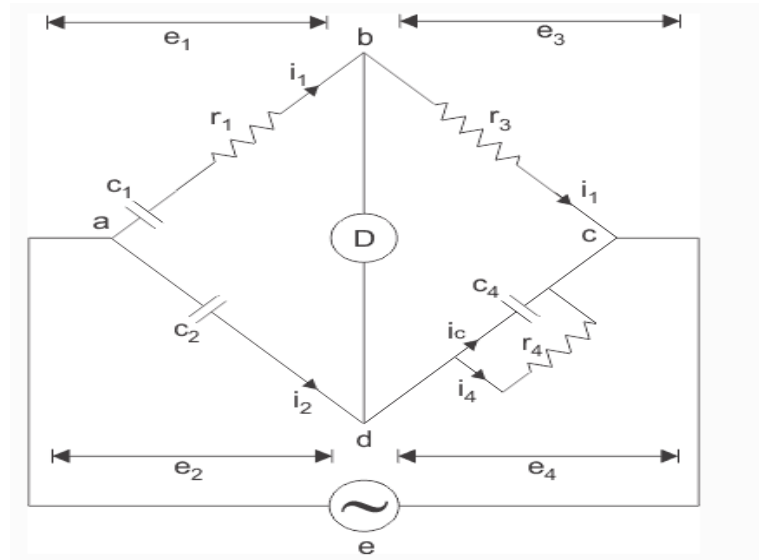


Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os ensaios de medição da Tangente Delta e capacitância, é utilizado como padrão um Capacitor de 33,08 pF, 600 KV, e uma Ponte resistiva.

Para a medição de capacitância e perdas dielétricas a frequência industrial, é utilizado o método de Ponte Schering, trazendo resultados mais precisos e seguros. (Figura 13).

Figura 13 - Ponte Schering para medição de capacitância e perdas dielétricas em frequência industrial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Sendo, c_1 é a capacitância desconhecida cujo valor deve ser determinado com resistência elétrica em série r_1 .
- c_2 é um capacitor padrão.
- c_4 é um capacitor variável.
- r_3 é um resistor puro (isto é, de natureza não indutiva).
- E r_4 é um resistor não indutivo variável conectado em paralelo com o capacitor variável c_4 .

As vantagens desse esquema vêm do fato que tanto a capacitância como o fator de perdas de um corpo de prova pode ser medido na sua tensão nominal. Em um projeto típico, os elementos de ajuste r_4 , c_4 e r_3 , serão submetidos a um valor de tensão (V) pequena. Se uma ruptura ocorrer nos capacitores c_1 ou c_2 o potencial dos terminais A e C aumentará, mas os elementos de ajuste e os operadores estarão protegidos pelos protetores contra sobretensão colocados em paralelo no circuito.

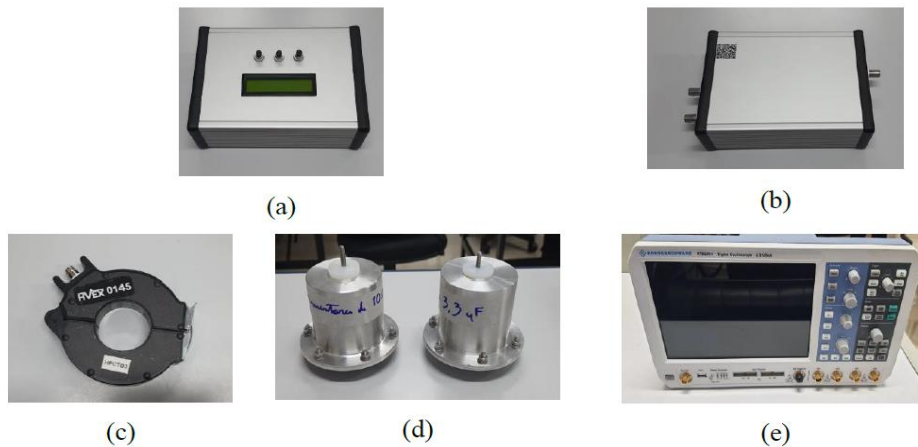
O balanceamento da ponte é conseguido pela variação sucessiva de r_4 e c_4 . Se a ponte está completamente balanceada, os terminais A e B possuem o mesmo potencial, e o

instrumento de nulo, indica deflexão zero. Esta relação forma a base para as condições de balanço de uma ponte AC genérica com componentes passivos.

3.2 Segregação das DPs e dos ruídos

Os ensaios iniciais tiveram como principal objetivo a coleta de sinais em condições com e sem a presença de ruídos com níveis superiores às descargas parciais geradas por um calibrador, utilizando diferentes amplitudes de pulsos, além de realizar o levantamento de dados e entender como isolar as DP dos ruídos com os equipamentos ilustrados na Figura 14.

Figura 14 - Instrumentos Utilizados para Levantamento de Dados Iniciais em Laboratório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde:

- (a) Instrumento de Calibração de DP HVEX;
- (b) Instrumento de casamento de impedância em baixa e alta frequência;
- (c) Transformador de corrente – HVPD;
- (d) Cargas *shunt* capacitiva ($3,3 \mu\text{F}$) e resistiva (10Ω);
- (e) Osciloscópio RONDE&SCHWARZ RTB2004 - 70 MHz, 4 canais analógicos, Tela de 10,1" touchscreen, Resolução de 10 bits, Amostragem de 2,5 GS/s;

O calibrador de DP HVEX utilizado possui a possibilidade de injeção de pulsos com diferentes amplitudes, variando de 1, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000 ρC . Além disso, os pulsos são gerados nas frequências de 120 Hz ou 100 Hz, ou um único pulso.

Um detalhe importante é que os sinais de 200 ρC , 500 ρC e 1000 ρC são amostrados em saídas diferentes dos demais sinais, para uma melhor organização.

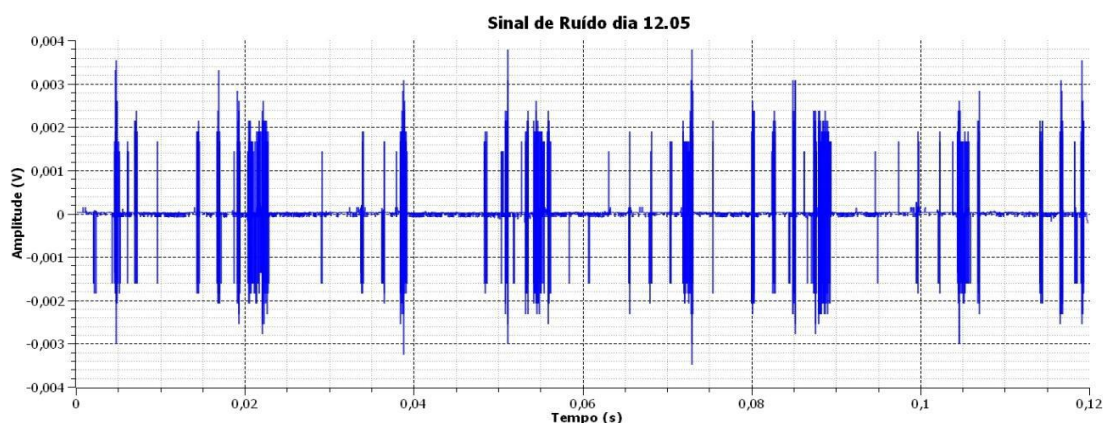
Foram coletados mais de 50 ensaios com diferentes amplitudes e diferentes presenças de sinais de ruído, para cada uma destas medições foram salvos dados da amplitude do sinal ao longo do tempo em CSV e os relatórios gerados pelo *software* utilizado. Ressalta-se que os dados apresentados no relatório contemplam uma janela do sinal bruto, o FFT do sinal, os dados de dispersão e os dados de números de pulsos. Um aspecto muito importante deste levantamento é e da correta utilização das ferramentas já desenvolvidas no *software* é o ajuste dos parâmetros de Gate e de Ganho. De maneira simples o ajuste do Gate serve para criar uma janela vertical de desconsideração de sinal para os cálculos realizados pela ferramenta, ou seja, o objetivo é eliminar os ruídos; para isso, ajusta-se o gate para um nível acima do ruído de fundo. Com isso feito, ajusta-se o Ganho para atingir o valor de ρC injetado com o calibrador (valor conhecido). O uso do calibrador só ocorre no laboratório.

O transformador de corrente de alta frequência - HVPD - utilizado nestes ensaios iniciais possui relação de transferência de medição de $3,9 \text{ mV/mA} \pm 5\%$, faixa de frequência de linearidade de 100 kHz a 20 MHz.

CAPÍTULO 4 – CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DE DESCARGAS PARCIAIS EM AMBIENTE CONTROLADO

A Figura 15 apresenta os ensaios de ruído de dois dias distintos, o ensaio com dois níveis diferentes de amplitude, dois ensaios com diferentes frequências e ensaios com diferentes cargas *shunt*, com intuito de demonstrar e discutir as diferenças notadas com as variações de configuração.

Figura 15 - Sinal de Ruído captado no dia 1.

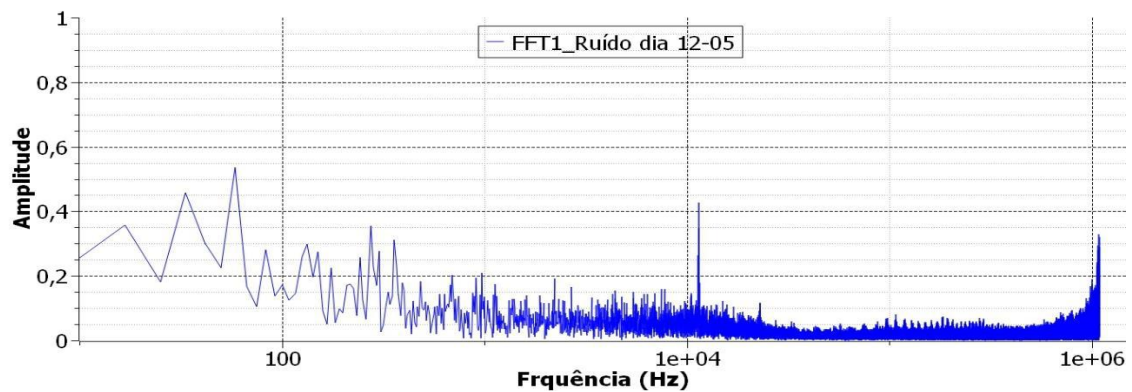


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que a janela de amostragem é de $t=0,12s$, totalizando cerca de 7,2 ciclos considerando a senoide fundamental de 60 Hz. As amplitudes máximas registradas de ruído estão perto do 4mV, com alguns trens de pulsos agrupados esporadicamente.

Percebe-se que a FFT (Figura 16) do ruído apresentou maiores concentrações na faixa de 1MHz, com amplitude de destaque em 60 Hz e próximo de 10 kHz, além de concentração na faixa de MHz.

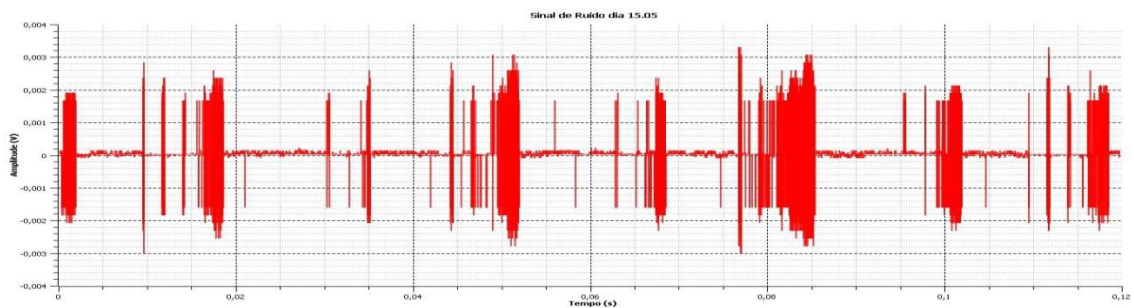
Figura 16 - FFT do Sinal de Ruído do Laboratório do dia 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

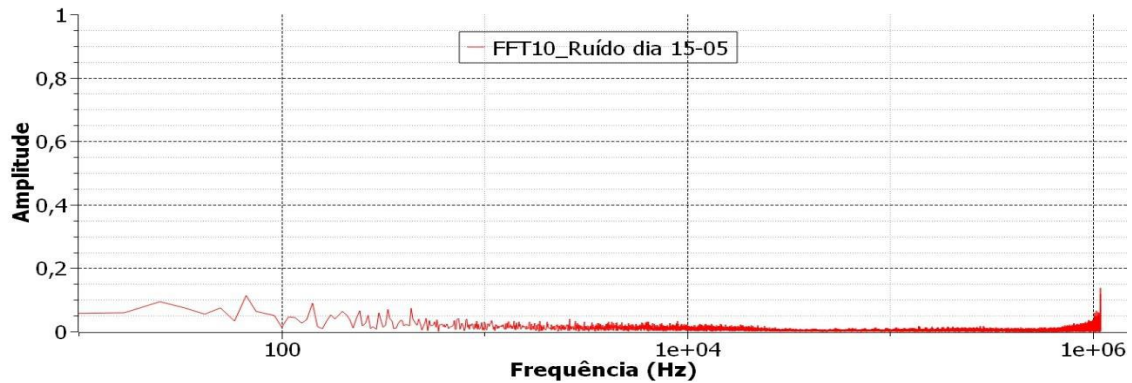
O sinal do dia 2 (Figura 17 e 18) se difere do ruído do dia 1, a amplitude é um pouco menor, perto de 3mV só que existem agrupamentos maiores em determinados instantes de tempo.

