



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Análise Comparativa do Diagnóstico e Classificação de
Falhas em Transformadores por meio de Sensoriamento de
Corrente em Altas Frequências, UHF e Piezeletricidade**

Izadora Rodrigues Bittencourt

Bauru
2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

“Análise Comparativa do Diagnóstico e Classificação de Falhas
em Transformadores por meio de Sensoriamento de Corrente
em Altas Frequências, UHF e Piezeletricidade”

IZADORA RODRIGUES BITTENCOURT

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

Orientador: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de
Castro

Bauru
2025

Bittencourt, Izadora Rodrigues.

Análise Comparativa do Diagnóstico e Classificação de Falhas em Transformadores por meio de Sensoriamento de Corrente em Altas Frequências, UHF e Piezeletricidade / Izadora Rodrigues Bittencourt. - Bauru, 2025

282 f. : il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro

1. Transformadores. 2. Emissão Acústica. 3. Processamento de Sinais. 4. Diagnóstico de Falhas. 4. Arco Elétrico. 5. Descargas Parciais. 6. UHF. 7. Corrente em Altas Frequências. 8. Piezeletricidade. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

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

Aos 04 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 10h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de IZADORA RODRIGUES BITTENCOURT, intitulada **ANÁLISE COMPARATIVA DO DIAGNÓSTICO E CLASSIFICAÇÃO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES POR MEIO DE SENSORIAMENTO DE CORRENTE EM ALTAS FREQUÊNCIAS, UHF E PIEZOELETRICIDADE**. 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. EDUARDO COELHO MARQUES DA COSTA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Poli-USP, Prof. Dr. JOSÉ VITAL FERRAZ LEÃO (Participação Virtual) do(a) Engenharia Elétrica / Universidade de Lins. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a 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
 **BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO**
Data: 05/02/2025 10:18:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

IMPACTO POTENCIAL DESSA PESQUISA

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento de transformadores desempenha um papel crucial no contexto social e econômico, pois a detecção precoce de falhas nesses equipamentos pode assegurar um elevado nível de segurança e otimização no planejamento operacional do setor elétrico. Ao identificar falhas em seus estágios iniciais, é possível evitar interrupções abruptas no fornecimento de energia, que poderiam gerar significativos prejuízos econômicos para diversos setores, como a produção de bens e serviços. Para as concessionárias de energia, a redução das interrupções no fornecimento não apenas contribui para a melhoria dos indicadores de qualidade do serviço, como também minimiza os riscos de penalidades financeiras relacionadas ao descumprimento de contratos de fornecimento. Nesse sentido, esta pesquisa propõe o desenvolvimento de metodologias avançadas de diagnóstico de falhas em transformadores, que auxiliam na implementação de medidas preventivas, mitigando, assim, os impactos socioeconômicos associados à falha total desses dispositivos essenciais.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The development of transformer monitoring systems plays a crucial role in both social and economic contexts, as early detection of failures in these devices can ensure a high level of safety and optimization in the operational planning of the electrical sector. By identifying faults at their initial stages, it is possible to prevent sudden interruptions in the power supply, which could result in significant economic losses across various sectors, such as the production of goods and services. For energy utilities, reducing supply disruptions not only contributes to the improvement of service quality indicators but also minimizes the risk of financial penalties related to non-compliance with supply contracts. In this context, this research proposes the development of advanced fault diagnosis methodologies for transformers, which assist in the implementation of preventive measures, thereby mitigating the socioeconomic impacts associated with the total failure of these essential devices.

*Dedico este trabalho à minha mãe Izilda, minha irmã Izabella e meu
companheiro Giovani, meus maiores apoiadores.*

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente à minha mãe Izilda e minha irmã Izabella, que sempre me apoiaram e incentivaram nessa jornada acadêmica.

Ao meu companheiro Giovani, que me incentivou e apoiou desde o início deste trabalho, sendo um grande alicerce para mim.

Ao meu orientador Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro pela orientação, trabalho, dedicação, inspiração e presença durante essa jornada acadêmica, sempre se fazendo presente e indispensável. Seu apoio e parceria foram imprescindíveis para a manutenção e conclusão desse Mestrado.

À minha amiga Marina, maior incentivadora e apoiadora deste Mestrado, e que acompanhou de perto desde o início, me inspirando e me lembrando do papel das mulheres na ciência.

À Faculdade de Engenharia, pelas oportunidades e suporte providenciados durante os estudos, com sua infraestrutura que possibilitou desenvolver e aprofundar meu conhecimento, assim como despertar o interesse por novos estudos, alimentando assim esse espírito acadêmico e o anseio pelo desenvolvimento de novas pesquisas.

A todos os professores da Faculdade de Engenharia de Bauru que atuaram na minha formação acadêmica e compartilharam parte de seu conhecimento para meu desenvolvimento pessoal e intelectual.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado, que foi fundamental para a continuidade dos meus estudos e para o desenvolvimento do meu projeto de pesquisa.

“A ciência descobriu não só que o universo tem uma grandeza vertiginosa e extática, não só que ele é acessível à compreensão humana, mas também que somos, num sentido muito real e de grande alcance, parte desse cosmos, nascido deles, nosso destino profundamente conectado ao dele.”

Carl Sagan

RESUMO

Apesar do avanço nos estudos de técnicas de monitoramento de descargas em transformadores, ainda permanecem alguns desafios na classificação e diagnóstico de diferentes tipos de falhas, além da necessidade de melhorias na aquisição de dados, especialmente em técnicas de UHF. Esses avanços podem ajudar a reduzir custos e melhorar a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, minimizando interrupções e perdas no sistema elétrico. Neste contexto, este estudo investigou três métodos de sensoriamento – UHF, emissão acústica e análise de corrente elétrica em alta frequência – bem como duas técnicas de classificação de falhas, sendo elas a combinação de estatísticas e Análise de Componentes Principais, a fim de se detectar e classificar três condições em transformadores: descarga parcial no isolador, arco elétrico e operação sem falha. Foram coletados 200 sinais para cada falha imposta ao transformador e, posteriormente, foram realizadas análises com o intuito de classificar as condições estudadas. Os resultados indicaram que, apesar das três técnicas de sensoriamento obterem êxito tanto na detecção, quanto na classificação das falhas quando operando individualmente, a utilização de um sensoriamento híbrido, ou seja, os três sensores operando simultaneamente, aprimora a confiabilidade do sistema. Além disso, esse trabalho analisou a utilização de um detector de envoltória para os sinais UHF, a fim de possibilitar a manipulação de frequências menores em relação à faixa de frequência descrita pela bibliografia.

Palavras-chave: transformadores, diagnóstico de falhas, sensoriamento, UHF, corrente elétrica, emissão acústica, piezeletricidade, detector de envoltória, análise de componentes principais, processamento de sinais, combinação de estatísticas.

ABSTRACT

Despite the advancements in studies on transformer discharge monitoring techniques, several challenges remain in classifying and diagnosing different types of faults, as well as in improving data acquisition, particularly in UHF techniques. These advancements can help reduce costs and enhance the reliability of power supply by minimizing interruptions and losses in the electrical system. In this context, this study investigated three sensing methods – UHF, acoustic emission, and high-frequency electric current analysis – as well as two fault classification techniques, namely the combination of statistical methods and Principal Component Analysis, to detect and classify three conditions in transformers: partial discharge in the insulator, electric arc, and fault-free operation. A total of 200 signals were collected for each fault imposed on the transformer, and analyses were subsequently conducted to classify the studied conditions. The results indicated that, although the three sensing techniques were successful in both detecting and classifying faults when operating individually, the use of hybrid sensing – with all three sensors operating simultaneously – ensures system reliability. Furthermore, this work analyzed the use of an envelope detector for UHF signals to facilitate the manipulation of lower frequencies compared to the frequency range described in the literature.

Keywords: transformers, fault diagnosis, sensing, UHF, electric current, acoustic emission, piezoelectricity, envelope detector, principal component analysis, signal processing, statistical combination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Falhas em transformadores.	26
Figura 2 – Causas de falhas em transformadores entre 1991 e 2010.....	28
Figura 3 – Falha em isolador.....	33
Figura 4 – Falhas no enrolamento.....	34
Figura 5 – Principais gases de hidrocarbonetos produzidos pelo óleo.....	37
Figura 6 - Subprodutos da decomposição de celulose e hidrocarbonetos na presença de oxigênio.	37
Figura 7 – Primeiro Triângulo de Duval, utilizando Metano, Etileno e Acetileno para diagnosticar os diferentes modos de falha.	41
Figura 8 – Representação esquemática da operação de um HFCT.	42
Figura 9 – PRPD de descargas parciais em transformadores.....	43
Figura 10 – Sinal acústico gerado por uma descarga parcial.....	47
Figura 11 – Demonstração do efeito piezelétrico direto e reverso.	48
Figura 12 – Faixas de frequência emitidas por diversas topologias de transformadores.	52
Figura 13 – Exemplo de detecção de envoltória de um sinal acústico modulado.	65
Figura 14 – Processo de detecção de envoltória de um sinal RF.	65
Figura 15 – Circuito detector de envoltória.....	66
Figura 16 – Transformador de Distribuição isolado a óleo de potência nominal de 30kV e tensões nominais de 13,8 kV no primário e 127 V/220 V no secundário.	68
Figura 17 – Fonte Variável de Média Tensão da marca General Electric, com Capacidade de até 40 kV.	68
Figura 18 – Osciloscópio Yokogawa DL850 utilizado para a aquisição dos dados. ...	69
Figura 19 – Eletrodo e bucha utilizados no ensaio laboratorial.	70
Figura 20 – Configuração dos ensaios laboratoriais.	70
Figura 21 – Parâmetro de reflexão (S11) e antena de Vivaldi utilizada.....	71
Figura 22 – Procedimento experimental para o sensoriamento UHF.....	72
Figura 23 – Transdutor piezelétrico PIC255-000041371 Piez-Sensor®.....	73
Figura 24 – Transformador de Distribuição com transdutor piezelétrico acoplado....	73
Figura 25 – Circuito do Amplificador Aplicado.....	74
Figura 26 – Curvas de Ganho e Rejeição de modo Comum.....	74
Figura 27 – Transformador de Corrente de Alta Frequência da marca IPEC, doado ao laboratório pela empresa.....	75
Figura 28 – Resposta em Frequência do HFCT48E.	76
Figura 29 – Configuração dos Ensaio Laboratoriais Realizados Para o Sensoriamento por Corrente Elétrica.	76
Figura 30 – Fluxograma do processamento de sinais para o cálculo da Distância Euclidiana.....	79
Figura 31 – Fluxograma do processamento de sinais para o sensoriamento UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica, respectivamente.....	81

Figura 32 – Envoltória de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo de um arco elétrico.....	83
Figura 33 – Envoltória de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo de uma descarga parcial no isolador.....	83
Figura 34 – Envoltória de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo do transformador operando sem falha.	84
Figura 35 – Espectro de frequências da envoltória de uma amostra de sinal UHF de um arco elétrico.....	85
Figura 36 – Espectro de frequências da envoltória de uma amostra de sinal UHF de uma descarga parcial no isolador.....	85
Figura 37 – Espectro de frequências da envoltória de uma amostra de sinal UHF do transformador operando sem falha.	86
Figura 38 – Espectro médio da envoltória do sinal UHF de um arco elétrico.	86
Figura 39 – Espectro médio da envoltória do sinal UHF de uma descarga parcial no isolador.....	87
Figura 40 – Espectro médio da envoltória do sinal UHF do transformador operando sem falha.....	87
Figura 41 – Cruzamento entre Energia e Desvio Padrão, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	89
Figura 42 – Cruzamento entre Energia e Frequência Média, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	90
Figura 43 – Cruzamento entre Energia e Banda Equivalente, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	91
Figura 44 – Cruzamento entre Energia e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	92
Figura 45 – Cruzamento entre Energia e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	93
Figura 46 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	94
Figura 47 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	95
Figura 48 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	96
Figura 49 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	97
Figura 50 – Cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	98
Figura 51 – Cruzamento entre Frequência Média e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	99
Figura 52 – Cruzamento entre Frequência Média e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	100
Figura 53 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	101

Figura 54 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	102
Figura 55 – Cruzamento entre Curtose e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.	103
Figura 56 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento UHF.	104
Figura 57 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento UHF.	105
Figura 58 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.	106
Figura 59 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	107
Figura 60 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento UHF.	108
Figura 61 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.	109
Figura 62 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	110
Figura 63 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.	111
Figura 64 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	112
Figura 65 – Cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	113
Figura 66 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento UHF.	114
Figura 67 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.	115
Figura 68 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	116
Figura 69 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.	117
Figura 70 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	118
Figura 71 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	119
Figura 72 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.	120
Figura 73 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	121
Figura 74 – Cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	122
Figura 75 – Cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.	123

Figura 76 – Cruzamento entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, para o sensoriamento UHF.	125
Figura 77 – Amostra de um sinal acústico no domínio do tempo de uma descarga parcial no isolador.	126
Figura 78 – Amostra de um sinal acústico no domínio do tempo de um arco elétrico.	126
Figura 79 – Amostra de um sinal acústico no domínio do tempo do transformador operando sem falha.	127
Figura 80 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal acústico de uma descarga parcial no isolador.	128
Figura 81 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal acústico de um arco elétrico.	129
Figura 82 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal acústico do transformador operando sem falha.	129
Figura 83 – Espectro médio do sinal acústico de uma descarga parcial no isolador.	130
Figura 84 – Espectro médio do sinal acústico de um arco elétrico.	130
Figura 85 – Espectro médio do sinal acústico do transformador operando sem falha.	131
Figura 86 – Cruzamento entre Energia e Desvio Padrão normalizados, para o sensoriamento acústico.	132
Figura 87 – Cruzamento entre Energia e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento acústico.	133
Figura 88 – Cruzamento entre Energia e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.	134
Figura 89 – Cruzamento entre Energia e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.	135
Figura 90 – Cruzamento entre Energia e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.	136
Figura 91 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento acústico.	137
Figura 92 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.	138
Figura 93 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.	139
Figura 94 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.	140
Figura 95 – Cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.	141
Figura 96 – Cruzamento entre Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.	142
Figura 97 – Cruzamento entre Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.	143

Figura 98 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.....	144
Figura 99 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.....	145
Figura 100 – Cruzamento entre Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.....	146
Figura 101 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoramento acústico.	147
Figura 102 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoramento acústico.	148
Figura 103 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.....	149
Figura 104 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.....	150
Figura 105 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoramento acústico.	151
Figura 106 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.....	152
Figura 107 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.	153
Figura 108 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.....	154
Figura 109 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.	155
Figura 110 – Cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.....	156
Figura 111 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoramento acústico.....	157
Figura 112 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.	158
Figura 113 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.	159
Figura 114 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.	160
Figura 115 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.	161
Figura 116 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.....	162
Figura 117 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.	163
Figura 118 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.	164
Figura 119 – Cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.	165

Figura 120 – Cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.	166
Figura 121 – Cruzamento entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, para o sensoriamento acústico.....	168
Figura 122 – Amostra de um sinal de corrente elétrica no domínio do tempo de uma descarga parcial no isolador.....	169
Figura 123 – Amostra de um sinal de corrente elétrica no domínio do tempo de um arco elétrico.....	170
Figura 124 – Amostra de um sinal de corrente elétrica no domínio do tempo do transformador operando sem falha.	170
Figura 125 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal de corrente elétrica de uma descarga parcial no isolador.....	172
Figura 126 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal de corrente elétrica de um arco elétrico.....	172
Figura 127 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal de corrente elétrica do transformador operando sem falha.	173
Figura 128 – Espectro médio do sinal de corrente elétrica de uma descarga parcial no isolador.....	173
Figura 129 – Espectro médio do sinal de corrente elétrica de um arco elétrico.	174
Figura 130 – Espectro médio do sinal de corrente elétrica do transformador operando sem falha.....	174
Figura 131 – Cruzamento entre Energia e Desvio Padrão normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	176
Figura 132 – Cruzamento entre Energia e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	177
Figura 133 – Cruzamento entre Energia e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	178
Figura 134 – Cruzamento entre Energia e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	179
Figura 135 – Cruzamento entre Energia e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	180
Figura 136 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	181
Figura 137 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	182
Figura 138 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	183
Figura 139 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	184
Figura 140 – Cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.....	185
Figura 141 – Cruzamento entre Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	186

Figura 142 – Cruzamento entre Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	187
Figura 143 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	188
Figura 144 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	189
Figura 145 – Cruzamento entre Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	190
Figura 146 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	191
Figura 147 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	192
Figura 148 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	193
Figura 149 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	194
Figura 150 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	195
Figura 151 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	196
Figura 152 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	197
Figura 153 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	198
Figura 154 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	199
Figura 155 – Cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	200
Figura 156 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	201
Figura 157 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	202
Figura 158 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	203
Figura 159 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	204
Figura 160 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	205
Figura 161 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	206
Figura 162 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	207
Figura 163 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoramento de corrente elétrica.	208

Figura 164 – Cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	209
Figura 165 – Cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.	210
Figura 166 – Cruzamento entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, para o sensoriamento de corrente elétrica.	212
Figura 167 – Cruzamento entre Energia para o sensoriamento UHF e Energia para o sensoriamento por Emissão Acústica.	213
Figura 168 – Cruzamento entre Desvio Padrão para o sensoriamento UHF e Desvio Padrão para o sensoriamento por Emissão Acústica.	214
Figura 169 – Cruzamento entre Frequência Média para o sensoriamento UHF e Frequência Média para o sensoriamento por Emissão Acústica.	215
Figura 170 – Cruzamento entre Banda Equivalente para o sensoriamento UHF e Banda Equivalente para o sensoriamento por Emissão Acústica.	216
Figura 171 – Cruzamento entre Curtose para o sensoriamento UHF e Curtose para o sensoriamento por Emissão Acústica.	217
Figura 172 – Cruzamento entre Assimetria para o sensoriamento UHF e Assimetria para o sensoriamento por Emissão Acústica.	218
Figura 173 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica.	219
Figura 174 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica.	220
Figura 175 – Cruzamento entre Energia para o sensoriamento UHF e Energia para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	221
Figura 176 – Cruzamento entre Desvio Padrão para o sensoriamento UHF e Desvio Padrão para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	222
Figura 177 – Cruzamento entre Frequência Média para o sensoriamento UHF e Frequência Média para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	223
Figura 178 – Cruzamento entre Banda Equivalente para o sensoriamento UHF e Banda Equivalente para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	224
Figura 179 – Cruzamento entre Curtose para o sensoriamento UHF e Curtose para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	225
Figura 180 – Cruzamento entre Assimetria para o sensoriamento UHF e Assimetria para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	226
Figura 181 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica.	227
Figura 182 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica.	228
Figura 183 – Cruzamento entre Energia para o sensoriamento por Emissão Acústica e Energia para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	229
Figura 184 – Cruzamento entre Desvio Padrão para o sensoriamento por Emissão Acústica e Desvio Padrão para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	230

Figura 185 – Cruzamento entre Frequência Média para o sensoriamento por Emissão Acústica e Frequência Média para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	231
Figura 186 – Cruzamento entre Banda Equivalente para o sensoriamento por Emissão Acústica e Banda Equivalente para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	232
Figura 187 – Cruzamento entre Curtose para o sensoriamento por Emissão Acústica e Curtose para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	233
Figura 188 – Cruzamento entre Assimetria para o sensoriamento por Emissão Acústica e Assimetria para o sensoriamento por Corrente Elétrica.	234
Figura 189 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	235
Figura 190 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	236
Figura 191 – Cruzamento entre Energia para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	237
Figura 192 – Cruzamento entre Desvio Padrão para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	238
Figura 193 – Cruzamento entre Frequência Média para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	239
Figura 194 – Cruzamento entre Banda Equivalente para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	240
Figura 195 – Cruzamento entre Curtose para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	241
Figura 196 – Cruzamento entre Assimetria para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	242
Figura 197 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	244
Figura 198 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	245

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Falhas em transformadores (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).	30
Tabela 2 – Falhas típicas em transformadores de potência (IEC 60599, 2015).....	38
Tabela 3 – PRPD das descargas parciais em transformadores (Adaptado de Gamez, 2018).	46
Tabela 4 – Faixas de frequência de falhas em transformadores (TENBOHLEN et al., 2023).	53
Tabela 5 – Comparação entre as técnicas de classificação estudadas por Schiewaldt (2024) a partir das distâncias euclidianas entre o centro geométrico de cada agrupamento.	54
Tabela 6 – Especificações do transdutor PIC255-000041371 Piez-Sensor®.	73
Tabela 7 – Especificações do INA 128P	73
Tabela 8 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Desvio Padrão.....	89
Tabela 9 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Frequência Média	90
Tabela 10 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Banda Equivalente	91
Tabela 11 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Curtose	92
Tabela 12 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Assimetria	93
Tabela 13 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Frequência Média	94
Tabela 14 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Banda Equivalente	95
Tabela 15 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Curtose	96
Tabela 16 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Assimetria.	97
Tabela 17 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Banda Equivalente.....	98
Tabela 18 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Curtose	99
Tabela 19 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Assimetria	100
Tabela 20 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Curtose	101
Tabela 21 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Assimetria.....	102
Tabela 22 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Curtose e Assimetria	103

Tabela 23 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média	105
Tabela 24 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente.....	106
Tabela 25 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Curtose	107
Tabela 26 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria.....	108
Tabela 27 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente	109
Tabela 28 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Curtose	110
Tabela 29 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria.....	111
Tabela 30 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Curtose	112
Tabela 31 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria.....	113
Tabela 32 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Curtose e Assimetria.....	114
Tabela 33 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente	115
Tabela 34 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose	116
Tabela 35 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria.....	117
Tabela 36 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose	118
Tabela 37 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria	119
Tabela 38 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria.....	120
Tabela 39 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose	121
Tabela 40 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria	122
Tabela 41 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Curtose e Assimetria.....	123
Tabela 42 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria	124
Tabela 43 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Análise de Componentes Principais	125
Tabela 44 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Desvio Padrão.....	132

Tabela 45 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Frequência Média	133
Tabela 46 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Banda Equivalente	134
Tabela 47 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Curtose	135
Tabela 48 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Assimetria	136
Tabela 49 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Frequência Média	137
Tabela 50 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Banda Equivalente.....	138
Tabela 51 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Curtose	139
Tabela 52 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Assimetria	140
Tabela 53 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Banda Equivalente.....	141
Tabela 54 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Curtose	142
Tabela 55 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Assimetria	143
Tabela 56 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Curtose.....	144
Tabela 57 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Assimetria.....	145
Tabela 58 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Curtose e Assimetria	146
Tabela 59 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média	148
Tabela 60 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente.....	149
Tabela 61 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Curtose	150
Tabela 62 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria.....	151
Tabela 63 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente	152
Tabela 64 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Curtose.....	153
Tabela 65 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria.....	154
Tabela 66 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Curtose	155

Tabela 67 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria	156
Tabela 68 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Curtose e Assimetria	157
Tabela 69 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente	158
Tabela 70 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose	159
Tabela 71 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria.....	160
Tabela 72 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose	161
Tabela 73 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria	162
Tabela 74 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria.....	163
Tabela 75 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose	164
Tabela 76 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria	165
Tabela 77 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Curtose e Assimetria.....	166
Tabela 78 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria	167
Tabela 79 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Análise de Componentes Principais	169
Tabela 80 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Desvio Padrão.....	176
Tabela 81 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Frequência Média	177
Tabela 82 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Banda Equivalente	178
Tabela 83 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Curtose	179
Tabela 84 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Assimetria	180
Tabela 85 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Frequência Média	181
Tabela 86 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Banda Equivalente	182
Tabela 87 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Curtose	183
Tabela 88 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Assimetria	184

Tabela 89 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Banda Equivalente.....	185
Tabela 90 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Curtose	186
Tabela 91 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Assimetria	187
Tabela 92 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Curtose	188
Tabela 93 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Assimetria.....	189
Tabela 94 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Curtose e Assimetria	190
Tabela 95 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média	192
Tabela 96 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente.....	193
Tabela 97 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Curtose	194
Tabela 98 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria.....	195
Tabela 99 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente	196
Tabela 100 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Curtose	197
Tabela 101 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria.....	198
Tabela 102 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Curtose	199
Tabela 103 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria	200
Tabela 104 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Curtose e Assimetria.....	201
Tabela 105 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente.....	202
Tabela 106 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose....	203
Tabela 107 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria	204
Tabela 108 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose ..	205
Tabela 109 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria	206

Tabela 110 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria.....	207
Tabela 111 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose	208
Tabela 112 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria.....	209
Tabela 113 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Curtose e Assimetria	210
Tabela 114 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria	211
Tabela 115 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Análise de Componentes Principais	212
Tabela 116 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	214
Tabela 117 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	215
Tabela 118 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	216
Tabela 119 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	217
Tabela 120 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	218
Tabela 121 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	219
Tabela 122 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	220
Tabela 123 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica	221
Tabela 124 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	222
Tabela 125 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	223
Tabela 126 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica.....	224
Tabela 127 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica.....	225
Tabela 128 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	226
Tabela 129 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	227
Tabela 130 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	228

Tabela 131 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	229
Tabela 132 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	230
Tabela 133 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	231
Tabela 134 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.....	232
Tabela 135 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.	233
Tabela 136 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	234
Tabela 137 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica	235
Tabela 138 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	236
Tabela 139 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	237
Tabela 140 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.....	238
Tabela 141 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	239
Tabela 142 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	240
Tabela 143 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	241
Tabela 144 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.....	242
Tabela 145 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.....	243
Tabela 146 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	244
Tabela 147 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica	245
Tabela 148 – Resumo dos resultados	246

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
E	<i>Campo Elétrico</i>	V / m
M	<i>Indutância Mútua</i>	H
H	<i>Campo Magnético</i>	A / m
B	<i>Fluxo Magnético</i>	T
Z_t	<i>Impedância de Transferência</i>	Ω
N	<i>Número de amostras de um sinal</i>	<i>Adimensional</i>
T	<i>Tensão mecânica ou stress</i>	N / m
E	<i>Energia de uma sequência discreta</i>	J
$x[n]$	<i>Sinal amostrado</i>	<i>Adimensional</i>
X_n	<i>Transformada de Fourier discreta de um sinal $x[n]$</i>	<i>Adimensional</i>
$H\{x[t]\}$	<i>Transformada de Hilbert</i>	<i>Adimensional</i>
$d(P,Q)$	<i>Distância Euclidiana</i>	<i>Adimensional</i>
ε	<i>Permissividade dielétrica</i>	F / m
f	<i>Frequência</i>	Hz
EB	<i>Banda Equivalente</i>	Hz
AB	<i>Frequência Média</i>	Hz
C	<i>Matriz covariância</i>	<i>Adimensional</i>
U	<i>Matriz ortonormal contendo autovetores de C</i>	<i>Adimensional</i>
S	<i>Assimetria</i>	<i>Adimensional</i>
K	<i>Curtose</i>	<i>Adimensional</i>
σ	<i>Desvio Padrão</i>	<i>Adimensional</i>
μ	<i>Média</i>	<i>Adimensional</i>
CP	<i>Componentes Principais</i>	<i>Adimensional</i>
$d_{m\beta}, d_{\beta m}$	<i>Constantes Piezelétricas</i>	m / V
ε	<i>Permissividade Dielétrica</i>	F / m

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	16
1.1. Considerações Iniciais e Objetivos	16
1.2. Organização do Trabalho Acadêmico	23
CAPÍTULO II – FALHAS EM TRANSFORMADORES	24
CAPÍTULO III – MÉTODOS DE DIAGNÓSTICOS	36
3.1. Análise de Gases Chave.....	36
3.2. Estimativa de Carga Aparente	42
3.3. Sensores Indutivos.....	43
3.4. Padrões de Descargas Parciais Resolvidos por Fase.....	44
3.5. Sensoriamento por Emissão Acústica	47
3.6. Sensoriamento por UHF	51
CAPÍTULO IV – TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS	57
4.1. Técnicas de Reconhecimento de Padrões por Resposta em Frequência	57
4.2. Técnicas de Reconhecimento de Padrões por Estatísticas.....	58
4.3. Análise de Componentes Principais	61
4.4. Transformada de Hilbert.....	62
CAPÍTULO V – METODOLOGIA	67
5.1. Método de Ensaio Laboratorial	67
5.2. Metodologia de Processamento de Sinais.....	77
CAPÍTULO VI – RESULTADOS.....	82
6.1. Sensoriamento Individual	82
6.1.1 Sensoriamento UHF.....	82

6.1.2 Sensoriamento por Emissão Acústica	125
6.1.3 Sensoriamento por Corrente Elétrica.....	169
6.2. Sensoriamento Híbrido.....	212
6.2.1 Sensoriamento UHF cruzado com Sensoriamento por Emissão Acústica.....	213
6.2.2 Sensoriamento UHF cruzado com Sensoriamento por Corrente Elétrica.....	221
6.2.3 Sensoriamento por Emissão Acústica cruzado com Sensoriamento por Corrente Elétrica.....	229
6.2.4 Sensoriamento UHF cruzado com Sensoriamento por Emissão Acústica e Sensoriamento por Corrente Elétrica.....	237
6.3. Discussões.....	246
CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO	264
Referências	267

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma introdução geral sobre o campo de diagnóstico de falhas em transformadores, bem como os desafios científicos e tecnológicos que salientam a motivação desse trabalho.

1.1. Considerações Iniciais e Objetivos

A visível melhoria nos índices de fornecimento de energia elétrica nos últimos anos está diretamente relacionada à capacidade de monitoramento da condição dos transformadores conectados ao sistema elétrico (KUMAR, R. et al., 2022). O objetivo desses monitoramentos é prevenir a evolução de falhas que possam comprometer a integridade do equipamento, evitando não apenas a perda do ativo, que representa um alto custo, mas também os ônus indiretos, como interrupções na produção industrial, multas por falhas no fornecimento de energia, entre outros. Assim, o principal objetivo dos sistemas de monitoramento de transformadores é diagnosticar falhas de forma não invasiva, sem a necessidade de paradas para inspeções (JAN et al., 2015).

A maioria das falhas em transformadores é causada pela deterioração dos sistemas de isolamento, que pode ocorrer especialmente quando o transformador é operado em condições extremas, como por exemplo em sobrecarga, que eleva a temperatura da máquina a valores muito superiores à temperatura nominal culminando com a deterioração físico-química dos materiais isolantes da máquina. Um estudo conduzido por Murugan e Ramasamy (2019) analisou as principais falhas observadas durante o monitoramento de 343 transformadores ao longo de um período de 10 anos. Os resultados mostraram que 36,73% das falhas estavam relacionadas às isolações, seguidas por 21,28% nos enrolamentos, 15,74% nas buchas e 11,95%

no comutador de tensão.

Os transformadores de potência são naturalmente expostos a estresses operacionais, o que causa degradação dielétrica tanto em componentes internos como externos. Além disso, segundo a Empresa de Pesquisa Energética do Governo Federal (2019, apud ABRAHÃO, SOUZA, 2021), apesar dos avanços em eficiência energética, no período entre 2000 e 2019 o consumo de energia elétrica cresceu a uma taxa média geométrica anual de 2,8% no Brasil, o que resulta em um aumento contínuo de carga sobre esses transformadores, muitos dos quais já operam há vários anos.

Em transformadores de potência, os materiais de isolamento, em sua maioria, são a base de celulose, óleo mineral ou vegetal, polímeros ou cerâmica. Os materiais a base de celulose são inseridos entre as camadas dos enrolamentos primário e secundário para fornecer isolamentos dielétrico e mecânico e evitar arcos elétricos (TANG; HALE; THAKER, 2014). O transformador também pode ser imerso em óleo para proporcionar isolamento adicional. Nesse tipo de equipamento, os materiais à base de celulose estão submersos e impregnados com o óleo. Dessa forma, a qualidade do óleo afeta as propriedades de isolamento e resfriamento do transformador, portanto, para garantir que a capacidade de isolamento do óleo do transformador não se deteriore, a carcaça do transformador é completamente vedada contra a entrada de umidade (FRANZEN; KARLSSON, 2013). Além disso, os isoladores tipo bucha do transformador são fabricados em materiais isolantes, tais quais polímeros e porcelana.

Quando o transformador opera em condições de sobrecarga, a isolação à base de celulose entre os enrolamentos sofre degradação físico-química devido às altas temperaturas. Esse processo resulta na liberação de gases no meio em que está

inserida, contaminando o óleo isolante. Como consequência, há uma redução da rigidez dielétrica original tanto da celulose quanto do óleo, comprometendo a eficiência isolante e a durabilidade do sistema.

A rigidez dielétrica reduzida pode favorecer a ocorrência de descargas parciais, que são descargas elétricas de baixa energia que ocorrem dentro de um material isolante, sem completar o caminho entre dois condutores, sinalizando uma falha inicial no isolamento. Além disso, podem ocorrer descargas totais, conhecidas como arcos elétricos, que são descargas de alta energia provocadas pela perda de isolamento entre dois pontos vivos, resultando no rompimento dielétrico e na passagem de corrente elétrica entre eles. Os arcos geralmente ocorrem entre espiras e enrolamentos ou entre espiras e a carcaça do equipamento, que é aterrada.

As buchas também estão sujeitas a falhas, conforme o estudo de Murugan e Ramasamy (2019), sendo o terceiro componente mais suscetível a não conformidades. Devido ao contato com a atmosfera, elas são afetadas pela ação da maresia, poeira, orvalho, poluição, dejetos de aves e outros materiais que se acumulam em sua superfície, o que pode levar à ocorrência de descargas parciais. Esse acúmulo de contaminantes cria trilhas condutivas sobre o isolador, reduzindo a rigidez dielétrica da bucha. Com a diminuição da capacidade isolante, formam-se pontos de campo elétrico elevado, onde o isolamento começa a falhar parcialmente, sem causar um arco elétrico completo, mas gerando descargas parciais, que podem evoluir para falhas mais graves se não forem controladas.

Por outro lado, o arco elétrico pode ocorrer em vários pontos quando o enrolamento é danificado em dois ou mais locais, resultando na remoção de sua isolamento e criando pontos vivos. Isso pode ocorrer devido a defeitos de fabricação ou a curtos-circuitos na rede elétrica, que geram forças axiais nos enrolamentos do

transformador, fazendo com que uma espira se atrite contra outra, e, assim, criando áreas sem isolamento. Além disso, transportes inadequados podem causar vibrações ou impactos que prejudicam a integridade do enrolamento, enquanto descargas parciais nas proximidades também aceleram a degradação do material isolante, contribuindo para a formação de falhas que favorecem o surgimento de arcos elétricos.

O óleo isolante também se degrada devido à penetração de umidade, à exposição ao calor excessivo e à liberação de compostos químicos provenientes da decomposição da celulose, o que resulta na contaminação do óleo. Essa contaminação compromete suas propriedades dielétricas, pois a presença de água, partículas e subprodutos da oxidação diminuem a capacidade isolante do óleo. Como consequência, surgem áreas com menor rigidez dielétrica, facilitando a ocorrência de descargas parciais (FRANZEN; KARLSSON, 2013).

Devido a essas degradações, que podem resultar no surgimento de descargas parciais e arcos elétricos, esses tipos de falhas emitem radiação eletromagnética, ondas acústicas, frequências de UHF, calor, gases chave e radiação ultravioleta (UV). Esta última intensifica o problema, pois a radiação UV danifica os materiais isolantes. Assim, por exemplo, o problema pode começar de forma sutil, com o transformador operando em sobrecarga, levando ao aquecimento da celulose. Isso provoca a degradação dielétrica, que, por sua vez, possibilita a ocorrência de descargas parciais. Essas descargas geram emissões de UV, que causam nova degradação na celulose e em outros materiais isolantes, resultando em um efeito cascata.

Por esse motivo, é crucial monitorar as falhas nos transformadores desde o início. Para essa finalidade, diversas técnicas de identificação de descargas estão disponíveis, como o sensoriamento de gases chave, conforme as diretrizes da norma

IEC 60599 (2022), o sensoriamento acústico, o sensoriamento eletromagnético e o reconhecimento de padrão de descargas parciais, conhecido como PRPD (*Partial Discharge Pattern Recognition*). Esta última técnica analisa os padrões de tensão e corrente elétrica das descargas. Embora a PRPD seja eficaz, ela não é capaz de diagnosticar arcos elétricos (Gamez, 2018). Além disso, a técnica de sensoriamento de gases chave pode ser demorada, pois exige análises químicas detalhadas e a extração do óleo mineral do transformador. É importante ressaltar que a análise de gases chave também pode resultar em falsos diagnósticos, uma vez que, por exemplo, a operação normal da chave comutadora pode gerar arcos elétricos durante manobras automáticas, o que leva à emissão natural de gases que são indicativos de falhas segundo essa técnica.

