

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia de Bauru

Relatório Final de Pós-doutoramento

PD-III

Projeto 5104

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS APLICADAS
A IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS
EM TRANSFORMADORES**

Dr. Marco Aurélio Rocha
Supervisor: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro

Bauru
2025

MARCO AURÉLIO ROCHA

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS APLICADAS
A IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS
EM TRANSFORMADORES**

Relatório de Pós-doutorado realizado
na Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Engenharia
de Bauru, Departamento de
Engenharia Elétrica, Bauru.

Supervisor: Prof. Dr. Bruno
Albuquerque de Castro.

Bauru
2025

Resumo

Este relatório faz a descrição sucinta das atividades desenvolvidas pelo acadêmico Marco Aurélio Rocha durante o período de 1 ano (11 de março de 2024 até 11 de março de 2025) de seu pós-doutorado. As atividades de pesquisa foram desenvolvidas sem financiamento ou qualquer tipo de bolsa, tendo o pós-doutorando exercido concomitantemente atividade docente como professor substituto no Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru e atividade de extensão universitária. No que condiz à pesquisa científica, o trabalho teve como enfoque a área de monitoramento de transformadores. Essas máquinas, em condições normais de operação, encontram-se continuamente expostas a diversos parâmetros críticos que podem degradar seu sistema de isolamento e produzir falhas como as descargas parciais. Desta forma, a correta identificação dessas falhas contribui para um aprimoramento da manutenção e pode evitar com que falhas totais ocorram nesses ativos. A pesquisa realizou um estudo preliminar de técnicas de processamento de sinais baseado nas Transformadas de Fourier de Tempo Curto, Wavelet e Hilbert, com intuito de quantificar e classificar múltiplas fontes de descargas parciais que ocorrem ou não em concomitância. Sensores piezelétricos foram acoplados à carcaça de um transformador de distribuição e os resultados preliminares obtidos atestaram que, para o caso estudado, as transformadas Wavelet e Hilbert foram promissoras para a classificação e quantificação de falhas isoladas, sendo a transformada Hilbert superior à quantificação de falhas distintas em concomitância. Para trabalhos futuros, com intuito do aprimoramento e validação metodológica desta pesquisa, surge a possibilidade do estudo da variação do número de sensores acoplados, de novas técnicas de processamento de sinais para quantificação das fontes de descargas, do aumento do número de fontes de descargas, dentre outros fatores.

Palavras-chave: descargas parciais, transformadores de potência, quantificação de falhas, emissão acústica, transdutores piezelétricos.

Abstract

This report provides a briefly description of the activities carried out by Dr Marco Aurélio Rocha during the one-year period (from March 11, 2024, to March 11, 2025) of his postdoctoral research. The research activities were conducted without financial support or any type of scholarship, with the postdoctoral researcher simultaneously holding a teaching position as a temporary professor in the Department of Electrical Engineering at the School of Engineering, Bauru Campus, as well as engaging in university extension activities. Regarding scientific research, the work focused on the area of transformer monitoring. These machines, under normal operating conditions, are continuously exposed to various critical parameters that can degrade their insulation system and lead to failures such as partial discharges. Therefore, the correct identification of these failures contributes to improved maintenance and can prevent total failures in these assets. The research carried out a preliminary study on signal processing techniques based on Short-Time Fourier Transform, Wavelet Transform, and Hilbert Transform, aiming to quantify and classify multiple sources of partial discharges, whether occurring simultaneously or not. Piezoelectric sensors were attached to a power transformer wall, and the preliminary results obtained indicated that, for this case, the Wavelet and Hilbert transforms showed promise for the classification and quantification of isolated failures, with the Hilbert transform proving superior in quantifying distinct simultaneous failures. For future work, with the aim of methodological improvement and validation of this research, there is the need of studying variations in the number of sensors used, exploring new signal processing techniques for discharge source quantification, increasing the number of discharge sources, among other factors.

Keywords: partial discharges, power transformer, quantification, acoustic emission, piezoelectricity.

Sumário

1. Introdução, Justificativa e Objetivos	6
2. Monitoramento de Transformadores por Emissão Acústica	7
2.1 Transformada de Fourier de Tempo Curto	9
2.2 Transformada Hilbert	10
2.3 Transformada Wavelet.....	10
3. Material e Métodos	12
4. Resultados e Discussão	16
4.1 Transformada Hilbert aplicada ao diagnóstico de falhas.....	16
4.2 Transformada Wavelet aplicada ao diagnóstico de falhas	22
4.3 STFT aplicada ao diagnóstico de falhas.....	27
5. Conclusão	32
6. Atividades de Ensino e Extensão	32
7. Lista de Publicações	33
8. Comentários do Supervisor	33
9. Referências	33

1. Introdução, Justificativa e Objetivos

Em condições normais de operação, os sistemas de isolamento empregados em transformadores de potência, encontram-se continuamente expostos a diversos parâmetros críticos provenientes de fontes elétricas, térmicas, mecânicas e ambientais, o que podem produzir um processo de deterioração gradativo das características dielétricas dos materiais isolantes (KOLTUNOWICZ, 2024; ABDI, et al., 2025). Deste modo, é de extrema importância garantir uma operação segura e contínua desses equipamentos que são fundamentais para o sistema elétrico de potência (ZHANG, X. et al., 2019; KUMAR, R. et al., 2022).

No contexto operacional dos transformadores, a ocorrência de falhas como as descargas parciais (DPs) é um fenômeno frequentemente observado e representa um importante indicativo da condição dielétrica do equipamento, pois essas não conformidades estão diretamente relacionados à deterioração das propriedades físico-químicas dos materiais isolantes. Essa degradação pode ser atribuída a diversos fatores, como por exemplo a operação em ambientes hostis com correntes de altas intensidades, surgimento de partículas gasosas oriundas de reações químicas internas ao transformador, penetração de umidade etc (FENG, et al., 2024; MURUGAN, RAMASAMY, 2019). Segundo Mao et al. (2020), as principais causas das descargas parciais são:

- Sob condição de alta temperatura, vibração e umidade, em condições anormais de origem elétrica, térmica e química o transformador de potência é propenso a degradação da isolamento.
- Defeitos internos provenientes da fabricação, instalação ou operação podem resultar em atividades de descarga.

Neste contexto, a norma IEC 60270 (2000) define descargas parciais como descargas de baixa energia que não preenchem completamente dois pontos condutores. Em geral, a ocorrência da DP é resultado do acúmulo localizado de estresse elétrico em áreas específicas

do isolamento elétrico e, quando ocorrem, podem emitir luz, calor, ondas acústicas e eletromagnéticas (ALSHALAWI; AL-ISMAIL, 2024; ZHOU; IANNUZZI, 2019; SCHIEWALDT 2024; IEC 60270, 2000). Uma outra falha que acomete o sistema de isolamento dos transformadores é a descarga total, também conhecida como arco elétrico. Pode se caracterizar pela completa ionização entre dois elementos condutores, resultado em uma energia liberada maior que a descarga parcial (SCHIEWALDT, 2024; ZHOU; IANNUZZI, 2019). Podem ser classificadas pela IEC 60599 (2015) como descargas do tipo D1 ou D2.

Desta forma, diversas metodologias de diagnóstico de falhas em transformadores foram desenvolvidas. Recomenda-se, para aprofundamento, a leitura de Abu-Siada (2018). Dentre as metodologias, a técnica da emissão acústica é uma das mais promissoras e se vale de transdutores piezelétricos fixados na parede do transformador para captar a atividade acústica oriunda das falhas. Embora promissora e consolidada, evidencia-se uma lacuna no estado da arte no que condiz a mensuração e quantificação do número de fontes de descargas elétricas que possuem caráter concomitante ou de mesma origem.

Diante do exposto, o objetivo central desta pesquisa de pós-doutoramento consiste no estudo comparativo de técnicas de processamento digital de sinais com intuito de se realizar a identificação, classificação e quantificação de fontes de descargas parciais em transformadores, em especial aquelas que ocorrem simultaneamente ou que compartilham mesma origem. Mais especificamente, descargas parciais nos isoladores e em material a base de celulose foram estudadas mediante a utilização de 3 sensores de emissão acústica espalhados na carcaça do transformador. Após a aquisição dos sinais oriundos das falhas, técnicas de processamento de sinais foram aplicadas objetivando quantificar e classificar as não conformidades.

2. Monitoramento de Transformadores por Emissão Acústica

O monitoramento de transformadores pelo método da emissão acústica se vale do princípio de que, quando uma descarga ocorre, ela produz ondas que se propagam pela máquina

(MEITEI, 2024). Neste contexto, o acoplamento de transdutores piezelétricos na carcaça do transformador tem como finalidade capturar essa emissão acústica com o objetivo de localizar, identificar e classificar o tipo de falha. Basicamente, os transdutores piezelétricos são formados de materiais bidirecionais que produzem tensões elétricas quando são excitados mecanicamente e produzem vibrações mecânicas quando uma fonte de tensão elétrica é aplicada. Portanto, esses transdutores podem ser sensíveis às tensões mecânicas oriundas de ondas acústicas, produzindo tensões proporcionais ao som de falhas como as descargas parciais.

Um dos pontos mais importantes na área de monitoramento de transformadores é a caracterização do tipo de fonte da falha, uma vez que sua identificação pode aprimorar o planejamento de manutenção. Para isso, de acordo com Rivas et al. (2025), a técnica por mapas de separação permite a caracterização de fontes de descargas parciais devido ao fato de extraírem características em tempo, frequência ou tempo-frequência. Essa abordagem permite a discriminação entre diferentes tipos de descargas como aquelas associadas às isolações a base de celulose, a bucha do transformador, o óleo, ou mesmo aquelas oriundas de diferentes geometrias – por exemplo as descargas ponto-ponto, que podem acometer pontos de espiras com isolação deteriorada, ponto-plano, que geralmente são observadas entre a carcaça do transformador e um ponto com isolação danificada etc. Entretanto, a identificação de múltiplas fontes de descargas que possuem ação concomitante ainda é um tema desafiador na literatura. Em se tratando da emissão acústica, sabe-se que os sons produzidos por diferentes fontes de descargas, sejam elas de mesmo tipo ou não, podem se misturar e dificultar sua classificação ou quantificação. Por exemplo, em Castro et al. (2023) foi proposto um sistema de classificação de descargas totais e falhas em buchas. No entanto as falhas foram caracterizadas de forma isolada. Portanto, um dos desafios tecnológicos é a identificação de diferentes tipos de falhas ou a quantificação das falhas de mesma origem que ocorre de forma concomitante.

Diversas técnicas de processamento de sinais podem ser utilizadas para a caracterização dos sinais acústicos. Para este trabalho as transformadas Wavelet, Hilbert e Fourier de tempo

curto foram aplicadas. Abaixo, encontra-se sumarizado o princípio matemático de cada uma delas. Para maiores aprofundamentos, deve-se consultar bibliografias especializadas como Oppenheim e Schaffer (2013), Oppenheim e Verghese (2017) e Oliveira (2007).