Figura 17 - Sinal de Ruído do Laboratório no dia 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18 - FFT do Sinal de Ruído do Laboratório no dia 2.



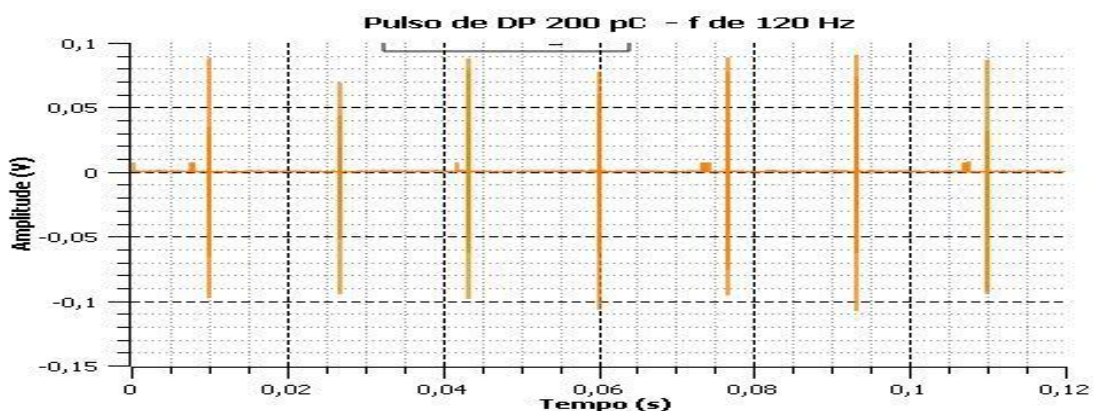
Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a FFT deste segundo dia nota-se perda de amplitude normal do sinal, não existe pulso de destaque na faixa de 10 kHz e a concentração do ruído continua em frequências próximas de MHz.

4.1 Comparativo de Pulsos de DPs.

O objetivo deste experimento de pulsos em diferentes frequências é analisar os pulsos e criar base de dados para experimentos de repetibilidade em análise com fundamental referenciada. A Figura 19 ilustra alguns resultados de pulsos de 200 ρC considerando as frequências de 100 Hz e 120 Hz.

Figura 19 - Sinal de DP de 200 ρC e 120 Hz.

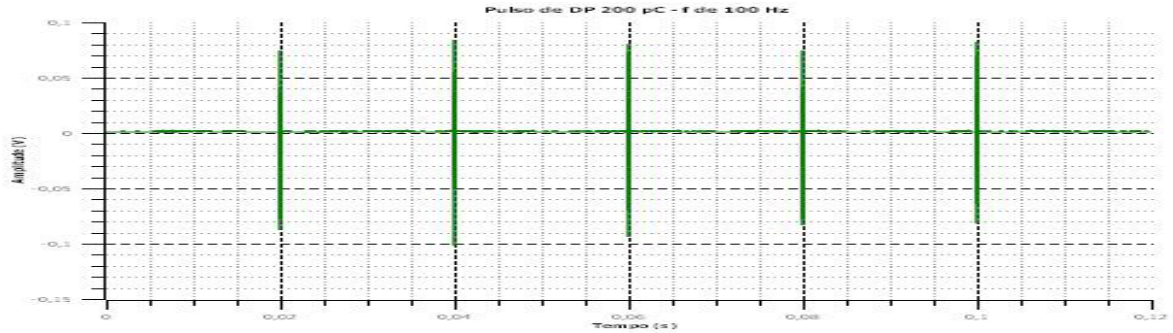


Fonte: Elaborado pelo autor.

O calibrador aponta uma frequência de 120 Hz, no entanto, os pulsos são gerados em 60 Hz, ou seja, existe a mesma quantidade de pulsos do que a quantidade de ciclos de senoide fundamental de 60 Hz, para o tempo de 0,12 segundos, cerca de 7 ciclos. Para uma calibração de 200 ρC uma amplitude de tensão máxima em torno de 100 mV foi registrada, no entanto,

nota-se no gráfico da Figura 20 uma flutuação no pulso, indicando que pode haver uma portadora senoidal.

Figura 20 - Sinal de DP de 200 μC e 100 Hz.

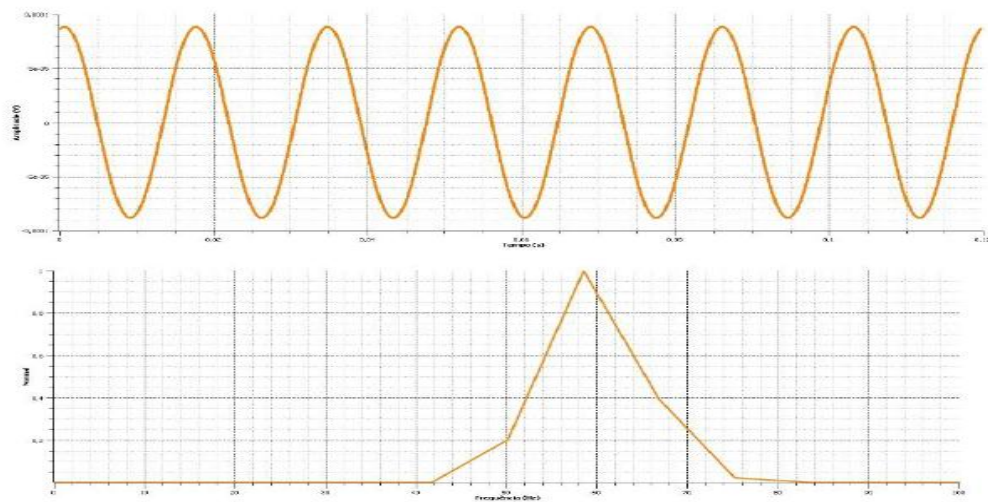


Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que para a frequência de 100 Hz do calibrador, o sinal de DP ocorre em frequência de 50 Hz, ou seja, a cada 0,02 segundos. A amplitude fica bem próxima, um pouco menor que a anterior, podendo ter sido afetada pelos diferentes ruídos no momento de coleta dos dados.

Para tentar entender o motivo dos pulsos não estarem alinhados foi analisado o sinal de 120 Hz com um filtro passa faixa de 58 a 60 Hz (Figura 21) e a análise de FFT deste sinal filtrado.

Figura 21 - Sinal de DP de 200 μC depois de Filtrado em 50 a 70 Hz e o FFT.



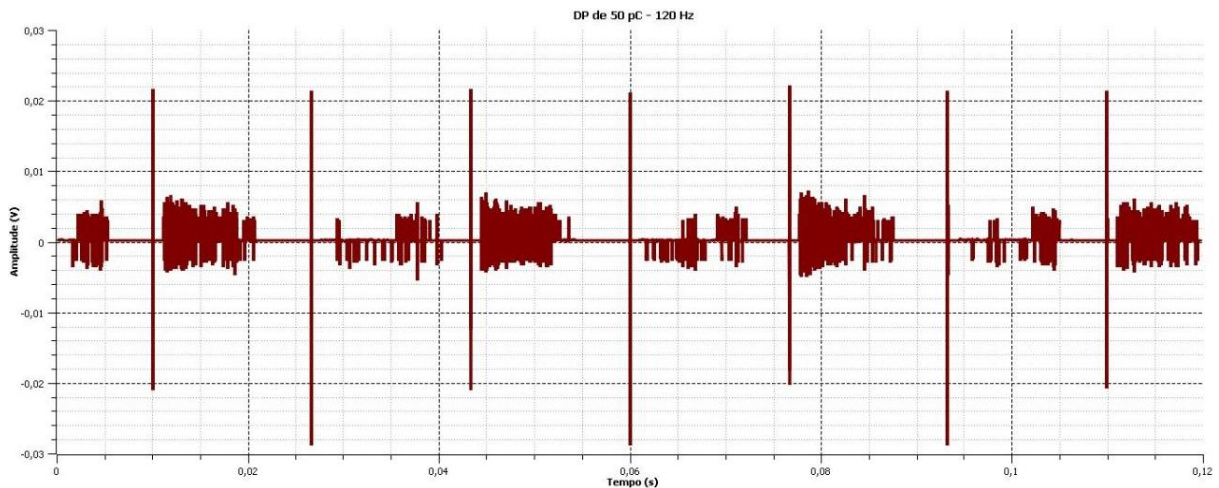
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se através da Figura 21 a existência de uma portadora senoidal na faixa de 60 Hz, mesmo que de baixa amplitude, cerca de 100 μV .

4.2 Comparativo de Amplitude de DPs.

Este experimento serve para avaliar a variação do cálculo de calibração, pois têm-se como hipótese que a amplitude de DP deve ser proporcional a tensão medida pelo HFCT uma vez que o sinal de descarga é característico, conforme apresentado na Figura 22. A não linearidade do cálculo pode ser afetada pela presença de ruído próximo do pulso de descarga, alterando o sinal de cálculo do envelopamento para transformação em ρC .

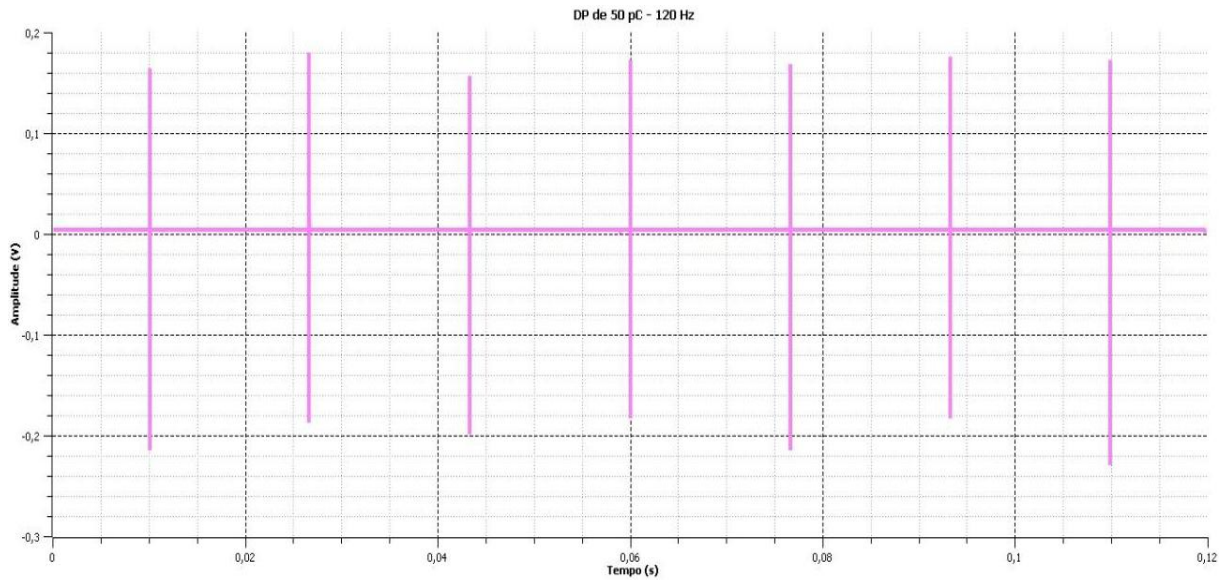
Figura 22 - Sinal de DP de 50 ρC e 120 Hz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O sinal de 50 ρC da Figura 23 possui pico máximo em torno de 22 mV. O ruído da rede está em torno de 6 mV.

Já a Figura 23 está com uma amplitude máxima de aproximadamente 180 mV, representando os 500 ρC injetados, ou seja, cerca de 8,2 vezes maior que o sinal de 50 ρC , podendo ser considerado proporcional o valor do cálculo de envelopamento utilizado. O ruído das Figuras 15 e 16 não influenciou tanto no envelopamento.

Figura 23 - Sinal de DP de 500 ρC e 120 Hz.

Fonte: Elaborado pelo autor.

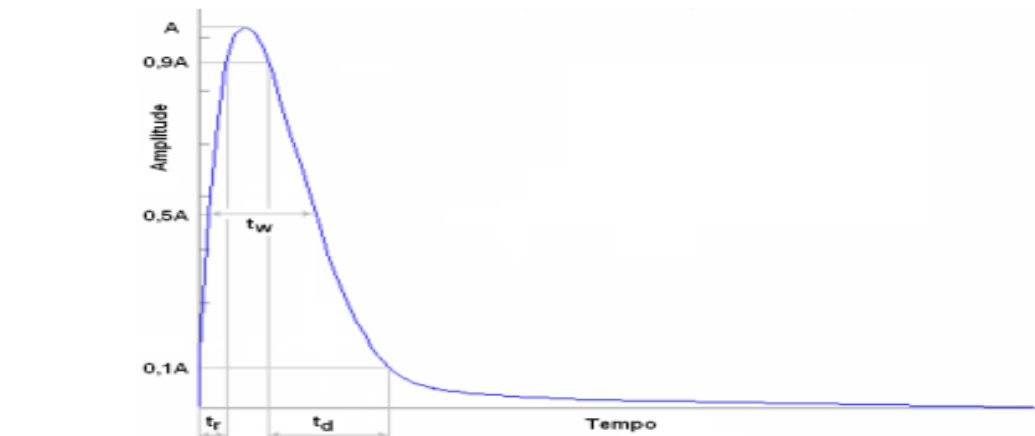
4.3 Característica dos Pulsos de Calibração DP.

