UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Sensoriamento UHF Baseado em RTL-SDR para Diagnóstico e Classificação de Falhas em Transformadores

Abdo Youssif Khoury Filho

Bauru
2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"Sensoriamento UHF Baseado em RTL-SDR para Diagnóstico e Classificação de Falhas em Transformadores"

ABDO YOUSSIF KHOURY FILHO

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

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

Bauru
2025

Khoury Filho, Abdo Youssif.
Sensoriamento UHF Baseado em RTL-SDR para Diagnóstico e Classificação de Falhas em Transformadores / Abdo Youssif Khoury Filho, 2025
126 p.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro

Coorientador: Prof. Dr. Jorge Alfredo Ardila-Rey

Dissertação (Mestrado)– Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2025

1. Descargas parciais. 2. Descargas totais. 3. Monitoramento UHF. 4. Dispositivos SDR. 5. Diagnóstico de falhas. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE ABDO YOUSSIF KHOURY FILHO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de agosto do ano de 2025, às 8h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de ABDO YOUSSIF KHOURY FILHO, intitulada **SENSORIAMENTO UHF BASEADO EM RTL-SDR PARA DIAGNÓSTICO E CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES** . A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. DANILO HERNANE SPATTI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Sistemas de Computação / Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP, Prof. Dr. MARCELO NICOLETTI FRANCHIN (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final:_ _ _ _ aprovado _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO

Documento assinado digitalmente
gov.br BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO
Data: 06/08/2025 11:05:10-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

A operação adequada dos transformadores de potência está diretamente ligada à qualidade do fornecimento de energia e a vida útil dos equipamentos conectados à rede de energia elétrica de um país. A identificação e a classificação de falhas em estágios iniciais, como as descargas parciais, que podem acelerar a degradação do sistema de isolação dessas máquinas elétricas, minimizam a possibilidade da ocorrência de interrupções abruptas no fornecimento de energia elétrica, protegendo a economia e a confiabilidade do sistema para os usuários. O diagnóstico de falhas em transformadores por meio do método UHF (em inglês, *ultra-high frequency*) tem se mostrado promissor em comparação a outros métodos, pois permite a detecção precoce de falhas incipientes, como descargas parciais e arcos elétricos (também conhecidas como descargas totais), sem a necessidade de contato direto com o equipamento energizado. No entanto, os dispositivos de aquisição de dados exigem altas taxas de amostragem, o que aumenta significativamente o custo do sistema. Com base nesse contexto, o impacto potencial desta pesquisa é desenvolver um método de diagnóstico e classificação de falhas em transformadores de potência por meio de sinais UHF utilizando dispositivos SDR (em inglês, *software-defined radio*) de baixo custo. A implementação de um sistema de detecção de falhas por método UHF mais acessível contribui para a criação de medidas preventivas contra o colapso total desses equipamentos, mitigando assim os impactos socioeconômicos decorrentes da evolução dessas falhas.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The proper operation of power transformers is directly linked to the quality of the energy supply and the lifespan of the equipment connected to a country's electrical grid. Identifying and classifying failures at early stages, such as partial discharges, which can accelerate the degradation of the insulation system of these electrical machines, minimizes the possibility of abrupt power supply interruptions, protecting the economy and the reliability of users to the power system. Fault diagnosis in transformers using the UHF (Ultra-High Frequency) method has shown promise compared to other methods, as it allows early detection of incipient faults, such as partial discharges and electrical arcing (also referred to as total discharges), without the need for direct contact with the energized equipment. However, data acquisition devices require high sampling rates, significantly increasing the system's cost. Based on this context, the potential impact of this research is to develop a fault diagnosis and classification method for power transformers through UHF signals using low-cost SDR (Software-Defined Radio) devices. The implementation of a more affordable UHF method fault detection system contributes to creating preventive measures against the potential total collapse of these devices, thus mitigating the socioeconomic impacts resulting from the progression of these faults.

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe e ao meu falecido pai, que sempre me apoiaram independentemente das circunstâncias, e a todos os amigos que me ajudaram e incentivaram a chegar até aqui, e também ao meu orientador, por todo o apoio e orientação.

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente à minha mãe, Rita Khoury, ao meu falecido pai, Abdo Khoury, ao meu irmão, Yasser Khoury, e aos meus avós, por sempre me apoiarem e incentivarem em cada uma de minhas escolhas ao longo da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro, pela dedicação, paciência e orientação. Sua presença e compromisso foram fundamentais para o desenvolvimento e a conclusão deste mestrado. Sou profundamente grato por sua parceria, incentivo e pelas inúmeras oportunidades que me proporcionou, “incluindo a experiência de comer um "completo" no McCharly, no Chile”.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Jorge Alfredo Ardila-Rey, pelo suporte durante a pesquisa, pelo convite para conhecer seu laboratório, sua equipe no Chile, e por compartilhar seu vasto conhecimento comigo, enriquecendo minha formação acadêmica e profissional.

Ao Prof. Dr. Marcelo Nicoletti Franchin, pelo suporte e inúmeras contribuições dadas para este projeto de pesquisa.

À Faculdade de Engenharia de Bauru, pelo suporte e pelas oportunidades proporcionadas ao longo do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica. Sua infraestrutura, recursos e iniciativas foram essenciais para a construção e o aprofundamento do meu conhecimento.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Bauru, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, contribuindo significativamente para o meu crescimento pessoal e intelectual.

Aos técnicos Hélio (Dep. de Eng. Mecânica), Helton, Nelson e Osmar (Dep. de Eng. Elétrica) por compartilharem seus conhecimentos e pelo suporte durante os ensaios com os aparatos.

A todos os amigos que fiz ao longo do curso, em especial Thiago Glissoi Lopes, que me apresentou à UNESP - Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru; Tiago Forti da Silva, pelo companheirismo, conhecimento e apoio durante toda a minha trajetória na pós-graduação; e Eduardo e Nicolas, por toda a ajuda durante os ensaios realizados.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, expresso minha mais sincera gratidão.

"A invenção é 1% inspiração e 99% transpiração."

Thomas Edison

RESUMO

A qualidade no fornecimento de energia, juntamente com a vida útil de todo equipamento conectado à rede e a confiabilidade do sistema de distribuição para os usuários estão ligados diretamente à operação adequada dos transformadores de potência. Essas máquinas elétricas são responsáveis por regular os níveis de tensão do sistema de distribuição de energia do país. No entanto, a deterioração e contaminação dos elementos internos e externos do transformador, causadas pelos estresses durante sua operação contínua, defeitos oriundos da fabricação, do transporte e das intempéries, podem resultar no surgimento de falhas do tipo descargas parciais e arcos elétricos (ou descargas totais), ocasionando interrupções abruptas no fornecimento de energia e até mesmo defeitos irreparáveis em um ativo de alto custo. Com o avanço da tecnologia, várias abordagens de monitoramento foram propostas. Dentre elas, destaca-se a detecção de falhas através da análise de sinais de ondas de ultra alta frequência (em inglês, *ultra-high Frequency* - UHF), uma técnica promissora de monitoramento sem as limitações das técnicas convencionais, como a necessidade de interromper a operação do equipamento. No entanto, os dispositivos de aquisição de dados exigem altas taxas de amostragem, elevando o custo final do sistema. Dessa forma, este estudo propõe a criação de um sistema de detecção e classificação de falhas em transformadores de potência através de sinais UHF utilizando dispositivo SDR (em inglês, *software-defined radio*) de baixo custo sintonizado nas frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. O sistema foi testado com duas topologias de antena, Vivaldi e bioinspirada, em condições operacionais de: descargas parciais no isolador; descargas parciais no isolante a base de celulose; descarga total no óleo; e operação normal da máquina elétrica. Os sinais coletados foram processados utilizando três tipos de técnicas de classificação: mapas de *Power Ratio*, análise de componentes principais (em inglês, *Principal Component Analysis* – PCA), e as estatísticas *Skewness*, *Kurtosis* e valor RMS. Os resultados demonstraram que as técnicas utilizadas obtiveram êxito em detectar e classificar falhas em pelo menos três frequências. A combinação da antena de Vivaldi, do mapa *Power Ratio* e da frequência de 400 MHz apresentou melhor desempenho. Já para a antena bioinspirada, a melhor combinação foi das estatísticas valor RMS e *Skewness* na frequência de 900 MHz.

Palavras-chave: Descargas parciais, descargas totais, monitoramento UHF, dispositivos SDR, diagnóstico de falhas.

ABSTRACT

The quality of energy supply, along with the lifespan of all equipment connected to the grid and the reliability for users of the power distribution system, is directly linked to the proper operation of power transformers. These electrical machines are responsible for regulating voltage levels in the country's power distribution system. However, the deterioration and contamination of internal and external transformer components, caused by operational stress, manufacturing defects, transportation, and environmental factors, can lead to the occurrence of faults such as partial discharges and electrical arcing (also referred to as total discharges), resulting in abrupt power supply interruptions and even irreversible damage to a high-cost asset. With the advancement of technology, several monitoring approaches have been proposed. Among them, fault detection through the analysis of ultra high frequency (UHF) wave signals stands out as a promising monitoring technique without the limitations of conventional methods, such as the need to interrupt the equipment's operation. However, data acquisition devices require high sampling rates, increasing the overall system cost. Thus, this study proposes the development of a fault detection and classification system for power transformers using UHF signals with a low-cost SDR (software-defined radio) device tuned to frequencies of 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz, and 900 MHz. The system was tested with two antenna topologies, Vivaldi and bio-inspired, under operational conditions of: partial discharges in the insulator, partial discharges in the cellulose-based insulation, total discharges in oil, and normal operation of the electrical machine. The collected signals were processed using three classification techniques: Power Ratio maps, principal component analysis (PCA), and statistical features such as Skewness, Kurtosis, and RMS value. The results demonstrated that the techniques used were successful in detecting and classifying faults at least at three frequencies. The combination of the Vivaldi antenna, the Power Ratio map, and the 400 MHz frequency showed better performance. For the bioinspired antena, the best combination was RMS value and Skewness statistics at the frequency of 900 MHz.

Keywords: Partial discharges, total discharges, UHF monitoring, SDR devices, fault diagnosis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estatística de pesquisas para falhas em componentes de transformadores. (a) CIGRE (s.d, *apud* ABBASI, 2022); (b) Christina et al. (2018); (c) Sachdev e Shah (1981); (d) Moravej e Abdoos (2012); (e) IEEE (1986, *apud* ABBASI, 2022); (f) EPRI (1991, *apud* ABBASI, 2022). 27

Figura 2 - Faixas de frequência emitidas por diversas topologias de transformadores. 31

Figura 3 - Diagrama de blocos básico de um dispositivo RTL-SDR. 33

Figura 4 – Características das estatísticas: (a) Skewness; (b) Kurtosis. 40

Figura 5 – Transformador utilizado para ensaios e seus dados de placa. 42

Figura 6 – Componentes utilizados. (a) Isolador contaminado com grafite em pó; (b) Fonte de alta tensão Minipa. 43

Figura 7 – Materiais utilizados. (a) HFCT IPEC 48E; (b) Ponta de Prova A.T. Instrutherm PPA-440; (c) Osciloscópio Yokogawa DL850. 44

Figura 8 – Dispositivo RTL-SDR DVB-T+DAB+FM utilizado e sua tabela de comandos. 45

Figura 9 - Foto da configuração utilizada no ensaio com antena de Vivaldi. 46

Figura 10 - Foto da configuração utilizada no ensaio com antena bioinspirada. 46

Figura 11 – Material utilizado. (a) Antena de Vivaldi; (b) Antena bioinspirada; (c) Parâmetro S11 da Antena de Vivaldi; (d) Parâmetro S11 da Antena bioinspirada. 47

Figura 12 – Instalação interna ao transformador. (a) Antena de Vivaldi; (b) Antena bioinspirada. 48

Figura 13 – Eletrodo. (a) Eletrodo montado com discos de isolante à base de celulose; (b) Eletrodo posicionado no interior do transformador. 49

Figura 14 – Eletrodo ajustado para ensaio de descarga total. 50

Figura 15 – Exemplo do corte em frequência de um sinal de Descarga Parcial no Isolador com Antena de Vivaldi em 500 MHz. 52

Figura 16 – Exemplo da ordenação dos dados aquisitados nas tabelas de frequências. 53

Figura 17 - Fluxograma do pré-processamento dos sinais de falhas. 53

Figura 18 – Fluxogramas para cálculos: (a) Power Ratio; (b) PCA; (c) Estatística Skewness, Kurtosis e Valor RMS. 56

Figura 19 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 500 MHz de descarga parcial no isolador utilizando a antena de Vivaldi. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador. 57

Figura 20 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 500 MHz de descarga parcial no isolante à base de celulose utilizando a antena de Vivaldi. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel. 58

Figura 21 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 500 MHz de descarga total utilizando a antena de Vivaldi. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A Óleo – Ruído ambiente do Óleo. 59

Figura 22 - Sinal UHF processado para a antena de Vivaldi em 500 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolador. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador. 61

Figura 23 - Sinal UHF processado para a antena de Vivaldi em 500 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolante à base de celulose. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel. 62

Figura 24 - Sinal UHF processado para a antena de Vivaldi em 500 MHz para transformador operando em condição de descarga total. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro

de interesse após o corte em frequência. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A. Óleo – Ruído Ambiente do Óleo. 63

Figura 25 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 600 MHz de descarga parcial no isolador utilizando a antena bioinspirada. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador. 65

Figura 26 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 600 MHz de descarga parcial no isolante à base de celulose utilizando a antena bioinspirada. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel. 66

Figura 27 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 600 MHz de descarga total utilizando a antena bioinspirada. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A. Óleo – Ruído Ambiente do Óleo. 67

Figura 28 - Sinal UHF processado para a antena bioinspirada em 600 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolador. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador. 68

Figura 29 - Sinal UHF processado para a antena bioinspirada em 600 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolante à base de celulose. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel. 69

Figura 30 - Sinal UHF processado para a antena bioinspirada em 600 MHz para transformador operando em condição de descarga total. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A. Óleo – Ruído Ambiente do Óleo. 71

Figura 31 – Padrão formado pelo mapa PR para a antena de Vivaldi em 400 MHz. 73

Figura 32 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena de Vivaldi em 600 MHz. 74

Figura 33 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena de Vivaldi em 700 MHz. 75

Figura 34 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena bioinspirada em 500 MHz. 77

Figura 35 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena bioinspirada em 600 MHz. 78

Figura 36 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena bioinspirada em 700 MHz. 79

Figura 37 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 400 MHz. 81

Figura 38 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 500 MHz. 82

Figura 39 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 600 MHz. 83

Figura 40 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 700 MHz. 84

Figura 41 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 900 MHz. 85

Figura 42 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 400 MHz. 86

Figura 43 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 600 MHz. 87

Figura 44 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 700 MHz. 88

Figura 45 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 900 MHz. 89

Figura 46 – Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 400 MHz. 91

Figura 47 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 500 MHz. 92

Figura 48 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 600 MHz. 93

Figura 49 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 700 MHz. 94

Figura 50 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 900 MHz. 95

Figura 51 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena bioinspirada em 400 MHz. 96

Figura 52 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena bioinspirada em 700 MHz. 97

Figura 53 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena bioinspirada em 900 MHz. 99

Figura 54 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 400 MHz. 100

Figura 55 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 500 MHz. 101

Figura 56 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 600 MHz. 102

Figura 57 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 700 MHz. 104

Figura 58 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 900 MHz. 105

Figura 59 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena bioinspirada em 400 MHz. 106

Figura 60 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena bioinspirada em 700 MHz. 107

Figura 61 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena bioinspirada em 900 MHz. 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena de Vivaldi em 400 MHz. 74

Tabela 2 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena de Vivaldi em 600 MHz. 75

Tabela 3 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena de Vivaldi em 700 MHz. 76

Tabela 4 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena bioinspirada em 500 MHz. 77

Tabela 5 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena bioinspirada em 600 MHz. 79

Tabela 6 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena bioinspirada em 700 MHz. 80

Tabela 7 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 400 MHz. 81

Tabela 8 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 500 MHz. 82

Tabela 9 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 600 MHz. 83

Tabela 10 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 700 MHz. 85

Tabela 11 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 900 MHz. 86

Tabela 12 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 400 MHz. 87

Tabela 13 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 600 MHz. 88

Tabela 14 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 700 MHz. 89

Tabela 15 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 900 MHz. 90

Tabela 16 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 400 MHz. 92

Tabela 17 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 500 MHz. 93

Tabela 18 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 600 MHz. 94

Tabela 19 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 700 MHz. 95

Tabela 20 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 900 MHz. 96

Tabela 21 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena bioinspirada em 400 MHz. 97

Tabela 22 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena bioinspirada em 700 MHz. 98

Tabela 23 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena bioinspirada em 900 MHz. 100

Tabela 24 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 400 MHz. 101

Tabela 25 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 500 MHz. 102

Tabela 26 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 600 MHz. 103

Tabela 27 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 700 MHz. 104

Tabela 28 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 900 MHz. 106

Tabela 29 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena bioinspirada em 400 MHz. 107

Tabela 30 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena bioinspirada em 700 MHz. 108

Tabela 31 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena bioinspirada em 900 MHz. 109

Tabela 32 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para mapa PR. 110

Tabela 33 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para PCA. 112

Tabela 34 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para o cruzamento das estatísticas valor RMS e Kurtosis. 115

Tabela 35 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para o cruzamento das estatísticas valor RMS e Skewness. 117

Tabela 36 – Melhores resultados de cada antena para cada uma das técnicas utilizadas, considerando a distância euclidiana média entre todos os grupos. 120

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	UNIDADE
f_s	Frequência do sinal após amplificador e passa-banda	Hz
f_{osc}	Frequência do sinal que alimenta circuito misturador	Hz
$E_{s(t)}$	Sinal resultante da equação que descreve o funcionamento do misturador RF	V
A	Amplitude da primeira componente do misturador RF	V
B	Amplitude da segunda componente do misturador RF	V
f_{LO}	Frequência do oscilador local	Hz
f_{RF}	Frequência do sinal de rádio frequência	Hz
V_{sinal}	Valor do sinal	V
I	Componente em fase do sinal (*in-phase*)	V
Q	Componente em quadratura do sinal (*quadrature*)	V
$x(t)$	Sinal no domínio do tempo	V
$X(k)$	Discreta Transformada de Fourier de x(n)	Adimensional
$x(n)$	Sinal amostrado no tempo discreto	Adimensional
k	Índice de amostra na Transformada de Fourier discreta	Adimensional
N	Número total de amostras	Adimensional
PRL	Potência relativa no intervalo de baixa frequência	Adimensional
PRH	Potência relativa no intervalo de alta frequência.	Adimensional

f_{1L}, f_{2L}	Limites inferior e superior da faixa de baixa frequência	Hz
f_{1H}, f_{2H}	Limites inferior e superior da faixa de alta frequência	Hz
f_t	Frequência total	Hz
C	Matriz de covariância	Adimensional
PC	Componente Principal	Adimensional
X_i	Elemento i de uma amostra no vetor X	V
$\overline{X}$	Média de X	V
V_{RMS}	Valor RMS (raiz quadrada da média dos quadrados)	V
S	Skewness (assimetria de uma distribuição)	Adimensional
K	Kurtosis (curtose de uma distribuição)	Adimensional
σ_x	Desvio padrão de X	Adimensional
$\bar{x}$	Média de x	Adimensional
$\bar{y}$	Média de y	Adimensional
P, Q	Pontos definidos no plano bidimensional, onde a distância euclidiana é calculada com base em suas respectivas coordenadas (x, y)	Adimensional
$S11$	Parâmetro de dispersão (reflexão) de um sistema	Adimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 22
1.1. Considerações Iniciais e Objetivos 22
1.2. Organização do Trabalho 25
2. FALHAS EM TRANSFORMADORES 26
2.1. Falhas no Enrolamento 28
2.1.1 Falhas no Sistema de Isolação à Base de Celulose 29
2.2. Falhas em Isoladores 29
3. DETECÇÃO DE FALHAS POR MÉTODO UHF 31
3.1. Detecção de Falhas por UHF em Transformadores 31
3.2. Tecnologia SDR (Software Defined Radio) 32
4. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS 36
4.1. Análise de Sinais no Domínio da Frequência – Transformada de Fourier 36
4.2. Mapa Power Ratio 36
4.3. Análise de Componentes Principais 37
4.4. Mapas baseados em RMS, Skewness e Kurtosis 38
5. METODOLOGIA 41
5.1. Ensaio Experimental 41
5.1.1 Transformador Operando com Descargas Parciais no Isolador 42
5.1.2 Transformador Operando com Descargas Parciais em Papel 48
5.1.3 Transformador Operando com Descarga Total 49
5.1.4 Transformador Operando em Condição sem Falhas 50
5.2. Método de Processamento de Dados 51
6. RESULTADOS 57
6.1. Espectro de Frequências dos Sinais Aquisitados pelo RTL-SDR 57
6.1.1 Conclusão Parcial 72
6.2. Técnicas de Classificação de Falhas 72
6.2.1 Mapa de Power Ratio 72
6.2.2 Análise de Componentes Principais 80
6.2.3 Estatísticas: Skewness, Kurtosis e RMS 90
6.3. Estudo Comparativo entre as Técnicas 110
7. CONCLUSÃO 121

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo introduz o campo de estudo de falhas em transformadores de potência, os objetivos do trabalho e os desafios científicos e tecnológicos associados a essa área.

1.1. Considerações Iniciais e Objetivos

Os transformadores de potência são essenciais para regular os níveis de tensão no sistema de distribuição de energia, garantindo a qualidade do fornecimento, a vida útil dos equipamentos conectados à rede e a confiabilidade do sistema para os usuários. No entanto, essas máquinas elétricas estão sujeitas a contaminação e deterioração de seus elementos ao longo de sua vida útil, devido a estresses operacionais por sobrecarga, defeitos de fabricação, transporte ou manutenção inadequada, intempéries e outros fatores, que intensificam a deterioração do sistema de isolação dielétrica. Isso, por sua vez, resulta no surgimento de falhas do tipo descargas parciais e descargas totais, que deterioram ainda mais o sistema de isolação (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

De acordo com a IEC 60270 (2000), as descargas parciais são caracterizadas como descargas elétricas de baixa energia, localizadas em um meio dielétrico que não preenche completamente o espaço entre dois condutores. Já as descargas totais, também conhecidas como arcos elétricos ou curtos-circuitos incipientes, são caracterizadas como descargas elétricas de alta energia que preenchem completamente o espaço entre os condutores (IEC 60599, 2015; SCHIEWALDT et al., 2024). Além disso, conforme a IEC 60599 (2015), que estabelece o método para a interpretação de gases dissolvidos em óleo mineral utilizado em transformadores de potência, as descargas totais podem ser classificadas em dois tipos: D1 corresponde às descargas de baixa energia; D2 corresponde às descargas de alta energia.

Como visto em Bittencourt (2025), Schiewaldt (2024) e na IEC 60270 (2000), durante a ocorrência desses tipos de falhas na máquina elétrica, há a emissão de ondas acústicas, transientes de corrente, gases, ondas de radiofrequência e outros fenômenos, que estão relacionados diretamente com a perda das características físico-químicas do sistema de isolação do transformador de potência, que podem levar a interrupções abruptas no fornecimento de energia ou até mesmo defeitos irreparáveis em um ativo de alto valor.

Por essa razão, a implementação de sistemas de monitoramento e diagnóstico de falhas em transformadores torna-se fundamental para garantir a qualidade e a continuidade do

fornecimento de energia, além da segurança dos usuários da rede. De acordo com Abbasi (2022) e Pradeep, Haque e Preetha (2025), existem diversas categorias de monitoramento da condição de transformadores, que incluem a análise de gases dissolvidos (DGA, do inglês *Dissolved Gas Analysis*), sensoriamento por emissão acústica, análise de resposta em frequência (FRA, do inglês *Frequency Response Analysis*), a utilização de sensores de corrente de alta frequência, dentre outros. A detecção de falhas através da análise de sinais de ondas de ultra alta frequência (UHF, do inglês *Ultra High Frequency*), torna-se uma técnica promissora de monitoramento, pois não há a necessidade de interromper a operação do equipamento ou manter contato direto com ele energizado. Contudo, devido à ampla faixa de frequência e largura de banda a ser explorada para detecção de falhas, essa técnica sofre com a necessidade de sistemas de aquisição de dados com alta capacidade.

Por exemplo, como visto em Orellana et al. (2023), na avaliação da evolução temporal das descargas parciais em um isolador poluído usando medições UHF e aprendizado profundo, foi utilizado um osciloscópio Keysight Infiniium DSOS804a, configurado com uma janela de tempo de 1 μs e uma frequência de amostragem de 5 GS/s, para realizar as aquisições de sinais captados pela antena de fenda aberta (em inglês: *open slot antenna*). No trabalho de Schiewaldt et al. (2024), foi utilizada uma antena de Vivaldi conectada a um conversor analógico-digital (ADC, do inglês *Analog-to-Digital Converter*) dedicado para o sistema de aquisição de dados, modelo M4i.2233-x8 SPECTRUM Instrumentation®, configurado com uma taxa de aquisição de 2,5 GHz, para realizar a avaliação da faixa de frequência UHF para classificação de falhas em transformadores de potência. Jiang et al. (2021) utilizaram um osciloscópio LeCroy 610Zi, configurado com uma janela de tempo de 1 μs e uma frequência de amostragem de 10 GS/s, em conjunto com sensores UHF (ZCCGQ-U-PZ-01) para detectar e diagnosticar descargas parciais em isolador (buchas). Os equipamentos listados acima possuem capacidade operacional para realizar a aquisição de dados UHF provenientes de falhas em transformadores, pois possuem ampla largura de banda e faixa de frequência, porém o alto custo desses equipamentos representa um fator limitante, uma vez que um sistema de aquisição de dados pode custar milhares de dólares, o que limita a disseminação da técnica de monitoramento baseada em UHF.

Com relação à faixa de UHF utilizada para diagnóstico de falhas em transformadores, algumas pesquisas científicas, como o trabalho de Rutgers (1997, *apud* TENBOHLEN et al., 2023), destacam e sugerem a faixa de frequência de 300 MHz a 3 GHz como eficaz para detectar falhas do tipo descarga parcial (DP) em transformadores de potência. No entanto, de acordo

com a Brochura Técnica 861 do Cigré, as faixas de frequência entre 100 MHz e aproximadamente 1 GHz são capazes de detectar sinais UHF provenientes de falhas em transformadores (CIGRÉ, 2022). Recentemente, um estudo conduzido por Tenbohlen et al. (2023), que analisou as emissões de alta frequência provenientes de falhas emuladas em 13 tipologias diferentes de transformadores em várias partes do mundo, demonstrou que a faixa de UHF ideal para a detecção de falhas está entre 400 MHz e 900 MHz. Neste contexto, a demanda de aquisição de dados torna-se alta.

Com base no problema descrito, este trabalho tem como objetivo avaliar um sistema de baixo custo, baseado em dispositivo RTL-SDR (em inglês, *RTL Software-Defined Radio*), para a avaliação e classificação da operação de transformadores de potência. O estudo está concentrado em quatro condições de operação: o transformador operando sem falha e três tipos de falha, que são os mais comuns em transformadores, conforme Murugan e Ramasamy (2019). Essas falhas incluem: falhas na isolação (36,74%), simuladas por descargas totais no óleo; falhas no enrolamento (21,30%), simuladas por descargas parciais no material isolante à base de celulose; e falhas no isolador (15,70%), reproduzidas por descargas parciais no isolador de porcelana (bucha). Um dispositivo RTL-SDR será utilizado em conjunto com dois modelos de antena, Vivaldi e bioinspirada, permitindo a comparação do sistema com duas topologias de antenas distintas. Por fim, as técnicas Mapas de *Power Ratio* (Mapas PR), Análise de Componentes Principais (do inglês, *Principal Component Analysis* - PCA) e as estatísticas *Skewness*, *Kurtosis* e Valor RMS (em inglês: *Root Mean Square*) são comparadas através de mapas auto-organizados com o intuito de avaliar a capacidade de classificação e detecção de falhas em transformadores. Assim, as contribuições deste trabalho incluem:

- Avaliação de um dispositivo de baixa taxa de aquisição para identificação e classificação de falhas em transformadores de potência;

- Estudo comparativo do sistema baseado em dispositivo RTL-SDR, utilizando as topologias de antena Vivaldi e bioinspirada em mariposa;

- Estudo comparativo entre as técnicas de classificação de falhas em transformadores: mapa *Power Ratio*; Análise de Componentes Principais; estatísticas RMS, *Skewness* e *Kurtosis*.

1.2. Organização do Trabalho

No Capítulo 2 são apresentadas as principais falhas que afetam os transformadores de potência. Em seguida, no Capítulo 3, é discutida a detecção de falhas em transformadores por meio de sinais UHF. O Capítulo 4 aborda as principais técnicas de processamento de sinais para a detecção e classificação dessas falhas. A metodologia utilizada é detalhada no Capítulo 5, enquanto os resultados são apresentados e analisados no Capítulo 6. Finalmente, o Capítulo 7 conclui o trabalho.

2. FALHAS EM TRANSFORMADORES

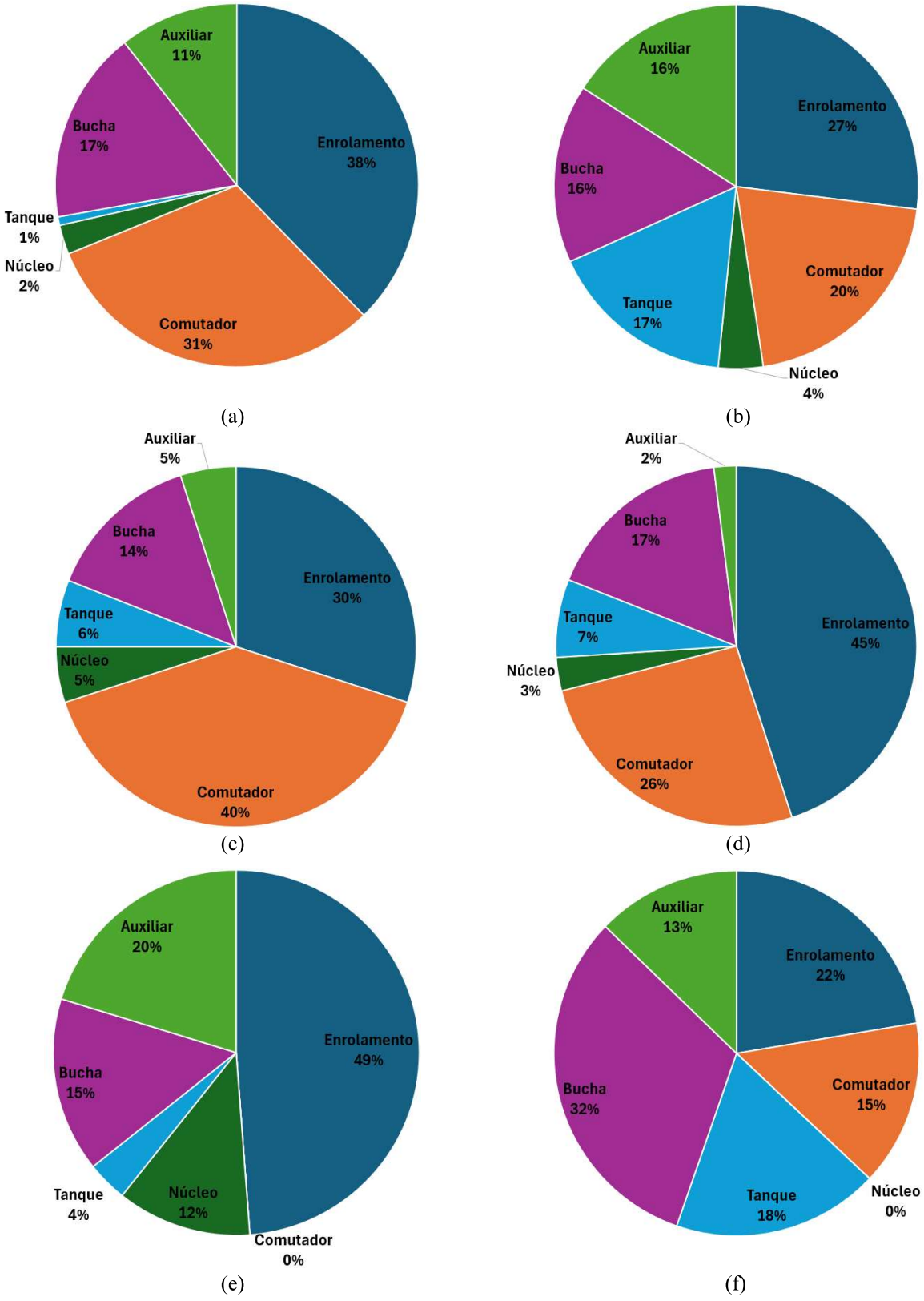
De acordo com Soni e Mehta (2021), os transformadores de potência são dispositivos críticos no sistema de transmissão de energia e exigem uma atenção adequada para maximizar sua vida útil e confiabilidade operacional. A vida útil média esperada desses equipamentos elétricos de potência é de aproximadamente 40 anos, e após esse período, o risco de colapso aumenta consideravelmente (SONI; MEHTA, 2021). A falha de transformadores pode ocasionar prejuízos financeiros às concessionárias, além da necessidade da substituição de um ativo de alto valor. Diante dos impactos gerados pela interrupção desses equipamentos, a detecção e o diagnóstico de falhas em transformadores de potência têm atraído a atenção de diversos pesquisadores tanto da academia quanto da indústria nas últimas décadas (ABBASI, 2022).

Segundo Abbasi (2022), o transformador de potência é composto por enrolamentos, núcleo magnético, estruturas de fixação, óleo isolante, tanque, buchas, terminais e outros. Durante sua operação, diferentes eventos podem ocasionar distintos tipos de falhas, resultando em impactos específicos no sistema elétrico. Essas falhas podem ser classificadas com base em diferentes critérios. Quanto à sua origem, a falha pode ser física, elétrica ou térmica. Quanto à sua natureza, pode ser intencional ou acidental. Quanto à sua persistência, como transitória, intermitente ou permanente. Além disso, essas falhas podem estar localizadas internamente ou externamente ao transformador.

Devido aos estresses causados durante a operação de transformadores, como distúrbios elétricos, descargas atmosféricas (raios), umidade, operação em sobrecarga, transporte inadequado, entre outros, podem acelerar o processo de degradação do sistema de isolação, favorecendo o surgimento de descargas parciais ou arcos elétricos, tanto internos quanto externos ao equipamento elétrico (ABBASI, 2022). Esses fenômenos intensificam ainda mais a deterioração da isolação, podendo resultar na parada do transformador ou perda total do ativo.

A Figura 1 demonstra a distribuição percentual dos tipos de falhas segundo diferentes autores. É possível notar que majoritariamente as falhas no enrolamento e na bucha se sobressaem entre as demais.

Figura 1 – Estatística de pesquisas para falhas em componentes de transformadores. (a) CIGRE (s.d, *apud* ABBASI, 2022); (b) Christina et al. (2018); (c) Sachdev e Shah (1981); (d) Moravej e Abdoos (2012); (e) IEEE (1986, *apud* ABBASI, 2022); (f) EPRI (1991, *apud* ABBASI, 2022).



Fonte: Baseado em Abbasi (2022).

Segundo Abbasi (2022), as falhas em transformadores de potência podem ser classificadas como internas ou externas. Entre as falhas internas, destacam-se as seguintes: falhas magnéticas, falhas mecânicas, que abrangem o deslocamento dos enrolamentos, problemas durante transporte inadequado e esmagamento do anel de suporte dos enrolamentos; falhas elétricas, que envolvem falhas dielétricas, curtos-circuitos entre espiras e defeitos no circuito magnético; falhas químicas, que estão relacionadas à degradação ou ao aumento de acidez do óleo, bem como à presença de umidade no óleo ou papel isolante; e, por fim, falhas térmicas, associadas às falhas no sistema de resfriamento, obstrução dos dutos de óleo, operação prolongada em sobrecarga (ABBASI, 2022).

Já as falhas externas destacam-se por: falhas mecânicas geradas por vibrações externas, como terremotos, falhas de montagem; falhas elétricas, que estão associadas a sobretensões transitórias e desequilíbrios de tensão e corrente de alimentação; e, por fim, falhas ambientais, como variações de temperatura, descargas atmosféricas (raios) etc (ABBASI, 2022).

2.1. Falhas no Enrolamento

Como observado em Murugan e Ramasamy (2019) os enrolamentos do transformador de potência devem ser corretamente isolados, sustentados e resfriados para suportar as exigências operacionais do equipamento. Por isso, são constituídos por condutores isolados, com camadas de espiras separadas por isolante à base de celulose, dispostas ao redor do núcleo ferromagnético da máquina elétrica.

As falhas nos enrolamentos podem representar entre 22% a 49% das ocorrências de defeitos em transformadores de potência, conforme apresentado na Figura 1. Sendo o curto-circuito entre as espiras o mais comum, resultante da degradação da isolação entre dois pontos distintos das bobinas, o que pode ser provocado facilmente por vibrações, manutenção e transporte inadequados, forças axiais provenientes de curtos-circuitos externos (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; SCHIEWALDT, 2024).

Além dos danos causados pela operação em sobrecarga, fatores como vibrações, transporte inadequado, dobras nos condutores, contaminação do óleo, umidade, desequilíbrios de tensão e outras adversidades podem enfraquecer o sistema de isolação da máquina elétrica, tornando-a vulnerável ao surgimento de pontos sem isolação nos enrolamentos do transformador e, portanto, ao surgimento de descargas totais. Também conhecida como

descarga de alta energia ou arco elétrico, a descarga total é o resultado do rompimento do dielétrico da máquina e da passagem da corrente elétrica entre dois pontos vivos. Este fenômeno pode ocorrer entre as espiras, entre as bobinas ou até mesmo entre fase e terra, por exemplo, entre uma espira e carcaça aterrada (BITTENCOURT, 2025).

2.1.1 Falhas no Sistema de Isolação à Base de Celulose

A deterioração do isolanete à base de celulose é uma falha comum que ocorre nos enrolamentos dos transformadores de potência. O óleo e o papel são os principais materiais utilizados na isolação dos transformadores de potência, estando presentes em componentes como grampos, barreiras, espaçadores e até mesmo entre os enrolamentos do primário e secundário dos transformadores (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; SCHIEWALDT, 2024).

A penetração de água, distúrbios e transitórios elétricos provenientes da rede de energia elétrica, falhas na fabricação, além da degradação térmica causada por problemas no sistema de refrigeração ou superaquecimento decorrente de estresses operacionais, podem acelerar o envelhecimento ou até mesmo causar a carbonização da isolação baseada em celulose, como o papel Nomex®, presente em componentes como grampos, espaçadores, entre bobinas do primário e secundário etc. A degradação da celulose resulta na perda de suas propriedades físico-químicas, formando pontos de isolação mais fracos o que pode resultar na ocorrência de descargas parciais ou descargas totais. Além disso, a celulose carbonizada libera gases como hidrogênio (H2), metano (CH4), acetileno (C2H2) e outros, que contaminam o óleo isolante do transformador (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; BITTENCOURT, 2025).

2.2. Falhas em Isoladores

De acordo com estudos realizados por diversos autores, como mostrado na Figura 1 as buchas isoladoras representam entre 14% a 32% das ocorrências de falhas mais frequentes em transformadores de potência. Esse componente é responsável por conduzir o condutor energizado até o núcleo do transformador, garantindo que não haja o contato da parte viva (condutor energizado) com as partes metálicas aterradas da máquina.

As buchas isoladoras são divididas em dois tipos: buchas sólidas e buchas de capacitância variável. As buchas sólidas possuem um condutor central de cobre ou alumínio e são fabricadas com materiais isolantes, como porcelana, vidro ou resina epóxi, em que o óleo mineral atua como isolante entre o condutor e o próprio isolador. Já as buchas de capacitância

variável, são confeccionadas com base em conjuntos de capacitores, que podem ser feitos de papel impregnado com óleo (OIP), papel saturado com resina (RIP) e papel aderido com resina (RBP) (MURUGAN; RAMASAMY, 2019; BARRETO, 2023; SCHIEWALDT, 2024; BITTENCOURT, 2025).