2.1 Transformada de Fourier de Tempo Curto

A transformada de Fourier converte sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência. No caso de sinais acústicos oriundos de descargas parciais essa transformada retornará o espectro em frequência dos sons emitidos pelas falhas. Para sistemas discretos a transformada é definida por (OPPENHEIN; SCHAFFER, 2013; BARRETO, 2023):

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

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

em que $X[k]$ é o vetor da transformada discreta de Fourier de um sinal amostrado $x[n]$ de N amostras, cujo conteúdo em frequência é ω_k .

Para o cálculo da transformada discreta de Fourier é tradicional o uso do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (do inglês, *Fast Fourier Transform - FFT*). Embora seja uma ferramenta consolidada, essa transformada não permite a visualização de como o conteúdo em frequência varia ao longo do tempo. Neste contexto, a Transformada de Fourier de Tempo Curto, conhecida do inglês por *Short-Time Fourier Transform - STFT*, surgiu como análise de tempo-frequência, permitindo a avaliação temporal das frequências com a inserção de um janelamento de tamanho L no sinal amostrado, conforme equação abaixo (OPPENHEIN; SCHAFFER, 2013):

$$X[n, k] = \sum_{m=0}^{L-1} x[n+m] \cdot w[m] \cdot e^{-j \frac{2\pi km}{N}}, \quad (3)$$

em que $w[m]$ é o vetor que representa a janela escolhida.

2.2 Transformada Hilbert

A Transformada de Hilbert (TH) é um método de análise de sinais que tem como uma de suas funções extrair as envoltórias ou envelopes de sinais. Considerando um sinal contínuo $x(t)$ a transformada Hilbert $H[x(t)]$ é definida matematicamente pela seguinte equação (LIU et al, 2024):

$$H[x(t)] = x(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (4)$$

Uma das principais contribuições dessa transformada, é o conceito de sinal analítico, que transforma um sinal real unidimensional em um sinal complexo bidimensional $z(t)$ dado por:

$$z(t) = x(t) + jH[x(t)]. \quad (5)$$

Assim, o módulo do sinal analítico é definido como o envelope ou envoltória do sinal analisado (KUMARESAN; RAO, 1999):

$$|z(t)| = \sqrt{x(t)^2 + H[x(t)]^2}. \quad (6)$$

No contexto desta pesquisa, aplicou-se o conceito de envelope de Hilbert para a caracterização dos sinais acústicos emitidos pelas falhas nos transformadores.

2.3 Transformada Wavelet

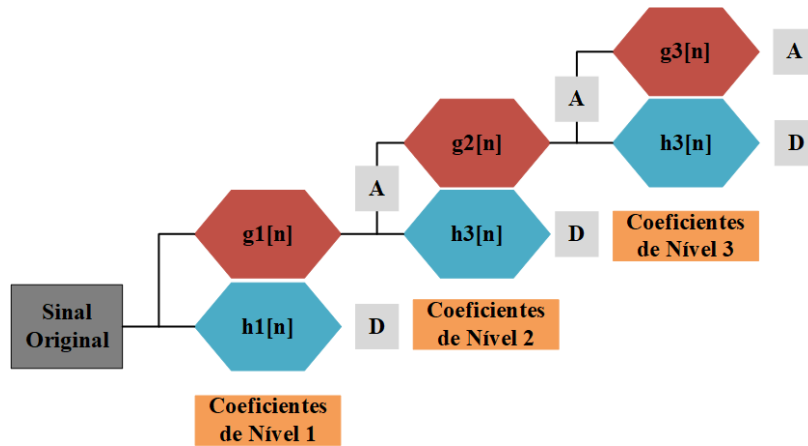
A Transformada Wavelet é uma ferramenta que permite a representação de sinais no plano tempo-frequência por um conjunto de filtragens sucessivas que produzem os coeficientes Wavelet em dois níveis: aproximação e detalhe. Para a transformada Wavelet discreta (TWD), um sinal de entrada é processado de forma paralela por dois filtros de resposta finita ao impulso: um filtro passa-baixa ($g[n]$), que extrai suas componentes de baixa frequência (coeficientes de aproximação), e um filtro passa-altas ($h[n]$), que seleciona componentes de alta frequência (coeficientes de detalhe). Filtragens sucessivas a partir dos níveis de aproximação produzem novos coeficientes de aproximação e detalhe em diferentes níveis da transformada Wavelet,

conforme Equações 7 e 8 (CHERIF et al., 2020; KONAR; CHATTOPADHYAY, 2015). Como exemplo, a Figura 1 apresenta a decomposição de um sinal original, em três níveis. A partir da primeira decomposição, observa-se que os coeficientes de aproximação são novamente decompostos em novos coeficientes de aproximação (A) e detalhe (D). Este processo se repete até que não seja mais possível a decomposição do sinal (CHERIF et al., 2020; BOUZIDA et al., 2011; ROCHA, 2022).

$$a_{j+1}[p] = \sum_n g[n-2p]a_j[n] \quad (7)$$

$$d_{j+1}[p] = \sum_n h[n-2p]a_j[n] \quad (8)$$

Figura 1 – Decomposição do sinal por meio de TWD em três níveis.



Fonte: ROCHA (2022), adaptado de CHERIF et al., (2020)

No contexto deste trabalho, foram extraídas as energias dos níveis Wavelet e do envelope oriundo da transformada Hilbert. A energia de uma sequência $s[n]$ de N amostras, é caracterizada por:

$$E = \frac{1}{N} \sum s[n]^2 . \quad (9)$$

3. Material e Métodos

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Sensores e Processamento de Sinais Aplicado à Dispositivos de Média Tensão, do Departamento de Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Unesp. Para atender os objetivos do projeto, foram emulados dois tipos de falhas em um transformador de distribuição de 30 kVA, 13,8 kV/220V/127V: descargas parciais em material celulósico na parte ativa do transformador e descargas parciais no isolador da máquina.

Para as descargas na parte ativa, foram confeccionados dois eletrodos a base de tungstênio que pressurizaram uma camada de papel comercial amplamente utilizado em sistemas de isolamento de transformadores. Já as descargas parciais em bucha isoladora foram geradas por meio da contaminação do dispositivo com pó de grafite com intuito de simular impurezas que se acumulam sobre esses dispositivos em situações práticas. Dois metais foram conectados à bucha para aplicar a tensão do teste. A Figura 2 apresenta os detalhes dos eletrodos e das buchas isoladoras contaminadas.

Figura 2 – Eletrodos para a realização de descargas parciais em (a) papel e (b) isoladores.



(a)



(b)

Em um primeiro momento, as falhas estudadas foram as descargas parciais em papel isolante. Dois eletrodos foram imersos no óleo em dois pontos distintos do transformador sendo posicionados aleatoriamente à direita e à esquerda da vista frontal dos terminais de baixa tensão

da máquina. O objetivo foi estudar o caso de quando duas falhas de mesmo tipo ocorrem em pontos diferentes sem estar em concomitância. Uma fonte de alta tensão aplicou uma diferença de potencial de 10 kV nos terminais dos eletrodos. Após, os dois eletrodos foram ligados em paralelo de forma a se aplicar a mesma tensão de 10 kV em seus terminais. Para garantir a ocorrência das descargas parciais de forma concomitante, dois sensores de corrente de alta frequência (IPEC CT48 e CT48E) foram acoplados nos ramos de cada um dos eletrodos. Os sensores são conhecidos pela sigla HFCT que do inglês, significa *High-Frequency Current Transform*. A coleta dos dados acústicos foi executada após a observação de picos de descargas em ambos os HFCTs. Depois disso, a falha de estudo foi descarga parcial nos isoladores, tendo sido aplicado a mesma metodologia: em um primeiro momento as descargas foram produzidas separadamente nas buchas esquerda e direita da máquina tomando como referência a vista frontal dos terminais de baixa tensão do transformador. Após, elas foram ligadas em paralelo para se estudar as falhas ocorrendo com sobreposição. A fonte de alta tensão alimentou os isoladores em sua tensão nominal de 13,8 kV.

Por fim, este trabalho estudou o efeito dois tipos de descargas parciais sobrepostas. Para isso, ligou-se um eletrodo com papel esquerdo em paralelo com o isolador direito do transformador. Dois HFCTs foram acoplados para se garantir que os dois tipos de descargas estivessem ocorrendo de forma concomitante. Na Figura 3 é ilustrada detalhes dos sensores HFCTs e das buchas.

Para aquisição de sinais oriundo das falhas aplicadas, foram utilizados três transdutores piezoelétricos fixados à carcaça do transformador com auxílio de vaselina, sendo dois posicionados diagonalmente na parte frontal e um na parte traseira esquerda da máquina elétrica, tomando como parte frontal a vista dos terminais de baixa tensão da máquina, conforme Figura 4. Fitas foram utilizadas para garantir que os transdutores não se movessem durante os testes.

Figura 3 – Sensores HFCTs e transformador utilizado no teste.