Os parâmetros que compõem o vetor de características de DP são definidos por vários atributos significativos que descrevem a forma de onda do pulso no domínio do tempo, dentre os quais se destacam os seguintes (MAZROUA, 1994):

- a) Tempo de subida (t_r): período correspondente entre 10 % e 90 % do valor de pico do pulso antes do ponto de máximo;
- b) Tempo de decaimento (t_d): período correspondente entre 90 % e 10 % do valor de pico após o ponto de máximo;
- c) Largura do pulso (t_w): intervalo de tempo entre os níveis de 50 % do valor de pico antes e após o ponto de máximo; e
- d) Área sob o pulso: área correspondente do pulso entre os níveis de 10 % do valor de pico antes e após o ponto de máximo.

A Figura 24 mostra os pontos de cálculo dos parâmetros no pulso de DP.

Figura 24 - Modelo de Pulso de Descarga Parcial.

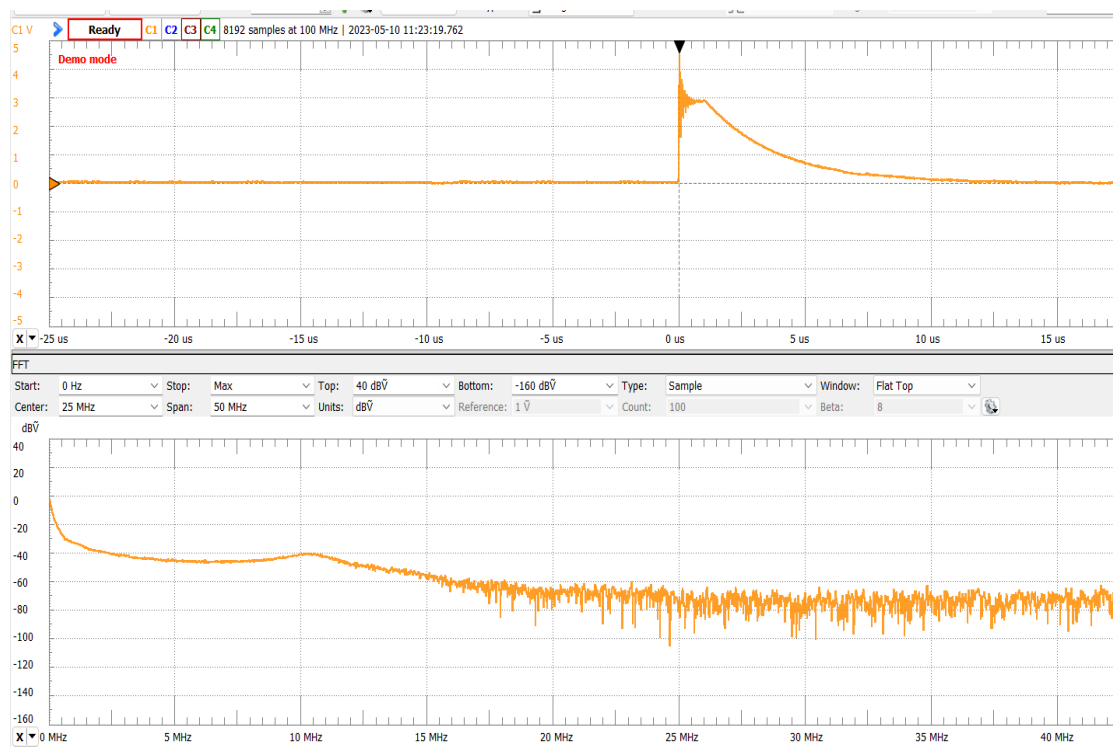


Fonte: Retirado a Norma IEC 60270, Cap.7.

A norma IEC 60270 (IEC, 2017) descreve nos capítulos 6 e 7 as características exigidas do pulso de calibração, bem como os ensaios necessários que o calibrador deve passar para poder ser utilizado como referência nos ensaios normativos em laboratório.

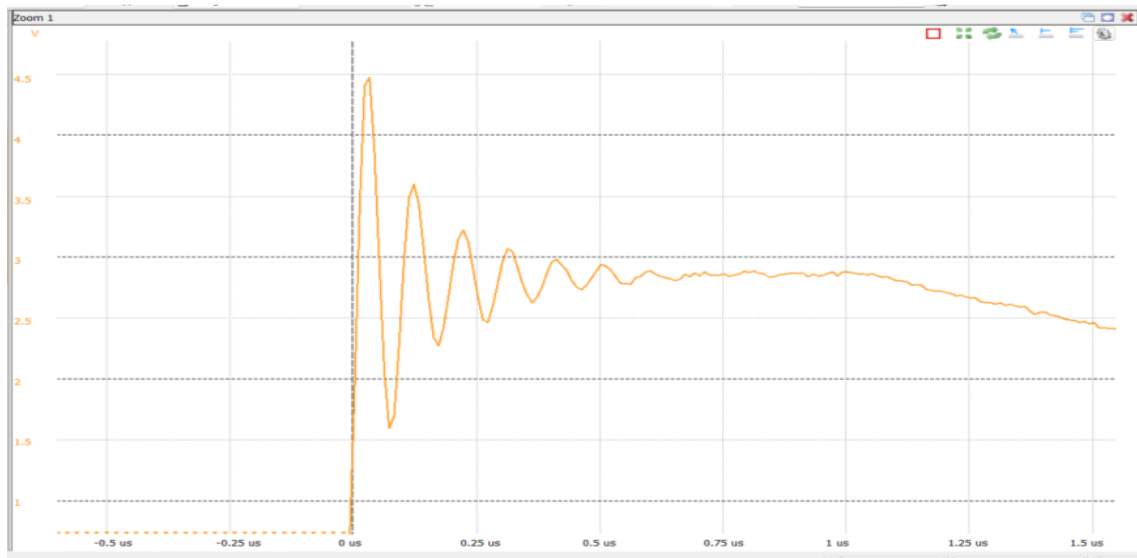
Nas Figuras 25 e 26 são demonstrados os testes feitos em dois calibradores distintos, com o objetivo de selecionar qual o de maior acuracidade.

Figura 25 - Sinal de Pulso e FFT do Calibrador 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Sinal de DP Calibrador 1.

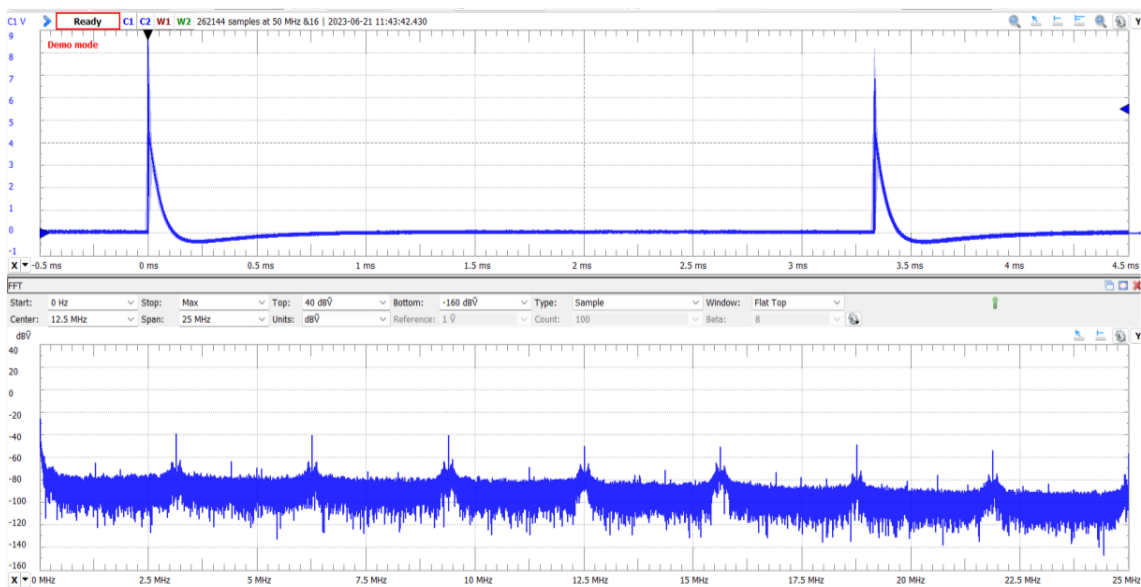


Fonte: Elaborado pelo autor.

O calibrador 1 possui um pulso característico com ganho na faixa de 10 MHz e possui característica de calda com oscilação. Ao aproximar o sinal de calibração percebe-se a presença de uma acomodação senoidal, característica de um sinal de descarga real, medida em campo.

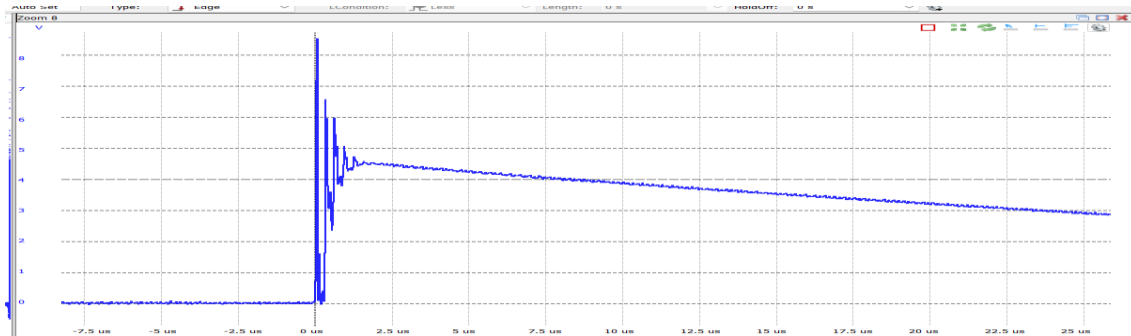
O sinal do calibrador 2 (Figuras 27 e 28) possui pulsos um pouco distintos, com menor calda. Ao aproximar o sinal, nota-se a acomodação senoidal com tempo e amplitude diferentes do calibrador 1.

Figura 27 - Sinal de Pulso e FFT do Calibrador 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Sinal de DP Calibrador 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Respostas dos HFCTs

Como mencionado nos capítulos anteriores, as DPs são pequenas descargas elétricas localizadas que ocorrem em isolantes elétricos quando submetidos a tensões elétricas elevadas. Elas acontecem em imperfeições ou descontinuidades no material isolante, como bolhas de ar, inclusões, vazios ou trincas.

Como forma de experimentação, foram analisados a seguir diferentes modelos de HFCTs. Estes dispositivos possibilitam a aplicação de uma técnica não invasiva, em que, idealmente o HFCT deve abraçar o cabo de aterramento para detecção dos picos de corrente causados pelas descargas parciais. Por se tratar do elemento principal para captação do sinal, o HFCT possui requisitos importantes, com tais características sendo definidas :

- Largura de banda suficiente para capturar os pulsos de alta frequência das descargas parciais, tipicamente de 1 MHz a algumas dezenas de MHz;
- Resposta linear na faixa de frequências de interesse;
- Núcleo magnético com alta permeabilidade, para operação eficiente nas frequências de DP;
- Blindagem eletrostática para minimizar ruído externo;
- Alta rigidez dielétrica devido às altas tensões;
- Desempenho estável em uma ampla faixa de temperatura; e
- Saída compatível com os equipamentos de medição e análise de descargas parciais.

A resposta ou comportamento do HFCT frente aos sinais de que se busca detectar, irá impactar diretamente nas etapas subsequentes de processamento, na detecção e classificação.

Sendo assim, fez-se necessário o levantamento da curva de resposta em frequência dos HFCTs disponíveis.

Para o levantamento das curvas de resposta em frequência foram utilizados diferentes modelos HFCTs Techimp, HVPD, Omicron, Pearson 8585C e Pearson 8705.

O levantamento da curva de resposta em frequência consiste na aplicação de sinais com frequência e amplitude previamente determinados, devendo varrer porções importantes do espectro de frequências. O sinal captado pelo HFCT é comparado com o sinal de referência, permitindo a obtenção da relação de ganho de sinal e defasagem.

Este processo pode ser realizado de modo: manual; analisando-se o sinal obtido pelo HFCT em relação ao sinal de referência; através de um osciloscópio, medindo-se as tensões, relações de ganho de tensão e defasagem de sinal para diversos pontos do espectro de frequência; de forma automatizada, através de dispositivos como osciloscópios, interfaces de aquisição de dados e analisadores de rede que realizam este procedimento de maneira mais assertiva e condicionada.