De acordo com Bittencourt (2025), as buchas isoladoras são projetadas para resistir a fissuras, fraturas e à contaminação por resíduos do ambiente, como poeira, água da chuva e outros agentes externos, além do intenso campo elétrico presente nos terminais dos transformadores de potência. No entanto, quando esse componente é exposto a condições que contaminam sua superfície, como dejetos de animais, maresia e outros contaminantes, suas propriedades de isolação superficial de fábrica são alteradas, levando ao surgimento de descargas parciais superficiais (BINOTTO et al., 2021; SCHIEWALDT, 2024).

3. DETECÇÃO DE FALHAS POR MÉTODO UHF

Este capítulo introduz a detecção de falhas em transformadores por meio de técnicas de UHF (em inglês, Ultra-high Frequency) e RTL-SDR (em inglês, RTL Software-Defined Radio).

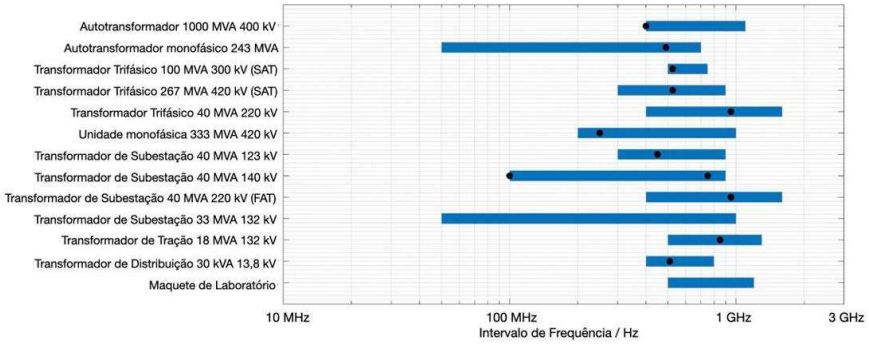
3.1. Detecção de Falhas por UHF em Transformadores

Como visto em Bittencourt (2025), o monitoramento de transformadores de potência através de sensores UHF é possível devido à natureza da falha, onde os pulsos de corrente de curta duração com tempos de subida rápidos gerados por descargas parciais emitem radiação eletromagnética (EM) na faixa de UHF.

De acordo com Rutgers (1997, *apud* TENBOHLEN et al., 2023), descargas parciais em transformadores isolados a óleo mostraram emissões eletromagnéticas significativas na faixa de frequência entre 300 MHz e 3 GHz. No entanto, segundo a Brochura Técnica 861 do Cigré, é possível detectar sinais de falhas em transformadores de potência nas faixas de frequência entre 100 MHz e aproximadamente 1 GHz (CIGRE, 2022). Um estudo recente conduzido por Tenbohlen et al. (2023), que investigou as emissões UHF provenientes de falhas do tipo descargas parciais e totais emuladas em 13 topologias de transformadores espalhados em várias partes do mundo, evidenciou que a faixa de frequência ideal para detectar as maiores amplitudes das falhas através de técnicas UHF está entre 400 MHz e 900 MHz.

A Figura 2 apresenta um gráfico com as faixas de frequência eletromagnética emitidas por cada uma das 13 topologias de transformadores no estudo realizado por Tenbohlen et al. (2023).

Figura 2 - Faixas de frequência emitidas por diversas topologias de transformadores.



Fonte: Adaptado de Tenbohlen et al. (2023, *apud* BITTENCOURT, 2025).

Sendo assim, este trabalho utilizará o método UHF em conjunto com um dispositivo RTL-SDR de baixo custo, sintonizado nas frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz.

3.2. Tecnologia SDR (Software Defined Radio)

Conforme mencionado, as tecnologias para aquisição de dados baseadas em métodos UHF para a detecção de falhas em transformadores de potência exigem equipamentos de alto custo para a aquisição de dados, devido à necessidade de altas taxas de amostragem. Diante desse desafio, torna-se viável o desenvolvimento de técnicas que possam contornar essa limitação, favorecendo a popularização do método UHF. Nesse contexto, o uso de aparelhos SDR (em inglês S*oftware-Defined Radio* ou em português Rádio Definido por Software) surge como uma alternativa promissora, pois esses dispositivos são compactos e fáceis de usar utilizados, capazes de receber sinais de radiofrequência por uma conexão USB.

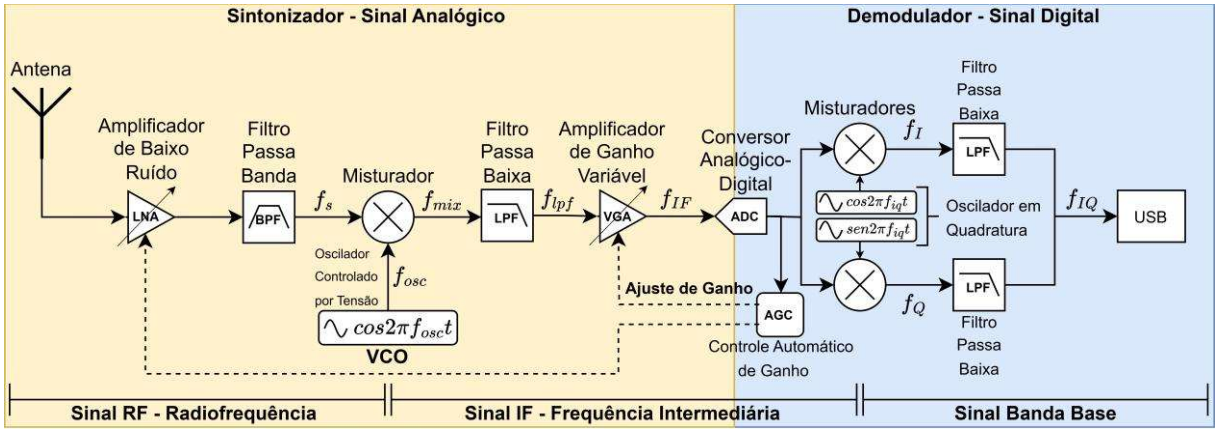
Segundo Cronjé (2004), esses dispositivos são sistemas que não processam um sinal de radiofrequência (RF) de maneira direta. O sinal analógico de entrada, proveniente, por exemplo, de uma antena, passa por um amplificador de baixo ruído (em inglês, *Low Noise Amplifier* - LNA) e, em seguida, por um filtro passa-banda (em inglês, *Band Pass Filter* - BPF), cuja frequência central é definida por software. Após essa etapa, o sinal com frequência central definida em f_s passa por um circuito misturador alimentado por um oscilador controlado por tensão (em inglês, *Voltage-Controlled Oscillator* - VCO), cuja frequência é f_{osc}.

O resultado do misturador é um sinal f_{mix}, que contém componentes de soma e subtração das frequências de entrada f_s e f_{osc}. Para remover a componente de alta frequência (soma), o sinal analógico f_{mix} passa por um filtro passa-baixa (em inglês, *Low Pass Filter* - LPF), resultando no sinal f_{lpf}. Em seguida, esse sinal passa por um amplificador de ganho variável (em inglês, *Variable Gain Amplifier* - VGA) para ajuste de nível, e produz um sinal analógico f_{IF}, com frequência reduzida, porém mantendo as informações contidas no sinal original f_s.

O controle automático de ganho (em inglês, *Automatic Gain Control* - AGC) ajusta o VGA para que o sinal analógico passe pelo conversor analógico-digital (em inglês, *Analog-Digital Converter* - ADC) com um nível de potência adequado. Em algumas aplicações, o AGC também ajusta o amplificador de radiofrequência no sintonizador (neste exemplo, o LNA).

Por fim, o sinal analógico f_{IF} é digitalizado por um conversor ADC e encaminhado para dois misturadores digitais alimentados por sinais gerados por um oscilador em quadratura: um cossenoidal e outro senoidal. O resultado dessa operação produz um sinal f_I (em inglês, *In-phase*) e um sinal f_Q (em inglês, *Quadrature*), que representam o sinal modulado em uma banda base. Em seguida, os sinais f_I e f_Q passam por um filtro passa-baixa digital, gerando um sinal f_{IQ} que pode ser processado por um computador por meio de conexão USB. O processo descrito é ilustrado através de um diagrama básico de um dispositivo RTL-SDR na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de blocos básico de um dispositivo RTL-SDR.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a primeira etapa analógica, o circuito misturador alimentado com frequência f_{osc} produz um sinal multiplicado pela frequência do sinal f_s, resultando em um sinal f_{mix}. Considerando V_{osc} e V_s, as amplitudes dos sinais do oscilador e do sinal filtrado com frequência f_s, a mistura dessas frequências pelo circuito oscilador resulta em um novo sinal $V_m(t)$ com as seguintes características em frequência:

$$V_m(t) = \frac{V_{osc}.V_s}{2} . (\cos(2\pi(f_s - f_{osc})t) + \cos(2\pi(f_s + f_{osc})t)) \quad (1)$$

Assim, o misturador produz um sinal tal que um dos fatores resultantes tem frequência menor que o sinal original, pois resulta da subtração de f_s e f_{osc}, sendo selecionado pelo filtro passa-baixa, o que gera o sinal f_{lpf}. Neste contexto, o sinal de saída tem uma frequência menor que o sinal de entrada e, portanto, demanda menores taxas de aquisição. Em alguns circuitos RTL-SDR, a frequência de interesse é sintonizada por software, controlando a primeira etapa

de filtragem e o oscilador, de forma que a resultante de $f_s - f_{osc}$ corresponda a uma frequência intermediária (IF) com valor fixo e baixo, por exemplo, da ordem de alguns MHz.

No final da etapa analógica, o sinal f_{IF} é digitalizado por meio de um ADC e novamente processado por dois misturadores em quadratura, em que o sinal é decomposto em duas componentes ortogonais, que juntas formam um número complexo $I + jQ$, onde I é a parte real e jQ a parte imaginária. Por fim, o sinal em componentes I e Q passa por um filtro passa-baixa, com a função de remover as componentes de alta frequência. Esse formato de dados é denominado I/Q (*In-phase/Quadrature*) e é obtido por misturadores com osciladores deslocados de 90° (KARIMI-GHARTEMANI; KARIMI; IRAVANI, 2004; WHITEBOARD, 2025). Para esta dissertação, optou-se por utilizar a amplitude do sinal calculada através do valor absoluto das componentes do sinal, conforme a equação abaixo:

$$V_{sinal} = \sqrt{I^2 + Q^2} \tag{2}$$

Originalmente, os dispositivos RTL-SDR foram projetados para atuar como receptores de TV digital (DVB-T), permitindo aos usuários assistirem às transmissões de TV UHF em seus computadores. De acordo com Mohamed et al. (2016), os dispositivos RTL-SDR funcionam adequadamente sem a necessidade de modificações no hardware. Portanto, é possível acessar os dados provenientes do dispositivo em tempo real apenas com o uso de um software adicional compatível. Além do chip RTL2832U, do fabricante Realtek, origem do termo RTL, que atua como um conversor analógico-digital (ADC) e envia os dados para computador o hospedeiro, esses dispositivos podem ser encontrados com quatro tipos de sintonizadores, que são componentes eletrônicos responsáveis por sintonizar uma faixa específica de frequência. São eles:

- **Rafael Micro R820T –** Faixa de sintonia: 24 MHz a 1766 MHz;
- **FC0012 –** Faixa de sintonia: 22 MHz a 948,6 MHz;
- **FC0013 –** Faixa de sintonia: 22 MHz a 1100 MHz;
- **Elonics E4000 –** Faixa de sintonia: 52 MHz a 2200 MHz.

Como visto em Stewart et al. (2015) e Mohamed et al. (2016), o demodulador RTL2832U possui um ADC capaz de amostrar sinais com uma taxa de 28,8 MHz. Contudo, as

interfaces USB 2.0 limitam a taxa de transferência a 3,2 MHz, fazendo com que esses dispositivos operem em tempo real com taxas de amostragem abaixo de 2,4 MHz, sem que ocorram perdas prejudiciais de amostras (MOHAMED et al., 2016).

No caso desta dissertação, o dispositivo RTL-SDR será utilizado para avaliar descargas parciais em transformadores de potência, como um método de baixo custo para aquisição de dados UHF. As frequências sintonizadas por software foram: 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. Essas frequências sintonizarão a primeira etapa de filtragem bem como o oscilador do dispositivo SDR. O objetivo é avaliar a eficácia deste método na identificação e classificação de falhas em transformadores.

4. TÉCNICAS DE ANÁLISE DE SINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as técnicas de análise digital de sinais que foram utilizadas no presente trabalho.

4.1. Análise de Sinais no Domínio da Frequência – Transformada de Fourier

Habitualmente, a Transformada Discreta de Fourier (do inglês, *Discrete Fourier Transform* - DFT) é o algoritmo matemático mais utilizado para converter sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência. De acordo com Kumar (2024), a análise de um sinal de descarga parcial no domínio da frequência pode aumentar a precisão da classificação da falha, pois por meio da DFT, é possível obter as informações da frequência em que ocorreu o evento. A Transformada de Fourier é definida pela equação (3) (OPPENHEIM; VERGHESE, 2017).

$$X(i) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \tag{3}$$

Onde: $X(i)$ é o valor da transformada para a i-ésima frequência; $x(n)$ é o valor do sinal no índice n; N é o número total de amostras no sinal; j é a unidade imaginária; e $e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$ é a decomposição do sinal em senos e cossenos.

Habitualmente, o cálculo computacional da DFT é feito através do algoritmo da FFT (em inglês, *Fast Fourier Transform*), que segundo Oppenheim e Verghese (2017) é uma abordagem eficiente para implementações digitais.

4.2. Mapa Power Ratio

Mapa de *Power Ratio*, ou apenas Mapa PR, é uma técnica convencional de separação que permite caracterizar pulsos de descargas parciais ou ruído elétrico com dois parâmetros distintos resultantes da sua aplicação, sendo eles: *PRL – Power Ratio Low* e *PRH – Power Ratio High*. Após aplicar a FFT no sinal aquisitado, é calculada a potência espectral de dois intervalos do espectro: um correspondente às baixas frequências e outro às altas frequências (FRESNO, 2017; MARTINEZ-TARIFA, 2015).

As potências espectrais PRL e PRH são calculadas a partir da razão entre a potência de seus respectivos intervalos de frequência, $[f_{1L}, f_{2L}]$ e $[f_{1H}, f_{2H}]$, pela potência espectral total,

calculada entre 0 e a frequência máxima do sinal analisado (f_t). Os parâmetros PRL e PRH são calculados respectivamente através das equações (MARTINEZ-TARIFA, 2015):

$$PRL = \frac{\sum_{f_{1L}}^{f_{2L}} |X(i)|^2}{\sum_{0}^{f_t} |X(i)|^2} \tag{4}$$

$$PRH = \frac{\sum_{f_{1H}}^{f_{2H}} |X(i)|^2}{\sum_{0}^{f_t} |X(i)|^2} \tag{5}$$

Onde $X(i)$ é o espectro em frequência do sinal, f_{1L} e f_{2L} são as frequências de corte inferior para o intervalo de baixa frequência (PRL), e f_{1H} e f_{2H} para o intervalo de alta frequência (PRH). Os intervalos de frequência devem estar de acordo com a condição $0 \leq f_{1L} < f_{2L}$; $f_{1H} < f_{2H} \leq f_t$; $f_{1L} < f_{2H}$ (MARTINEZ-TARIFA, 2015). Para este trabalho, f_{1L} e f_{2L} representam a primeira metade do espectro analisado, enquanto f_{1H} e f_{2H} representam a segunda metade do espectro.

Com os valores de PRL e PRH calculados e combinados em pares, é possível formar pontos em um plano cartesiano para a criação de mapas bidimensionais. Esses mapas permitem avaliar as diferentes características dos sinais associados aos diferentes tipos de falhas estudados.

4.3. Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (do inglês *Principal Component Analysis* – PCA) é uma técnica utilizada para extrair padrões em um conjunto de dados, evidenciando as semelhanças ou diferenças. Essa técnica transforma um conjunto de dados originais em um novo conjunto de variáveis, através de combinações lineares, de forma a preservar o máximo de informação em termos de semelhanças e diferenças (BARRETO, 2023). De acordo com Schiewaldt (2024), os objetivos da análise de componentes principais são os seguintes: identificar correlações entre variáveis originais para reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados; validar constructos predefinidos; criar rankings a partir dos fatores; extrair fatores ortogonais para técnicas multivariadas que exigem ausência de multicolinearidade.

Considere uma matriz espectral X, generalizada por $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, X_{i3}, \ldots, X_{in})$, para realizar a extração das componentes principais, deve ser feito o calculo da matriz de

covariância (calculada através da equação 6) de X_i, e posteriormente, decompor a matriz covariância em valores singulares por meio do cálculo dos autovalores da matriz covariância. A matriz de covariância C é definida como (SCHIEWALDT, 2024):

$$C = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(X_i - \bar{X})^T \tag{6}$$

Em que n é o número total de amostras, X_i representa o módulo do vetor de características da i-ésima amostra, $\overline{X}$ representa o módulo do vetor médio e T é a transposição de uma matriz ou vetor.

Após o cálculo da matriz de covariância, realiza-se a extração dos autovalores de C por meio da decomposição em valores singulares, definida pela equação (SCHIEWALDT, 2024):

$$C = USU^T \tag{7}$$

Onde U é a matriz ortonormal que contém os autovetores de C, e S é uma matriz diagonal de autovalores de C. De acordo com Priananda (2024) e Melo (2024) essa técnica permite a análise dos resultados em até n dimensões, onde, as três primeiras componentes principais resultantes (PC1, PC2 e PC3) possuem as principais características dados analisados. E à medida que mais componentes principais vão sendo consideradas (PC4, PC5 até PCn), menores são as características essenciais presentes naquela componente principal.

Utilizando as componentes principais combinadas em pares (por exemplo, PC1 e PC2), é possível formar pontos em um plano cartesiano e criar mapas bidimensionais. O objetivo desses mapas é avaliar as diferentes características dos sinais provenientes dos diferentes tipos de falhas estudados.

4.4. Mapas baseados em RMS, Skewness e Kurtosis

Os mapas bidimensionais baseados nas estatísticas valor RMS, *Skewness* e *Kurtosis* podem ser caracterizados como uma técnica de reconhecimento de padrões. Com essa abordagem, os valores obtidos a partir dessas estatísticas são combinados em pares, formando pontos em um plano cartesiano. Esses pontos representam os sinais analisados e formam agrupamentos de dados conforme a intensidade e a forma do sinal.

Em Castro (2017), um dos critérios mais importantes para se avaliar um sinal aquisitado é a estatística do valor RMS. Esse critério pode ser utilizado para avaliar a potência efetiva do sinal adquirido em um intervalo de tempo finito e é expresso pela equação:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i^2} \tag{8}$$

Onde X_i é o valor do sinal no instante i-ésimo dentro do conjunto de dados analisado e N o número total de amostras.

De acordo com Ardila-Rey et al. (2021), as estatísticas *Skewness* (valor S) e *Kurtosis* (valor K) são capazes de caracterizar a assimetria e o pico de distribuição de qualquer variável contínua. Esses dois parâmetros permitem avaliar a normalidade da distribuição com maior precisão em comparação aos valores associados à média e à dispersão.

Através da análise do valor de *Skewness*, é possível obter informações sobre a forma da distribuição dos valores. Quando a distribuição dos valores está em torno da média, a distribuição é dita simétrica, logo a *Skewness* (S) é zero. No entanto, quando os valores se concentram mais em um dos lados da média, a distribuição é assimétrica ou inclinada. A *Skewness* ou assimetria, é definida pela equação (9) (CARVALHO; MENEZES; BONIDIA, 2024).

$$S(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^3}{(\mathrm{n}-1)\sigma^3} \tag{9}$$

Onde n é o número de amostras, x_i é módulo do valor individual de cada amostra, com i sendo o índice variando de 1 até n, $\overline{x}$ é módulo da média das amostras, σ_x é o desvio padrão das amostras.

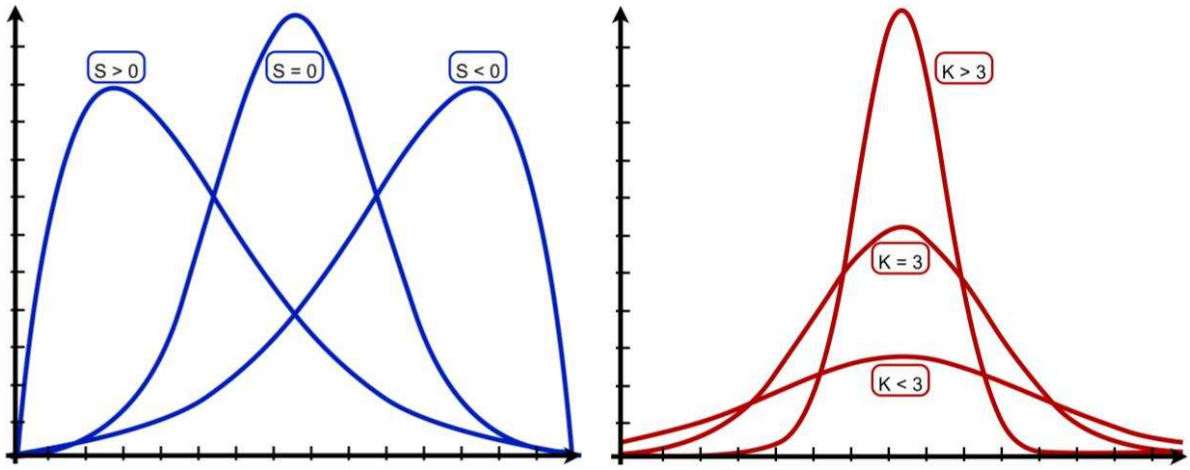
Já a análise do valor de *Kurtosis* permite identificar a dispersão dos valores em torno da média. Quando o valor de *Kurtosis* (K) é elevado, a distribuição possui pico mais acentuado. Por outro lado, quando a *Kurtosis* é baixa, a distribuição torna-se mais achatada. A *Kurtosis* é definida pela equação (10) (CARVALHO; MENEZES; BONIDIA, 2024).

$$K(x) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^4}{(\mathrm{n}-1)\sigma^4} \tag{10}$$

Onde n é o número de amostras, X_i é módulo do valor individual de cada amostra, com i sendo o índice variando de 1 até n, $\overline{X}$ é módulo da média das amostras, σ_x é o desvio padrão das amostras.

Através das Figuras 4(a) e 4(b) é possível observar as características das estatísticas *Skewness* (S) e *Kurtosis* (K) (ARDILA-REY et al., 2021; CARVALHO; MENEZES; BONIDIA, 2024).

Figura 4 – Características das estatísticas: (a) Skewness; (b) Kurtosis.



(a) (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a formação dos mapas bidimensionais, as estatísticas descritas anteriormente serão combinadas em pares para formar coordenadas no plano cartesiano. O objetivo é avaliar as diferenças entre os sinais provenientes dos diferentes tipos de falhas estudados.

5. METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia aplicada para o estudo da utilização de um dispositivo RTL- SDR na aquisição de ondas UHF (Ultra-high Frequency) provenientes de falhas em transformadores de potência. A seção está dividida em duas partes: ensaio experimental, onde são detalhadas as condições e os procedimentos experimentais durante as medições realizadas no ensaio; e o método de processamento de dados, para a análise e interpretação dos sinais aquisitados em laboratório.

5.1. Ensaio Experimental

Como o propósito desta dissertação é avaliar a eficácia e a eficiência da utilização de RTL-SDR na identificação e classificação de falhas em transformadores de potência, utilizou-se um transformador de distribuição, isolado a óleo, com potência nominal de 30 kVA, tensões nominais de 13,8 kV no primário e 127 V/220 V no secundário, conforme os dados de placa da Figura 5. Foram introduzidas quatro condições de operação: transformador operando sem falha; com descargas parciais nos isoladores; com descargas parciais em papel isolante; e arcos elétricos (também conhecidos como descargas totais). O objetivo foi emular condições de degradação que ocorrem nos transformadores. Conforme mencionado, as descargas nas buchas podem ocorrer por contaminação superficial, já as descargas em papel podem ser provocadas por degradação deste tipo de isolante devido à temperatura elevada, sendo este material comumente empregado entre as espiras e entre os enrolamentos de alta e baixa tensão. Já as descargas totais, também classificadas pela norma IEC 60599 em tipo D1 ou D2, podem ocorrer quando há ruptura da camada isolante em espiras, criando pontos vivos no transformador.

Figura 5 – Transformador utilizado para ensaios e seus dados de placa.



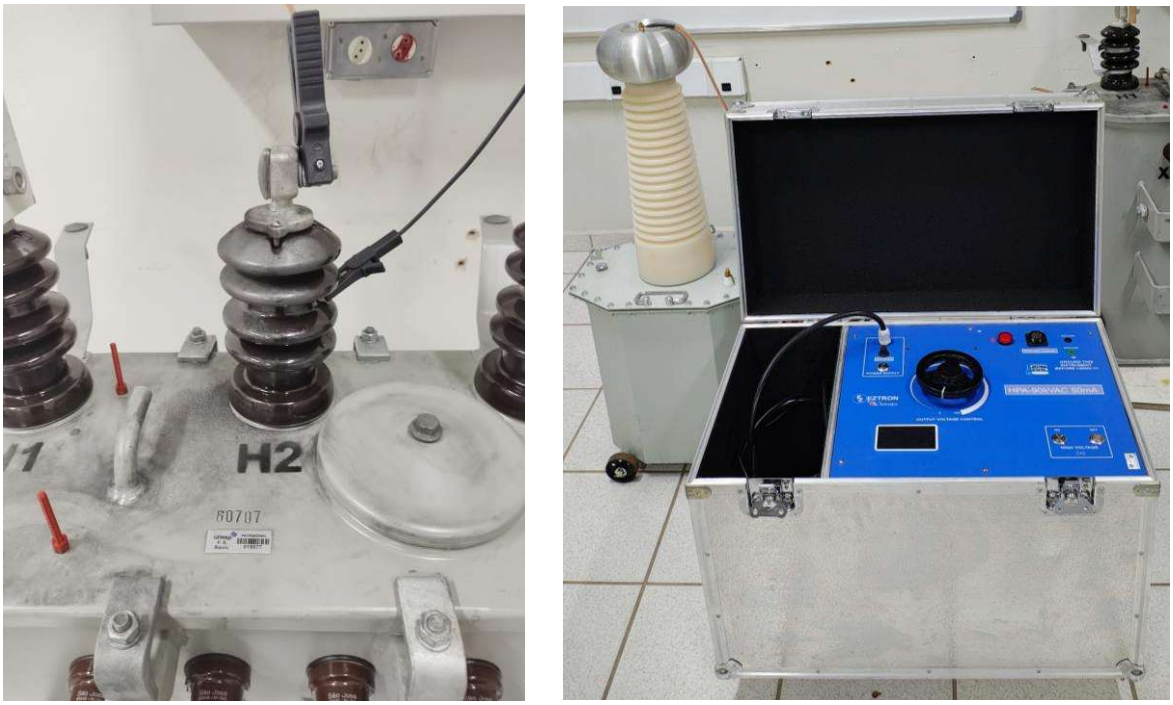
Fonte: Elaborado pelo autor.

As subseções a seguir descrevem de forma detalhada os métodos para simular essas falhas.

5.1.1 Transformador Operando com Descargas Parciais no Isolador

Para simular a condição de falha de descarga parcial na bucha, um dos isoladores do transformador foi contaminado com pó de grafite, conforme apresentado na Figura 6(a), simulando a contaminação superficial do material dielétrico. Uma fonte de alta tensão, EZTRON *by* Minipa, modelo digital AC HPA 90 kV / 50 mA, mostrada na Figura 6(b), aplicou 13,8 kV nos terminais da bucha, sendo esta a tensão nominal de operação do equipamento.

Figura 6 – Componentes utilizados. (a) Isolador contaminado com grafite em pó; (b) Fonte de alta tensão Minipa.



(a) (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma antena de Vivaldi foi posicionada a 1 metro de distância do transformador e conectada a um dispositivo RTL-SDR para aquisição dos sinais UHF provenientes das falhas. Para validar a ocorrência destas falhas durante os ensaios, um sensor HFCT (em inglês, *High Frequency Current Transformer*) do fabricante IPEC, modelo 48E (Figura 7(a)), que possui resposta em frequência de até 50 MHz, e uma ponta de prova de alta tensão, Instrutherm PPA-440 (Figura 7(b)), com tensão máxima de 28 kVCA, foram conectados ao terminal do isolador e a fonte de alta tensão, respectivamente. O intuito foi garantir a ocorrência do fenômeno de descarga parcial pelo padrão de impulso de corrente por fase de tensão aplicada no isolador. Os sinais de tensão e corrente foram aquisitados por um osciloscópio Yokogawa DL850 (Figura 7(c)) com taxa de aquisição configurada para 100 MHz e largura de banda de 100 MHz.

Figura 7 – Materiais utilizados. (a) HFCT IPEC 48E; (b) Ponta de Prova A.T. Instrutherm PPA-440; (c) Osciloscópio Yokogawa DL850.



(a) (b) (c)

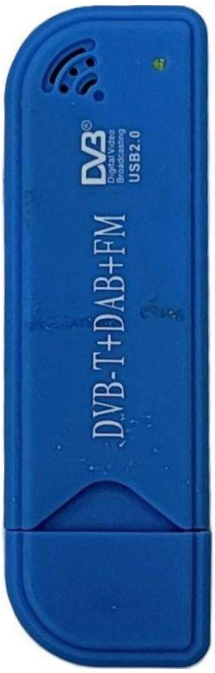
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em um notebook com o terminal de comando *Conda Prompt* instalado foi conectado um dispositivo RTL-SDR - modelo DVB-T+DAB+FM - acoplado a uma antena de Vivaldi. O RTL-SDR possui sintonizador FC0012 e demodulador RTL2838. Em seguida, no *prompt* Conda foi inserido o comando rtl_sdr, que pertence a uma biblioteca gratuita para captura e processamento de sinais provenientes de dispositivos RTL-SDR de baixo custo. Para realizar a captura do sinal recebido pela antena, foi utilizado o comando semelhante ao descrito abaixo:

rtl_sdr -f 400000000 -g -19,2 -s 2400000 -n 12000000 ComDescBucha400AntHz0.raw

Onde o parâmetro *-f* sintoniza a frequência central do RTL-SDR em 400 MHz, o parâmetro *-g* ajusta o ganho em -19,2 dB, o *-s* define a taxa de amostragem em 2,4 MHz, o *-n* define o número de amostras a capturar. O nome de saída do arquivo, com seu respectivo formato, foi definido como *ComDescBucha400AntHz0.raw*. O parâmetro *-f*, responsável pela sintonização da frequência central do RTL-SDR, ajusta o filtro passa-banda e o circuito misturador do dispositivo, como demonstrado na Figura 3. Para os sinais aquisitados no dispositivo RTL-SDR, foi utilizado o valor absoluto do formato I/Q. A Figura 8 contém a imagem do dispositivo RTL-SDR utilizado e seus comandos básicos.

Figura 8 – Dispositivo RTL-SDR DVB-T+DAB+FM utilizado e sua tabela de comandos.

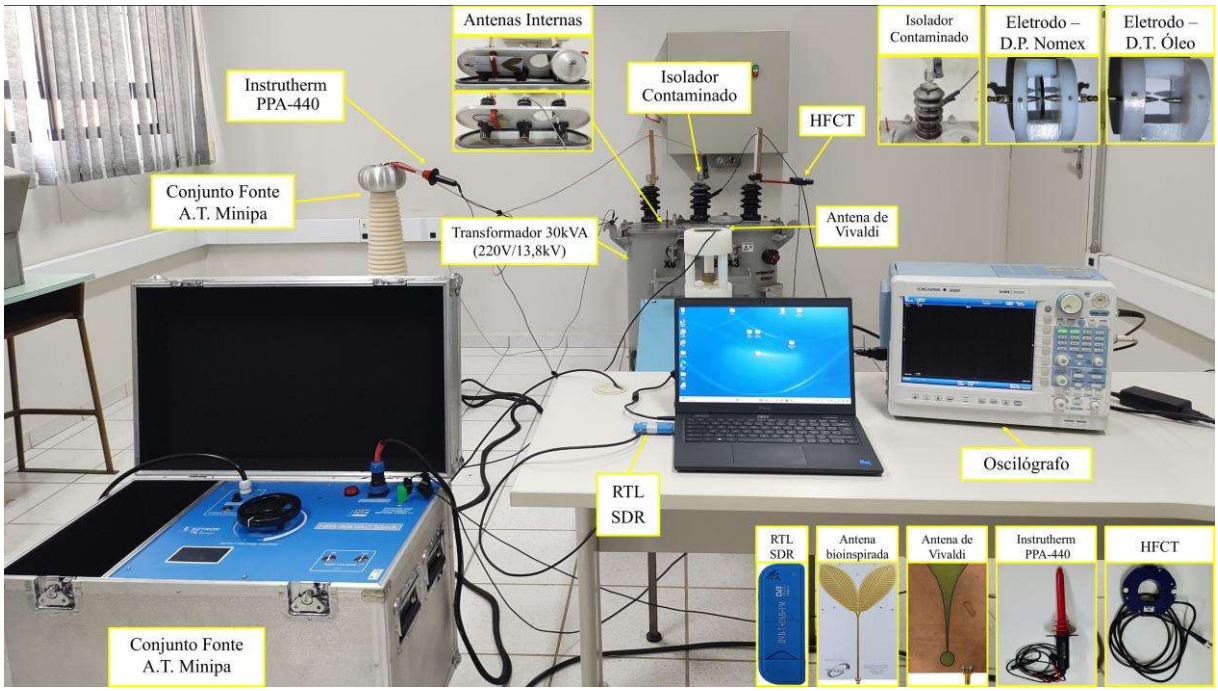


Comandos rtl_sdr	
-f	Frequência central sintonizada em Hz.
-s	Taxa de amostragem (Padrão: 2048000 Hz).
-d	Especifica qual dispositivo RTL-SDR usar (Padrão: 0).
-g	Ajuste do ganho do receptor (Padrão: 0 para Auto.).
-p	Ajusta o erro de frequência, PPM (Padrão: 0).
-b	Define o tamanho do *buffer* (Padrão: 16 * 16384).
-n	Define o número de amostras a capturar (Padrão: 0, infinito).
-S	Força a saída síncrona (Padrão: Assíncrona).
-D	Ativa o modo de amostragem direta (Padrão: desativado).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a condição de descarga parcial superficial no isolador do transformador foram aquisitados 50 sinais de descargas para cada frequência sintonizada no RTL-SDR. As frequências escolhidas tiveram como base o estudo proposto por Tenbohlen et al. (2023), que constatou que a faixa ótima para medições de falhas em transformadores por UHF fica entre 400 MHz e 900 MHz. Desta forma, como o RTL-SDR sintoniza o sinal em apenas uma frequência por vez, optou-se pelos seguintes valores: 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. Assim, para cada frequência sintonizada, foi realizado 50 aquisições de sinais. A Figura 9 ilustra a configuração de ensaios utilizando a antena de Vivaldi.

Figura 9 - Foto da configuração utilizada no ensaio com antena de Vivaldi.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tais ensaios foram repetidos substituindo a antena de Vivaldi por uma antena bioinspirada, como é possível visualizar na Figura 10, realizando-se 30 aquisições de sinais com a nova antena.

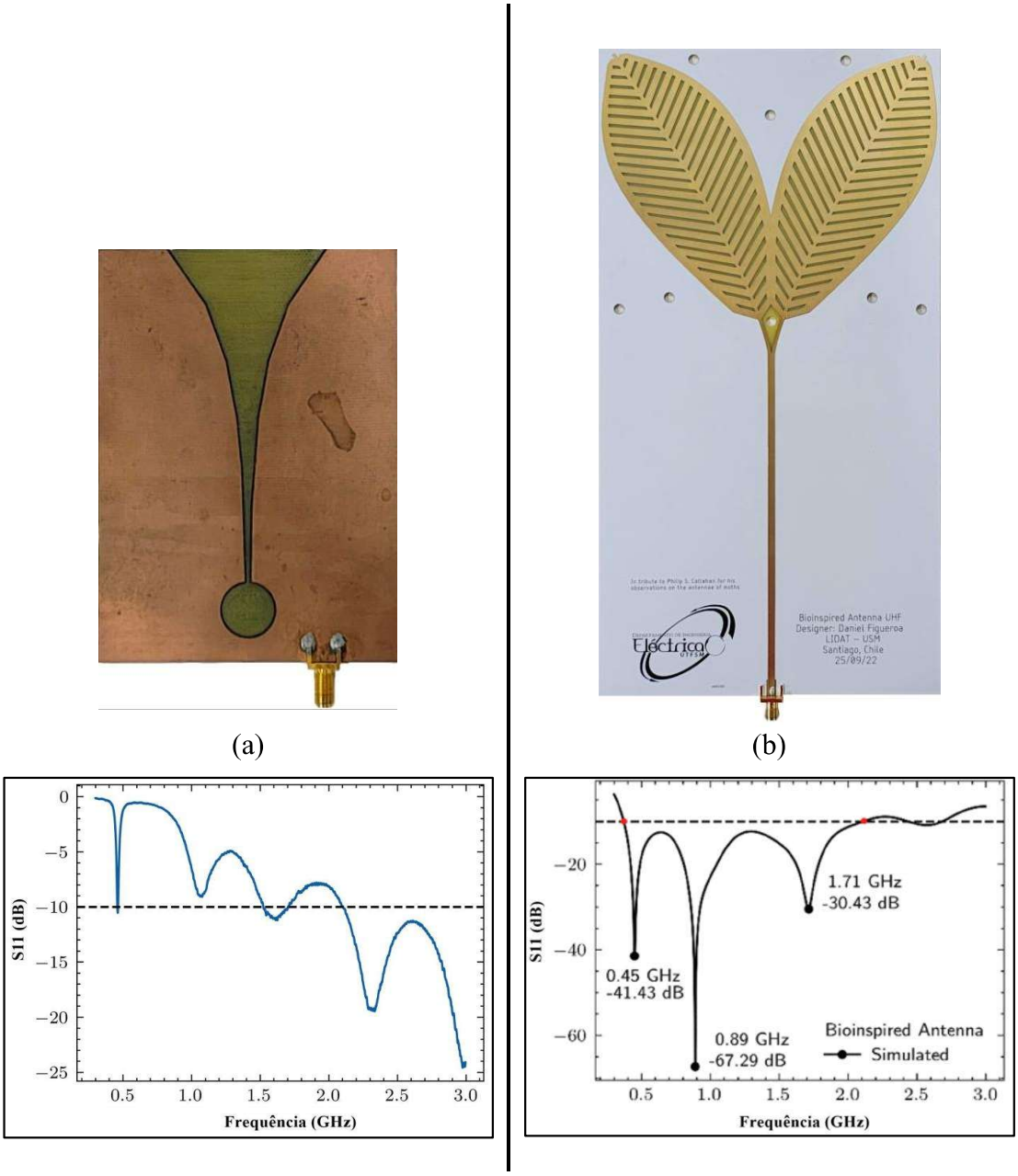
Figura 10 - Foto da configuração utilizada no ensaio com antena bioinspirada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As antenas de Vivaldi e bioinspirada são apresentadas nas Figuras 11(a) e 11(b), respectivamente. O gráfico de reflexão da antena (parâmetro S11) da Vivaldi é apresentado na Figura 11(c) e o da antena bioinspirada na Figura 11(d), onde é possível observar que ambas as antenas apresentam picos de ressonância próximos às frequências escolhidas para os ensaios, 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz.

Figura 11 – Material utilizado. (a) Antena de Vivaldi; (b) Antena bioinspirada; (c) Parâmetro S11 da Antena de Vivaldi; (d) Parâmetro S11 da Antena bioinspirada.