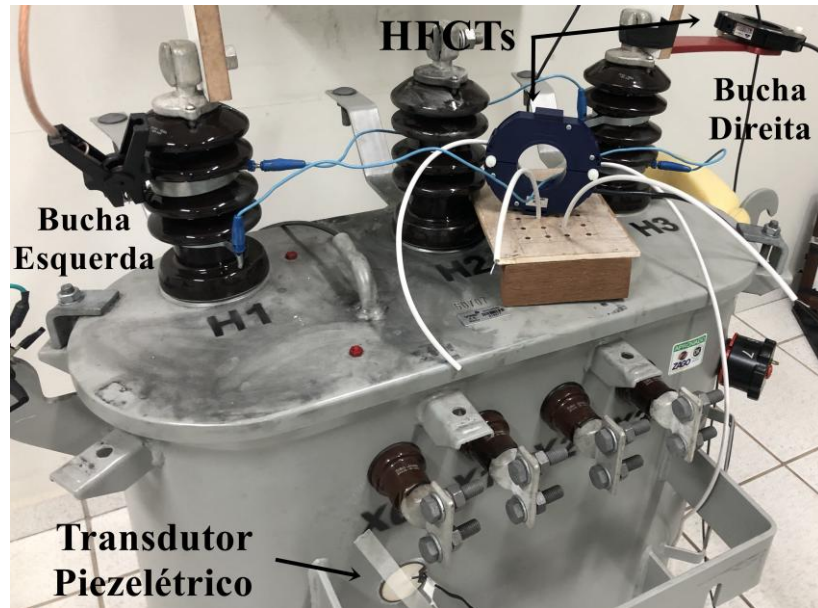
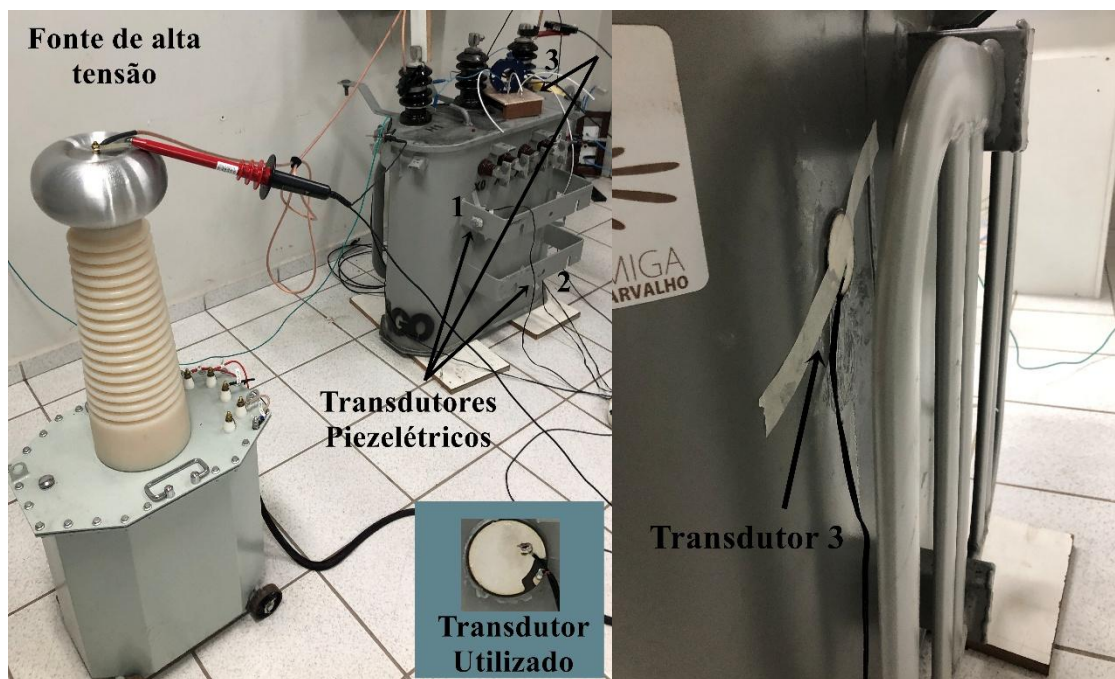


Figura 4 – Detalhes do experimento e dos transdutores piezelétricos.



Os transdutores utilizados possuem ressonância em 50 kHz e são similares aos utilizados no estudo de Barreto (2023). A aquisição dos sinais acústicos captados pelos transdutores piezoelétricos foi realizada por um osciloscópio digital Yokogawa 850DL ajustado para uma frequência de amostragem de 100 MHz. Essa faixa de frequência foi escolhida pois,

concomitante à aquisição dos sensores piezelétricos foi realizada a aquisição de dados dos HFCTs cuja resposta em frequência é de até 50 MHz. Finalmente, os dados foram transferidos para um computador pessoal e o processamento dos sinais foi realizado utilizando o software MATLAB®.

Para o diagnóstico das falhas, uma média de 15 ensaios foram realizados para cada um dos casos estudados. Após a aquisição dos sinais oriundos dos transdutores, foram aplicadas três técnicas de processamento de sinais: a primeira, baseada na Transformada de Hilbert (TH), a segunda, baseada na Transformada Wavelet Discreta (TWD) e, por fim, a STFT.

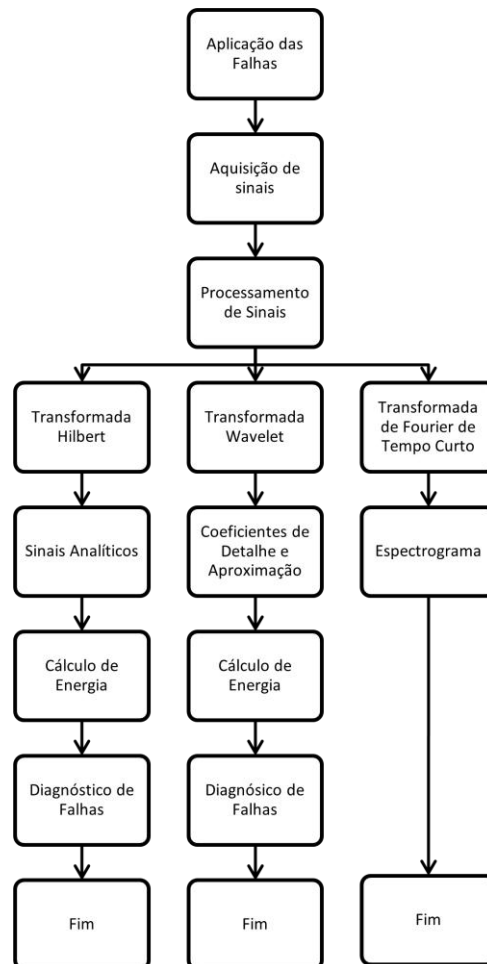
A TH forneceu um sinal analítico, e deste sinal analítico foi extraído a energia de envelope. Após isso, os resultados foram dispostos em gráficos tridimensionais para o agrupamento de dados, considerando as energias dos envelopes dos sinais dos transdutores 1, 2 e 3. Os gráficos tridimensionais foram realizados da seguinte maneira: cada eixo representou a energia do envelope do sinal analítico obtido pela TH do sinal adquirido de cada sensor piezoelétrico. Portanto, cada ponto no plano cartesiano tridimensional tem como coordenadas a energia do envelope de cada transdutor produzido por uma descarga parcial.

A segunda técnica proposta se baseou na TWD. Do mesmo modo que a TH, a TWD foi empregada para cada um dos sinais oriundos dos sensores de emissão acústica. A análise Wavelet foi realizada pela extração da energia dos coeficientes de detalhe e aproximação. A Wavelet mãe escolhida foi a Daubechies, uma vez que não apresenta descontinuidade em sua função. Nesta técnica foram obtidos 9 níveis de aproximação e 9 níveis de detalhe. Após isso, os resultados foram dispostos em gráficos tridimensionais e foi realizado o seguinte procedimento: cada eixo do gráfico representa a energia do respectivo nível Wavelet obtido.

A terceira técnica proposta se baseia na STFT. O procedimento aplicado seguiu o mesmo princípio das técnicas anteriores com uma única diferença: ao invés de se realizar gráficos tridimensionais, os resultados obtidos foram apresentados na forma de espectrogramas com o intuito de se analisar as diferenças de amplitude e frequência entre as falhas. Para essa

transformada foi utilizado comando no Matlab® com janela Kaiser de 1024 pontos com sobreposição de 256. O fluxograma apresentado na Figura 5 resume as análises de processamento digital de sinais utilizadas neste projeto de pós-doutorado.

Figura 5 – Fluxograma da análise de processamento de sinais.



4. Resultados e Discussão

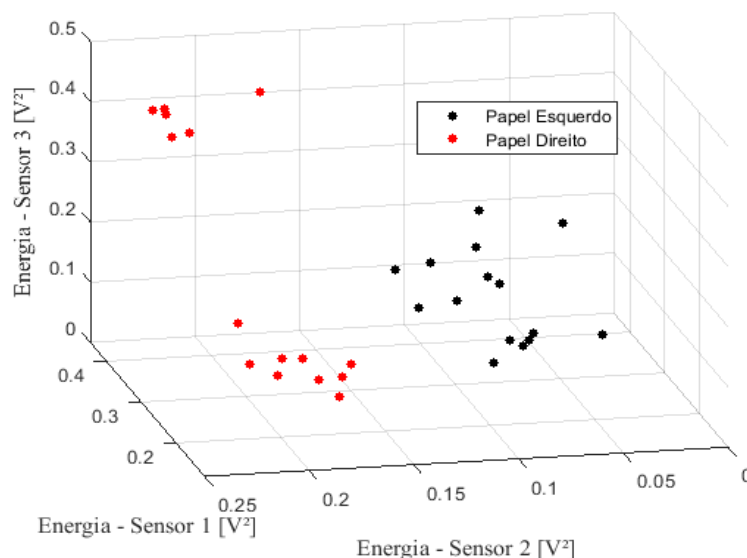
Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais obtidos mediante as técnicas de processamento digital de sinais aplicadas. Como os transdutores piezelétricos foram utilizados como sensores acústicos, os transdutores 1, 2 e 3 foram renomeados para sensor 1, sensor 2 e sensor 3 para a apresentação dos resultados.

4.1 Transformada Hilbert aplicada ao diagnóstico de falhas

Com o intuito de realizar o diagnóstico dos dois tipos de falhas estudadas, emulou-se ambas as falhas conforme descritas anteriormente. Os sinais acústicos foram processados e,

pela aplicação da Transformada Hilbert, obteve-se o sinal analítico. Deste sinal analítico, calculou-se a energia do envelope e, cada energia oriunda de cada um dos sensores foi disposta como uma coordenada do plano cartesiano. Assim, cada ponto representa dados oriundos de uma descarga parcial. A Figura 6 apresenta a comparação entre as falhas isoladas no papel posicionadas na parte superior direita e inferior esquerda do transformador.

Figura 6 – Descargas parciais isoladas em papel – Transformada Hilbert (TH).

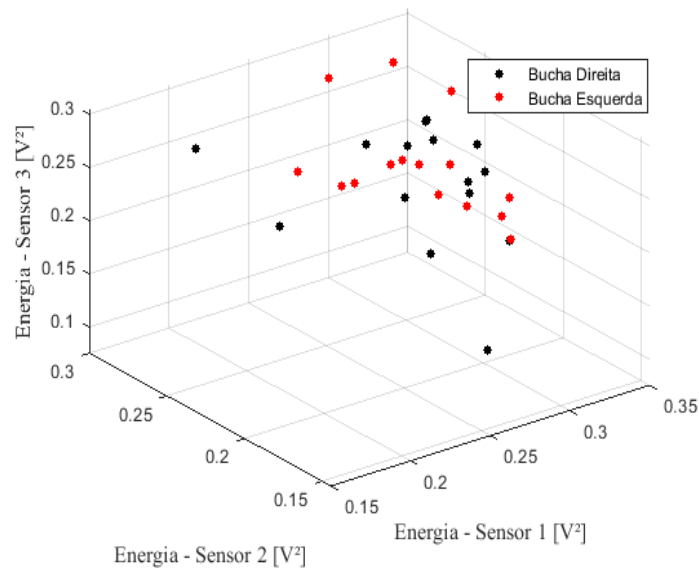


Pela análise da Figura 6, é possível observar que houve um comportamento de agrupamento entre as falhas isoladas no papel posicionadas na parte direita e esquerda do Transformador de Potência. Além disso, o comportamento proporcionou a identificação e a quantificação da falha, quando aplicada de forma isolada.