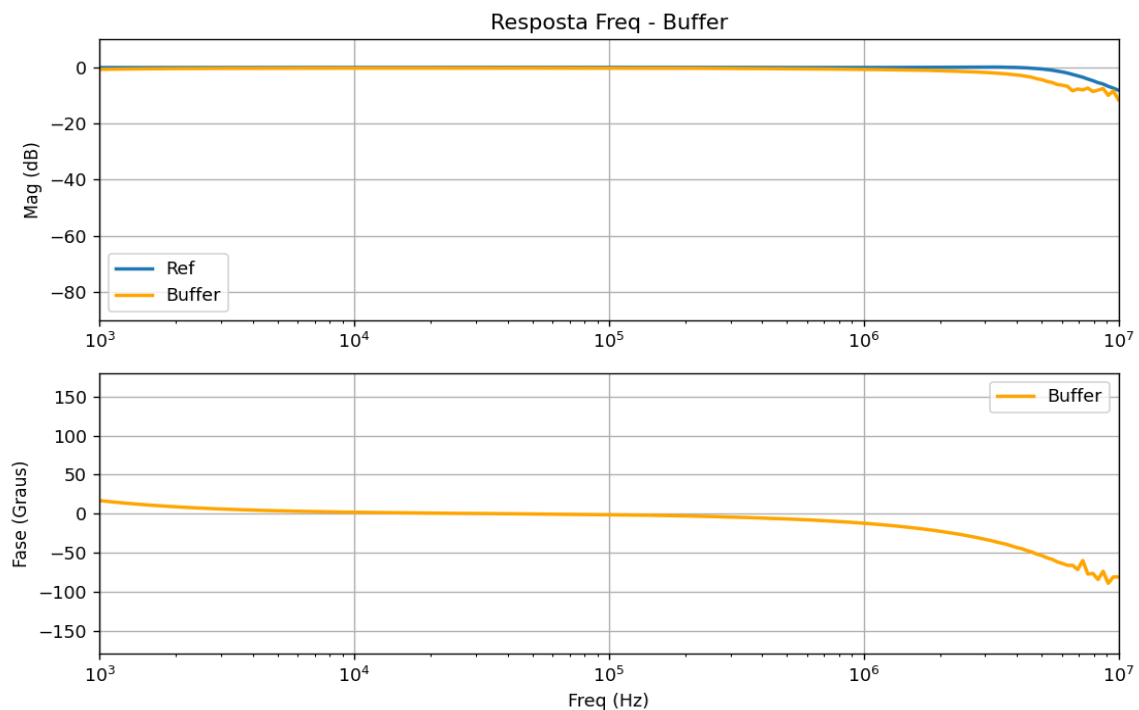
A bancada montada em contou com uma interface de aquisição de dados responsável por gerar os sinais senoidais dentro do espectro de análise e medir a tensão obtida na saída do HFCT, processando as relações de ganho e defasagem entre os sinais. A saída do gerador de sinais arbitrários da interface de aquisição é um sinal de tensão com amplitude de pico de 5 V, com sua saída podendo ou não contar com um resistor de 50 Ω , muito comum para o casamento de impedâncias em algumas situações. Por não se tratar de um sinal de corrente, aplicou-se uma carga de 100 Ω à saída do gerador, em que o HFCT foi conectado nesta linha para medição da corrente e obtenção da curva de resposta.

Tradicionalmente a saída dos geradores de sinais não possui grande capacidade de corrente, perdendo linearidade de resposta de acordo com o carregamento da sua saída. Este comportamento foi observado durante os testes iniciais, podendo ser notado através da atenuação do sinal de referência sobre a carga, quando comparado com o valor programado. Para evitar este efeito buscou-se por um amplificador, elemento que será responsável por apresentar o sinal a carga, fornecendo a potência necessária.

Devido à limitada capacidade de corrente dos amplificadores operacionais mais comuns presente no mercado nacional, optou-se por montar o protótipo de um *buffer push-pull* com transistores bipolares, em que posteriormente, mostrou-se mais eficiente para o levantamento dos dados iniciais necessários.

O Amplificador foi projetado de maneira a extrair a máxima resposta de frequência da interface de aquisição de dados. A Figura 29 demonstra o amplificador combinado com circuito de buffer quando conectados a uma carga de 1 k Ω .

Figura 29 - Resposta combinada: gerador e circuito buffer discreto.



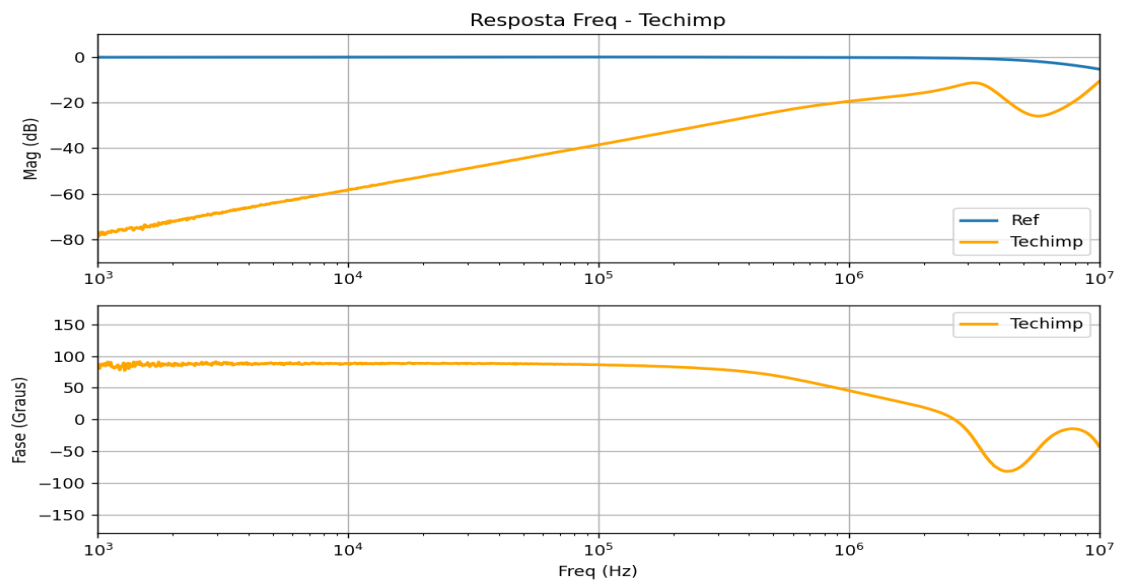
Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36 apresentam os testes realizados, que foram utilizados a mesma configuração, de modo a não interferir nos resultados de cada HFCT. Ou seja:

- Carga de 100 Ω ;
- Tensão de pico de 1 V;
- Resposta de 1 kHz até 10 MHz; e
- Cabo coaxial longo conectando o HFCT à entrada da interface.

A. HFCT – Techimp

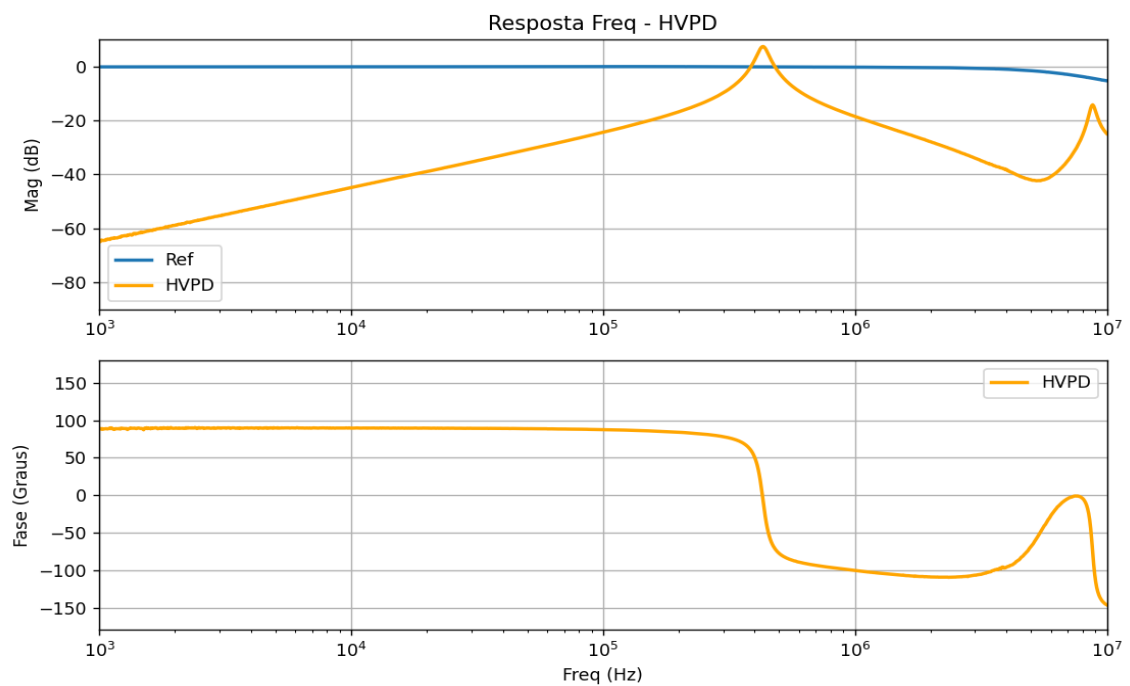
Figura 30 - Resposta HFCT Techimp.



Fonte: Elaborado pelo autor.

B. HFCT – HVPD

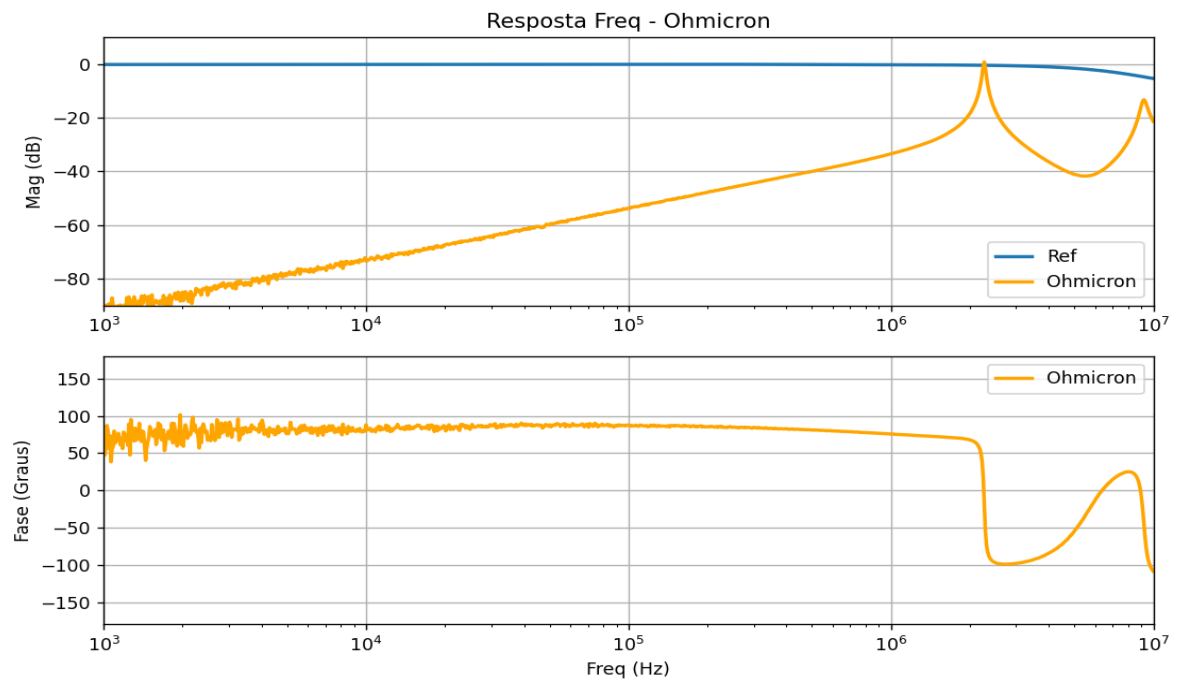
Figura 31 - Resposta HFCT HVPD.



Fonte: Elaborado pelo autor.