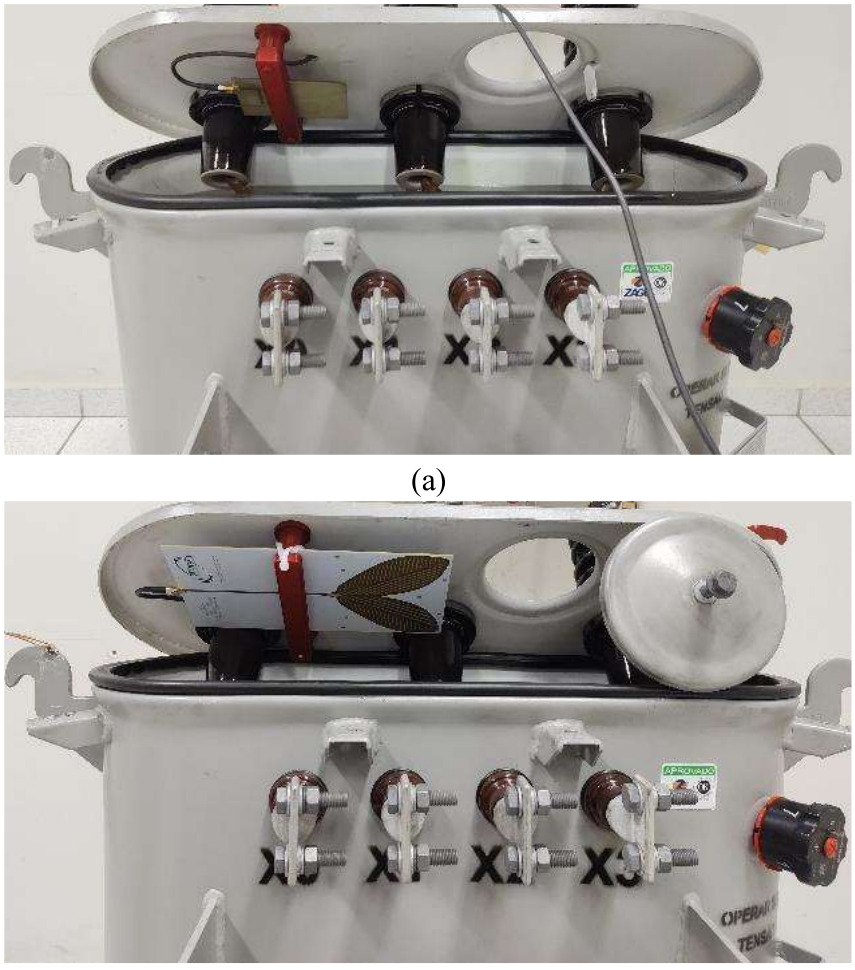


Fonte: Adaptado de (c) Schiewaldt et al. (2024), (d) Ardila-Rey et al. (2024).

5.1.2 Transformador Operando com Descargas Parciais em Papel

Para simular as condições de falhas de descargas parciais no isolante baseado em celulose, material dielétrico comumente empregado em enrolamentos, são necessárias duas modificações. A primeira modificação é a inserção da antena dentro do tanque do transformador, sem que ocorra o contato com o óleo isolante da máquina ou sua carcaça metálica. A fixação dessa antena foi feita utilizando um suporte confeccionado em material termoplástico do tipo PETG, conforme Figura 12.

Figura 12 – Instalação interna ao transformador. (a) Antena de Vivaldi;
(b) Antena bioinspirada.



(a)

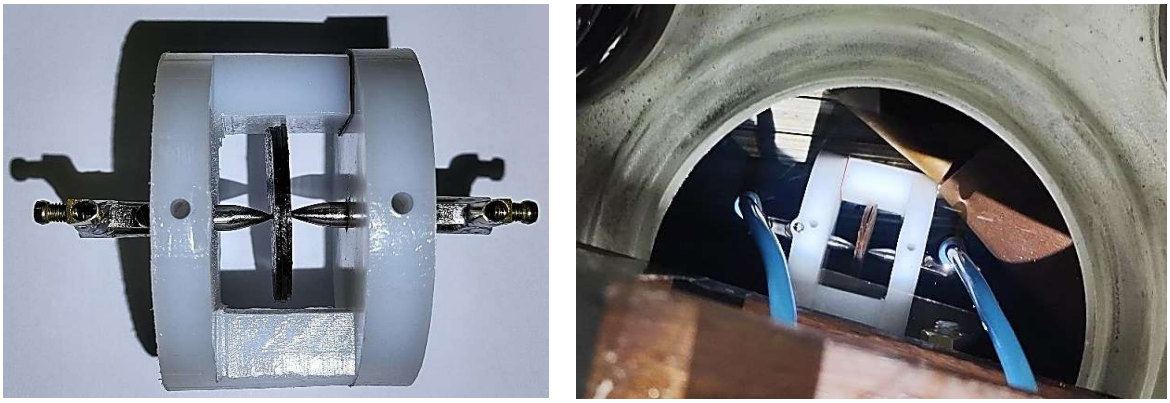
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A segunda modificação foi a necessidade da confecção de um eletrodo com o corpo feito de Nylon e em seu interior contendo duas pontas alinhadas e distanciadas através de ajustes mecânicos entre si, confeccionadas em aço inoxidável. Entre as ponteiras do eletrodo, foram

colocados três discos de isolante baseado em celulose, com aproximadamente 38 mm de diâmetro, previamente impregnados, durante 24 horas, em óleo mineral do próprio transformador, para serem utilizados como corpo de prova. Em seguida, os cabos da fonte de alta tensão são conectados aos terminais do eletrodo e este é submerso no tanque do transformador através da tampa de inspeção, de modo que os cabos da fonte de alta tensão ou o próprio eletrodo não entrem em contato com as partes metálicas da máquina elétrica ou a antena. A Figura 13(a) apresenta o eletrodo montado para a realização dos ensaios e a Figura 13(b) mostra o posicionamento do eletrodo no interior do transformador.

Figura 13 – Eletrodo. (a) Eletrodo montado com discos de isolante à base de celulose; (b) Eletrodo posicionado no interior do transformador.



(a) (b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o posicionamento dos materiais, a fonte de alta tensão é ligada e alimenta o eletrodo de maneira gradual. O fenômeno de descarga parcial no isolante baseado em celulose ocorreu com a tensão de alimentação variando de 10 a 15 kV. As aquisições foram iniciadas após a confirmação da ocorrência da falha, por meio da análise do padrão de impulso de corrente por fase de tensão, realizadas por meio do osciloscópio Yokogawa DL850. Em seguida, de maneira semelhante ao ensaio de descargas parciais no isolador, para cada frequência sintonizada no RTL-SDR, 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz, foram realizadas 50 aquisições de sinais para a antena de Vivaldi e mais 30 aquisições para a antena bioinspirada.

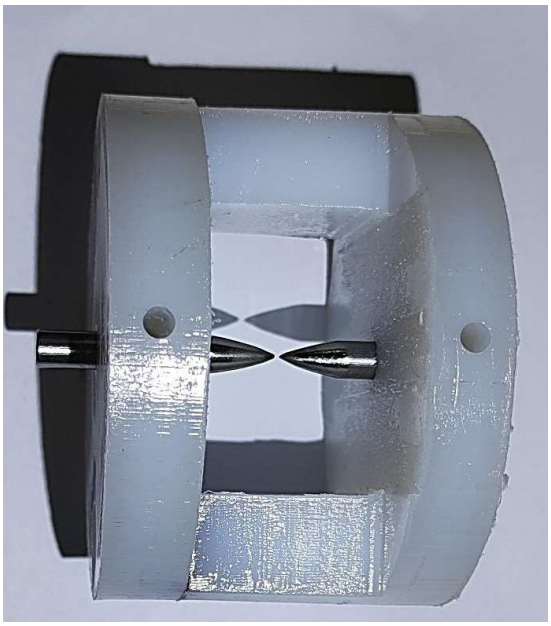
5.1.3 Transformador Operando com Descarga Total

A descarga total em um transformador ocorre quando há a ruptura ou a deterioração da camada isolante das espiras da máquina elétrica. Para emular este tipo de falha, a antena foi

mantida interna ao transformador, enquanto as ponteiras do eletrodo foram ajustadas com um espaçamento de 1 mm entre si, conforme apresentado pela Figura 14. Em seguida, o eletrodo foi submerso no óleo do transformador, de modo que não houvesse contato entre o eletrodo e a antena ou as partes metálicas da máquina elétrica.

A fonte de alta tensão foi acionada e o eletrodo alimentado de maneira gradual, com a tensão variando de 7,5 a 15 kV, até que o fenômeno de descarga total fosse confirmado pelo padrão de impulso de corrente por fase de tensão analisado através do osciloscópio Yokogawa DL850. Em seguida, o dispositivo RTL-SDR é sintonizado e aquisita 50 sinais para cada frequência utilizando a antena de Vivaldi, e 14 sinais para a antena bioinspirada. As frequências sintonizadas para as duas antenas foram: 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz.

Figura 14 – Eletrodo ajustado para ensaio de descarga total.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.4 Transformador Operando em Condição sem Falhas

Para emular a condição do transformador operando sem falha em cada caso descrito anteriormente, foi aplicada uma tensão no elemento de estudo de modo que não fossem produzidos padrões de impulsos de corrente por fase de tensão visualizados através do osciloscópio Yokogawa DL850. Esse ensaio garantiu que os objetos estudados estivessem energizados, sem produzir sinais de falhas. A aquisição desses dados é idêntica às realizadas

anteriormente, onde dispositivo RTL-SDR é sintonizado e aquisita 50 sinais para a antena de Vivaldi e 30 sinais para a antena bioinspirada, exceto para a condição de descarga total com a antena bioinspirada que utilizou 14 sinais, para cada uma das frequências sintonizadas, sendo elas: 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. Assim, os sinais coletados com origem UHF foram considerados ruído eletromagnético do ambiente laboratorial.

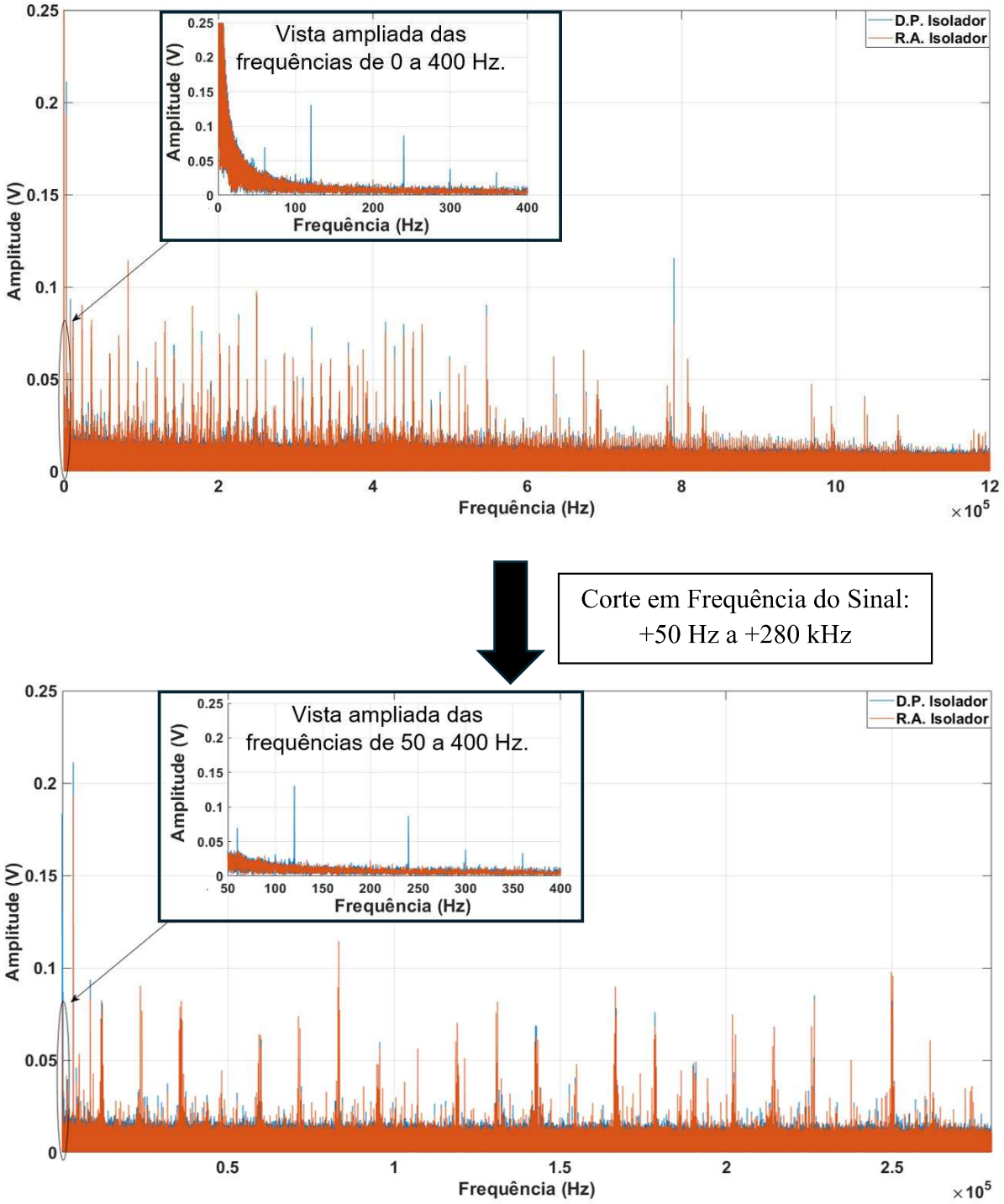
5.2. Método de Processamento de Dados

Como o foco central deste trabalho é avaliar a eficácia e eficiência da utilização de dispositivos RTL-SDR na identificação e classificação de descargas parciais e totais, incluindo a operação do transformador de potência em seu estado normal, todos os sinais aquisitados foram processados utilizando o software Matlab®.

Para cada sinal IQ aquisitado, foi extraído seu valor absoluto e, em seguida, a sua transformada de Fourier. Para evitar efeitos de amplitudes, foi feita a normalização do sinal de modo que todos os seus valores fossem mantidos entre os valores de 0 e 1. Com o sinal normalizado, foi realizado um corte em frequência para evitar possíveis influências causadas pela amplitude da portadora do sinal. Independente da frequência central (portadora), a faixa selecionada se manteve em um valor padrão, sendo a frequência inicial igual à frequência da portadora mais 50 Hz e a frequência final igual à frequência da portadora mais 280 kHz. Após o corte, o sinal é normalizado novamente para que não ocorra influência das amplitudes e salvo na matriz pertencente à sua frequência e antena, ordenada em forma de linhas.

A Figura 15 ilustra um exemplo de um sinal aquisitado utilizando a antena de Vivaldi sintonizada em 500 MHz para detectar a falha de descarga parcial no isolador. O espectro em frequência do sinal de descarga parcial no isolador é identificado como “D.P. Isolador” e representado na cor azul, enquanto o espectro do sinal de ruído ambiente, correspondente à condição sem falha, é identificado como “R.A. Isolador” e representado na cor vermelha. É possível observar as amplitudes da portadora, no início do sinal, removidas após o processo de corte do sinal em frequência.

Figura 15 – Exemplo do corte em frequência de um sinal de Descarga Parcial no Isolador com Antena de Vivaldi em 500 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o pré-processamento dos sinais, ou seja, a seleção de faixa de frequência e a normalização, foram criadas matrizes de falhas do transformador contendo os sinais aquisitados para as quatro condições do transformador de potência ensaiadas, que são os três tipos de falhas

e a condição normal de operação, para cada uma das seguintes frequências: 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. A Figura 16 ilustra dois exemplos da ordenação das tabelas de falhas do transformador para a antena de Vivaldi e bioinspirada para uma das frequências analisadas.

Figura 16 – Exemplo da ordenação dos dados aquisitados nas tabelas de frequências.

Antena de Vivaldi

FALHAS TRANSFORMADOR 400 MHZ	
00 – 49	Descarga Parcial no Isolador
50 – 99	Ruído Ambiente para Descarga Parcial no Isolador
100 – 149	Descarga Parcial Isolante a base de celulose
150 – 199	Ruído Ambiente para Descarga Parcial e Isolante à base de celulose
200 – 249	Descarga Total tipo D2
250 – 299	Ruído Ambiente para Descarga Total

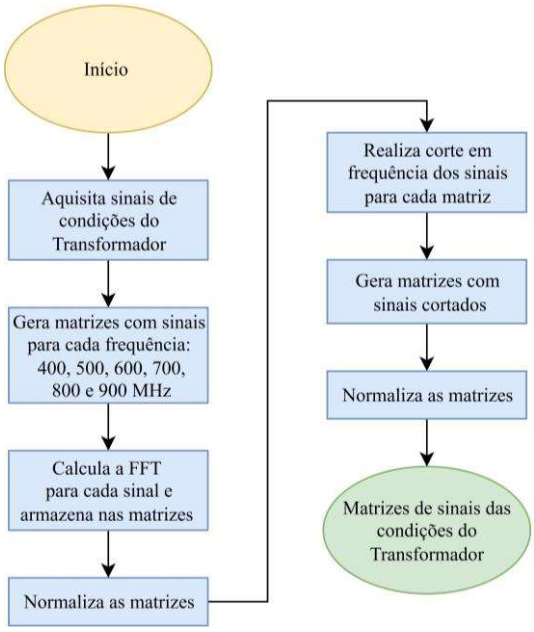
Antena bioinspirada

FALHAS TRANSFORMADOR 400 MHZ	
00 – 29	Descarga Parcial no Isolador
30 – 59	Ruído Ambiente para Descarga Parcial no Isolador
60 – 99	Descarga Parcial Isolante a base de celulose
100 – 129	Ruído Ambiente para Descarga Parcial e Isolante à base de celulose
130 – 143	Descarga Total tipo D2
144 – 157	Ruído Ambiente para Descarga Total

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para facilitar a compreensão dos tratamentos iniciais dos dados aquisitados, a Figura 17 apresenta um fluxograma do pré-processamento dos sinais de falha provenientes dos ensaios.

Figura 17 - Fluxograma do pré-processamento dos sinais de falhas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das matrizes de falhas contendo os espectros dos sinais pré-processados, inicialmente foi aplicada a ferramenta de mapas de *Power Ratio* (mapa PR), uma técnica convencional para análise de sinais de falhas em transformadores de potência. Cada sinal foi dividido em duas bandas de frequência, *power ratio* para baixas frequências (*PRL*) e *power ratio* para altas frequências (*PRH*). Através dessa técnica foram geradas novas matrizes contendo, para cada frequência e antena do ensaio, os parâmetros PR de baixa e alta frequência. Cada linha dessa nova matriz, que antes representava um sinal, após a aplicação da técnica mapa PR, representa um par de coordenadas no sistema cartesiano. As matrizes foram normalizadas eliminando possíveis efeitos de amplitude, e permitem a criação de mapas auto-organizáveis na classificação das falhas em transformadores.

Além do mapa PR, a técnica de Análise de Componentes Principais, ou PCA (em inglês, *Principal Component Analysis*) foi aplicada nas matrizes de falhas de transformador. Esta ferramenta matemática é capaz de reduzir um grande conjunto de dados variáveis em um conjunto menor, mantendo a maior parte da informação em suas primeiras componentes. As novas matrizes PCA foram formadas com as Componentes Principais 1 e 2 de cada sinal de falha de sua matriz original, para cada antena e para as seguintes frequências: 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz. Da mesma forma que o mapa PR, cada linha da matriz PCA, que foi normalizada, possui duas colunas e também forma um ponto no sistema cartesiano.

E por fim, foram calculadas as estatísticas *Skewness*, que indica a assimetria do sinal, a *Kurtosis*, que caracteriza o achatamento do sinal e por último o valor RMS que indica a potência efetiva do sinal. Essas três métricas foram calculadas para cada matriz de falhas de transformador, e formaram as matrizes de estatísticas para cada frequência analisada. Posteriormente as matrizes de estatísticas também foram normalizadas e formaram mapas bidimensionais auto-organizáveis nas seguintes combinações: valor RMS x *Skewness* e valor RMS x *Kurtosis*.

Com o objetivo de avaliar a capacidade das técnicas aplicadas na classificação das condições de falhas do transformador, o método de comparação utilizado foi o de distância euclidiana entre os centroides de cada cluster formado pelos tipos de falhas nos mapas auto-organizáveis. Para cada conjunto de dados gerados pelos tipos de falhas, foram extraídos os centroides, ou seja, a média das coordenadas de cada ponto que forma o agrupamento das falhas, a partir da equação (11) e (12):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \tag{11}$$

$$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + \cdots + y_n}{n} \tag{12}$$

Onde $\bar{x}$ é a coordenada média no eixo x , $x_1 + x_2 + \cdots + x_n$ representa a soma do conjunto de valores no eixo x e n o número total de elementos nesse conjunto. Da mesma forma, $\bar{y}$ é a coordenada média no eixo y , $y_1 + y_2 + \cdots + y_n$ representa a soma do conjunto de valores no eixo y e n o número total de elementos nesse conjunto.

A partir dos centroides calculados, foi aplicada a fórmula da distância euclidiana, dada pela equação (13) para os pontos $P(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ e $Q(y_1, y_2, \ldots, y_n)$ em um espaço de n-dimensões.

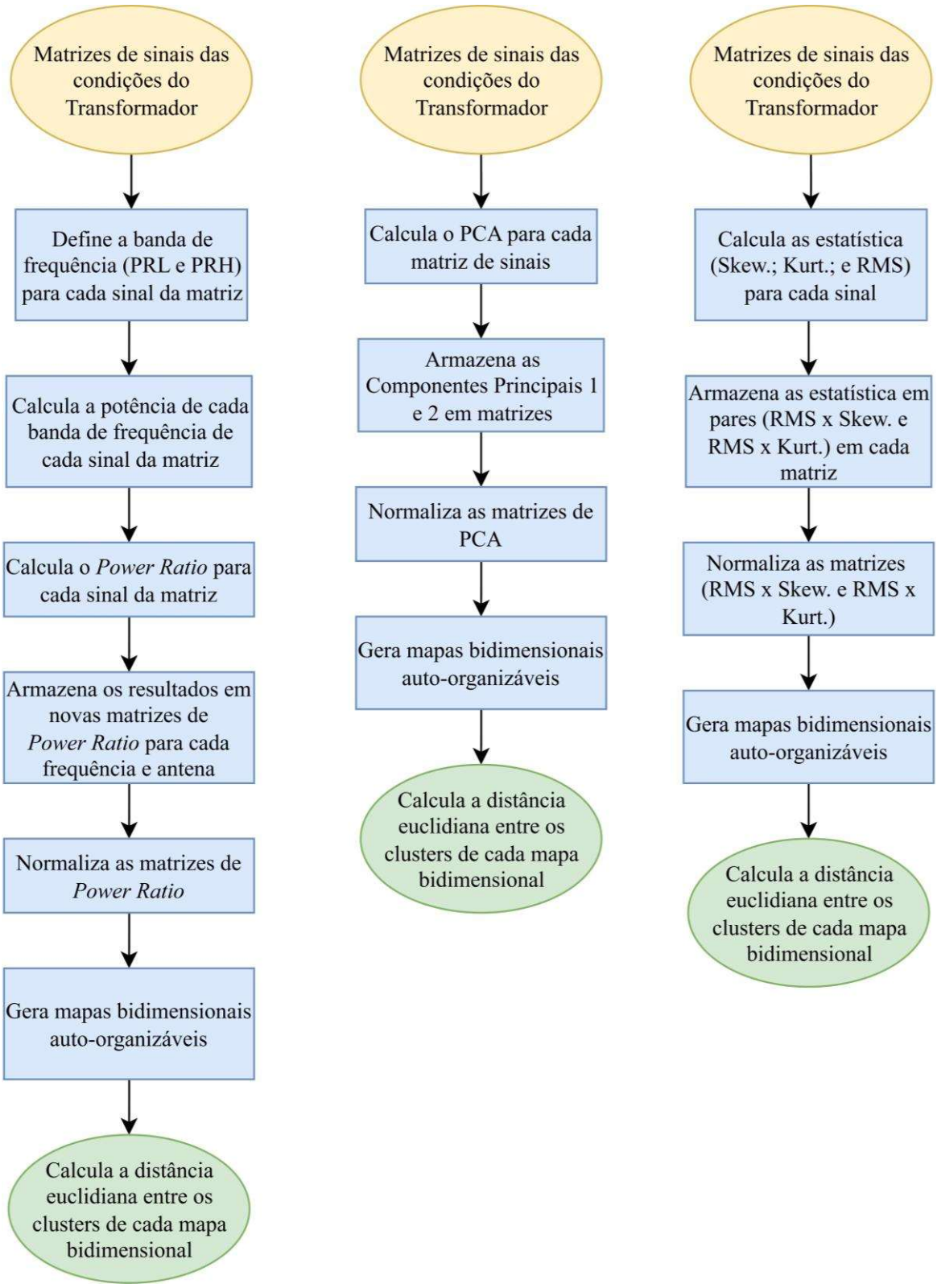
$$(P, Q) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \cdots + (x_n - y_n)^2} \tag{13}$$

Onde $P(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ é o ponto médio em um espaço de n-dimensões com a coordenada x, e da mesma forma, $Q(y_1, y_2, \ldots, y_n)$ é ponto médio para coordenada y.

Através dos valores de distâncias euclidianas dos clusters presentes nos mapas bidimensionais auto-organizáveis, é possível avaliar a capacidade de classificação das falhas para cada técnica aplicada no processamento de sinais para as frequências estudadas. Quanto maior a distância entre os clusters, maior será a capacidade de separação da técnica analisada.

A Figura 18 apresenta três fluxogramas para facilitar a compreensão das técnicas de processamento de sinais utilizadas na classificação de falhas em transformadores. A Figura 18(a) mostra o fluxograma para o cálculo do *Power Ratio* dos sinais ensaiados, a Figura 18(b) refere-se ao cálculo da Análise de Componentes Principais (PCA), e a Figura 18(c), ao cálculo das estatísticas *Skewness*, *Kurtosis* e valor RMS.

Figura 18 – Fluxogramas para cálculos: (a) Power Ratio; (b) PCA; (c) Estatística Skewness, Kurtosis e Valor RMS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

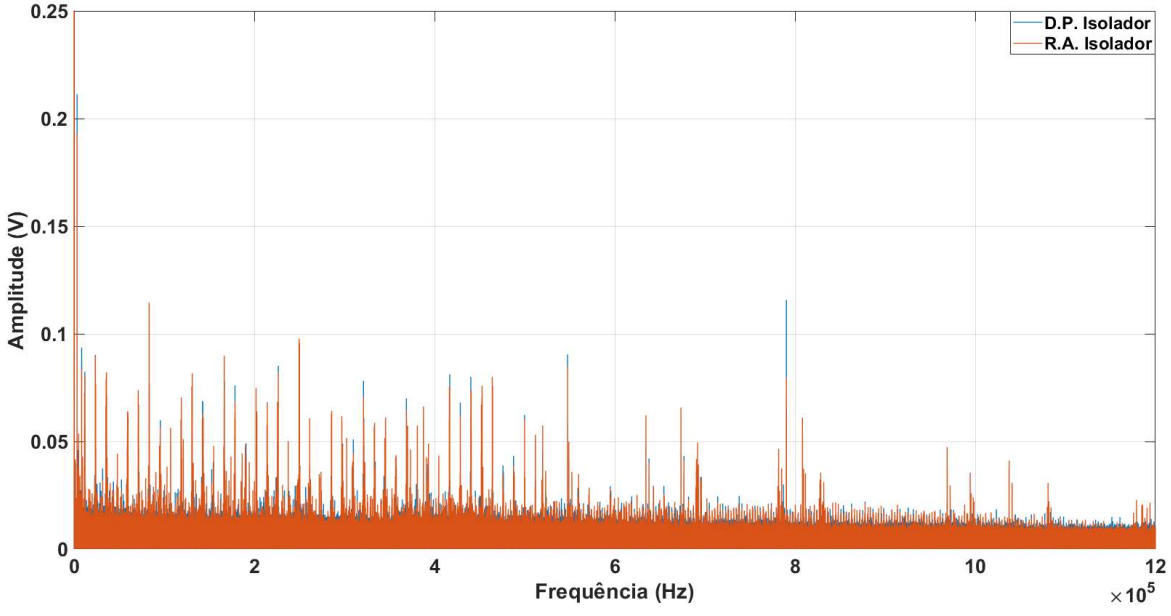
6. RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através do processamento dos dados coletados durante os ensaios. Primeiro, é feita uma análise e a discussão dos sinais em frequência aquisitados pelo RTL-SDR para as quatro condições estudadas. Na sequência são apresentados os resultados das três técnicas de classificação de falhas aplicadas. Por último, é realizado um estudo comparativo entre as técnicas de classificação utilizadas.

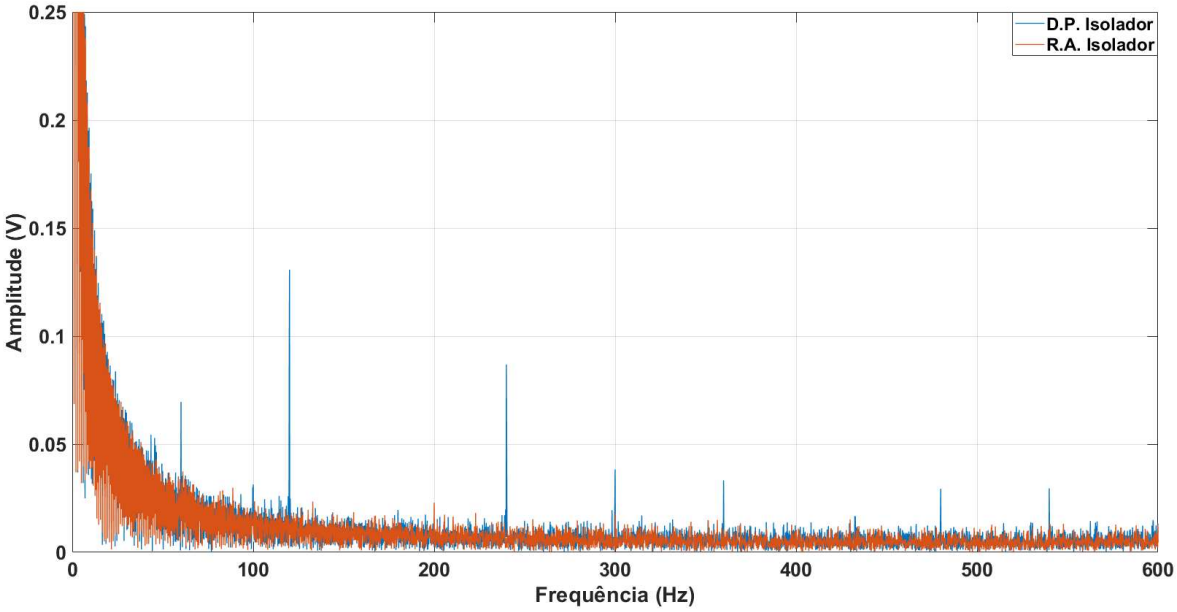
6.1. Espectro de Frequências dos Sinais Aquisitados pelo RTL-SDR

As Figuras 19, 20 e 21 apresentam uma amostra das transformadas de Fourier de cada valor absoluto dos sinais IQ UHF aquisitados pelo dispositivo RTL-SDR, sintonizado em 500 MHz, de cada condição estudada utilizando a antena de Vivaldi. As condições são: transformador operando em condição de descarga parcial no isolador, descarga parcial em isolante à base de celulose, descarga total no óleo e operação sem falha. Para facilitar a visualização e comparação entre as falhas e operação normal do transformador, cada gráfico nas Figuras 19, 20 e 21 inclui o sinal de ruído ambiente, que corresponde à condição de operação sem falha do transformador.

Figura 19 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 500 MHz de descarga parcial no isolador utilizando a antena de Vivaldi. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador.



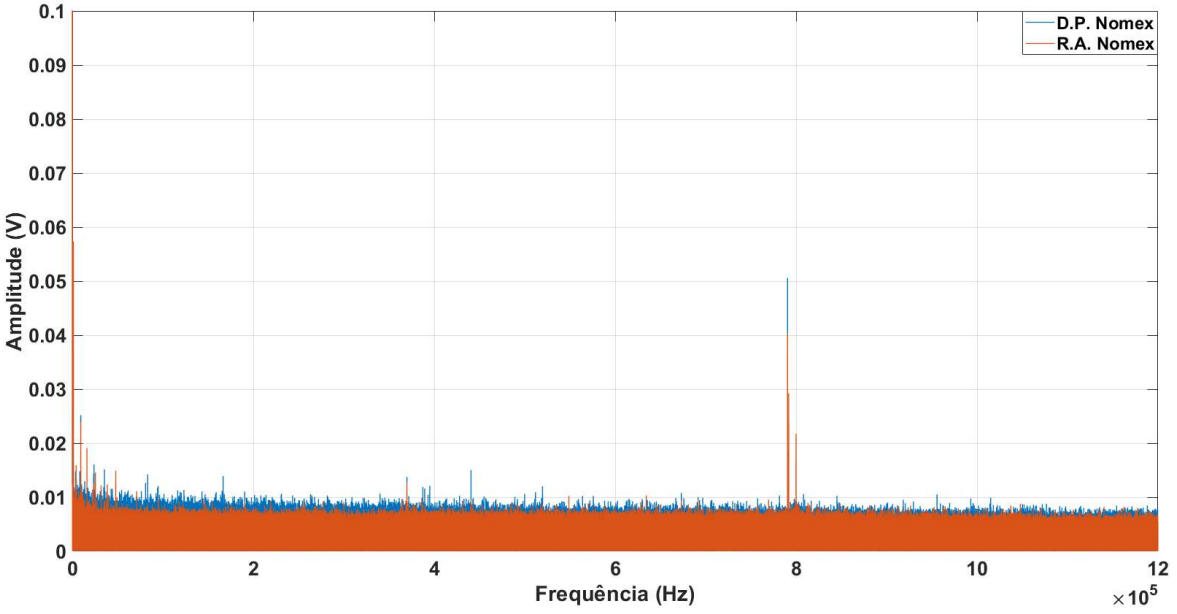
(a)



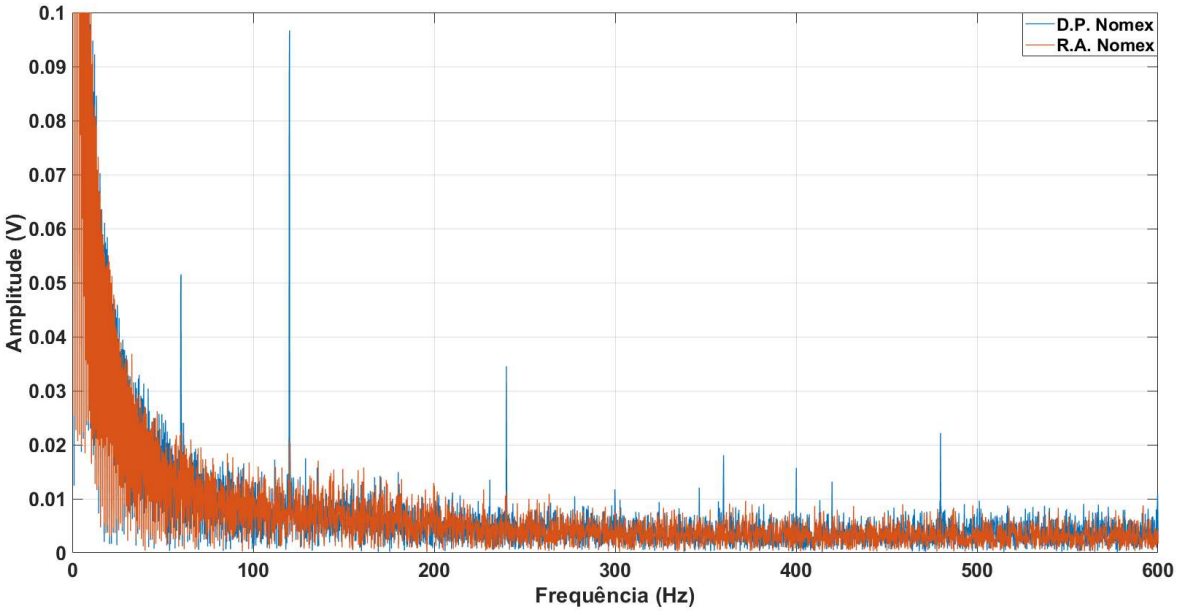
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 500 MHz de descarga parcial no isolante à base de celulose utilizando a antena de Vivaldi. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel.



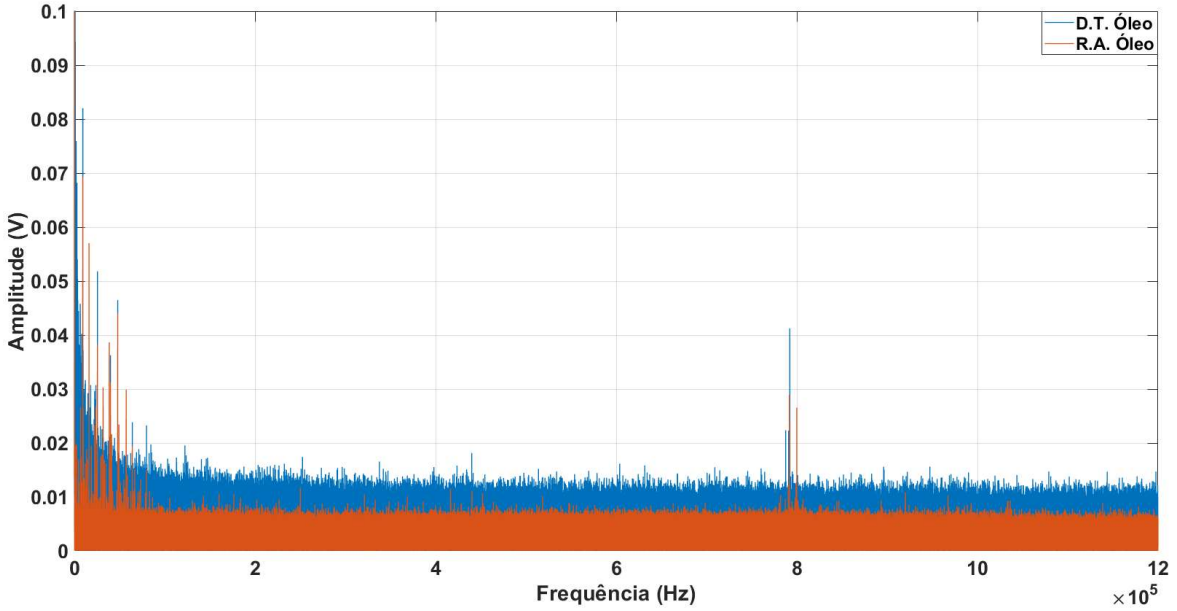
(a)



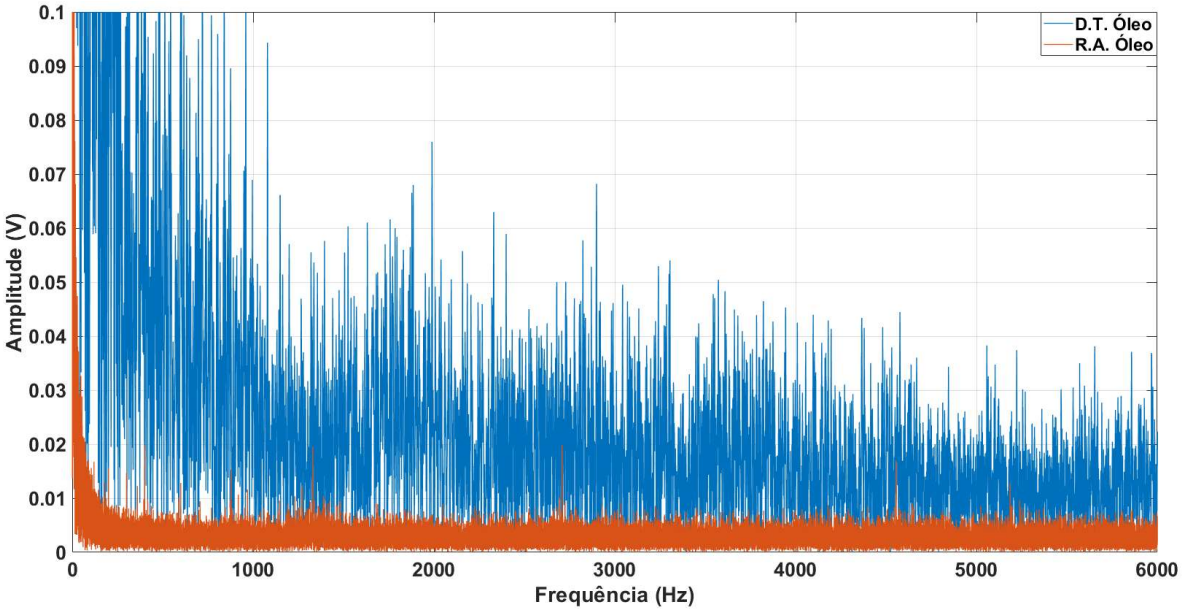
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 500 MHz de descarga total utilizando a antena de Vivaldi. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A Óleo – Ruído ambiente do Óleo.