Para a segunda falha estudada (descargas na bucha) esta técnica não obteve o mesmo êxito, conforme se observa na Figura 7. Quando se realiza a comparação das falhas isoladas nas buchas direita e esquerda do transformador, a técnica não mostra nenhum comportamento de clusterização, impossibilitando a quantificação da falha. Por outro lado, constata-se que, pelo fato de possuírem a mesma origem, os dados apresentaram mesmo padrão. Uma outra possibilidade para este resultado é que as buchas e os sensores foram posicionados equidistantemente entre si, abrindo a possibilidade de investigar se o aumento do número de sensores ou o acoplamento de sensores na tampa do transformador pode melhorar a separação

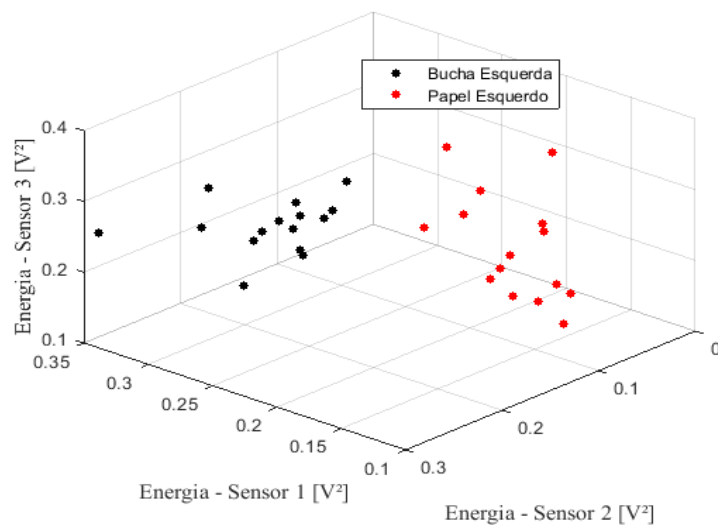
entre falhas.

Figura 7 – Descargas parciais isoladas em bucha – TH.



A Figura 8 apresenta a comparação entre as falhas isoladas na bucha esquerda e papel esquerdo.

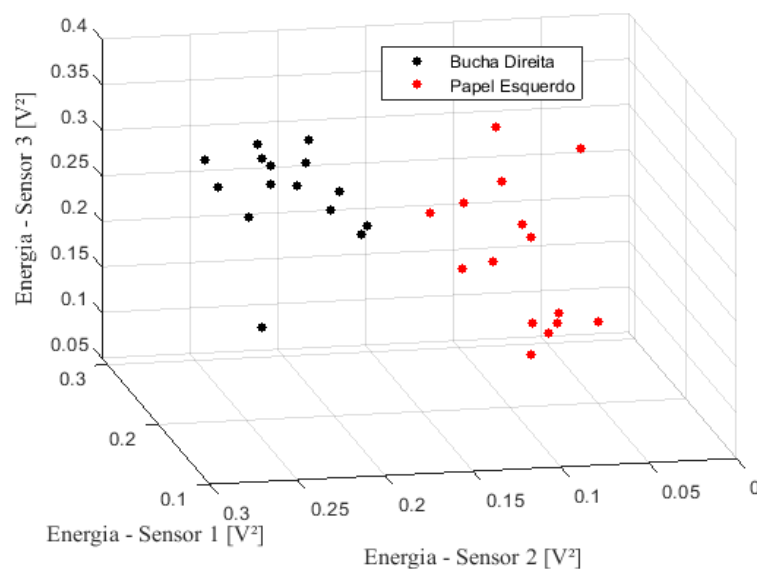
Figura 8 – Descargas parciais isoladas na bucha esquerda e papel esquerdo – TH.



Neste mesmo cenário, quando se compara as falhas isoladas entre as buchas e o papel, é possível notar que há a possibilidade da identificação e quantificação das falhas, uma vez que se observa duas regiões bem definidas.

A Figura 9 apresenta o comportamento da energia do envelope do sinal quando se compara a falha gerada na bucha direita e papel esquerdo.

Figura 9 – Descargas parciais isoladas na bucha direita e papel esquerdo – TH.



Mediante a análise da Figura 9, é possível diferenciar as descargas isoladas na bucha direita e papel esquerdo tendo em vista que os padrões de pontos externaram duas regiões bem definidas.

A Figura 10 apresenta a comparação das falhas isoladas na bucha esquerda e papel direito e a Figura 11 apresenta a comparação entre as falhas isoladas na bucha direita e papel direito.

Figura 10 – Descargas parciais isoladas na bucha esquerda e papel direito – TH.

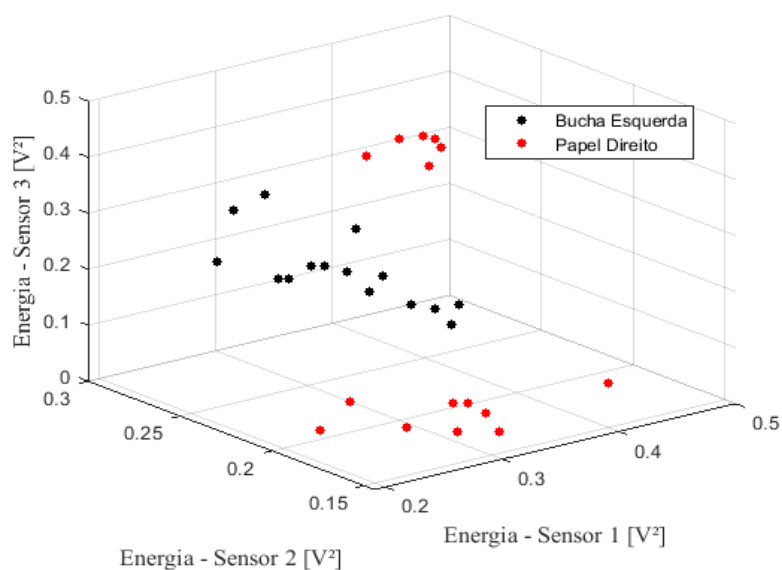
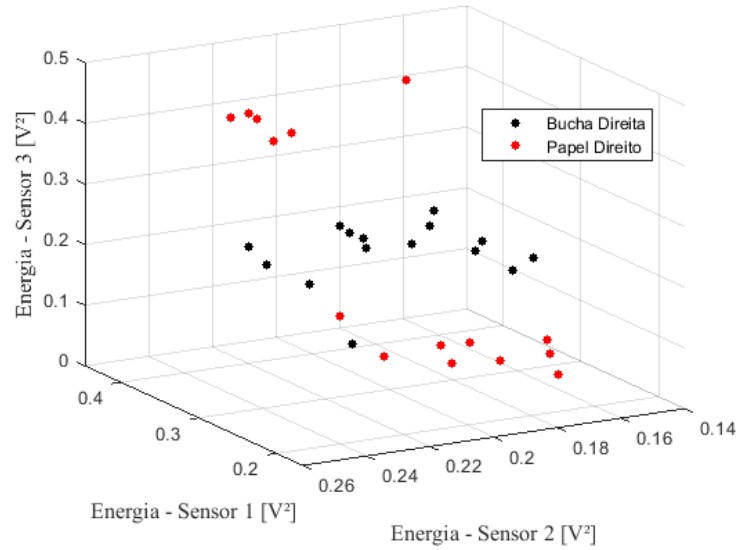


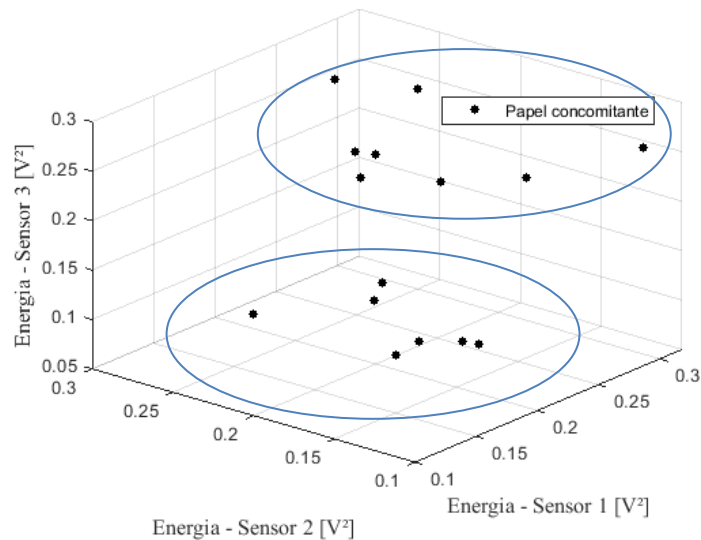
Figura 11 – Descargas parciais isoladas na bucha direita e papel direito – TH.



Tanto a Figura 10 quanto a Figura 11 apresentam um comportamento que não permite o correto diagnóstico entre as falhas uma vez que não é permitido a visualização de duas regiões bem definidas. Observa-se que os pontos apresentaram sobreposição para ambos os casos.

Com isso, este estudo analisou o comportamento dos sinais oriundos da energia do envelope quando a falha no papel ocorre concomitantemente entre os dois eletrodos. A Figura 12 apresenta este resultado.

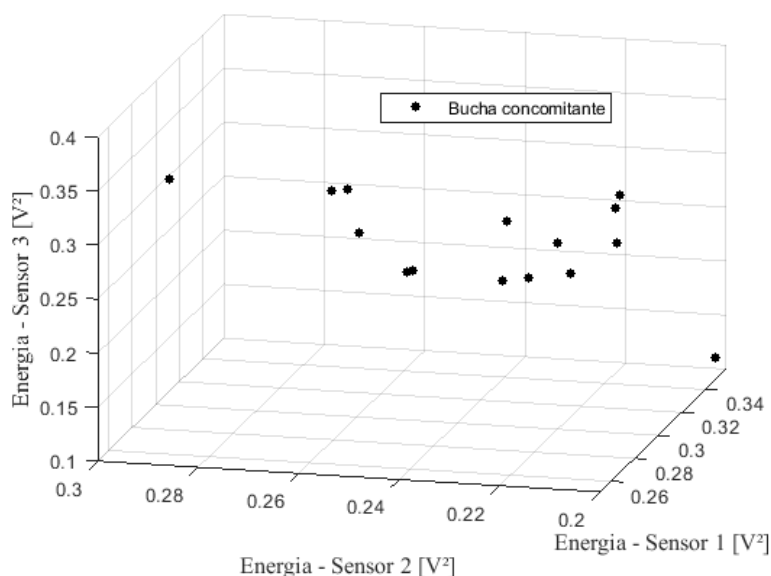
Figura 12 – Diagnóstico das falhas no papel ocorrendo de forma concomitante – TH.



Nota-se, pela análise da Figura 12, que há um comportamento de agrupamento, mesmo que não se conheça qual falha é relacionada a qual posição (direita ou esquerda). Observa-se pontos agrupados conforme destacado na figura.

Embora eficaz para o papel, o método não foi eficaz na identificação e quantificação das duas falhas ocorrendo de forma concomitante nas buchas do transformador, demonstrado pela Figura 13.

Figura 13 – Diagnóstico das falhas nas buchas ocorrendo de forma concomitante – TH.