C. HFCT - Ohmicron

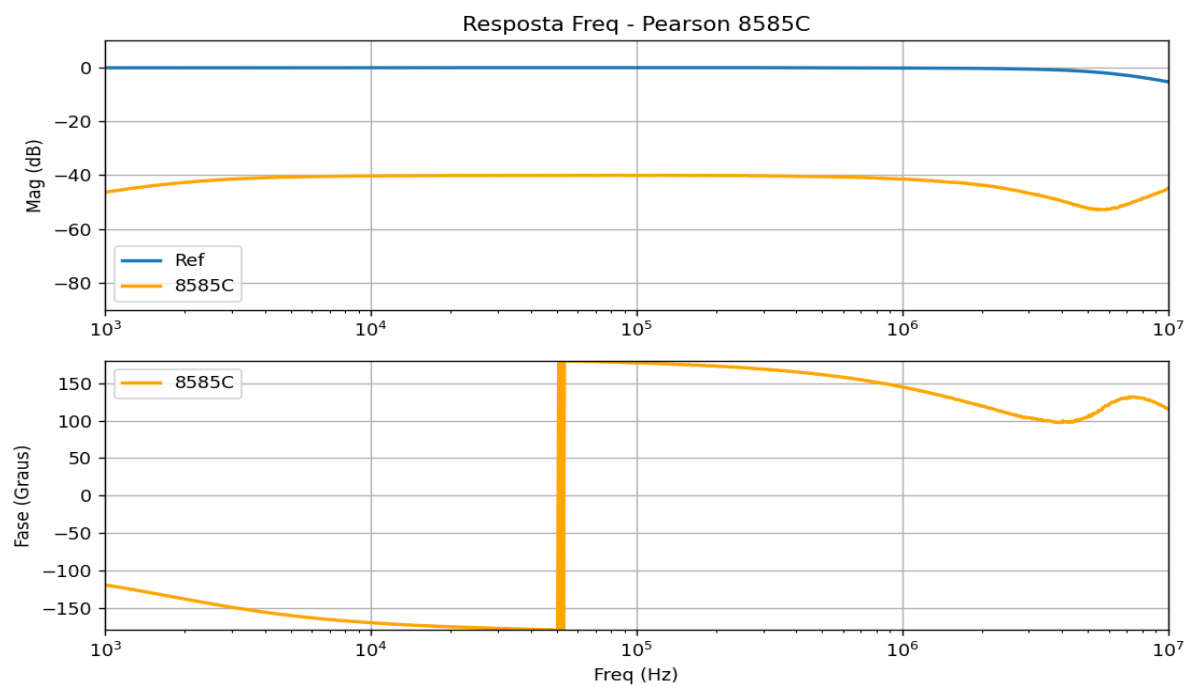
Figura 32 - Resposta HFCT Ohmicron.



Fonte: Elaborado pelo autor.

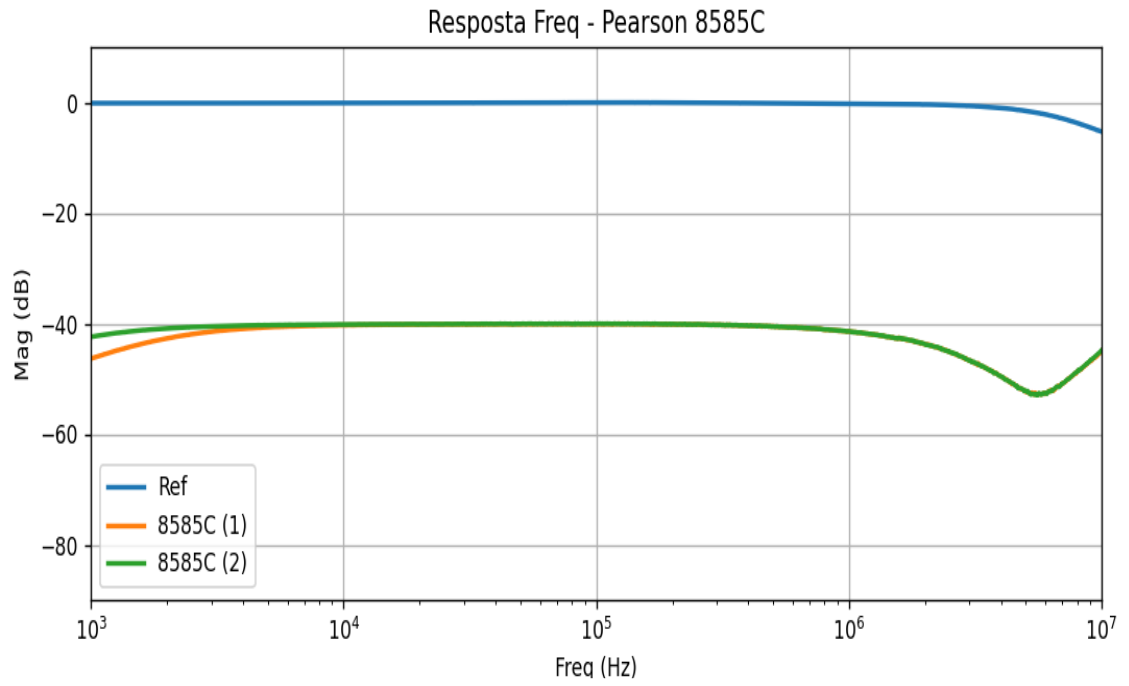
D. HFCT - Pearson 8585C

Figura 33 - Resposta HFCT Person 8585C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 34 - Comparação entre dois Person 8585C.



E. HFCT - Pearson 8705C

Figura 35 - Resposta HFCT Person 8705C.

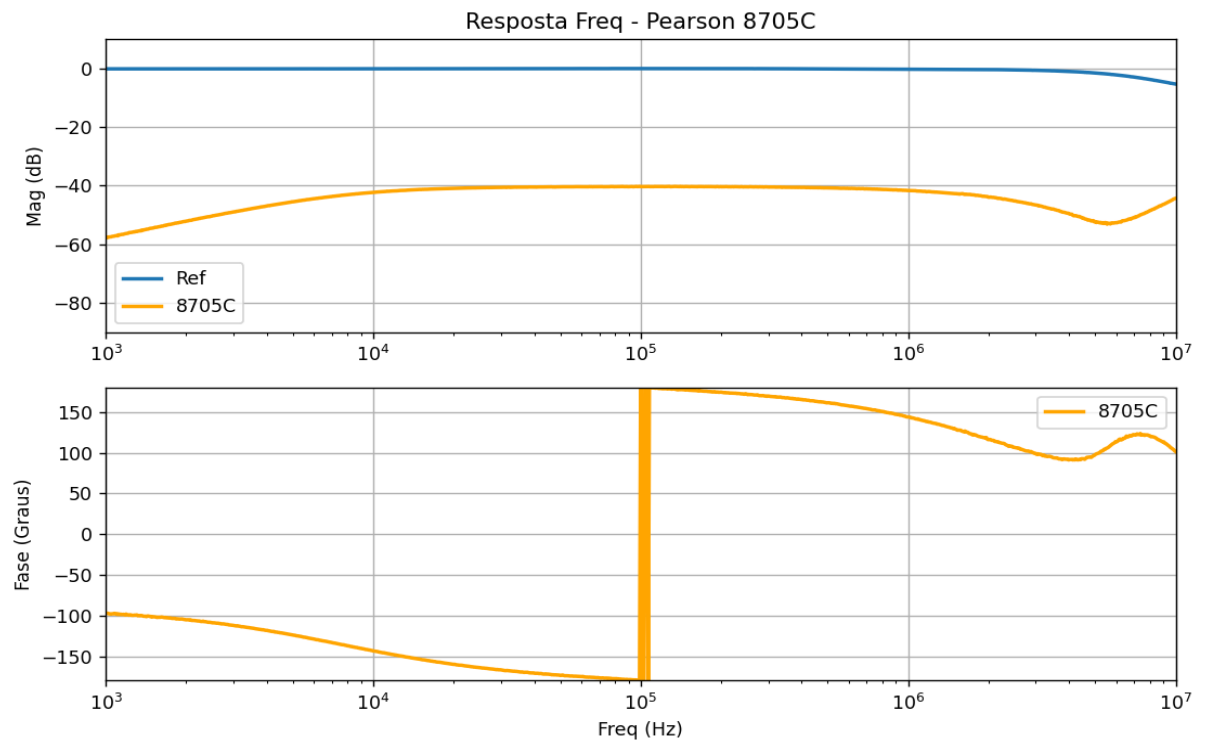
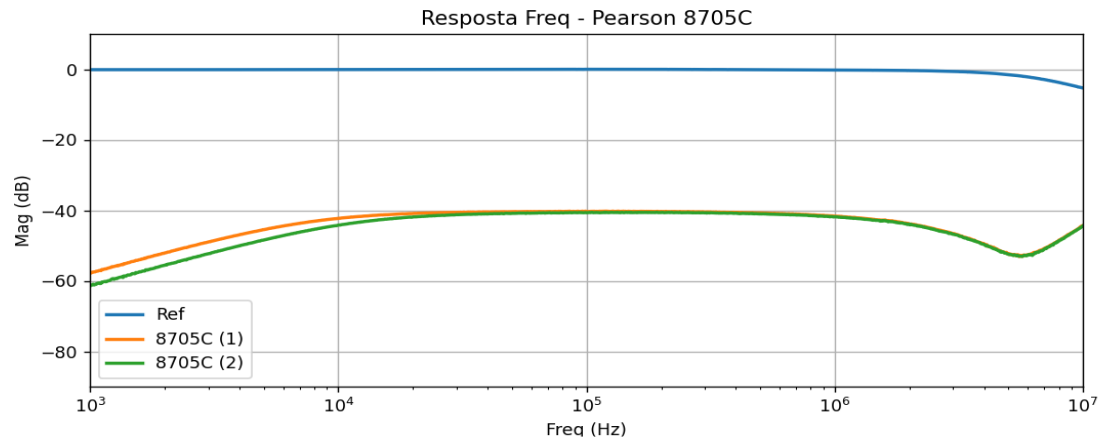


Figura 36 - Comparação entre dois Pearson 8705C.

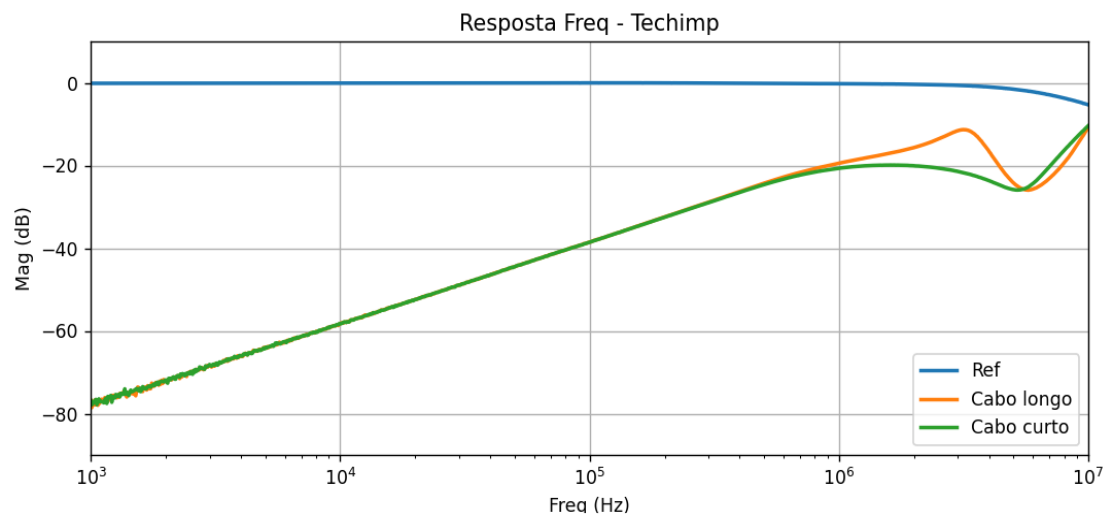


Fonte: Elaborado pelo autor.

F. Cabo Coaxial dos HFCTs.

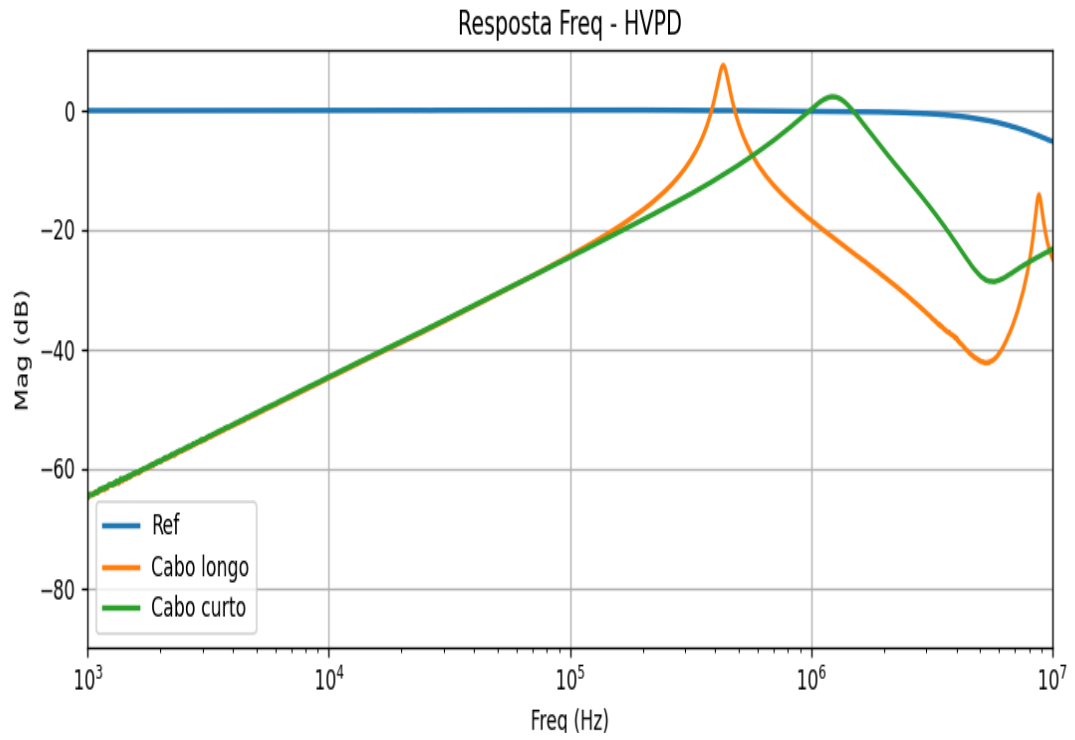
A conexão entre o HFCT e o dispositivo de aquisição de dados necessita de um cabo coaxial. Idealmente o cabo deve possuir o menor comprimento possível, entretanto, no campo o comprimento poderá ser elevado em função das distâncias físicas entre o ponto de fixação do HFCT até o dispositivo de aquisição. Para checar o impacto do comprimento do cabo realizou-se o levantamento da curva de resposta com um cabo coaxial curto - situação mais próxima do ideal. O resultado para os HFCT's analisados são apresentados na Figura 42, 43, 44, 45 e 46.