(a)

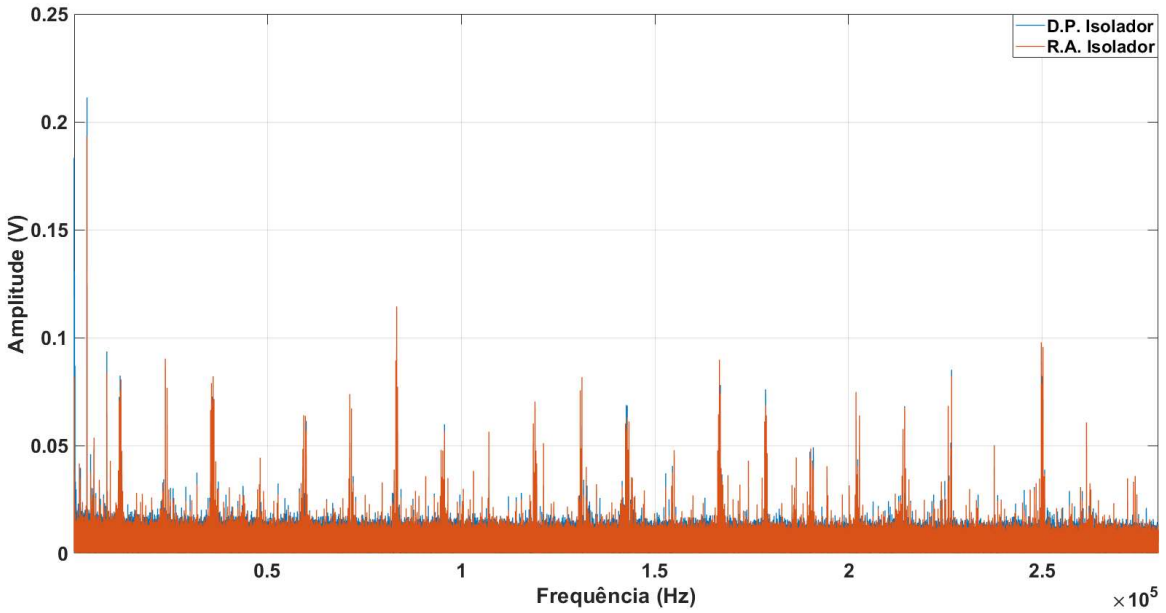


(b)

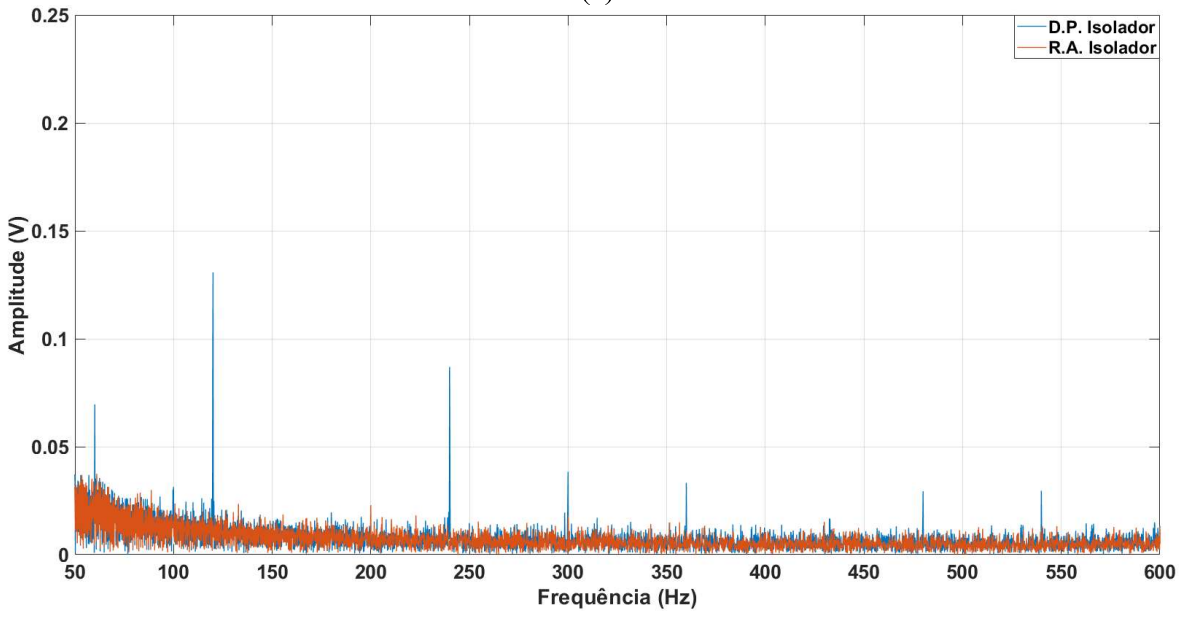
Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 19, 20 e 21 possuem escalas relativas no eixo das ordenadas, onde o valor 0 da frequência corresponde ao valor de frequência da portadora sintonizada no RTL-SDR, neste caso 500 MHz. Dada a diferença de escala entre a portadora e o restante do sinal, e o fato de que a maior parte da informação está contida próxima à portadora, optou-se por utilizar uma faixa do sinal que vai de +50 Hz a +280 kHz acima da frequência da portadora. As faixas de análise dos sinais são apresentadas nas Figuras 22, 23 e 24.

Figura 22 - Sinal UHF processado para a antena de Vivaldi em 500 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolador. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador.



(a)



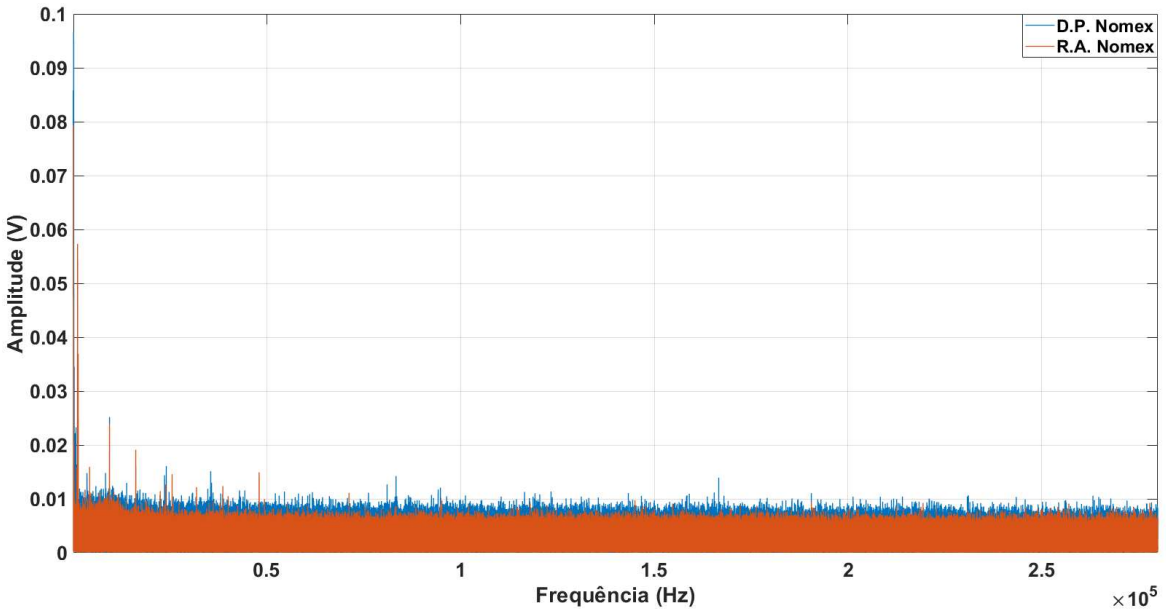
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

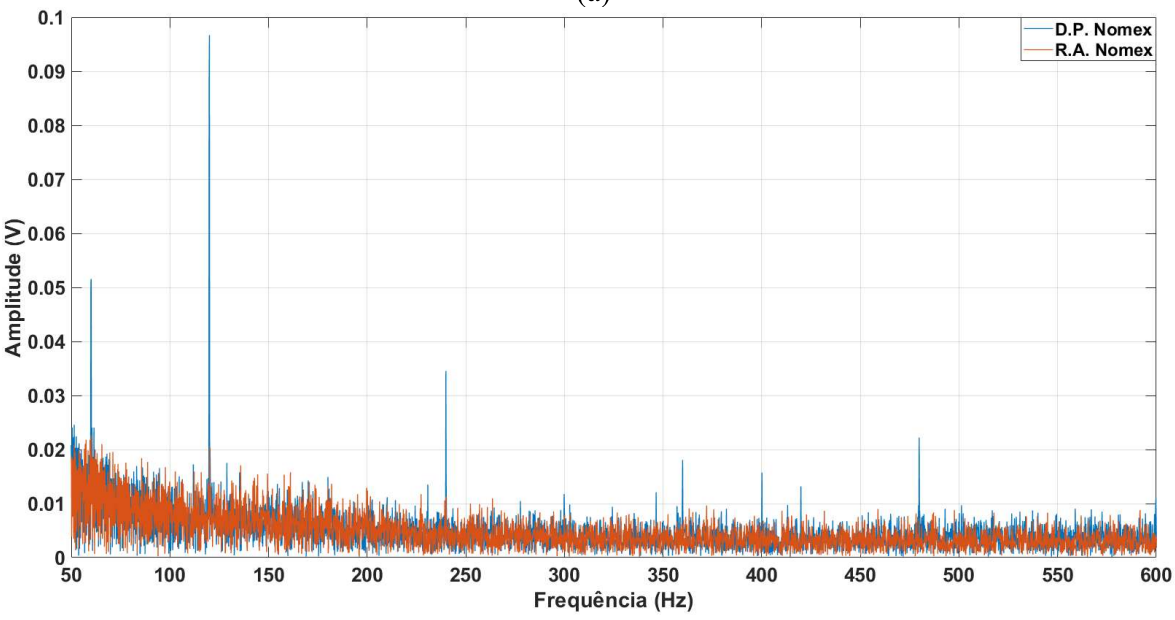
Analisando a Figura 22 , referente à operação do transformador com condição de descarga parcial no isolador (sinal azul) e ruído eletromagnético ambiente (sinal vermelho), é possível notar que próximo à frequência da portadora, há picos de sinais em algumas das frequências múltiplas de 60 Hz, sendo mais visíveis: 60 Hz, 120 Hz, 240 Hz e 300 Hz. Como a antena está fixada externamente ao transformador, é possível notar a presença de vários picos

ao longo do sinal, tanto na condição de descarga parcial no isolador quanto na condição de ruído ambiente, que não fornecem informações úteis para a detecção de falha, comportando-se apenas como um ruído ambiente.

Figura 23 - Sinal UHF processado para a antena de Vivaldi em 500 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolante à base de celulose. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel.



(a)

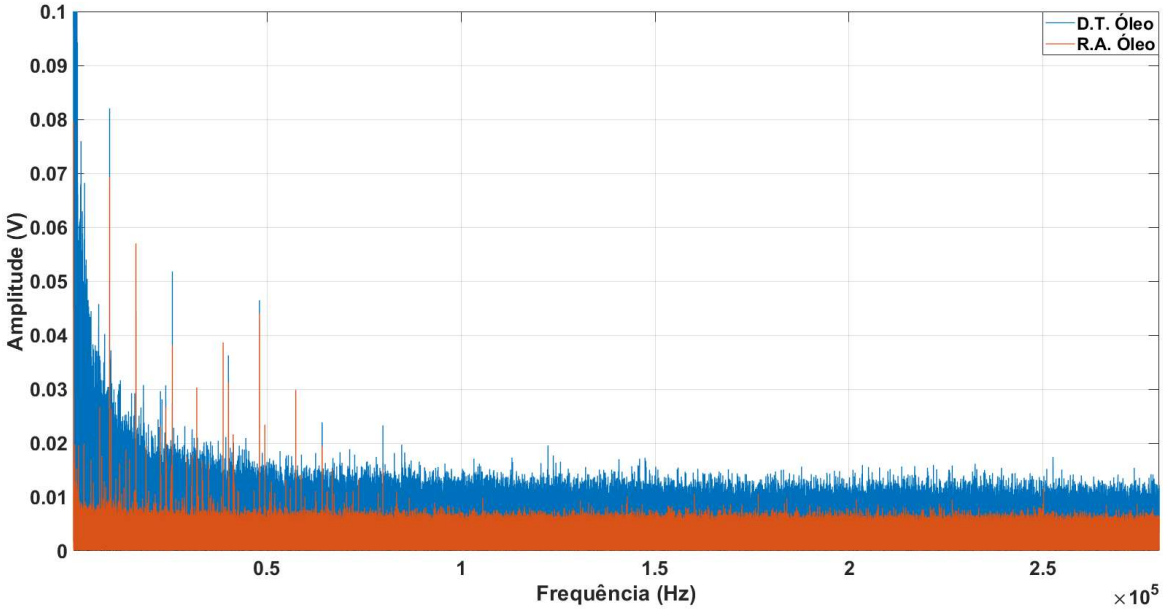


(b)

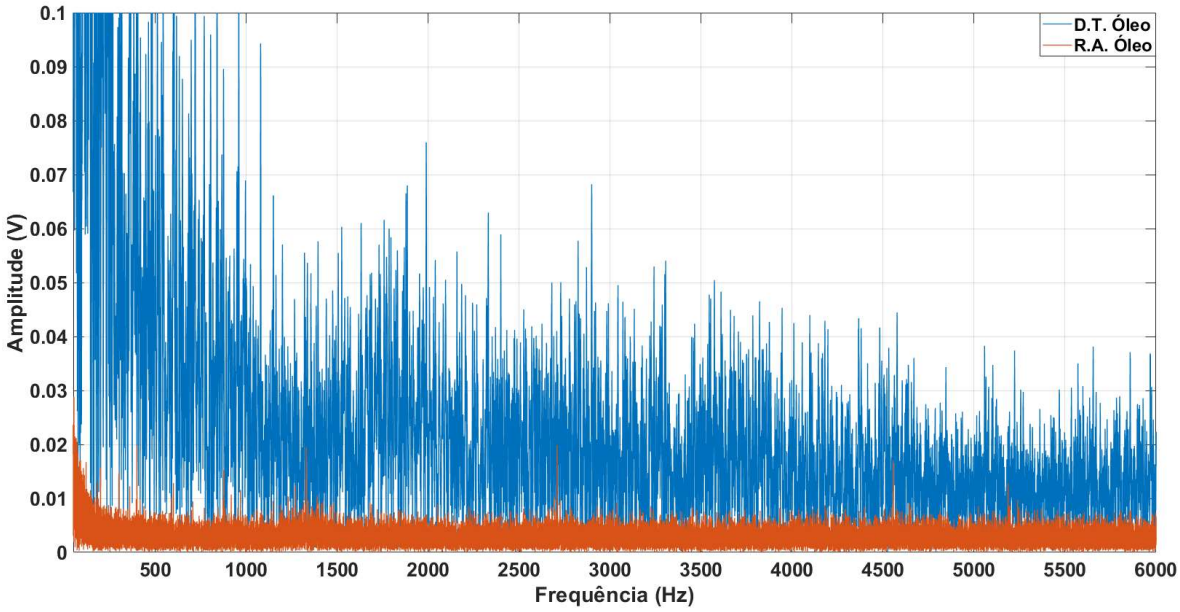
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 23 apresenta os sinais do transformador operando sob condição de descarga parcial no isolante à base de celulose, sendo os sinais da descarga parcial e do ruído ambiente apresentados em azul e vermelho, respectivamente. De maneira semelhante à Figura 22, é perceptível a presença de picos característicos próximos à frequência da portadora em alguns valores múltiplos de 60 Hz, onde os mais aparentes são: 60 Hz, 120 Hz e 240 Hz. Uma vez que a antena está fixada internamente ao transformador, a carcaça metálica aterrada funciona como uma gaiola de Faraday, eliminando a presença de picos ocasionados por ruído eletromagnético ambiente ao longo dos sinais.

Figura 24 - Sinal UHF processado para a antena de Vivaldi em 500 MHz para transformador operando em condição de descarga total. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A. Óleo – Ruído Ambiente do Óleo.



(a)



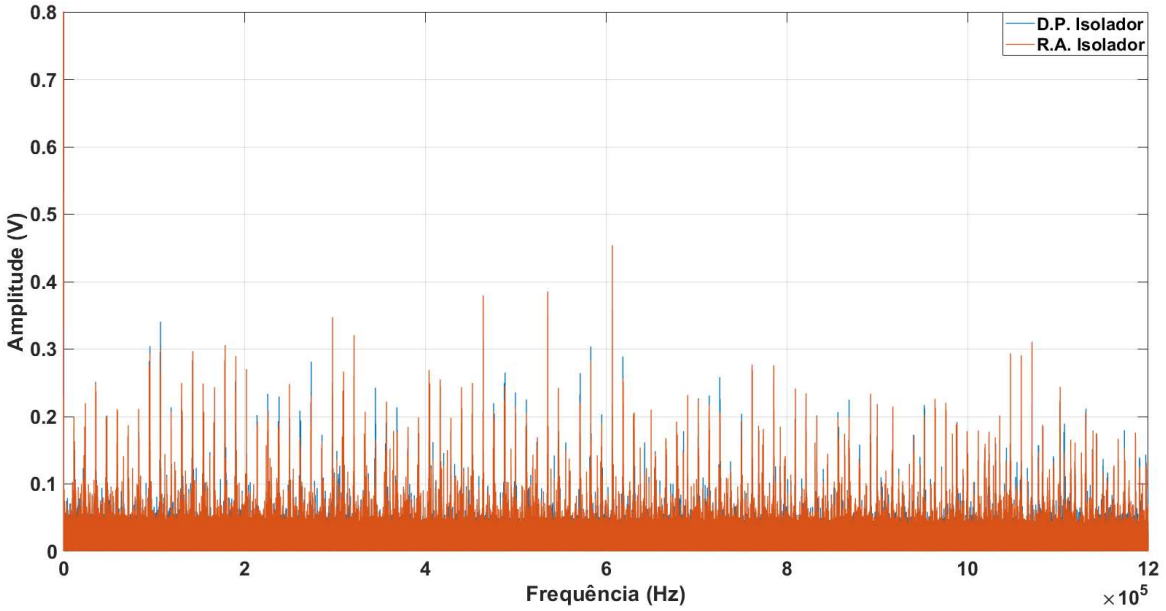
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

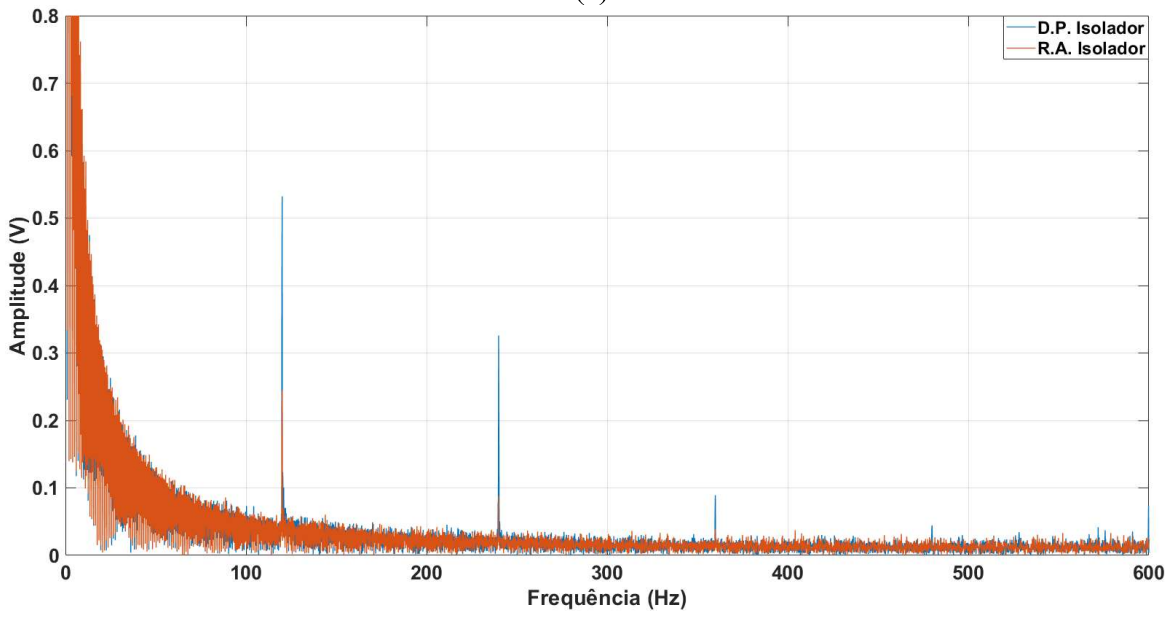
Por fim, a Figura 24 contém o sinal do transformador operando sob condição de descarga total, onde o sinal de descarga total está representado pela cor azul e o sinal de ruído ambiente está representado pela cor vermelha. Em contraste com os sinais de descarga parcial no isolador e no isolante à base de celulose apresentados, durante a ocorrência da descarga total observa-se uma elevação em toda a amplitude do sinal aquisitado, em comparação ao ruído eletromagnético ambiente, sobretudo na região próxima à portadora que demonstra uma maior concentração de energia em relação aos outros dois tipos de falhas.

Para a antena bioinspirada, as Figuras 25, 26 e 27 apresentam uma amostra das transformadas de Fourier de cada sinal UHF aquisitado pelo dispositivo RTL-SDR, sintonizado em 600 MHz, para as condições estudadas: transformador operando em condição de descarga parcial no isolador, descarga parcial em isolante à base de celulose, descarga total no óleo e operação sem falha. Para facilitar a visualização e comparação entre as falhas e operação normal do transformador, cada gráfico nas Figuras 25, 26 e 27 inclui o sinal de ruído ambiente, que corresponde à condição de operação sem falha do transformador.

Figura 25 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 600 MHz de descarga parcial no isolador utilizando a antena bioinspirada. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador.



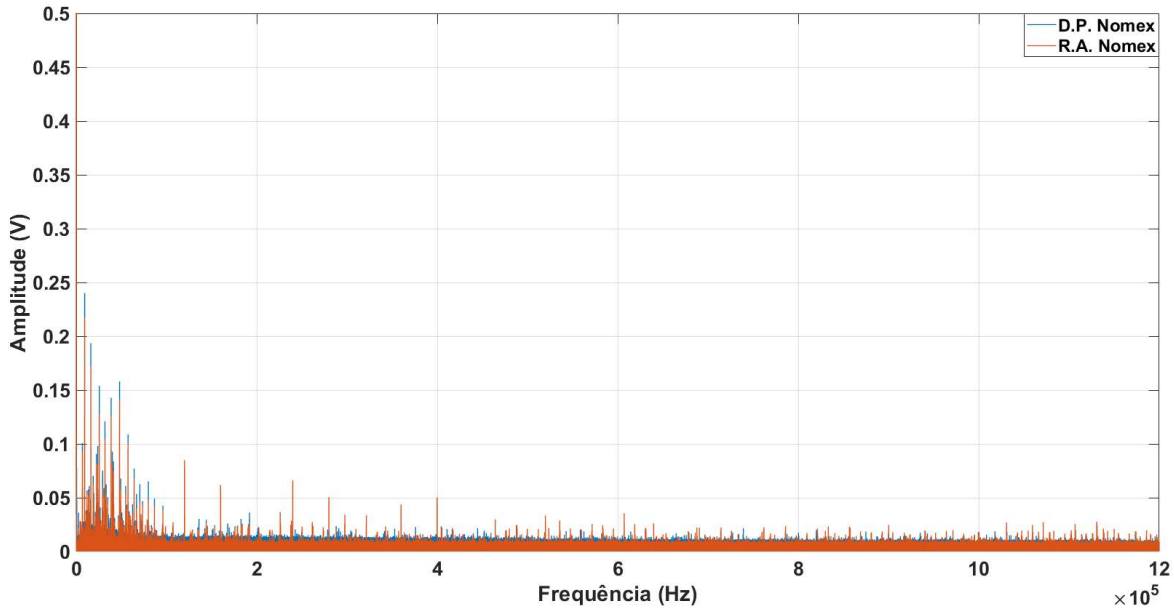
(a)



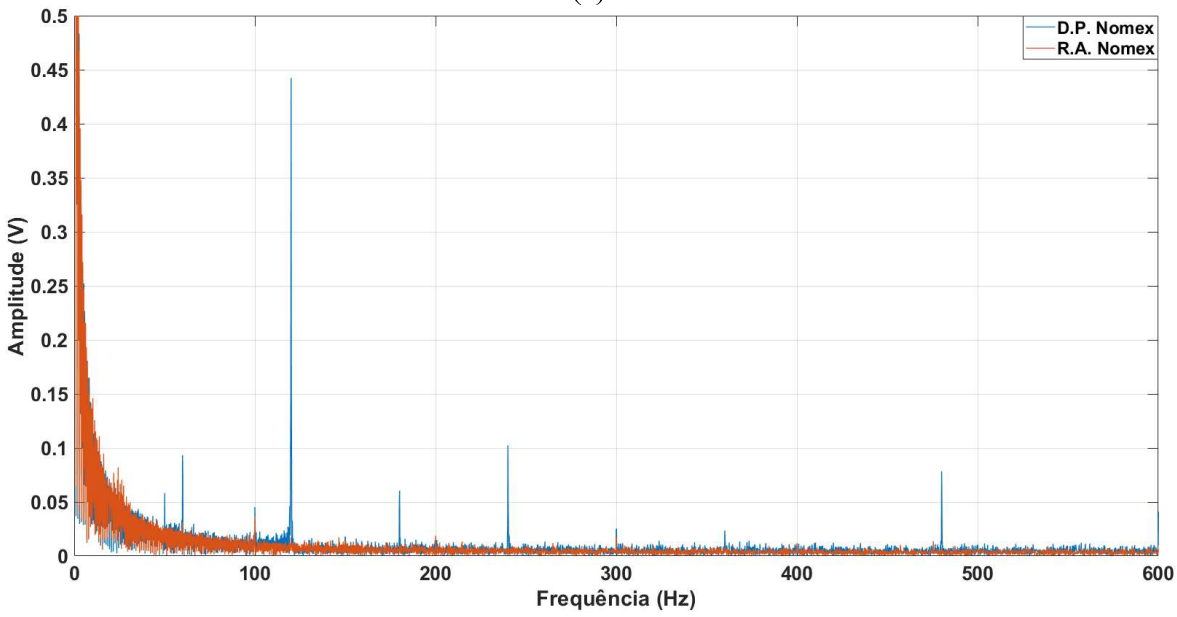
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 600 MHz de descarga parcial no isolante à base de celulose utilizando a antena bioinspirada. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel.



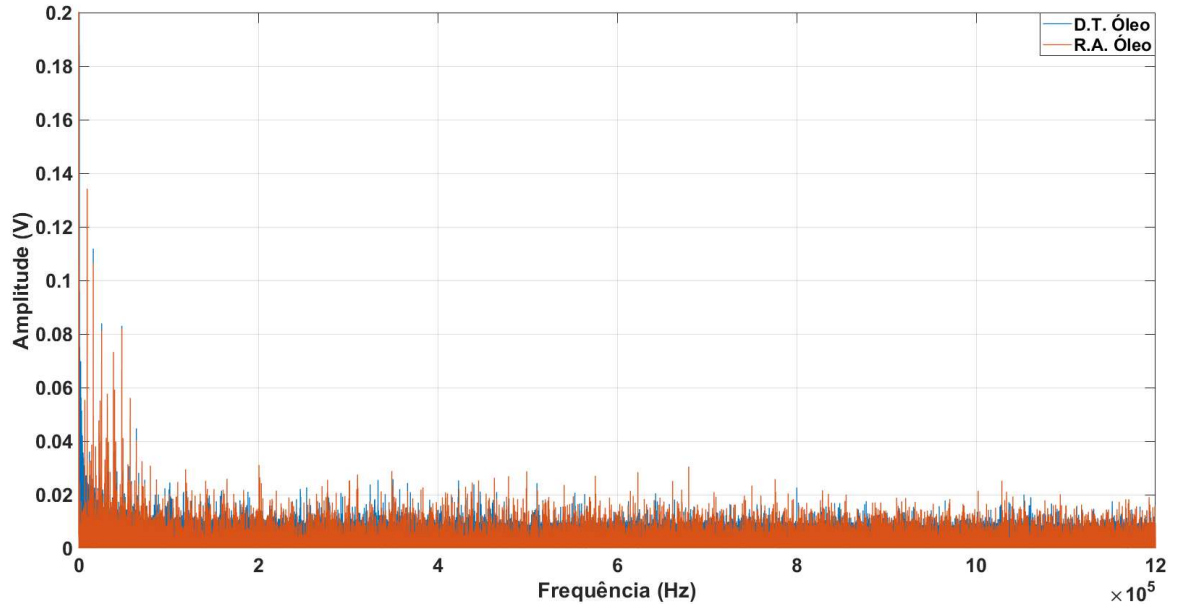
(a)



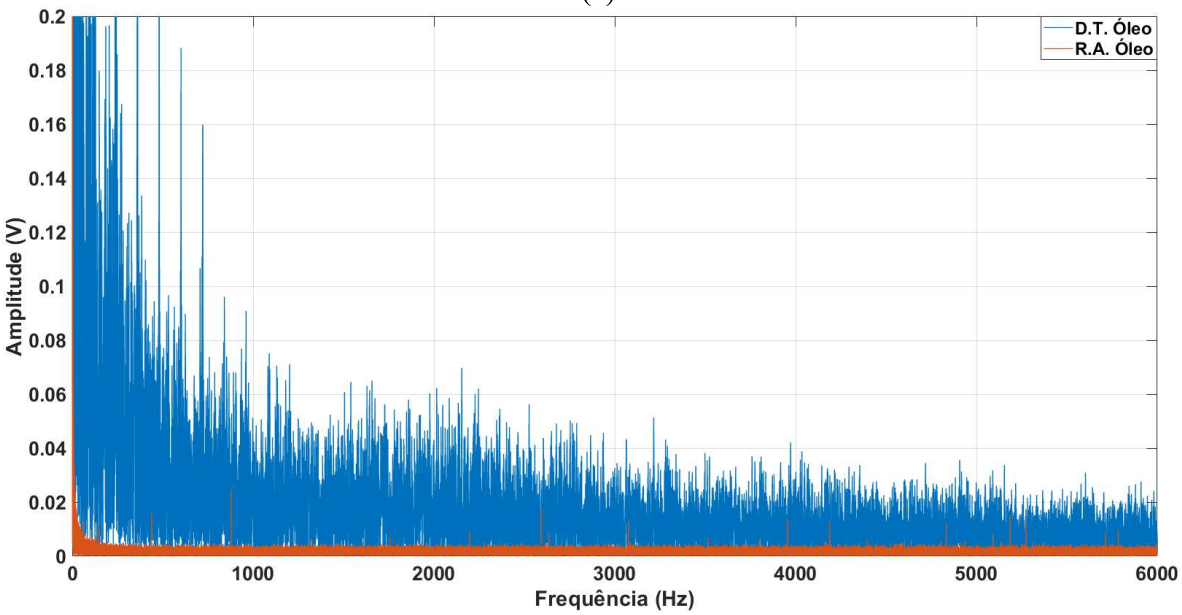
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 - Espectro de uma amostra do sinal UHF completo em 600 MHz de descarga total utilizando a antena bioinspirada. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A. Óleo – Ruído Ambiente do Óleo.



(a)



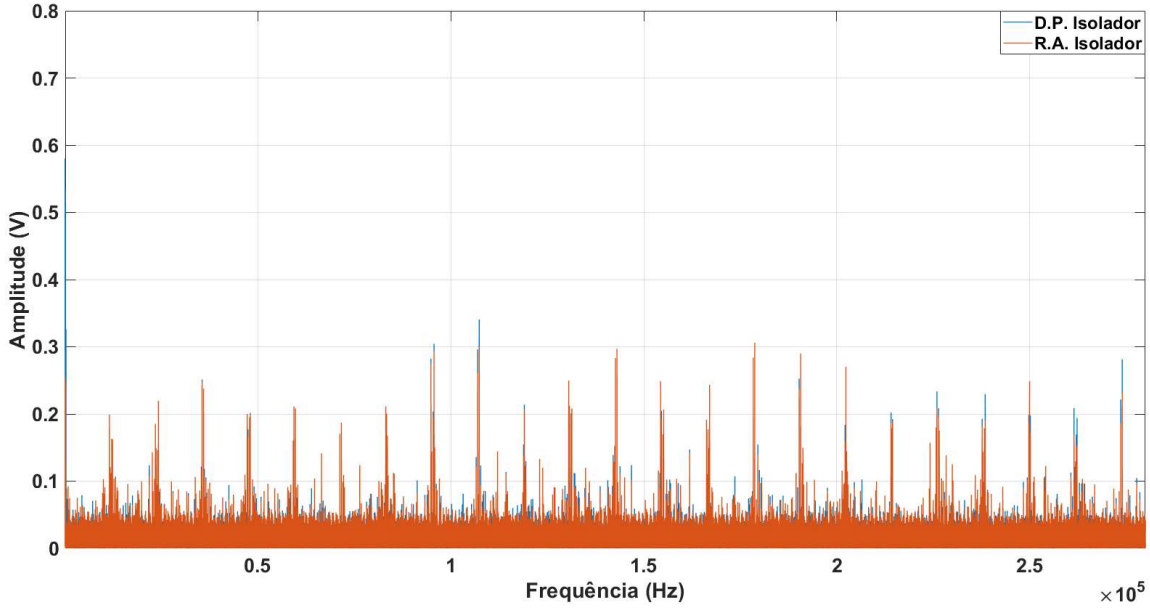
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

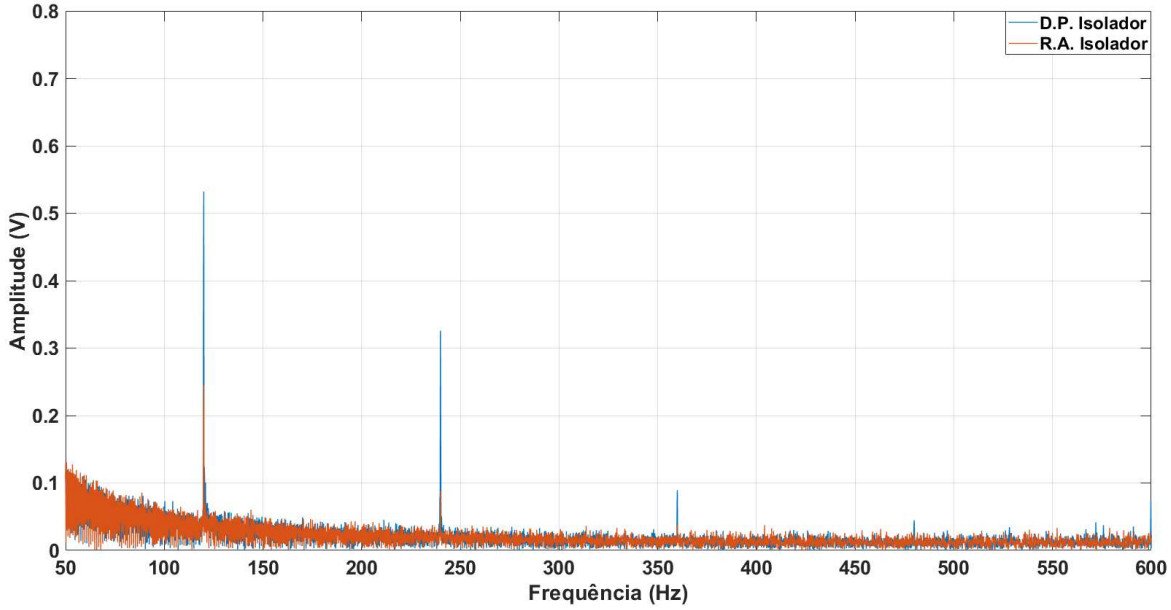
Os gráficos das Figuras 25, 26 e 27, também possuem escalas relativas no eixo das ordenadas, onde o valor 0 da frequência corresponde ao valor de frequência da portadora sintonizada no RTL-SDR, neste caso 600 MHz. Em conformidade com a análise dos sinais aquisitados utilizando a antena de Vivaldi, foi realizado um corte em frequência que vai de +50

Hz a +280 kHz acima da frequência da portadora. A Figura 28 apresenta a faixa de frequência do sinal utilizado no processamento.

Figura 28 - Sinal UHF processado para a antena bioinspirada em 600 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolador. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Isolador – Descarga Parcial no Isolador; R.A. Isolador – Ruído Ambiente do Isolador.



(a)



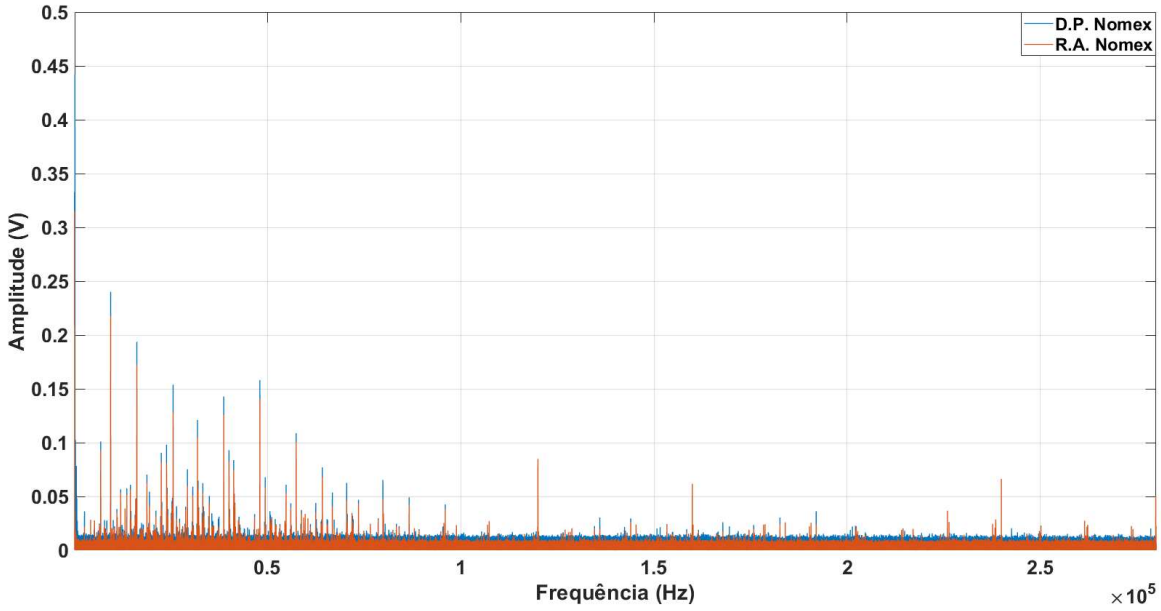
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

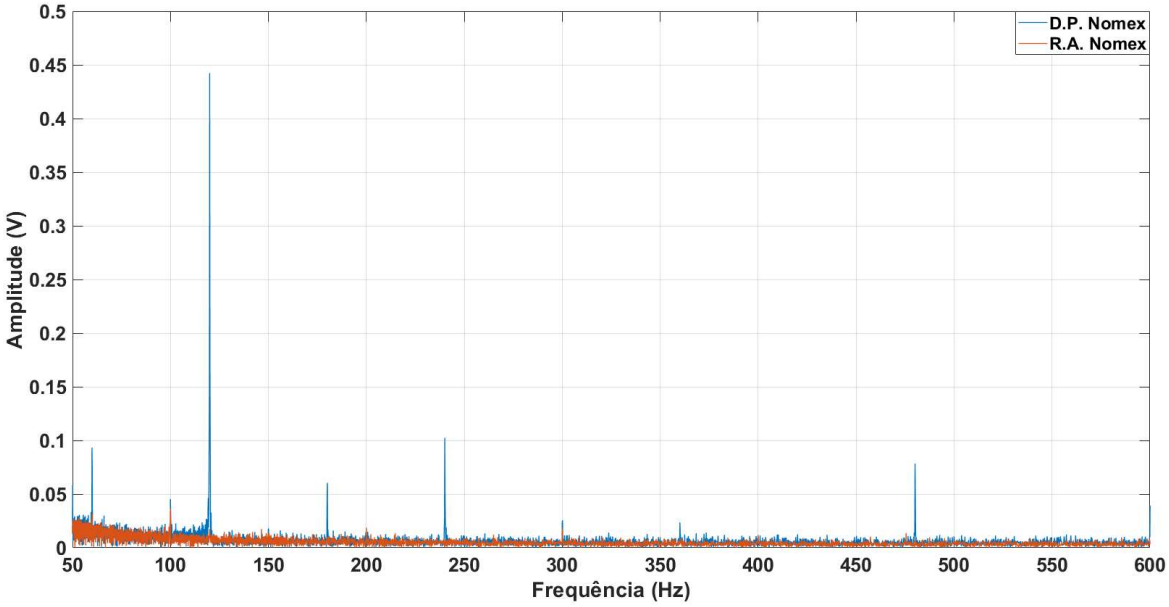
De forma análoga à análise realizada nos sinais aquisitados com a antena de Vivaldi, a Figura 28 apresenta o transformador operando sob a condição de descarga parcial no isolador

(sinal azul) e ruído eletromagnético ambiente (sinal vermelho), porém com sinais aquisitados utilizando a antena bioinspirada. É possível visualizar a presença de picos de falha em algumas frequências múltiplas de 60 Hz, onde as mais visíveis são: 120 Hz, 240 Hz e 300 Hz. Também há a presença de picos ao longo dos sinais de condição de descarga parcial e ruído ambiente, devido ao fato de a antena estar instalada externamente ao transformador, ficando suscetível a captar interferências de radiofrequência provenientes do ambiente. A Figura 29 apresenta a faixa de frequência do sinal utilizado no processamento.