Com base nessas limitações, diferentes metodologias têm sido propostas na literatura. Por exemplo, Besharatifard et al. (2022) analisou a capacidade de sensores piezoelétricos de baixo custo para identificar descargas parciais em transformadores de potência imersos em óleo. Sikorski e Wielewski (2023) apresentou em detalhes a construção de um sistema portátil e de baixo custo para monitoramento online de descargas parciais através de um transdutor piezelétrico de alta sensibilidade. Castro et al. (2022) propôs uma análise experimental e comparativa entre sensores de emissão acústica e sensores de efeito Hall, com o objetivo de diferenciar descargas em resina epóxi e papel Nomex, materiais constituintes do isolamento de transformadores a seco. Porém nenhum desses trabalhos aplicou técnicas de classificação para arcos elétricos, ou analisou a influência de múltiplos sensoriamentos. Uwiringiyimana et al. (2022) comparou o desempenho de uma antena UHF para a detecção de descargas parciais com um transformador de corrente de alta frequência comercial em um transformador a óleo. Jing et al. (2021) propôs a

técnica de UHF para detectar 4 defeitos típicos internos e externos causados por descargas parciais em buchas de 110 kV, analisando os parâmetros de diferentes defeitos apresentando os gráficos de DP resolvidos por fase (PRPD), além de 16 parâmetros detalhados no domínio do tempo e da frequência do sinal UHF. Schiewaldt (2023) avaliou 3 sistemas de classificação de falhas (técnica cromática, análise de componentes principais e análise de forma) em 3 faixas de frequências UHF consolidadas pela literatura técnico-científica (banda total, banda de 100 MHz a 1 GHz e banda de 400 MHz a 900 MHz) considerando descargas totais internas e descargas parciais superficiais em isoladores de um transformador. Em nenhum desses trabalhos mencionados, aprestou-se um estudo comparativo entre as técnicas baseadas em UHF, corrente e acústica. Além disso, com exceção de Schiewaldt (2023), os arcos elétricos não foram avaliados no monitoramento por UHF. Uma outra questão não abordada por todos esses artigos mencionados é a questão da taxa de aquisição que a instrumentação UHF exige, que é alta e pode limitar sua aplicação. Neste contexto, nenhum trabalho estudou alternativas para a redução da taxa de aquisição de dados, como esta dissertação propõe. Romano et al. (2024) propôs uma nova metodologia para a extração online e não invasiva de pulsos de descarga parcial a partir de dados brutos de medição obtidos utilizando um sistema de aquisição de dados de 8 bits e um sensor de transformador de corrente de alta frequência (HFCT) de baixo custo. Já Tikakosol et al. (2024) propôs uma técnica de medição para identificar e determinar a ocorrência de descargas parciais na isolação de transformadores de tipo seco utilizando quatro sensores de emissão acústica para determinar as fontes de DP e uma técnica de HFCT para identificar a fonte de DP e o nível de critério. Porém nenhuma dessas literaturas contempla o estudo de arcos elétricos, além de não explorar o sensoriamento híbrido.

Conforme previamente mencionado, embora a técnica de sensoriamento UHF seja eficaz, ainda existem desafios a serem superados, especialmente no que diz respeito à redução da taxa de aquisição de dados, uma vez que a faixa de frequência do UHF varia de 300 MHz a 3 GHz. A utilização da envoltória do sinal representa uma oportunidade para operar com taxas de aquisição mais baixas, exigindo um hardware menos complexo e custoso, o que pode contribuir para a diminuição dos custos eletrônicos associados à aquisição de dados.

Além disso, embora as técnicas mencionadas sejam eficazes, existem vários desafios, especialmente na classificação das falhas, visto que cada tipo de falha requer manutenções específicas. Mediante essa problemática, essa dissertação propõe um estudo comparativo para se diagnosticar três condições de operação de transformadores: descarga parcial, arco elétrico e operação sem falha, a partir de três técnicas de sensoriamento: por UHF, emissão acústica e por corrente elétrica. São comparadas também duas técnicas de classificação dessas condições, sendo elas a combinação de estatísticas tradicionais tais como Energia, Desvio Padrão, Frequência Média, Banda Equivalente, Assimetria e Curtose (SCHIEWALDT et al., 2024) e a Análise de Componentes Principais (CASTRO et al., 2023), visando formar mapas auto-organizáveis que irão auxiliar o processo de classificação das condições estudadas, uma vez que cada falha requer ações de manutenção distintas.

Portanto, esse estudo tem como principais objetivos:

1. Comparar três técnicas de sensoriamento para classificação de falhas em transformadores: UHF, acústico e por corrente elétrica;
2. Avaliar as vantagens e desvantagens dos sensoriamentos individual e híbrido, ou seja, combinando os tipos de sensoriamento estudados por esta dissertação;

3. Avaliar se o sistema UHF mediante uso de envoltória do sinal é eficaz quanto à classificação das falhas;
4. Avaliar se sensores de emissão acústica com resposta em frequência reduzida são eficazes quanto à classificação das falhas;
5. Comparar duas metodologias de processamento de sinais baseadas em estatísticas e Análise das Componentes Principais dos espectros das falhas.

1.2. Organização do Trabalho Acadêmico

Esta dissertação se inicia apresentando no Capítulo 2 as falhas que acometem os transformadores, estabelecendo onde e como elas mais ocorrem. No Capítulo 3 são abordadas as técnicas de diagnósticos, descrevendo os principais sensoriamentos envolvidos na detecção e classificação das falhas. Em seguida, técnicas de processamento de sinais são apresentadas no Capítulo 4. A metodologia é apresentada no Capítulo 5 e, no Capítulo 6, os resultados são discutidos. O trabalho é concluído no Capítulo 7.

CAPÍTULO II – FALHAS EM TRANSFORMADORES

Este capítulo apresenta a estrutura dos transformadores de potência e as principais falhas que o acometem, com ênfase nas falhas abordadas neste trabalho.

De acordo com Jordão (2008), os transformadores são parte essencial de um sistema de potência, variando desde grandes unidades instaladas em usinas geradoras, com capacidades de até centenas de mega volt-ampères, até pequenos transformadores utilizados em comunicações, com potências na ordem de frações de watt. No entanto, dentre essa ampla variedade de tipos, são considerados transformadores de potência aqueles que operam desde a geração de energia nas usinas elétricas até sua distribuição final aos consumidores.

Embora os transformadores de potência sejam altamente confiáveis para operação contínua, com o tempo, esses equipamentos se tornam suscetíveis à degradação devido ao estresse operacional. A deterioração dos componentes internos pode resultar em falhas irreversíveis, ocasionando prejuízos devido à interrupção do serviço e à necessidade de manutenção ou, em pior caso, de substituição de um ativo com elevado custo de aquisição (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

Sabe-se que várias companhias elétricas ao redor do mundo enfrentam grandes dívidas, e os investimentos em novos transformadores e substituições estão no nível mais baixo das últimas décadas. Esse cenário se agrava com o aumento do consumo de energia que, segundo a Empresa de Pesquisa Energética do Governo Federal (2019, apud ABRAHÃO, SOUZA, 2021), no período entre 2000 e 2019 cresceu a uma taxa média geométrica anual de 2,8% no Brasil, o que resulta em um aumento contínuo de carga sobre esses transformadores, muitos dos quais já operam há vários

anos.

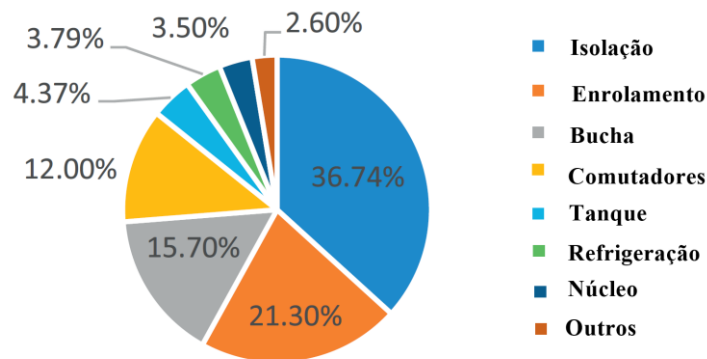
Além disso, é crucial identificar quando o transformador se torna um elemento de alta periculosidade para o meio ambiente e para a vida humana, já que, na maioria dos casos, contém grandes volumes de óleo em contato com componentes de alta tensão. Isso aumenta o risco de incêndio e explosão em situações anormais ou em caso de falhas técnicas, o que pode colocar em risco não somente a integridade do equipamento, mas também da rede, demais equipamentos e instalações próximas.

As falhas em transformadores de potência podem ser causadas por diversos fatores, como defeitos de fabricação, condições operacionais inadequadas e processos de degradação. No entanto, a maioria das falhas ocorre devido à combinação de duas ou mais fontes — elétricas, mecânicas e térmicas — agindo sobre os componentes do transformador.

Embora seja difícil definir um único modo de falha devido à complexidade do equipamento, a maioria dos casos envolve a ruptura do sistema de isolamento. Assim, mesmo que a causa original da falha seja elétrica, a deterioração do isolamento pode ter sido provocada por fatores elétricos, mecânicos ou térmicos.

O estudo apresentado por Murugan e Ramasamy (2019) discute as principais falhas encontradas nos componentes dos transformadores de potência, a partir de uma análise estatística envolvendo 343 transformadores de potência observados entre 2003 e 2013. Ilustra-se, na Figura 1, as falhas nos componentes dos transformadores avaliados durante esse estudo, indicando que a maioria das falhas são encontradas no sistema de isolação (36,74%), nos enrolamentos (21,30%) e nas buchas (15,70%). Estes dois últimos são os objetos de estudo deste trabalho.

Figura 1 – Falhas em transformadores.



Fonte: Murugan, Ramasamy, 2019.

Os enrolamentos de um transformador devem ser isolados para garantir que a corrente percorra o núcleo, evitando curtos-circuitos entre as espiras. Em transformadores de potência, a diferença de potencial entre as partes dos enrolamentos primário e secundário pode ser bastante elevada. Por isso, materiais isolantes como celulose à base de papelão e papel são inseridos entre as camadas dos enrolamentos, proporcionando isolamento dielétrico e mecânico, além de prevenir a formação de arcos elétricos (TANG et al., 2014).

Além disso, o transformador pode ser imerso em óleo para fornecer isolamento adicional. A qualidade do óleo impacta as propriedades de isolamento e resfriamento do transformador, por isso, a carcaça do transformador é completamente vedada contra a entrada de umidade, garantindo que a capacidade de isolamento do óleo não se deteriore (FRANZEN; KARLSSON, 2013). O óleo atua tanto como meio de resfriamento, removendo o calor do núcleo e das bobinas, quanto como parte do sistema de isolamento.

A bucha é um componente responsável por isolar um condutor de alta tensão que atravessa um invólucro de metal, funcionando como um caminho de corrente através da parede do tanque. O interior da bucha pode conter isolamento de papel e, muitas vezes, é preenchido com óleo para fornecer isolamento adicional (FRANZEN;

KARLSSON, 2013). Sua função é garantir o isolamento elétrico entre o tanque e os enrolamentos, além de conectar o enrolamento à parte externa do transformador na rede elétrica.

Segundo Tang et al. (2014), as buchas se dividem em duas categorias principais: sólidas e capacitivas. As buchas sólidas possuem um condutor central, geralmente de cobre ou alumínio, envolto por materiais isolantes como porcelana, vidro, papel revestido com resina ou isoladores de epóxi, exceto nas extremidades dos terminais. Elas são utilizadas principalmente em tensões mais baixas, de até 25 kV. Por outro lado, nas buchas capacitivas, diversos capacitores são inseridos em seu interior, sendo utilizadas em classificações de tensão superiores a 25 kV.

De acordo com Abbasi (2022), distúrbios elétricos, raios, transitórios de chaveamento, falhas de isolamento, umidade, sobrecargas, distúrbios na linha, estresse ou fadiga, transporte inadequado entre instalações e fábricas, terremotos e explosões no tanque de óleo do transformador são as principais causas de falhas internas e externas em transformadores de potência. Esses eventos podem levar à degradação térmica do papel e do óleo isolante, causando pontos quentes, superaquecimento, descargas parciais ou arcos elétricos, além de defeitos mecânicos, como deslocamento do núcleo, espiras em aberto ou em curto, deslocamentos entre os enrolamentos de baixa e alta tensão, deformação dos enrolamentos nas direções radial e axial, entre outros.

Apresenta-se, na Figura 2, apresenta o impacto dos mecanismos de falha e a frequência com que ocorrem em transformadores de potência, conforme discutido por Roncero-Clemente e Roanes-Lozano (2018), no período de 1991 a 2010. As principais causas de falha em transformadores incluem conexões soltas, falhas dielétricas, umidade, raios, colapsos elétricos, sobrecargas excessivas, manutenção inadequada,

entre outros fatores.

Figura 2 – Causas de falhas em transformadores entre 1991 e 2010.



Fonte: Roncero-Clemente e Roanes-Lozano, 2018.

Conforme Murugan e Ramasamy (2019), essas diversas falhas podem ter origem elétrica, mecânica, térmica ou química. Uma falha induzida eletricamente resulta tipicamente em um dano no sistema de isolação do transformador. Os fatores elétricos mais comuns são:

- a) Operação do transformador em condições de sub tensões ou sobretensões: dependendo da magnitude e duração da sobretensão, pode ocasionar o estresse da isolação e o superaquecimento do núcleo;
- b) Exposição à surtos de raios e de comutação: os transformadores são projetados para tolerarem certo nível de magnitude de raios e tensão de comutação sem que haja danos em sua isolação. Um transformador que sofreu falha devido a esses tipos de surtos, geralmente apresenta algum dano localizado perto dos terminais de saída;
- c) Descargas parciais: uma descarga parcial pode ser causada por um sistema de isolação mal projetado, defeitos de fabricação, e/ou contaminação do sistema de isolação. Uma descarga parcial pode ser um pequeno arco elétrico de baixa intensidade e irá causar um dano local à isolação e/ou aos condutores;

d) Eletricidade estática. Esse fenômeno é limitado a transformadores operando em tensões muito elevadas (acima de 345 kV). Quando a temperatura do óleo do transformador encontra-se baixa e este óleo é circulado rapidamente, uma carga estática é desenvolvida entre o óleo e os componentes metálicos do transformador. Quando a magnitude dessa carga excede a capacidade dielétrica do óleo de isolamento, pode haver uma descarga.

Uma falha mecânica geralmente resulta na deformação dos enrolamentos do transformador, o que pode causar abrasão ou ruptura do papel isolante. Quando o dano atinge um nível crítico, isso pode culminar em uma falha elétrica. A deformação dos enrolamentos pode ocorrer de duas maneiras principais: devido ao transporte inadequado ou movimentação do transformador, ou em decorrência de forças eletromecânicas induzidas magneticamente. Em situações de falhas internas, os enrolamentos podem ser submetidos a forças magnéticas que excedem os limites para os quais foram originalmente projetados.

Um transformador bem projetado, operando em condições ideais e submetido a uma manutenção adequada, deve possuir um sistema de isolamento capaz de garantir um serviço confiável por um período de 20 a 30 anos, ou até mais (BARTLEY, 2003). Os principais fatores térmicos que contribuem para a degradação incluem:

a) Sobrecarga prolongada além da capacidade projetada do transformador;

b) Falhas no sistema de arrefecimento, como bloqueio ou incrustação dos radiadores ou refrigeradores, falhas nas bombas de óleo e no sistema de distribuição de óleo;

c) Obstrução nos dutos de óleo, restringindo o fluxo adequado de óleo de resfriamento para os enrolamentos;

d) Operação sob condições de superexcitação, como sobretensão ou subfrequência, que pode gerar um fluxo magnético parasita excessivo, resultando em superaquecimento severo do isolamento próximo ao núcleo ou a outros componentes estruturais;

e) Funcionamento do transformador em condições de temperaturas ambiente excessivamente elevadas.

Finalmente, falhas químicas estão diretamente associadas à contaminação dos materiais dielétricos, seja por umidade, ar ou por substâncias geradas a partir de reações químicas, muitas vezes induzidas pelas descargas parciais e outros processos eletroquímicos que ocorrem ao longo da vida útil do transformador. A presença de umidade, em particular, reduz significativamente a rigidez dielétrica dos materiais isolantes, acelerando a degradação do papel isolante e do óleo, enquanto a introdução de ar pode favorecer a oxidação do óleo isolante, deteriorando suas propriedades. Além disso, produtos químicos formados por reações internas, como ácidos, podem agravar ainda mais o desgaste dos componentes dielétricos, comprometendo a confiabilidade do sistema de isolamento (SIKORSKI, 2019). Um resumo das principais falhas é ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Falhas em transformadores (MURUGAN; RAMASAMY, 2019).

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

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

Portanto, a falha no isolamento resultante dos fatores discutidos anteriormente pode levar à ocorrência de descargas parciais, que indicam a degradação do sistema isolante. Em casos mais graves, essa degradação pode culminar na formação de arcos elétricos, o que não apenas compromete a integridade do equipamento, mas também representa um risco significativo de falhas catastróficas, incêndios e danos ao sistema elétrico como um todo.

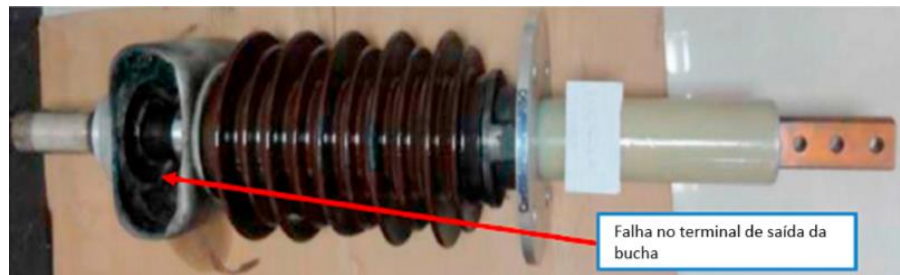
De acordo com a IEC 60270 (2000), norma internacional que trata da medição de descargas parciais em equipamentos elétricos isolados, as descargas parciais se

caracterizam como uma descarga elétrica localizada em um dielétrico que não preenche completamente o espaço entre dois condutores, sendo ionizações de baixa energia. Já os arcos elétricos são descargas entre dois pontos que preenchem o espaço entre dois condutores. Na ocorrência dessas falhas, há emissão de radiação ultravioleta, calor, ondas acústicas, pulsos de corrente e ondas eletromagnéticas (IEC 60270, 2000).

Nesse contexto, especialmente em função da geração de calor e da emissão de radiação UV, o processo de degradação dielétrica nas áreas adjacentes à falha inicial se intensifica, configurando-se como um fenômeno cumulativo. Essa degradação progressiva pode afetar ainda mais a eficiência do isolamento, aumentando a suscetibilidade do sistema a falhas elétricas e diminuindo a durabilidade do equipamento.

Ocorrências de descargas parciais são observadas em buchas nos transformadores. Embora a configuração desse componente seja elaborada para resistir a um intenso campo elétrico, fissuras, fraturas e a presença de sujeira podem resultar em uma distribuição irregular do campo elétrico, favorecendo a ocorrência de descargas nas buchas (JIANG et al, 2021). Além disso, o afrouxamento dos condutores, causado através da vibração do transformador, resulta em superaquecimento. Esse calor danifica o papel isolante ou o óleo utilizado na isolação (MURUGAN; RAMASAMY, 2019). É ilustrado, na Figura 3, uma falha no terminal de saída da bucha.

Figura 3 – Falha em isolador.



Fonte: Murugan e Ramasamy, 2019.

Os arcos elétricos são observados no enrolamento do transformador e indicam uma falha significativa no sistema. Esta falha ocorre devido a danos na isolação dos condutores das bobinas, causados principalmente por fatores como sobreaquecimento, vibrações, dobras no condutor, contaminação do óleo, desequilíbrios de tensão e presença de umidade. Esses fatores enfraquecem a isolação, tornando-a vulnerável a rompimentos que facilitam a formação de arcos elétricos.

Quando essa falha ocorre, o transformador pode sofrer interrupções inesperadas no funcionamento e custos elevados de manutenção e reparo, além de colocar em risco a continuidade do fornecimento de energia. O arco elétrico no enrolamento pode se manifestar de diversas formas, incluindo entre espiras, entre bobinas, entre fases e entre fase e terra, causando danos variáveis e potencialmente graves ao equipamento. São ilustrados, na Figura 4, diferentes modos de falha que favorecem o surgimento de arcos elétricos, demonstrando os pontos críticos de vulnerabilidade.

Figura 4 – Falhas no enrolamento.



Fonte: Adaptado de Murugan e Ramasamy, 2019; Barreto, 2023 e Schiewaldt, 2024.

Desse modo, a comunidade científica tem se empenhado em desenvolver técnicas que possibilitem a detecção precoce de descargas parciais e arcos elétricos, abordando não apenas os métodos de identificação, mas também as técnicas de processamento de sinais dos dados coletados. Portanto, vários métodos de monitoramento de falhas foram sugeridos para avaliar as condições operacionais dos transformadores, cujas particularidades podem ser consultadas na literatura (DUVAL, 2002; HARBAJI; SHABAN; EL-HAG, 2015; KOLTUNOWICZ, et al. 2016; WOON; EL-HAG; HARBAJI, 2016; HAGHJOO; MOSTAFAEI; MOHAMMADI, 2017; KANAKAMBARAN; SARATHI; SRINIVASAN, 2018; ALBARRACÍN-SANCHES, et al. 2020; KUMAR, et al. 2021; CASTRO, et al. 2022, BARRETO, 2023; SCHIEWALDT, 2024). Essas estratégias visam captar os parâmetros emitidos pelas falhas, como ondas eletromagnéticas, ondas acústicas, pulsos de corrente, impedância dos enrolamentos e substâncias químicas presentes no óleo do transformador, entre outros. O objetivo é localizar, classificar e compreender o grau de degradação em que

a máquina está operando (BARRETO, 2023).

Com base nessa problemática, esta dissertação tem como objetivo comparar três técnicas de sensoriamento para classificação de descargas parciais em isoladores e arcos elétricos, utilizando a emissão acústica, UHF e corrente elétrica, que serão detalhadas no capítulo a seguir. Além disso, busca-se avaliar diferentes técnicas de processamento de sinais em relação à classificação dessas falhas.

CAPÍTULO III – MÉTODOS DE DIAGNÓSTICOS

Neste capítulo apresentam-se os principais métodos de diagnósticos de falhas em transformadores. É importante destacar que este trabalho incorpora, em sua metodologia, os métodos de emissão acústica, análise de corrente em alta frequência e detecção em UHF.

3.1. Análise de Gases Chave

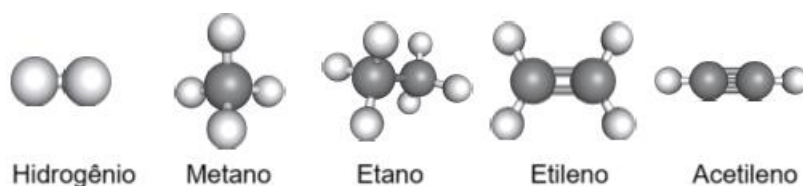
Dentro do tanque do transformador, há uma variedade de compostos orgânicos e inorgânicos que podem reagir quimicamente, como o cobre dos enrolamentos, o aço do núcleo e das estruturas de fixação, os hidrocarbonetos presentes no óleo isolante, e a celulose proveniente do papel e dos componentes isolantes (Gamez, 2018). Além disso, a energia gerada pelas perdas durante a operação normal, bem como aquela causada por falhas e condições anormais, também desempenha um papel fundamental nesse processo.

Esse cenário pode ser comparado a um reator químico, onde a energia disponível induz a decomposição e a recombinação desses materiais reativos, gerando novos subprodutos químicos. Como esses subprodutos podem ser medidos e quantificados, é possível estabelecer correlações úteis entre a energia introduzida no sistema e o comportamento químico dos seus componentes (Gamez, 2018). Tais correlações são ferramentas valiosas para a avaliação da condição do transformador.

O calor gerado pelas perdas operacionais e por certos modos de falha, assim como a energia dissipada por descargas elétricas, contribuem para a decomposição das moléculas do óleo. Ao analisar a quantidade, a proporção e as taxas de evolução dos gases dissolvidos no óleo do transformador, os engenheiros conseguiram relacioná-los a modos de falha específicos e seus graus de severidade (Gamez,

2018). Os principais subprodutos dessas reações estão ilustrados na Figura 5.

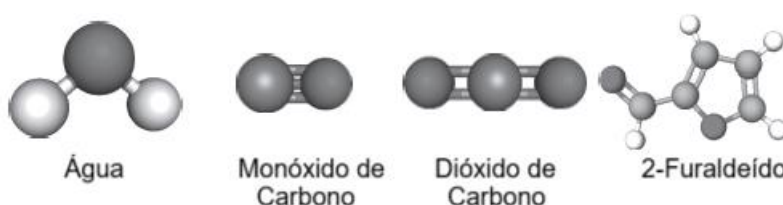
Figura 5 – Principais gases de hidrocarbonetos produzidos pelo óleo.



Fonte: Adaptado de Gamez, 2018.

Entretanto, esses não são os únicos gases ou subprodutos produzidos pelas reações químicas dentro do transformador. Além dos hidrocarbonetos presentes no óleo, há outros materiais no transformador que também interagem durante essas reações químicas (Gamez, 2018). Por exemplo, a mesma energia que provoca a degradação do óleo terá um efeito semelhante no papel. Na Figura 6 são ilustrados os subprodutos da decomposição de celulose e hidrocarbonetos na presença de oxigênio.

Figura 6 - Subprodutos da decomposição de celulose e hidrocarbonetos na presença de oxigênio.



Fonte: Adaptado de Gamez, 2018.

Segundo Gamez (2018), desde a introdução da Análise de Gases Dissolvidos (DGA) como técnica diagnóstica, diversos padrões e associações foram identificados, documentados e utilizados como ferramentas e diretrizes para diagnóstico. Apesar da variedade de técnicas de interpretação disponíveis, a maioria delas fundamenta-se em um ou mais dos seguintes fatores:

- a) O perfil de gases de uma amostra específica, geralmente a mais recente;

b) A relação (proporção) entre as concentrações de diferentes gases em uma amostra;

c) A taxa de variação dessas concentrações entre amostras coletadas em diferentes momentos.

Na maioria dos casos, os métodos de análise buscam estabelecer correlações estatisticamente significativas entre o comportamento dos gases e modos específicos de operação ou falha dos transformadores em uma determinada população. A definição de um comportamento "normal" dos gases é obtida através da análise de transformadores sem falhas conhecidas. Além disso, a categorização de defeitos conhecidos e suas tendências históricas permite a formulação de diretrizes gerais relacionadas aos padrões de emissão de gases associados a modos de falha específicos (Gamez, 2018).

Segundo a IEC 60599 (2015), os tipos de falhas detectáveis pela Análise de Gases Dissolvidos (DGA) são os detalhados na Tabela 2:

Tabela 2 – Falhas típicas em transformadores de potência (IEC 60599, 2015).

Tipo	Falha	Exemplos
PD	Descargas Parciais	Descargas em cavidades preenchidas com gás resultantes de impregnação incompleta, alta umidade no papel, supersaturação do óleo ou cavitação.
D1	Descargas de baixa energia	Faíscas ou arcos entre conexões defeituosas de diferentes potenciais ou potenciais flutuantes, provenientes de anéis de blindagem, toroides, discos adjacentes ou condutores do enrolamento, soldas quebradas ou laços fechados no núcleo. Descargas entre partes de fixação, buchas e tanque, alta tensão e terra dentro dos enrolamentos, nas paredes do tanque. Rastreamento em blocos de madeira, cola de vigas isolantes, espaçadores de enrolamento. Ruptura do óleo, seletor rompendo a corrente.
D2	Descargas de alta energia	Flashover (arco voltaico), rastreamento ou arco de alta energia local ou com seguimento de

		potência. Curtos-circuitos entre baixa tensão e terra, conectores, enrolamentos, buchas e tanque, barra de cobre e tanque, enrolamentos e núcleo, no duto de óleo, torre. Laços fechados entre dois condutores adjacentes ao redor do fluxo magnético principal, parafusos isolados do núcleo, anéis metálicos que seguram as pernas do núcleo.
T1	Falha térmica $t < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$	Sobrecarga do transformador em emergências. Bloqueio de item que restringe o fluxo de óleo nos enrolamentos. Fluxo disperso nas vigas de fixação dos colos.
T2	Falha térmica $300\text{ }^{\circ}\text{C} < t < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	Contatos defeituosos entre conexões aparafusadas (particularmente entre barramentos de alumínio), contatos deslizantes, contatos dentro do seletor de chaves (formação de carbono pirolítico), conexões de cabos e hastes de buchas. Correntes circulantes entre fixadores e parafusos do colo, fixadores e lâminas, no sistema de aterramento, soldas ou fixadores defeituosos em blindagens magnéticas. Isolamento desgastado entre condutores paralelos adjacentes nos enrolamentos.
T3	Falha térmica $t > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$	Grandes correntes circulantes no tanque e no núcleo. Correntes circulantes menores nas paredes do tanque criadas por um campo magnético altamente descompensado. Pontes de curto nas lâminas de aço do núcleo.

A técnica de análise de gases chave concentra-se na identificação de um gás específico, que atua como o principal indicador de determinados modos de falha. A predominância desse gás em comparação aos demais está associada a um mecanismo que gera sua produção em quantidade significativamente superior. Os gases que correspondem aos gases chave são: Acetileno (C_2H_2), Etileno (C_2H_4), Monóxido de Carbono (CO) e Hidrogênio (H_2).

A detecção de acetileno, principalmente quando sua proporção é alta em comparação com outros gases, está associada às intensas energias que podem ser

produzidas por arcos elétricos. O acetileno geralmente aparece em conjunto com hidrogênio e quantidades reduzidas de outros gases. Caso a isolação sólida (como papel e papelão prensado) esteja implicada na falha, isso normalmente resultará na produção significativa de monóxido de carbono e dióxido de carbono (Gamez, 2018).

Elevadas quantidades de etileno costumam ser geradas quando o óleo é submetido a temperaturas médias a altas. Esse processo geralmente se associa à presença de menores quantidades de hidrogênio (H_2) e metano (CH_4). Na ausência de sinais de decomposição do papel, esse tipo de falha pode ocorrer devido à exposição do óleo a um componente de alta temperatura. Tal situação pode ser observada em estruturas de chumbo, conexões ou junções que estão em contato direto com o óleo (Gamez, 2018).

Modos de falha térmica que afetam diretamente a isolação sólida, como papel e papelão prensado, geram grandes quantidades de monóxido de carbono (CO). Como essas estruturas isolantes frequentemente estão impregnadas com óleo, essas falhas também são geralmente acompanhadas por metano (CH_4) e etileno (C_2H_4). O superaquecimento generalizado das bobinas pode resultar na produção substancial desse gás. Condições como sobrecarga, ocasionadas por falhas ou conexões de bobinas em contato direto com o papel isolante, podem levar à geração de CO (Gamez, 2018).

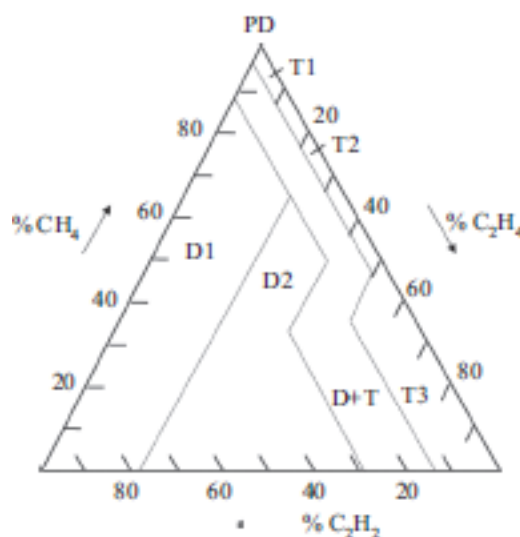
Finalmente, de acordo com Gamez (2018), os fenômenos de descargas parciais (DP) estão associados a estresses elétricos localizados. Esse tipo de falha, normalmente, não carrega a mesma quantidade de energia que os modos de falha térmica, sendo, assim, classificado como um modo de falha de baixa energia. Entretanto, ele produz grandes volumes de hidrogênio (H_2), frequentemente acompanhado por menores quantidades de metano (CH_4).

Um dos métodos de interpretação mais reconhecidos e amplamente utilizados na indústria é a representação gráfica desenvolvida por Michel Duval (Gamez, 2018). Duval criou um formato de representação gráfica que permite a correlação da relação entre três gases por meio de um gráfico triangular.

Duval também expandiu ainda mais esse conceito com a introdução de representações utilizando pentágonos, que possibilitam a correlação do conteúdo de cinco gases. Cada triângulo ou pentágono é dividido em zonas que se relacionam com os diferentes modos de falha detectáveis por essas técnicas.

Para cada gráfico, primeiro é calculada a quantidade total de gases. Em seguida, a proporção de cada gás em relação a esse total é expressa em forma de porcentagem, permitindo a identificação de um ponto no sistema de coordenadas “triangular” ou “pentagonal”. Esse ponto estabelece o tipo de falha ocorrida a partir da concentração desses gases. Até o momento, a literatura disponível identifica sete triângulos e dois pentágonos de Duval. Na Figura 7 é exemplificado um dos triângulos de Duval.

Figura 7 – Primeiro Triângulo de Duval, utilizando Metano, Etileno e Acetileno para diagnosticar os diferentes modos de falha.



Fonte: Adaptado de Gamez, 2018.

3.2. Estimativa de Carga Aparente

A descarga parcial, sendo um impulso elétrico resultante do movimento de cargas em um material, pode ser identificada por meio da técnica da carga aparente. Essa abordagem permite quantificar a intensidade da descarga, indicando que, quanto maior o valor em picoCoulombs (pC), maior será a intensidade da descarga. A estimativa de carga aparente é um conceito utilizado em medições e análises de descargas parciais (DP) em sistemas elétricos. A carga aparente representa uma medida da intensidade da descarga parcial, levando em consideração tanto a corrente pulsada quanto suas características temporais. De acordo com Albarracín et al. (2018), a carga aparente da descarga parcial deve ser estimada integrando seu pulso de corrente ou avaliando sua componente contínua (DC), considerando que o tempo T deve ser grande o suficiente para que o pulso seja extinguido:

$$q = \int_0^T i(t)dt = I_{DC}T \quad (1)$$

A operação de acoplamento da corrente de pulso de descargas parciais (DP) e seu subsequente processamento através de circuitos eletrônicos, sejam eles analógicos ou digitais, é viável em teoria. Contudo, na prática, há limitações significativas que dificultam a implementação desse procedimento. No domínio da frequência, observa-se que o componente residual de corrente contínua (DC) frequentemente apresenta uma magnitude superior à do sinal de DP, o que torna necessária à sua filtragem. Entretanto, a tentativa de filtrar esse componente residual, enquanto se preserva o componente DC, revela-se impraticável, pois exigiria o uso de filtros com componentes de tamanho extremamente grande. Por essa razão, todos os sistemas de detecção de descargas parciais incorporam filtros passa-alta, que eliminam todas as harmônicas a partir de uma frequência de corte que varia entre 20 e 30 kHz (ALBARRACÍN et al., 2018).

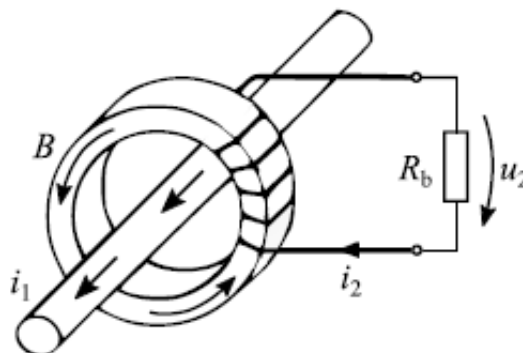
3.3. Sensores Indutivos

Para realizar medições elétricas conforme a norma IEC 60270 (2000), os sensores indutivos frequentemente usados para a detecção de descargas parciais (DP) são os transformadores de corrente de alta frequência (HFCT) e a bobina de Rogowski (RC). Os sensores indutivos funcionam com base no princípio da lei de Faraday. O núcleo, geralmente de formato toroidal para facilitar a construção e montagem do sensor, é posicionado em torno dos condutores pelos quais os pulsos de corrente $i(t)$, associados à DP, podem se propagar (ALBARRACÍN et al., 2018). A corrente que circula gera um campo magnético que interage com o enrolamento secundário da bobina, induzindo uma tensão $e(t)$ proporcional à taxa de variação da corrente no condutor e à indutância mútua M entre a bobina e o condutor, de acordo com a seguinte equação:

$$e = M \frac{di}{dt} \quad (2)$$

O acoplamento magnético permite que os dois circuitos envolvidos, o primário, por onde a corrente flui, e o secundário, formado pela bobina do sensor, fiquem eletricamente isolados. Isso possibilita a obtenção de um sistema de medição não intrusivo, que não requer a alteração do circuito sob teste. É apresentado na Figura 8 o modelo elétrico simplificado de um sensor indutivo HFCT.

Figura 8 – Representação esquemática da operação de um HFCT.



Fonte: Fritsch; Wolter, 2022.

De acordo com Fritsch e Wolter (2022), transformadores de corrente de alta frequência (HFCTs) são frequentemente recomendados para medir correntes transitórias, como as causadas por descargas parciais (DP). Eles são especialmente utilizados na detecção de DP em cabos de energia, geralmente instalados nas extremidades dos cabos, em torno da conexão à terra da blindagem do cabo ou ao redor do núcleo do cabo. Devido à sua alta sensibilidade, os HFCTs são capazes de detectar até mesmo DPs de amplitude mínima.

Um HFCT é composto basicamente por um núcleo toroidal e um enrolamento secundário ao seu redor. O núcleo é colocado em torno de um condutor elétrico, como um cabo de alimentação, para medir a corrente i_1 que o atravessa, como os pulsos de descargas parciais (DP). Essa corrente gera um campo magnético H , concentrado pelo núcleo do HFCT, representado pela densidade de fluxo magnético B . Esse fluxo induz uma tensão u_2 no enrolamento secundário, que é medida na saída do sensor. A função de transferência do HFCT, também chamada de impedância de transferência Z_T , pode ser modelada analiticamente (FRITSCH; WOLTER, 2022).