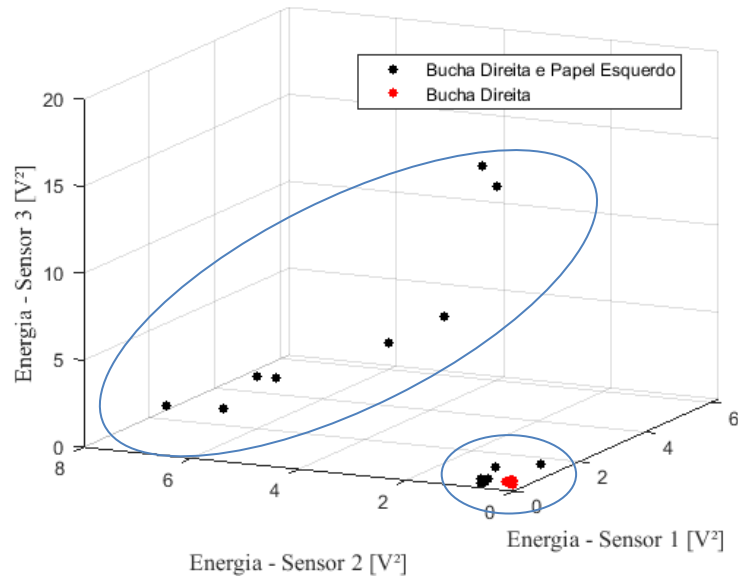


Conforme discutido previamente, uma possibilidade para este resultado é que as buchas e os sensores foram posicionados equidistantemente entre si, o que abre possibilidade de investigar se o aumento do número de sensores ou o acoplamento de sensores na tampa do transformador pode melhorar a separação entre falhas.

Na Figura 14 apresenta-se os resultados observados quando a bucha direita e o papel esquerdo ocorrem de forma concomitante. Os pontos de cor preta representam este resultado. Para este caso, observa-se que foram formadas duas regiões entre os pontos de cor preta, o que pode estar relacionado ao número de falhas impostas ao transformador. Para validar o resultado, os pontos extraídos do teste em que somente a bucha direita gerou a falha de forma isolada foram ilustrados conjuntamente e indicados pelos pontos de cor vermelha no mesmo gráfico. Pelo resultado, observa-se que os pontos cuja energia dos sensores 1 e 2 ficaram entre 0 e 2 V^2 se aproximaram do padrão da descarga parcial de forma isolada, representam sinais predominantemente relativos às descargas em bucha e, os outros pontos, podem estar

relacionados predominantemente às descargas no papel.

Figura 14 – Diagnóstico das falhas na bucha direita e papel esquerdo comparado com a falha isolada na bucha direita – TH.

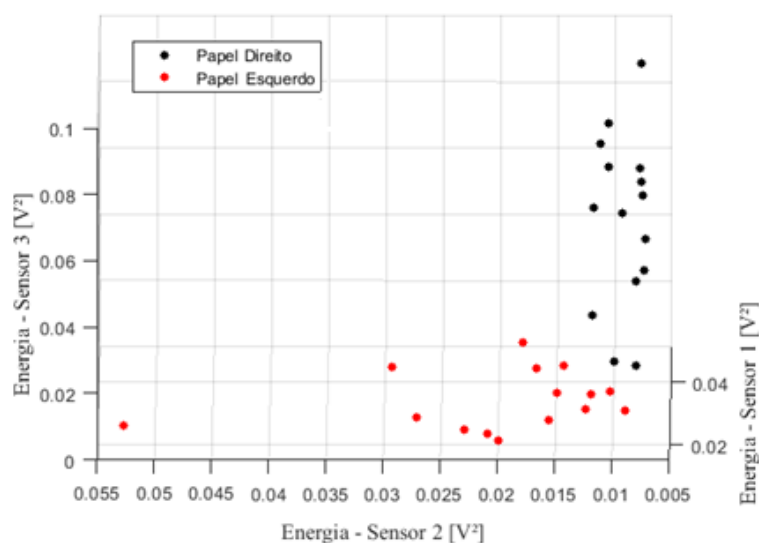


4.2 Transformada Wavelet aplicada ao diagnóstico de falhas

Neste tópico, serão apresentados os resultados oriundos do processamento de sinais por meio da TWD. Os sinais acústicos foram processados e, pela aplicação da TWD, obteve-se os coeficientes de aproximação e detalhe. Destes coeficientes, calculou-se a energia de cada um dos 18 níveis (9 de aproximação e 9 de detalhe) e foi gerado um gráfico tridimensional, em que cada eixo representa a energia de um coeficiente Wavelet de cada um dos sensores. Foram apresentados os níveis Wavelet que externaram os melhores resultados para classificação e quantificação das falhas.

A Figura 15 apresenta a comparação das falhas isoladas no papel posicionadas na parte superior direita e inferior esquerda para o nível de aproximação 5.

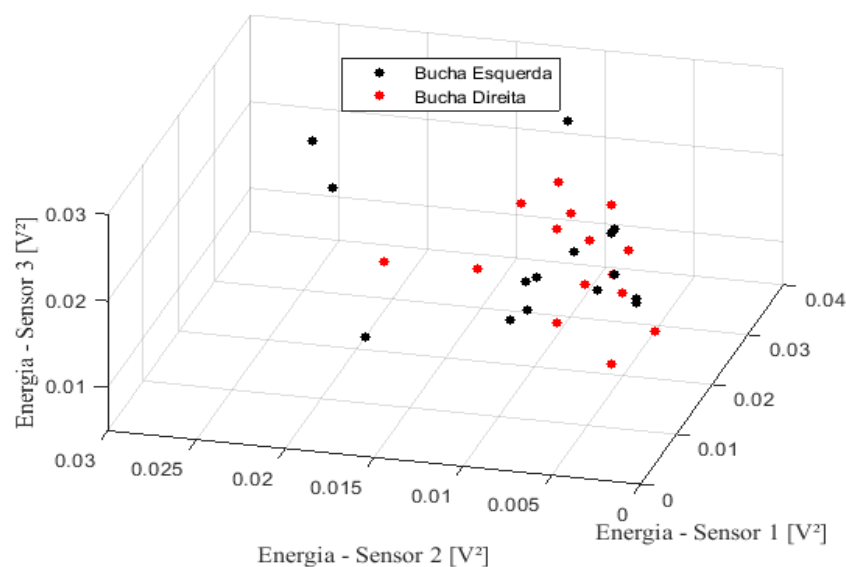
Figura 15 – Comparação das falhas isoladas no papel – TWD.



Através da análise da Figura 15, nota-se que há a identificação de qual falha isolada está acometendo a máquina elétrica e há a quantificação das falhas, tendo em vista a formação de duas regiões bem definidas representadas pelas cores vermelha e preta.

A Figura 16 apresenta os mapas gerados por pontos com as duas falhas ocorrendo de forma isoladas nas duas buchas também para o nível de aproximação 5.

Figura 16 – Descargas parciais isoladas nas buchas -TWD.



Assim como verificado na TH, quando se realiza a comparação das falhas isoladas nas buchas direita e esquerda do transformador de potência, a técnica não mostra nenhum

comportamento de clusterização, impossibilitando a quantificação da falha.

As Figuras 17, 18, 19 e 20 apresentam as falhas de papel e bucha quando ocorrem de forma isoladas mediante a análise das energias dos coeficientes de detalhe de nível 6.

Figura 17 – Comparação das falhas isoladas na bucha esquerda e papel direito -TWD.

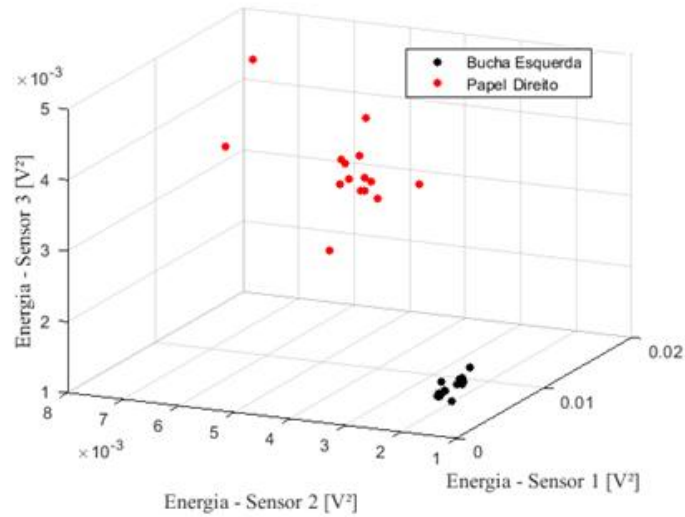


Figura 18 – Comparação das falhas isoladas na bucha esquerda e papel esquerdo -TWD.

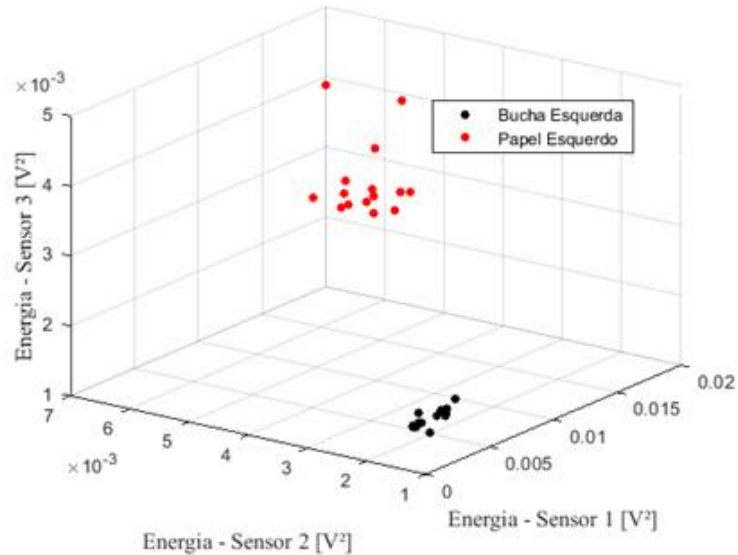


Figura 19 – Comparação das falhas isoladas na bucha direita e papel esquerdo -TWD.