Figura 29 - Sinal UHF processado para a antena bioinspirada em 600 MHz para transformador operando em condição de descarga parcial no isolante à base de celulose. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.P. Nomex – Descarga Parcial no Papel; R.A. Nomex – Ruído Ambiente do Papel.



(a)

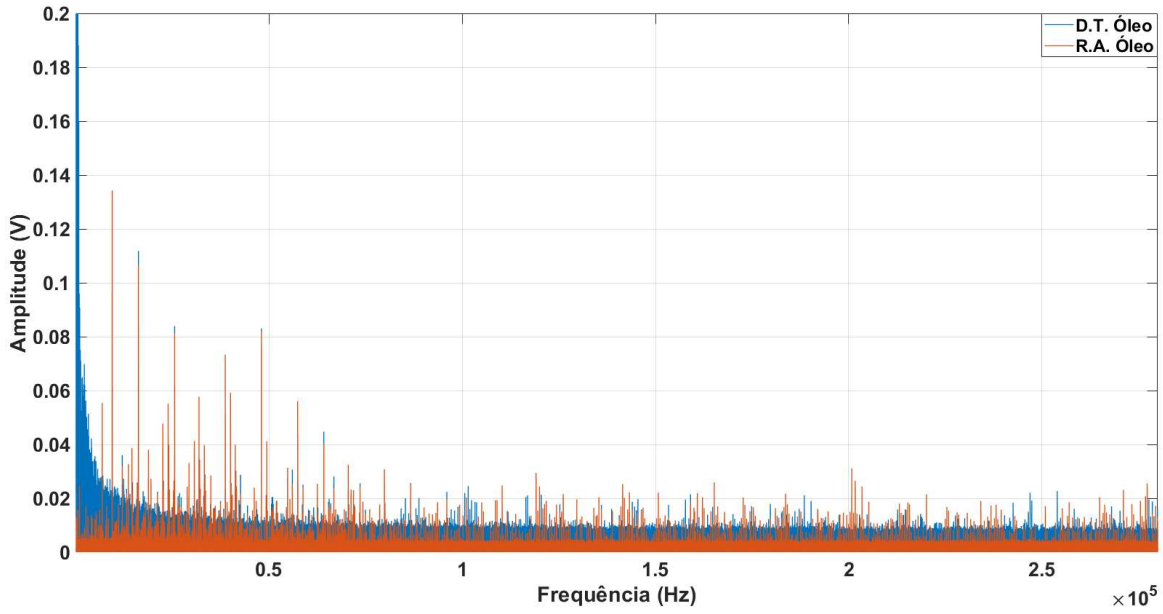


(b)

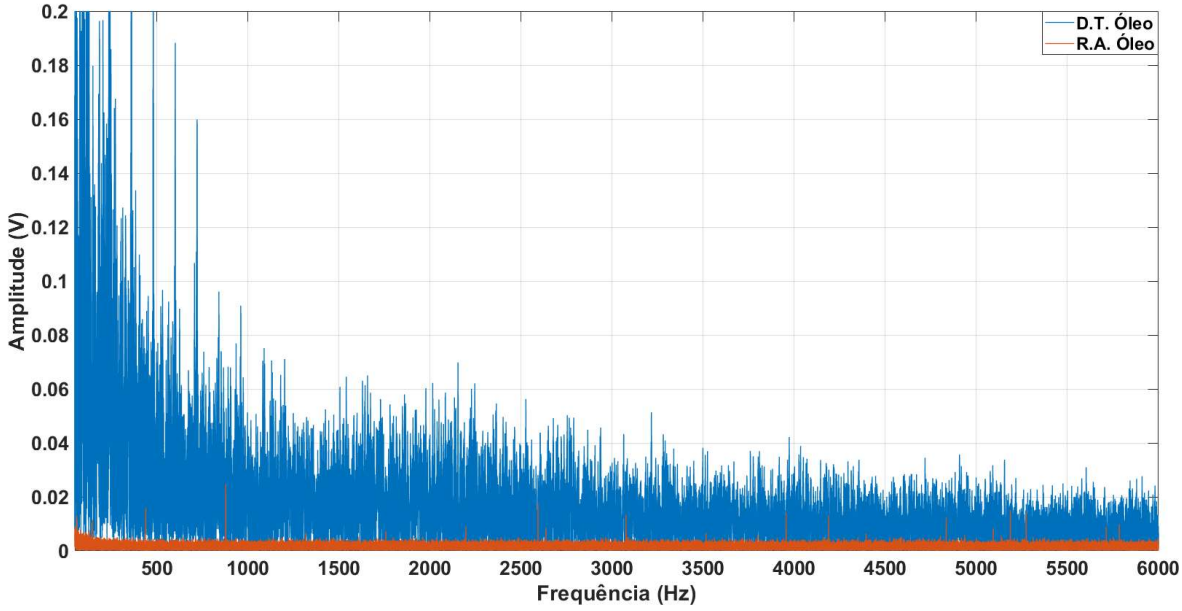
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 29 contém os sinais de falha e de ruído ambiente apresentados em azul e vermelho, respectivamente, do transformador operando sob condição de descarga parcial no isolante à base de celulose. É possível visualizar a presença dos picos múltiplos de 60 Hz próximos à portadora do sinal, de valores: 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz e 240 Hz. Devido a antena estar instalada internamente no transformador e sua carcaça atuar como uma gaiola de Faraday, não se observa muitos picos de ruído ambiente ao longo do sinal em relação ao ensaio quando a antena é instalada fora do transformador.

Figura 30 - Sinal UHF processado para a antena bioinspirada em 600 MHz para transformador operando em condição de descarga total. (a) espectro de interesse e (b) ampliação do espectro de interesse após o corte em frequência. D.T. Óleo – Descarga Total no Óleo; R.A. Óleo – Ruído Ambiente do Óleo.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Já a Figura 30 mostra o transformador operando sob condição de descarga total, com os sinais de descarga total e ruído ambiente representados pela cor azul e vermelha, respectivamente. É perceptível que durante a ocorrência da descarga há um aumento da amplitude espectral do sinal aquisitado no momento da falha, sendo que a maior parte da energia

está concentrada próxima à região da portadora, se opondo aos sinais apresentados para as falhas do tipo descarga parcial.

6.1.1 Conclusão Parcial

A análise dos espectros em frequência dos sinais UHF aquisitados pelo dispositivo RTL-SDR, associado às antenas de Vivaldi e bioinspirada, permite distinguir as diferentes condições operacionais do transformador de potência, tanto em falha quanto em operação normal, mesmo após o corte em frequência de +50 Hz a +280 kHz acima da portadora. Os sinais de falha do tipo descarga parcial, no isolador ou em isolante baseado em celulose, apresentaram picos de amplitudes significativas em comparação com os sinais de operação normal do transformador. Já os sinais provenientes de falha tipo descarga total, apresentaram uma elevação da amplitude em toda a faixa analisada quando comparado aos sinais de operação normal.

6.2. Técnicas de Classificação de Falhas

A partir das análises realizadas nos sinais de cada tipo de falha no domínio da frequência para cada antena utilizada nos ensaios, demonstradas na seção anterior, é perceptível a diferença no caráter impulsivo e energético dos sinais para as descargas parciais e totais, indicando a possibilidade de classificação dos tipos de falhas presentes em transformadores de potência.

As técnicas de classificação de falhas em transformadores de potência são importantes, pois são capazes de identificar e determinar a natureza dos defeitos, fator primordial no planejamento de manutenção, uma vez que diferentes falhas requerem diferentes ações de manutenção. Diante disso, o presente trabalho propõe a comparação das seguintes técnicas de classificação de falhas em transformadores: mapa de *Power Ratio*, Análise de Componentes Principais e as estatísticas valor RMS, *Skewness* e *Kurtosis*, capazes de quantificar a magnitude e analisar o formato do sinal aquisitado. Os resultados obtidos pelas técnicas de classificação de falhas utilizadas são apresentados nos tópicos a seguir.

Observação: As tabelas de distâncias euclidianas nas subseções a seguir possuem algumas distâncias omitidas, simbolizadas por "-", dada a natureza simétrica das tabelas.

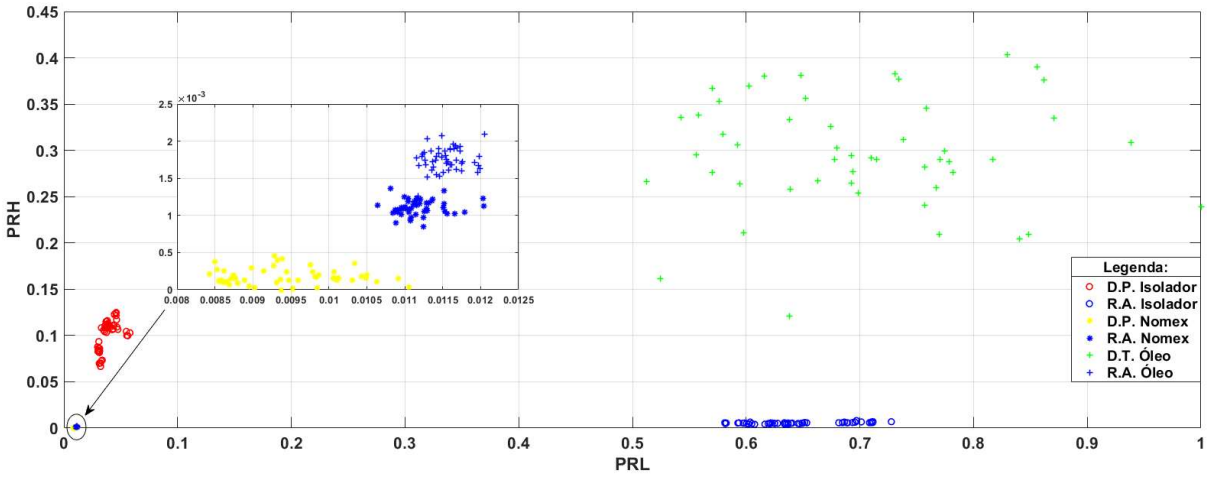
6.2.1 Mapa de Power Ratio

Inicialmente foi utilizada a técnica tradicional mapa de *Power Ratio* para a classificação de falhas em transformadores. Os dados normalizados para permitir a comparação entre as

frequências estudadas. Optou-se por apresentar os gráficos de mapa PR para as frequências de 400 MHz, 600 MHz e 700 MHz para a antena de Vivaldi, pois esses valores apresentaram os melhores resultados, ou seja, regiões bem definidas para a classificação de falhas. Por outro lado, para as frequências omitidas, 500 MHz, 800 MHz e 900 MHz para a antena de Vivaldi, não houve a formação de clusters bem definidos, ou seja, não foi possível classificar as falhas ocorridas.

A Figura 31 ilustra o mapa bidimensional formado através dos valores de *Power Ratio High* (*PRH*) e *Power Ratio Low* (*PRL*) para a antena de Vivaldi nas seguintes condições: Descarga Parcial no Isolador (D.P. Isolador), Ruído Ambiente do Isolador (R.A. Isolador), Descarga Parcial no Isolante à Base de Celulose (D.P. Nomex), Ruído Ambiente do Isolante à Base de Celulose (R.A. Nomex), Descarga Total no Óleo (D.T. Óleo) e Ruído Ambiente do Óleo (R.A. Óleo).

Figura 31 – Padrão formado pelo mapa PR para a antena de Vivaldi em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 31 contém o cruzamento dos valores de *Power Ratio* para a antena de Vivaldi sintonizada em 400 MHz, na condição D.P. Isolador, o *PRH* variou de 0,06656 a 0,1249, enquanto o *PRL* variou de 0,02967 a 0,05804. Já o R.A. Isolador teve o *PRH* variando de 0,00406 a 0,008054, enquanto o *PRL* variou de 0,5812 a 0,7276. A D.P. Nomex teve o *PRH* variando de 0 a 0,0004528, enquanto o *PRL* variou de 0,008431 a 0,01106. O R.A. Nomex apresentou um *PRH* entre 0,0008446 e 0,001364, e um *PRL* de 0,01065 a 0,01204. Para a condição D.T. Óleo, o *PRH* variou de 0,1212 a 0,4037, enquanto o *PRL* variou de 0,5121 a 1.

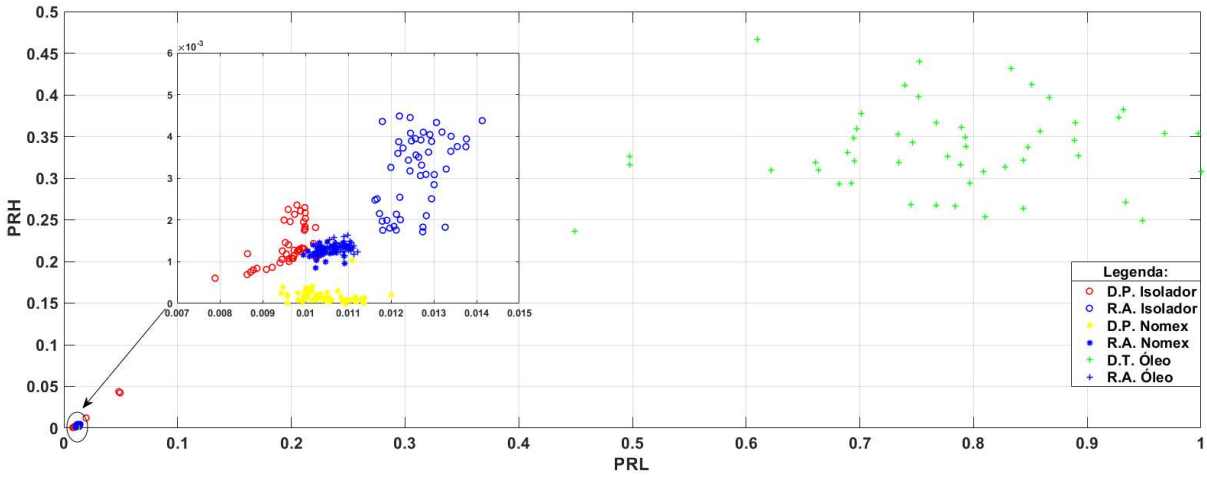
O R.A. Óleo apresentou um *PRH* entre 0,001261 e 0,00209, e um *PRL* de 0,01115 a 0,01205. A Tabela 1 contém as distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados apresentados.

Tabela 1 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena de Vivaldi em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,6137	0,1040	0,1027	0,6919	0,1019
R.A. Isolador	-	0,6355	0,6337	0,2974	0,6334
D.P. Nomex	-	-	0,0020	0,7534	0,0026
R.A. Nomex	-	-	-	0,7514	$7{,}41 \times 10^{-04}$
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,7508

A Figura 32 apresenta o padrão formado pelo mapa PR para o conjunto de dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 600 MHz.

Figura 32 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena de Vivaldi em 600 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 32, observa-se que, para a condição D.P. Isolador, o *PRH* variou de 0,0006039 a 0,04371, enquanto o *PRL* variou de 0,00789 a 0,04948. Já o R.A. Isolador apresentou *PRH* de 0,001717 a 0,004485, enquanto o *PRL* variou de 0,01163 a 0,01413. A D.P. Nomex apresentou *PRH* de 0 a 0,001042, enquanto o *PRL* variou de 0,009432 a 0,012. O R.A. Nomex apresentou o *PRH* de 0,0008521 a 0,001481, enquanto o *PRL* ficou entre 0,00996 e 0,01094. Para a condição D.T. Óleo, o *PRH* variou de 0,2366 a 0,4667, enquanto o *PRL* ficou entre 0,4493 e 1. Já o R.A. Óleo apresentou *PRH* de 0,001099 a 0,001645, enquanto o *PRL* variou de 0,01023 a 0,01122. Observe que há uma sobreposição entre o cluster D.P. Isolador com os clusters R.A. Nomex e R.A. Óleo, no entanto, esses clusters referem-se a aplicações

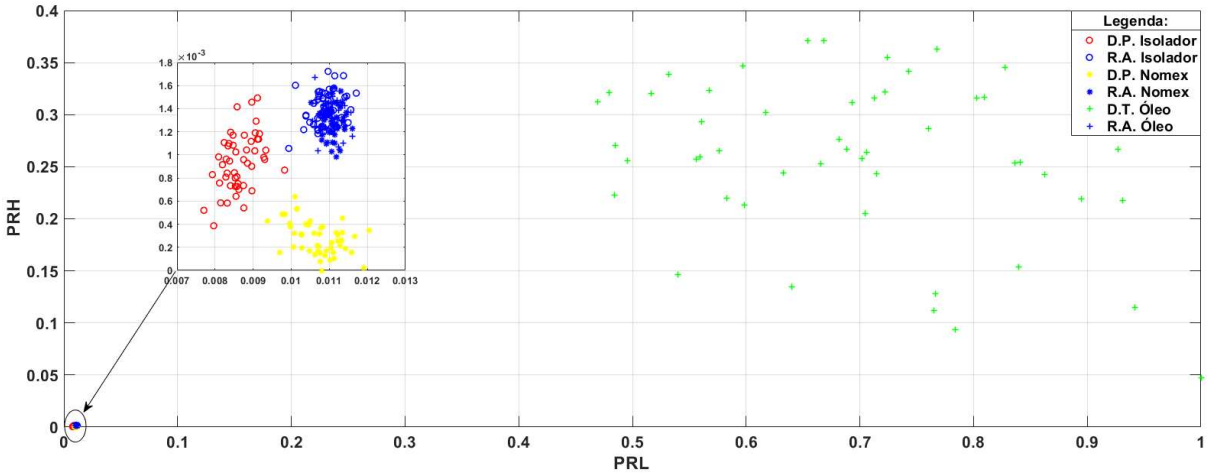
distintas, com a antena posicionada externamente e internamente ao transformador, respectivamente. Observa-se a presença de pontos (amarelo) do agrupamento de D.P. Nomex nos agrupamentos do R.A. Nomex e R.A. Óleo (azul). Uma possível hipótese para essa ocorrência é a limitação humana durante os ensaios. Embora a falha tenha ocorrido, a sincronização da gravação do dispositivo RTL-SDR com o momento da falha não foi bem-sucedida, resultando na aquisição de ruído. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados apresentados são exibidas na Tabela 2.

Tabela 2 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena de Vivaldi em 600 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0012	0,0033	0,0023	0,8349	0,0020
R.A. Isolador	-	0,0037	0,0029	0,8338	0,0025
D.P. Nomex	-	-	0,0011	0,8370	0,0013
R.A. Nomex	-	-	-	0,8366	$4{,}488 \times 10^{-04}$
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,8362

O padrão formado pelo mapa PR para os dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 700 MHz é apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena de Vivaldi em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise da Figura 33 revela que, na condição D.P. Isolador, o *PRH* variou de 0,0003864 a 0,001493, enquanto o *PRL* ficou entre 0,007706 e 0,009825. Por sua vez, o R.A. Isolador apresentou *PRH* de 0,001056 a 0,001723, enquanto o *PRL* variou de 0,009936 a 0,01171. Para a D.P. Nomex, o *PRH* ficou entre 0 e 0,0006355, enquanto o *PRL* variou de

0,009378 a 0,01206. No caso do R.A. Nomex, o *PRH* variou de 0,0009826 a 0,001587, enquanto o *PRL* ficou entre 0,01052 e 0,0116. Já a condição D.T. Óleo apresentou *PRH* de 0,04752 a 0,3712, enquanto o *PRL* ficou entre 0,4692 e 1. Por fim, o R.A. Óleo apresentou *PRH* de 0,001037 a 0,001673, enquanto o *PRL* variou de 0,01056 a 0,01161. A Tabela 3 exibe as distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados analisado. A Tabela 3 exibe as distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados analisados.

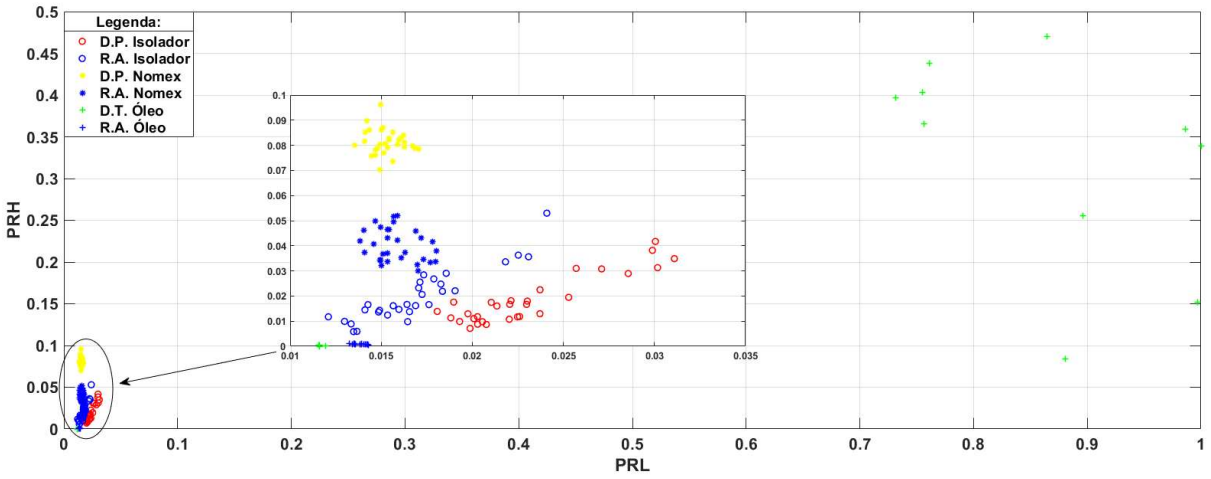
Tabela 3 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena de Vivaldi em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0023	0,0022	0,0025	0,7310	0,0024
R.A. Isolador	-	0,0011	$2{,}0174 \times 10^{-04}$	0,7287	$1{,}3179 \times 10^{-04}$
D.P. Nomex	-	-	0,0011	0,7293	0,0011
R.A. Nomex	-	-	-	0,7286	$7{,}9633 \times 10^{-05}$
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,7286

De modo semelhante aos gráficos provenientes dos resultados dos ensaios com a antena de Vivaldi, para a antena bioinspirada optou-se por apresentar os gráficos das frequências de 500 MHz, 600 MHz e 700 MHz, pois estes valores apresentaram clusters, ou seja, regiões bem definidas para a classificação de falhas. Enquanto para as frequências omitidas, 400 MHz, 800 MHz e 900 MHz, não houve a formação de clusters.

A Figura 34 ilustra o mapa bidimensional formado pelos valores de *Power Ratio High* (*PRH*) e *Power Ratio Low* (*PRL*) para a antena bioinspirada e dispositivo RTL-SDR sintonizado em 500 MHz.

Figura 34 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena bioinspirada em 500 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

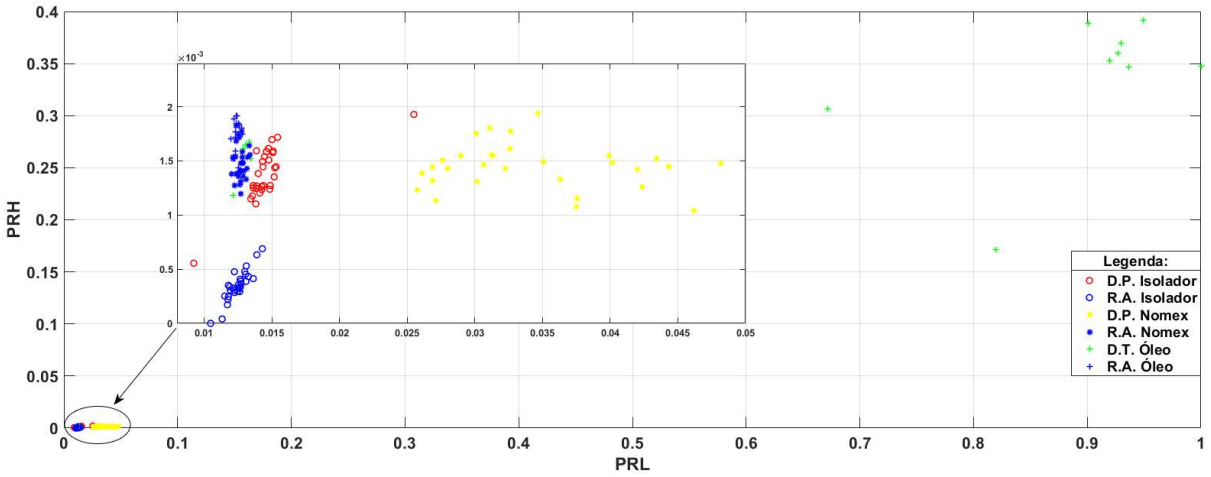
Observa-se, na Figura 34, que na condição de D.P. Isolador, o *PRL* variou de 0,01807 a 0,03109, enquanto o *PRH* ficou entre 0,007118 e 0,04172. Já para a condição R.A. Isolador, os valores de *PRL* oscilaram entre 0,0121 e 0,02409, enquanto o *PRH* ficou na faixa de 0,00584 a 0,05298. No caso da D.P. Nomex, os valores de *PRL* situaram-se entre 0,01353 e 0,01705, enquanto o *PRH* variou de 0,07039 a 0,0961. Para o R.A. Nomex, o *PRL* ficou entre 0,01385 e 0,01802, ao passo que o *PRH* oscilou entre 0,03014 e 0,05213. Para a condição de D.T. Óleo, o *PRL* oscilou entre 0,01156 e 1, enquanto o *PRH* variou de 0 a 0,4706. Por fim, no R.A. Óleo, o *PRL* variou de 0,01327 a 0,01431, enquanto o *PRH* oscilou entre 0,0004998 e 0,001166. Verifica-se que alguns pontos (verde) do agrupamento do D.T. Óleo estão próximos ao agrupamento do R.A. Óleo (azul). Uma possível hipótese para isso é a limitação humana durante os ensaios. No momento da ocorrência da falha, a sincronização da gravação do dispositivo RTL-SDR com esse evento não foi bem-sucedida, resultando na aquisição de ruído. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados analisados são exibidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena bioinspirada em 500 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0064	0,0634	0,0231	0,6341	0,0198
R.A. Isolador	-	0,0614	0,0204	0,6394	0,0194
D.P. Nomex	-	-	0,0410	0,6232	0,0805
R.A. Nomex	-	-	-	0,6339	0,0396
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,6489

Na Figura 35, é possível visualizar o padrão obtido pelo mapa PR com os dados aquisitados pela antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 600 MHz.

Figura 35 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena bioinspirada em 600 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

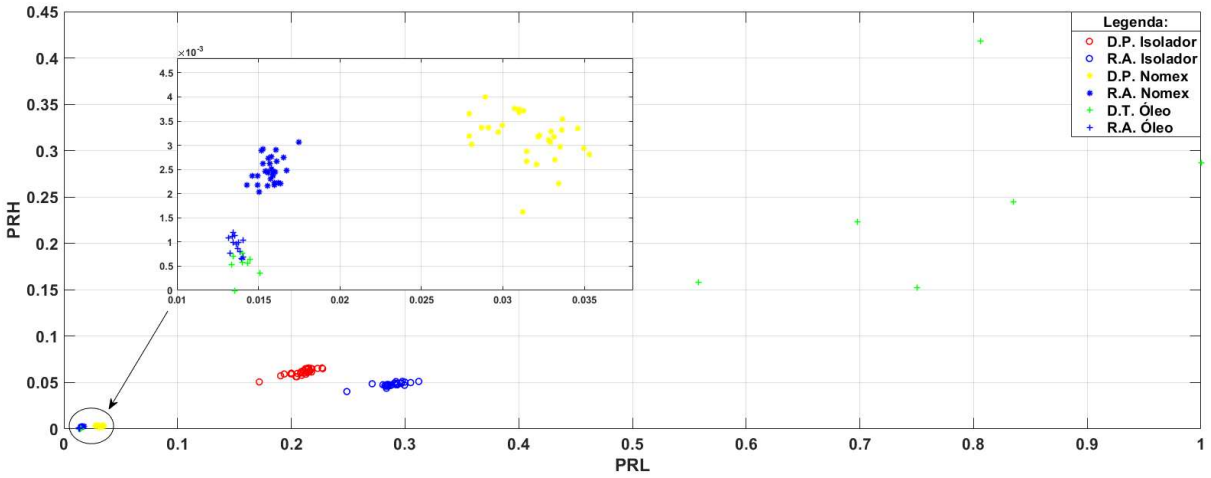
A Figura 35 mostra que, para a condição D.P. Isolador, o *PRL* variou de 0,009237 a 0,0255, enquanto o *PRH* ficou entre 0,0005558 e 0,00193. No caso do R.A. Isolador, o *PRL* oscilou entre 0,01048 e 0,0143, ao passo que o *PRH* variou de 0 a 0,0006892. Já para a condição D.P. Nomex, os valores de *PRL* situaram-se entre 0,02574 e 0,04814, enquanto o *PRH* esteve na faixa de 0,001044 a 0,001939. No R.A. Nomex, o *PRL* variou de 0,01205 a 0,01342, enquanto o *PRH* ficou entre 0,001199 e 0,001827. A condição D.T. Óleo apresentou *PRL* entre 0,01216 e 1, enquanto o *PRH* oscilou de 0,00118 a 0,3919. Por fim, no R.A. Óleo, os valores de *PRL* variaram de 0,01196 a 0,01282, enquanto o *PRH* ficou entre 0,001435 e 0,001915. Observa-se a presença de pontos (verdes) do cluster D.T. Óleo nos clusters R.A. Óleo e R.A. Nomex (azuis). Uma possível explicação para isso é a limitação humana durante os ensaios. Apesar de a falha ter ocorrido, a sincronização da gravação do dispositivo RTL-SDR com o evento da falha não foi precisa, resultando na captura de ruído. A Tabela 5 contém as distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados apresentados.

Tabela 5 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena bioinspirada em 600 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0024	0,0196	0,0019	0,6052	0,0022
R.A. Isolador	-	0,0218	0,0012	0,6075	0,0014
D.P. Nomex	-	-	0,0215	0,5869	0,0218
R.A. Nomex	-	-	-	0,6069	$3{,}8013 \times 10^{-04}$
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,6071

A Figura 36 exibe o padrão formado pelo mapa PR a partir dos dados coletados com a antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR configurado para 700 MHz.

Figura 36 - Padrão formado pelo mapa PR para a antena bioinspirada em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através da análise da Figura 36, é possível observar que, para a falha D.P. Isolador, o *PRL* apresentou valores entre 0,1718 e 0,2276, enquanto o *PRH* variou de 0,05075 a 0,06581. Já no R.A. Isolador, o *PRL* oscilou entre 0,2489 e 0,3121, ao passo que o *PRH* esteve na faixa de 0,04034 a 0,0514. No caso da D.P. Nomex, os valores de *PRL* situaram-se entre 0,02792 e 0,03532, enquanto o *PRH* variou de 0,001622 a 0,004. Para o R.A. Nomex, o *PRL* ficou entre 0,01431 e 0,01749, e o *PRH* oscilou entre 0,002043 e 0,003068. Na condição de D.T. Óleo, *PRL* apresentou variação de 0,01334 a 1, enquanto o *PRH* esteve na faixa de 0 a 0,418. Por fim, na R.A. Óleo, o *PRL* oscilou entre 0,01317 e 0,01406, enquanto o *PRH* ficou entre 0,0006396 e 0,001192. Verifica-se que alguns pontos (verdes) do cluster D.T. Óleo estão sobrepondo o cluster R.A. Óleo (azuis). Uma possível hipótese para isso é a dificuldade de emular a falha, atrelada à limitação humana. Embora a falha tenha ocorrido, a sincronização do momento da gravação do dispositivo RTL-SDR com o evento não foi bem-sucedida, resultando na aquisição

de ruído. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para mapa PR com a antena bioinspirada em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0793	0,1879	0,2032	0,1373	0,2057
R.A. Isolador	-	0,2606	0,2764	0,0780	0,2787
D.P. Nomex	-	-	0,0159	0,3252	0,0181
R.A. Nomex	-	-	-	0,3405	0,0026
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,3429

Com base nas figuras e nas tabelas apresentadas nesta seção, é possível observar a capacidade da técnica de mapa PR em distinguir os diferentes tipos de falhas analisadas no transformador de potência.

6.2.1.1 Conclusão Parcial

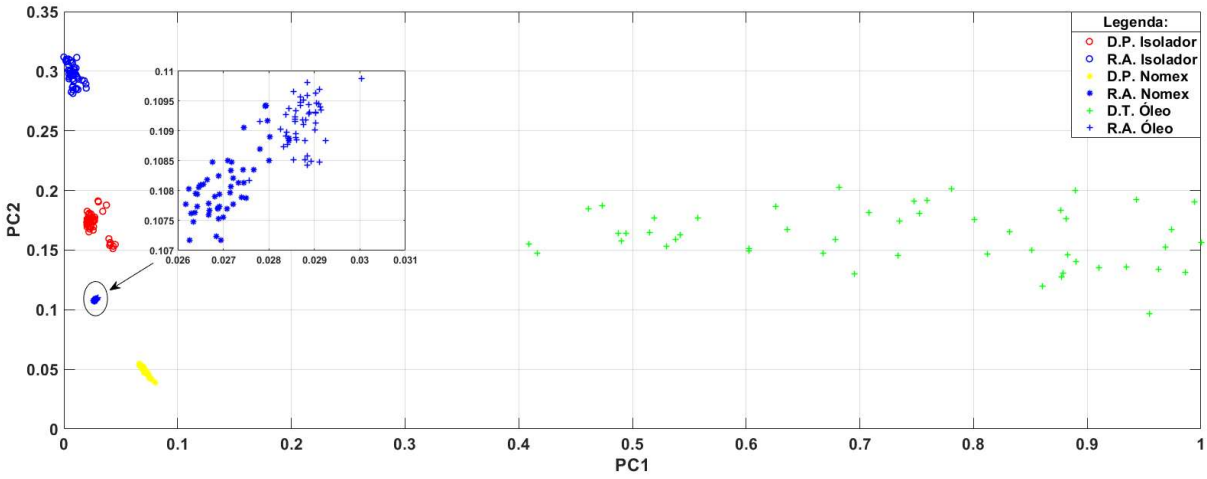
A análise dos gráficos da distribuição dos valores de *Power Ratio* revela regiões bem definidas para a antena de Vivaldi nas frequências 400 MHz, 600 MHz e 700 MHz e para a antena bioinspirada nas frequências de 500 MHz, 600 MHz e 700 MHz. Essas regiões estão diretamente associadas aos conjuntos de dados das falhas ensaiadas no transformador em laboratório, comprovando a eficácia da técnica de *Power Ratio* na detecção e classificação das falhas em transformadores para as frequências analisadas.

6.2.2 Análise de Componentes Principais

Para a Análise de Componentes Principais (PCA), optou-se por apresentar os gráficos para as frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz para a antena de Vivaldi, pois estes valores apresentaram clusters, ou seja, regiões definidas para detecção e classificação de falhas. Enquanto para a frequência de 800 MHz, omitida, não houve a formação de clusters bem definidos, ou seja, não houve uma classificação das falhas ocorridas.

O mapa bidimensional formado através dos valores de Componentes Principais 1 e 2 (PC1 e PC2) é ilustrado na Figura 37 para a antena de Vivaldi nas seguintes condições: Descarga Parcial no Isolador (D.P. Isolador), Ruído Ambiente do Isolador (R.A. Isolador), Descarga Parcial no Isolante à Base de Celulose (D.P. Nomex), Ruído Ambiente do Isolante à Base de Celulose (R.A. Nomex), Descarga Total no Óleo (D.T. Óleo) e Ruído Ambiente do Óleo (R.A. Óleo).