Como o acoplamento entre o sensor e o dispositivo sob teste é indutivo e, portanto, galvanicamente isolado, os HFCTs são adequados para monitoramento *online*. Além disso, possuem um design simples e são fáceis de fabricar. Todas essas vantagens fazem do HFCT um excelente sensor de corrente para a faixa de alta frequência (FRITSCH; WOLTER, 2022).

3.4. Padrões de Descargas Parciais pela Fase

Segundo Albarracín et al. (2018), muitos esforços têm sido direcionados para obter assinaturas que são comuns a DPs de fontes semelhantes. Um dos métodos mais populares e confiáveis entre os engenheiros de manutenção é baseado na coleta

de sinais na mesma fase em relação à frequência da rede. Essa técnica, do inglês *phase-resolved partial discharge* (PRPD), apresenta os padrões de tensão e corrente de pulsos elétricos. A forma e a duração dos pulsos são características comuns para pulsos da mesma natureza, portanto, outros métodos são baseados na extração das características temporais e espectrais do sinal, como ferramentas resolvidas no tempo e mapas de função de transferência.

A densidade espectral de potência e a distribuição de potência espectral em diferentes bandas de frequência também têm se mostrado técnicas confiáveis para extrair características da natureza da descarga. Os padrões PRPD são um método de classificação elétrica convencional usado para identificar fontes de DP e ruído. Essa representação de padrão é baseada na amplitude ou pico adquirido a partir dos pulsos, portanto, medições em uma banda de frequência abaixo de 500 kHz são suficientes, de acordo com o padrão IEC 60270 (ALBARRACÍN et al., 2018).

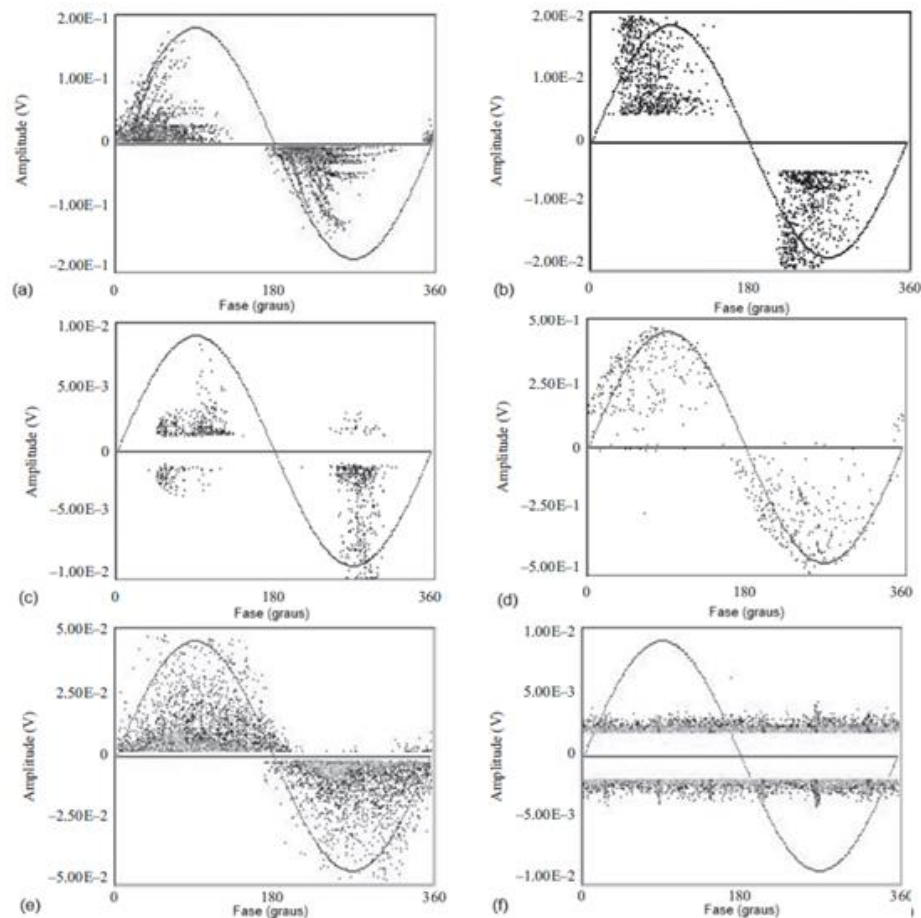
De acordo com Albarracín et al. (2018), em um transformador, além das descargas parciais internas e de superfície, é possível detectar atividades de outras fontes de DP, como a corona no óleo, bolhas de gás no óleo e DP em partículas metálicas flutuantes. Esses três tipos de DP são considerados menos perigosos, pois afetam o óleo, que pode ser regenerado dieletricamente, reduzindo o impacto no sistema de isolamento do transformador. No entanto, ainda é importante monitorar essas atividades para garantir a operação segura do equipamento. As principais características dos padrões PRPD em transformadores estão resumidas na Tabela 3.

Tabela 3 – PRPD das descargas parciais em transformadores (Adaptado de Albarracín et al., 2018).

Tipo da fonte	Características
DP interna em camadas de papel	Simetria marcada entre pulsos positivos e negativos. Os clusters se espalham a partir das passagens por zero (0° ou 180°) da tensão AC.
DP superficial no papel	Simetria marcada entre pulsos positivos e negativos. Clusters acumulados tipicamente em torno do máximo e mínimo do sinal AC.
Corona PD no óleo	Assimetria marcada entre pulsos positivos e negativos. Clusters de DP concentrados em torno de 90° e 270°.
Bolhas de gás no óleo	Simetria entre pulsos positivos e negativos. Disrupção das bolhas leva à extinção da atividade de DP.
DP em partículas metálicas flutuantes	Comportamento simétrico com a maioria das descargas entre 0° e 90°.
Ruído	Não está correlacionado com a fase do sinal sinusoidal, representado como uma banda dispersa de pontos em todas as fases.

Para ilustrar as características típicas e os padrões de descargas parciais em transformadores de potência, na Figura 9 são mostrados os PRPD de testes realizados em laboratório por Cavallini et al. (2010), com defeitos artificiais de cada tipo de fonte detalhados na Tabela 3, da seguinte maneira: (a) DP interna no papel Kraft, (b) DP na superfície do papel prensado, (c) DP corona no óleo, (d) bolhas flutuando no óleo, (e) DP em partículas metálicas flutuantes no óleo, (f) fonte de DP interna "submersa" em ruído em um transformador.

Figura 9 – PRPD de descargas parciais em transformadores.



Fonte: Cavallini et al., 2010.

3.5. Sensoriamento por Emissão Acústica

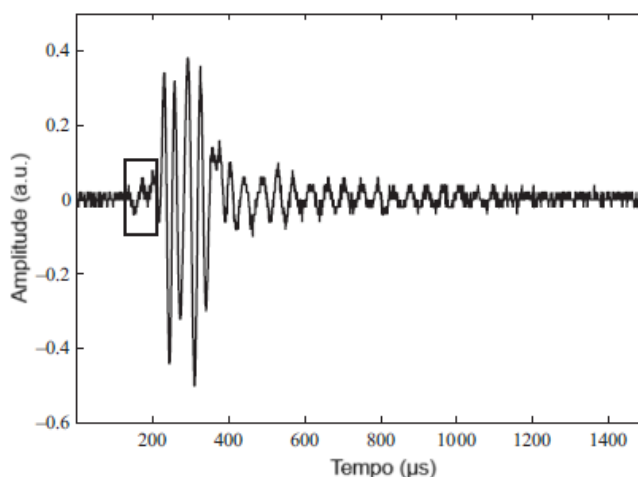
Conforme mencionado anteriormente, uma descarga parcial é gerada por uma súbita avalanche de elétrons, resultando em uma liberação de energia pulsada. Na maioria dos casos, a descarga ocorre dentro de cavidades formadas por diferentes tipos de materiais isolantes. A emissão acústica é então modulada pela cavidade, criando ondas estacionárias e resultando em um pulso ressonante amortecido. Essa emissão é captada por sensores ultrassônicos baseados na piezeletricidade (ALBARRACÍN et al., 2018).

Os métodos acústicos têm várias vantagens sobre os métodos elétricos na detecção de descargas parciais. Eles são fáceis de manipular, instalar e substituir,

pois a maioria dos sensores fica externamente no tanque do transformador, que é aterrado. Além disso, esses sensores são imunes ao ruído eletromagnético causado por fontes como a corona. O uso de múltiplos sensores permite localizar com maior precisão as DPs (ALBARRACÍN et al., 2018).

Na Figura 10 é ilustrado um sinal acústico gerado por uma descarga parcial. A parte delimitada na figura corresponde a sinais que viajam mais rápido do que a onda frontal direta e pode causar erros na detecção e localização das DPs.

Figura 10 – Sinal acústico gerado por uma descarga parcial.



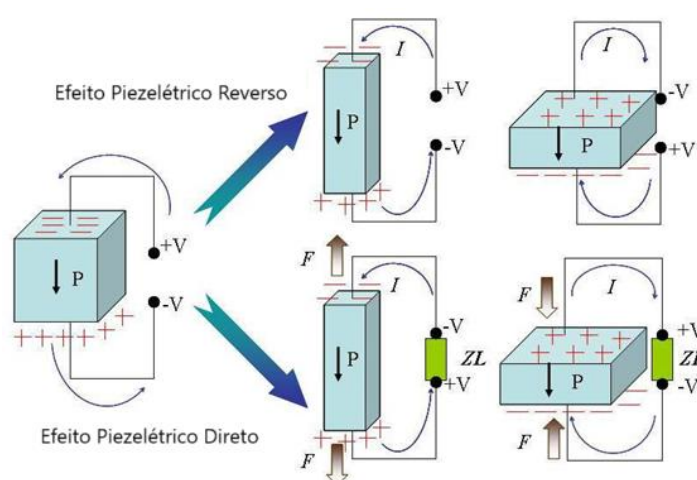
Fonte: Adaptado de Albarracín et al., 2018.

Entretanto, a localização da fonte é desafiadora devido à atenuação e aos sinais propagados pela estrutura. Isso torna muito difícil detectar mais de uma fonte de descarga simultaneamente e, na maioria dos casos, é necessário combinar vários métodos de detecção, como a detecção elétrica ou a detecção em UHF.

Os sensores piezelétricos são detectores de banda estreita com uma janela em torno de 150 kHz e são instalados na superfície externa do tanque, enfrentando todos os problemas mencionados. Os materiais piezelétricos contêm cristais que possuem a propriedade bidirecional de conversão de energia, ou seja, podem converter energia mecânica em energia elétrica e energia elétrica em energia mecânica. O primeiro

princípio é chamado de efeito piezelétrico direto e, o segundo de efeito piezelétrico reverso (MENG; CHENG; HUANG, 2022, apud BARETO, 2023). Isso significa que, ao receber uma tensão mecânica, eles produzem uma diferença de potencial em seus terminais, da mesma forma que, quando se aplica uma tensão elétrica em seus terminais, surgem-se deformações mecânicas. Na Figura 11 são ilustrados os efeitos piezelétricos direto e reverso.

Figura 11 – Demonstração do efeito piezelétrico direto e reverso.



Fonte: Adaptado de Khorsand et al., 2024.

Devido ao efeito piezelétrico direto, esses materiais têm a capacidade de detectar ondas acústicas. Isso ocorre porque as ondas acústicas atuam como uma carga mecânica sobre os cristais piezelétricos, resultando em uma tensão elétrica que é proporcional à carga aplicada. Essa propriedade torna os materiais piezelétricos eficazes para a conversão de energia mecânica em sinais elétricos, permitindo um sensoriamento preciso de fenômenos acústicos. (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2010; MENG, CHENG, HUANG, 2022, apud BARRETO, 2023).

Para que um material apresente o efeito piezelétrico, sua estrutura molecular não deve conter um centro de simetria. As relações constitutivas que definem o comportamento piezelétrico de um material podem ser determinadas por meio de

equações específicas que descrevem as interações entre as tensões elétricas e as deformações mecânicas. Essa ausência de simetria é crucial para que o material responda de maneira eficaz a estímulos mecânicos, gerando uma carga elétrica correspondente (BERLINCOURT; CURRAN; JAFFE, 1964, apud BUSCHVISHNIAC, 1998, apud BARETO, 2023):

$$Dm = d_{M\beta}^{H,\theta} T_{\beta} + \varepsilon_{mk}^{T,H,\theta} E_k + m_{mk}^{T,\theta} H_k + p_m^{T,H} d\theta \quad (3)$$

$$S_{\alpha} = s_{\alpha\beta}^{E,H,\theta} T_{\beta} + d_{\beta m}^{H,\theta} E_m + d_{\beta m}^{E,\theta} H_m + \alpha_{\alpha}^{E,H} d\theta \quad (4)$$

Nas Equações (3) e (4), $d_{m\beta}$ e $d_{\beta m}$ são as constantes piezelétricas, m_{mk} a constante magneto dielétrica, p_m a constante piroelétrica, α_{α} o coeficiente de expansão térmica, H_k a componente de campo magnético e θ a temperatura. Sendo os sobrescritos E , H , θ e T indicadores de campo elétrico, campo magnético, temperatura e tensão mecânica, respectivamente. A Equação (3) representa o efeito piezelétrico direto, e o efeito piezelétrico reverso é representado pela Equação (4).

Segundo Americo et al. (2017), o método acústico oferece uma forma não destrutiva de avaliar as propriedades isolantes dos materiais, permitindo a identificação de pequenas falhas em meios isolantes por meio dos ruídos gerados pela formação de descargas parciais (DPs). No entanto, a propagação desses sinais acústicos dentro do transformador sofre reflexões e refrações devido aos diferentes tipos de materiais presentes no interior do equipamento, o que pode distorcer o tempo de propagação da onda e levar a leituras equivocadas. Para contornar esse problema, utilizam-se vários sensores distribuídos ao longo do transformador, permitindo, a partir da leitura conjunta dos sinais, determinar o ponto de origem da DP. O objetivo desse método é localizar, em três dimensões, as atividades de DPs por meio da medição dos sinais acústicos.

3.6. Sensoriamento por UHF

O monitoramento de descargas parciais em UHF é baseado no princípio de que os pulsos de corrente de DP são transientes de curta duração com tempos de subida rápidos, que fluem através do enrolamento do transformador, fazendo com que a superfície metálica do enrolamento, próxima à fonte da DP, emita radiação eletromagnética (EM) na faixa de UHF (TENBOHLEN et al., 2023).

O estudo de Tenbohlen et al. (2023) demonstra que, embora pesquisas anteriores tenham identificado emissões significativas na faixa UHF, entre 300 MHz e 3 GHz. Ao compilar e comparar estudos globais, foi constatado que as faixas de frequência nas quais as emissões UHF são detectadas variam consideravelmente (SCHIEWALDT, 2024 apud KUPPUSWAMY; DEVAUX; LELAIDIER, 2003; LI et al., 2004; TENBOHLEN et al., 2008; SIEGEL et al., 2019).

De acordo com Tenbohlen et al. (2023, apud SCHIEWALDT, 2024), o método de detecção de DPs em ondas UHF já se tornou uma prática comum nos testes de validação em equipamentos de comutação isolados a gás (GIS), devido a sua eficácia e capacidade de localizar e categorizar falhas e a vantagem de possuir resistência a ruídos.

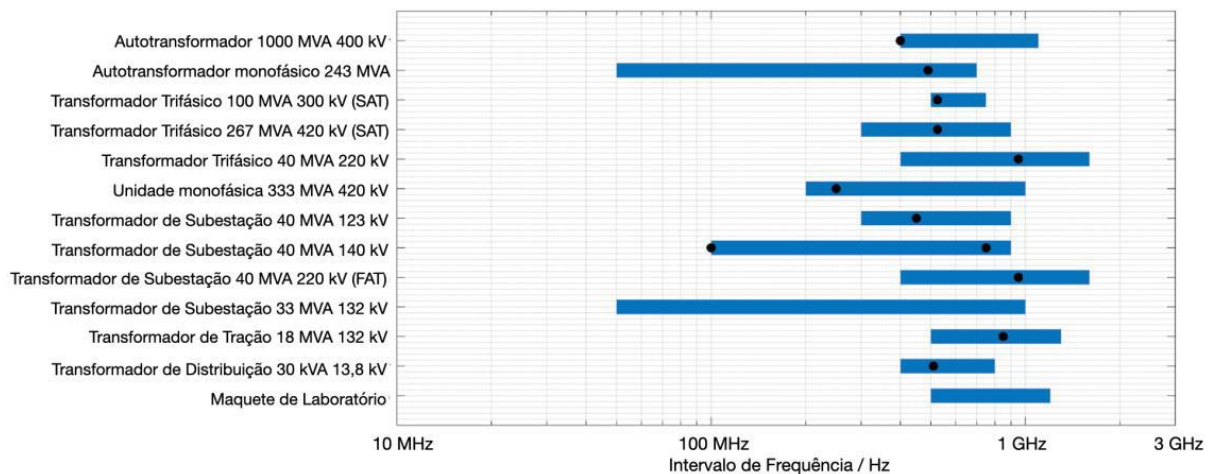
Na Tabela 4 é apresentado o compilado de diversos artigos realizado por Tenbohlen et al. (2023) em seu estudo, onde as emissões UHF de DPs são analisadas, comparando a antena utilizada para detecção, o equipamento utilizado no teste e as faixas de frequência detectadas.

Além das frequências discutidas por Tenbohlen et al. (2023), também é apontado que as discussões técnicas do Cigré, que culminaram na Brochura Técnica 861 (CIGRÈ, 2022), indicam que a detecção de sinais UHF é comum em faixas de frequência que vão de 100 MHz até aproximadamente 1 GHz. No entanto, em

situações específicas em que sinais acima de 1 GHz estão presentes, uma maior largura de banda pode se revelar vantajosa.

Finalmente, o estudo de Tenbohlen et al. (2023) analisou 13 tipos de transformadores em ensaios realizados em várias partes do mundo. Os resultados indicaram que a faixa de frequência de 400 MHz a 900 MHz é adequada para a identificação de falhas em, pelo menos, 13 topologias de transformadores. É apresentado na Figura 12 o resultado desse estudo.

Figura 12 – Faixas de frequência emitidas por diversas topologias de transformadores.



Fonte: Tenbohlen et al., 2023, apud Schiewaldt, 2024.

De acordo com Schiewaldt (2024), as antenas do tipo monopolo são amplamente utilizadas, pois funcionam como ressonadores para ondas UHF, com seu tamanho determinado pela frequência desejada. Esses sensores apresentam diversas características, como ganho e largura de feixe. Para antenas que não possuem uma área física bem definida, como monopolos ou dipolos, podem-se utilizar a altura efetiva (H_e) ou o fator de antena (AF). No estudo, o AF é calculado em relação à frequência do sinal (f):

$$AF(f) = \frac{E(f)}{U(f)}, \quad (5)$$

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

Tabela 4 – Faixas de frequência de falhas em transformadores (TENBOHLEN et al., 2023).

Ref.	Tipo de DP	Frequência de pulso da DP (MHz)	Frequência de pico (MHz)	Objeto de teste	Tipo da Antena	Largura de banda da Antena (MHz)
Rutgers; Fu (1997)	Eletrodo flutuante	100-1200	700	Tanque de metal	N/A	300-1200
Siegel et al. (2019)	Agulha em óleo	230-1380	211	Tanque de metal	N/A	200-1500
	Descarga superficial	380-1170	643			
	Descarga rastejante	200-1300	200			
	Descarga entre espiras	1040-1300	1059			
Kuppuswamy; Devaux; Lelaidier (2002)	Agulha em óleo	250-1100	490	Tanque de metal	Antena espiral arquimediana	500-1500
	Descarga superficial	450-930	465			
	DP em cunha de óleo	320-1050	575			
	Descarga em vazio	250-680	425			
Li et al. (2004)	Partícula metálica flutuante	260-850	290	Câmara de teste dielétrica	N/A	N/A
	Agulha em óleo	5-960	35			
	Descarga superficial	150-1440	378			
	Partícula metálica flutuante	0-1000	370			
Jongen et al. (2005)	Agulha em óleo	25-200	35	Câmara de teste dielétrica	Antena bi-cônica/log-periódica	30-2000
	Descarga em vazio	5-150	88			
Ishikura et al. (2008)	DP em cunha de óleo	20-480	396/408	Tanque de metal	N/A	N/A
Hikita; Ohtsuka; Matsumoto (2007)	Agulha em óleo	370-2540	450	Tanque de metal	Antena em formato de cone	N/A
	Descarga superficial	275-1700	450/700			
Tenbohlen et al. (2008)	Agulha em óleo	260-775	349	Tanque de metal	Antena fractal Peano de múltiplas bandas	345-600 660-735 920-1000
	Descarga superficial	260-760	518			
	Partícula metálica flutuante	260-765	525			
	Descarga em vazio	260-400	302			
Jiang et al. (2011)	Agulha em óleo	270-955	368	Câmara de teste dielétrica	Antena fractal Hilbert multi-ressonante	300-1000
	Descarga superficial	265-810	332			
	Partícula metálica flutuante	270-725	341			
	Descarga em vazio	255-530	286			
Li et al (2012)	Descarga superficial	300-950	370	Câmara de teste dielétrica	Antena meandro	300-1000
	Descarga em vazio	310-940	425			
Li; Guo; Peng (2014)	Partícula metálica flutuante	400-735	695	Tanque de metal	Antena espiral logarítmica de duplo braço	100-2000
	Descarga em vazio	270-620	335			
Sinaga; Phung; Blackburn (2014)	Descarga superficial	125-700	210	Câmara de teste dielétrica	Antena de laço meandro de múltiplas bandas	480-520 800-850 1100-1150
	Partícula metálica flutuante	190-580	500			
Ye et al (2014)	Descarga superficial	260-580	311	Tanque de metal	Antena em formato de disco	150-1000

Koziol et al. (2019)	Agulha em óleo	20–1680	1140	Câmara de teste dielétrica	Antena monopolo elíptica planar alimentada por microtira de banda larga	1200–3000
Chai; Phung; Zhang (2018)	Descarga superficial	265–980	900	Câmara de teste dielétrica	Arranjo de antenas Hilbert empilhadas multi-banda	339–375
	Descarga em vazio	265–1000	605			395–440 450–1000
Li et al. (2013)	DP em óleo	20–300	50	Câmara de teste dielétrica	Antena helicoidal de banda larga	N/A
	Partícula metálica flutuante	25–620	172			

Schiewaldt (2024) realizou um estudo comparando três faixas de frequências de sinais UHF, aplicadas em duas falhas em transformadores, considerando três técnicas de classificação de falhas. Foram escolhidas como faixas de frequência o sinal sem filtragem, faixas segundo a Brochura Técnica 861 do Cigrè (100 MHz a 1 GHz) e faixa entre 400 MHz e 900 MHz indicada por Tenbohlen et al. (2023). Na Tabela 5 são compilados os resultados de seu trabalho.

O estudo resultou que, dentre as metodologias de classificação de falhas, a Análise de Componentes Principais combinada com a faixa de frequência de 400 MHz a 900 MHz apresentou os melhores resultados, considerando a distância entre os agrupamentos de dados. O experimento também revelou que a limitação da faixa de frequência não comprometeu a classificação e identificação das falhas. Dessa forma, a possibilidade de utilizar faixas de frequência menores pode favorecer o desenvolvimento de sistemas de aquisição de dados mais acessíveis, sem perda de informações ao restringir a largura de banda.

Tabela 5 – Comparação entre as técnicas de classificação estudadas por Schiewaldt (2024) a partir das distâncias euclidianas entre o centro geométrico de cada agrupamento.

Falhas/Método de Classificação	Banda Total			100 MHz a 1 GHz			400 MHz a 900 MHz		
	TC	ACP	AF	TC	ACP	AF	TC	ACP	AF
Descarga Interna e no Isolador	0,36	5,67	0,005	0,37	5,04	0,02	0,31	3,69	0,07
Descarga Interna e Ruído	0,6285	4,42	0,09	0,37	4,07	0,01	0,51	3,87	0,22

Descarga no Isolador e Ruído	0,09	6,39	0,002	0,05	6,01	0,04	0,22	5,47	0,14
---------------------------------	------	------	-------	------	------	------	------	------	------

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

Nesta dissertação, foi utilizada a antena de topologia de Vivaldi para a detecção das descargas parciais e arcos elétricos. Segundo Gazit (1988), a antena Vivaldi pertence à classe de antenas aperiódicas, escaladas continuamente e suavemente curvadas. Em diferentes frequências, diferentes partes da antena irradiam, enquanto o tamanho da parte radiante permanece constante em termos de comprimento de onda. Assim, teoricamente, a antena Vivaldi possui uma faixa de frequência operacional ilimitada, com largura de feixe constante ao longo dessa faixa. Na prática, entretanto, a largura de banda operacional é limitada pela transição entre a linha de transmissão de alimentação e a linha de fenda da antena, bem como pelas dimensões finitas da antena. A constância da largura do feixe em relação à frequência depende do projeto correto da antena.

No projeto de uma antena Vivaldi para operação na região de micro-ondas, dois aspectos principais devem ser considerados:

(a) A transição da linha de transmissão principal para a linha de fenda, que alimenta a antena. Essa transição deve possuir uma faixa de frequência operacional muito ampla e baixo coeficiente de reflexão, a fim de explorar o potencial da antena.

(b) As dimensões e o formato da antena, que devem ser projetados para obter a largura de feixe desejada, além de controlar os lóbulos laterais e traseiros dentro da faixa de frequência operacional.

Para a localização das descargas parciais utilizando o método UHF, é necessário determinar três coordenadas espaciais desconhecidas. Para isso, geralmente são requeridos quatro sensores, distribuídos ao redor do tanque. Um sensor fornece a referência de tempo, enquanto os demais captam variáveis

independentes, que são utilizadas pelo algoritmo de localização de DPs por meio da diferença de tempo das ondas eletromagnéticas (AMERICO et al., 2017 apud JUDD, 2011). A triangulação convencional não é adequada quando o equipamento analisado contém uma grande quantidade de metais internos, como é o caso dos transformadores, que bloqueiam a passagem das ondas eletromagnéticas. Nesse contexto, tem-se adotado uma abordagem alternativa, na qual a estrutura básica do transformador (núcleo e enrolamentos) é pré-processada, considerando os efeitos de propagação e as variações na velocidade do sinal. A partir dessa análise, o conjunto de diferenças de tempo obtido pode ser associado aos pontos de localização dos sensores no tanque do transformador (AMERICO et al., 2017 apud COENEN; TENBOHLEN, 2012).

Embora tenha se demonstrado efetiva, a técnica de UHF depende de altas taxas de aquisição para extrair informações das falhas em transformadores, visto a faixa de frequências que o UHF abrange. Portanto, é objetivo deste trabalho avaliar a análise de envoltória do sinal de UHF como técnica de redução da taxa de aquisição.

CAPÍTULO IV – TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS

Neste capítulo apresenta-se técnicas de processamento digital de sinais que alicerçam a metodologia empregada nessa dissertação.

4.1. Técnicas de Reconhecimento de Padrões por Resposta em Frequência

A Transformada de Fourier é uma ferramenta matemática que permite transformar um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência (OPPENHEIN; VERGHESE, 2017). A Transformada de Fourier é particularmente útil para analisar a frequência e a fase de componentes de um sinal, facilitando a identificação de padrões e características que podem não ser evidentes no domínio do tempo. Considerando um sinal amostrado $x[n]$ com N amostras, essa transformada é definida por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (6)$$

em que $X[k]$ é a representação do sinal discreto no domínio da frequência e k é o índice da frequência discreta.

A Transformada de Fourier possibilita, portanto, a avaliação do conteúdo espectral dos sinais, servindo como base para diversas técnicas de reconhecimento de padrões e separação de dados, como a combinação de estatísticas e a Análise de Componentes Principais do espectro de frequências. Essas técnicas são particularmente valiosas na diferenciação de falhas em transformadores, pois permitem identificar características distintivas nos sinais capturados, facilitando a detecção precoce de problemas. Além disso, a combinação dessas abordagens pode melhorar a acurácia na classificação de falhas, contribuindo para a manutenção preditiva e a confiabilidade dos sistemas elétricos.

4.2. Técnicas de Reconhecimento de Padrões por Estatísticas

A combinação de estatísticas aplicadas neste trabalho, utiliza métricas como Energia, Desvio Padrão, Frequência Média, Banda Equivalente, Curtose e Assimetria. Esses parâmetros servem como coordenadas para avaliar o grau de separabilidade dos dados e são aplicados na classificação de falhas em transformadores (JONES, et al. 2000; ZHANG, et al., 2005; WANG, et al., 2017; ARDILA-REY, et al. 2018, apud BARRETO, 2023).

Neste trabalho, a Transformada Discreta de Fourier foi calculada a partir dos sinais das três técnicas de sensoriamento analisadas (acústico, UHF e corrente elétrica), considerando todas as condições operacionais do transformador. Em seguida, para cada caso, foram aplicadas a técnica de reconhecimento de padrões por cruzamento de estatísticas e a Análise de Componentes Principais (ACP) como sistemas de separação de dados. Essas técnicas são caracterizadas como ferramentas eficazes de extração de características, que permitem o reconhecimento de padrões de sinais complexos sem a necessidade de um processo de treinamento supervisionado (SCHIEWALDT et al., 2024).

As estatísticas consideradas para a avaliação das técnicas de sensoriamento estudadas por este trabalho foram Energia, Desvio Padrão, Frequência Média, Banda Equivalente, Curtose e Assimetria.

A Frequência Média (em inglês, *Average Band*) de um sinal é uma medida que representa a frequência média ponderada dos componentes espectrais de um sinal. Ela é frequentemente utilizada para caracterizar sinais de forma a entender sua distribuição de energia ao longo das frequências, e pode ser matematicamente definida por (SCHIEWALDT et al., 2024):

$$AB = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} f[k]|X[k]|}{\sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|} \quad (7)$$

em que $X[k]$ é a Transformada Discreta de Fourier de uma sequência discreta $x[n]$ com N amostras e $f[k]$ é a frequência.

A Banda Equivalente (em inglês, *Equivalent Bandwidth*) de um sinal refere-se à largura de faixa de frequências de um sinal que contém a mesma quantidade de energia que um sinal idealizado com uma frequência específica. Ela é utilizada para descrever a largura de banda de um sinal em termos de sua capacidade de transmitir informação sem distorção. A Banda Equivalente (EB) pode ser calculada a partir da largura de banda efetiva do espectro de um sinal. A largura de banda equivalente é particularmente relevante em comunicações e processamento de sinais, onde é crucial para a eficiência do uso do espectro, e é calculada por (SCHIEWALDT et al., 2024):

$$EB = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{N-1} f[k]^2 |X[k]|^2}{NE}} \quad (8)$$

em que E é a Energia do sinal, definida como (SCHIEWALDT et al., 2024):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 \quad (9)$$

A Energia de um sinal é uma medida da potência total contida no sinal durante um determinado intervalo de tempo. Em um sinal discreto, a energia é calculada como a soma dos quadrados das amostras.

O Desvio Padrão (σ) é uma medida estatística que quantifica a dispersão ou a variação dos valores em um conjunto de dados em relação à média. Em outras palavras, ele indica o quanto os dados tendem a se afastar da média. Para um vetor de comprimento finito X composto por N observações escalares, o desvio padrão é definido como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |X[k] - \mu|^2} \quad (10)$$

em que μ é a média de X , definida por:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X[k] \quad (11)$$

A Curtose (ou *Kurtosis*) é uma medida estatística que caracteriza a forma da distribuição de dados, com especial ênfase na "altura" e no "afunilamento" das extremidades da distribuição. Essa métrica fornece informações sobre a propensão dos dados a gerar valores extremos, conhecidos como *outliers*, em comparação com uma distribuição normal. A análise da curtose permite identificar distribuições que apresentam caudas mais longas ou mais curtas do que aquelas observadas em uma distribuição normal, oferecendo, assim, insights sobre a concentração dos dados em torno da média e a frequência de ocorrências extremas (BOCK, 2016). A Curtose (K) é definida por (SCHIEWALDT et al., 2024):

$$K = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{|X[k]| - \mu}{\sigma} \right]^4 \quad (12)$$

Da mesma forma, a Assimetria (ou *Skewness*) é uma medida estatística que quantifica a simetria de uma distribuição de dados. Ela indica se os dados tendem a se concentrar mais em um lado da média do que no outro. A análise da assimetria fornece insights importantes sobre a forma da distribuição, auxiliando na compreensão da dispersão e da variabilidade dos dados (BOCK, 2016). A Assimetria (S) é definida por (SCHIEWALDT et al., 2024):

$$S = \sum_{n=0}^{N-1} \left[\frac{|X[k]| - \mu}{\sigma} \right]^3 \quad (13)$$

O objetivo do cálculo das estatísticas selecionadas é aplicar cada parâmetro como um sistema cartesiano, na geração de mapas auto-organizáveis com o cruzamento de informações dos três sensores, inicialmente entre si e, em um segundo momento, entre eles, a fim de avaliar o comportamento da forma do espectro em todos os casos estudados e selecionar as técnicas de sensoriamento e de processamento de sinais que obtiveram melhor performance.

4.3. Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é uma técnica estatística utilizada para reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados, mantendo a maior quantidade possível de variabilidade. Ela permite demonstrar semelhanças ou diferenças em um conjunto de dados. Essa abordagem transforma um conjunto de variáveis originais possivelmente correlacionadas em um novo conjunto de variáveis não correlacionadas, denominadas componentes principais. Cada componente principal é uma combinação linear das variáveis originais e é ordenado de tal forma que o primeiro componente captura a maior parte da variabilidade dos dados, o segundo componente captura a segunda maior parte, e assim por diante (JOLLIFFE, 2002).

Inicialmente, os dados são centralizados, subtraindo-se a média de cada variável para que fiquem centrados na origem. Em seguida, calcula-se a matriz de covariância, que descreve as relações entre as variáveis. Após isso, são determinados os autovalores e autovetores, onde os autovalores indicam a variabilidade explicada por cada componente principal e os autovetores mostram a direção desses componentes no espaço de dados. Os componentes são então ordenados com base nos autovalores, permitindo a seleção de um número reduzido deles para preservar a maior parte da variabilidade dos dados. Por fim, os dados originais são projetados no espaço dos componentes principais, resultando em um novo conjunto de dados com dimensões reduzidas (JOLLIFFE, 2002).

Assim, como exemplo, dado uma matriz de dados A , generalizada por $A_i = (A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}, \dots, A_{ip})$, define-se a matriz covariância C como:

$$C = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (A_i - \bar{A})(A_i - \bar{A})^T \quad (14)$$

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

Para este estudo, a matriz A_i foi formada por todos os vetores de espectro de frequência de tamanho p extraídos de i sinais acústicos no domínio do tempo, referentes às duas falhas analisadas e aos ruídos inerentes ao sistema, de cada um dos três sensores estudados.

A abordagem mais comum na literatura para obter o conjunto de autovalores de C é aplicando a decomposição por valores singulares (DVS) (GRANATO, et al., 2018; WANG, et al., 2018, apud BARRETO, 2023):

$$C = USU^T \quad (15)$$

em que U consiste em uma matriz ortonormal contendo os autovetores de C , e, S é uma matriz diagonal de autovalores de C .

Segundo Castro et al. (2023), é possível formar mapas de separação criando gráficos a partir das três primeiras colunas da matriz U como coordenadas, o que se configura como uma técnica eficaz para a separação de dados.

A técnica proposta por Castro et al. (2023) permite que um conjunto de dados do espectro de frequências dos sinais seja organizado em uma única matriz, na qual cada linha representa a Transformada de Fourier de um sinal associado a uma falha específica. Essa matriz é então utilizada como entrada para a aplicação da Análise de Componentes Principais (ACP), facilitando a identificação de padrões e a diferenciação de falhas. Essa abordagem não apenas simplifica a análise dos dados, mas também potencializa a eficiência na detecção de anomalias nos sinais analisados.

4.4. Transformada de Hilbert

A Transformada de Hilbert é uma operação matemática utilizada em processamento de sinais que gera uma representação analítica de um sinal real. Um

sinal analítico é uma função de tempo complexa (ou seja, analítica) que possui uma transformada de Fourier cujas componentes de frequência negativa são nulas (OPPENHEIM; SCHAFER, 2012, apud ROCHA, 2022). Ela transforma um sinal $x(t)$ em um novo sinal complexo $\hat{x}(t)$, que contém informações sobre a fase e a amplitude do sinal original (OPPENHEIM, 2009). Se expressarmos o sinal modulado com valor real $x(t)$ como um sinal analítico, ele será expresso no plano complexo como:

$$\hat{x}(t) = x(t) + jH\{x(t)\} \quad (16)$$

onde $H\{x(t)\}$ é a Transformada de Hilbert do sinal $x(t)$ e j é a unidade imaginária. Dessa forma, $\hat{x}(t)$ representa o sinal analítico que contém as informações de amplitude e fase do sinal original no plano complexo.