Figura 37 - Efeito do comprimento do cabo - Techimp.



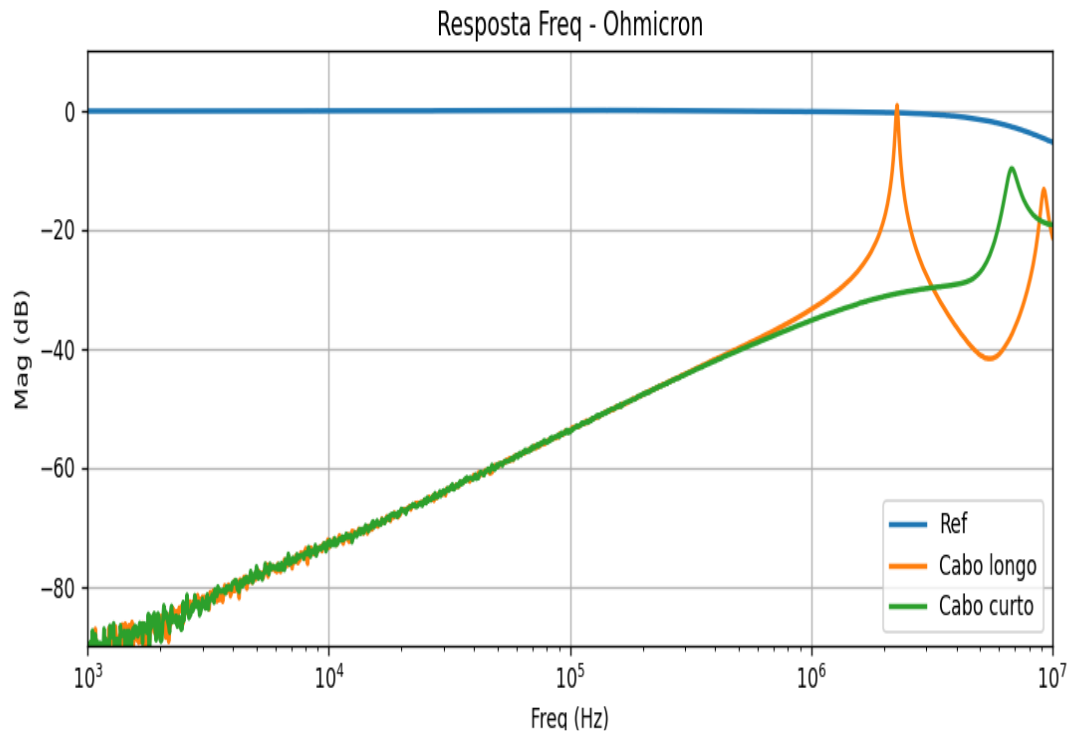
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 38 - Efeito do comprimento do cabo - HVPD.



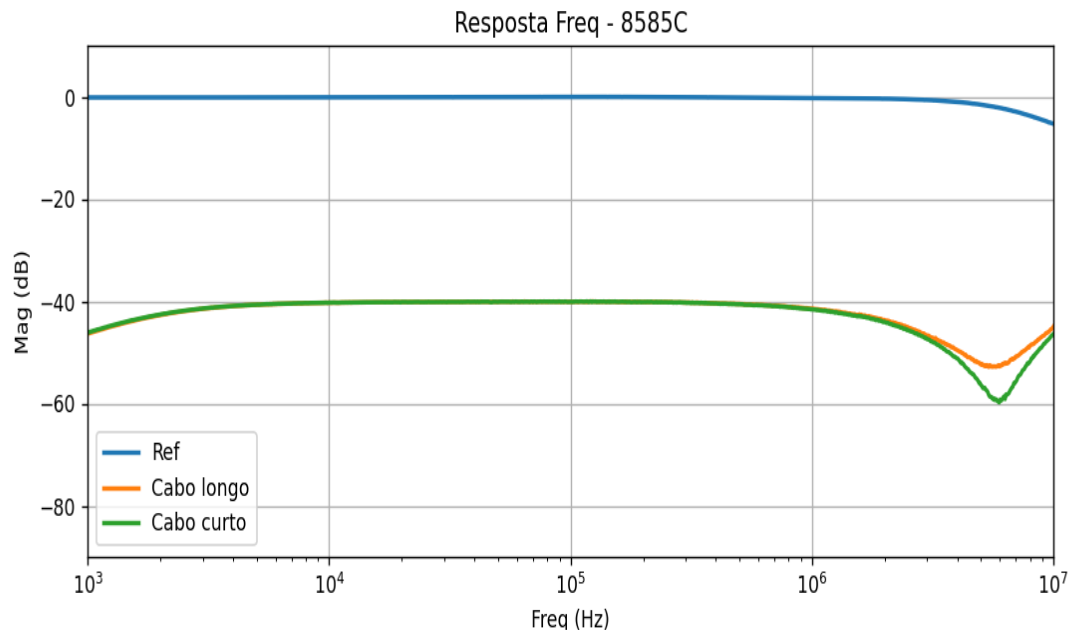
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Efeito do comprimento do cabo - Ohmicron.



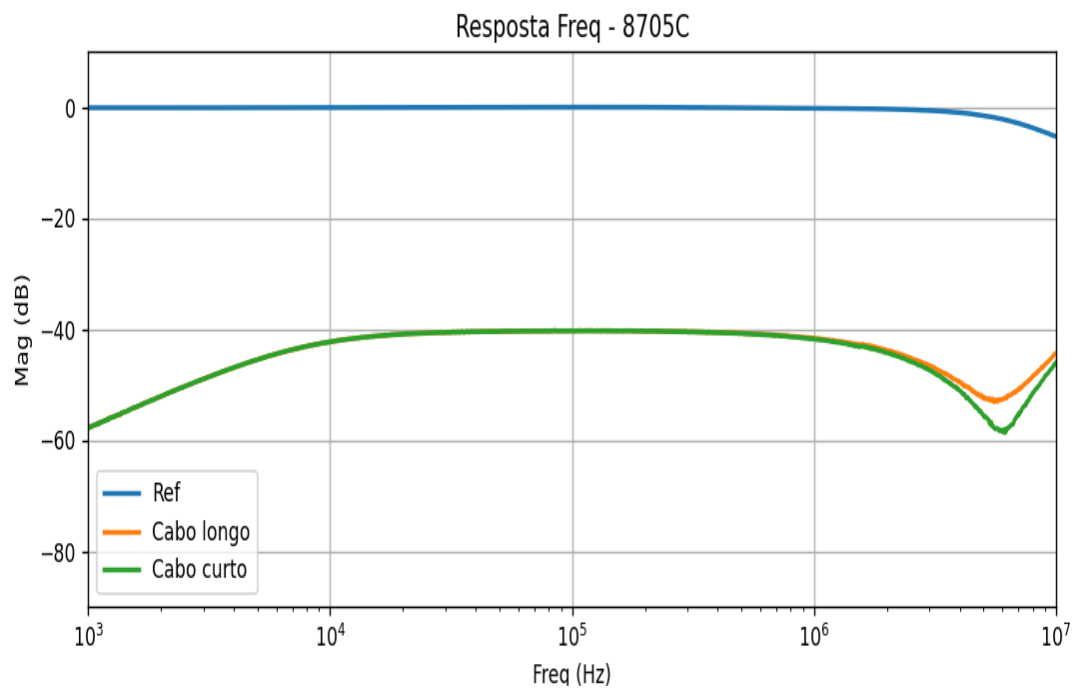
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Efeito do comprimento do cabo – 8585C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41 - Efeito do comprimento do cabo – 8705C.



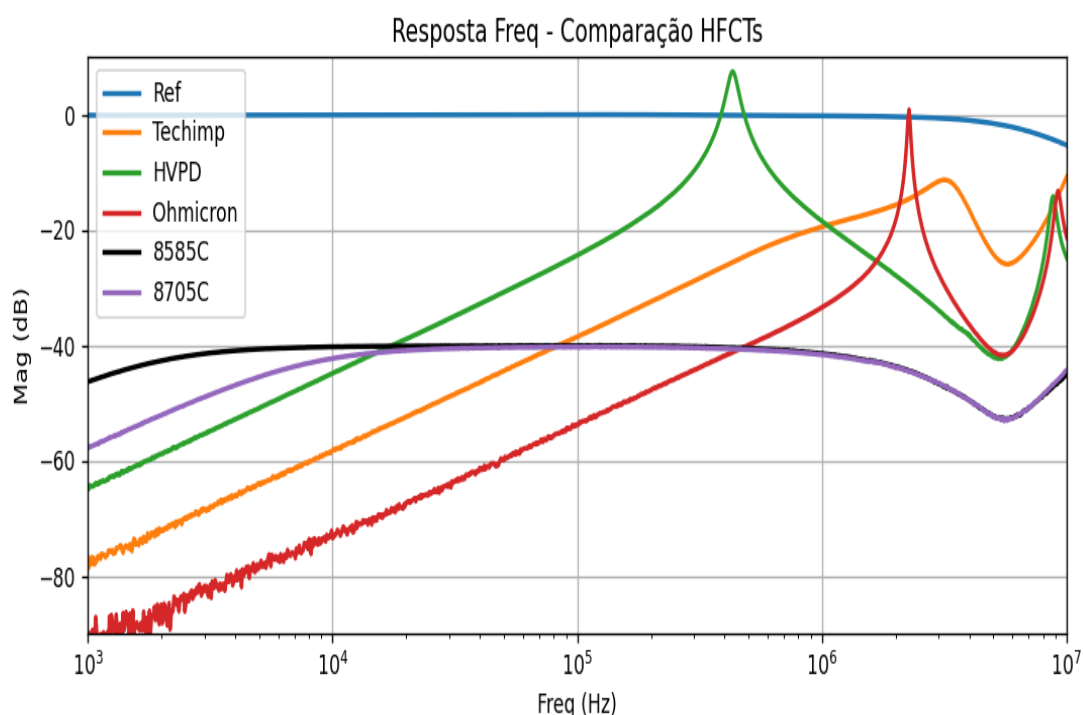
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados apresentados demonstram que o comprimento do cabo afeta o comportamento do circuito equivalente, e consequentemente a análise do sinal adquirido.

4.6 Considerações sobre os testes realizados

As curvas obtidas demonstraram que cada HFCT possui características próprias em relação a curva característica, banda de sinal ou mesmo pontos de ressonância que podem afetar as etapas de processamento posteriores. A comparação da resposta em frequência – magnitude do sinal captado – de todos os HFCTs analisados é apresentada a seguir, na Figura 42.

Figura 42 - Comparação de respostas em frequência entre os HFCTs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os HFCTs “Techimp”, “HVPD” e “Omicron” possuem picos pronunciados em frequências distintas. De maneira geral esses picos não significam maior sensibilidade para detecção das descargas, exceto se a banda de frequência do sinal ocorrer exatamente nos respectivos picos. Ao mesmo tempo, estes pontos de ressonância acabam amplificando o ruído de fundo nestes pontos, podendo dificultar a detecção em ambientes ruidosos, como o pátio de uma subestação.

Um dos pontos que chama atenção dos HFCTs analisados da Person está relacionado com a atenuação do sinal captado, de aproximadamente 40 dB. Este é um ponto negativo, visto que a amplitude do sinal recebido pela interface de aquisição ou dispositivo de detecção acaba aproveitando pouco de sua margem dinâmica, diminuindo a relação sinal-ruído. Este problema acaba afetando ainda mais dispositivos com baixa resolução em seus conversores analógico-

digital (ADC), como os presentes na maioria dos osciloscópios – geralmente com resolução de 8bit. Apesar da atenuação do sinal, a resposta em frequência é plana em toda a banda analisada, evitando que a resposta do HFCT altere características do sinal captado.

A resposta dos HFCTs 8585C e 8705C obtidas durante o levantamento são muito semelhantes. Entretanto, o sinal captado nos testes práticos – descargas realizadas em laboratório através da fonte de alta tensão – acabou sendo diferente entre os dois modelos. Este comportamento pode estar relacionado com o posicionamento físico dos cabos combinado com o tamanho da janela interna. Sendo assim, faz-se necessária uma padronização no posicionamento dos cabos de aterramento ao centro dos HFCTs para que seja possível verificar se os resultados com descargas se tornam mais próximos. Este é um ponto importante visto que o modelo com janela menor pode não se adequar a maioria dos cabos de aterramento das estruturas que serão ensaiadas.