Figura 37 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

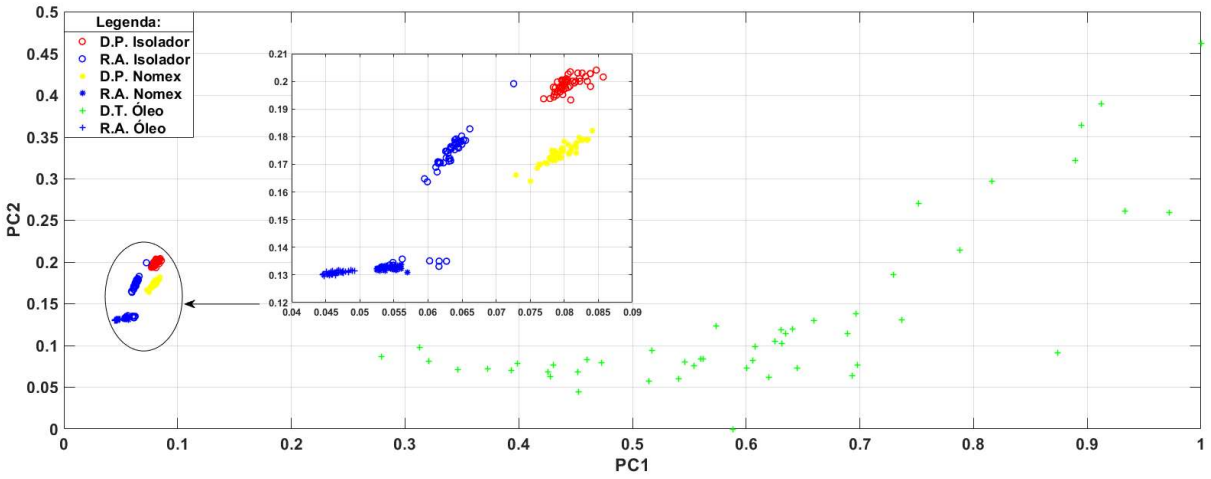
Na Figura 37, observa-se o comportamento da PCA para a antena de Vivaldi em 400 MHz. Na condição D.P. Isolador, os valores de PC2 oscilaram entre 0,1512 e 0,1912, enquanto os de PC1 ficaram no intervalo de 0,02011 a 0,04517. No caso do R.A. Isolador, o PC2 apresentou valores de 0,2814 a 0,3119, enquanto o PC1 ficou entre 0 e 0,01961. A D.P. Nomex registrou PC2 variando de 0,03887 a 0,0546, enquanto o PC1 situou-se entre 0,06627 e 0,08019. Para o R.A. Nomex, os valores de PC2 ficaram entre 0,1072 e 0,1094, enquanto o PC1 variou de 0,02618 a 0,02845. Já na condição D.T. Óleo, o PC2 apresentou variações de 0,09675 a 0,2027, enquanto o PC1 esteve na faixa de 0,4088 a 1. Por último, o R.A. Óleo exibiu valores de PC2 entre 0,1082 e 0,1099, enquanto os de PC1 ficaram no intervalo de 0,02757 a 0,03004. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,1258	0,1320	0,0648	0,7096	0,0638
R.A. Isolador	-	0,2565	0,1902	0,7406	0,1893
D.P. Nomex	-	-	0,0740	0,6743	0,0739
R.A. Nomex	-	-	-	0,7110	0,0020
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,7092

O padrão formado pela PCA para os dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 500 MHz é apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 500 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

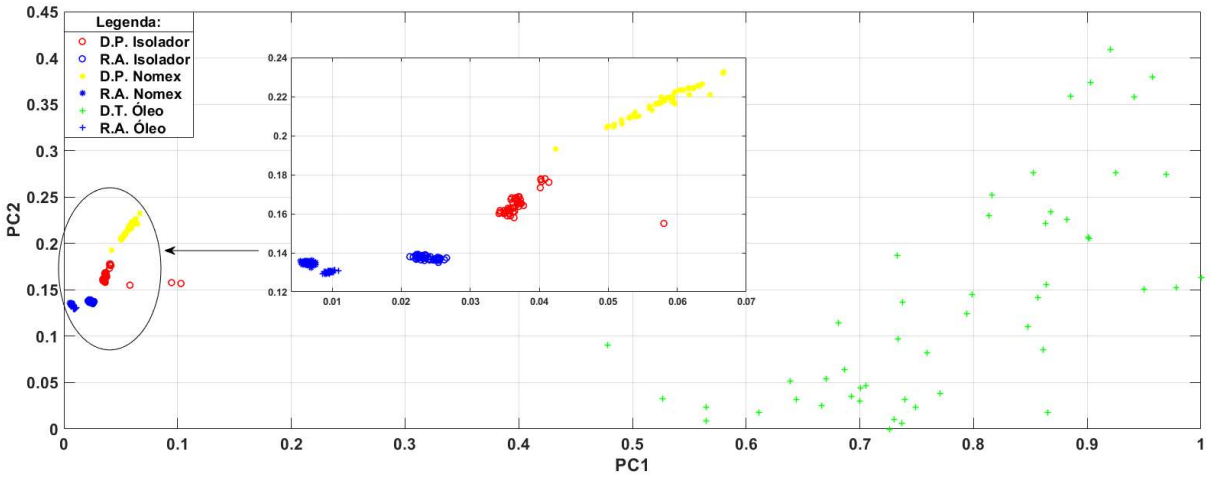
A análise da Figura 38 revela que, para a falha de D.P. Isolador, os valores de PC2 situaram-se entre 0,1933 e 0,2041, enquanto o PC1 variou de 0,07697 a 0,08571. O R.A. Isolador apresentou valores de PC2 na faixa de 0,1331 a 0,1991, enquanto o PC1 ficou entre 0,0544 e 0,07257. Para a D.P. Nomex, os valores de PC2 oscilaram entre 0,164 e 0,1821, enquanto o PC1 ficou no intervalo de 0,07285 a 0,08415. No caso do R.A. Nomex, os valores de PC2 variaram de 0,1311 a 0,1338, enquanto o PC1 apresentou valores entre 0,05247 e 0,057. Já na condição D.T. Óleo, o PC2 variou de 0 a 0,4617, enquanto o PC1 ficou na faixa de 0,2795 a 1. Por fim, o R.A. Óleo exibiu valores de PC2 entre 0,1297 e 0,1317, enquanto os valores de PC1 oscilaram entre 0,04459 e 0,04927. A Tabela 8 apresenta as distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados analisados.

Tabela 8 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 500 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0351	0,0248	0,0714	0,5338	0,0761
R.A. Isolador	-	0,0177	0,0371	0,5484	0,0412
D.P. Nomex	-	-	0,0487	0,5320	0,0545
R.A. Nomex	-	-	-	0,5553	0,0079
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,5631

A Figura 39 exibe o padrão gerado pela PCA a partir dos dados coletados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 600 MHz.

Figura 39 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 600 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

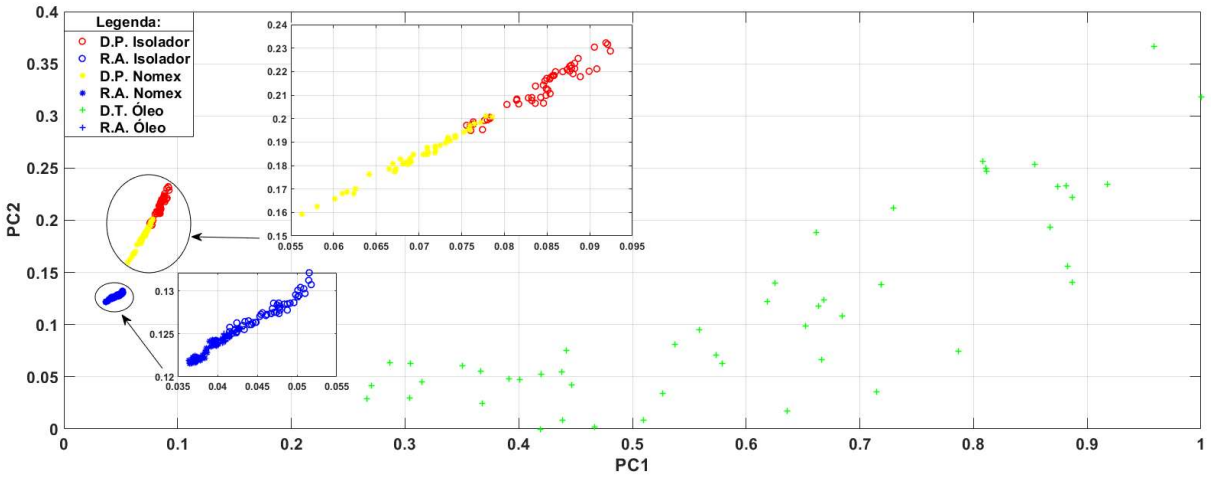
O gráfico da Figura 39 demonstra que os valores de PC2, para a condição D.P. Isolador, ficaram entre 0,1551 e 0,1779, enquanto o PC1 apresentou variações de 0,03416 a 0,1029. Para o R.A. Isolador, os valores de PC2 oscilaram entre 0,1351 e 0,1392, enquanto o PC1 ficou no intervalo de 0,02124 a 0,02656. Na D.P. Nomex, os valores de PC2 variaram de 0,1931 a 0,2327, enquanto o PC1 ficou entre 0,04233 e 0,06671. Já o R.A. Nomex apresentou valores de PC2 na faixa de 0,1324 a 0,1361, enquanto o PC1 oscilou entre 0,005352 e 0,007646. No caso do D.T. Óleo, os valores de PC2 situaram-se entre 0 e 0,4095, enquanto o PC1 variou de 0,4779 a 1. Por fim, a condição R.A. Óleo apresentou PC2 entre 0,1291 e 0,1312, enquanto o PC1 ficou na faixa de 0,008598 a 0,01097. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são exibidas pela Tabela 9.

Tabela 9 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 600 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0316	0,0551	0,0447	0,7442	0,0458
R.A. Isolador	-	0,0863	0,0175	0,7595	0,0160
D.P. Nomex	-	-	0,0967	0,7301	0,0992
R.A. Nomex	-	-	-	0,7768	0,0056
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,7738

O padrão formado pela PCA para os dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 700 MHz, é apresentado na Figura 40.

Figura 40 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

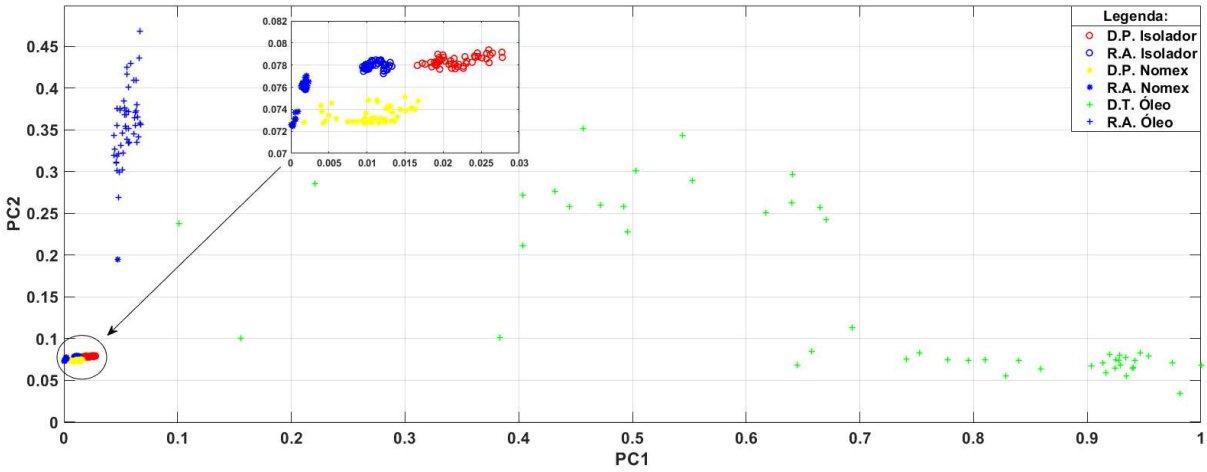
Analisando a Figura 40, observa-se que, para a condição D.P. Isolador, os valores de PC1 oscilaram entre 0,07558 e 0,09242, enquanto os de PC2 variaram de 0,1949 a 0,2322. No caso do R.A. Isolador, o PC1 apresentou valores entre 0,04152 e 0,05179, enquanto o PC2 ficou na faixa de 0,1251 a 0,1321. Já na D.P. Nomex, os valores de PC1 estiveram entre 0,05628 e 0,07856, com PC2 variando de 0,1594 a 0,2009. Para o R.A. Nomex, o PC1 situou-se entre 0,03641 e 0,04007, enquanto o PC2 apresentou variações de 0,1215 a 0,1243. No caso do D.T. Óleo, os valores de PC1 foram de 0,2667 a 1, enquanto o PC2 variou entre 0 e 0,3664. Por fim, o R.A. Óleo teve PC1 oscilando entre 0,03888 e 0,04299, enquanto os valores de PC2 ficaram entre 0,1234 e 0,1257. Observa-se que há uma sobreposição entre o cluster D.P. Nomex (amarelo) e o cluster D.P. Isolador (vermelho). É importante ressaltar que essa ocorrência se dá em condições distintas de posicionamento da antena, sendo ela interna ou externa ao transformador. Contudo, esse fenômeno reforça a hipótese de sobreposição de agrupamentos do mesmo tipo de falha à medida que esta evolui. A Tabela 10 contém as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 10 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0933	0,0322	0,1015	0,5301	0,0984
R.A. Isolador	-	0,0612	0,0099	0,5585	0,0064
D.P. Nomex	-	-	0,0693	0,5398	0,0662
R.A. Nomex	-	-	-	0,5669	0,0036
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,5640

A Figura 41 exibe o padrão gerado pela PCA a partir dos dados coletados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR configurado em 900 MHz.

Figura 41 - Padrão formado pela PCA para a antena de Vivaldi em 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 41 mostra que, para a falha D.P. Isolador, os valores de PC1 variaram entre 0,0166 e 0,02777, enquanto no eixo PC2 oscilaram de 0,07762 a 0,07938. No caso do R.A. Isolador, os valores de PC1 ficaram entre 0,009411 e 0,01327, enquanto os de PC2 situaram-se entre 0,07723 e 0,07847. Já para a D.P. Nomex, PC1 apresentou valores de 0 a 0,01667, com PC2 na faixa de 0,07244 a 0,07507. Para R.A. Nomex, os valores de PC1 oscilaram entre 1,055 x 10^{-05} e 0,04721, enquanto PC2 variou de 0,07243 a 0,1944. No caso do D.T. Óleo, PC1 apresentou um intervalo de 0,1012 a 1, enquanto os valores de PC2 ficaram entre 0,03436 e 0,3517. Por fim, na R.A. Óleo, os valores de PC1 estiveram entre 0,04394 e 0,06732, enquanto PC2 oscilou de 0,2692 a 0,4683. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 11.

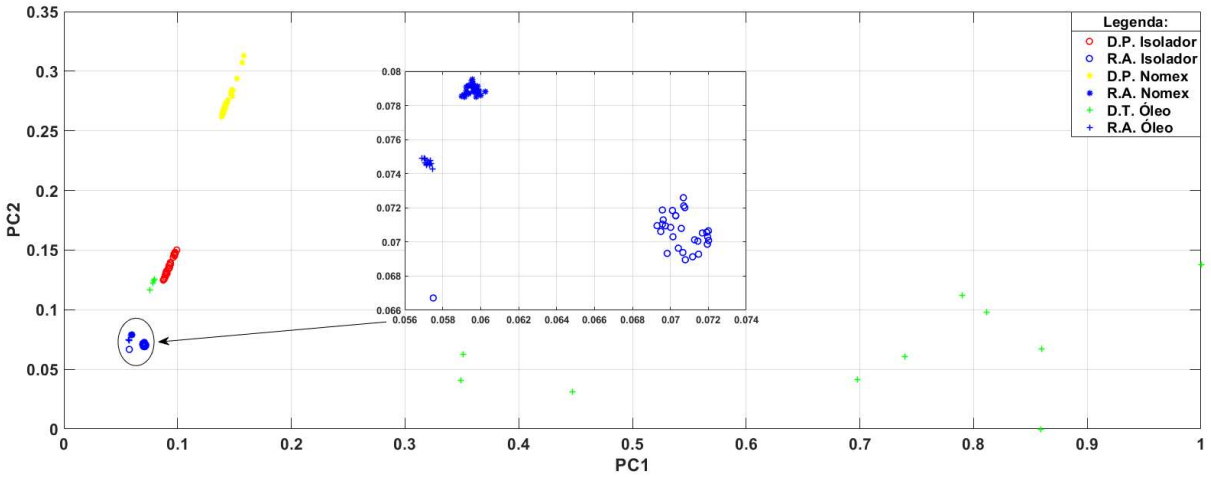
Tabela 11 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena de Vivaldi em 900 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0107	0,0133	0,0193	0,6920	0,2820
R.A. Isolador	-	0,0048	0,0086	0,7026	0,2839
D.P. Nomex	-	-	0,0082	0,7047	0,2885
R.A. Nomex	-	-	-	0,7112	0,2854
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,6892

Assim como os gráficos obtidos nos ensaios utilizando a antena de Vivaldi, optou-se por apresentar os gráficos da antena bioinspirada para as frequências de 400 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz, pois essas frequências apresentaram clusters, ou seja, regiões bem definidas para a classificação de falhas. Já para as frequências omitidas, 500 MHz e 800 MHz, não houve a formação de clusters.

A Figura 42 ilustra o mapa bidimensional resultante do cruzamento dos valores de *Power Ratio High* (*PRH*) e *Power Ratio Low* (*PRL*) para a antena bioinspirada.

Figura 42 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 42 apresenta o padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 400 MHz. Para a condição de D.P. Isolador, os valores de PC1 situaram-se entre 0,08741 e 0,09922, enquanto a PC2 variou de 0,1249 a 0,15. Já no R.A. Isolador, a PC1 oscilou entre 0,0575 e 0,07201, enquanto a PC2 ficou na faixa de 0,06672 a 0,0726. No caso da D.P. Nomex, os valores de PC1 variaram entre 0,1385 e 0,1581, enquanto a PC2 ficou entre 0,2616 e 0,313. Para o R.A. Nomex, o PC1 apresentou valores entre 0,05901 e 0,06024, enquanto a PC2 oscilou

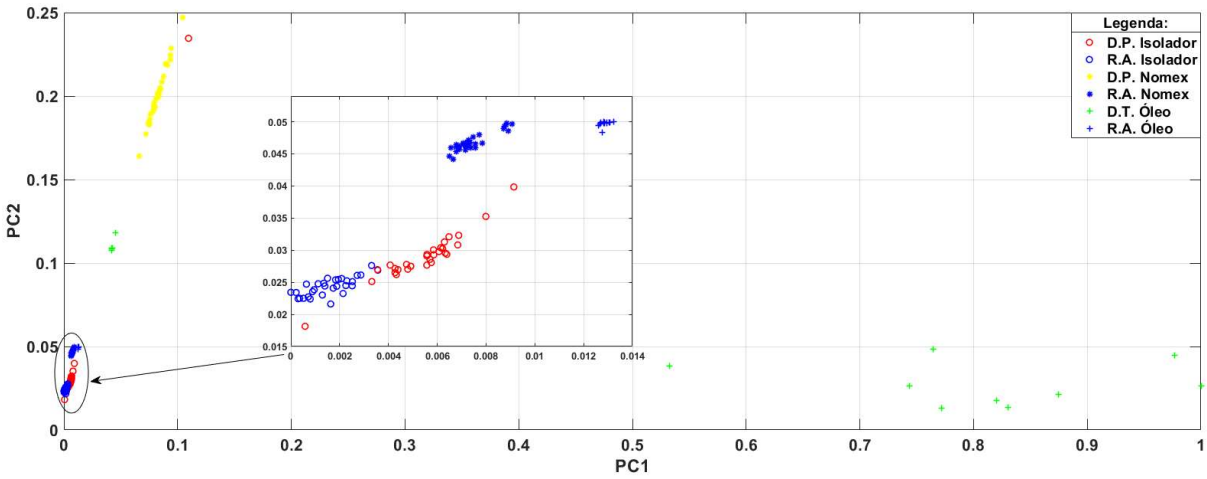
entre 0,07849 e 0,07954. Para a condição de D.T. Óleo, a PC1 variou de 0,07554 a 1, enquanto a PC2 esteve entre 0 e 0,1377. Por fim, no R.A. Óleo, a PC1 oscilou entre 0,0569 e 0,05745, enquanto a PC2 variou de 0,0743 a 0,07491. Verifica-se que alguns pontos do agrupamento D.T. Óleo (verdes) permaneceram próximos ao agrupamento D.P. Isolador (vermelhos). Portanto, ao avaliar os resultados obtidos anteriormente, onde a descarga total (agrupamento D.T. Óleo) apresentava padrões de agrupamentos bem definidos, mesmo com pontos espaçados, surge a possibilidade de interpretar esses pontos como originados por ionização do óleo devido ao formato do eletrodo. A consequência da ionização, sem a ocorrência da ruptura do isolante à base de óleo, é o possível surgimento de descarga corona no óleo. A Tabela 12 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 12 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0708	0,1461	0,0675	0,4260	0,0724
R.A. Isolador	-	0,2168	0,0136	0,4454	0,0137
D.P. Nomex	-	-	0,2129	0,4189	0,2178
R.A. Nomex	-	-	-	0,4559	0,0049
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,4584

Na Figura 43, é possível visualizar o padrão obtido pela PCA com os dados registrados pela antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 600 MHz.

Figura 43 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 600 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

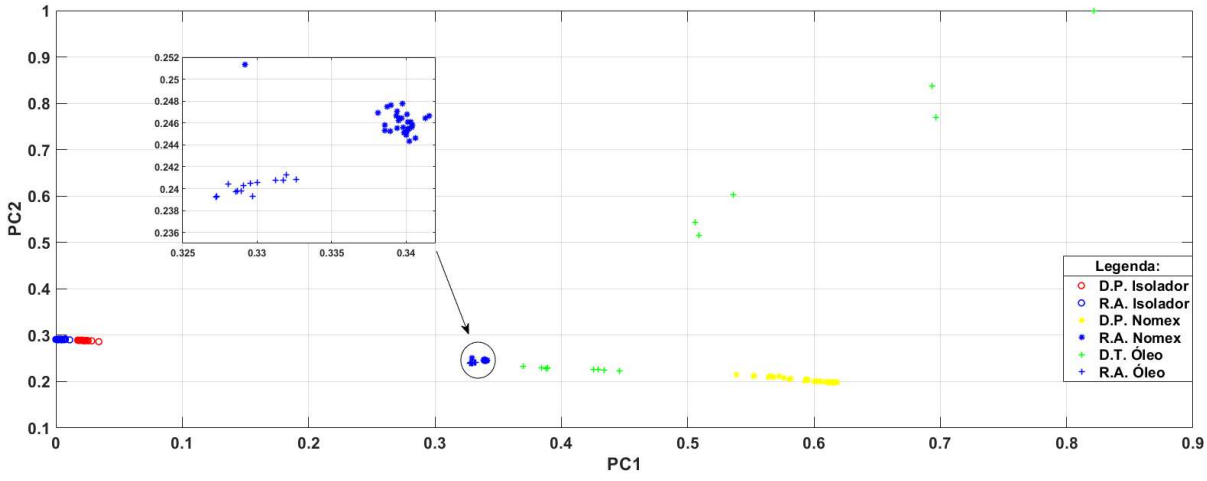
A Figura 43 mostra que, na condição de D.P. Isolador, os valores da PC1 variaram entre 0,0005822 e 0,1096, enquanto a PC2 oscilou de 0,01815 a 0,2346. No caso do R.A. Isolador, a PC1 apresentou valores entre 0 e 0,003563, enquanto a PC2 esteve na faixa de 0,02162 a 0,02761. Na D.P. Nomex, os valores da PC1 situaram-se entre 0,06591 e 0,1045, enquanto a PC2 variou de 0,1638 a 0,2469. Já no R.A. Nomex, a PC1 ficou entre 0,006488 e 0,009075, enquanto a PC2 oscilou entre 0,04422 e 0,04972. Para a condição de D.T. Óleo, os valores da PC1 variaram de 0,0419 a 1, enquanto a PC2 ficou entre 0,01287 e 0,1182. Por fim, no R.A. Óleo, a PC1 oscilou entre 0,01262 e 0,01324, enquanto a PC2 variou de 0,04836 a 0,05. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 600 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0136	0,1803	0,0111	0,5293	0,0144
R.A. Isolador	-	0,1938	0,0233	0,5372	0,0278
D.P. Nomex	-	-	0,1709	0,4773	0,1660
R.A. Nomex	-	-	-	0,5304	0,0061
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,5249

O padrão formado pela PCA para os dados aquisitados com a antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 700 MHz é apresentado na Figura 44.

Figura 44 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 44, observa-se que, na condição de D.P. Isolador, os valores da PC1 variaram entre 0,01729 e 0,03397, enquanto a PC2 oscilou de 0,2861 a 0,2894. No caso

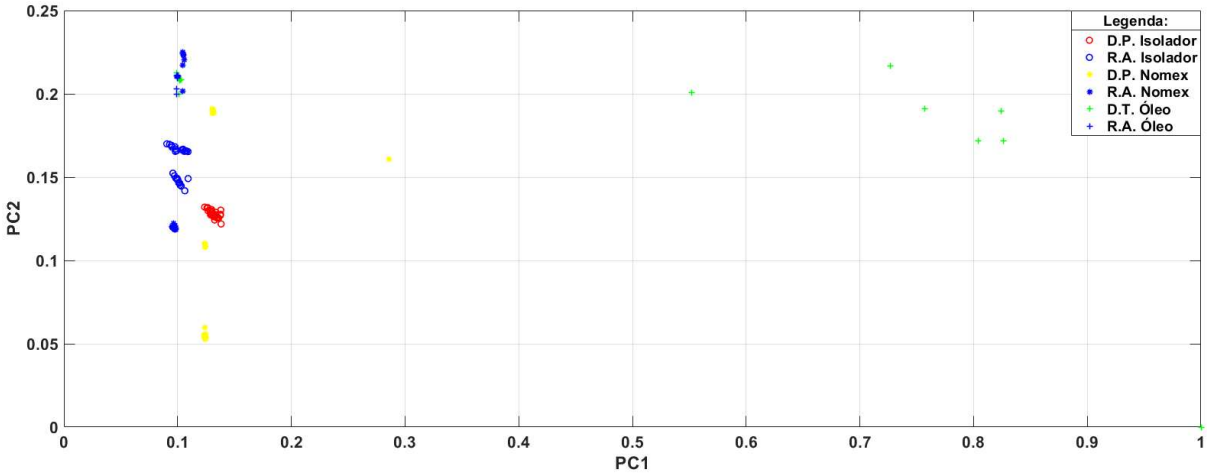
do R.A. Isolador, a PC1 apresentou valores entre 0 e 0,01091, enquanto a PC2 ficou na faixa de 0,29 a 0,2919. Na D.P. Nomex, os valores da PC1 situaram-se entre 0,5387 e 0,6182, enquanto a PC2 variou de 0,1965 a 0,2155. Já na R.A. Nomex, a PC1 ficou entre 0,3292 e 0,3415, enquanto a PC2 oscilou entre 0,2444 e 0,2514. Para a condição de D.T. Óleo, os valores da PC1 variaram de 0,3696 a 0,8217, enquanto a PC2 ficou entre 0,2225 e 1. Por fim, no R.A. Óleo, a PC1 oscilou entre 0,3272 e 0,3326, enquanto a PC2 variou de 0,2392 a 0,2413. A Tabela 14 exibe as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 14 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0182	0,5760	0,3205	0,5022	0,3117
R.A. Isolador	-	0,5942	0,3387	0,5189	0,3298
D.P. Nomex	-	-	0,2556	0,2477	0,2644
R.A. Nomex	-	-	-	0,2492	0,0115
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,2602

Na Figura 45, é possível visualizar o padrão obtido pela PCA com os dados registrados pela antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR operando em 900 MHz.

Figura 45 - Padrão formado pela PCA para a antena bioinspirada em 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 45 mostra que, na condição de D.P. Isolador, os valores da PC1 variaram entre 0,1238 e 0,1383, enquanto os valores da PC2 oscilaram de 0,1219 a 0,132. Já para o R.A. Isolador, a PC1 variou de 0,09054 a 0,1092, e a PC2 ficou entre 0,1418 e 0,17. Para a condição de D.P. Nomex, os valores da PC1 oscilaram entre 0,1235 e 0,286, enquanto os valores da PC2

variaram de 0,05309 a 0,1912. No caso do R.A. Nomex, os valores da PC1 variaram entre 0,09488 e 0,106, e os valores da PC2 oscilaram de 0,1186 a 0,2251. Na condição de D.T. Óleo, a PC1 variou de 0,09892 a 1, enquanto os valores da PC2 ficaram entre 0 e 0,2166. Finalmente, para o R.A. Óleo, a PC1 variou entre 0,09887 e 0,1002, e os valores da PC2 ficaram na faixa de 0,1999 a 0,2114. Observa-se que alguns pontos do cluster D.T. Óleo (verdes) estão sobrepostos ao cluster R.A. Óleo (azuis). Uma possível hipótese para isso é a limitação humana durante os ensaios. Apesar de a falha ter sido emulada, a sincronização da gravação do dispositivo RTL-SDR com o evento não foi precisa, o que resultou na captura de ruído. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados para a PCA com a antena bioinspirada em 900 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0427	0,0295	0,0370	0,3169	0,0867
R.A. Isolador	-	0,0669	0,0124	0,3428	0,0505
D.P. Nomex	-	-	0,0575	0,3236	0,1147
R.A. Nomex	-	-	-	0,3462	0,0627
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,3440

A partir da análise das figuras e das tabelas apresentadas nesta seção, observa-se a capacidade da técnica de PCA em distinguir os diferentes tipos de falhas avaliadas no transformador de potência.

6.2.2.1 Conclusão Parcial

Conforme observado nos gráficos da distribuição dos valores da Análise de Componentes Principais (em inglês, *Principal Component Analysis* – PCA), a antena de Vivaldi nas frequências 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz e a antena bioinspirada nas frequências 400 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz, apresentaram regiões bem definidas, associadas aos conjuntos de dados das falhas ensaiadas no transformador em laboratório. Esse resultado comprova a capacidade da técnica PCA em classificar as falhas em transformadores para as frequências analisadas.

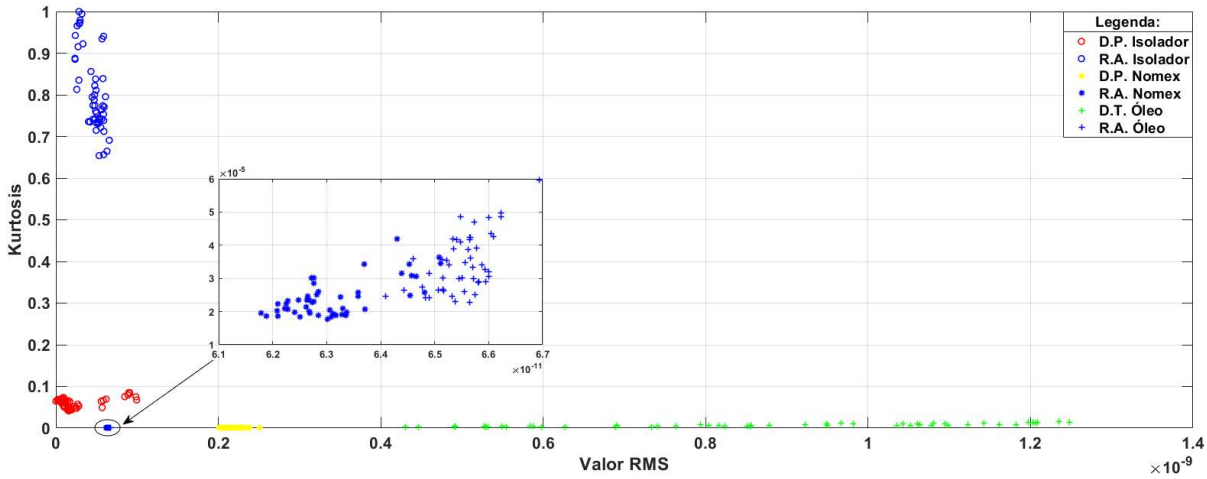
6.2.3 Estatísticas: Skewness, Kurtosis e RMS

Para o cruzamento das estatísticas *Kurtosis* e valor RMS, optou-se por exibir os gráficos para as frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz para a antena de Vivaldi, pois esses valores apresentaram clusters, ou seja, regiões definidas para classificação

de falhas. Enquanto para a frequência de 800 MHz, que foi omitida, não houve a formação de clusters bem definidos, ou seja, não foi possível classificar as falhas ocorridas.

O mapa bidimensional formado a partir das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* é apresentado na Figura 46, para a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR operando em 400 MHz, nas seguintes condições: Descarga Parcial no Isolador (D.P. Isolador), Ruído Ambiente do Isolador (R.A. Isolador), Descarga Parcial no Isolante à Base de Celulose (D.P. Nomex), Ruído Ambiente do Isolante à Base de Celulose (R.A. Nomex), Descarga Total no Óleo (D.T. Óleo) e Ruído Ambiente do Óleo (R.A. Óleo).

Figura 46 – Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

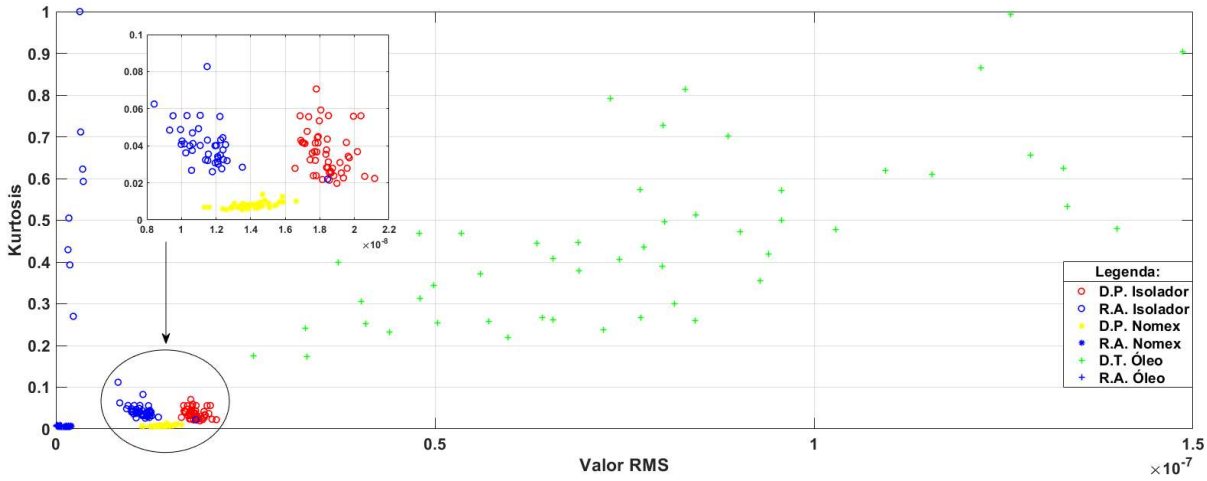
Na Figura 46 é possível notar o cruzamento das estatísticas *Kurtosis* e valor RMS. Para a falha D.P. Isolador, os valores RMS variaram de 0 a $9{,}937 \times 10^{-11}$, enquanto os da *Kurtosis* oscilaram entre 0,04122 e 0,08521. No caso do R.A. Isolador, o valor RMS ficou na faixa de $2{,}347 \times 10^{-11}$ a $6{,}572 \times 10^{-11}$, enquanto a *Kurtosis* apresentou valores entre 0,654 e 1. Já para D.P. Nomex, os valores RMS variaram de $2{,}005 \times 10^{-10}$ a $2{,}508 \times 10^{-10}$, com a *Kurtosis* entre $5{,}549 \times 10^{-05}$ e 0,0002357. Em relação ao R.A. Nomex, o valor RMS situou-se entre $6{,}179 \times 10^{-11}$ e $6{,}511 \times 10^{-11}$, enquanto a *Kurtosis* oscilou de $1{,}77 \times 10^{-05}$ a $4{,}201 \times 10^{-05}$. Para D.T. Óleo, o valor RMS apresentou valores entre $4{,}301 \times 10^{-10}$ e $1{,}248 \times 10^{-09}$, com a *Kurtosis* variando de 0,002663 a 0,01496. Por fim, na condição R.A. Óleo, os valores RMS estiveram na faixa de $6{,}409 \times 10^{-11}$ a $6{,}694 \times 10^{-11}$, enquanto os da *Kurtosis* variaram de $2{,}283 \times 10^{-05}$ a $5{,}969 \times 10^{-05}$. A Tabela 16 apresenta os valores das distâncias euclidianas para os conjuntos de dados analisados.

Tabela 16 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,7456	0,0616	0,0617	0,0544	0,0617
R.A. Isolador	-	0,8072	0,8073	0,8000	0,8072
D.P. Nomex	-	-	$9{,}1588 \times 10^{-05}$	0,0072	$8{,}0960 \times 10^{-05}$
R.A. Nomex	-	-	-	0,0073	$1{,}0628 \times 10^{-05}$
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,0073

O padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* para os dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 500 MHz é apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 500 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

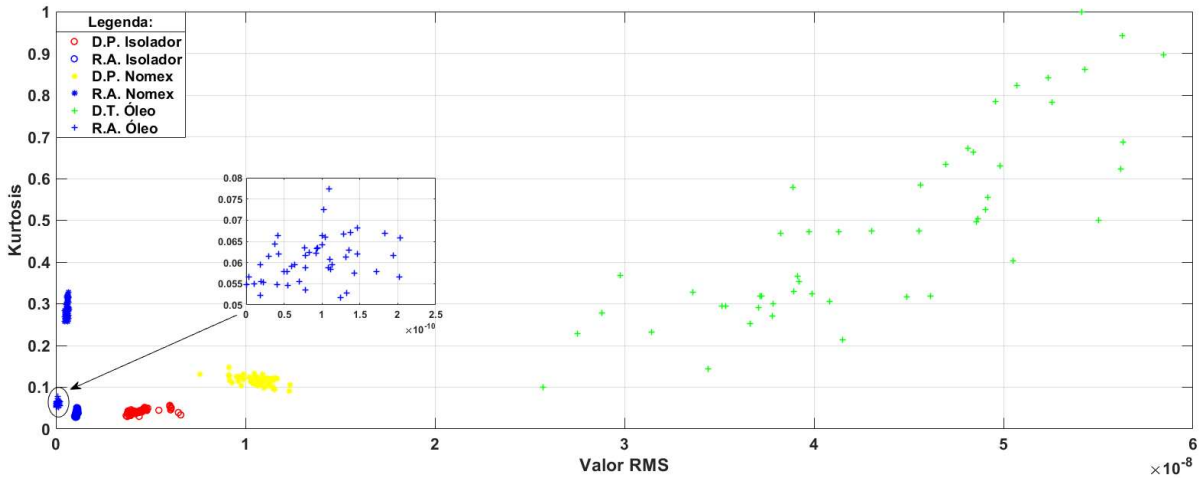
Na Figura 47, observa-se que, na condição D.P. Isolador, os valores RMS variaram entre $1{,}656 \times 10^{-08}$ e $2{,}116 \times 10^{-08}$, enquanto os da *Kurtosis* oscilaram de 0,01972 a 0,07064. Para o R.A. Isolador, os valores RMS apresentaram variação de $1{,}596 \times 10^{-09}$ a $1{,}845 \times 10^{-08}$, com a *Kurtosis* indo de 0,02201 até 1. No caso da D.P. Nomex, o valor RMS variou de $1{,}132 \times 10^{-08}$ a $1{,}662 \times 10^{-08}$, enquanto os valores da *Kurtosis* ficaram entre 0,005426 e 0,01373. Em relação ao R.A. Nomex, os valores RMS oscilaram de $1{,}176 \times 10^{-09}$ a $2{,}115 \times 10^{-09}$, com a *Kurtosis* variando de 0,003998 a 0,008714. Para a condição D.T. Óleo, o valor RMS apresentou variação de $2{,}603 \times 10^{-08}$ a $1{,}486 \times 10^{-07}$, enquanto a *Kurtosis* variou entre 0,1735 e 0,9933. Por fim, no R.A. Óleo, o valor RMS variou de 0 a $9{,}126 \times 10^{-10}$, com a *Kurtosis* variando de 0,004649 a 0,009955. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 500 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0895	0,0285	0,0306	0,4170	0,0296
R.A. Isolador	-	0,1180	0,1201	0,3275	0,1191
D.P. Nomex	-	-	0,0021	0,4455	0,0011
R.A. Nomex	-	-	-	0,4476	0,0010
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,4466

A Figura 48 exibe o padrão gerado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* a partir dos dados coletados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR configurado para 600 MHz.

Figura 48 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 600 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

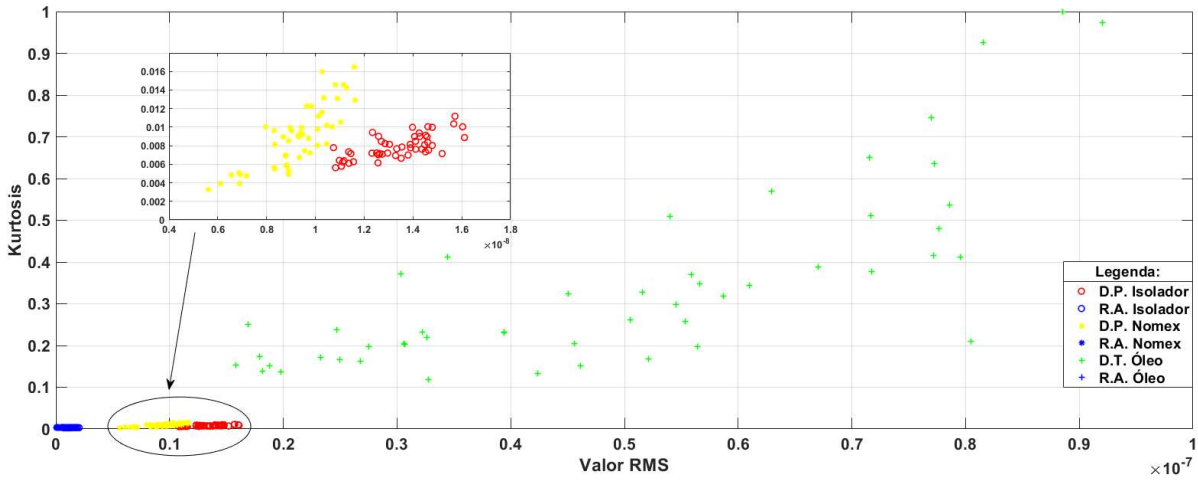
A análise da Figura 48 revela que, para a falha D.P. Isolador, os valores RMS variaram entre 3,707x10^{-09} e 6,587x10^{-09}, enquanto os valores da *Kurtosis* oscilaram de 0,0297 a 0,05653. No R.A. Isolador, o valor RMS variou de 9,911x10^{-10} a 1,181x10^{-09}, com a *Kurtosis* apresentando uma variação de 0,02779 a 0,05128. Já para D.P. Nomex, o valor RMS variou entre 7,605x10^{-09} e 1,238x10^{-08}, enquanto a *Kurtosis* oscilou entre 0,0901 e 0,147. No caso do R.A. Nomex, os valores RMS variaram de 4,439x10^{-10} a 7,027x10^{-10}, com a *Kurtosis* variando de 0,2576 a 0,3278. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou de 2,569x10^{-08} a 5,844x10^{-08}, enquanto a *Kurtosis* ficou entre 0,09957 e 1. Por fim, no R.A. Óleo, o mínimo valor RMS foi 0, e o máximo foi 2,027x10^{-10}, com a *Kurtosis* variando entre 0,05176 e 0,07744. A Tabela 18 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 18 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 600 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0015	0,0744	0,2488	0,4359	0,0187
R.A. Isolador	-	0,0759	0,2503	0,4374	0,0202
D.P. Nomex	-	-	0,1743	0,3614	0,0557
R.A. Nomex	-	-	-	0,1871	0,2300
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,4171

O padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* para os dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 700 MHz é apresentado na Figura 49.