Segundo Rocha (2022), embora, à primeira vista, a Transformada de Hilbert não altere o domínio da função à qual é aplicada, ela possibilita a construção de um espectro do sinal original com alta precisão a partir da função analítica. Essa função é composta por uma parte real, correspondente ao sinal original, e uma parte imaginária, que é a Transformada de Hilbert do sinal. Dessa forma, é possível obter atributos instantâneos dos sinais, como amplitude e fase. Matematicamente, a Transformada de Hilbert $H\{x(t)\}$ de um sinal qualquer, representado por $x(t)$, pode ser expressa por (KONAR; CHATTOPADHYAY, 2015; RANGEL-MAGDALENO et al., 2017, apud ROCHA, 2022):

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (17)$$

De modo geral, modulação é o processo de alterar sistematicamente uma ou mais características de um sinal portador em resposta a um sinal de mensagem, com o objetivo de transmitir informações (ALENCAR, 2001, apud SOUSA, 2018). O objetivo da modulação é gerar um sinal modulado em uma frequência mais elevada,

que incorpore as informações desejadas pelo usuário, ao mesmo tempo em que suas características sejam adequadas ao processo de transmissão de dados utilizado.

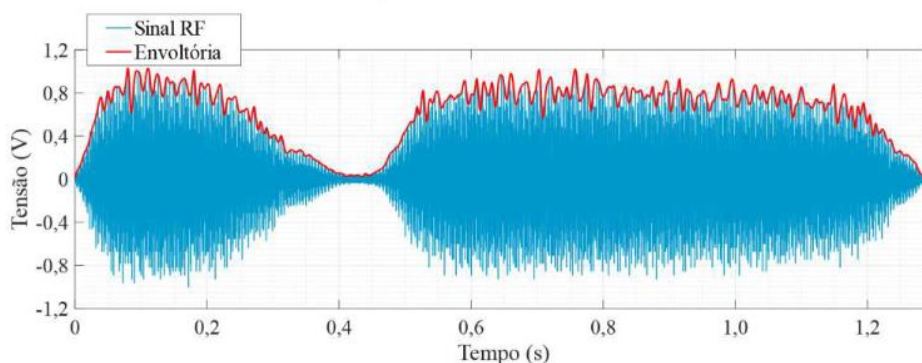
De acordo com Sousa (2018), a técnica de Modulação em Amplitude (AM, do inglês *Amplitude Modulation*) é um método em que a amplitude da onda portadora varia de acordo com a amplitude do sinal de interesse, conhecido como sinal de mensagem ou modulador. Já no processo de demodulação, busca-se rastrear a envoltória do sinal, que é definida pela amplitude do sinal. Uma vez que a confiabilidade da técnica de detecção esteja estabelecida, é possível observar os parâmetros dos sinais com uma redução nos requisitos de conversão, transmissão e armazenamento de dados.

A Transformada de Hilbert atua como uma ferramenta poderosa na detecção da envoltória de sinais, permitindo uma análise detalhada de suas características de amplitude e facilitando a demodulação e a interpretação de sinais complexos (PAPOULIS, 2002). A envoltória do sinal pode ser obtida a partir do módulo do sinal analítico:

$$|\hat{x}(t)| = \sqrt{X(T)^2 + H\{x(t)\}^2} \quad (18)$$

Essa fórmula permite que a envoltória seja extraída, revelando as variações na amplitude do sinal original, conforme ilustrado na Figura 13. A envoltória obtida é útil para detectar padrões de modulação e identificar características importantes do sinal, como picos e vales, que são cruciais em aplicações de comunicação e processamento de sinais.

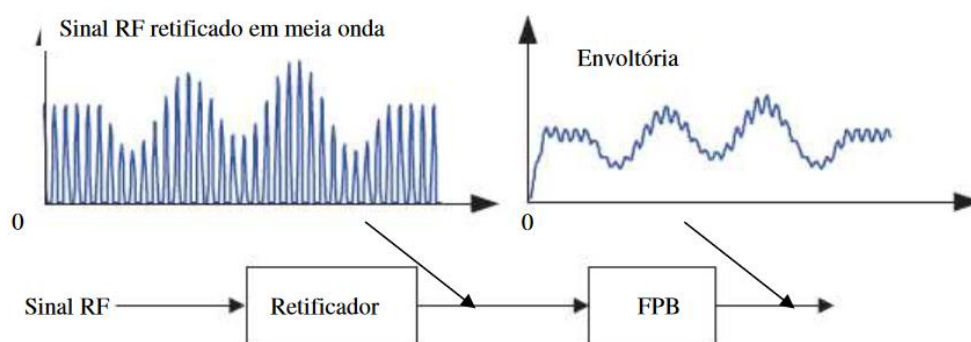
Figura 13 – Exemplo de detecção de envoltória de um sinal acústico modulado.



Fonte: Sousa, 2018.

Entretanto, o cálculo da Transformada Hilbert é utilizado para extrair a envoltória de um sinal no lugar de um dispositivo eletrônico que executaria esta função naturalmente. Eletronicamente, a detecção da envoltória é realizada inicialmente por meio da retificação de meia onda do sinal, que ajusta as amostras negativas do sinal de entrada para zero. Em seguida, aplica-se um filtro passa-baixas (FPB) projetado para eliminar as componentes de alta frequência remanescentes do sinal original (SOUSA, 2018). Este processo pode ser visualizado com mais detalhes no diagrama da Figura 14.

Figura 14 – Processo de detecção de envoltória de um sinal RF.

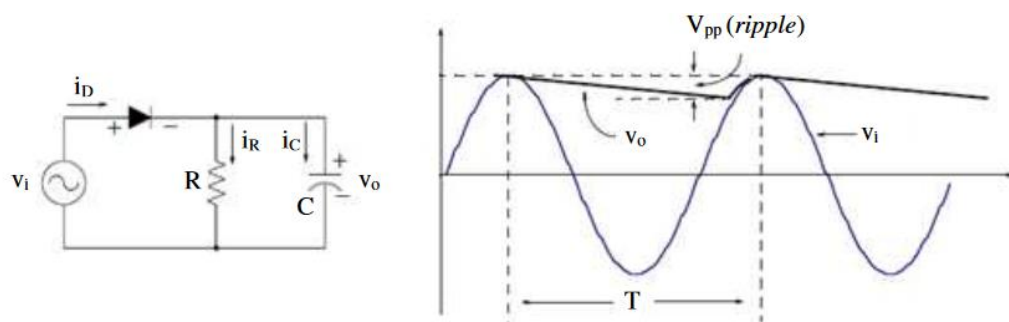


Fonte: Adaptado de Lyons, 2017, apud Sousa, 2018.

De acordo com Sousa (2018), os projetos de circuitos para detecção de envoltória costumam ser simples e de baixo custo. A retificação do sinal de entrada é

realizada por meio de um circuito retificador utilizando um diodo, enquanto o filtro passa-baixas pode ser implementado com um circuito RC básico, composto por um resistor e um capacitor em paralelo. Essa configuração RC proporciona, essencialmente, a suavização da envoltória, que é determinada pelos picos do sinal de entrada. Ilustra-se, na Figura 15, a tensão no capacitor, assumindo que o diodo seja ideal e que a constante de tempo RC seja significativamente maior que o período do sinal original — que, neste exemplo, é senoidal.

Figura 15 – Circuito detector de envoltória.



Fonte: Adaptado de Karris, 2005, apud Sousa, 2018.

Quando a tensão de entrada v_i for maior que a tensão v_o sobre o capacitor C , o diodo conduz, permitindo que o capacitor se carregue com o valor da tensão de entrada. Em contrapartida, quando v_i é menor, o capacitor se descarrega através do resistor R . Dessa forma, o sinal de tensão de saída é apresentado como a envoltória do sinal de tensão de entrada. A função do circuito, portanto, é acompanhar a amplitude positiva do sinal de entrada sempre que esta excede a tensão de joelho do diodo (ALAA, 2013, apud SOUSA, 2018).

CAPÍTULO V – METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia realizada para o estudo dos três métodos de sensoriamento para diagnóstico de falhas em transformadores. Para isso, este capítulo será dividido em método de ensaio laboratorial e metodologia de processamento de sinais.

5.1. Método de Ensaio Laboratorial

Como o objetivo dessa dissertação é avaliar três métodos de sensoriamento para a classificação de falhas em transformadores, ou seja, emissão acústica, UHF e correntes em alta frequência, durante os ensaios laboratoriais foi utilizado 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 ilustrado na Figura 16. Neste contexto, foram introduzidas três condições no transformador, das quais duas correspondem a falhas específicas descritas pela norma IEC 60599 (2015): descargas parciais, aplicadas nos isoladores, e descargas de baixa energia do tipo D1, aqui referidas como arcos elétricos, no enrolamento. A terceira condição estudada corresponde a operação do transformador sem falhas.

Para isso, foram emulados, primeiramente, 200 arcos elétricos e, posteriormente, 200 descargas parciais nos isoladores do transformador. Conforme mencionado, os arcos elétricos são falhas que acometem as espiras do transformador em dois ou mais pontos em que há perda de isolação. Já as descargas parciais nos isoladores ocorrem devido a depósito de outros materiais como poeira, maresia, dejetos de animais, entre outros.

Para a emulação dos arcos elétricos, utilizou-se um eletrodo ponto-plano com um espaçamento ajustado em 2 mm que foi posicionado no interior do transformador,

Figura 16 – Transformador de Distribuição isolado a óleo de potência nominal de 30kV e tensões nominais de 13,8 kV no primário e 127 V/220 V no secundário.

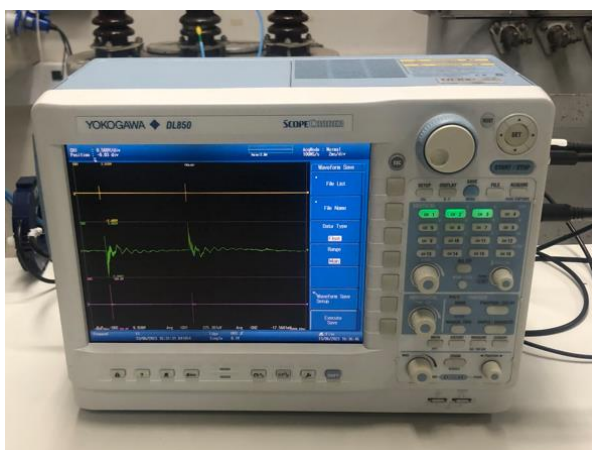


A vintage General Electric portable oil tester, model 40. The device is a rectangular metal box with a control panel on top. The panel features a pressure gauge with a scale from 0 to 40 PSI, a black control knob, a red indicator light, and a small switch labeled "SWITCH". The text "GENERAL ELECTRIC" is embossed on the panel. A label on the front of the box reads: "GENERAL ELECTRIC PORTABLE OIL TESTER MODEL NO. 40 115V 50/60 HERTZ SERIAL NO. 10000 MADE IN U.S.A.". Below this label is a "UNESP" logo. The device is shown in a workshop setting with various tools and equipment visible in the background.

68

Os dados de cada método de sensoriamento foram coletados através do osciloscópio da marca Yokogawa, modelo DL850, conforme ilustrado na Figura 18. O objetivo foi simular os arcos elétricos que podem ocorrer internamente no transformador entre seus enrolamentos ou entre as espiras, em situações de perda de isolamento.

Figura 18 – Osciloscópio Yokogawa DL850 utilizado para a aquisição dos dados.



Fonte: Elaborado pela autora.

A descarga parcial no isolador foi emulada com a aplicação de pó de grafite nos isoladores de porcelana do transformador, simulando a contaminação superficial causada por poeira, maresia (salinidade) e dejetos de animais. Na bucha, foi aplicada a tensão nominal do transformador de 13,8 kV em 200 medições, visando reproduzir as condições de operação e os efeitos da contaminação sobre o desempenho dos isoladores. Finalmente, foram realizadas mais 100 medições do ruído de fundo dos sensores, considerando a operação normal do transformador sem a presença de falhas, a fim de estabelecer uma base de comparação com os dados obtidos nas condições de falha estudadas. É ilustrado, na Figura 19, o eletrodo para simulação do arco elétrico e a bucha contaminada com pó de grafite para simulação de descarga parcial no isolador.

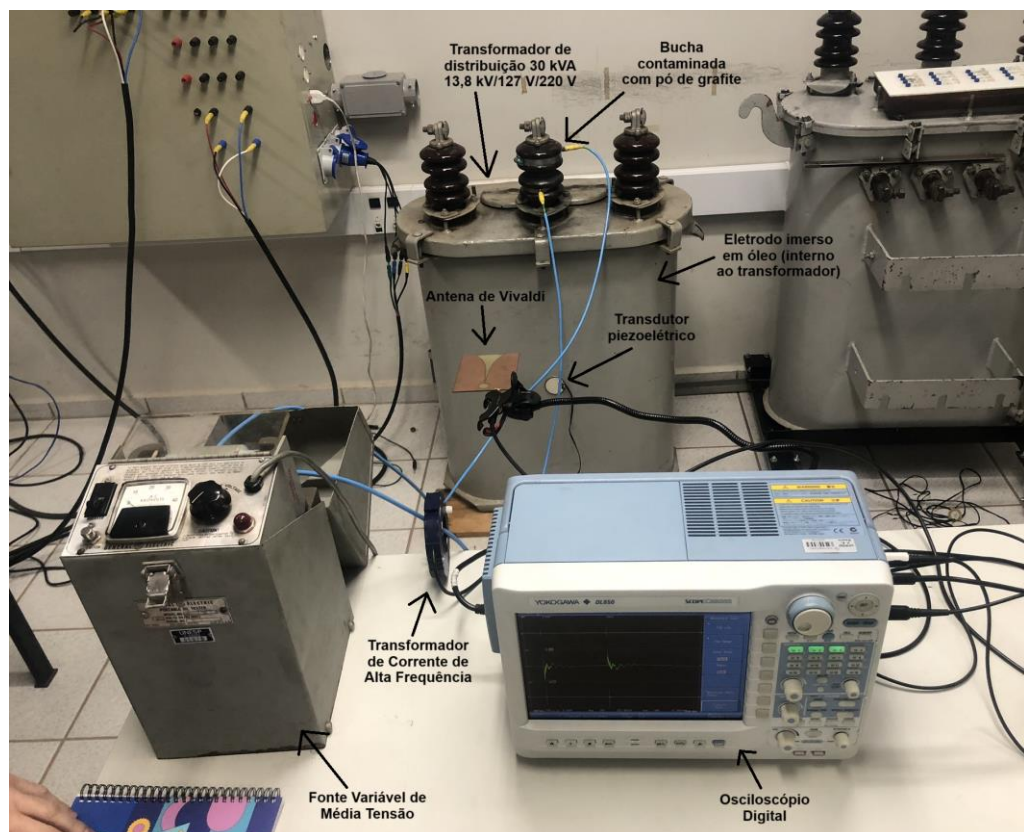
Figura 19 – Eletrodo e bucha utilizados no ensaio laboratorial.



Fonte: Elaborado pela autora.

Ilustra-se, na Figura 20, a configuração dos ensaios laboratoriais para os três métodos de sensoriamento, detalhando a disposição de cada equipamento utilizado no experimento.

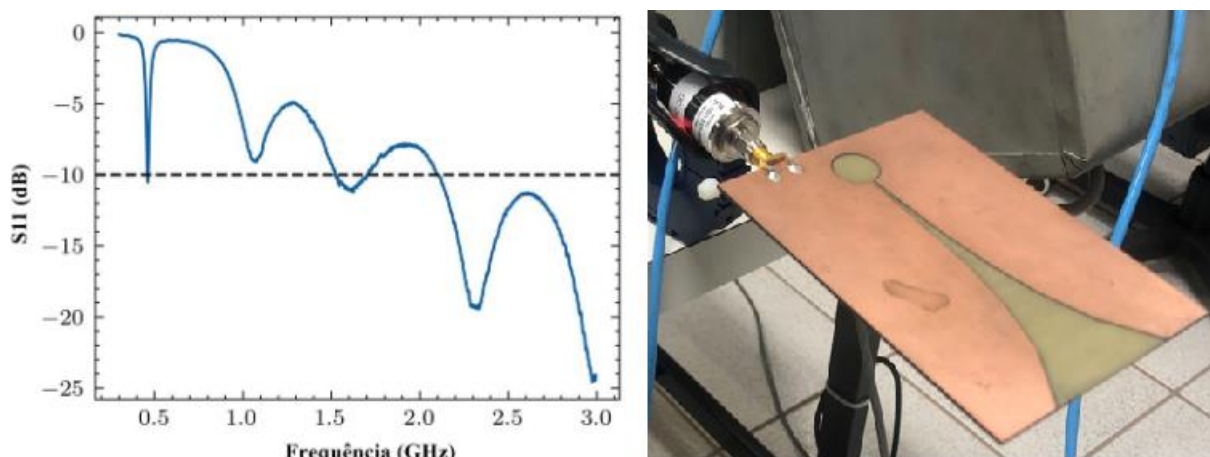
Figura 20 – Configuração dos ensaios laboratoriais.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados coletados do sistema UHF foram extraídos do mesmo ensaio de Schiewaldt (2024). Uma antena de topologia Vivaldi foi posicionada a 1 metro do transformador, com o sistema de aquisição de dados M4i.2233-x8 da SPECTRUM Instrumentation configurado para uma taxa de amostragem de 2,5 GHz, semelhante à abordagem utilizada por Albarracín et al. (2015). Durante o ensaio, foram realizadas 200 medições de descargas parciais nos isoladores, 200 medições de arco elétrico e 100 medições de ruído de fundo. Na Figura 21 é ilustrada a antena utilizada junto de seu parâmetro de reflexão (S_{11}). Verifica-se que, em 400 MHz, o coeficiente atinge -3 dB, o que indica que a antena pode ser sensível a sinais com frequências superiores a esse valor.

Figura 21 – Parâmetro de reflexão (S_{11}) e antena de Vivaldi utilizada.



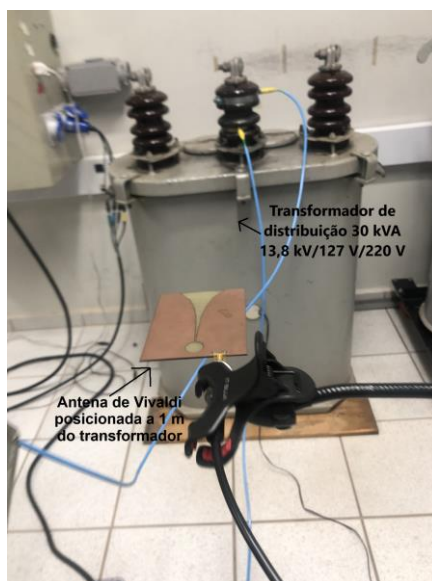
Fonte: Adaptado de Ardila-Rey, 2023, apud Schiewaldt, 2024.

A análise dos sinais coletados envolveu a extração da envoltória dos sinais por meio da transformada de Hilbert, com o objetivo de verificar se a envoltória é eficaz para o diagnóstico e classificação de falhas. Além disso, o detector de envoltória foi emulado digitalmente no software *Matlab*®. Considerando que as envoltórias dos sinais apresentam frequências mais baixas, o objetivo foi investigar se essas envoltórias dos sinais UHF são sensíveis ao diagnóstico e à classificação das falhas analisadas. Assim, buscou-se avaliar a possibilidade de operar com menores taxas

de aquisição, o que viabilizaria o uso de uma eletrônica de baixo custo, uma vez que o hardware necessário para a detecção das envoltórias não é complexo.

Dessa forma, o estudo avaliou a eficácia da análise das envoltórias no diagnóstico de falhas em transformadores. Na Figura 22, ilustram-se os detalhes do ensaio experimental para o sensoriamento UHF.

Figura 22 – Procedimento experimental para o sensoriamento UHF.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para o sensoriamento acústico, foi utilizado um transdutor piezelétrico de modelo semelhante ao PIC255-000041371 Piezo-Sensor® (PIEZO TECHNOLOGY, 2022), apresentado na Figura 23, com frequência de ressonância de 50 kHz, conforme mostrado na Tabela 6. O transdutor foi posicionado no centro da carcaça do transformador, utilizando parafina líquida oleaginosa para garantir o acoplamento acústico. Os sinais gerados pelo transdutor foram condicionados por um amplificador de instrumentação modelo INA 128P da *Texas Instruments*®, cujas especificações estão detalhadas na Tabela 7. Na Figura 24, é apresentada a configuração dos ensaios laboratoriais realizados para o sensoriamento acústico.

Tabela 6 – Especificações do transdutor PIC255-000041371 Piez-Sensor®.

Frequência de Ressonância	50 kHz
Capacitância	25 nF
Permissividade	1750
Temperatura de Funcionamento	Até 350 °C

Figura 23 – Transdutor piezelétrico PIC255-000041371 Piez-Sensor®.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7 – Especificações do INA 128P

Número de Canais	1
Tensão de Alimentação (V)	9V
Ganho de Tensão	1 - 1000
Largura de Banda no Ganho Mínimo	1,3MHz
Temperatura de Operação	-40°C a 125°C
Relação de Rejeição em Modo Comum	120dB
Erro de Ganho	0,5%

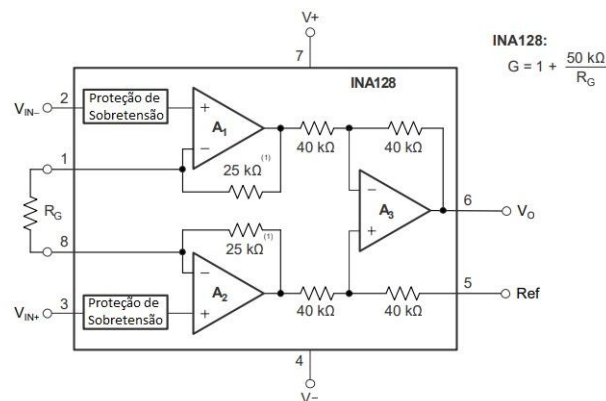
Figura 24 – Transformador de Distribuição com transdutor piezelétrico acoplado.



Fonte: Elaborado pela autora.

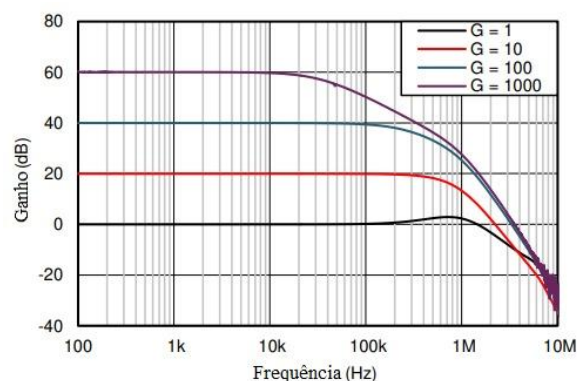
O amplificador foi configurado conforme o circuito apresentado na Figura 25. O ganho do amplificador foi ajustado para 10, garantindo uma resposta constante até 400 kHz, conforme indicado na Figura 26. Esse ajuste de ganho e frequência foi selecionado devido à boa rejeição de ruído nessa faixa de frequência, além de ser adequado para operar na frequência de ultrassom. Dessa forma, a escolha da resistência de 5 kΩ e a configuração do amplificador garantem um desempenho otimizado tanto para a captação dos sinais acústicos quanto para a redução de interferências indesejadas. Os ensaios foram mantidos a uma temperatura constante. Assim como no sensoriamento UHF, foram realizadas 200 medições de descargas parciais nos isoladores, 200 medições de arco elétrico e 100 medições de ruído de fundo.

Figura 25 – Circuito do Amplificador Aplicado.



Fonte: Texas Instruments, 2022.

Figura 26 – Curvas de Ganho e Rejeição de modo Comum.

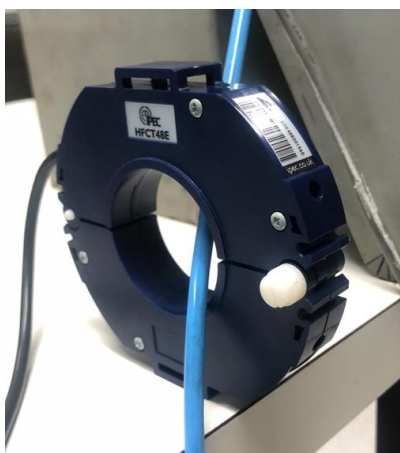


Fonte: Texas Instruments, 2022.

A taxa de aquisição foi ajustada para 100 MHz, que é a capacidade limite do osciloscópio utilizado. Para o processamento dos sinais, aplicou-se um filtro passa-alta de *Butterworth* de 4ª ordem, com frequência de corte de 20 kHz, visando remover ruídos indesejados provenientes das vibrações do transformador.

Finalmente, para o sensoriamento por corrente elétrica, foi utilizado um transformador de corrente de alta frequência, também conhecido no inglês como *High Frequency Current Transformer* (HFCT). Ilustra-se, na Figura 27, o sensor de modelo HFCT48E, que é da marca IPEC, doado ao laboratório pela empresa.

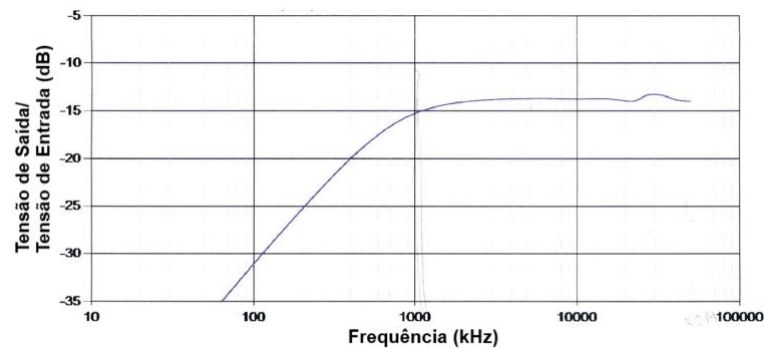
Figura 27 – Transformador de Corrente de Alta Frequência da marca IPEC, doado ao laboratório pela empresa.



Fonte: Elaborado pela autora.

O sensor possui uma resposta em frequência de até 50 MHz, conforme é ilustrado na Figura 28, sendo que a resposta em frequência é praticamente constante de 1000 kHz a 50 MHz, e, portanto, o osciloscópio foi ajustado para uma taxa de aquisição de 100 MHz. O transformador de corrente (TC) foi instalado no cabo de alimentação dos eletrodos para monitorar o padrão das três condições estudadas. Assim como nos outros métodos de sensoriamento, foram realizadas 200 medições de descargas parciais nos isoladores, 200 medições de arco elétrico e 100 medições de ruído de fundo.

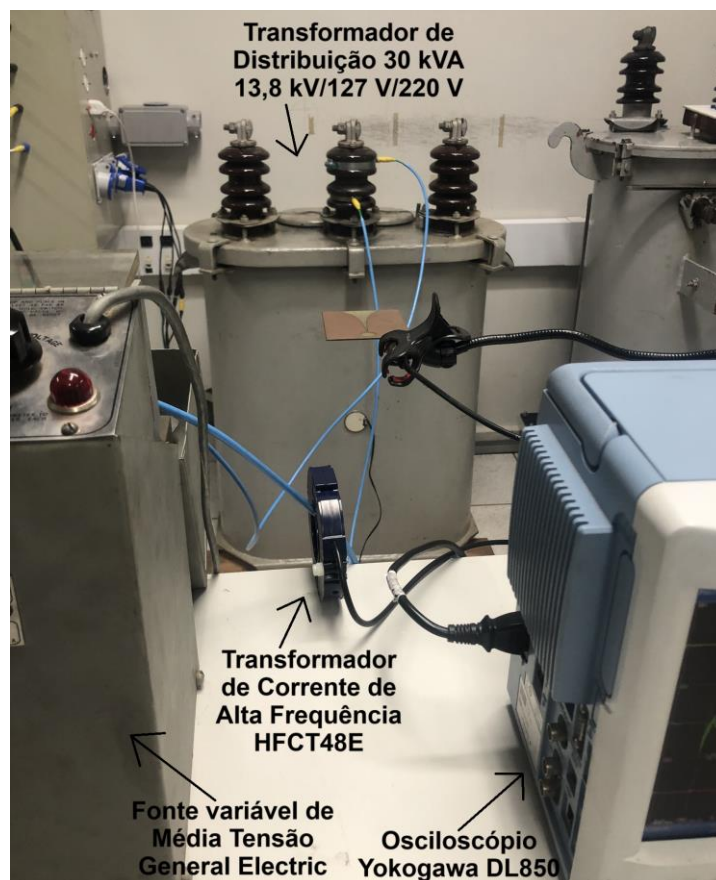
Figura 28 – Resposta em Frequência do HFCT48E.



Fonte: IPEC (2021).

Na Figura 29 é ilustrada a configuração dos ensaios laboratoriais realizados para o sensoriamento por corrente elétrica, destacando o posicionamento do TC e os equipamentos utilizados durante o experimento.

Figura 29 – Configuração dos Ensaios Laboratoriais Realizados Para o Sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

5.2. Metodologia de Processamento de Sinais

O objetivo desta dissertação é estudar três técnicas que permitam a detecção e a classificação dos dois modos de falha, bem como da operação do transformador em condições normais. Para identificar o método mais eficaz nesses aspectos, foram avaliados tanto o sensoriamento individual quanto o sensoriamento híbrido. Todo o processamento dos sinais foi realizado utilizando o software Matlab®.

No sensoriamento individual, para cada sinal no domínio do tempo, foi extraída a transformada de Fourier, resultando em uma matriz de espectros para as três condições estudadas: transformador com arco elétrico, transformador com descarga parcial no isolador e transformador sem falha. A partir dos espectros gerados pela transformada de Fourier, foram calculadas as seguintes estatísticas: Energia, Desvio Padrão, Frequência Média, Banda Média, Curtose e Assimetria. Esses parâmetros compuseram a matriz das estatísticas utilizadas para análise e classificação das falhas. O objetivo foi formar mapas bidimensionais e tridimensionais, tais que essas estatísticas foram postas duas a duas ou três a três para formar esses mapas. Por fim, a técnica da Análise de Componentes Principais foi aplicada à matriz normalizada formada pelo espectro de todas as falhas, sendo que as Componentes Principais 1 e 2 formaram mapas bidimensionais ou tridimensionais com o intuito de se classificar as condições de operação do transformador.

Com a base de dados coletada, foram gerados mapas auto-organizáveis bidimensionais e tridimensionais em coordenadas cartesianas com todas as combinações possíveis das estatísticas e da análise de componentes principais, de forma com que cada estatística e, posteriormente, cada componente principal, se transformou em um par, ou em um trio, do sistema de coordenadas cartesianas. O objetivo foi avaliar se a técnica permite distinguir as situações estudadas,

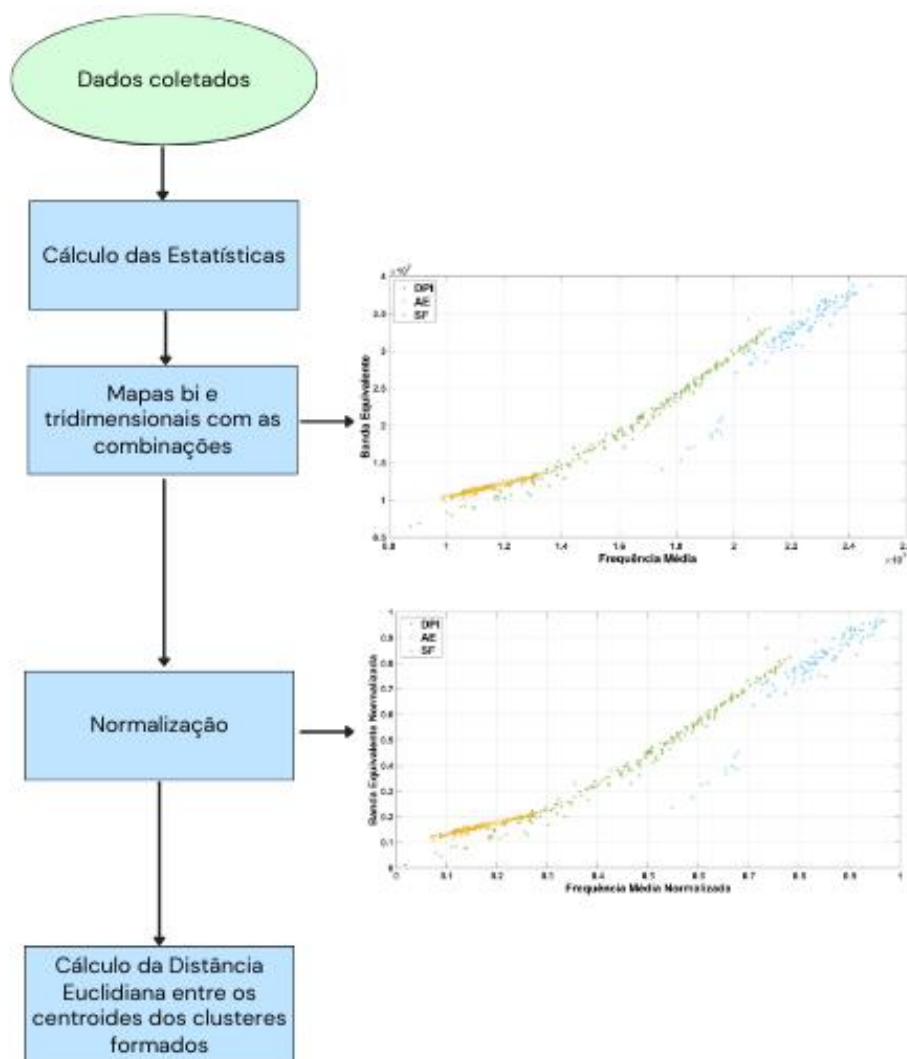
estabelecendo uma classificação clara entre elas. Para efeito de comparação, todos os parâmetros foram normalizados. Desta forma, foi realizada uma comparação da combinação de estatísticas e da análise de componentes principais para cada um dos sensores.

O método de comparação utilizado foi a Distância Euclidiana entre os centroides de cada cluster formado por diferentes tipos de falhas. A partir do conjunto de dados de cada tipo de falha, foram extraídos os centroides dos agrupamentos gerados por combinações estatísticas. Esses centroides foram calculados para o arco elétrico, a descarga parcial no isolador e para o transformador operando sem falhas. Com base nesses centroides, aplicou-se a fórmula da Distância Euclidiana. De forma geral, para dois pontos $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$ e $Q(y_1, y_2, \dots, y_n)$ em um espaço n -dimensional, a distância euclidiana mede a distância linear entre eles:

$$d(P, Q) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} \quad (19)$$

Para fins de comparação, os parâmetros dos agrupamentos foram normalizados, de modo que todos os valores no plano cartesiano ficaram entre 0 e 1, resultando em distâncias euclidianas também entre 0 e 1, permitindo a comparação das técnicas. Quanto maior a distância entre os agrupamentos das falhas, melhor é a técnica avaliada. O fluxograma apresentado na Figura 30 ilustra as ações realizadas.

Figura 30 – Fluxograma do processamento de sinais para o cálculo da Distância Euclidiana.



Fonte: Elaborado pela autora.

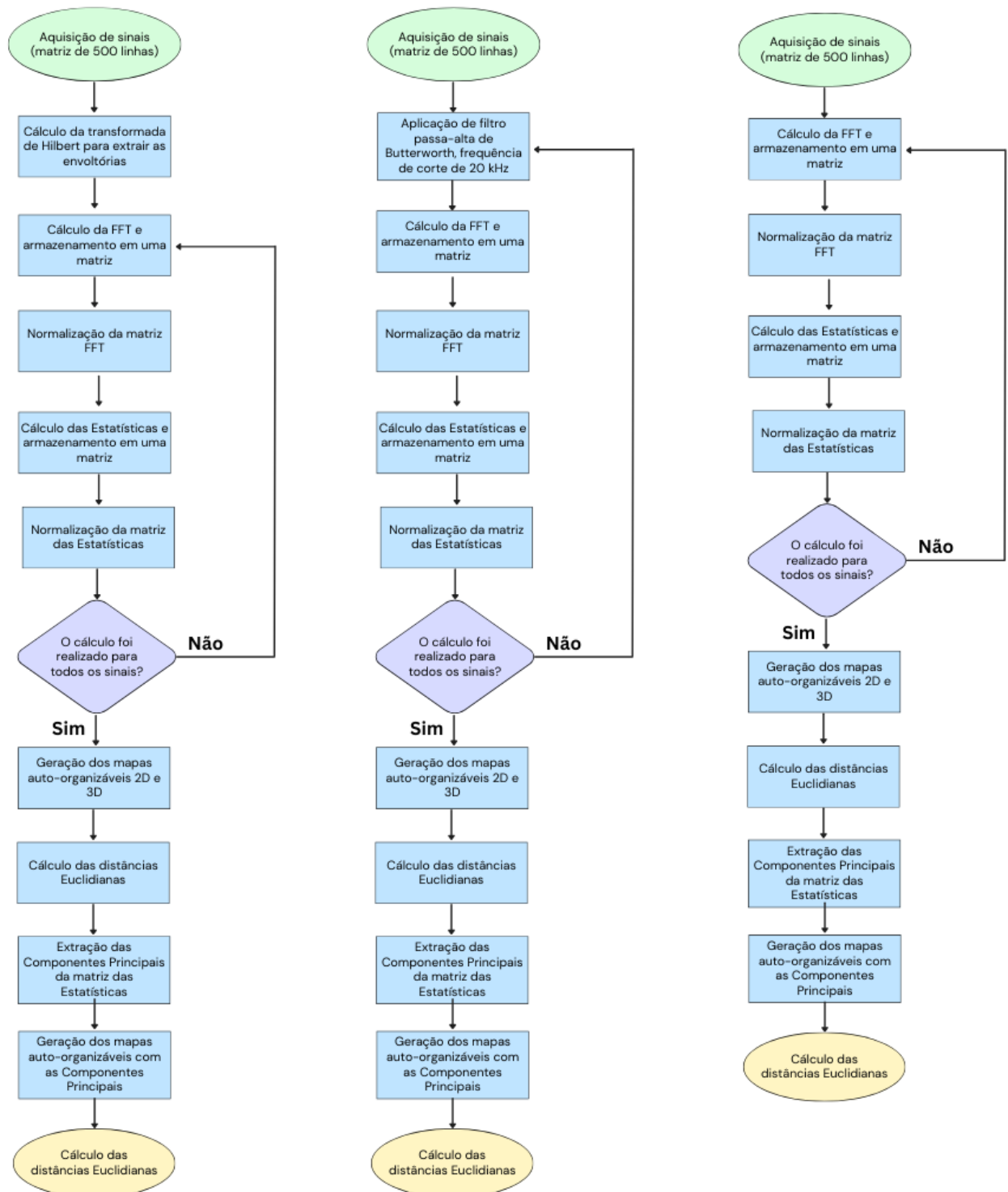
Inicialmente, todas as estatísticas foram avaliadas considerando apenas um tipo de sinal, levando em conta o sensoriamento individual, onde as informações cruzadas para a formação dos mapas bi ou tridimensionais eram as próprias estatísticas, combinadas entre si. Em um segundo momento, foi analisado o sensoriamento híbrido, no qual as estatísticas de cada sensor foram integradas, cruzando as informações entre dois tipos de sensoriamento e, posteriormente, entre os três sensores, utilizando as mesmas métricas para diferentes combinações de técnicas de sensoriamento.