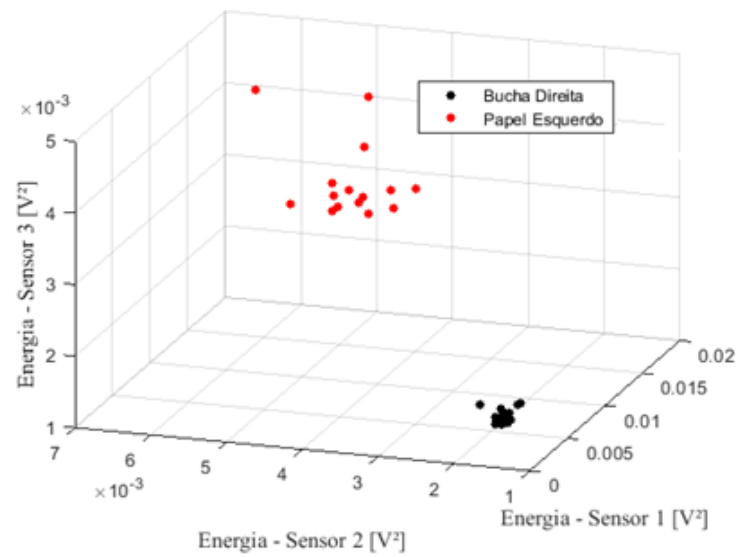
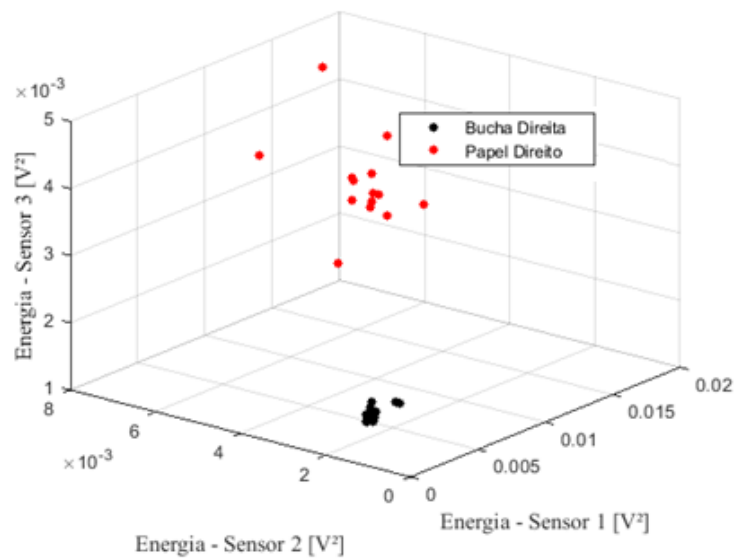


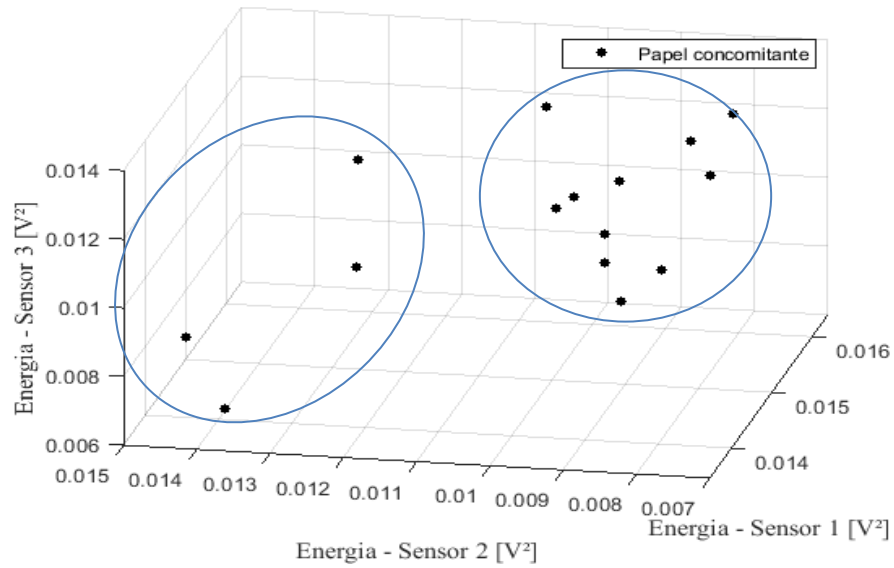
Figura 20 – Comparação das falhas isoladas na bucha direita e papel direito -TWD.



Os resultados obtidos demonstram que a TWD foi superior à análise de envoltória da TH, uma vez que, em todas as combinações de falhas foi possível observar a separação dos dados para cada tipo de falha.

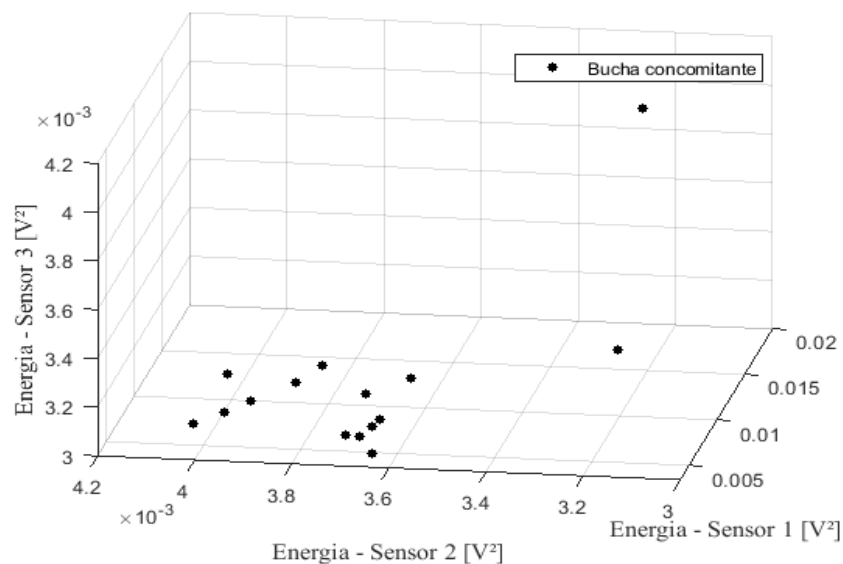
No que se relaciona às falhas em concomitância, mas de mesma origem, a TWD apresentou um comportamento semelhante à TH. Na Figura 21 é apresentada a TWD de nível de detalhe 6 para as falhas ocorrendo em concomitância nos papéis.

Figura 21 – Diagnóstico de falhas no papel ocorrendo de forma concomitante -TWD.



Observa-se a existência de pontos distintos que se concentraram entre 0,013 V² e 0,015 V² e pontos de energia entre 0,008 V² e 0,01 V² para o sensor 2. Deste modo surge a hipótese deste distanciamento estar relacionado ao número de falhas. No entanto, esse resultado deve ser confirmado em trabalhos futuros. A Figura 22 apresenta a ocorrência de falhas concomitantes nas buchas do transformador.

Figura 22 – Comparação das falhas concomitantes na bucha-TWD.



Quando se analisa as falhas nas buchas direita e esquerda ocorrendo concomitantemente, a TWD não permitiu um diagnóstico eficaz, uma vez que não foi possível a identificação e quantificação das falhas assim como ocorreu com a transformada Hilbert.

No contexto das falhas diferentes (bucha e papel) em concomitância a TWD não foi eficaz em diagnosticar o número de falhas pois os pontos não apresentaram padrões relacionados com a quantidade de falhas impostas ao transformador. Neste contexto, a TH teve melhor eficácia que a TWD.

4.3 STFT aplicada ao diagnóstico de falhas

As Figuras 23, 24 e 25 ilustram, para cada sensor, os espectrogramas gerados pela STFT para cada cenário de falha de mesma origem.

Observa-se que, de forma geral, os três sensores apresentaram padrões diferentes entre si. Considerando o intervalo de tempo analisado, para todos os casos, vários pulsos acústicos de descargas parciais foram constatados tendo em vista as frequências apresentadas ao longo do tempo. Por exemplo, para o sensor 1 a ocorrência de descargas parciais tanto no papel quanto na bucha, sendo elas concomitantes ou não, estão caracterizadas em frequências na ordem de até 40 kHz, apresentando picos próximos a 50 kHz, 100 kHz, 150 kHz e 300 kHz. Já para o sensor 2, as faixas de mais significativas foram, para todos os casos, frequências próximas a 50 kHz, entre 100 kHz e 150 kHz e em 300 kHz. Para o sensor 3, as falhas isoladas no papel apresentaram frequências anteriores a 40 kHz e próximas de 50 kHz. Observa-se, para as buchas, faixas em baixa frequência, picos em 50 kHz e uma leve discrepância das amplitudes na faixa de 150 kHz e 300 kHz. Tais diferenças entre os sensores podem estar relacionados à posição e a sensibilidade própria de cada sensor. No mais, torna-se plausível um estudo futuro sobre a influência do tipo de janelamento e das configurações de cálculo da STFT com intuito de melhorar a resolução tempo-frequência da transformada, ou estabelecer a transformada como entrada de sistemas inteligentes objetivando o aprimoramento dos resultados.

Figura 23 – Espectrograma do sensor 1 para sinais de descargas isoladas em papel ao lado direito (a), esquerdo (b), isoladas nas buchas do lado direito (c), esquerdo (d), descargas em concomitância nos papéis (e) e nas buchas (f).