Figura 49 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

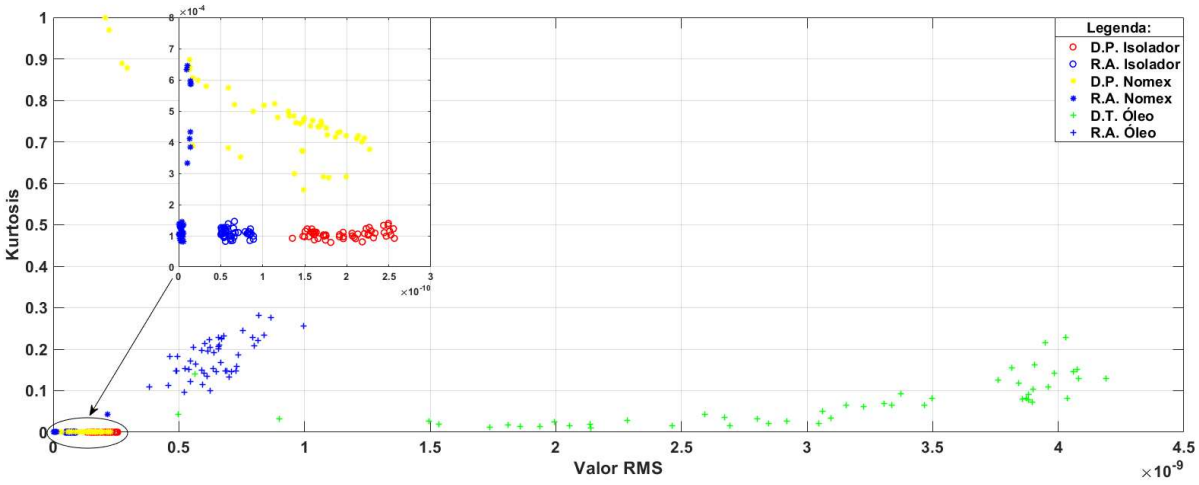
Para o gráfico da Figura 49, na condição de falha de D.P. Isolador, o valor RMS variou entre $1{,}074 \times 10^{-08}$ e $1{,}611 \times 10^{-08}$, enquanto a *Kurtosis* apresentou uma variação de 0,005621 a 0,01117. No caso do R.A. Isolador, os valores RMS oscilaram de $5{,}938 \times 10^{-10}$ a $2{,}043 \times 10^{-09}$, com a *Kurtosis* variando de 0,00272 a 0,003773. Para a D.P. Nomex, o valor RMS ficou entre $5{,}628 \times 10^{-09}$ e $1{,}163 \times 10^{-08}$, enquanto a *Kurtosis* teve uma variação de 0,003236 a 0,01646. No R.A. Nomex, o mínimo valor RMS foi 0 e o máximo chegou a $5{,}051 \times 10^{-10}$, enquanto a *Kurtosis* oscilou entre 0,002869 e 0,004669. Para a D.T. Óleo o valor RMS variou de $1{,}581 \times 10^{-08}$ a $9{,}202 \times 10^{-08}$, com a *Kurtosis* variando de 0,1178 até 1. Por fim, no R.A. Óleo, os valores RMS ficaram entre $2{,}817 \times 10^{-10}$ e $7{,}355 \times 10^{-10}$, enquanto a *Kurtosis* variou entre 0,002418 e 0,003548. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0047	0,0010	0,0044	0,3361	0,0050
R.A. Isolador	-	0,0057	$3{,}0899 \times 10^{-04}$	0,3407	$3{,}0057 \times 10^{-04}$
D.P. Nomex	-	-	0,0054	0,3350	0,0060
R.A. Nomex	-	-	-	0,3404	$6{,}0956 \times 10^{-04}$
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,3410

A Figura 50 exibe o padrão gerado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* a partir dos dados coletados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 900 MHz.

Figura 50 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena de Vivaldi em 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 50, na condição de falha de D.P. Isolador, o valor RMS variou entre $1{,}353 \times 10^{-10}$ e $2{,}565 \times 10^{-10}$, enquanto a *Kurtosis* apresentou uma variação de $7{,}892 \times 10^{-5}$ a 0,0001397. No caso do R.A. Isolador, os valores RMS oscilaram de $5{,}034 \times 10^{-11}$ a $8{,}904 \times 10^{-11}$, com a *Kurtosis* variando de $8{,}231 \times 10^{-5}$ a 0,0001462. Para a D.P. Nomex, o valor RMS ficou entre $1{,}265 \times 10^{-11}$ e $2{,}961 \times 10^{-10}$, enquanto a *Kurtosis* teve uma variação de 0,000248 a 1. No R.A. Nomex, o menor valor RMS foi 0 e o máximo atingiu $2{,}157 \times 10^{-10}$, enquanto a *Kurtosis* oscilou entre $8{,}173 \times 10^{-5}$ e 0,04325. Para a condição de D.T. Óleo, o valor RMS variou de $4{,}989 \times 10^{-10}$ a $4{,}191 \times 10^{-9}$, com a *Kurtosis* indo de 0,01069 até 0,2282. Por fim, no R.A. Óleo, os valores RMS ficaram entre $3{,}818 \times 10^{-10}$ e $9{,}966 \times 10^{-10}$, enquanto a *Kurtosis* variou de 0,09555

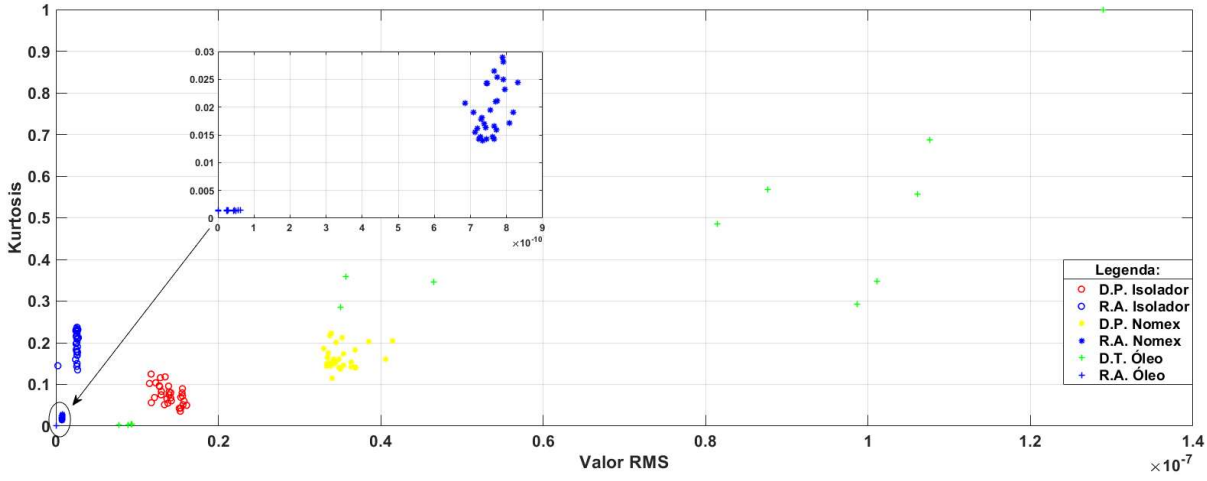
a 0,2819. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena de Vivaldi em 900 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	$3{,}5234 \times 10^{-06}$	0,0751	$9{,}5418 \times 10^{-04}$	0,0721	0,1795
R.A. Isolador	-	0,0751	$9{,}5066 \times 10^{-04}$	0,0721	0,1795
D.P. Nomex	-	-	0,0741	0,0030	0,1044
R.A. Nomex	-	-	-	0,0712	0,1785
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,1074

Assim como os gráficos obtidos das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* através dos ensaios utilizando a antena de Vivaldi, para a antena bioinspirada optou-se por exibir os gráficos das frequências de 400 MHz, 700 MHz e 900 MHz, pois essas frequências geraram clusters, ou seja, áreas bem definidas para a classificação de falhas em transformadores. Por outro lado, para as frequências omitidas, 500 MHz, 600 MHz e 800 MHz, não houve a formação de clusters. A Figura 51 apresenta o mapa bidimensional resultante do cruzamento do valor RMS e *Kurtosis* para a antena bioinspirada em 400 MHz.

Figura 51 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena bioinspirada em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico exibido pela Figura 51 demonstra o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Kurtosis* para a antena bioinspirada na frequência de 400 MHz. Para a condição de D.P. Isolador, o valor RMS variou entre $1{,}152 \times 10^{-08}$ e $1{,}61 \times 10^{-08}$, enquanto a *Kurtosis* apresentou uma variação de 0,03574 a 0,1248. No caso do R.A. Isolador, os valores RMS oscilaram de

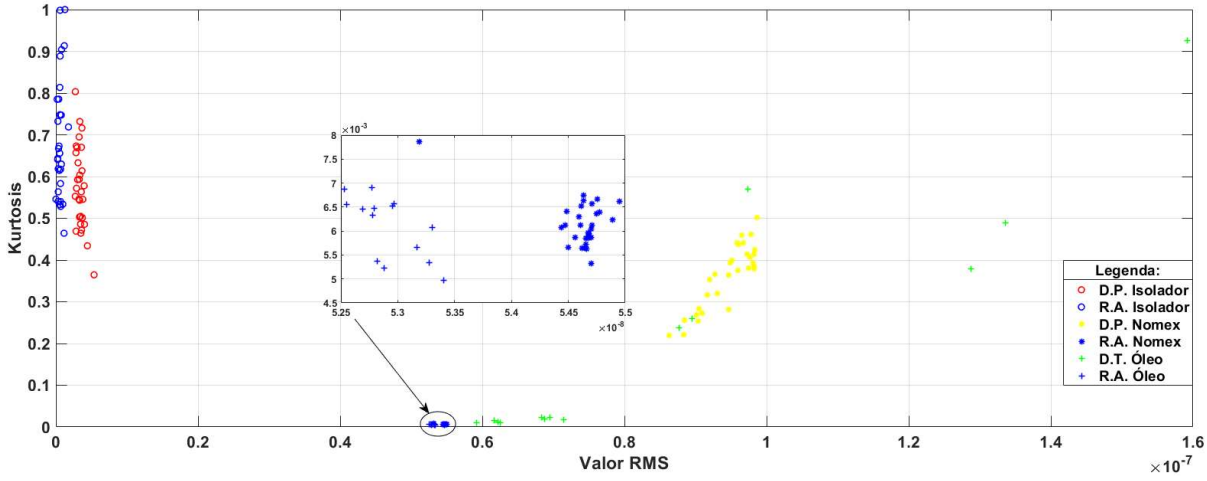
2,431x10^{-10} a 2,772x10^{-09}, com a *Kurtosis* variando de 0,1348 a 0,2372. Para a D.P. Nomex, o valor RMS ficou entre 3,302x10^{-08} e 4,148x10^{-08}, enquanto a *Kurtosis* teve uma variação de 0,1148 a 0,2226. No R.A. Nomex, o valor RMS mínimo foi 6,851x10^{-10} e o máximo chegou a 8,317x10^{-10}, enquanto a *Kurtosis* oscilou entre 0,01403 e 0,02898. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou de 7,735x10^{-09} a 1,29x10^{-07}, com a *Kurtosis* variando de 0,002868 até 1. Por fim, no R.A. Óleo, os valores RMS ficaram entre 0 e 6,262x10^{-11}, enquanto a *Kurtosis* variou entre 0,001348 e 0,001411. A Tabela 21 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 21 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena bioinspirada em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,1186	0,0892	0,0560	0,2776	0,0742
R.A. Isolador	-	0,0294	0,1745	0,1590	0,1927
D.P. Nomex	-	-	0,1452	0,1884	0,1634
R.A. Nomex	-	-	-	0,3335	0,0182
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,3517

A Figura 52 exibe o padrão gerado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis*, a partir dos dados coletados com a antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR configurado para 700 MHz.

Figura 52 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena bioinspirada em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 52 apresenta o padrão formador pelas estatísticas valor RMS e *Kurtosis* para a antena bioinspirada em 700 MHz. Para a condição de falha de D.P. Isolador, o valor RMS

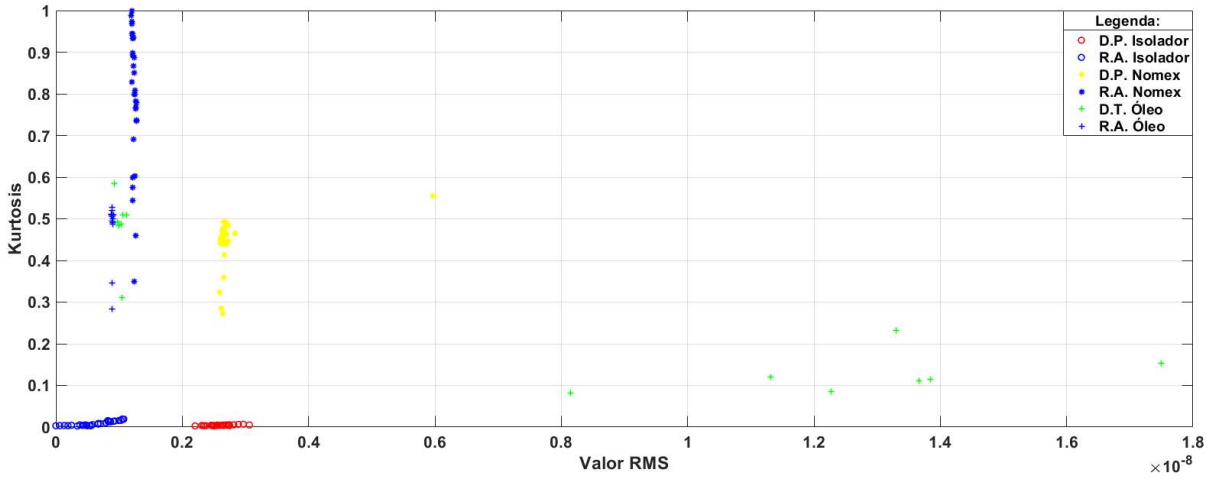
variou entre 2,729x10^{-09} e 5,374x10^{-09}, enquanto a *Kurtosis* apresentou uma variação de 0,3645 a 0,8034. No caso do R.A. Isolador, os valores RMS oscilaram de 0 a 1,769x10^{-09}, com a *Kurtosis* variando de 0,4641 a 1. Para a D.P. Nomex, o valor RMS ficou entre 8,625x10^{-08} e 9,866x10^{-08}, enquanto a *Kurtosis* teve uma variação de 0,2185 a 0,5017. No R.A. Nomex, o valor RMS variou de 5,319x10^{-08} a 5,495x10^{-08}, com a *Kurtosis* oscilando entre 0,005327 e 0,007857. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou de 5,925x10^{-08} a 1,591x10^{-07}, com a *Kurtosis* oscilando entre 0,009806 e 0,9248. Por fim, no R.A. Óleo, os valores RMS ficaram entre 5,253x10^{-08} e 5,34x10^{-08}, enquanto a *Kurtosis* variou entre 0,004971 e 0,006905. Verifica-se que alguns pontos do agrupamento D.T. Óleo (verdes) estão localizados sob os pontos do agrupamento D.P. Nomex (amarelos). Contudo, ao avaliar os resultados obtidos anteriormente, os quais a descarga total (agrupamento D.T. Óleo) apresentava padrões de agrupamentos bem definidos, mesmo com pontos espaçados, surge a possibilidade de interpretar esses pontos como originados por ionização do óleo devido ao formato do eletrodo. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena bioinspirada em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,1130	0,2117	0,5684	0,3609	0,5684
R.A. Isolador	-	0,3247	0,6814	0,4740	0,6815
D.P. Nomex	-	-	0,3567	0,1493	0,3568
R.A. Nomex	-	-	-	0,2074	6,1184 x10^{-05}
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,2075

Na Figura 53, é possível visualizar o padrão obtido pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* com os dados registrados pela antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR operando em 900 MHz.

Figura 53 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis para a antena bioinspirada em 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 53, observa-se o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Kurtosis* para a antena bioinspirada em 900 MHz. No caso da falha de D.P. Isolador, o valor RMS variou entre 2,203x10^{-09} e 3,063x10^{-09}, enquanto a *Kurtosis* apresentou uma variação de 0,002671 a 0,006851. Para o R.A. Isolador, os valores RMS oscilaram de 0 a 1,075x10^{-09}, com a *Kurtosis* variando de 0,002558 a 0,01927. Na condição de D.P. Nomex, o valor RMS variou entre 2,591x10^{-09} e 5,967x10^{-09}, enquanto a *Kurtosis* foi de 0,2724 a 0,5558. No R.A. Nomex, o valor RMS variou de 1,197x10^{-09} a 1,278x10^{-09}, com a *Kurtosis* oscilando entre 0,3495 e 1. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou de 9,236x10^{-10} a 1,749x10^{-08}, com a *Kurtosis* oscilando de 0,08097 até 0,5849. Por fim, para o R.A. Óleo os valores RMS ficaram entre 8,793x10^{-10} e 9,074x10^{-10}, enquanto a *Kurtosis* variou entre 0,2835 e 0,5271. Observa-se que alguns pontos do cluster D.T. Óleo (verdes) estão presentes no cluster R.A. Óleo (azuis). Uma possível hipótese para isso é a dificuldade envolvendo a realização dos ensaios. Embora a falha tenha sido emulada, a sincronização da gravação do dispositivo RTL-SDR com o evento da falha não foi bem-sucedida, resultando na aquisição de ruído. A Tabela 23 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

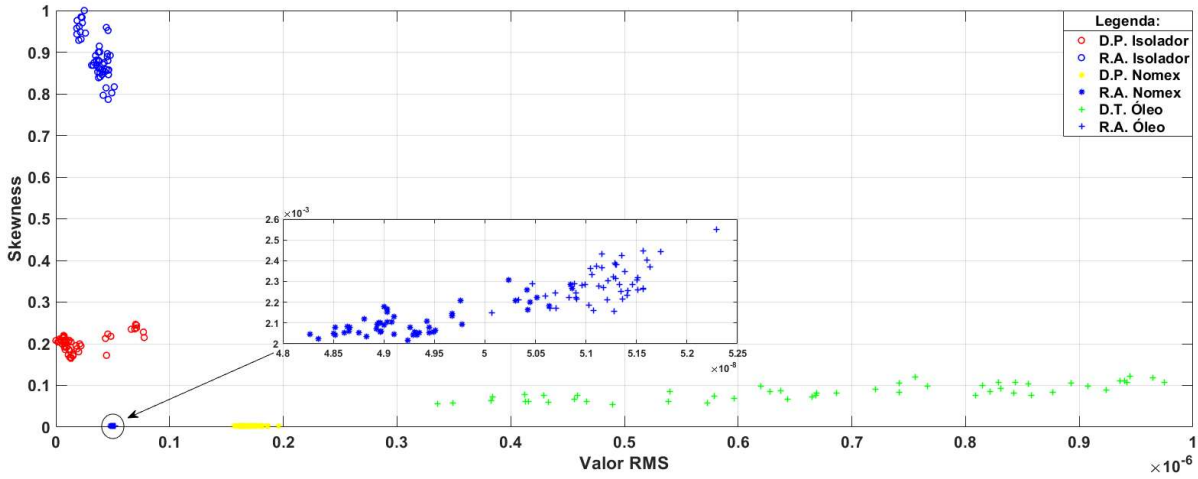
Tabela 23 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Kurtosis com a antena bioinspirada em 900 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0046	0,4385	0,7859	0,3010	0,4748
R.A. Isolador	-	0,4340	0,7813	0,2965	0,4703
D.P. Nomex	-	-	0,3473	0,1375	0,0363
R.A. Nomex	-	-	-	0,4848	0,3110
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,1738

Por meio da análise das figuras e tabelas geradas com base no cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis*, verifica-se a eficácia desta combinação em diferenciar os distintos tipos de falhas analisadas no transformador de potência.

Optou-se por exibir os gráficos para as frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz da antena de Vivaldi para o cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness*, uma vez que estas frequências apresentaram clusters, ou seja, agrupamentos bem definidos para classificação de falhas. Enquanto para a frequência de 800 MHz, omitida, não houve a formação de clusters. A Figura 54 exibe o padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena de Vivaldi em 400 MHz. A legenda de falhas segue o mesmo padrão dos gráficos anteriores.

Figura 54 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 54 exibe o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena de Vivaldi em 400 MHz. Para a D.P. Isolador, o valor RMS variou entre 0 e 7,763x10^{-08}, enquanto o valor de *Skewness* oscilou entre 0,1651 e 0,2467. Na condição de R.A.

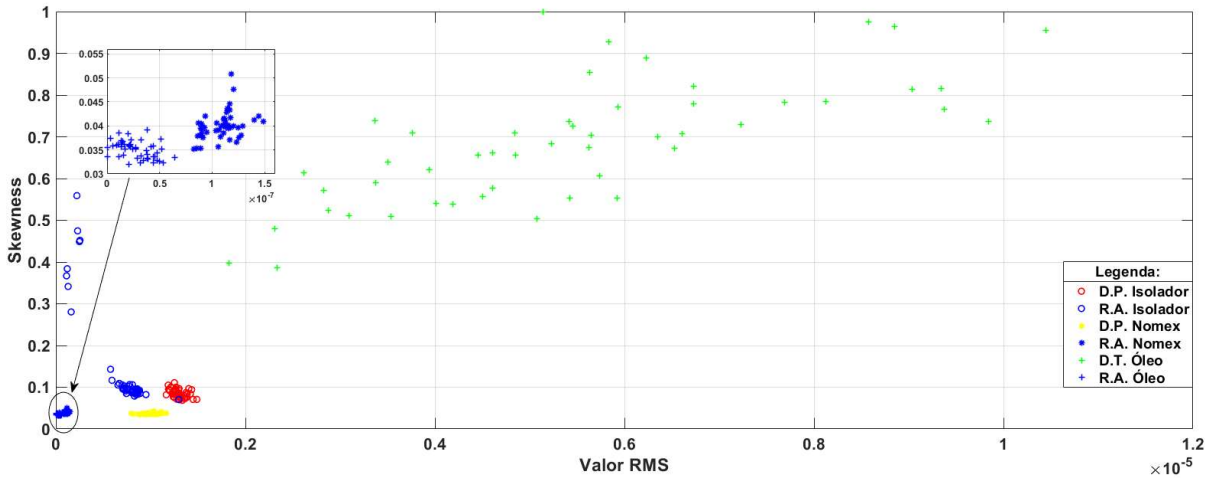
Isolador, os valores de RMS variaram de 1,834x10^{-08} a 5,134x10^{-08}, com a *Skewness* variando entre 0,7865 e 1. Para D.P. Nomex, o valor RMS oscilou entre 1,567x10^{-07} a 1,959x10^{-07}, enquanto a *Skewness* variou de 0,002422 a 0,003648. Na condição de R.A. Nomex, o valor RMS variou entre 4,827x10^{-08} e 5,086x10^{-08}, enquanto a *Skewness* oscilou entre 0,002018 e 0,002309. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou entre 3,36x10^{-07} e 9,75x10^{-07}, com a *Skewness* oscilando de 0,05425 a 0,1228. Por fim, para o R.A. Óleo os valores RMS oscilaram de 5,007x10^{-08} a 5,229x10^{-08}, enquanto a *Skewness* variou de 0,002149 a 0,00255. A Tabela 24 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 24 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,6880	0,2002	0,2010	0,1187	0,2008
R.A. Isolador	-	0,8882	0,8890	0,8066	0,8888
D.P. Nomex	-	-	7,8154x10^{-04}	0,0816	5,9591x10^{-04}
R.A. Nomex	-	-	-	0,0824	1,8563x10^{-04}
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,0822

O padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* para os dados aquisitados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR sintonizado em 500 MHz é apresentado na Figura 55.

Figura 55 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 500 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 55, observa-se o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena de Vivaldi em 500 MHz. Para a condição de D.P. Isolador, os valores

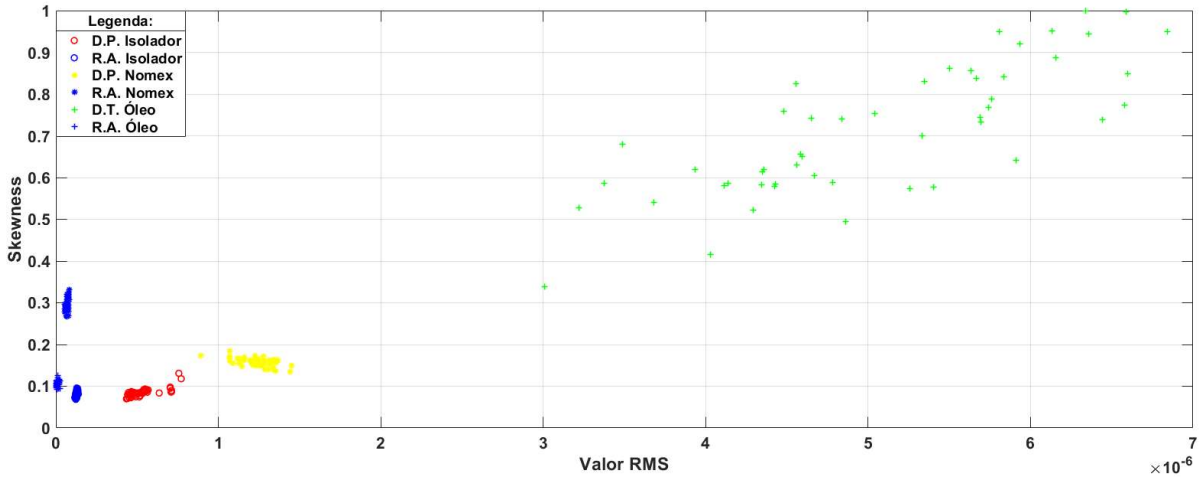
RMS variaram entre 1,165x10^{-06} e 1,488x10^{-06}, e o valor de *Skewness* oscilou entre 0,06887 e 0,1109. Na condição do R.A. Isolador, os valores RMS ficaram entre 1,122x10^{-07} e 1,297x10^{-06}, e a *Skewness* variou entre 0,07068 e 0,559. Para a D.P. Nomex, o valor RMS variou de 7,96x10^{-07} a 1,168x10^{-06}, com a *Skewness* variando entre 0,034 e 0,04267. No R.A. Nomex, o valor RMS oscilou de 8,267x10^{-08} a 1,487x10^{-07}, e a *Skewness* variou entre 0,03525 e 0,0508. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou entre 1,83x10^{-06} e 1,045x10^{-05}, com a *Skewness* variando entre 0,3863 e 1. Por fim, no R.A. Óleo, os valores RMS variaram de 0 a 6,416x10^{-08}, com a *Skewness* oscilando de 0,03201 a 0,03918. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são exibidas na Tabela 25.

Tabela 25 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 500 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0602	0,0483	0,0452	0,6023	0,0501
R.A. Isolador	-	0,1085	0,1054	0,5421	0,1103
D.P. Nomex	-	-	0,0031	0,6507	0,0018
R.A. Nomex	-	-	-	0,6475	0,0049
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,6524

A Figura 56 exibe o padrão gerado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* a partir dos dados coletados com a antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR configurado para 600 MHz.

Figura 56 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 600 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

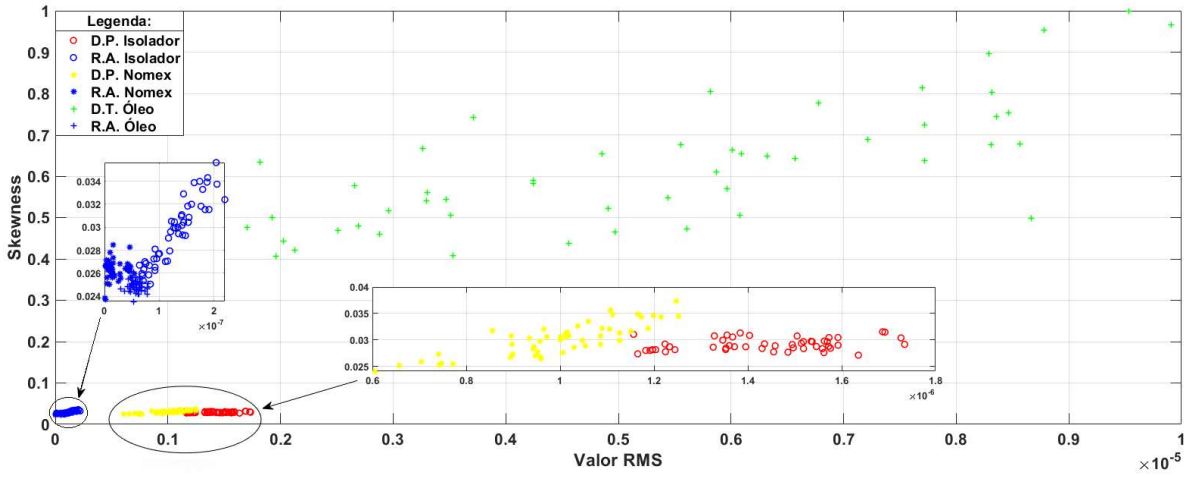
A Figura 56 exibe o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena de Vivaldi em 600 MHz. Para a condição de falha de D.P. Isolador, o valor RMS oscilou entre 4,342 $x10^{-07}$ e 7,714$x10^{-07}$, enquanto a *Skewness* variou entre 0,06979 e 0,131. No caso do R.A. Isolador, o valor RMS oscilou entre 1,161$x10^{-07}$ e 1,383$x10^{-07}$, com a *Skewness* variando entre 0,06863 e 0,0957. Para a D.P. Nomex, o valor RMS variou entre 8,906$x10^{-07}$ e 1,449$x10^{-06}$, e a *Skewness* oscilou de 0,1346 a 0,1844. No R.A. Nomex, os valores RMS variaram entre 5,199$x10^{-08}$ e 8,229$x10^{-08}$, com a *Skewness* oscilando de 0,267 a 0,3311. Quanto ao D.T. Óleo, o valor RMS oscilou entre 3,008$x10^{-06}$ e 6,844$x10^{-06}$, com a *Skewness* variando de 0,338 até 1. Por fim, para o R.A. Óleo, os valores RMS oscilaram entre 0 e 2,374$x10^{-08}$, com a *Skewness* variando de 0,09348 a 0,1255. A Tabela 26 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 26 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 600 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	6,3282$x10^{-04}$	0,0728	0,2147	0,6254	0,0210
R.A. Isolador	-	0,0735	0,2153	0,6260	0,0217
D.P. Nomex	-	-	0,1419	0,5525	0,0518
R.A. Nomex	-	-	-	0,4107	0,1936
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,6043

Na Figura 57, é possível visualizar o padrão obtido pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* com os dados registrados pela antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR operando em 700 MHz.

Figura 57 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

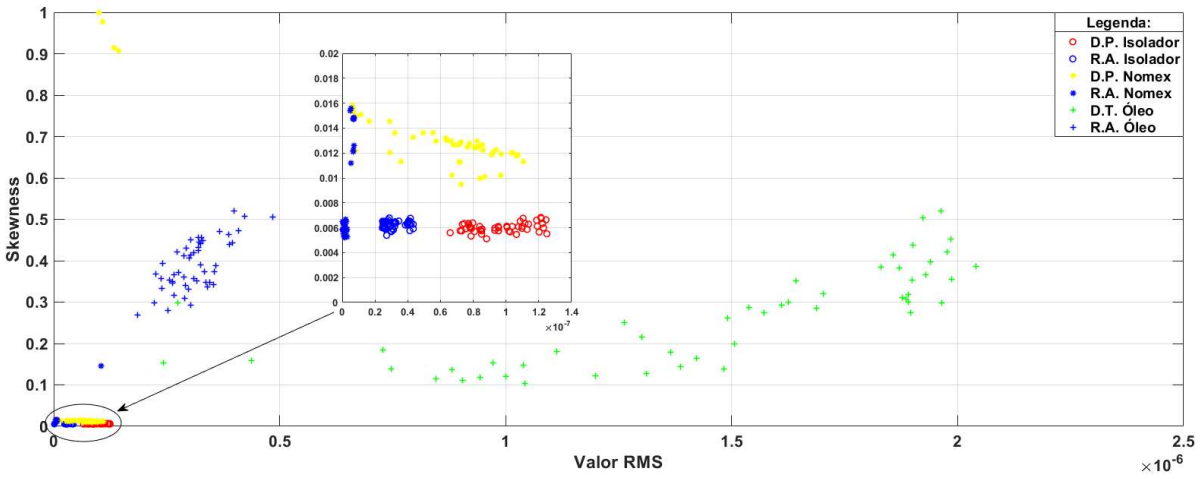
O padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena de Vivaldi em 700 MHz é apresentado na Figura 57. Para a D.P. Isolador, o valor RMS oscilou entre 1,157x10^{-06} e 1,734x10^{-06}, enquanto a *Skewness* variou de 0,02711 a 0,03153. No caso do R.A. Isolador, o valor RMS variou de 6,393x10^{-08} a 2,2x10^{-07}, com a *Skewness* oscilando entre 0,02505 e 0,03562. Para a D.P. Nomex, os valores RMS variaram entre 6,059x10^{-07} e 1,252x10^{-06}, enquanto a *Skewness* oscilou de 0,02408 a 0,03737. No R.A. Nomex, os valores RMS oscilaram entre 0 e 5,438x10^{-08}, com a *Skewness* variando de 0,02369 até 0,02849. Quanto à D.T. Óleo, o valor RMS oscilou de 1,702x10^{-06} a 9,907x10^{-06}, com a *Skewness* variando de 0,4065 até 1. Por fim, para o R.A. Óleo, o valor RMS oscilou entre 3,033x10^{-08} e 7,918x10^{-08}, e a *Skewness* variou de 0,02355 a 0,0261. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são apresentadas na Tabela 27.

Tabela 27 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	4,0123x10^{-04}	9,8590x10^{-04}	0,0029	0,5908	0,0043
R.A. Isolador	-	5,8467x10^{-04}	0,0033	0,5904	0,0047
D.P. Nomex	-	-	0,0039	0,5899	0,0053
R.A. Nomex	-	-	-	0,5938	0,0014
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,5951

Na Figura 58, é possível visualizar o padrão obtido pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* com os dados registrados pela antena de Vivaldi e o dispositivo RTL-SDR operando em 900 MHz.

Figura 58 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena de Vivaldi em 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

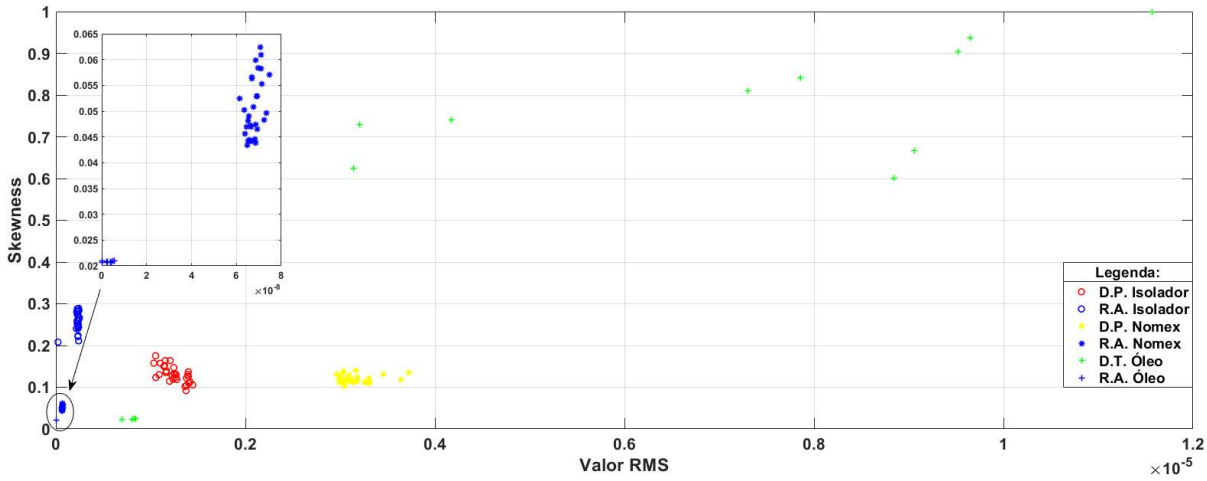
Analisando a Figura 58, observa-se o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena de Vivaldi em 900 MHz. Em relação à D.P. Isolador, o valor RMS oscilou entre $6{,}589 \times 10^{-8}$ e $1{,}249 \times 10^{-7}$, ao passo que a *Skewness* variou de 0,005112 a 0,006825. Para o R.A. Isolador, os valores RMS variaram entre $2{,}451 \times 10^{-8}$ e $4{,}336 \times 10^{-8}$, com a *Skewness* oscilando de 0,005389 a 0,006788. No caso da D.P. Nomex, os valores RMS oscilaram entre $6{,}161 \times 10^{-9}$ e $1{,}442 \times 10^{-7}$, enquanto a *Skewness* variou de 0,009499 a 1. Já no R.A. Nomex, o valor RMS oscilou entre 0 e $1{,}05 \times 10^{-7}$, e a *Skewness* variou entre 0,005226 e 0,1453. Em relação à D.T. Óleo, os valores RMS oscilaram de $2{,}429 \times 10^{-7}$ a $2{,}041 \times 10^{-6}$, enquanto a *Skewness* variou entre 0,1039 e 0,5203. Por fim, para o R.A. Óleo, os valores RMS oscilaram de $1{,}859 \times 10^{-7}$ a $4{,}853 \times 10^{-7}$, com a *Skewness* variando de 0,2689 a 0,5204. As respectivas distâncias euclidianas entre os conjuntos analisados estão descritas na Tabela 28.

Tabela 28 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena de Vivaldi em 900 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	$2{,}2477 \times 10^{-04}$	0,0816	0,0044	0,2582	0,3845
R.A. Isolador	-	0,0813	0,0041	0,2580	0,3843
D.P. Nomex	-	-	0,0772	0,1766	0,3029
R.A. Nomex	-	-	-	0,2538	0,3801
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,1263

Por fim, de modo similar aos gráficos obtidos por meio das estatísticas valor RMS e *Skewness* dos ensaios utilizando a antena de Vivaldi, optou-se por exibir os gráficos da antena bioinspirada para as frequências de 400 MHz, 700 MHz e 900 MHz, pois essas frequências geraram clusters, ou seja, áreas bem definidas para a classificação de falhas. Porém, para as frequências omitidas, 500 MHz, 600 MHz e 800 MHz, não houve a formação de clusters. A Figura 59 apresenta o mapa bidimensional resultante do cruzamento do valor RMS e *Skewness*.