O objetivo foi verificar se essa abordagem proporcionaria informações mais conclusivas ao sistema. Assim como no sensoriamento individual, foram gerados mapas auto-organizáveis bidimensionais e tridimensionais. Os mapas bidimensionais cruzaram as informações de dois sensores por vez, enquanto os tridimensionais consideraram os dados combinados dos três sensores simultaneamente, permitindo uma análise mais integrada das diferentes fontes de dados.

As maiores distâncias euclidianas representam maiores separações entre os centroides dos agrupamentos formados em cada mapa auto-organizável. Isso, por sua vez, indica uma maior capacidade de classificação das falhas, uma vez que a maior separação entre os grupos reflete uma distinção mais clara entre as diferentes condições estudadas.

Na Figura 31 é apresentado o fluxograma do processamento de sinais para os três métodos de sensoriamento estudados por este trabalho.

Figura 31 – Fluxograma do processamento de sinais para o sensoriamento UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica, respectivamente.



Fonte: Elaborado pela autora.

CAPÍTULO VI – RESULTADOS

A apresentação dos resultados é organizada em três partes. Na primeira, são exibidos os resultados relacionados ao sensoriamento individual. A segunda parte aborda os resultados obtidos com o uso de sensoriamento híbrido. Por fim, a terceira parte discute os resultados alcançados, oferecendo uma análise detalhada.

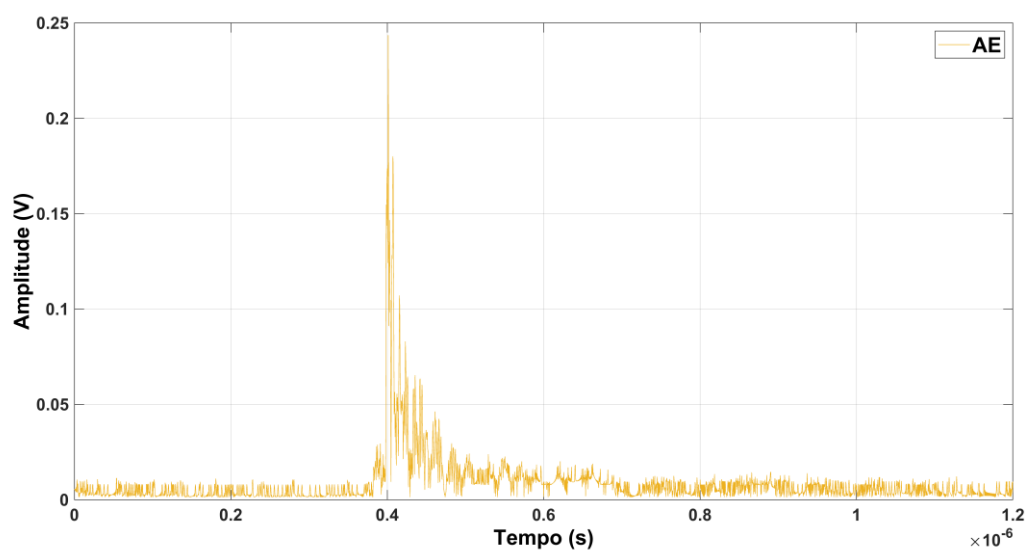
6.1. Sensoriamento Individual

Os resultados a seguir são apresentados com base em um único método de sensoriamento monitorando o transformador operando com descarga parcial no isolador (DPI), com arco elétrico (AE) e sem falha (SF), e são separados em subseções para cada tipo de sensoriamento estudado.

6.1.1 Sensoriamento UHF

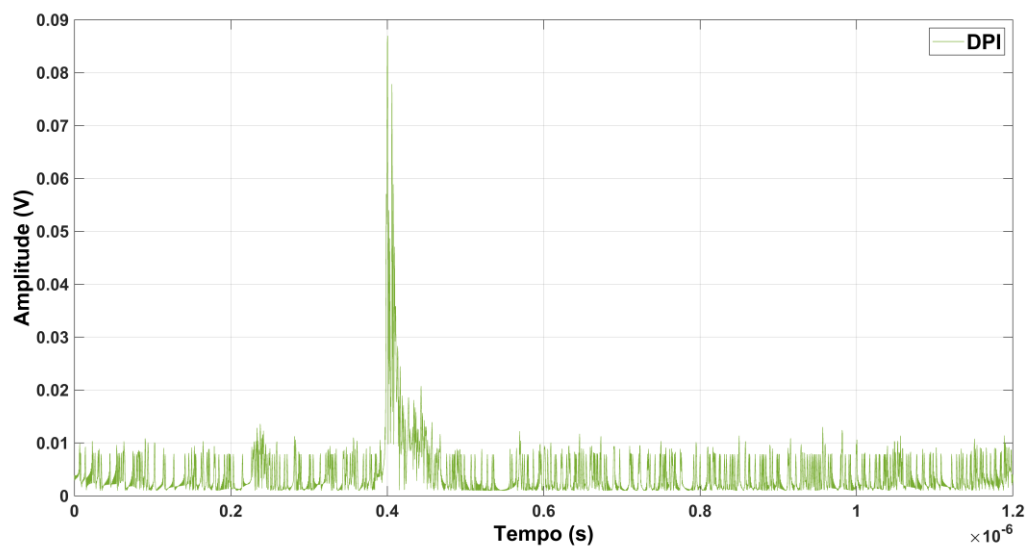
São apresentadas, nas Figuras 32, 33 e 34, as envoltórias de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo do transformador operando com um arco elétrico, operando com uma descarga parcial no isolador e operando sem falhas, respectivamente. A literatura técnico-científica expande a discussão sobre a faixa de frequência em UHF mais adequada para a detecção de sinais de descargas em transformadores. Contudo, a captação de faixas de frequência mais amplas requer *hardwares* mais robustos e, conseqüentemente, mais onerosos. Como parte da contribuição desta dissertação, a seguir são apresentados e analisados os resultados de aquisição de dados por meio da captação da envoltória dos sinais de cada caso estudado, permitindo a manipulação de faixas de frequência mais estreitas a partir do uso de um *hardware* menos complexo e mais acessível.

Figura 32 – Envoltória de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo de um arco elétrico.



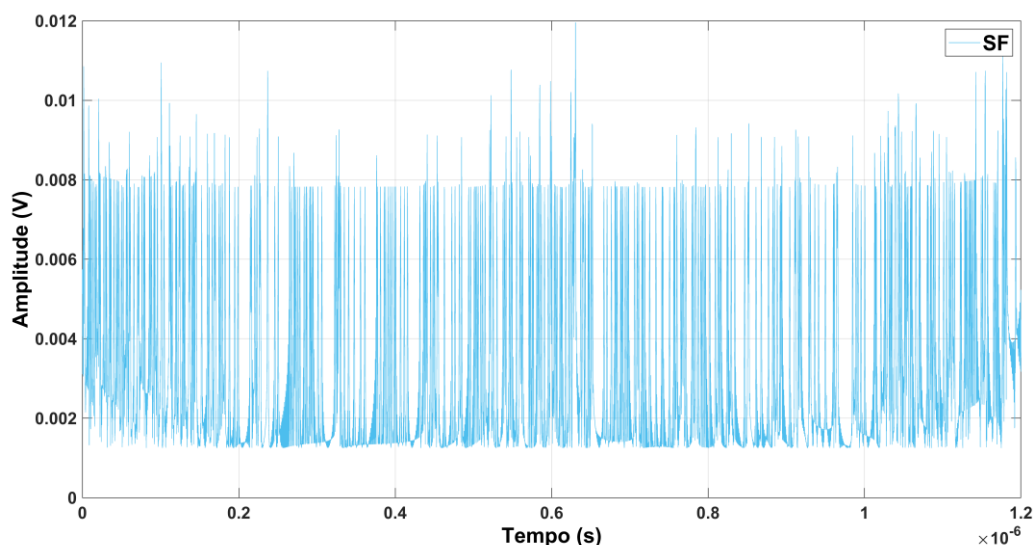
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 – Envoltória de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo de uma descarga parcial no isolador.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 – Envoltória de uma amostra de sinal UHF no domínio do tempo do transformador operando sem falha.

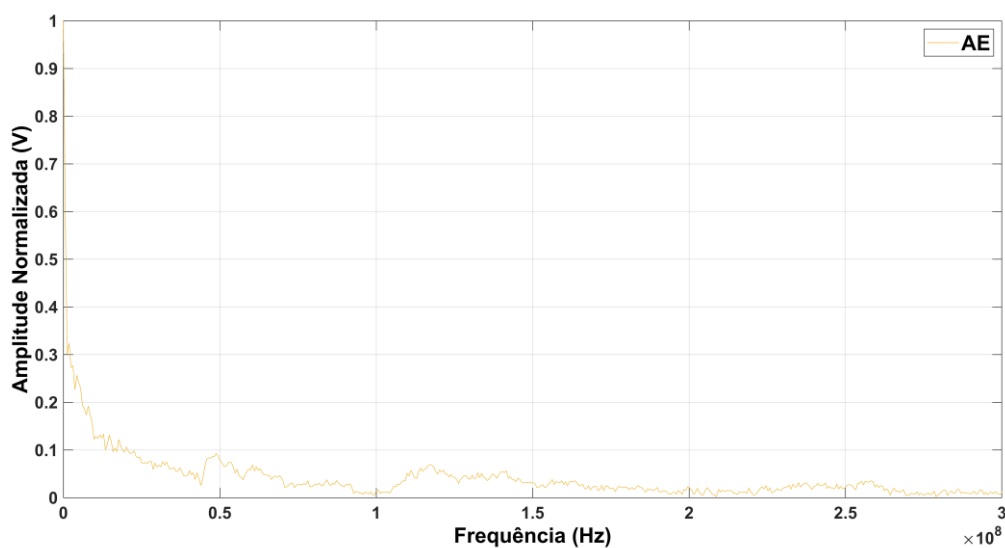


Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os sinais no domínio do tempo, observa-se que ambas as falhas apresentam um caráter impulsivo, com um decaimento que se estende por aproximadamente $0,2 \mu\text{s}$. O valor de pico da descarga parcial no isolador foi de $0,087 \text{ V}$, enquanto o arco elétrico atingiu um pico de $0,24 \text{ V}$.

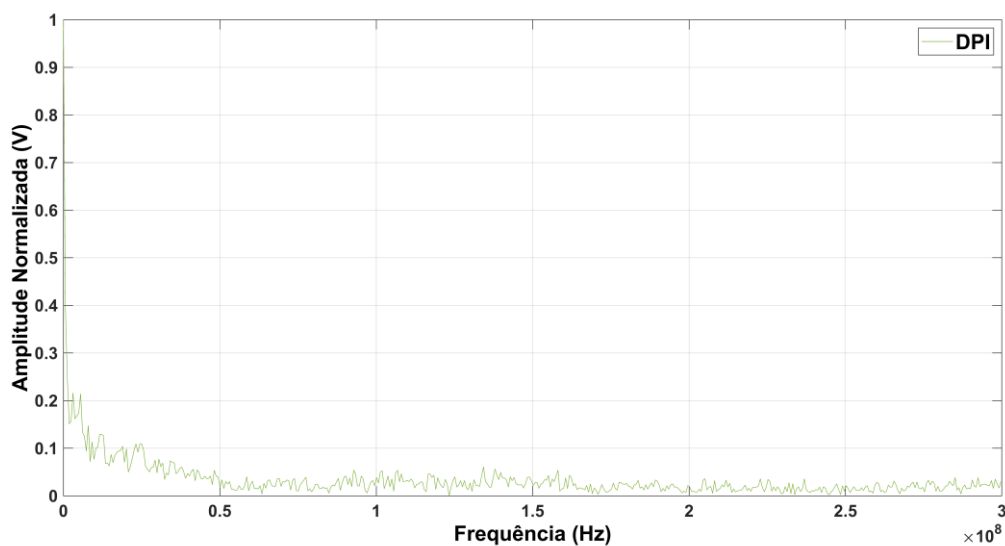
Os conteúdos espectrais dos três casos estudados são apresentados nas Figuras 35, 36 e 37, utilizando uma amostra de cada caso e normalizando os resultados. Na descarga parcial no isolador, observam-se picos nas frequências de 3 MHz e 5 MHz . No arco elétrico, os picos ocorrem nas frequências de $1,8 \text{ MHz}$ e 4 MHz . O espectro de frequência da descarga parcial no isolador é significativo entre 3 MHz e 50 MHz , enquanto o arco elétrico apresenta um espectro de frequência significativo entre $1,8 \text{ MHz}$ e 70 MHz , além de exibir amplitudes entre 100 MHz e 150 MHz . Quando o transformador opera sem falhas, o espectro de frequência apresenta uma distribuição uniforme, característica de um ruído branco gaussiano.

Figura 35 – Espectro de frequências da envoltória de uma amostra de sinal UHF de um arco elétrico.



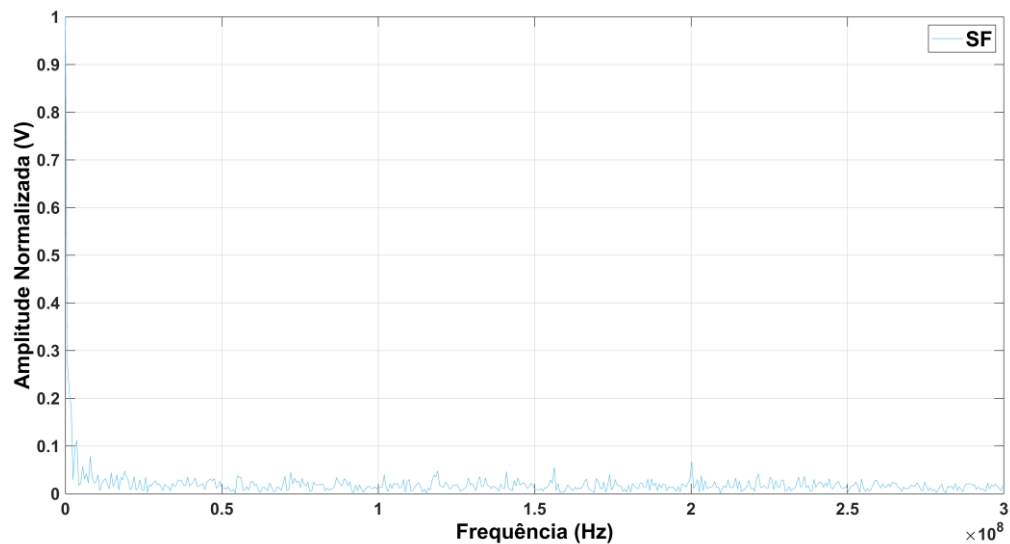
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 36 – Espectro de frequências da envoltória de uma amostra de sinal UHF de uma descarga parcial no isolador (DPI).



Fonte: Elaborado pela autora.

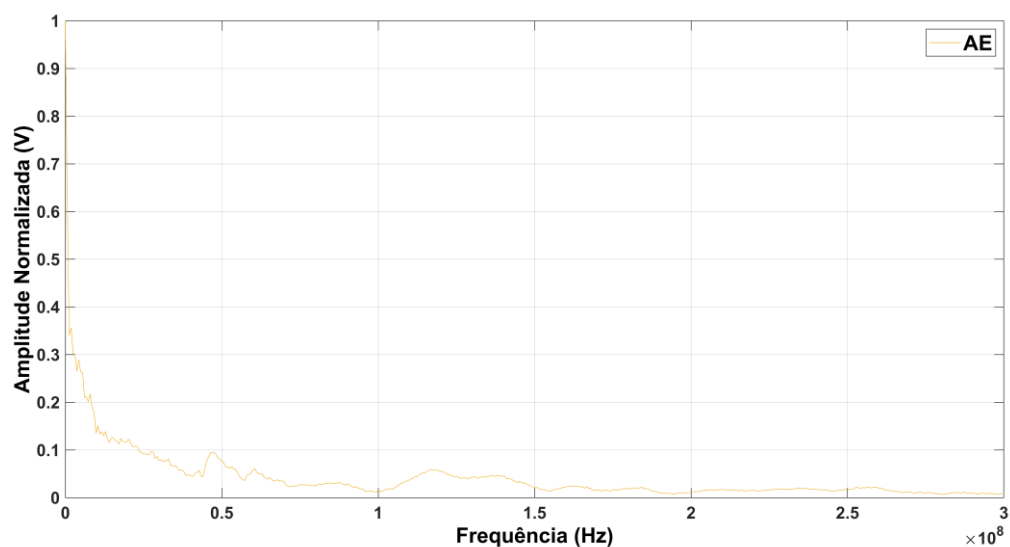
Figura 37 – Espectro de frequências da envoltória de uma amostra de sinal UHF do transformador operando sem falha.



Fonte: Elaborado pela autora.

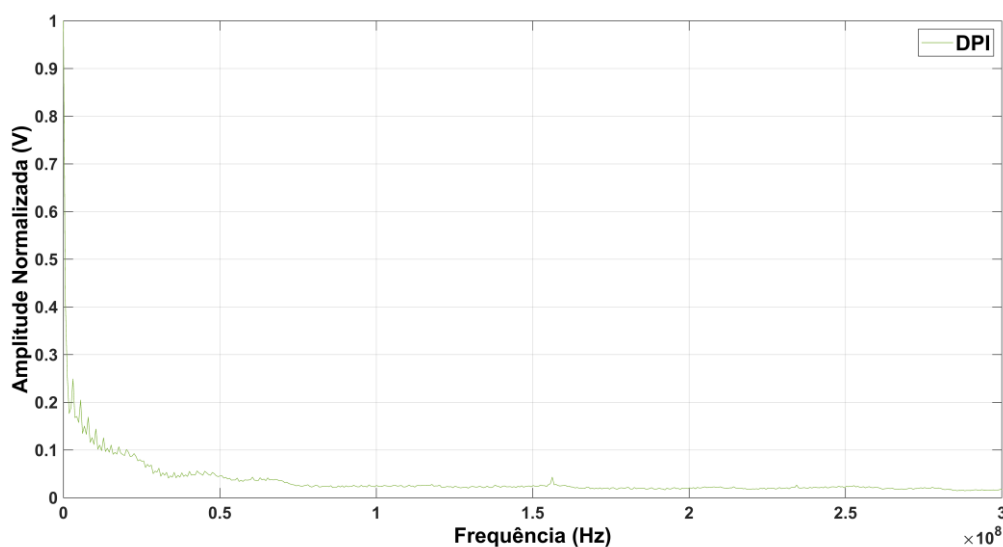
Para uma análise mais detalhada, tomou-se a média espectral do conjunto dos 200 sinais de cada tipo de falha estudada e dos 100 sinais do transformador operando sem falha, e normalizou-se os três resultados. São apresentados, nas Figuras 38, 39 e 40, os espectros de frequências médios de cada caso avaliado.

Figura 38 – Espectro médio da envoltória do sinal UHF de um arco elétrico.



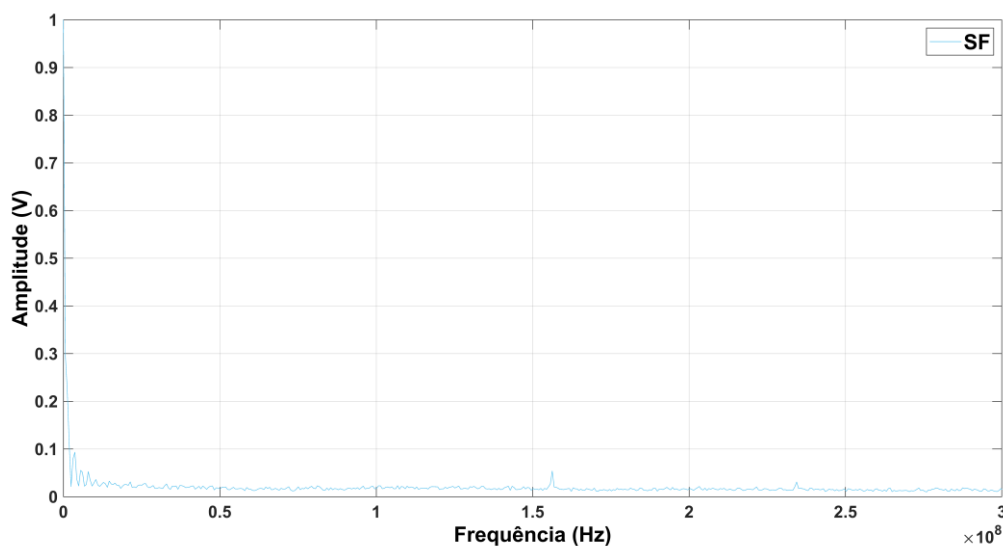
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 39 – Espectro médio da envoltória do sinal UHF de uma descarga parcial no isolador.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 40 – Espectro médio da envoltória do sinal UHF do transformador operando sem falha.



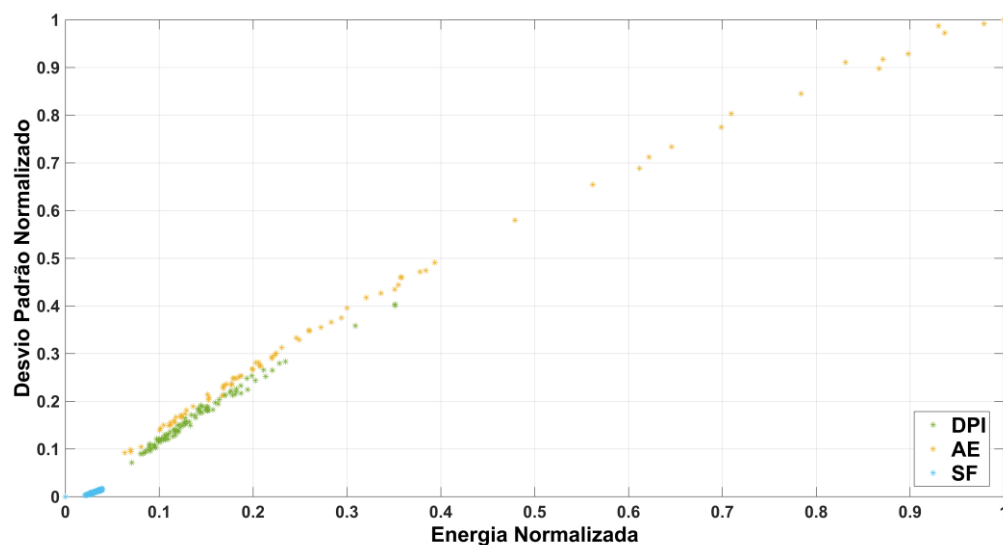
Fonte: Elaborado pela autora.

É representado, na Figura 38, que a maior parte da energia do espectro médio da envoltória do sinal UHF de um arco elétrico está concentrada nas frequências mais baixas, com um pico inicial significativo em 1,8 MHz. Após esse pico, há uma rápida diminuição na amplitude, com pequenas variações até cerca de 150 MHz, onde as

amplitudes tornam-se quase insignificantes. Na Figura 39, observa-se um padrão semelhante ao do arco elétrico, com a energia concentrada nas baixas frequências. No entanto, a amplitude inicial da descarga parcial no isolador é um pouco menor em comparação ao AE. A presença de picos nas baixas frequências indica a natureza impulsiva do sinal da descarga parcial no isolador. O pico inicial se localiza na faixa de 3 MHz, mas com menos energia em comparação ao arco elétrico. Os picos continuam em decaimento de amplitude até por volta de 60 MHz, onde começam a se tornar insignificantes, havendo, entretanto, um pico notável por volta de 156 MHz. Ilustra-se, na Figura 40, um caso típico de ruído branco gaussiano. Esse tipo de ruído é composto por componentes de frequência que possuem a mesma potência em toda a faixa de frequências, resultando em uma amplitude constante e homogênea no espectro. Esse comportamento é esperado em condições normais de operação, onde não há eventos impulsivos ou falhas que possam introduzir variações significativas no espectro de frequência.

Para a análise da combinação de estatísticas, efetuou-se o cruzamento de um conjunto de parâmetros estatísticos e espectrais após sua normalização, permitindo a comparação inicial entre duas e, e um segundo momento, entre três variáveis simultaneamente.

Figura 41 – Cruzamento entre Energia e Desvio Padrão, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



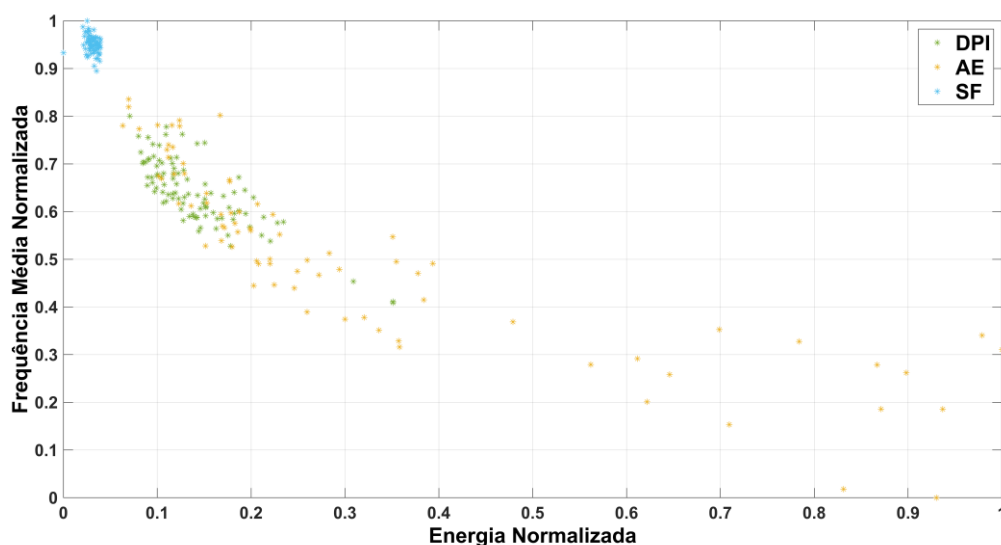
Fonte: Elaborado pela autora.

Ilustra-se, na Figura 41, o cruzamento entre Energia e Desvio Padrão. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,08 a 0,35, enquanto o Desvio Padrão variou de 0,07 a 0,41. No caso do arco elétrico, a Energia apresentou uma variação de 0,07 a 1, e o Desvio Padrão variou de 0,9 a 1. Em contraste, para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,038 e o Desvio Padrão de 0 a 0,017. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 8 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Desvio Padrão

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2101
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1907
Arco elétrico e operação sem falha	0,4006

Figura 42 – Cruzamento entre Energia e Frequência Média, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



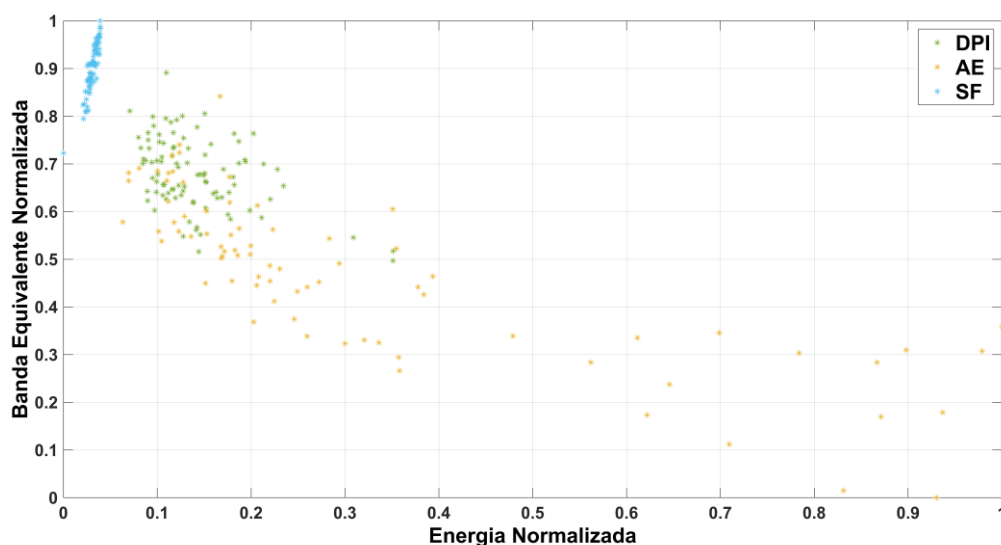
Fonte: Elaborado pela autora.

É apresentado, na Figura 42, o cruzamento entre Energia e Frequência Média. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,07 a 0,35, enquanto a Frequência Média variou de 0,41 a 0,80. No caso do arco elétrico, a Energia variou de 0,08 a 1, e a Frequência Média foi de 0 a 0,84. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,038 e a Frequência Média de 0,89 a 1. A seguir, são apresentadas as distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados:

Tabela 9 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1501
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3259
Arco elétrico e operação sem falha	0,4488

Figura 43 – Cruzamento entre Energia e Banda Equivalente, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



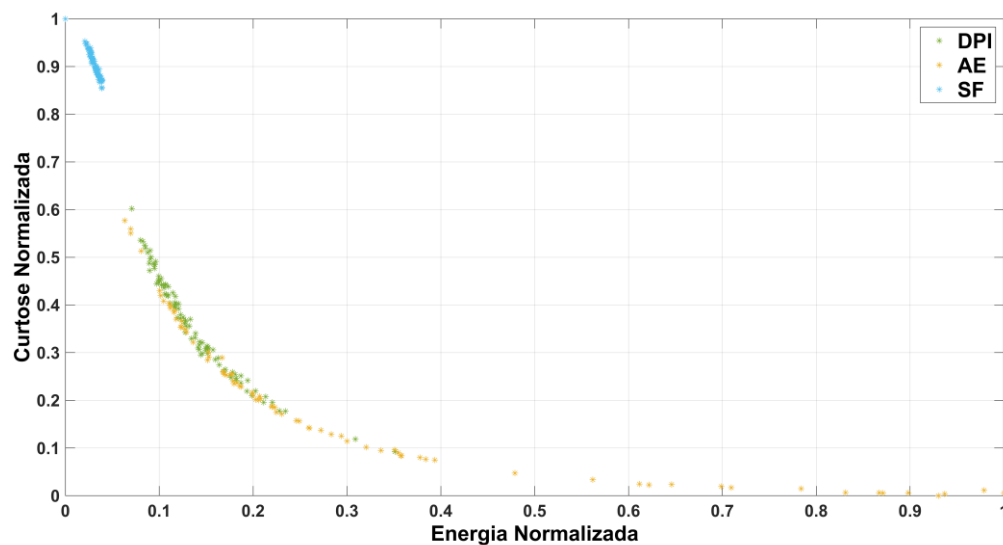
Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se na Figura 43 o cruzamento entre Energia e Banda Equivalente. Na descarga parcial no isolador, houve uma variação de Energia entre 0,08 e 0,35 e de Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89. No arco elétrico a variação de Energia foi de 0,06 a 1 e de Banda Equivalente foi de 0 a 0,84. Finalmente, para a operação sem falha, a Energia variou de 0 a 0,038 e a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam abaixo:

Tabela 10 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2042
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2543
Arco elétrico e operação sem falha	0,4547

Figura 44 – Cruzamento entre Energia e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



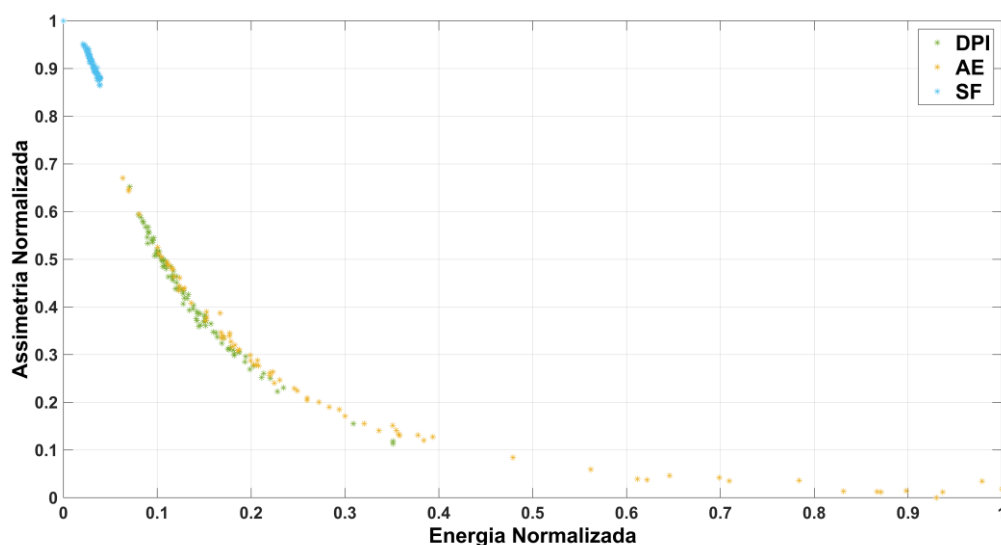
Fonte: Elaborado pela autora.

É apresentado, na Figura 44, o cruzamento entre Energia e Curtose. Pode-se observar que na descarga parcial no isolador houve uma variação de Energia entre 0,08 e 0,35 e de Curtose entre 0,11 e 0,61. No arco elétrico a variação de Energia observada foi de 0,07 a 1 e de Curtose de 0 a 0,58. Já para a operação sem falha, a Energia variou de 0 a 0,038 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam abaixo:

Tabela 11 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1731
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5460
Arco elétrico e operação sem falha	0,6905

Figura 45 – Cruzamento entre Energia e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



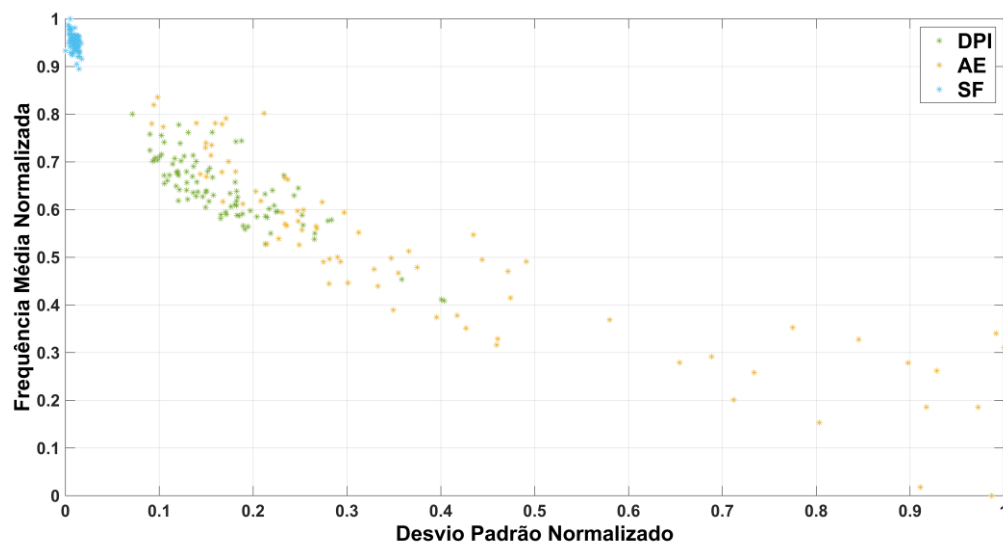
Fonte: Elaborado pela autora.