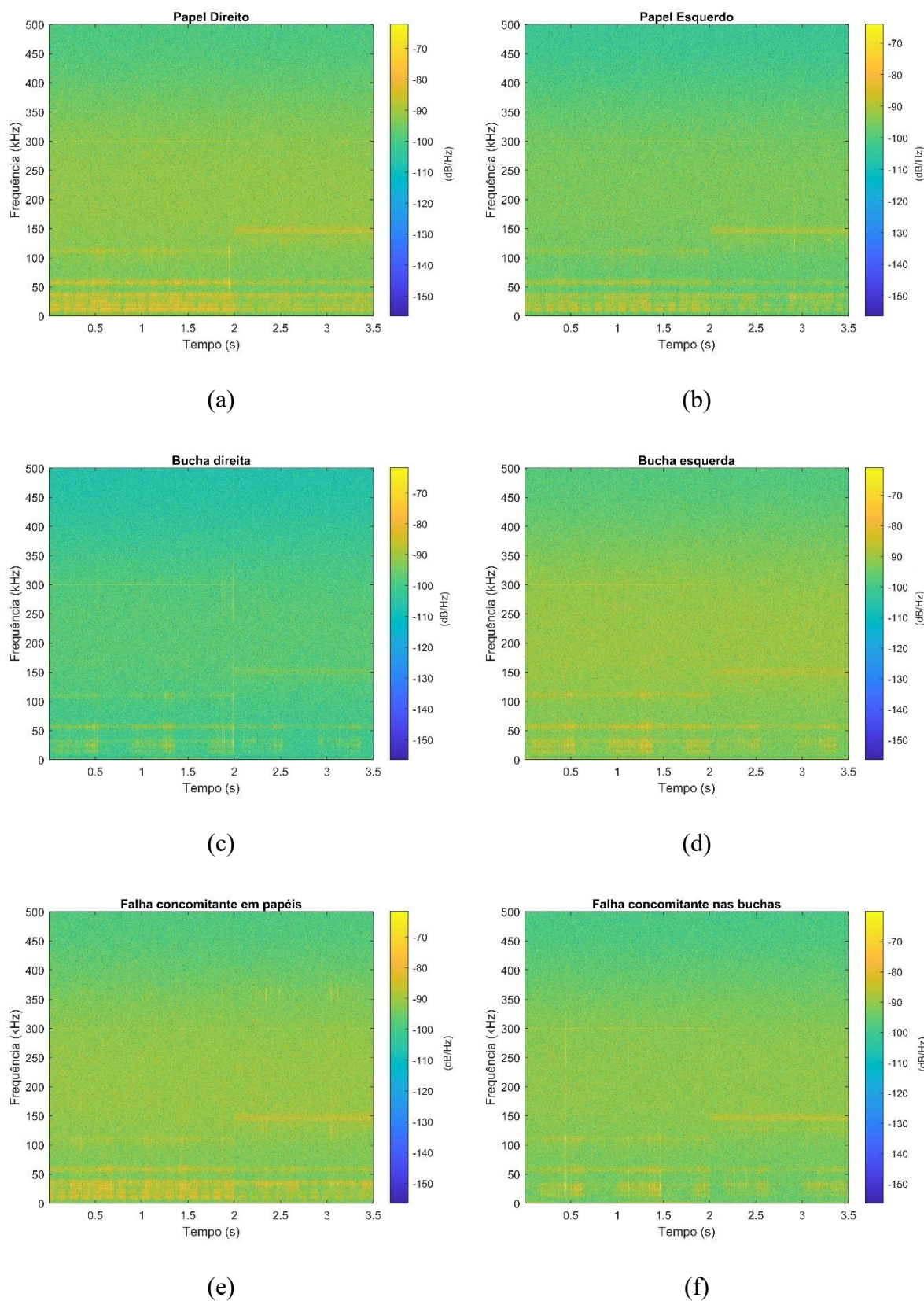


Figura 24 – Espectrograma do sensor 2 para sinais de descargas isoladas em papel ao lado direito (a), esquerdo (b), isoladas nas buchas do lado direito (c), esquerdo (d), descargas em concomitância nos papéis (e) e nas buchas (f).

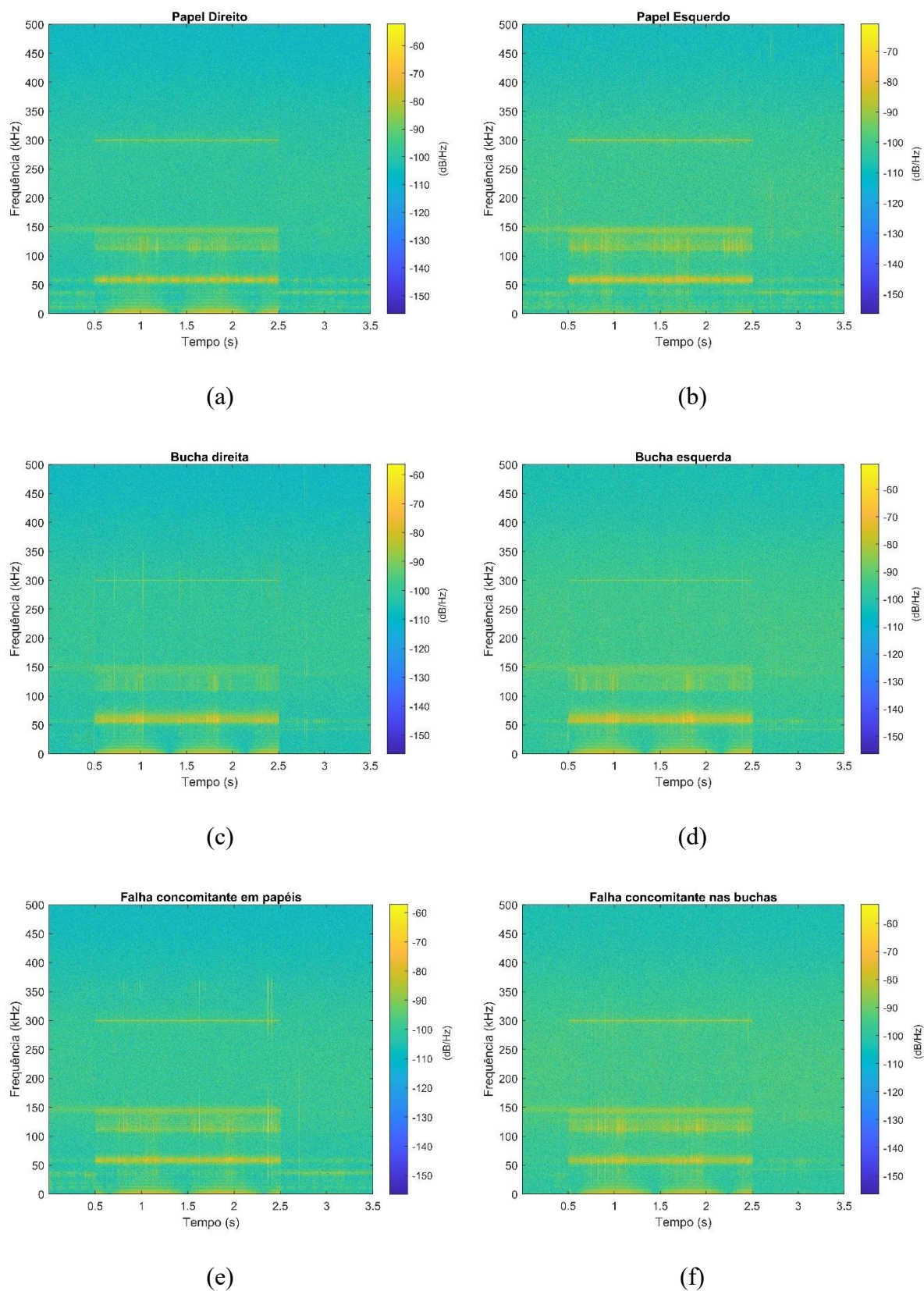
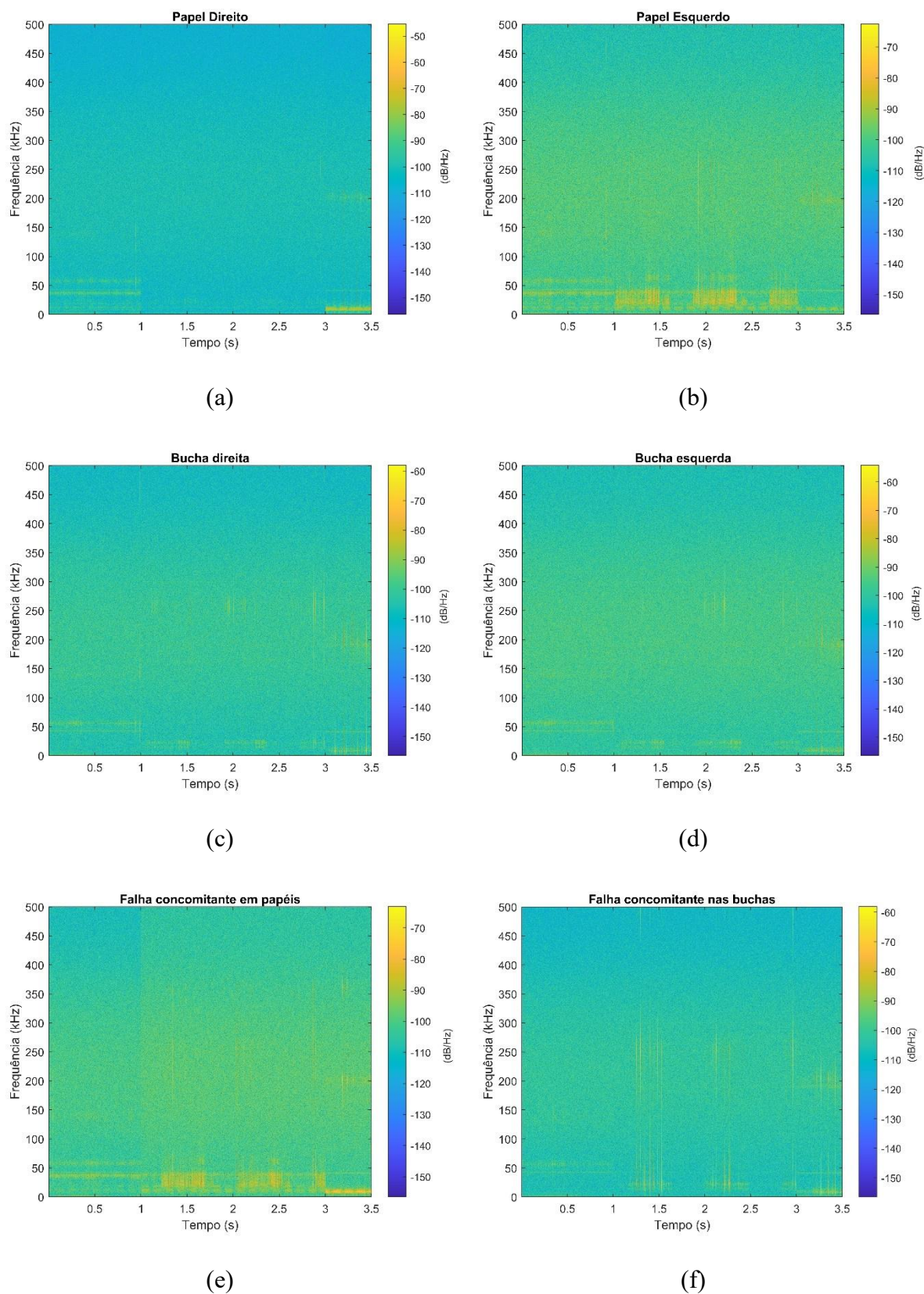
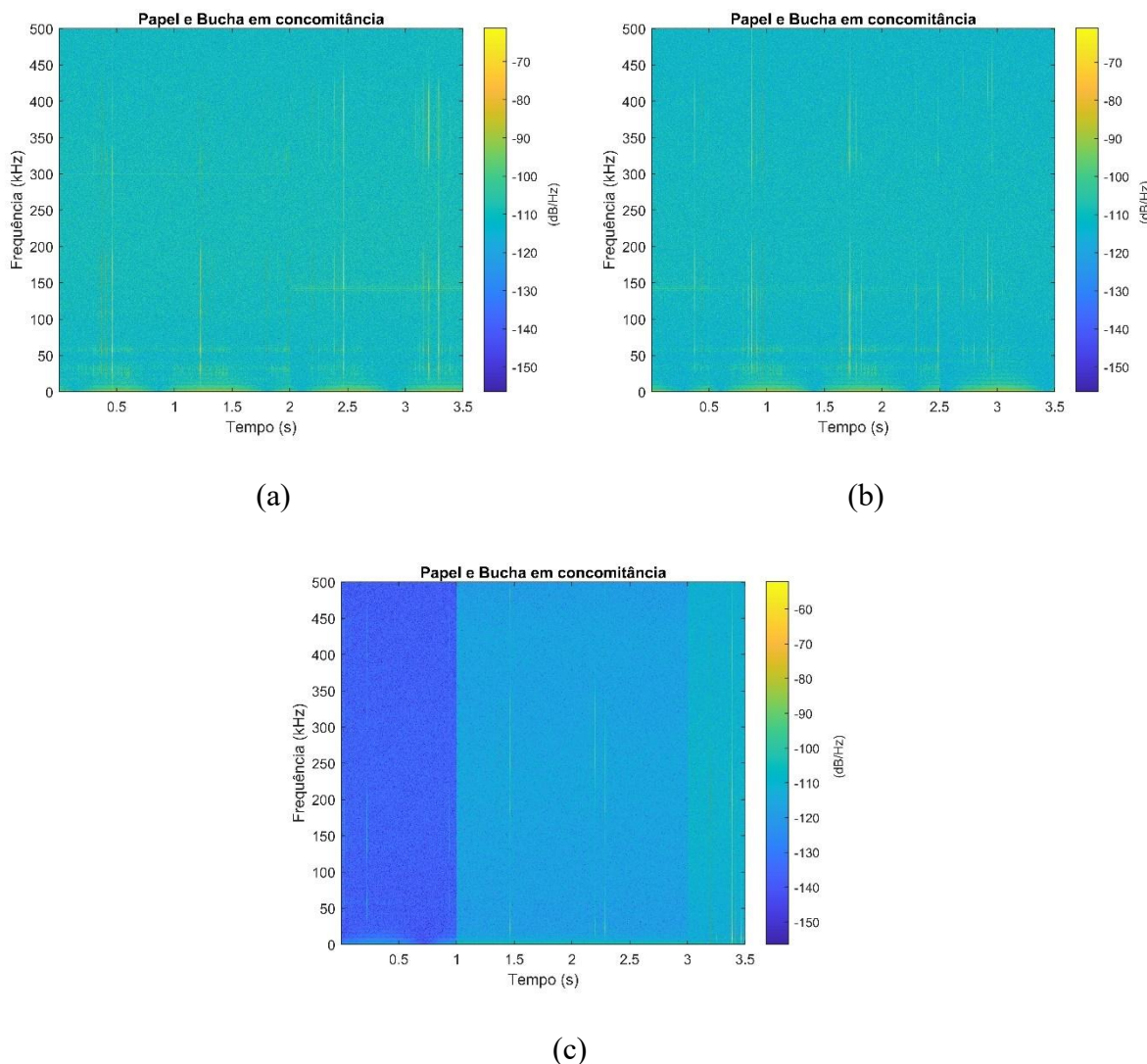