A análise de modelos semelhantes de mesmo fabricante demonstrou que as curvas são equivalentes, trazendo reprodutibilidade entre cada um dos canais que forem amostrados com dispositivos semelhantes.

O resultado dos testes demonstrou que o comprimento do cabo impacta diretamente na resposta de frequência dos HFCTs, cada um de uma maneira diferente. Desse modo, pode-se relacionar este comportamento com a capacitância parasita do cabo com o aumento do comprimento. Essa capacitância pode interagir de diversas maneiras com o circuito equivalente, desde a formação de um filtro passa-baixa com o resistor burden interno ao HFCT – tradicionalmente de $50\ \Omega$ – ou mesmo afetando pontos de ressonância em função do modelo RLC que representa o HFCT.

A frequência de corte do filtro passa-baixa formado pode ser elevada através da diminuição do resistor burden, mas isso diminuirá na mesma proporção a tensão presente na saída do HFCT, impactando negativamente na relação sinal ruído.

Uma abordagem possível a ser testada envolve o uso de um amplificador acoplado diretamente no HFCT (cabo curto), com a saída deste amplificador podendo ser conectada a um cabo com maior comprimento sem que este interaja com o HFCT. Esta abordagem pode melhorar a resposta dos dispositivos em relação ao ganho do sinal dentro da banda útil ou mesmo na relação sinal ruído, visto que a saída de baixa impedância do amplificador possibilita maior imunidade a ruídos ambiente.

Em síntese, o sucesso da metodologia de medição de descargas parciais depende da análise e validação de diversos fatores e variáveis em andamento. Compreender esses elementos é crucial para garantir medições confiáveis.

O casamento de impedância pode ser realizado utilizando um amplificador operacional configurado como buffer ou como amplificador com ganho superior ao unitário. No caso do amplificador buffer (ganho unitário), obtêm-se o benefício do casamento de impedância com o transformador de corrente (TC), aliado à baixa impedância de saída, o que reduz os efeitos adversos de cabos longos; entretanto, não há amplificação do sinal. Já nos amplificadores com ganho superior a um, além dos mesmos benefícios, o sinal é amplificado, proporcionando maior amplitude e permitindo um melhor aproveitamento da margem dinâmica do equipamento de aquisição.

CAPÍTULO 5 – INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE INSTALAÇÃO NA MEDIÇÃO NÃO INVASIVA DE DESCARGAS PARCIAIS

5.1 Impacto do tamanho do HFCT e posicionamento durante os ensaios

Existem diversas opções com relação ao diâmetro interno dos HFCTs. Sua escolha deve ser pautada entre o compromisso de melhor captação dos sinais provenientes da descarga, bem como na versatilidade de se adequar ao ambiente de uma subestação.

Em uma subestação é comum encontrar equipamentos de diversas classes, fabricados por diversos fabricantes. Além disso, podem utilizar diferentes cabos de aterramento, em alguns casos se utilizando de múltiplos cabos de aterramento devido as grandezas envolvidas.

A escolha de um HFCT com maior diâmetro interno facilita a utilização no campo, visto que poderá ser utilizado tanto em cabos com maior diâmetro, ou mesmo na presença de múltiplos cabos de aterramento. A escolha de um HFCT com menor diâmetro limita sua utilização em cabos com menor diâmetro, porém, tende a obter melhor resultado com relação ao sinal aquisitado.

Testes realizados em laboratório com relação a resposta em frequência apontaram resultados muito similares entre os modelos 8705 e 8585 para o *range* de medição, entretanto, nos testes com geração de descargas parciais observou-se respostas diferentes entre os HFCTs.

A escolha do diâmetro interno ideal para um HFCT dependerá das especificações do sistema elétrico no qual ele será aplicado, levando em consideração fatores como o número de cabos de aterramento, a presença de interferências eletromagnéticas, e a sensibilidade desejada para detectar descargas parciais.

Diâmetros intermediários podem ser uma escolha de compromisso, oferecendo uma sensibilidade adequada sem sacrificar muito a versatilidade. Um HFCT com diâmetro interno intermediário pode ser uma opção versátil e razoável para sistemas com configurações variáveis de cabos de aterramento:

O posicionamento correto do cabo dentro do HFCT é crucial para garantir a eficácia da detecção e pode ser relacionado com alguns fatores, como a distribuição não uniforme de Campo Magnético, a perda de acoplamento magnético e o aprimoramento da geometria do transformador.

Quando o cabo não está centralizado, a distribuição do campo magnético gerado pela corrente no cabo pode não ser uniforme na janela do HFCT. Isso pode resultar em uma resposta não consistente e na perda de sensibilidade para detecção de descargas parciais, prejudicando

a indução no secundário. O acoplamento magnético é essencial para a detecção eficaz de correntes de alta frequência associadas a descargas parciais.

Os HFCTs são projetados com uma geometria específica para otimizar o acoplamento magnético e a resposta em frequência. O desalinhamento do cabo pode comprometer essa geometria, resultando em uma resposta deteriorada.

Partes do núcleo magnético podem saturar mais facilmente se o fluxo está concentrado devido à má posição do cabo. Apesar de ser um caso mais extremo quando relacionado com a baixa corrente das descargas, pode ocorrer em algumas situações, como por exemplo, caso a carcaça do HFCT entre em contato com o cabo de aterramento, podendo levar a uma relativa elevada corrente, ou também em casos em que a corrente natural do condutor já é elevada.

Os resultados experimentais indicam que a relação sinal-ruído melhora significativamente quando o HFCT é posicionado o mais próximo possível da fonte geradora da descarga, ou seja, junto ao ponto de conexão do cabo de aterramento. Esse comportamento decorre de diversos fatores relacionados à propagação do sinal e à interferência eletromagnética. A indutância do cabo de conexão, por exemplo, típica de valores entre 1 e 10 $\mu\text{H}/\text{m}$ para cabos de seção de 10 mm^2 , provoca atenuação em frequências mais altas — geralmente acima de 100 kHz — que são predominantes em descargas parciais. Ao aproximar o HFCT do equipamento, minimizam-se os efeitos indutivos, aumentando a sensibilidade do sensor em faixas de alta frequência, essenciais para a detecção precisa das descargas.

Além disso, cabos mais longos atuam como antenas, captando ruídos eletromagnéticos provenientes de transformadores próximos, linhas de média tensão ou cargas industriais. Essa interferência, geralmente na faixa de centenas de kHz a alguns MHz, pode mascarar o sinal de DP, reduzindo a relação sinal-ruído. Posicionar o HFCT próximo ao equipamento permite captar o sinal direto, minimizando o efeito das reflexões causadas por descontinuidades do cabo, conectores e adaptadores.

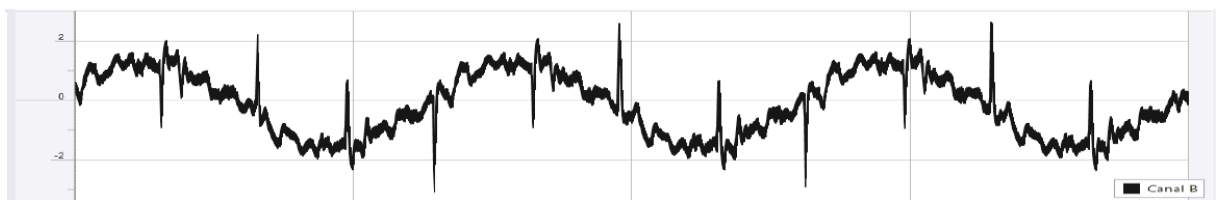
Outro fator relevante é a própria magnitude da corrente associada às descargas parciais, tipicamente na faixa de 1 a 100 μA . Correntes tão baixas reduzem o risco de saturação do núcleo magnético do HFCT, desde que este seja projetado com material de alta permeabilidade e seção adequada. Contudo, a baixa corrente aumenta a exigência em termos de amplificação e filtragem, sendo necessário cuidado para que o sinal não seja perdido ou distorcido durante a aquisição. Perdas por correntes parasitas e histerese do núcleo magnético tornam-se proporcionalmente mais significativas em correntes muito baixas, podendo atenuar parcialmente o sinal captado.

A impedância de saída do HFCT também influencia diretamente a qualidade da medição. Para uma conversão eficiente de corrente em tensão, a impedância deve ser suficientemente alta; entretanto, valores elevados podem limitar a banda útil do sinal, restringindo a detecção de componentes de alta frequência presentes em DP. Por exemplo, um HFCT com impedância de $1\text{ k}\Omega$ pode limitar a detecção acima de 500 kHz , enquanto uma impedância de $100\ \Omega$ permite faixa até 5 MHz , mas reduz a amplitude do sinal convertido.

Durante testes em laboratório de alta tensão, observou-se deformação das formas de onda e corrente de fuga elevada, medida com amperímetro de alta sensibilidade (faixa de μA). A análise revelou que a carcaça de um dos HFCTs estava em contato direto com o cabo de aterramento, criando um caminho de fuga e distorcendo o sinal. Após a correta isolamento, tanto a deformação quanto a corrente excessiva cessaram, evidenciando que o HFCT deve ser completamente isolado da carcaça e do cabo de aterramento para garantir medições precisas.

A Figura 43 ilustra a forma de onda registrada no canal do transformador de corrente durante o contato da carcaça do HFCT com o cabo de aterramento. Mesmo sem tensão aplicada, observou-se corrente de fuga e distorção do sinal na interface de aquisição. Quando a tensão foi aplicada e ocorreram descargas parciais, as distorções permaneceram, reforçando a importância do correto posicionamento, isolamento e dimensionamento do HFCT para medições confiáveis em laboratórios de alta tensão e em campo.

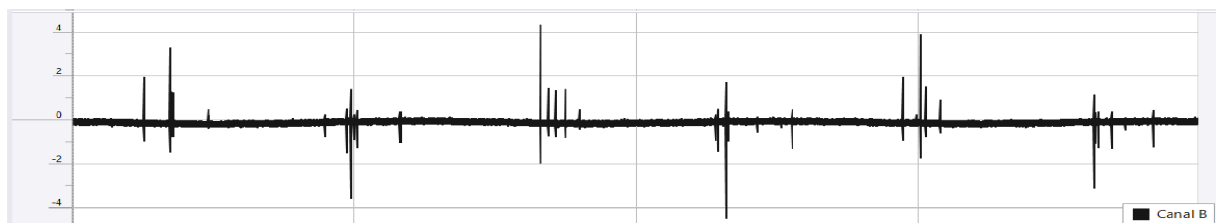
Figura 43 - Distorção causada pelo contato da carcaça do HFCT com o cabo de aterramento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 44 apresenta o sinal no TC após a sua carcaça estar isolada do cabo de aterramento onde a medição estava sendo realizada.

Figura 44 - Sinal do HFCT após a carcaça ser isolada do cabo.

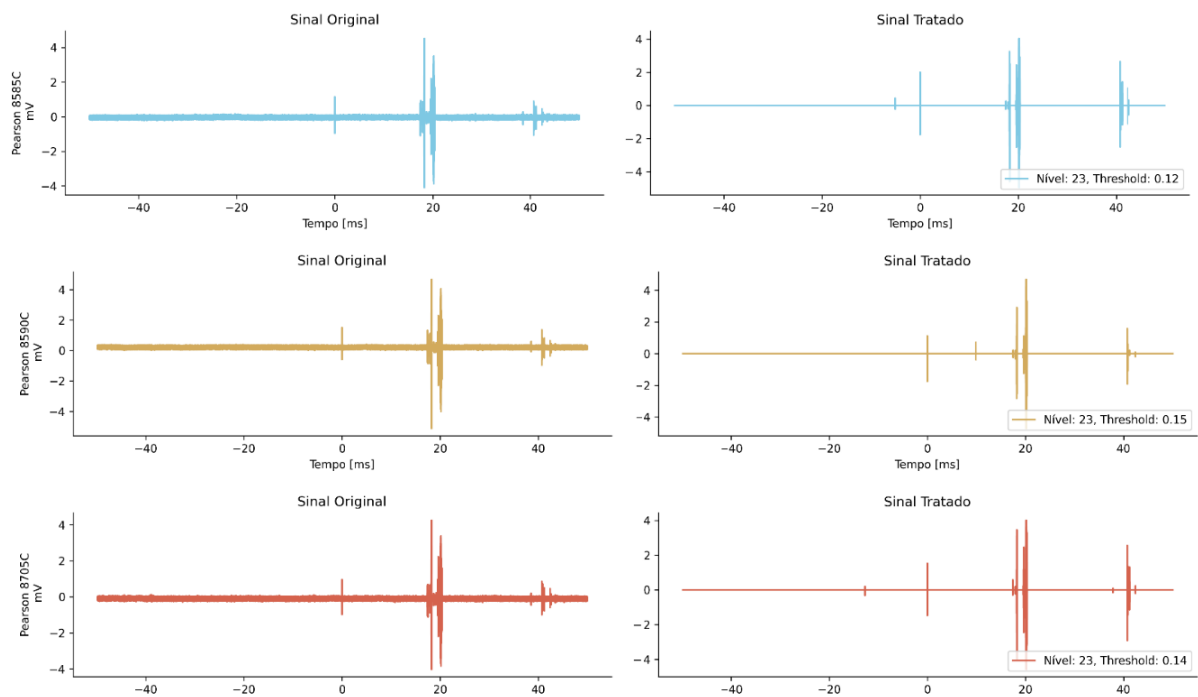


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Análise da Sensibilidade e Características dos Sinais Medidos

Nesta seção, investigou-se as sensibilidades dos sinais medidos pelos HFCT's da Pearson, o modelo 8590C, em relação a uma variedade de fenômenos elétricos, como Corona, Chaveamento de Cargas e Pulsos de DP. A Figura 45 ilustra o comportamento dos sinais durante a simulação de chaveamento em um contexto laboratorial. Este experimento é essencial para estabelecer um entendimento preciso do impacto de cargas transitórias nos sistemas de detecção de DP.