No cruzamento entre Energia e Assimetria, apresentado na Figura 45, observa-se que para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,07 a 0,35, enquanto a Assimetria variou de 0,11 a 0,66. No caso do arco elétrico, a Energia apresentou uma variação de 0,06 a 1, e a Assimetria variou de 0 a 0,68. Em contraste, para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,038 e a Assimetria de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados são apresentadas:

Tabela 12 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1655
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4944
Arco elétrico e operação sem falha	0,6299

Figura 46 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



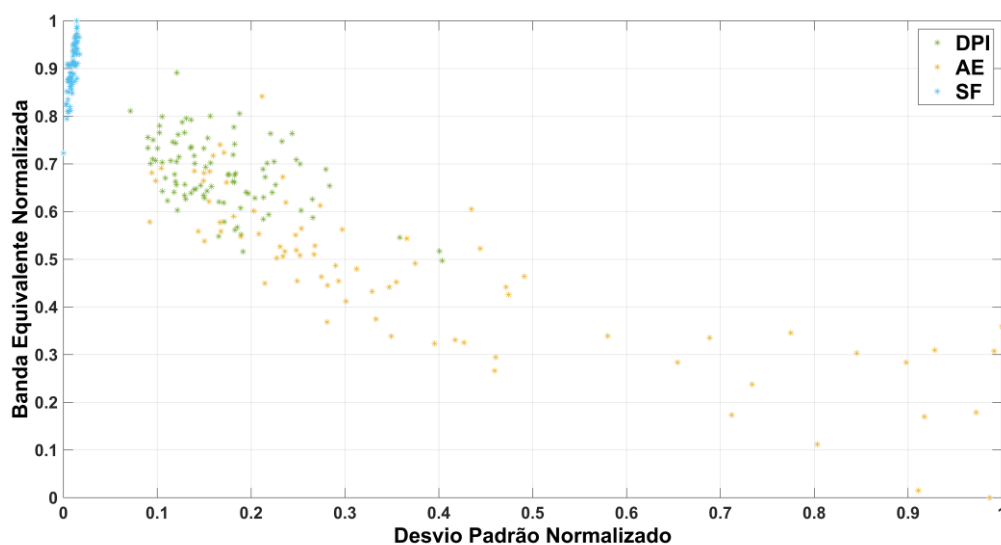
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 46 tem-se o cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média. Pode-se observar que na descarga parcial no isolador houve uma variação de Desvio Padrão entre 0,08 e 0,4 e de Frequência Média entre 0,4 e 0,8. No arco elétrico, a variação de Desvio Padrão observada foi de 0,08 a 1 e de Frequência Média de 0 a 0,83. Já para a operação sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,02 e a Frequência Média variou de 0,89 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam abaixo:

Tabela 13 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1787
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3451
Arco elétrico e operação sem falha	0,4965

Figura 47 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



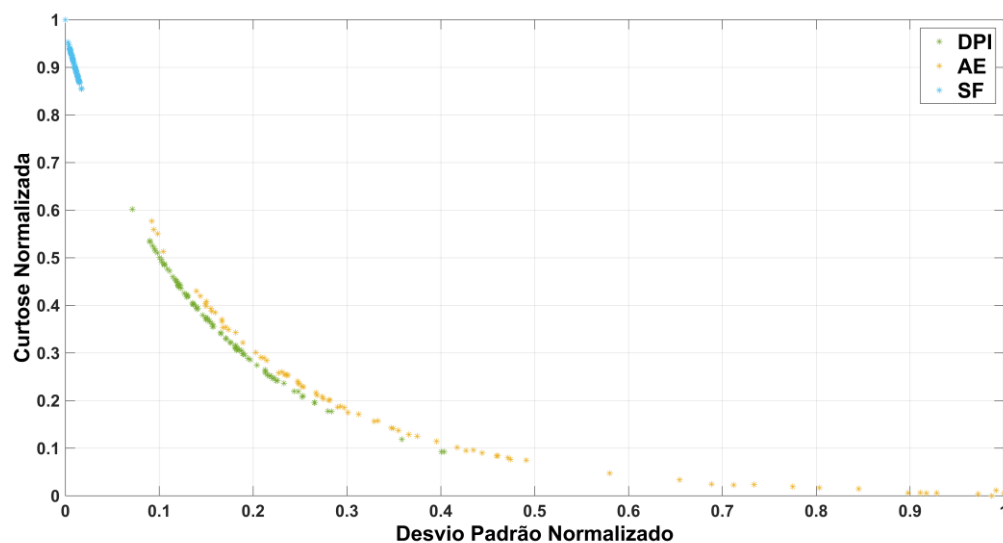
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 47 é apresentado o cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente. A descarga parcial no isolador variou no Desvio Padrão de 0,07 e 0,4 e na Banda Equivalente de 0,49 e 0,89. A variação do arco elétrico de Desvio Padrão foi de 0,09 a 1 e de Banda Equivalente de 0 a 0,84. Já para a operação sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,017 e a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 14 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2260
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2785
Arco elétrico e operação sem falha	0,5018

Figura 48 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



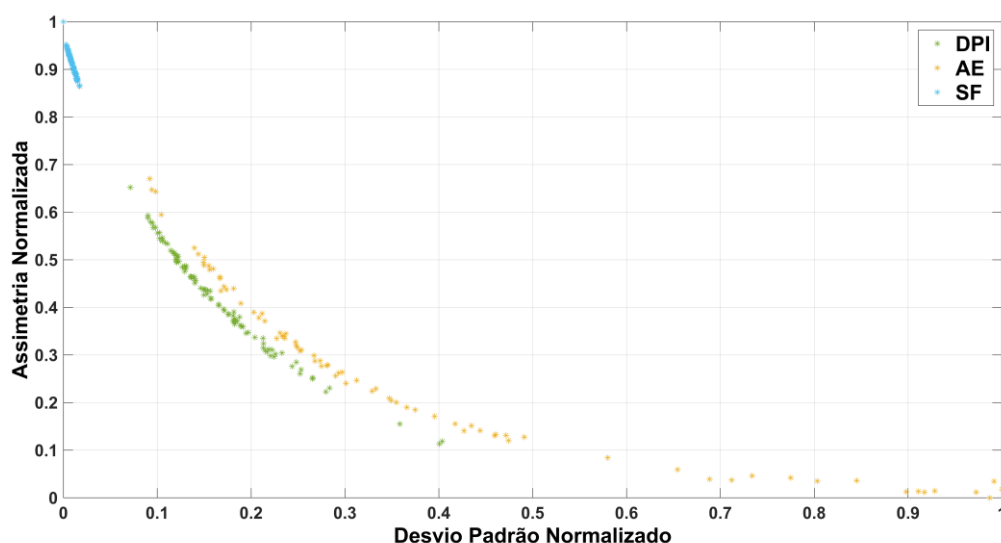
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 48 é apresentado o cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose. Houve variação da descarga parcial no isolador no Desvio Padrão entre 0,08 e 0,4 e na Curtose entre 0,09 e 0,6. O arco elétrico apresentou variação de Desvio Padrão de 0,9 a 0,4 e de Curtose de 0 a 0,58. A operação sem falha variou no Desvio Padrão de 0 a 0,017 e na Curtose de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 15 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1984
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5577
Arco elétrico e operação sem falha	0,7224

Figura 49 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



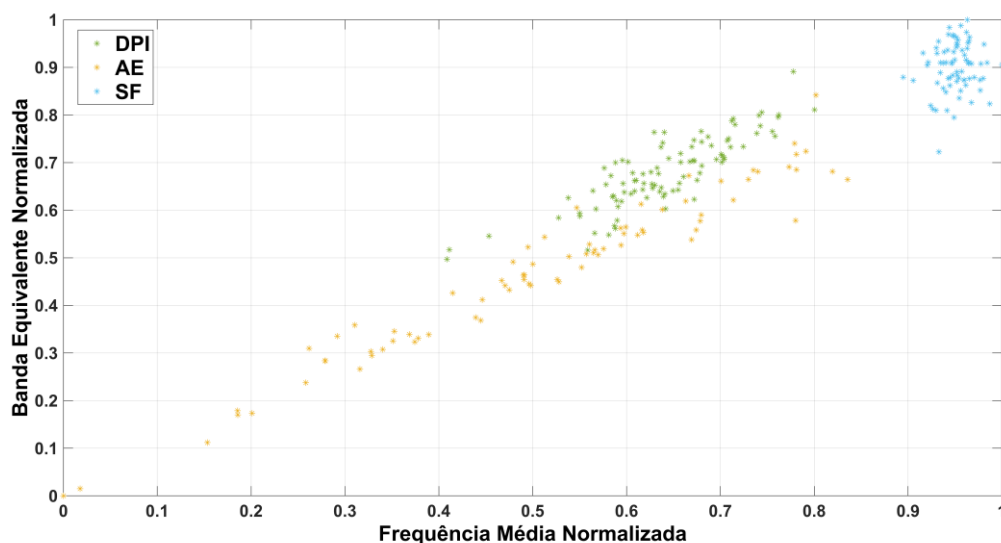
Fonte: Elaborado pela autora.

Ilustra-se, na Figura 49, o cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria. Houve variação da descarga parcial no isolador no Desvio Padrão entre 0,07 e 0,4 e na Assimetria entre 0,11 e 0,65. O arco elétrico apresentou variação de Desvio Padrão de 0,09 a 1 e de Assimetria de 0 a 0,89. A operação sem falha variou no Desvio Padrão de 0 a 0,017 e na Assimetria de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 16 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Assimetria.

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1918
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5072
Arco elétrico e operação sem falha	0,6647

Figura 50 – Cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



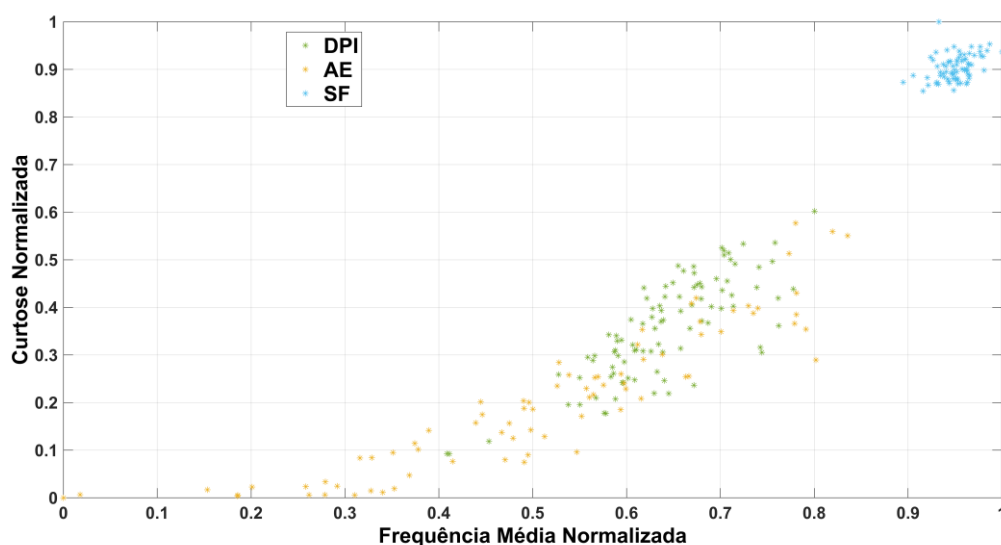
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 50 é apresentado o cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou de 0,41 a 0,8, enquanto a Banda Equivalente variou de 0,49 a 0,89. No caso do arco elétrico, a Frequência Média variou de 0 a 0,84, e a Banda Equivalente foi de 0 a 0,84. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,89 a 1 e a Banda Equivalente de 0,72 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 17 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Banda Equivalente.

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1717
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3839
Arco elétrico e operação sem falha	0,5411

Figura 51 – Cruzamento entre Frequência Média e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



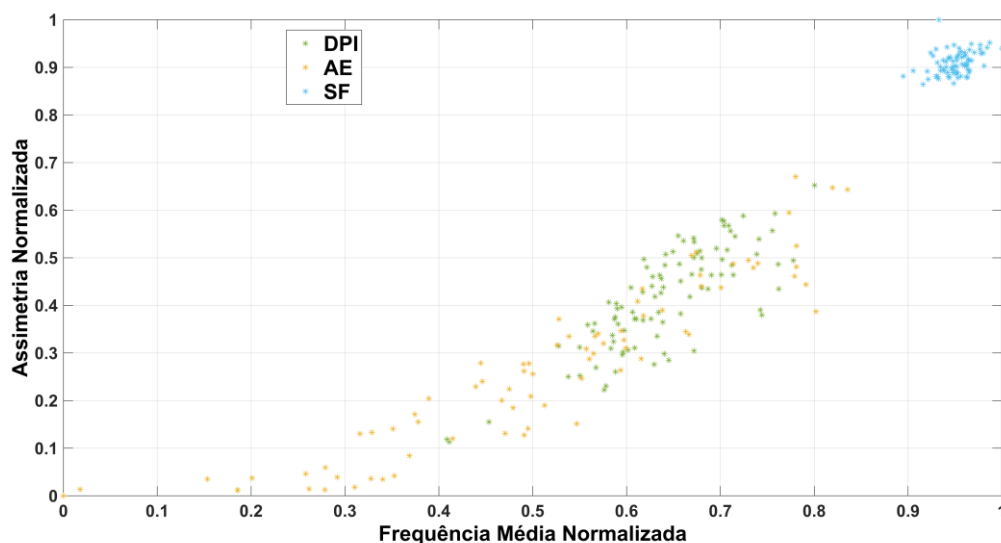
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 51 é apresentado o cruzamento entre Frequência Média e Curtose. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média apresentou variação de 0,42 a 0,80, enquanto a Curtose variou de 0,09 a 0,60. No caso do arco elétrico, a Frequência Média variou de 0 a 0,84, e a Curtose foi de 0 a 0,58. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,89 a 1 e a Curtose de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 18 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1332
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6171
Arco elétrico e operação sem falha	0,7502

Figura 52 – Cruzamento entre Frequência Média e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



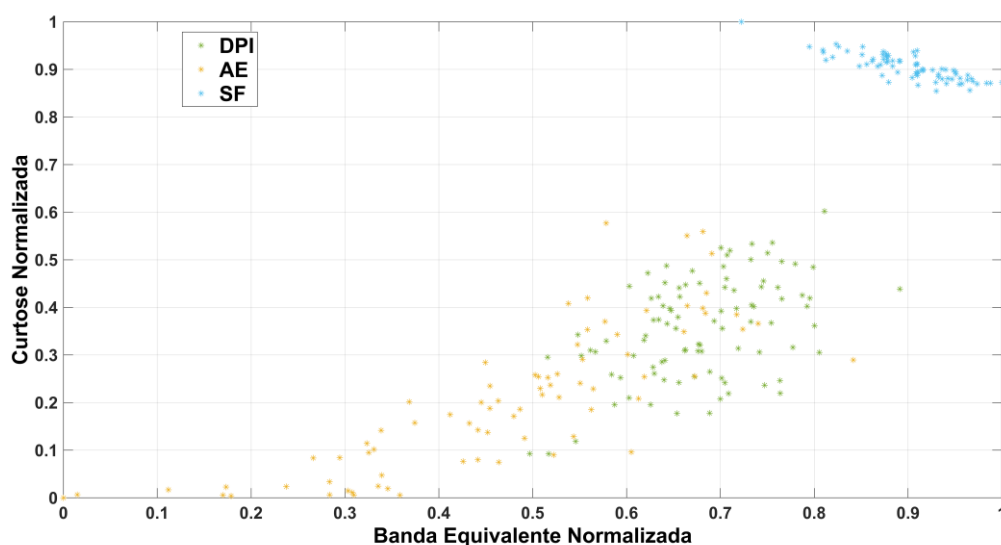
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 52, ilustra-se o cruzamento entre Frequência Média e Assimetria. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou entre 0,42 e 0,80, enquanto a Assimetria variou entre 0,11 e 0,65. No caso do arco elétrico, a Frequência Média variou entre 0 e 0,84, e a Assimetria entre 0 e 0,68. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Assimetria entre 0,86 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 19 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1231
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5719
Arco elétrico e operação sem falha	0,6949

Figura 53 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



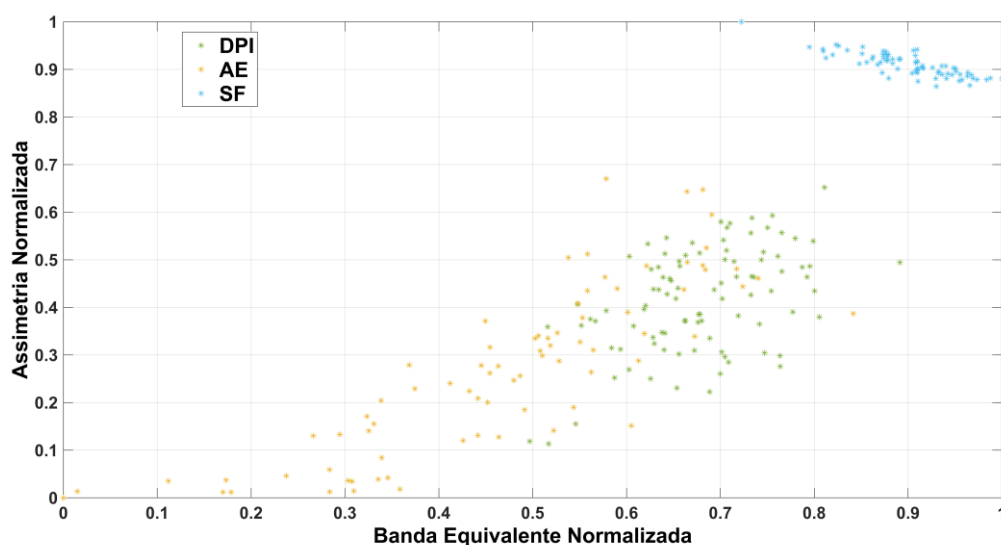
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 53 é apresentado o cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose. Para a descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente teve variação entre 0,49 e 0,89, enquanto a Curtose variou entre 0,09 e 0,60. No caso do arco elétrico, a Banda Equivalente variou entre 0 e 0,84, e a Curtose entre 0 e 0,58. Já para o transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1 e a Curtose de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 20 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1921
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5825
Arco elétrico e operação sem falha	0,7537

Figura 54 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



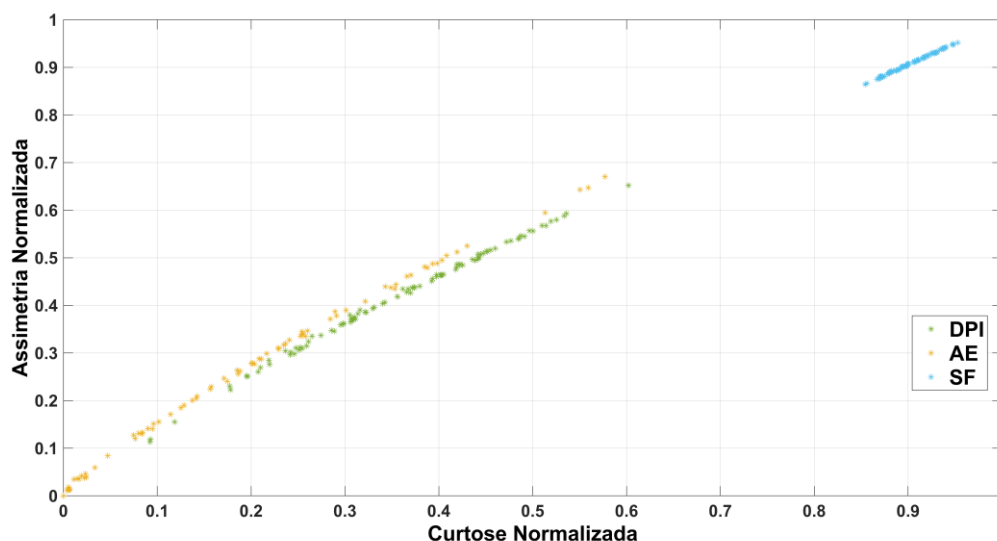
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria é apresentado na Figura 54. Para a descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente variou de 0,49 a 0,89, enquanto a Assimetria variou entre 0,11 e 0,65. Para o arco elétrico, a Banda Equivalente variou de 0 a 0,84, e a Assimetria de 0 a 0,68. Finalmente, para o transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1 e a Assimetria de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 21 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1853
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5344
Arco elétrico e operação sem falha	0,6987

Figura 55 – Cruzamento entre Curtose e Assimetria, ambos normalizados, para o sensoriamento UHF.



Fonte: Elaborado pela autora.

Finalmente, o cruzamento entre Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 55. Para a descarga parcial no isolador, a Curtose variou de 0,09 a 0,60, enquanto a Assimetria variou entre 0,11 e 0,65. Para o arco elétrico, a Curtose variou de 0 a 0,57, e a Assimetria de 0 a 0,67. Finalmente, para o transformador operando sem falha, a Curtose variou de 0,85 a 1 e a Assimetria de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

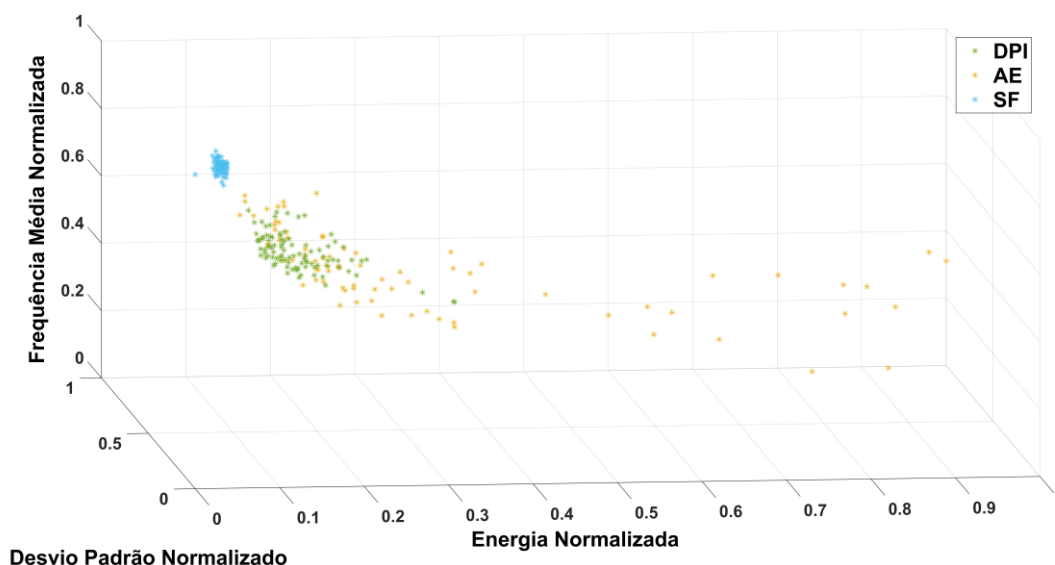
Tabela 22 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1503
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7205
Arco elétrico e operação sem falha	0,8707

Observa-se que todos os cruzamentos bidimensionais do sensoriamento UHF foram eficazes na distinção entre a presença e a ausência de falhas, pois o cluster correspondente aos dados do transformador operando sem falhas apresenta uma região bem delimitada e suficientemente afastada dos clusters associados às falhas.

No entanto, na classificação do tipo específico de falha, esse cruzamento de dados não foi eficiente, pois em todos os casos houve sobreposição de pontos entre a descarga parcial no isolador e o arco elétrico.

Figura 56 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento UHF.



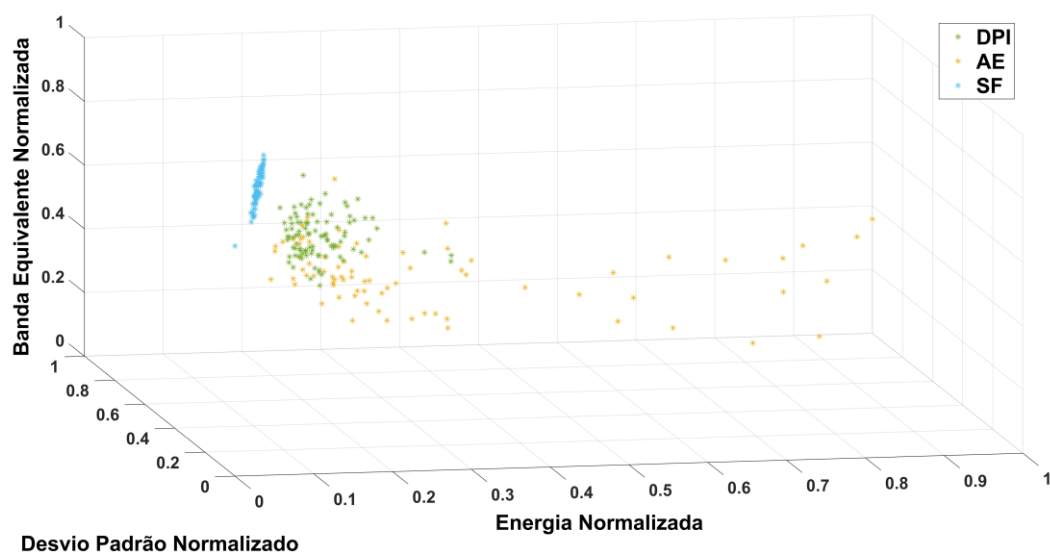
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média é ilustrado na Figura 56. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,12 a 0,35, o Desvio Padrão variou entre 0,08 e 0,40 e a Frequência Média variou de 0,40 a 0,8. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,12 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0,1 e 1, e a Frequência Média variou de 0 a 0,85. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, o Desvio Padrão variou entre 0 e 0,01 e a Frequência Média variou de 0,89 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 23 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2221
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3617
Arco elétrico e operação sem falha	0,5516

Figura 57 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento UHF.



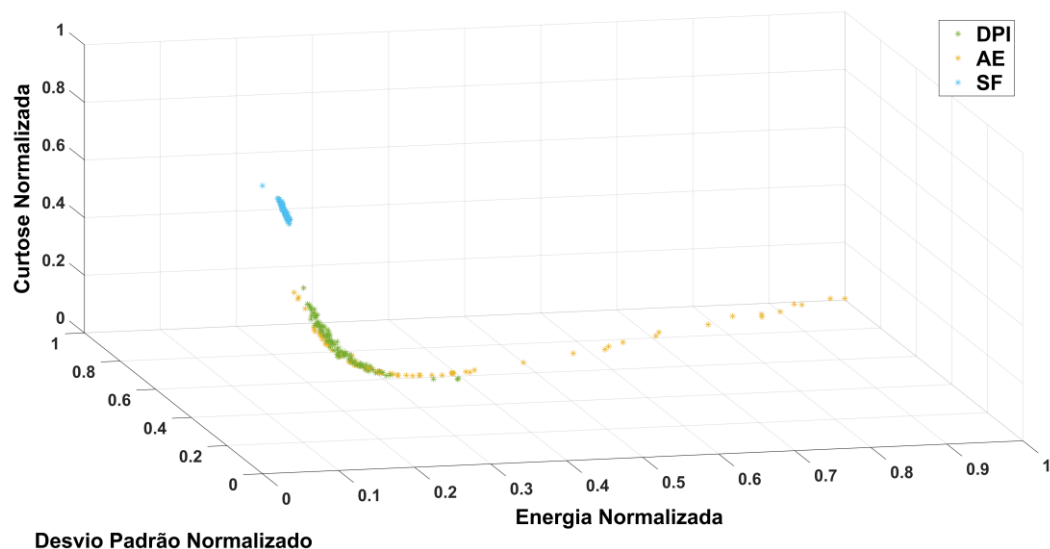
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 57. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Energia entre 0,07 e 0,35, do Desvio Padrão entre 0,07 e 0,40 e da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89. No arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,07 a 1, o Desvio Padrão de 0,09 a 1, e a Banda Equivalente de 0 a 0,84. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, o Desvio Padrão variou entre 0 e 0,01 e a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 24 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2617
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2989
Arco elétrico e operação sem falha	0,5563

Figura 58 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.



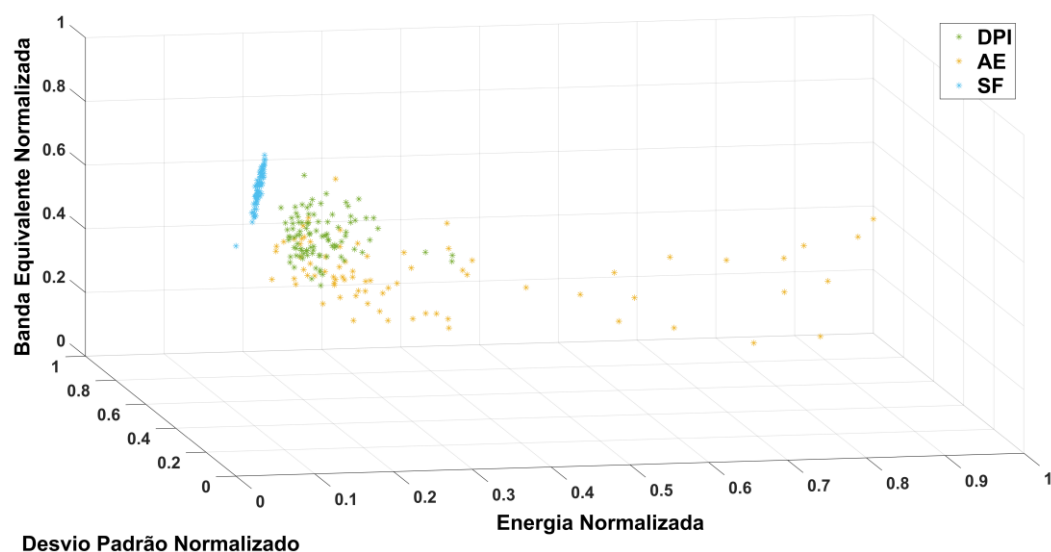
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 58 ilustra-se o cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose. Para a descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,07 a 0,35, o Desvio Padrão de 0,07 e 0,40 e a Curtose de 0,09 a 0,61. Para o arco elétrico, a Energia variou de 0,06 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0,09 e 1, e a Curtose variou de 0 a 0,58. Finalmente, para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 25 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2382
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5682
Arco elétrico e operação sem falha	0,7613

Figura 59 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



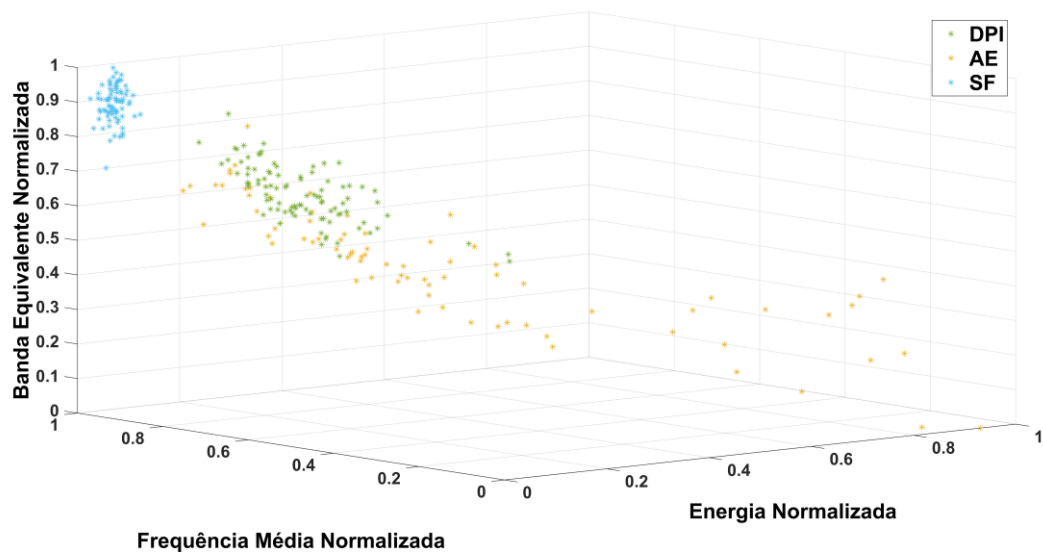
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria é ilustrado na Figura 59. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,06 a 0,35, o Desvio Padrão variou entre 0,07 e 0,40 e a Assimetria variou de 0,11 a 0,65. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,05 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0,09 e 1, e a Assimetria variou de 0 a 0,68. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, o Desvio Padrão variou entre 0 e 0,01 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 26 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2327
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5187
Arco elétrico e operação sem falha	0,7068

Figura 60 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento UHF.



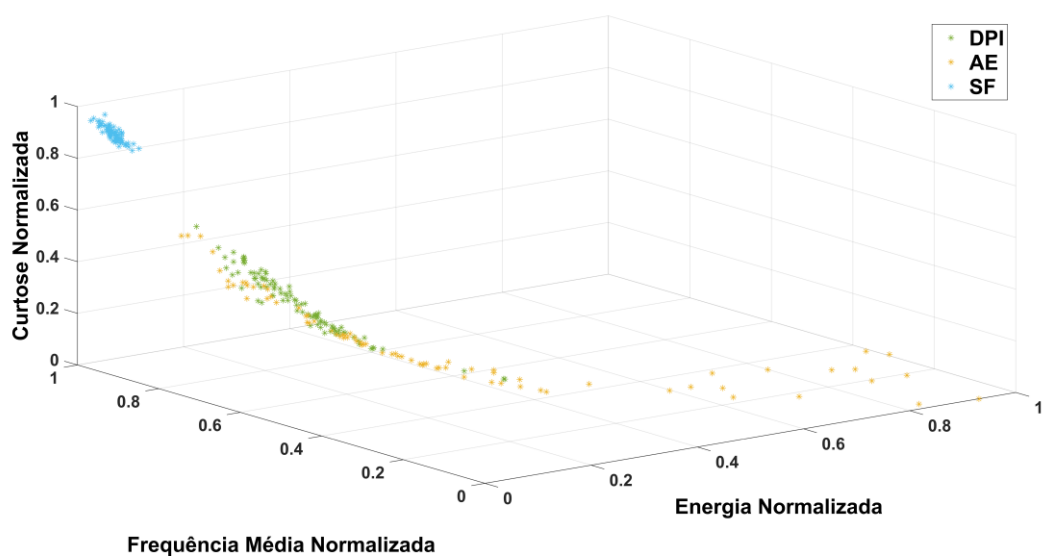
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente se apresenta na Figura 60. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Energia entre 0,07 e 0,35, da Frequência Média entre 0,40 e 0,80 e da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,81. No arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,06 a 1, a Frequência Média de 0 a 0,84, e a Banda Equivalente de 0 a 0,84. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 27 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2165
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3989
Arco elétrico e operação sem falha	0,5920

Figura 61 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.



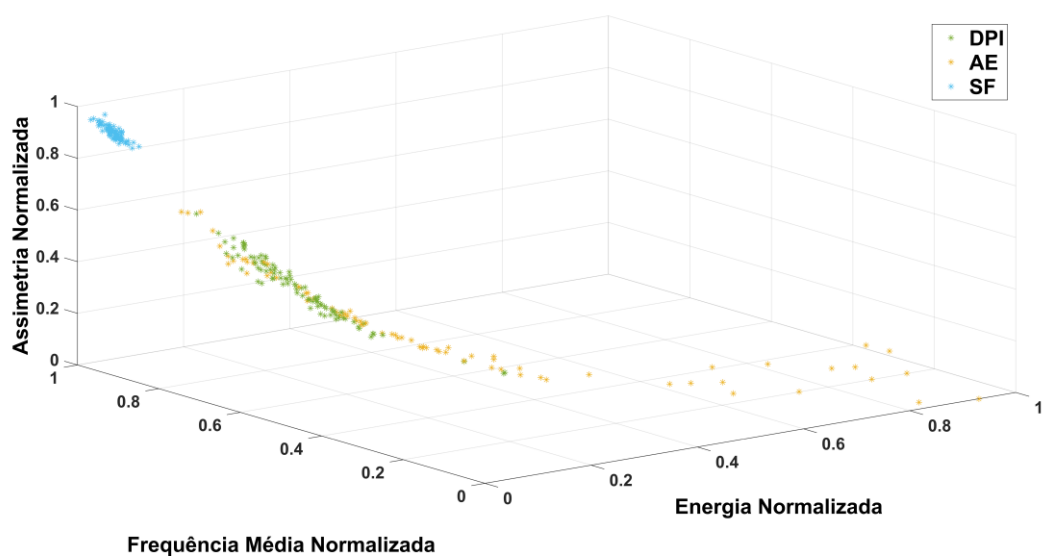
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 61. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Energia entre 0,08 e 0,35, da Frequência Média entre 0,40 e 0,80 e da Curtose entre 0,09 e 0,62. No arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,07 a 1, a Frequência Média de 0 a 0,84, e a Curtose de 0 a 0,59. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 28 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1874
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6266
Arco elétrico e operação sem falha	0,7877

Figura 62 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



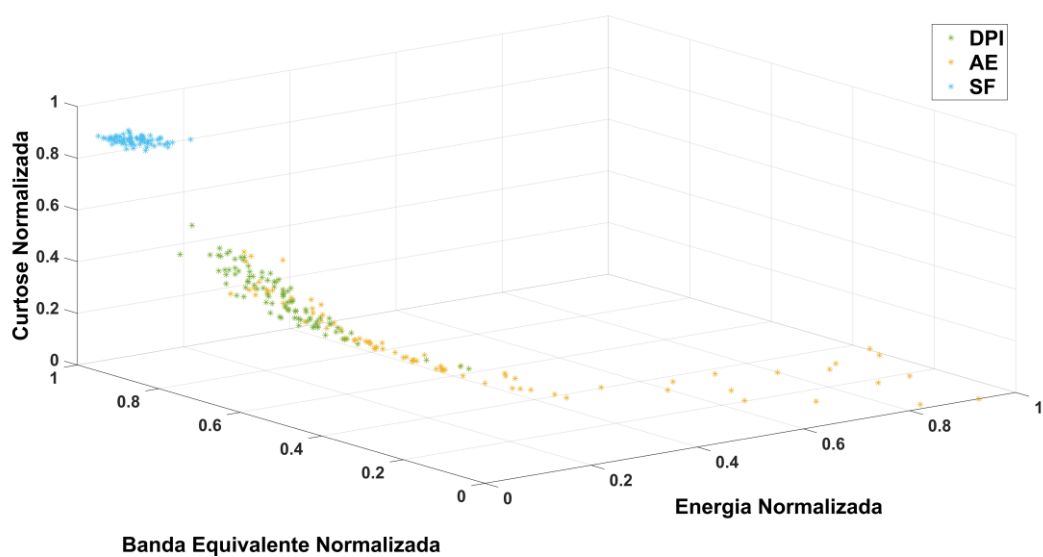
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria é ilustrado na Figura 62. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,07 a 0,35, a Frequência Média variou entre 0,40 e 0,80 e a Assimetria variou de 0,11 a 0,65. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,06 a 1, a Frequência Média variou entre 0 e 0,84, e a Assimetria variou de 0 a 0,67. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 29 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1804
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5821
Arco elétrico e operação sem falha	0,7352

Figura 63 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.