Figura 25 – Espectrograma do sensor 3 para sinais de descargas isoladas em papel ao lado direito (a), esquerdo (b), isoladas nas buchas do lado direito (c), esquerdo (d), descargas em concomitância nos papéis (e) e nas buchas (f).



Na Figura 26 são ilustrados os sinais para descargas em papel ocorrendo de forma concomitante às buchas.

Figura 26 – Espectrogramas dos sensores 1 (a), 2 (b) e 3 (c) para descargas parciais ocorrendo de forma concomitante no papel esquerdo e na bucha direita.



Observa-se que, para o caso estudado, a STFT não foi eficiente em diferenciar as falhas isoladas. Por outro lado, o padrão espectral se alterou quando as duas falhas foram aplicadas de forma concomitante.

Pela análise gráfica, observa-se que, quando os dois tipos de falhas tiveram atividade conjunta, as frequências produziram bandas maiores que perduraram, aproximadamente, de 20 kHz a 200 kHz e de 250 kHz a 400 kHz para os três sensores.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou o estudo da quantificação de descargas parciais em transformadores por meio da aplicação de técnicas de processamento de sinais baseados em Transformada Hilbert (TH), Transformada Wavelet Discreta (TWD) e Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT). Com base nos resultados obtidos, para falhas que ocorreram de forma isolada, a TH e TWD demonstraram promissoras para a classificação e quantificação. Entretanto, quando duas falhas de topologias distintas foram inseridas em concomitância, a TH se demonstrou mais eficaz em relação às outras abordagens. No caso dos resultados apresentados pela STFT, embora o padrão da transformada não tenha mudado com falhas as isoladas, observou-se alterações quando as falhas de tipos diferentes foram colocadas em concomitância. Esse relatório de pós-doutoramento se deu como um estudo preliminar de técnicas de quantificação do número de falhas em transformadores abrindo, para trabalhos futuros, sua validação e aprimoramentos que possam envolver: estudo da variação do número de sensores, estudo de outras técnicas de processamento de sinais para quantificação das fontes de descargas, aumento do número de fontes de descargas parciais e reavaliação das técnicas apresentadas, aplicação de sistemas inteligentes para melhoria dos resultados, dentre outros.

6. Atividades de Ensino e Extensão

O pós-doutorando atuou de forma concomitante como professor substituto no Departamento de Engenharia Elétrica, com uma carga horária semanal de 8 horas. As disciplinas ministradas incluíram: Eletromagnetismo I, Eletromagnetismo II, Eletricidade Básica e Laboratório de Sistemas de Controle. Além disso, a participação na extensão ocorreu por meio do projeto “Treinamento e Capacitação de Eletricista – Sisproec 521”, onde o pós-doutorando contribuiu na revisão e adequação dos materiais didáticos do curso.

7. Lista de Publicações

O pós-doutorando contribuiu com os seguintes trabalhos do grupo de pesquisa, sendo um publicado e outro sob avaliação:

KHOURY FILHO, A. Y.; GOUVEA, J. P.; ROCHA, M. A.; ALVES, A. F.; ANDREOLI, A. L.; CASTRO, B. A. Fault Classification in Power Transformers by High Frequency Current Sensors and Wavelet Transform. XV CLAGTEE, Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, 2024. Obs.: artigo publicado

CASTRO, E. O. A.; KHOURY FILHO, A. Y.; FRAGA, R; C. P; ROCHA, M. A.; CASTRO, B. A. Influence of External Noise on Transformer Fault Classification by Acoustic Emission: A Preliminary Study. 16th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2025. Obs.: artigo aceito para publicação.

8. Comentários do Supervisor

O relatório apresentado pelo Dr. Marco Aurélio Rocha está bem estruturado e redigido. Se refere ao período de 1 ano de estágio de pós-doutoramento realizado sem financiamento interno ou externo e apresenta resultados preliminares sobre o uso de sensores acústicos na categorização e quantificação de falhas em transformadores. Três transformadas foram aplicadas visando atingir os objetivos propostos. O supervisionado também estudou a quantificação das falhas quando ocorrem de forma concomitante, um desafio de grande significância para área de pesquisa. Nesse contexto, o pós-doutorando cumpriu devidamente as atividades propostas. Tal pesquisa também abre a possibilidade de aprimoramento futuro dos métodos estudados e dos resultados apresentados aqui. Cabe destacar que o pós-doutorando também atuou como docente do Departamento de Engenharia Elétrica e participou de Projeto de Extensão.

9. Referências

ABDI, S.; HARID, N.; Comprehensive Assessment of Transformer Oil After Thermal Aging: Modeling for Simultaneous Evaluation of Electrical and Chemical Characteristics. *Energies*, Basel, v. 18, n. 8, p. 1915, abr. 2025.

ABU-SIADA, Ahmed (ed.). *Power Transformer Condition Monitoring and Diagnosis*. IET Energy Engineering, n. 104. London: The Institution of Engineering and Technology, 2018. ISBN 978-1-78561-254-1.

ALSHALAWI, A. H.; AL-ISMAIL, F. S. Partial discharge detection based on ultrasound using optimized deep learning approach. IEEE access: practical innovations, open solutions, v. 12, p. 5151–5162, 2024.

BARRETO, G. K. I. m estudo comparativo sobre a influência da temperatura em transdutores piezelétricos aplicados ao diagnóstico de falhas em transformadores por meio de emissão acústica. 2023. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2023.

BOUZIDA, A. et al. Fault diagnosis in industrial induction machines through discrete wavelet transform. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v.58, n. 9, p. 4385-4395. 2011.

CASTRO, B. A. et al. New Algorithm Applied to Transformers' Failures Detection Based on Karhunen–Loève Transform. IEEE Transactions on Industrial Informatics, v. 19, n. 11, p. 10883-10891, 2023.

CHERIF, H. et al. Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor. Energy, Elsevier BV, v. 212, p. 118684, dez. 2020.

FENG, Y.; LI, J.; XU, G.; YANG, D.; ZHANG, X. Research on the characteristics of partial discharge gas generation in typical defects of oil immersed current transformers. Heliyon, v. 10, n. 21, e38558, set. 2024.

IEC 60270. High voltage test techniques – Partial discharge measurements. 2000.

IEC 60599. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. 2015

KOLTUNOWICZ, Tomasz N. Dielectric Insulation in Medium-and High-Voltage Power Equipment—Degradation and Failure Mechanism, Diagnostics, and Electrical Parameters Improvement. Energies, v. 17, n. 11, p. 2704, 2024.

KONAR, P.; CHATTOPADHYAY, P. Multi-class fault diagnosis of induction motor using hilbert and wavelet transform. Applied Soft Computing, Elsevier BV, v. 30, p. 341–352, maio 2015.

KUMAR, R. et al. A condition monitoring and fault detection in the windings of power transformer using impulse frequency response analysis. International Journal of System Assurance Engineering and Management, p. 1-13, 2022.

KUMARESAN, Ramdas; RAO, Ashwin. Model-based approach to envelope and positive instantaneous frequency estimation of signals with speech applications. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 105, n. 3, p. 1912-1924, 1999.

LIU, Xinzhi et al. A complex neural network model by Hilbert Transform. Pattern Recognition Letters, v. 186, p. 113-118, 2024.

MAO, Y. et al. Research on partial discharge detection technology for power transformers. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2020.

MEITEI, S. N. Partial discharge detection using piezoelectric sensors on power transformer: A review. IEEE Sensors Journal, v. 24, n. 9, p. 13730-13742, 2024.

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

OLIVEIRA, H. M. Análise de sinais para engenheiros: uma abordagem via wavelets. 1. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2007. 268 p. ISBN 978-8574522838

OPPENHEIM ALAN E SCHAFER, R. W. Processamento em tempo discreto de sinais. 3. Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013. ISBN 978-8581431024.

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

RIVAS, Jannery et al. Separation Maps for Classification of Multiple Partial Discharges: A Comparative Study Focusing on Time and Frequency Characteristics. High Voltage, 2025.

ROCHA, M. A. Identificação e classificação de curto entre espiras e desbalanço de tensão em motores de indução trifásicos utilizando sensores de corrente, emissão acústica e vibração com emprego de transformada Hilbert e transformada Wavelet. 2022. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2022.

SCHIEWALDT, K. Técnicas de Processamento de Sinais Aplicadas a Separação de Dados e Análise em Frequência de Sinais UHF Emitidos por Falhas de Transformadores. 2024. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2024.

ZHANG, X. et al. A novel partial discharge detection method for power transformers on site adopting its component as ultra-high frequency sensor. IEEE transactions on power delivery, v. 34, n. 6, p. 2269–2271, 2019.

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