Figura 45 - Ensaio de DP no laboratório com HFCT's da Pearson 8705C, 8585C e 8590C – sinal de DP com 80pC com alta intensidade de ruído.



Fonte: Elaborado pelo autor.

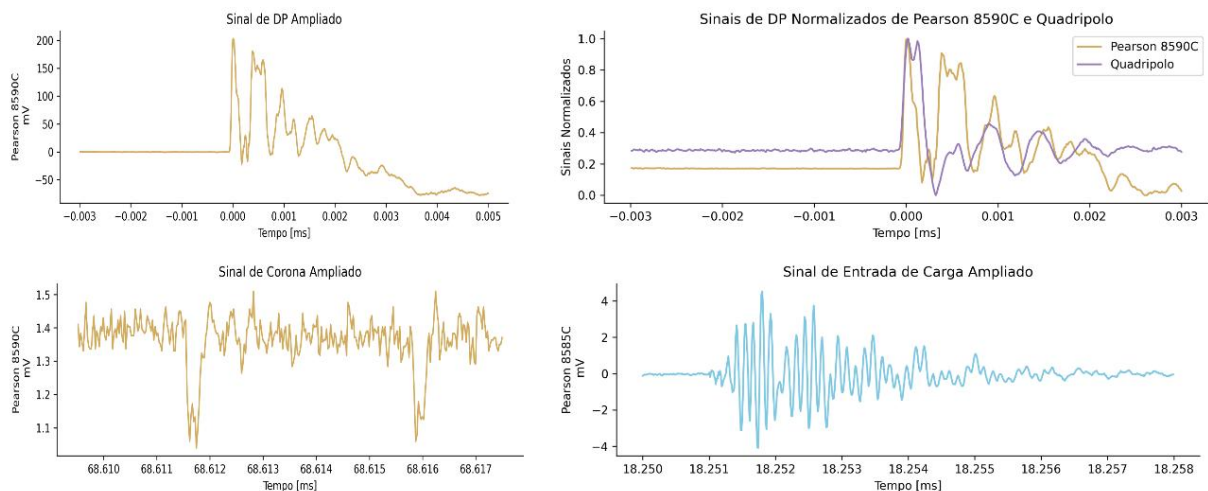
Em seguida, realiza-se a caracterização de um pulso de descarga parcial (DP), ilustrando sua assinatura típica. Para uma análise mais detalhada, é feita uma comparação entre os pulsos captados pelo HFCT 8590C e o quadripolo do sistema de medição da fonte ressonante do laboratório de alta tensão da ISA ENERGIA BRASIL, oferecendo uma avaliação da eficiência de diferentes dispositivos de monitoramento. O quadripolo, neste contexto, representa o modelo elétrico de quatro terminais que engloba cabos, filtros, transformadores e demais elementos da rede de medição, permitindo compreender como esses componentes afetam a forma, amplitude e fidelidade do sinal de DP.

Os sinais típicos de descarga tipo corona também são explorados, com destaque para suas características peculiares, diferenciando-os das DP, o que é essencial para diagnósticos precisos. Além disso, o sinal de entrada de carga é caracterizado, delineando estratégias para distinguir claramente esses eventos das descargas parciais.

A Figura 46 ilustra os sinais de DP normalizados, obtidos tanto pelo quadripolo quanto pelo HFCT 8590C, assim como os sinais correspondentes a descargas do tipo corona e ao acionamento de cargas, em versões ampliadas, permitindo uma análise comparativa detalhada e fornecendo subsídios para a interpretação correta dos fenômenos registrados.

Os ensaios de caracterização de sinais foram realizados para coletar dados que permitam a identificação de perfis distintos entre os diferentes sinais elétricos. O intuito é aprimorar o reconhecimento de padrões e facilitar a classificação automática utilizando algoritmos de inteligência artificial. Este enfoque inovador visa não apenas entender as características singulares de cada tipo de sinal, mas também desenvolver sistemas de monitoramento e diagnóstico mais sofisticados, que sejam capazes de aprender e adaptar-se para identificar com precisão as nuances entre os diversos fenômenos que podem ser encontrados nas SE's.

Figura 46 - Resultado do ensaio de sensibilidade e caracterização dos sinais de DP, corona e chaveamento de cargas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

6.1 Aspectos Gerais

A escolha dos equipamentos para análise dos sinais com os HFCT's, possibilitou uma base sólida para o desenvolvimento da metodologia de medição. A análise comparativa entre diferentes HFCT's proporcionou uma avaliação das características distintas, apresentando respostas de frequência particulares de cada modelo. Além disso, a influência do comprimento do cabo sobre a resposta em frequência dos HFCT's revelou a necessidade de considerar as interações com a capacitância parasita do cabo.

Durante as atividades em laboratório, foram realizados ensaios detalhados que envolveram a geração controlada de pulsos de descargas parciais. A fonte ressonante de alta tensão da ISA ENERGIA permitiu a reprodução de cenários realistas de descargas parciais, possibilitando a análise das respostas dos sensores HFCT's em diferentes configurações. Além disso, a coleta e análise dos sinais gerados durante esses ensaios proporcionaram *insights* valiosos sobre as características espectrais, forma de onda e padrões de comportamento das descargas parciais.

A metodologia adotada possibilitou identificar a presença do componente fundamental de 60 Hz, bem como inferir características relacionadas aos pulsos de descargas parciais (DP) em diferentes fases dos equipamentos analisados. Além disso, a comparação entre os sensores HFCT 8705C e HFCT 8585C evidenciou a boa sensibilidade e a resposta linear desses dispositivos, aspectos essenciais para a confiabilidade das medições.

Conclui-se, portanto, que o sucesso da metodologia de medição de descargas parciais em ativos de subestação depende da análise e validação de diversos fatores e variáveis em andamento. Compreender esses elementos é crucial para garantir medições confiáveis. O trabalho oferece contribuições significativas para o contínuo desenvolvimento de uma metodologia de ensaio de descargas parciais em equipamentos energizados. Um dos aspectos cruciais a serem abordados futuramente diz respeito à otimização dos mecanismos de filtragem, desempenhando um papel essencial na resolução do desafio de filtrar sinais espúrios.

6.2 Publicações Aprovadas sobre a Pesquisa

CRIVELARO, MATHEUS GOES ; RODRIGUES, DOUGLAS ; GIFALLI, ANDRÉ ; PAPA, JOÃO PAULO ; GONZALES, CARLOS GUILHERME ; DE SOUZA, ANDRÉ NUNES ; DA SILVA, GUSTAVO VINÍCIUS ; NETO, ERASMO SILVEIRA . *Denoising Autoencoder for Partial Discharge Identification in Instrument Transformers*. In: 2024 31st International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2024, Graz. 2024 31st International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2024. p. 1.

GIFALLI, A.; CRIVELARO, MATHEUS GOES ; SOUZA, ANDRÉ NUNES DE ; GONZALES, CARLOS GUILHERME ; HUBLARD, A. V. F. ; YAMAGUCHI, V. H. S. ; SOUZA, A. A. Z. N. ; NETO, ERASMO SILVEIRA ; DA SILVA, GUSTAVO VINÍCIUS . XV LATIN-AMERICAN CONGRESS GENERATION AND TRANSMISSION ON ELECTRICITY - CLAGTEE Partial Discharge Diagnosis in a High Voltage Current Transformer: A Wavelet Transform and Competitive Network Approach. 1. ed. Mar del Plata: , 2024. v. 1. 85p .

6.3 Continuação da Pesquisa

Como continuidade dessa pesquisa, vislumbram-se os seguintes tópicos:

- Aplicar a metodologia em ensaios de campo, com transformadores de corrente energizados em diferentes subestações.
- Desenvolver sistemas de aquisição com pré-processamento embarcado para melhorar a relação sinal-ruído.
- Implementar algoritmos de inteligência artificial para classificação automática de sinais de DP e ruídos.
- Avaliar sensores alternativos ao HFCT, como sensores ópticos e UHF/VHF, para ampliar a faixa de detecção.
- Investigar o impacto de condições climáticas e ambientais na geração e detecção de descargas parciais.
- Criar estratégias de calibração dinâmica durante ensaios de DP em campo.
- Desenvolver modelos computacionais para simulação de sinais de DP em diferentes topologias de subestação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR IEC 60270 – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão: Medição de descargas parciais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ALI, N. N.; HUNTER, J. A.; RAPISARDA, P.; LEWIN, P. L. Identification of multiple partial discharge sources in high voltage transformer windings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSIS (CMD), 2017, Chiang Mai. Proceedings... Lausanne: IEEE, 2017.

ALI, N. N.; RAPISARDA, P.; LEWIN, P. L. Multiple partial discharge source discrimination in a high voltage transformer winding. In: ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (INSUCON), 2017. Proceedings... IEEE, 2017.

ANTCZAK, K. Deep Recurrent Neural Networks for ECG Signal Denoising. arXiv preprint, arXiv:1807.11551, 2018.

ARDILA-REY, J. A.; CERDA-LUNA, P.; ROZAS-VALDERRAMA, R. A.; CASTRO, B. A. D.; ANDREOLI, A. L.; MUHAMMAD-SUKKI, F. Separation techniques of partial discharges and electrical noise sources: A review of recent progress. IEEE Access, v. 8, 2020.

BACEGA, W. R. et al. Partial Discharges Field Tests in a 230 kV Circuit Breaker. In: IEEE EUROCON, 2017, Macedônia. Proceedings... IEEE, 2017.

CIGRÉ. Final Report of the 2004–2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment – Part 4: Instrument Transformers. Technical Brochure 512. Paris: CIGRÉ, 2012.

FUANGSOONGNERN, U.; PLUEKSAWAN, W.; TIKAKOSOL, K. A measurement technique to identify and locate partial discharge in transformer with AE and HFCT. In: INNOVATIVE SMART GRID TECHNOLOGIES – ASIA (ISGT ASIA), 2014. p. 108–113.

IEC. High Voltage Test Techniques – Measurement of Partial Discharges by Electromagnetic and Acoustic Methods. IEC, 2016.

KLÜSS, J. V.; ELG, A.-P. Challenges Associated with Implementation of HFCTs for Partial Discharge Measurements. In: CONFERENCE ON PRECISION ELECTROMAGNETIC MEASUREMENTS (CPEM), 2020, Denver. Proceedings... IEEE, 2020.

KREUGER, F. H. Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment. London: Butterworths, 1989.

LAI, K. X. et al. Localization with Phase Resolved Partial Discharge Measured with High Frequency Current Transformer. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE

PROPERTIES AND APPLICATIONS OF DIELECTRIC MATERIALS (ICPADM), 2021, Malásia. Proceedings... IEEE, 2021.

MAZROUA, A. A.; BARTINIKAS, R.; SALAMA, M. M. Discrimination between PD pulse shapes using different neural network paradigms. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, v. 1, n. 6, p. 1119–1131, 1994.

PENG, X.; ZHOU, C.; HEPBURN, D. M.; SONG, X. Denoising and feature extraction in PD-based cable condition monitoring systems. In: *ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP)*, 2010. IEEE, 2010.

ROJAS, H. E.; FORERO, M. C.; CORTÉS, C. A. Application of the local polynomial Fourier transform in the evaluation of electrical signals generated by partial discharges in distribution transformers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, p. 227–236, 2017.

SILVA, F. T. de A. Processamento de sinais de descargas parciais utilizando dicionários sobrecompletos e representações esparsas. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.

VINCENT, P.; LAROCHELLE, H.; LAJOIE, I.; BENGIO, Y.; MANZAGOL, P.-A. Stacked denoising autoencoders: Learning useful representations in a deep network with a local denoising criterion. *Journal of Machine Learning Research*, v. 11, p. 3371–3408, 2010.

WANG, X.; ZHU, D.; LI, F.; GAO, S. Analysis and rejection of noises from partial discharge (PD) on-site testing environment. In: *CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP)*, 1998. Proceedings... IEEE, 1998.

XU, Y. et al. Special requirements of high frequency current transformers in the on-line detection of partial discharges in power cables. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2016.

YU, S.; MA, J.; WANG, W. Deep learning for denoising. *Geophysics*, p. 1–107, 2019.