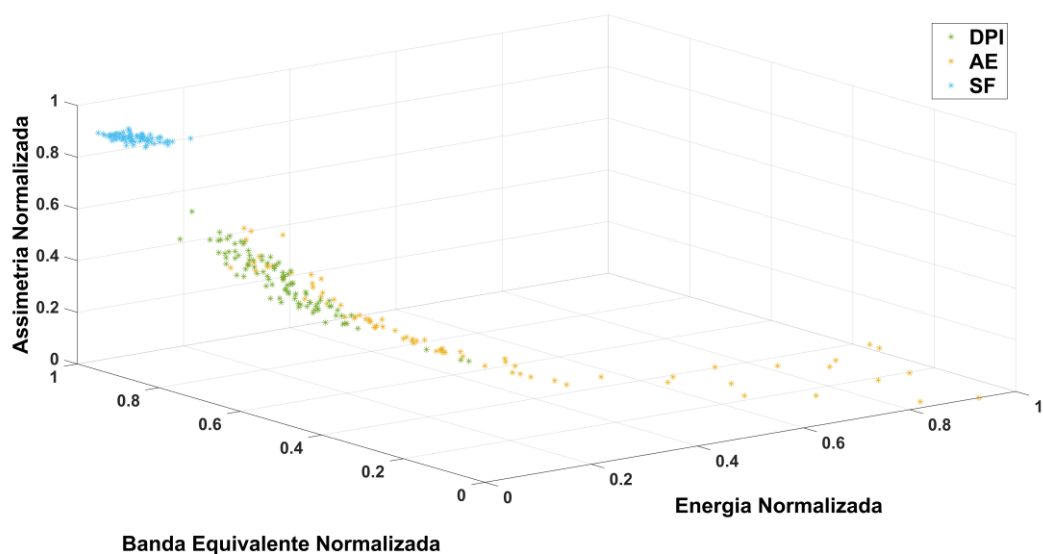
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 63. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Energia entre 0,07 e 0,35, da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89 e da Curtose entre 0,09 e 0,60. No arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,06 a 1, a Banda Equivalente de 0 a 0,84, e a Curtose de 0 a 0,58. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, a Banda Equivalente variou entre 0,72 e 1 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 30 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2330
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5925
Arco elétrico e operação sem falha	0,7911

Figura 64 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



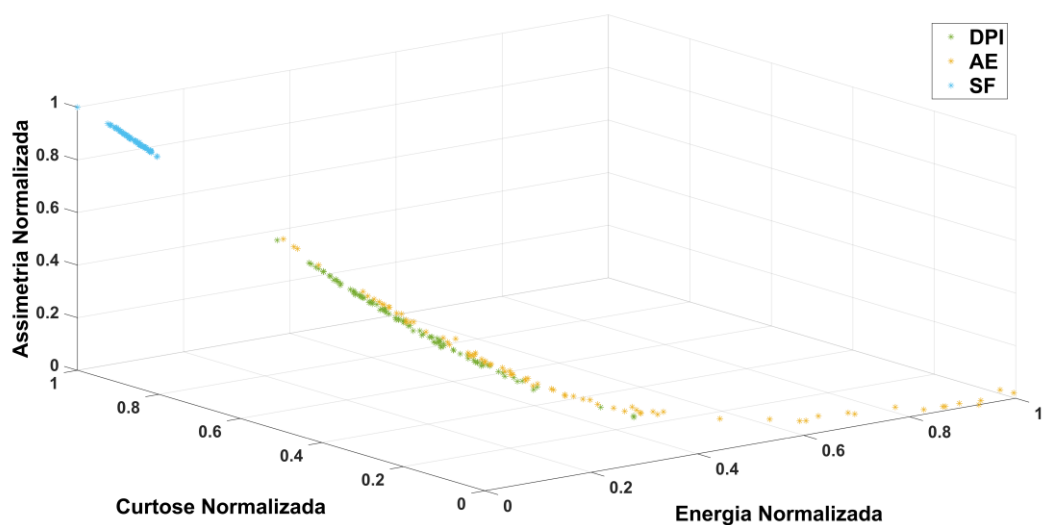
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 64. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Energia entre 0,07 e 0,35, da Frequência Média entre 0,49 e 0,89 e da Assimetria entre 0,11 e 0,65. No arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,06 a 1, a Frequência Média de 0 a 0,84, e a Assimetria de 0 a 0,67. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, a Frequência Média variou entre 0,72 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 31 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2274
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5453
Arco elétrico e operação sem falha	0,7388

Figura 65 – Cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



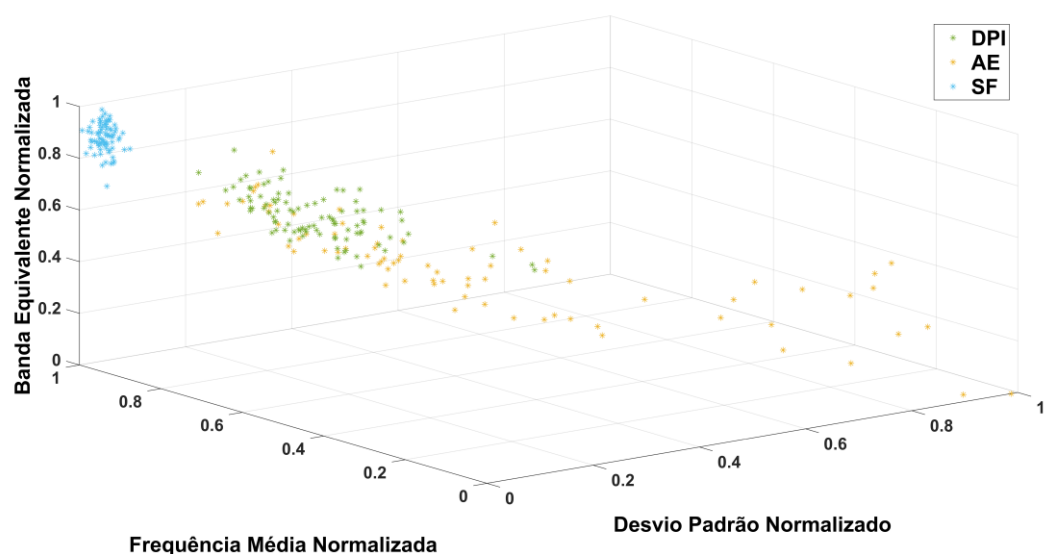
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 65. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,07 a 0,35, a Curtose variou entre 0,09 e 0,58 e a Assimetria variou de 0,11 a 0,58. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,06 a 1, a Curtose variou entre 0 e 0,56, e a Assimetria variou de 0 a 0,59. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 0,03, a Curtose variou entre 0,85 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 32 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1999
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7286
Arco elétrico e operação sem falha	0,9033

Figura 66 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento UHF.



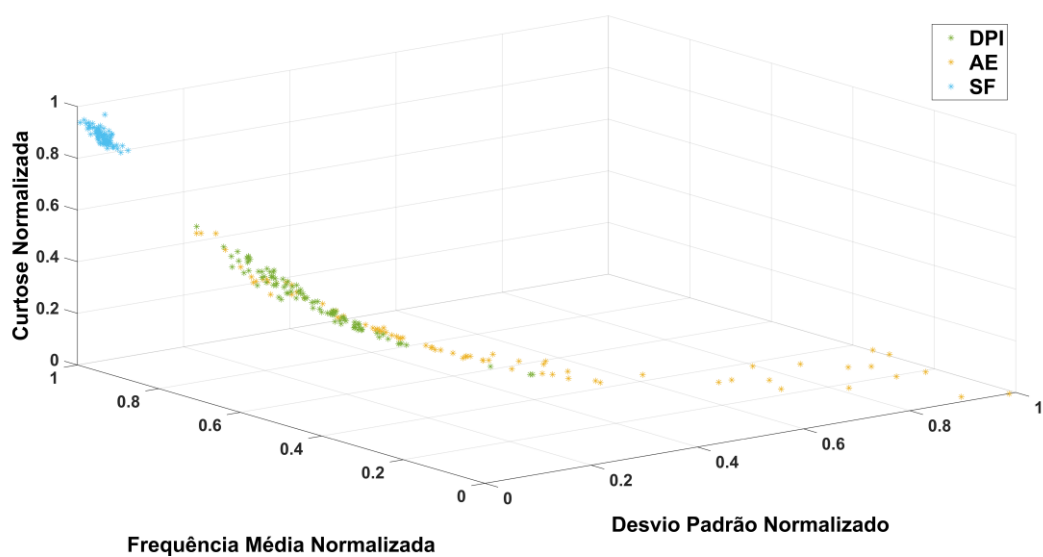
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente se apresenta na Figura 66. Na descarga parcial no isolador, houve variação do Desvio Padrão entre 0,07 e 0,40, da Frequência Média entre 0,40 e 0,82 e da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89. No arco elétrico o Desvio Padrão sofreu variação de 0,09 a 1, a Frequência Média de 0 a 0,85, e a Banda Equivalente de 0 a 0,84. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 33 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2372
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4148
Arco elétrico e operação sem falha	0,6289

Figura 67 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.



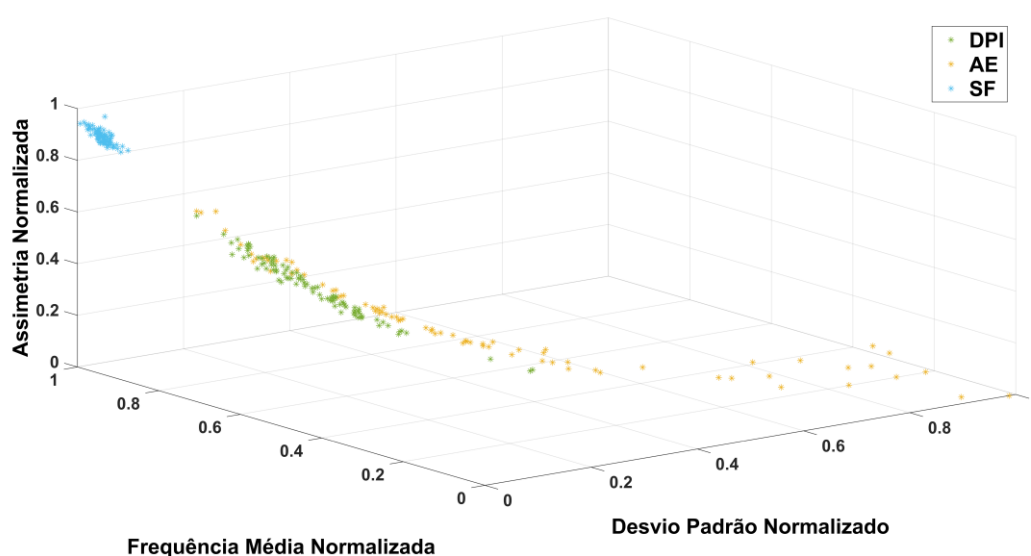
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 67. Na descarga parcial no isolador, houve variação do Desvio Padrão entre 0,08 e 0,40, da Frequência Média entre 0,40 e 0,80, e da Curtose entre 0,09 e 0,50. No arco elétrico o Desvio Padrão sofreu variação de 0,09 a 1, a Frequência Média de 0 a 0,84, e a Curtose de 0 a 0,49. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 34 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2110
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6368
Arco elétrico e operação sem falha	0,8158

Figura 68 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



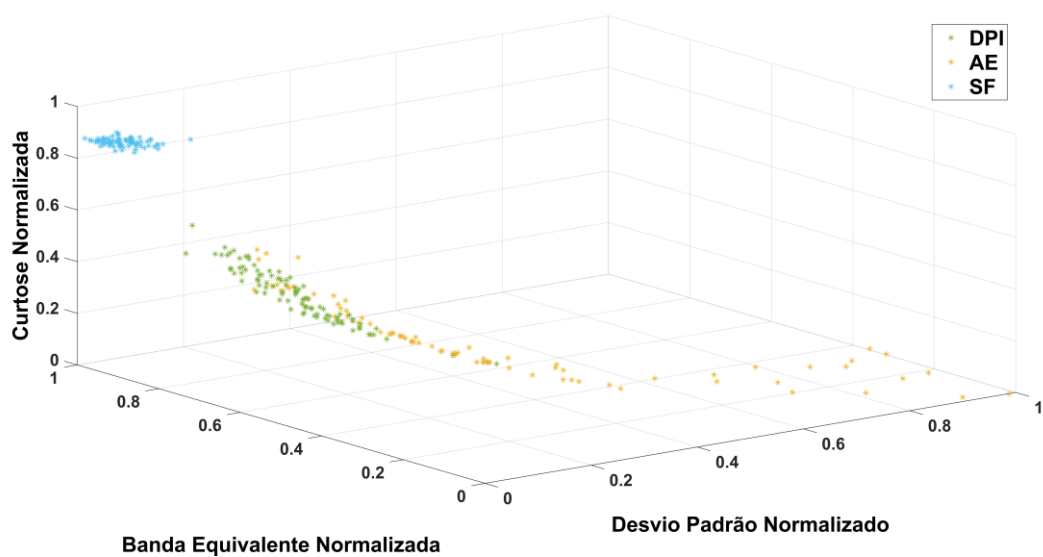
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria é ilustrado na Figura 68. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,07 a 0,40, a Frequência Média variou entre 0,40 e 0,80 e a Assimetria variou de 0,11 a 0,65. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,09 a 1, a Frequência Média variou entre 0 e 0,84, e a Assimetria variou de 0 a 0,67. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01, a Frequência Média variou entre 0,89 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 35 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2048
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5931
Arco elétrico e operação sem falha	0,7653

Figura 69 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.



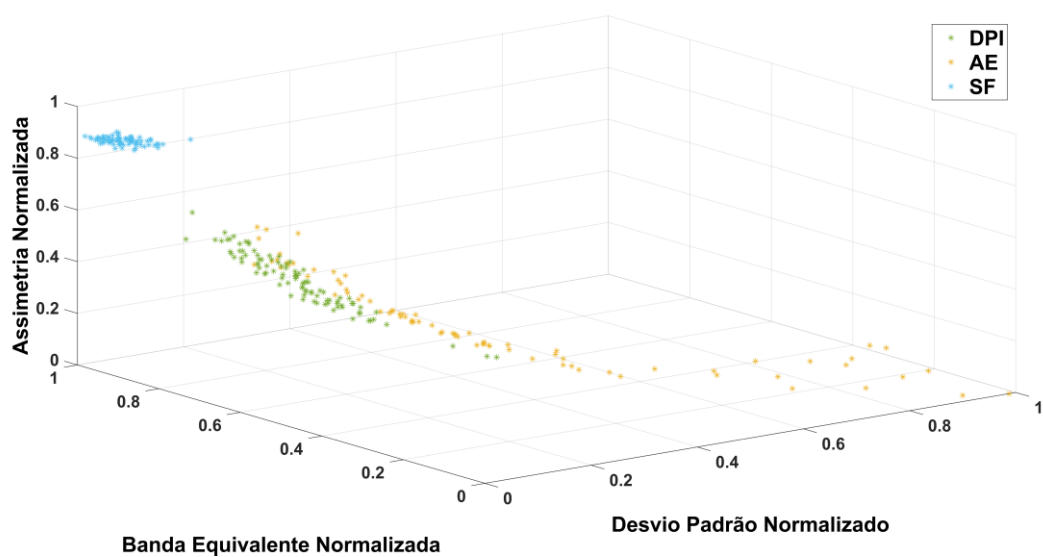
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 69. Na descarga parcial no isolador, houve variação do Desvio Padrão entre 0,08 e 0,40, da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89 e da Curtose entre 0,09 e 0,60. No arco elétrico o Desvio Padrão sofreu variação de 0,09 a 1, a Banda Equivalente de 0 a 0,84, e a Curtose de 0 a 0,58. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01, a Banda Equivalente variou entre 0,72 e 1 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 36 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2524
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6033
Arco elétrico e operação sem falha	0,8191

Figura 70 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



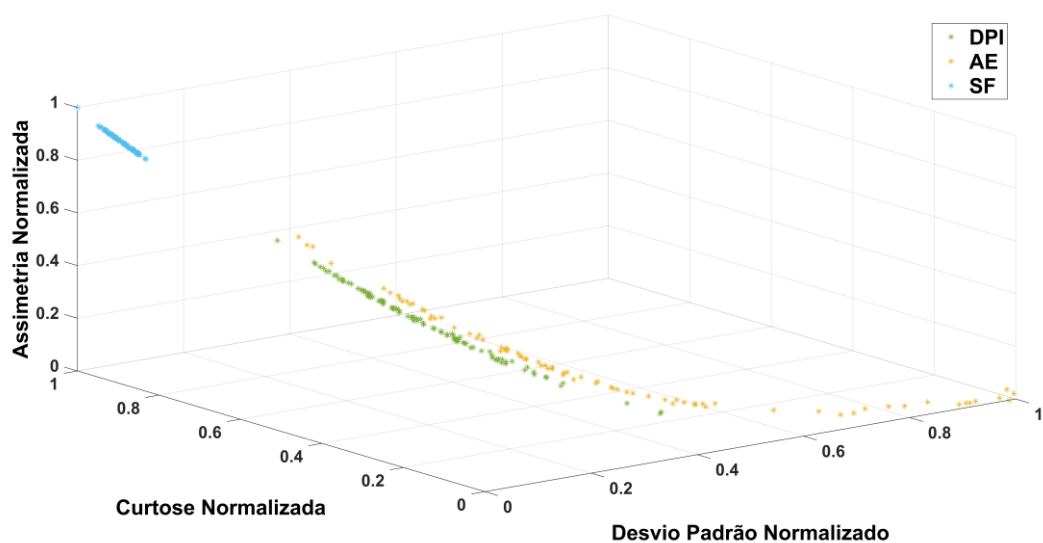
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 70. Na descarga parcial no isolador, houve variação do Desvio Padrão entre 0,08 e 0,40, da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89, e da Assimetria entre 0,11 e 0,67. No arco elétrico o Desvio Padrão sofreu variação de 0,09 a 1, a Banda Equivalente de 0 a 0,84, e a Assimetria de 0 a 0,69. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01, a Banda Equivalente variou entre 0,72 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 37 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2472
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5570
Arco elétrico e operação sem falha	0,7687

Figura 71 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



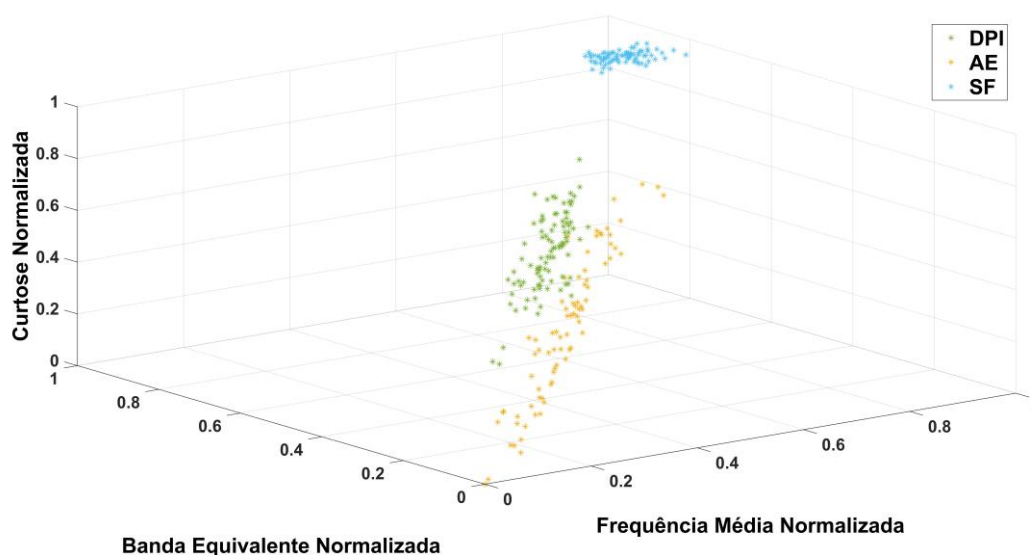
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 71. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,08 a 0,40, a Curtose variou entre 0,09 e 0,59 e a Assimetria variou de 0,11 a 0,68. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,09 a 1, a Curtose variou entre 0 e 0,57, e a Assimetria variou de 0 a 0,67. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 0,01, a Curtose variou entre 0,85 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 38 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2222
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7374
Arco elétrico e operação sem falha	0,9279

Figura 72 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento UHF.



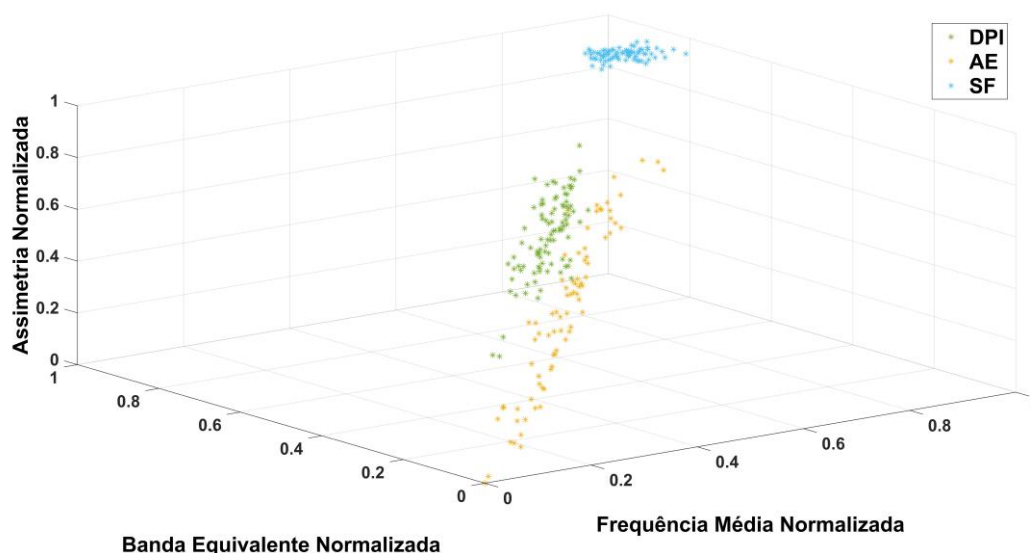
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 72. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Frequência Média entre 0,40 e 0,80, da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89 e da Curtose entre 0,09 e 0,60. No arco elétrico a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,84, a Banda Equivalente de 0 a 0,84, e a Curtose de 0 a 0,58. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,89 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,72 e 1 e a Curtose variou de 0,85 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 39 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2051
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6586
Arco elétrico e operação sem falha	0,8437

Figura 73 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



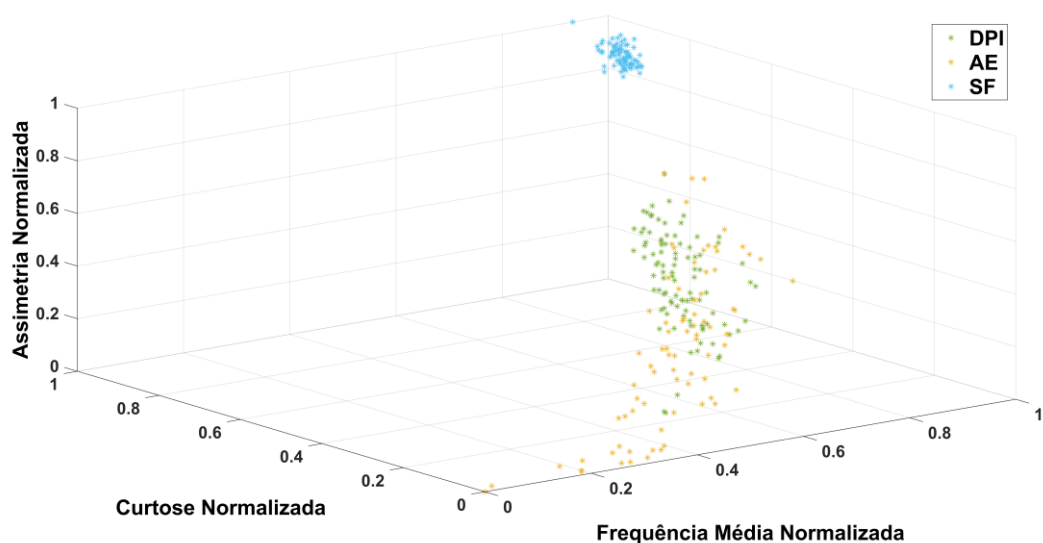
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 73. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Frequência Média entre 0,40 e 0,80, da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89, e da Assimetria entre 0,11 e 0,65. No arco elétrico a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,84, a Banda Equivalente de 0 a 0,84, e a Assimetria de 0 a 0,66. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,89 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,72 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 40 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1987
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6165
Arco elétrico e operação sem falha	0,7949

Figura 74 – Cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



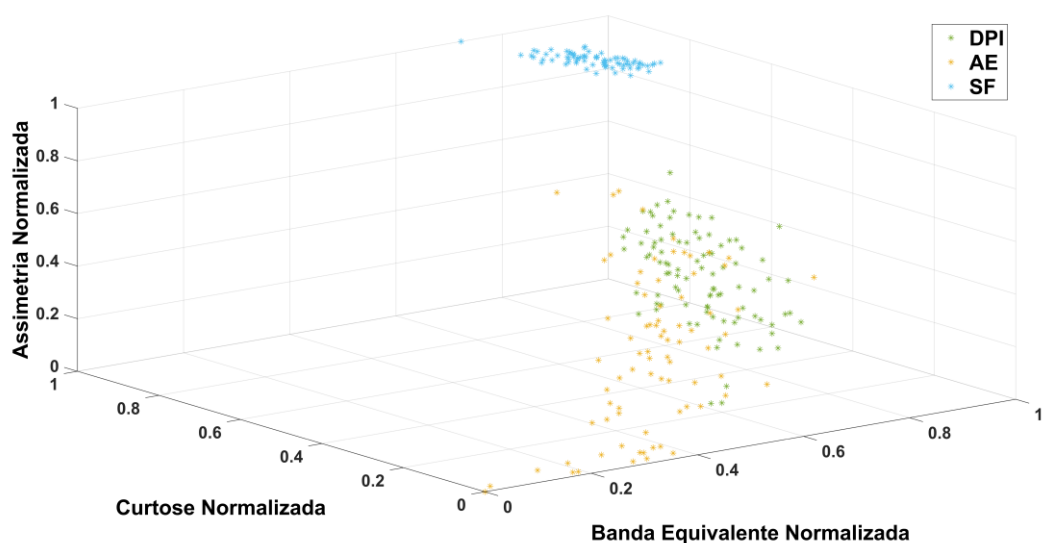
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 74. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou de 0,40 a 0,80, a Curtose variou entre 0,09 e 0,60 e a Assimetria variou de 0,11 a 0,67. Para o arco elétrico a Frequência Média variou de 0 a 0,84, a Curtose variou entre 0 e 0,57, e a Assimetria variou de 0 a 0,69. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,89 a 1, a Curtose variou entre 0,85 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 41 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1666
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7833
Arco elétrico e operação sem falha	0,9497

Figura 75 – Cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento UHF.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria se apresenta na Figura 75. Na descarga parcial no isolador, houve variação da Banda Equivalente entre 0,49 e 0,89, da Curtose entre 0,09 e 0,60 e da Assimetria entre 0,11 e 0,68. No arco elétrico a Banda Equivalente sofreu variação de 0 a 0,84, a Curtose de 0 a 0,57, e a Assimetria de 0 a 0,69. No transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,72 a 1, a Curtose variou entre 0,85 e 1 e a Assimetria variou de 0,86 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 42 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria

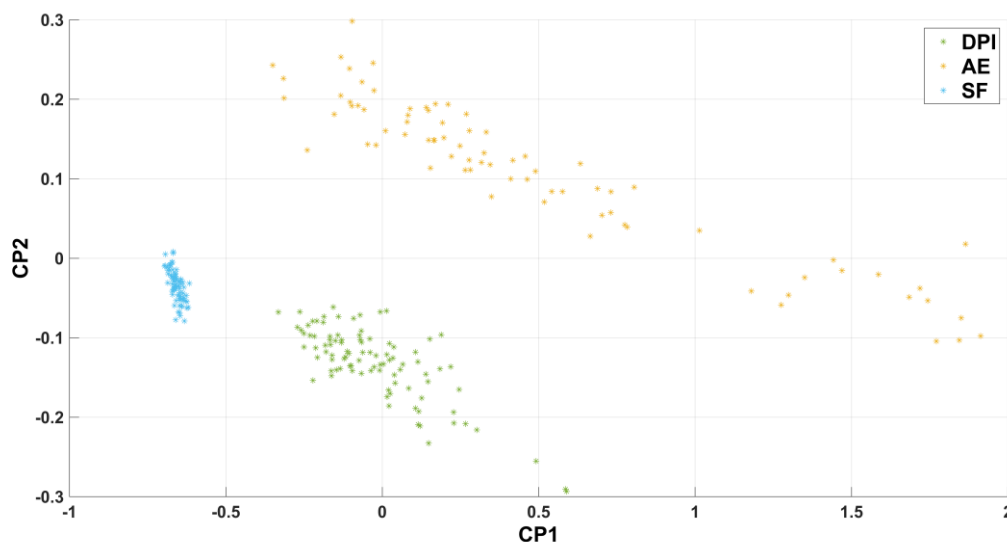
Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2166
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7563
Arco elétrico e operação sem falha	0,9525

Observa-se que, assim como os cruzamentos em duas dimensões, todos os cruzamentos em três dimensões apresentados foram eficazes na diferenciação entre a presença ou ausência de descargas. O cluster formado pelos dados do transformador operando sem falhas apresenta uma região bem definida e suficientemente distante dos clusters que representam as falhas. No entanto, para a classificação do tipo de falha ocorrida, esse cruzamento de dados não se mostrou eficiente, uma vez que, em todos os casos, houve uma interposição de pontos entre a descarga parcial no isolador e o arco elétrico.

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada à matriz de espectros. Com as componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2), foi gerado um mapa bidimensional para classificar as três condições analisadas neste trabalho. Na Figura 76 é apresentada a ACP para o sinal UHF, aplicada à matriz da Transformada de Fourier normalizada. Nota-se que a combinação entre a CP1 e a CP2 não apenas identificou a ocorrência de falhas, mas também se mostrou eficaz na sua classificação, resultando em três regiões distintas que caracterizam a descarga parcial no isolador, o arco elétrico e o transformador operando sem falhas. Para as descargas parciais no isolador, a componente principal 1 variou de -0,33 a 0,52 e a componente principal 2 de -0,29 a -0,06. Para o arco elétrico, a CP1 variou entre -0,35 e 1,91 e a CP2 entre -0,1 e 0,29. Finalmente, para o transformador operando sem falhas, a CP1 apresentou variação de -0,69 a -0,61 e a CP2 variou de -0,07 a 0,10. As distâncias euclidianas

são apresentadas na Tabela 43.

Figura 76 – Cruzamento entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, para o sensoriamento UHF.



Fonte: Elaborado pela autora.

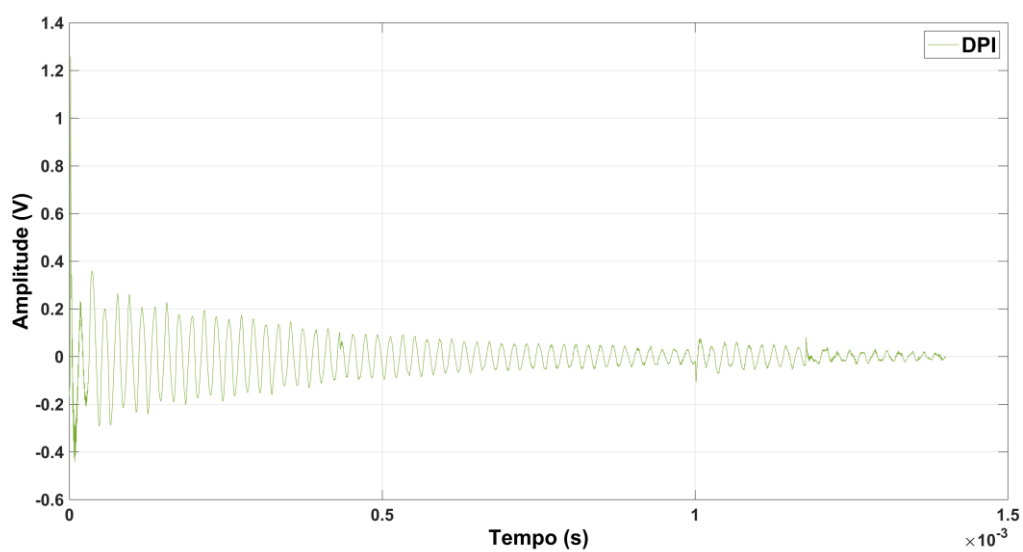
Tabela 43 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Análise de Componentes Principais

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4886
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6299
Arco elétrico e operação sem falha	1,0419

6.1.2 Sensoriamento por Emissão Acústica

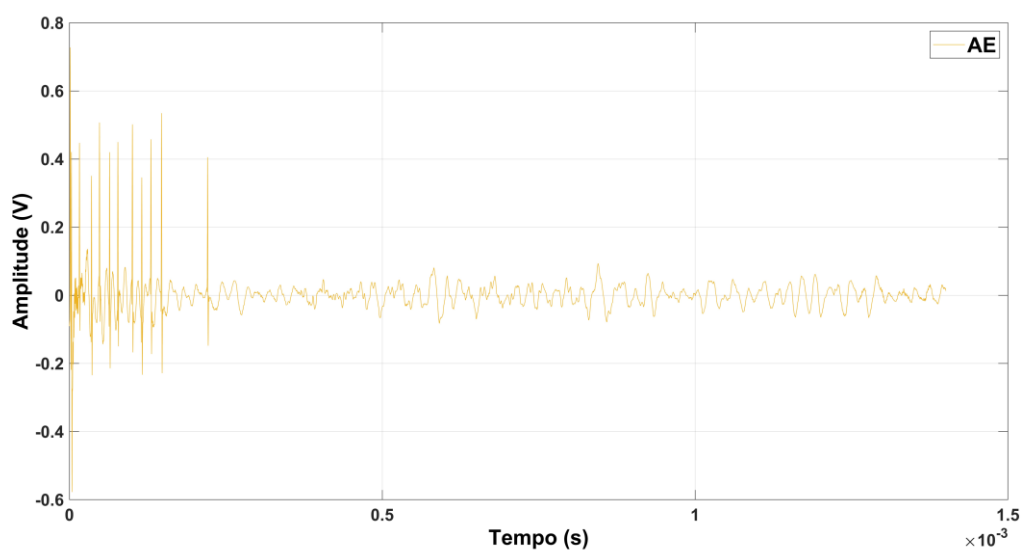
São apresentadas, nas Figuras 77, 78 e 79, amostras de sinal acústico no domínio do tempo do transformador operando com uma descarga parcial no isolador, com um arco elétrico e operando sem falhas, respectivamente.

Figura 77 – Amostra de um sinal acústico no domínio do tempo de uma descarga parcial no isolador.



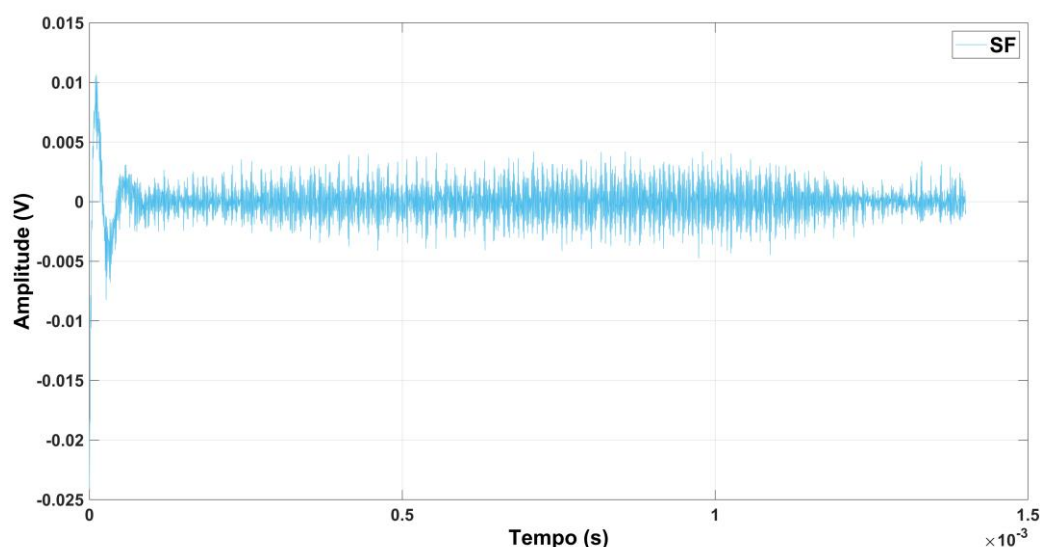
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 78 – Amostra de um sinal acústico no domínio do tempo de um arco elétrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 79 – Amostra de um sinal acústico no domínio do tempo do transformador operando sem falha.