Figura 59 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena bioinspirada em 400 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena bioinspirada em 400 MHz é apresentado na Figura 59. Para a D.P. Isolador, o valor RMS variou de $1{,}033 \times 10^{-6}$ a $1{,}444 \times 10^{-6}$, enquanto a *Skewness* oscilou entre 0,09182 e 0,1754. No caso do R.A. Isolador, o valor RMS variou entre $2{,}181 \times 10^{-8}$ e $2{,}486 \times 10^{-7}$, com a *Skewness* oscilando de 0,2081 a 0,289. Para a falha de D.P. Nomex, os valores RMS ficaram entre $2{,}961 \times 10^{-6}$ e $3{,}72 \times 10^{-6}$, enquanto a *Skewness* variou de 0,1015 a 0,1412. Para o R.A. Nomex, o valor RMS oscilou entre $6{,}144 \times 10^{-8}$ e $7{,}46 \times 10^{-8}$, com a *Skewness* variando de 0,04338 a 0,06234. Na D.T.

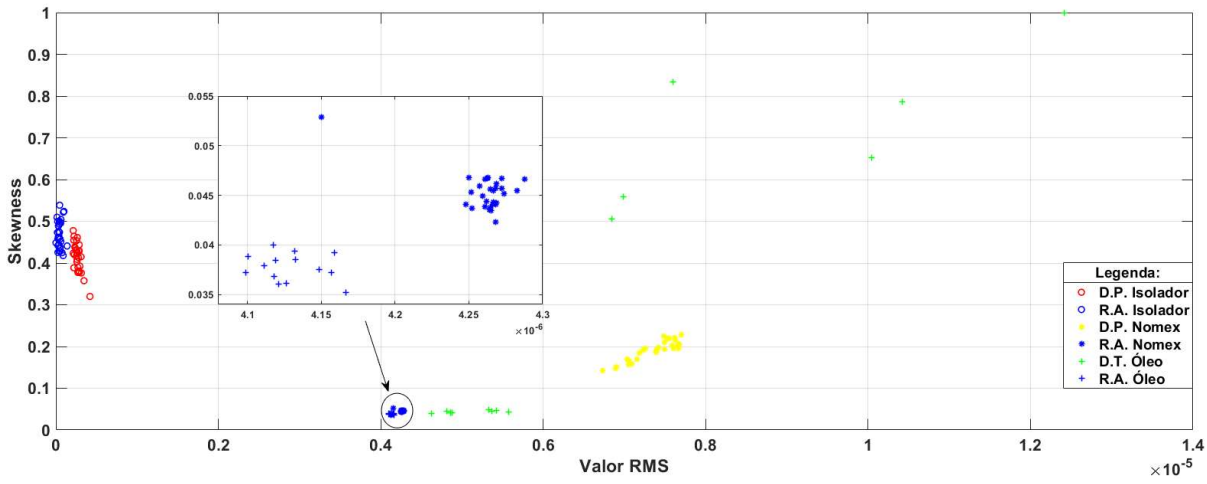
Óleo, o valor RMS oscilou de 6,937x10^{-7} a 1,157x10^{-5}, e a *Skewness* variou de 0,0224 a 1. Por fim, para o R.A. Óleo, o valor RMS oscilou entre 0 e 5,616x10^{-9}, com a *Skewness* variando de 0,02064 a 0,02104. A Tabela 29 apresenta as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 29 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena bioinspirada em 400 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,1252	0,0114	0,0803	0,4369	0,1103
R.A. Isolador	-	0,1366	0,2055	0,3117	0,2355
D.P. Nomex	-	-	0,0689	0,4483	0,0989
R.A. Nomex	-	-	-	0,5172	0,0300
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,5472

A Figura 60 apresenta o padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena bioinspirada na frequência de 700 MHz.

Figura 60 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena bioinspirada em 700 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 60 apresenta o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena bioinspirada em 700 MHz. Para a D.P. Isolador, o valor RMS variou de 2,129x10^{-7} a 4,193x10^{-7}, enquanto a *Skewness* oscilou entre 0,3199 e 0,4777. No caso do R.A. Isolador, o valor RMS variou de 0 a 1,381x10^{-7}, com a *Skewness* oscilando de 0,4179 a 0,5385. Para a falha de D.P. Nomex, os valores RMS ficaram entre 6,73x10^{-6} e 7,698x10^{-6}, com a *Skewness* variando de 0,1429 a 0,2285. No caso do R.A. Nomex, o valor RMS variou de 4,15x10^{-6} a 4,288x10^{-6}, com a *Skewness* oscilando entre 0,04227 e 0,05287. Para a falha de D.T. Óleo, o

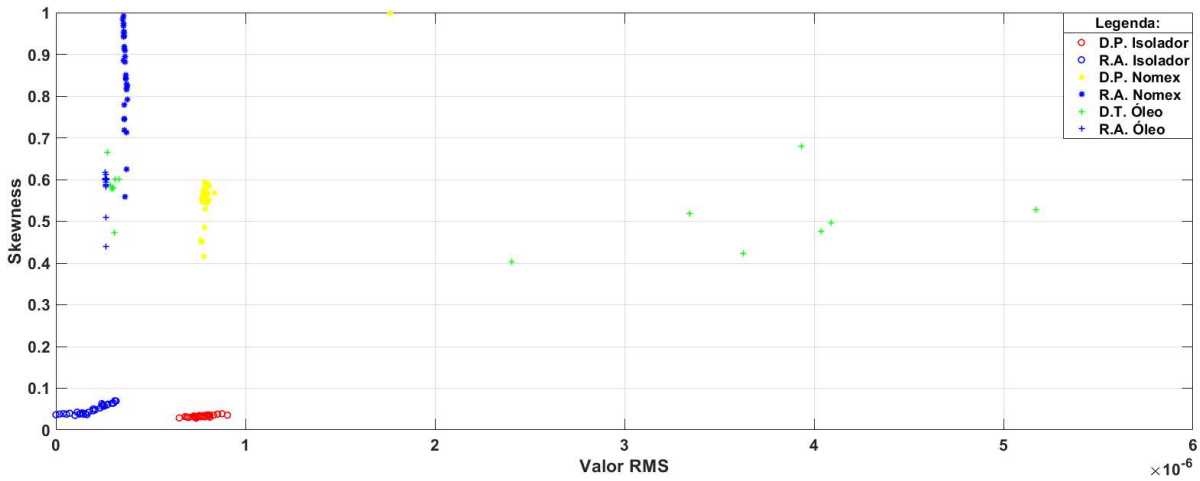
valor RMS variou de 4,623x10^{-6} a 1,242x10^{-5}, enquanto a *Skewness* oscilou entre 0,04015 e 1. No R.A. Óleo, os valores RMS ficaram entre 4,099x10^{-6} e 4,167x10^{-6}, com a *Skewness* variando de 0,03523 a 0,03997. As distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados são exibidas na Tabela 30.

Tabela 30 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena bioinspirada em 700 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0540	0,2223	0,3685	0,0788	0,3760
R.A. Isolador	-	0,2763	0,4225	0,1329	0,4300
D.P. Nomex	-	-	0,1462	0,1435	0,1537
R.A. Nomex	-	-	-	0,2896	0,0075
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,2972

O padrão formado pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena bioinspirada e o dispositivo RTL-SDR operando em 900 MHz é apresentado na Figura 61.

Figura 61 - Padrão formado pelas estatísticas valor RMS e Skewness para a antena bioinspirada em 900 MHz.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura 61, observa-se o padrão formado pelas estatísticas valor RMS e *Skewness* para a antena bioinspirada em 900 MHz. Para a falha D.P. Isolador, o valor RMS variou de 6,512x10^{-7} a 9,051x10^{-7}, enquanto a *Skewness* oscilou entre 0,02827 e 0,0389. Na condição de R.A. Isolador, os valores RMS oscilaram de 0 a 3,177x10^{-7}, com a *Skewness* variando de 0,03478 a 0,07004. Para a condição de falha de D.P. Nomex, o valor RMS variou entre 7,657x10^{-7} e 1,763x10^{-6}, com a *Skewness* oscilando de 0,4164 a 1. No R.A. Nomex, os valores RMS ficaram entre 3,537x10^{-7} e 3,776x10^{-7}, com a *Skewness* oscilando de 0,5587 a

0,9922. Para a D.T. Óleo, o valor RMS variou de $2{,}73\text{x}10^{-7}$ a $5{,}17\text{x}10^{-6}$, enquanto a *Skewness* oscilou entre 0,4029 e 0,6805. No caso do R.A. Óleo, o valor RMS oscilou de $2{,}599\text{x}10^{-7}$ a $2{,}682\text{x}10^{-7}$, com a *Skewness* variando de 0,4392 a 0,6173. Verifica-se que alguns pontos do cluster D.T. Óleo (verdes) estão sobrepostos ao cluster R.A. Óleo (azuis). Uma possível hipótese para isso é a dificuldade na realização dos ensaios. Embora a falha tenha sido emulada, a sincronização entre a gravação do dispositivo RTL-SDR e o evento da falha não foi precisa, resultando na aquisição de ruído. A Tabela 31 exibe as distâncias euclidianas dos conjuntos de dados analisados.

Tabela 31 - Distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados formados pelas estatísticas valor RMS e Skewness com a antena bioinspirada em 900 MHz.

FALHAS	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
D.P. Isolador	0,0162	0,5300	0,8138	0,5102	0,5478
R.A. Isolador	-	0,5138	0,7976	0,4940	0,5316
D.P. Nomex	-	-	0,2838	0,0198	0,0178
R.A. Nomex	-	-	-	0,3036	0,2660
D.T. Óleo	-	-	-	-	0,0376

A partir da análise das figuras e das tabelas formadas pelo cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness*, verifica-se a eficácia dessa combinação na distinção dos diferentes tipos de falhas analisadas no transformador de potência.

6.2.3.1 Conclusão Parcial

Conforme observado nos gráficos formados pelos cruzamentos dos valores obtidos das estatísticas valor RMS *e Kurtosis*, a antena de Vivaldi para as frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz, e a antena bioinspirada para as frequências de 400 MHz, 700 MHz e 900 MHz apresentaram regiões bem definidas, associadas aos conjuntos de dados das falhas ensaiadas no transformador em laboratório. Esses resultados comprovam o potencial promissor da aplicação das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* na classificação das falhas em transformadores para as frequências analisadas.

Da mesma forma, no cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness*, a antena de Vivaldi nas frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz, e a antena bioinspirada nas frequências de 400 MHz, 700 MHz e 900 MHz exibiram clusters, agrupamento de conjuntos de dados correspondentes aos dados das falhas ensaiadas no transformador. Esses resultados demonstram o potencial da utilização das estatísticas valor RMS e *Skewness* na identificação e classificação das falhas em transformadores nas frequências avaliadas.

6.3. Estudo Comparativo entre as Técnicas

A Tabela 32 apresenta um resumo agrupado das tabelas de distâncias euclidianas (valores normalizados) apresentadas individualmente na Seção 6.2.1, facilitando assim a análise comparativa dos melhores resultados obtidos através da técnica de mapa PR para as antenas de Vivaldi e bioinspirada, respectivamente. Algumas distâncias foram omitidas, simbolizadas por "---", dada a natureza simétrica das tabelas.

Tabela 32 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para mapa PR.

Antena	Frequência (MHz)	Falhas	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
Vivaldi	400	D.P. Isolador	0,6137	0,104	0,1027	0,6919	0,1019
Vivaldi	400	R.A. Isolador	---	0,6355	0,6337	0,2974	0,6334
Vivaldi	400	D.P. Nomex	---	---	0,002	0,7534	0,0026
Vivaldi	400	R.A. Nomex	---	---	---	0,7514	$7{,}41\text{x}10^{-4}$
Vivaldi	400	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,7508
Vivaldi	600	D.P. Isolador	0,0012	0,0033	0,0023	0,8349	0,0020
Vivaldi	600	R.A. Isolador	---	0,0037	0,0029	0,8338	0,0025
Vivaldi	600	D.P. Nomex	---	---	0,0011	0,8370	0,0013
Vivaldi	600	R.A. Nomex	---	---	---	0,8366	$4{,}488\text{x}10^{-4}$
Vivaldi	600	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,8362
Vivaldi	700	D.P. Isolador	0,0023	0,0022	0,0025	0,7310	0,0024
Vivaldi	700	R.A. Isolador	---	0,0011	$2{,}0174\text{x}10^{-4}$	0,7287	$1{,}3179\text{x}10^{-4}$
Vivaldi	700	D.P. Nomex	---	---	0,0011	0,7293	0,0011
Vivaldi	700	R.A. Nomex	---	---	---	0,7286	$7{,}9633\text{x}10^{-5}$
Vivaldi	700	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,7286

Bioinspirada	500	D.P. Isolador	0,0064	0,0634	0,0231	0,6341	0,0198
Bioinspirada	500	R.A. Isolador	---	0,0614	0,0204	0,6394	0,0194
Bioinspirada	500	D.P. Nomex	---	---	0,0410	0,6232	0,0805
Bioinspirada	500	R.A. Nomex	---	---	---	0,6339	0,0396
Bioinspirada	500	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,6489
Bioinspirada	600	D.P. Isolador	0,0024	0,0196	0,0019	0,6052	0,0022
Bioinspirada	600	R.A. Isolador	---	0,0218	0,0012	0,6075	0,0014
Bioinspirada	600	D.P. Nomex	---	---	0,0215	0,5869	0,0218
Bioinspirada	600	R.A. Nomex	---	---	---	0,6069	$3{,}8013 \times 10^{-4}$
Bioinspirada	600	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,6071
Bioinspirada	700	D.P. Isolador	0,0793	0,1879	0,2032	0,1373	0,2057
Bioinspirada	700	R.A. Isolador	---	0,2606	0,2764	0,0780	0,2787
Bioinspirada	700	D.P. Nomex	---	---	0,0159	0,3252	0,0181
Bioinspirada	700	R.A. Nomex	---	---	---	0,3405	0,0026
Bioinspirada	700	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,3429

A Tabela 32 contém os valores das distâncias euclidianas calculadas para a técnica de mapa PR para as antenas de Vivaldi e bioinspirada. Para efeito comparativo, foi calculada a média total de cada tabela de distâncias euclidianas, com o objetivo de identificar quais as frequências e antenas se destacaram pelos maiores valores obtidos. Para a antena de Vivaldi, os resultados foram os seguintes: em 400 MHz, a média foi de 0,4050; em 600 MHz foi 0,2799; e em 700 MHz obteve-se 0,2440. Já para a antena bioinspirada, os valores obtidos foram: em 500 MHz, a média foi de 0,2370; em 600 MHz resultou em 0,2072; e em 700 MHz foi obtido o valor 0,1835.

A partir desses cálculos, observa-se que a antena de Vivaldi obteve o melhor desempenho em 400 MHz com média de 0,4050, enquanto a bioinspirada se destacou em 500 MHz com média de 0,2370. Isso indica que essas combinações de antenas e frequências foram as que obtiveram uma melhor separação dos conjuntos de dados para a técnica de mapa PR.

A Tabela 33 fornece um resumo das tabelas de distâncias euclidianas (valores normalizados) apresentadas separadamente na seção 6.2.2, facilitando a análise comparativa dos melhores resultados obtidos por meio da técnica de PCA para as antenas de Vivaldi e bioinspirada.

Tabela 33 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para PCA.

Antena	**Frequência**	**Falhas**	**R.A. Isolador**	**D.P. Nomex**	**R.A. Nomex**	**D.T. Óleo**	**R.A. Óleo**
Vivaldi	400 MHz	D.P. Isolador	0,1258	0,1320	0,0648	0,7096	0,0638
Vivaldi	400 MHz	R.A. Isolador	---	0,2565	0,1902	0,7406	0,1893
Vivaldi	400 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,0740	0,6743	0,0739
Vivaldi	400 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,7110	0,0020
Vivaldi	400 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,7092
Vivaldi	500 MHz	D.P. Isolador	0,0351	0,0248	0,0714	0,5338	0,0761
Vivaldi	500 MHz	R.A. Isolador	---	0,0177	0,0371	0,5484	0,0412
Vivaldi	500 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,0487	0,5320	0,0545
Vivaldi	500 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,5553	0,0079
Vivaldi	500 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,5631
Vivaldi	600 MHz	D.P. Isolador	0,0316	0,0551	0,0447	0,7442	0,0458
Vivaldi	600 MHz	R.A. Isolador	---	0,0863	0,0175	0,7595	0,0160
Vivaldi	600 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,0967	0,7301	0,0992
Vivaldi	600 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,7768	0,0056
Vivaldi	600 MHz	D.T.	---	---	---	---	0,7738

		Óleo					
Vivaldi	700 MHz	D.P. Isolador	0,0933	0,0322	0,1015	0,5301	0,0984
Vivaldi	700 MHz	R.A. Isolador	---	0,0612	0,0099	0,5585	0,0064
Vivaldi	700 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,0693	0,5398	0,0662
Vivaldi	700 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,5669	0,0036
Vivaldi	700 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,5640
Vivaldi	900 MHz	D.P. Isolador	0,0107	0,0133	0,0193	0,6920	0,2820
Vivaldi	900 MHz	R.A. Isolador	---	0,0048	0,0086	0,7026	0,2839
Vivaldi	900 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,0082	0,7047	0,2885
Vivaldi	900 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,7112	0,2854
Vivaldi	900 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,6892
Bioinspirada	400 MHz	D.P. Isolador	0,0708	0,1461	0,0675	0,4260	0,0724
Bioinspirada	400 MHz	R.A. Isolador	---	0,2168	0,0136	0,4454	0,0137
Bioinspirada	400 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,2129	0,4189	0,2178
Bioinspirada	400 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,4559	0,0049
Bioinspirada	400 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,4584
Bioinspirada	600 MHz	D.P. Isolador	0,0136	0,1803	0,0111	0,5293	0,0144
Bioinspirada	600 MHz	R.A. Isolador	---	0,1938	0,0233	0,5372	0,0278
Bioinspirada	600 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,1709	0,4773	0,1660
Bioinspirada	600 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,5304	0,0061
Bioinspirada	600 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,5249
Bioinspirada	700 MHz	D.P. Isolador	0,0182	0,5760	0,3205	0,5022	0,3117
Bioinspirada	700 MHz	R.A. Isolador	---	0,5942	0,3387	0,5189	0,3298

Bioinspirada	700 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,2556	0,2477	0,2644
Bioinspirada	700 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,2492	0,0115
Bioinspirada	700 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,2602
Bioinspirada	900 MHz	D.P. Isolador	0,0427	0,0295	0,0370	0,3169	0,0867
Bioinspirada	900 MHz	R.A. Isolador	---	0,0669	0,0124	0,3428	0,0505
Bioinspirada	900 MHz	D.P. Nomex	---	---	0,0575	0,3236	0,1147
Bioinspirada	900 MHz	R.A. Nomex	---	---	---	0,3462	0,0627
Bioinspirada	900 MHz	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,3440

As distâncias euclidianas calculadas para a técnica de PCA nas antenas de Vivaldi e bioinspirada são apresentadas de modo agrupado na Tabela 33. Com o intuito de facilitar a análise comparativa, foi calculada a média total de cada tabela de distâncias euclidianas, permitindo a identificação das frequências e antenas que obtiveram os melhores resultados.

Para a antena de Vivaldi, os valores médios foram: 0,3145 em 400 MHz; 0,2098 em 500 MHz; 0,2855 em 600 MHz; 0,2201 em 700 MHz; e 0,3136 em 900 MHz. Já para a antena bioinspirada, os resultados obtidos foram: 0,2161 em 400 MHz; 0,2271 em 600 MHz; 0,3199 em 700 MHz; e 0,1489 em 900 MHz.

Com base nesses cálculos, observa-se que a antena de Vivaldi apresentou o melhor desempenho em 400 MHz, com a média de distâncias euclidianas 0,3145. Para a antena bioinspirada, o destaque ocorreu em 700 MHz, onde foi obtido o valor 0,3199. Esses valores apontam que essas combinações de antenas e frequências foram as que obtiveram uma melhor separação dos conjuntos de dados para essa técnica.

A Tabela 34 apresenta um resumo das tabelas de distâncias euclidianas (valores normalizados) que foram detalhadas individualmente na Seção 6.2.3, facilitando a análise comparativa dos melhores resultados obtidos por meio do cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis* para as antenas de Vivaldi e bioinspirada.

Tabela 34 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para o cruzamento das estatísticas valor RMS e Kurtosis.

Antena	Frequência (MHz)	Falhas	R.A. Isolador	D.P. Nomex	R.A. Nomex	D.T. Óleo	R.A. Óleo
Vivaldi	400	D.P. Isolador	0,7456	0,0616	0,0617	0,0544	0,0617
Vivaldi	400	R.A. Isolador	---	0,8072	0,8073	0,8000	0,8072
Vivaldi	400	D.P. Nomex	---	---	$9{,}1588\text{x}10^{-05}$	0,0072	$8{,}0960\text{x}10^{-05}$
Vivaldi	400	R.A. Nomex	---	---	---	0,0073	$1{,}0628\text{x}10^{-05}$
Vivaldi	400	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,0073
Vivaldi	500	D.P. Isolador	0,0895	0,0285	0,0306	0,4170	0,0296
Vivaldi	500	R.A. Isolador	---	0,1180	0,1201	0,3275	0,1191
Vivaldi	500	D.P. Nomex	---	---	0,0021	0,4455	0,0011
Vivaldi	500	R.A. Nomex	---	---	---	0,4476	0,0010
Vivaldi	500	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,4466
Vivaldi	600	D.P. Isolador	0,0015	0,0744	0,2488	0,4359	0,0187
Vivaldi	600	R.A. Isolador	---	0,0759	0,2503	0,4374	0,0202
Vivaldi	600	D.P. Nomex	---	---	0,1743	0,3614	0,0557
Vivaldi	600	R.A. Nomex	---	---	---	0,1871	0,2300
Vivaldi	600	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,4171
Vivaldi	700	D.P. Isolador	0,0047	0,0010	0,0044	0,3361	0,0050
Vivaldi	700	R.A. Isolador	---	0,0057	$3{,}0899\text{x}10^{-04}$	0,3407	$3{,}0057\text{x}10^{-04}$
Vivaldi	700	D.P. Nomex	---	---	0,0054	0,3350	0,0060
Vivaldi	700	R.A. Nomex	---	---	---	0,3404	$6{,}0956\text{x}10^{-04}$
Vivaldi	700	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,3410

Vivaldi	900	D.P. Isolador	$3{,}5234 \times 10^{-06}$	0,0751	$9{,}5418 \times 10^{-04}$	0,0721	0,1795
Vivaldi	900	R.A. Isolador	---	0,0751	$9{,}5066 \times 10^{-04}$	0,0721	0,1795
Vivaldi	900	D.P. Nomex	---	---	0,0741	0,0030	0,1044
Vivaldi	900	R.A. Nomex	---	---	---	0,0712	0,1785
Vivaldi	900	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,1074
Bioinspirada	400	D.P. Isolador	0,1186	0,0892	0,0560	0,2776	0,0742
Bioinspirada	400	R.A. Isolador	---	0,0294	0,1745	0,1590	0,1927
Bioinspirada	400	D.P. Nomex	---	---	0,1452	0,1884	0,1634
Bioinspirada	400	R.A. Nomex	---	---	---	0,3335	0,0182
Bioinspirada	400	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,3517
Bioinspirada	700	D.P. Isolador	0,1130	0,2117	0,5684	0,3609	0,5684
Bioinspirada	700	R.A. Isolador	---	0,3247	0,6814	0,4740	0,6815
Bioinspirada	700	D.P. Nomex	---	---	0,3567	0,1493	0,3568
Bioinspirada	700	R.A. Nomex	---	---	---	0,2074	$6{,}1184 \times 10^{-05}$
Bioinspirada	700	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,2075
Bioinspirada	900	D.P. Isolador	0,0046	0,4385	0,7859	0,3010	0,4748
Bioinspirada	900	R.A. Isolador	---	0,4340	0,7813	0,2965	0,4703
Bioinspirada	900	D.P. Nomex	---	---	0,3473	0,1375	0,0363
Bioinspirada	900	R.A. Nomex	---	---	---	0,4848	0,3110
Bioinspirada	900	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,1738

A Tabela 34 contém os valores das distâncias euclidianas calculadas para o cruzamento das estatísticas valor RMS e Kurtosis, considerando as antenas de Vivaldi e bioinspirada. Para efeito de comparação, foi calculada a média total de cada tabela de distâncias euclidianas do

cruzamento das estatísticas valor RMS e *Kurtosis*, com o intuito de identificar as frequências e antenas com os melhores desempenhos.

Para a antena Vivaldi, os resultados foram os seguintes: a média total em 400 MHz foi de 0,2819; em 500 MHz foi 0,1749; em 600 MHz foi 0,1992; em 700 MHz foi de 0,1151; e para 900 MHz foi de 0,0796. No caso da antena bioinspirada, os resultados foram: para 400 MHz obteve-se 0,1581; em 700 MHz foi obtido 0,3508; e 900 MHz resultou em 0,3652. Esses resultados indicam que, para a antena de Vivaldi, o melhor desempenho foi em 400 MHz com o valor de 0,2819, enquanto para a antena bioinspirada, o melhor desempenho ocorreu em 900 MHz com o valor de 0,3652. Os melhores resultados indicam as combinações de frequência e antena para as quais ocorreram as melhores separações dos dados, considerando as estatísticas de valor RMS e *Kurtosis*.

Para facilitar a análise comparativa dos melhores resultados obtidos no cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness* para as antenas de Vivaldi e bioinspirada, a Tabela 35 apresenta um resumo das tabelas de distâncias euclidianas (valores normalizados) detalhadas individualmente na Seção 6.2.3.

Tabela 35 - Tabela resumo com as distâncias euclidianas em unidade para o cruzamento das estatísticas valor RMS e Skewness.

Antena	**Frequência (MHz)**	**Falhas**	**R.A. Isolador**	**D.P. Nomex**	**R.A. Nomex**	**D.T. Óleo**	**R.A. Óleo**
Vivaldi	400	D.P. Isolador	0,6880	0,2002	0,2010	0,1187	0,2008
Vivaldi	400	R.A. Isolador	---	0,8882	0,8890	0,8066	0,8888
Vivaldi	400	D.P. Nomex	---	---	$7{,}8154 \times 10^{-4}$	0,0816	$5{,}9591 \times 10^{-4}$
Vivaldi	400	R.A. Nomex	---	---	---	0,0824	$1{,}8563 \times 10^{-4}$
Vivaldi	400	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,0822
Vivaldi	500	D.P. Isolador	0,0602	0,0483	0,0452	0,6023	0,0501
Vivaldi	500	R.A. Isolador	---	0,1085	0,1054	0,5421	0,1103
Vivaldi	500	D.P. Nomex	---	---	0,0031	0,6507	0,0018

Vivaldi	500	R.A. Nomex	---	---	---	0,6475	0,0049
Vivaldi	500	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,6524
Vivaldi	600	D.P. Isolador	$6{,}3282 \times 10^{-4}$	0,0728	0,2147	0,6254	0,0210
Vivaldi	600	R.A. Isolador	---	0,0735	0,2153	0,6260	0,0217
Vivaldi	600	D.P. Nomex	---	---	0,1419	0,5525	0,0518
Vivaldi	600	R.A. Nomex	---	---	---	0,4107	0,1936
Vivaldi	600	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,6043
Vivaldi	700	D.P. Isolador	$4{,}0123 \times 10^{-4}$	$9{,}8590 \times 10^{-4}$	0,0029	0,5908	0,0043
Vivaldi	700	R.A. Isolador	---	$5{,}8467 \times 10^{-4}$	0,0033	0,5904	0,0047
Vivaldi	700	D.P. Nomex	---	---	0,0039	0,5899	0,0053
Vivaldi	700	R.A. Nomex	---	---	---	0,5938	0,0014
Vivaldi	700	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,5951
Vivaldi	900	D.P. Isolador	$2{,}2477 \times 10^{-04}$	0,0816	0,0044	0,2582	0,3845
Vivaldi	900	R.A. Isolador	---	0,0813	0,0041	0,2580	0,3843
Vivaldi	900	D.P. Nomex	---	---	0,0772	0,1766	0,3029
Vivaldi	900	R.A. Nomex	---	---	---	0,2538	0,3801
Vivaldi	900	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,1263
Bioinspirada	400	D.P. Isolador	0,1252	0,0114	0,0803	0,4369	0,1103
Bioinspirada	400	R.A. Isolador	---	0,1366	0,2055	0,3117	0,2355
Bioinspirada	400	D.P. Nomex	---	---	0,0689	0,4483	0,0989
Bioinspirada	400	R.A. Nomex	---	---	---	0,5172	0,0300
Bioinspirada	400	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,5472
Bioinspirada	700	D.P. Isolador	0,0540	0,2223	0,3685	0,0788	0,3760

Bioinspirada	700	R.A. Isolador	---	0,2763	0,4225	0,1329	0,4300
Bioinspirada	700	D.P. Nomex	---	---	0,1462	0,1435	0,1537
Bioinspirada	700	R.A. Nomex	---	---	---	0,2896	0,0075
Bioinspirada	700	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,2972
Bioinspirada	900	D.P. Isolador	0,0162	0,5300	0,8138	0,5102	0,5478
Bioinspirada	900	R.A. Isolador	---	0,5138	0,7976	0,4940	0,5316
Bioinspirada	900	D.P. Nomex	---	---	0,2838	0,0198	0,0178
Bioinspirada	900	R.A. Nomex	---	---	---	0,3036	0,2660
Bioinspirada	900	D.T. Óleo	---	---	---	---	0,0376

A Tabela 35 apresenta as distâncias euclidianas calculadas para a análise do cruzamento das estatísticas valor RMS e *Skewness*, considerando as antenas de Vivaldi e bioinspirada. Para facilitar a comparação entre as frequências, foi determinada a média total de cada tabela. Os valores médios obtidos para a antena de Vivaldi foram: 0,3419 em 400 MHz; 0,2422 em 500 MHz; 0,2551 em 600 MHz; 0,1992 em 700 MHz; e 0,1849 em 900 MHz. Já para a antena bioinspirada, as médias calculadas foram: 0,2243 em 400 MHz; 0,2266 em 700 MHz; e 0,3789 em 900 MHz.

Com base nesses resultados, observa-se que a antena de Vivaldi teve seu melhor desempenho em 400 MHz com o valor médio de 0,3419, enquanto a antena bioinspirada se destacou em 900 MHz com 0,3789, indicando as melhores combinações para a separação do conjunto de dados, levando em conta a antena e frequência para a estatística RMS e Skewness.

Compilando as análises ao longo deste capítulo, observa-se que a antena Vivaldi obteve bons resultados no mapa PR para as frequências de 400 MHz, 600 MHz e 700 MHz, com a PCA identificando padrões nas frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz. As estatísticas valor RMS e *Kurtosis* destacaram-se nas frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz, assim como as combinações de valor RMS e *Skewness* foram significativas nas frequências de 400 MHz, 500 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz.

Por outro lado, a antena bioinspirada obteve êxito no mapa PR para as frequências de 500 MHz, 600 MHz e 700 MHz, enquanto a PCA evidenciou padrões nas frequências de 400 MHz, 600 MHz, 700 MHz e 900 MHz. As métricas de valor RMS e *Kurtosis* foram relevantes nas frequências de 400 MHz, 700 MHz e 900 MHz, assim como as combinações de valor RMS com *Skewness* foram significativas nas frequências de 400 MHz, 700 MHz e 900 MHz.

A Tabela 36 apresenta um resumo dos melhores desempenhos de cada antena para cada uma das técnicas utilizadas.

Tabela 36 – Melhores resultados de cada antena para cada uma das técnicas utilizadas, considerando a distância euclidiana média entre todos os grupos.

Antena\Técnica	Mapa PR	PCA	RMS/Kurtosis	RMS/Skewness
Antena de Vivaldi	400 MHz 0,4050	400 MHz 0,3145	400 MHz 0,2819	400 MHz 0,3419
Antena bioinspirada	500 MHz 0,2370	700 MHz 0,3199	900 MHz 0,3652	900 MHz 0,3789

Analisando a Tabela 36, nota-se que o melhor resultado para a separação dos conjuntos de dados provenientes das falhas emuladas durante os ensaios foi a combinação da antena de Vivaldi, a técnica de mapa PR e a frequência de 400 MHz, com média final de 0,4050. Por outro lado, as combinações das estatísticas valor RMS e *Skewness* e valor RMS e *Kurtosis*, aplicadas à antena bioinspirada sintonizada em 900 MHz, também apresentaram um bom desempenho, com os 2º e 3º maiores valores médios calculados, 0,3789 e 0,3652, respectivamente. É importante ressaltar que os melhores resultados estão de acordo com as frequências de ressonância das antenas de Vivaldi e bioinspirada, mostrados na Figura 11(c) e 11 (d) respectivamente.

Embora a técnica de PCA não tenha alcançado os maiores valores médios na separação dos conjuntos de dados das falhas analisadas, esta técnica demonstrou maior aproveitamento entre as diferentes frequências avaliadas. No caso da antena de Vivaldi, foram obtidos resultados de separação dos conjuntos de dados em cinco das seis frequências avaliadas, enquanto na antena bioinspirada esse aproveitamento ocorreu em quatro das seis frequências.

7. CONCLUSÃO

Os transformadores de potência regulam os níveis de tensão no sistema de distribuição de energia de um país, garantindo a qualidade, confiabilidade e segurança do fornecimento de energia elétrica e preservando a vida útil dos equipamentos conectados à rede. No entanto, esses equipamentos sofrem com a deterioração devido ao surgimento de falhas, como descargas parciais e totais causadas pela contaminação de seus elementos. Diante disso, a implementação de um sistema de detecção e classificação de falhas em transformadores torna-se fundamental, uma vez que é possível prolongar sua vida útil, proteger um ativo de alto custo, reduzir gastos com a manutenção e aumentar a segurança dos usuários.

Dentre as diversas técnicas existentes para o diagnóstico de falhas em transformadores de potência, uma alternativa promissora é a análise de ondas UHF. A literatura tradicional delimitava uma faixa de frequência de 300 MHz a 3 GHz para detecção dessas falhas. No entanto, um estudo recente de Tenbohlen et al. (2023), realizado em transformadores ao redor do mundo, demonstrou a eficácia da faixa de 400 MHz a 900 MHz para monitoramento desses equipamentos. Apesar da redução na faixa de frequência para análise, o sistema demanda dispositivos que operem com alta largura de banda e frequência, o que eleva seu custo final.

Com base nessa problemática, este trabalho avaliou a utilização de um dispositivo RTL-SDR de baixo custo associado a duas topologias de antenas distintas para detectar e classificar três tipos de falhas em transformadores: descarga parcial no isolador, descarga parcial no isolante à base de celulose, e descarga total no óleo isolante.

Os resultados dos ensaios realizados demonstraram que o dispositivo RTL-SDR associado às antenas e às métricas aplicadas, apresentou desempenho promissor no diagnóstico e na classificação das falhas abordadas, com êxito em pelo menos três das seis frequências analisadas. Destaca-se que a antena de Vivaldi combinada com a técnica de mapa PR e a frequência de 400 MHz apresentou o melhor desempenho. Ressalta-se ainda que a utilização de dispositivos RTL-SDR de baixo custo torna o método UHF mais acessível, reduzindo o custo de aquisição de dados, que anteriormente poderia chegar a milhares de reais.

Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de novas topologias de antenas, a análise de diferentes tipos de falhas em transformadores, a utilização de outros tipos de dispositivos SDR, a avaliação da compatibilidade USB desses dispostivos, analise da evolução das falhas

ao longo do tempo e a avaliação do porcessamento de sinais IQ de forma direta, sem trata-los no domínio frequência.

Referências

ABBASI, A. R. Fault detection and diagnosis in power transformers: a comprehensive review and classification of publications and methods. **Electric Power Systems Research**, v. 209, p. 107990, 2022.

ARDILA-REY, J. A. et al. Bioinspired Ultrahigh Frequency Antenna for Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 73, p. 1-18, 2024.

ARDILA-REY, J. A. et al. Separation of partial discharges sources and noise based on the temporal and spectral response of the signals. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 70, p. 1-13, 2021.

BARRETO, G. K. I. Um estudo comparativo sobre a influência da temperatura em transdutores piezelétricos aplicados ao diagnóstico de falhas em transformadores por meio de emissão acústica. 2023.

BITTENCOURT, I. R. Análise comparativa do diagnóstico e classificação de falhas em transformadores por meio de sensoriamento de corrente em altas frequências, UHF e piezeletricidade. 2025.

CARVALHO, A. C. P. L. F.; MENEZES, A. G.; BONIDIA, R. P. Ciência de dados: fundamentos e aplicações. 2024.

CHRISTINA, A. et al. Causes of transformer failures and diagnostic methods–A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1442-1456, 2018.

Cigrè TB 861 “Improvements to PD Measurements for Factory and Site Acceptance Tests of Power. **Cigre Technical Brochure 861**. 2022.

CRONJÉ, J. J. **Software architecture design of a software defined radio system**. 2004. Tese de Doutorado. University of Stellenbosch.

CASTRO, B. A. et al. Assessment of macro fiber composite sensors for measurement of acoustic partial discharge signals in power transformers. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 18, p. 6090-6099, 2017.

FRESNO, J. M. et al. Partial discharges and noise separation using spectral power ratios and genetic algorithms. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 1, p. 31-38, 2017.

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

IEC 60599. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of the results of dissolved gas analysis, 2015.

JIANG, J. et al. Partial discharge detection and diagnosis of transformer bushing based on UHF method. **IEEE Sensors Journal**, v. 21, n. 15, p. 16798-16806, 2021.

KARIMI-GHARTEMANI, M.; KARIMI, H.; IRAVANI, M. R. A magnitude/phase-locked loop system based on estimation of frequency and in-phase/quadrature-phase amplitudes. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 51, n. 2, p. 511-517, 2004.

KUMAR, H. et al. A review on the classification of partial discharges in medium-voltage cables: detection, feature extraction, artificial intelligence-based classification, and optimization techniques. **Energies**, v. 17, n. 5, p. 1142, 2024.

MARTINEZ-TARIFA, J. M.; ARDILA-REY, J. A.; ROBLES, G. Automatic selection of frequency bands for the power ratios separation technique in partial discharge measurements: part I, fundamentals and noise rejection in simple test objects. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 4, p. 2284-2291, 2015.

MELO, J. V. J. et al. Separation and Classification of Partial Discharge Sources in Substations. **Energies**, v. 17, n. 15, p. 3804, 2024.

MOHAMED, H. et al. Partial discharge detection using low cost RTL-SDR model for wideband spectrum sensing. In: **2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT)**. IEEE, 2016. p. 1-5.

MORAVEJ, Z.; ABDOOS, A. A. An improved fault detection scheme for power transformer protection. **Electric Power Components and Systems**, v. 40, n. 10, p. 1183-1207, 2012.

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.

OPPENHEIM, A. V.; VERGHESE, G. C. **Signals, systems & inference**. London, UK: Pearson, 2017.

ORELLANA, L. et al. Danger assessment of the partial discharges temporal evolution on a polluted insulator using UHF measurement and deep learning. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 124, p. 106573, 2023.

PRADEEP, L.; HAQUE, N.; PREETHA, P. Discrimination of multiple partial discharge sources in oil impregnated pressboard insulation using HFCT sensor & ensembled learning classifiers. **Measurement**, p. 117920, 2025.

PRIANANDA, C. W. et al. Machine Learning-Based Phase Resolved Partial Discharge Pattern Classification using HOG and PCA. In: **2024 IEEE 22nd Student Conference on Research and Development (SCOReD)**. IEEE, 2024. p. 7-12.

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

SACHDEV, M. S.; SHAH, D. V. Transformer differential and restricted earth fault protection using a digital processor. **Transactions of the Canadian Electrical Association, Engineering and Operating Division**, v. 20, n. pt 4, 1981.

SCHIEWALDT, K. et al. Assessment of UHF frequency range for failure classification in power transformers. **Sensors**, v. 24, n. 15, p. 5056, 2024.

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.

SONI, R.; MEHTA, B. Review on asset management of power transformer by diagnosing incipient faults and faults identification using various testing methodologies. **Engineering Failure Analysis**, v. 128, p. 105634, 2021.

STEWART, R. W. et al. A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 9, p. 64-71, 2015.

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

WHITEBOARD. **SDR/IQ**. Disponível em: http://whiteboard.ping.se/SDR/IQ. Acesso em: 20 mar. 2025.