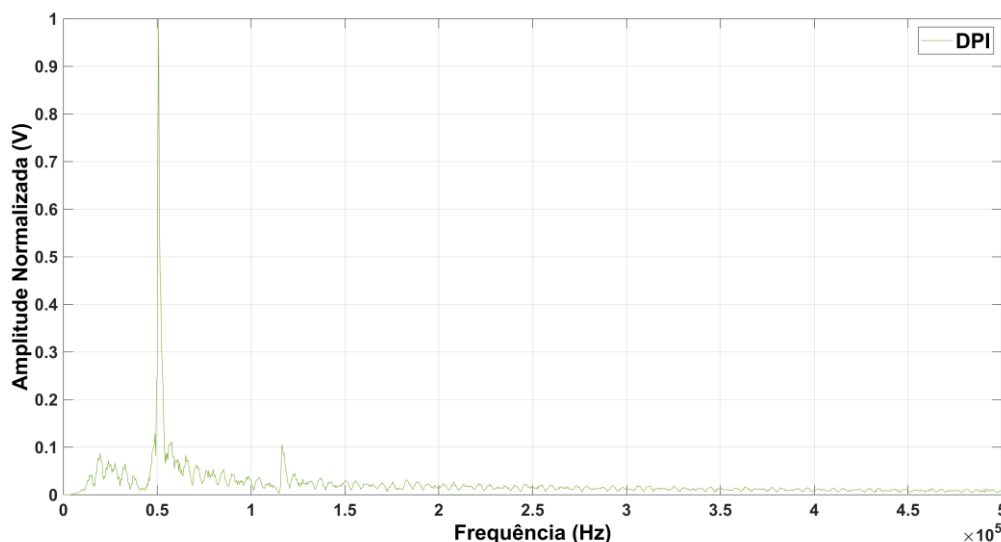
Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os sinais no domínio do tempo, observa-se que o sinal de descarga parcial no isolador (DPI) apresenta um sinal de caráter impulsivo com amplitudes que variam entre aproximadamente -0,42 V e 0,35 V. Há uma variação significativa na amplitude ao longo do tempo, especialmente nos primeiros 500 μ s, indicando a presença de eventos de alta energia. O gráfico correspondente ao arco elétrico mostra um sinal de maior amplitude, que varia entre -0,2 V e 0,52 V e possui duração de aproximadamente 250 μ s. Após esse período, a amplitude do sinal decresce e se torna mais estável, embora ainda esteja presente um certo nível de ruído. Já o sinal do transformador operando sem falhas apresenta amplitude relativamente baixa, com oscilações menores e menos pronunciadas em comparação com os outros dois gráficos. A amplitude se mantém dentro de um intervalo mais estreito, variando de aproximadamente -0,004 V a 0,004 V. O sinal é mais uniforme e regular.

Os conteúdos espectrais dos três casos estudados são apresentados nas

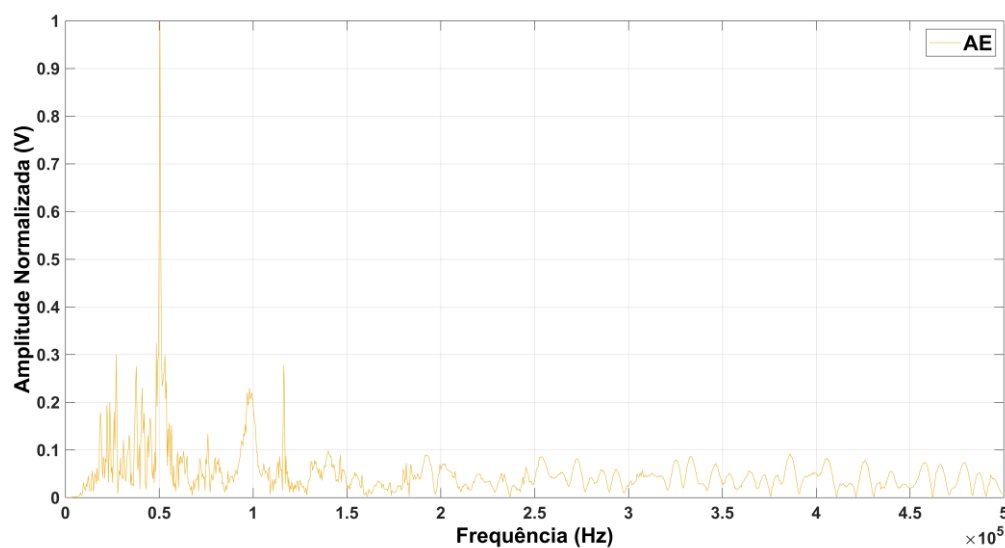
Figuras 80, 81 e 82, utilizando uma amostra de cada caso e normalizando os resultados. Na descarga parcial no isolador, observam-se um pico na frequência de 50 kHz. No arco elétrico, o pico também ocorre na frequência de 50 kHz. O espectro de frequência da descarga parcial no isolador é significativo entre 1,9 kHz e 11,6 kHz, enquanto o arco elétrico apresenta um espectro de frequência significativo entre 1,8 kHz e 11,6 kHz, porém exibindo amplitudes superiores à descarga parcial no isolador. Quando o transformador opera sem falhas, o espectro de frequência apresenta uma diminuição gradual da magnitude à medida que a frequência aumenta, característico de um ruído rosa. Diferente do ruído branco, que apresenta uma magnitude aproximadamente constante em todas as frequências, o ruído rosa caracteriza-se por um decaimento de magnitude que segue uma relação de $1/f$, onde f é a frequência de amostragem.

Figura 80 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal acústico de uma descarga parcial no isolador.



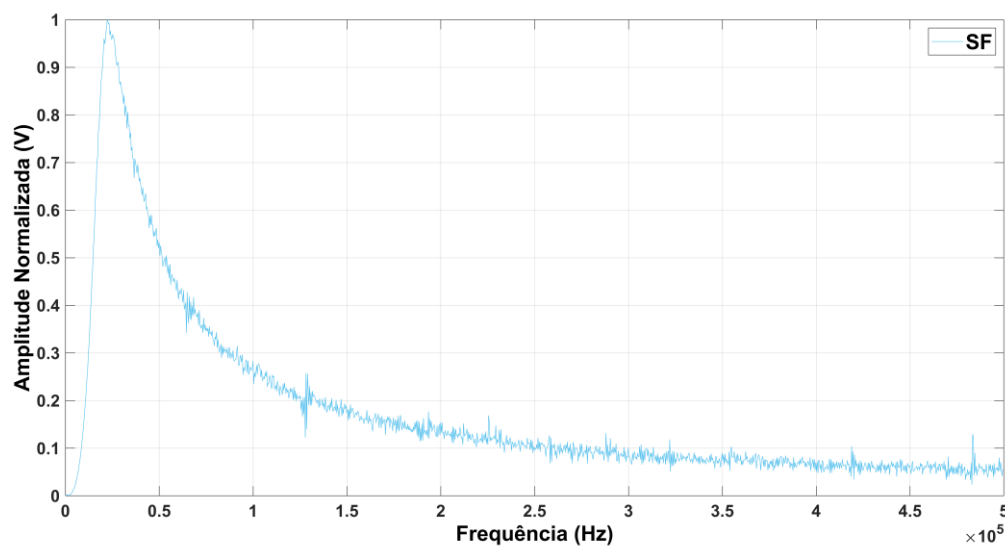
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 81 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal acústico de um arco elétrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 82 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal acústico do transformador operando sem falha.

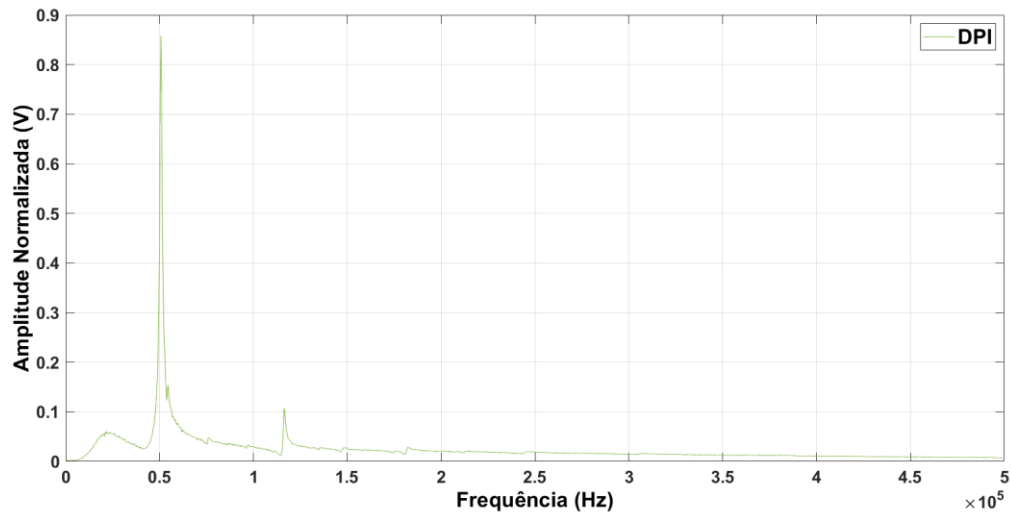


Fonte: Elaborado pela autora.

Para uma análise mais detalhada, tomou-se a média espectral do conjunto dos 200 sinais de cada tipo de falha estudada e dos 100 sinais do transformador operando

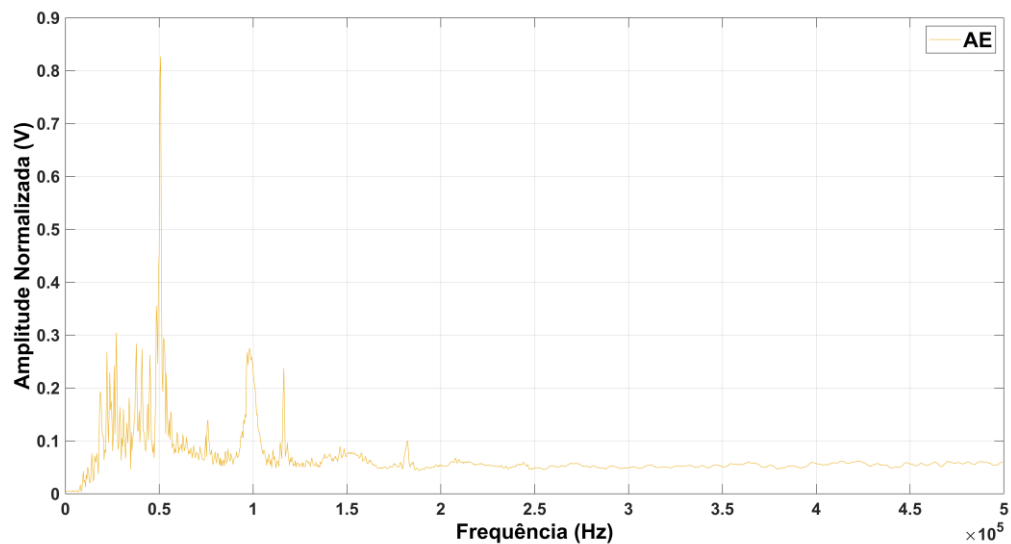
sem falha, e normalizou-se os três resultados. São apresentados, nas Figuras 83, 84 e 85, os espectros de frequências médios de cada caso avaliado.

Figura 83 – Espectro médio do sinal acústico de uma descarga parcial no isolador.



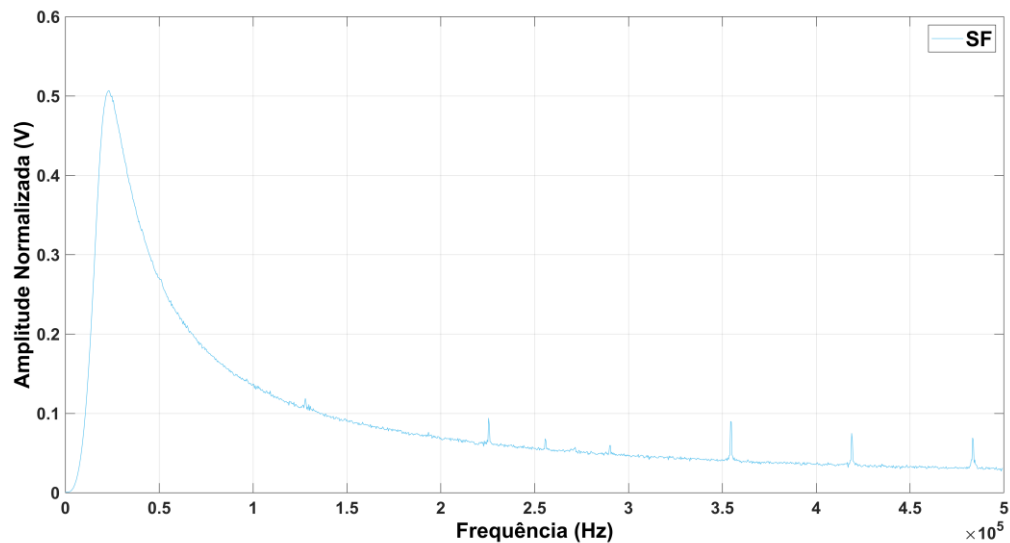
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 84 – Espectro médio do sinal acústico de um arco elétrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 85 – Espectro médio do sinal acústico do transformador operando sem falha.

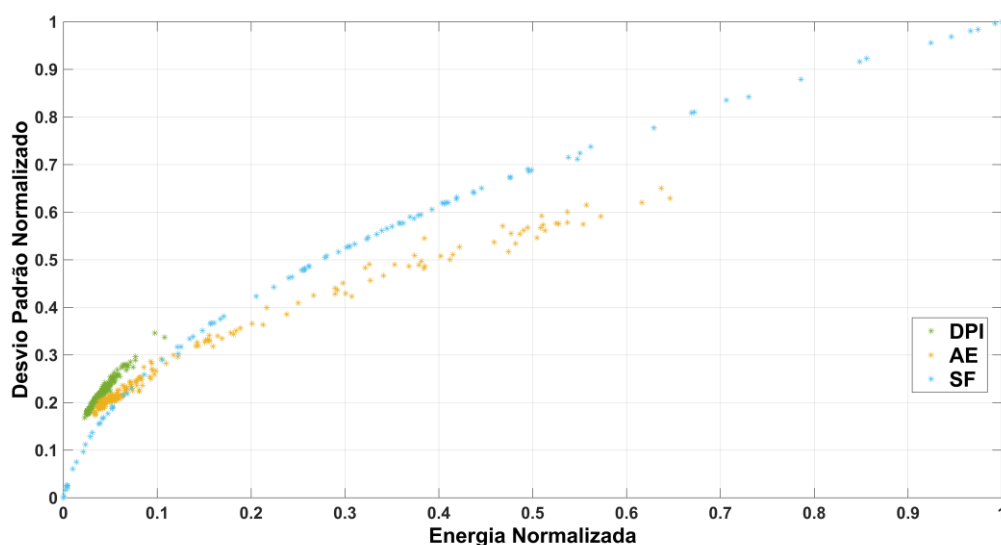


Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 83 é apresentado que a maior parte da energia do sinal está concentrada nas frequências mais baixas, com um pico inicial significativo em 50,7 kHz. Há uma rápida diminuição na amplitude, com outro pequeno pico localizado em 116 kHz, e após isso as amplitudes tornam-se quase insignificantes. Na Figura 84, observa-se um padrão semelhante ao da descarga parcial no isolador, com a energia concentrada nas baixas frequências. No entanto, a amplitude inicial é um pouco maior em comparação à DPI. A presença de picos nas baixas frequências indica a natureza impulsiva do sinal do arco elétrico, mas com mais energia em comparação à descarga parcial. Há também um pico notável por volta de 50,7 kHz, porém observa-se picos de amplitude considerável na faixa entre 108 e 116 kHz. A Figura 85 ilustra um caso típico de ruído rosa. O gráfico confirma as características teóricas do ruído rosa, mostrando claramente como a energia do sinal é mais concentrada em frequências baixas e vai decaindo conforme a frequência aumenta. Isso o diferencia do ruído branco, que teria um espectro plano, com magnitude constante em todas as frequências.

Para a análise da Combinação de estatísticas, efetuou-se o cruzamento de um conjunto de parâmetros estatísticos e espectrais após sua normalização, permitindo a comparação inicial entre duas e, em um segundo momento, entre três variáveis simultaneamente.

Figura 86 – Cruzamento entre Energia e Desvio Padrão normalizados, para o sensoriamento acústico.



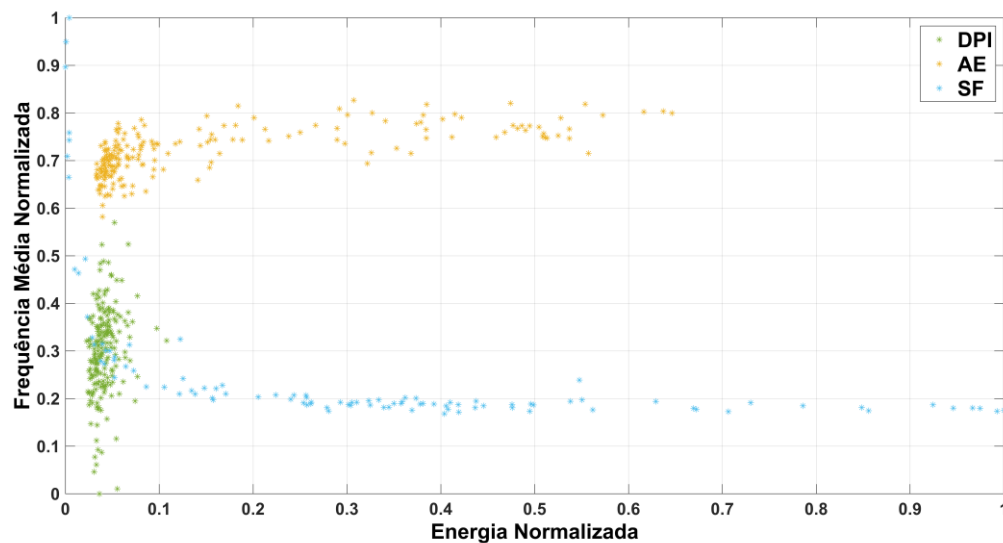
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Desvio Padrão é ilustrado na Figura 86. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,11, e o Desvio Padrão de 0,16 a 0,34. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64 e do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e o Desvio Padrão variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 44 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Desvio Padrão

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1426
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3835
Arco elétrico e operação sem falha	0,2431

Figura 87 – Cruzamento entre Energia e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento acústico.



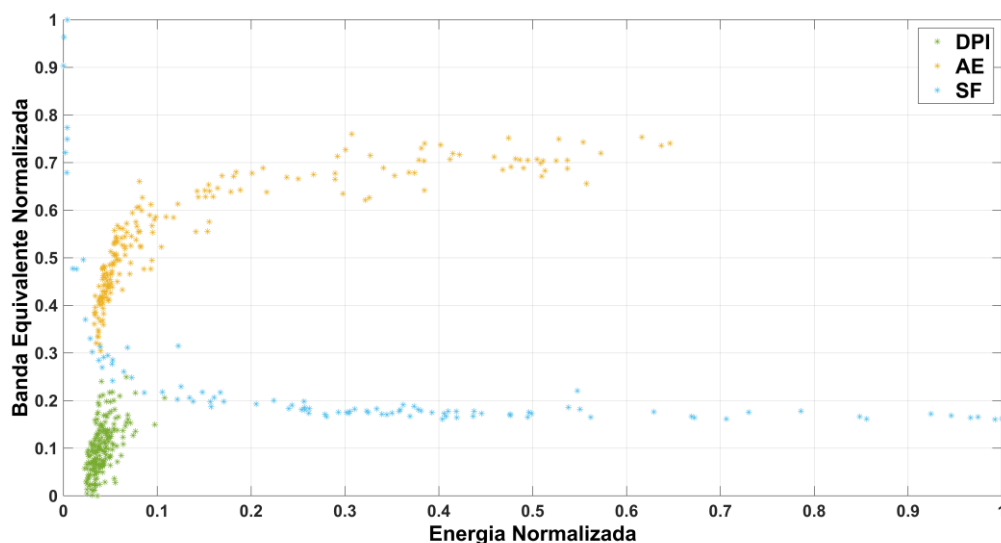
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Frequência Média é ilustrado na Figura 87. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,03 a 0,10, e a Frequência Média variou entre 0 e 0,56. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,04 a 0,65, e a Frequência Média variou entre 0,58 e 0,82. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Frequência Média variou entre 0,18 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 45 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4345
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4861
Arco elétrico e operação sem falha	0,7833

Figura 88 – Cruzamento entre Energia e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.



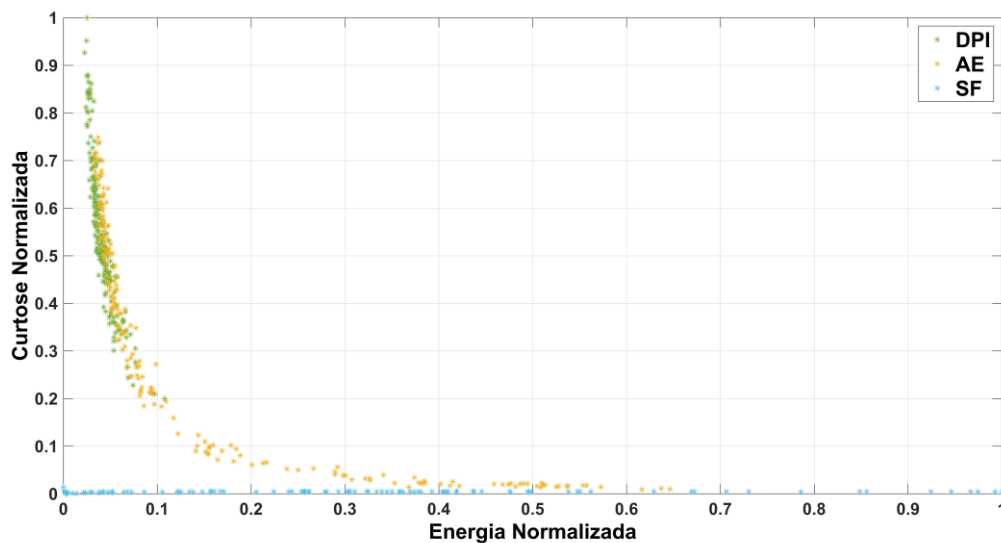
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Banda Equivalente se apresenta na Figura 88. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,10, e a Banda Equivalente de 0 a 0,24. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64, e da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 46 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4600
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3187
Arco elétrico e operação sem falha	0,3357

Figura 89 – Cruzamento entre Energia e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.



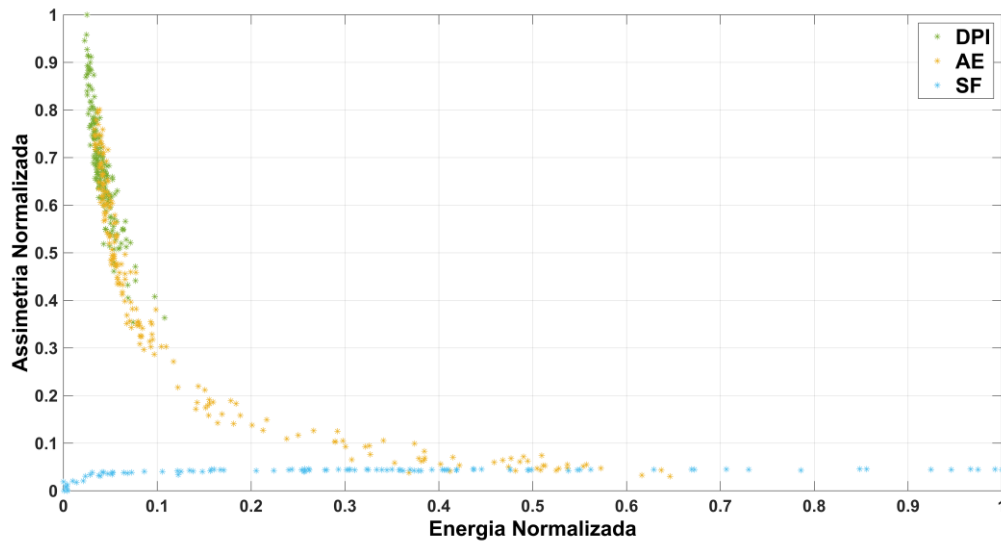
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Curtose é ilustrado na Figura 89. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,11, e a Curtose de 0,20 a 1. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,04 e 0,65 e da Curtose entre 0,01 e 0,74. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 47 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2718
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6203
Arco elétrico e operação sem falha	0,3486

Figura 90 – Cruzamento entre Energia e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



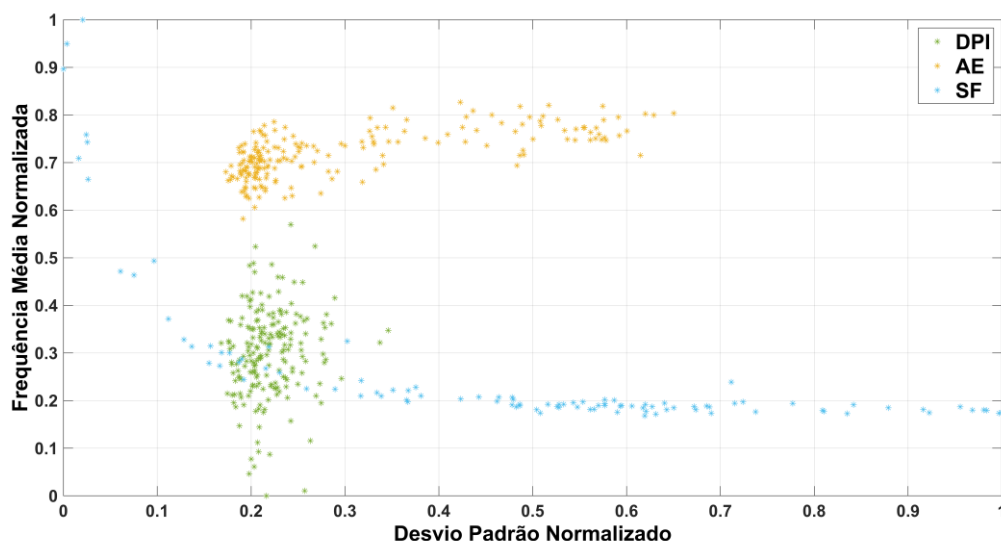
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Assimetria é ilustrado na Figura 90. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,02 a 0,11, e a Assimetria variou entre 0,35 e 1. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,03 a 0,64, e a Assimetria variou entre 0,03 e 0,80. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 48 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3188
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7032
Arco elétrico e operação sem falha	0,3848

Figura 91 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento acústico.



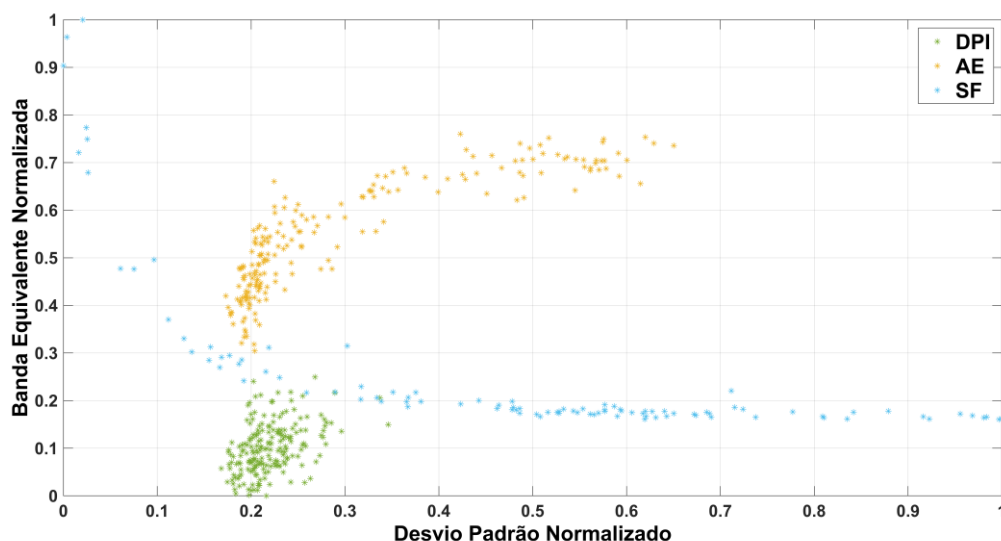
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média se apresenta na Figura 91. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,16 a 0,34, e a Frequência Média de 0 a 0,57. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65, e da Frequência Média entre 0,58 e 0,82. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Frequência Média variou entre 0,18 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 49 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4265
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2647
Arco elétrico e operação sem falha	0,4918

Figura 92 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.



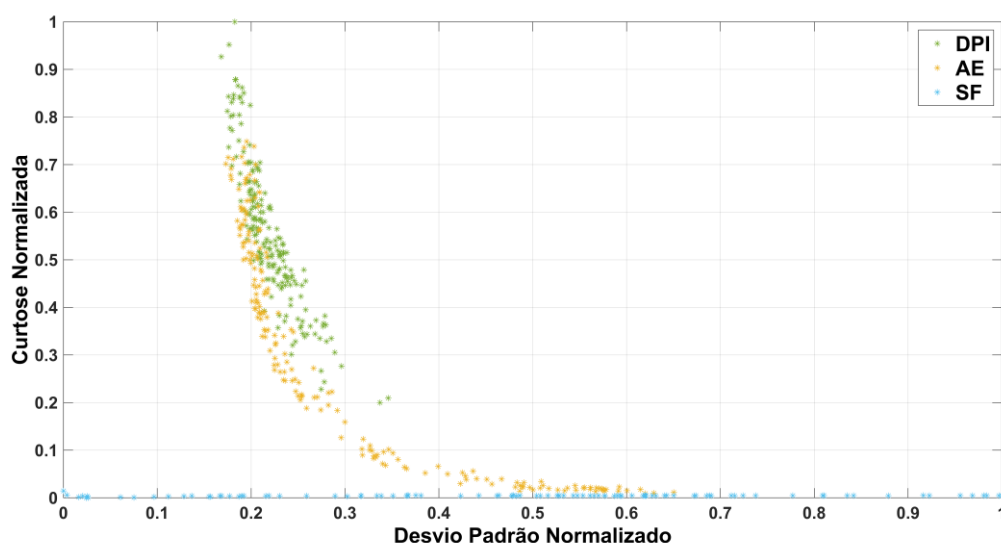
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 92. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,16 a 0,34, e a Banda Equivalente de 0 a 0,24. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65 e da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 50 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4524
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3027
Arco elétrico e operação sem falha	0,3439

Figura 93 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoramento acústico.



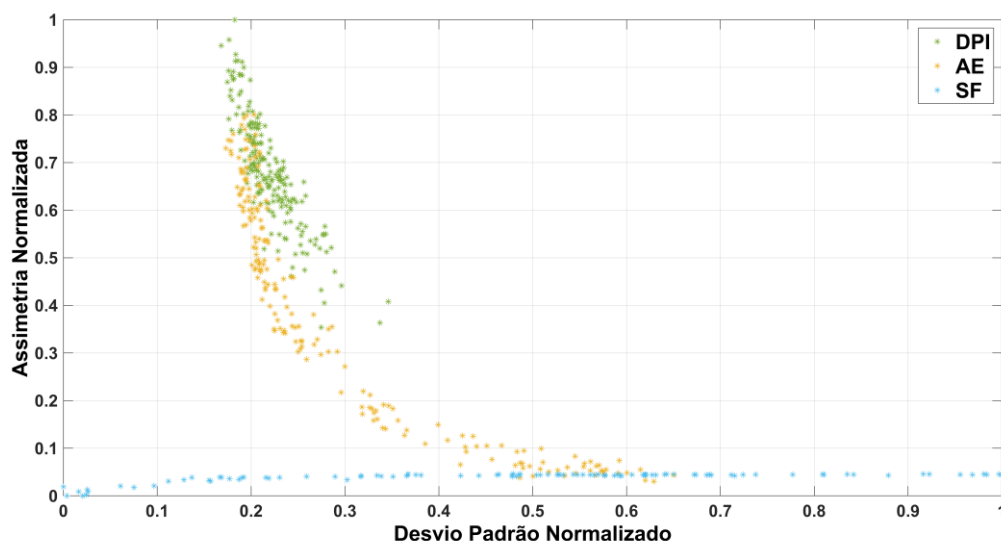
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose é ilustrado na Figura 93. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,17 a 0,34, e a Curtose variou entre 0,19 e 1. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,17 a 0,65, e a Curtose variou entre 0 e 0,74. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 51 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2588
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6122
Arco elétrico e operação sem falha	0,3565

Figura 94 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



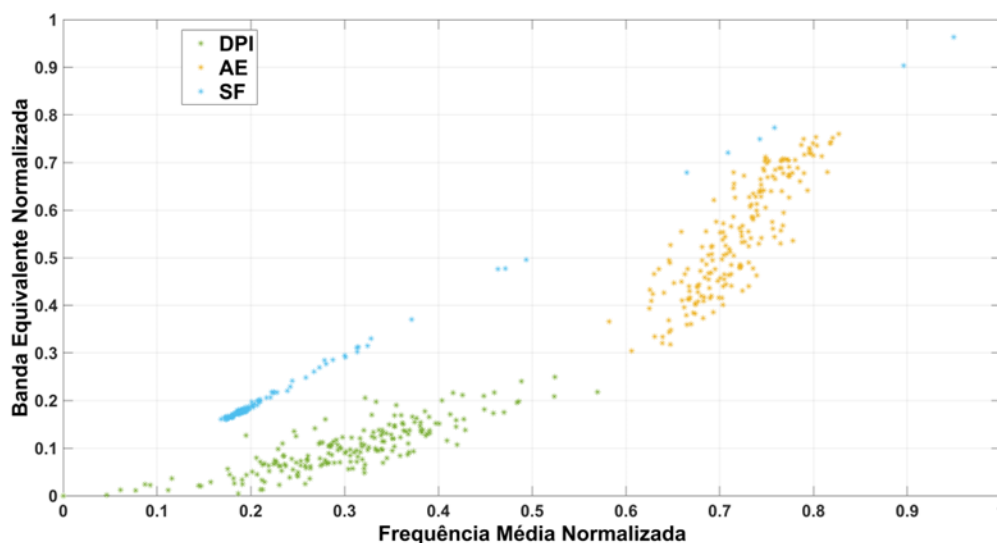
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria se apresenta na Figura 94. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,17 a 0,34, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65, e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 52 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3078
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6961
Arco elétrico e operação sem falha	0,3920

Figura 95 – Cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.



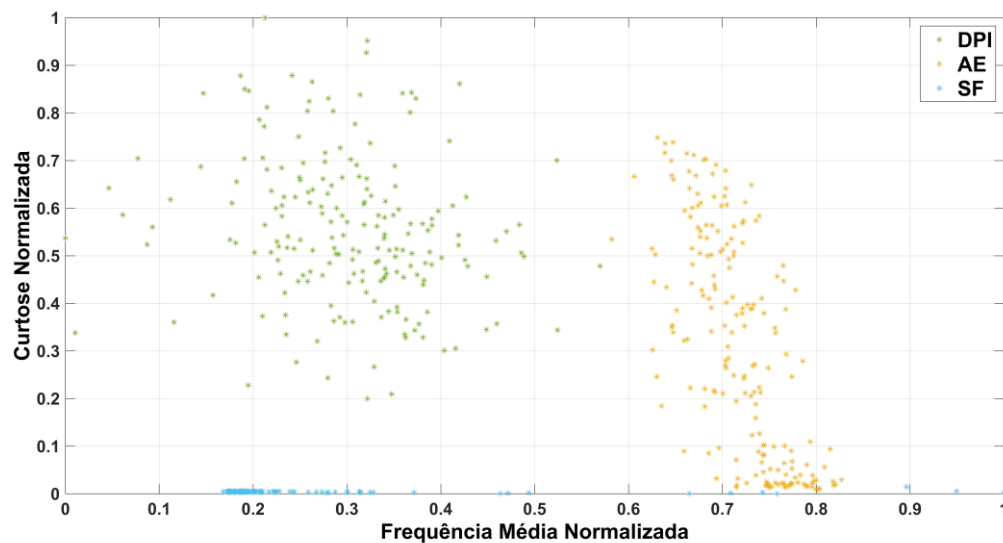
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 95. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,57, e a Banda Equivalente de 0 a 0,24. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,58 e 0,82 e da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,16 a 1, e a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 53 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,6108
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1568
Arco elétrico e operação sem falha	0,5435

Figura 96 – Cruzamento entre Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



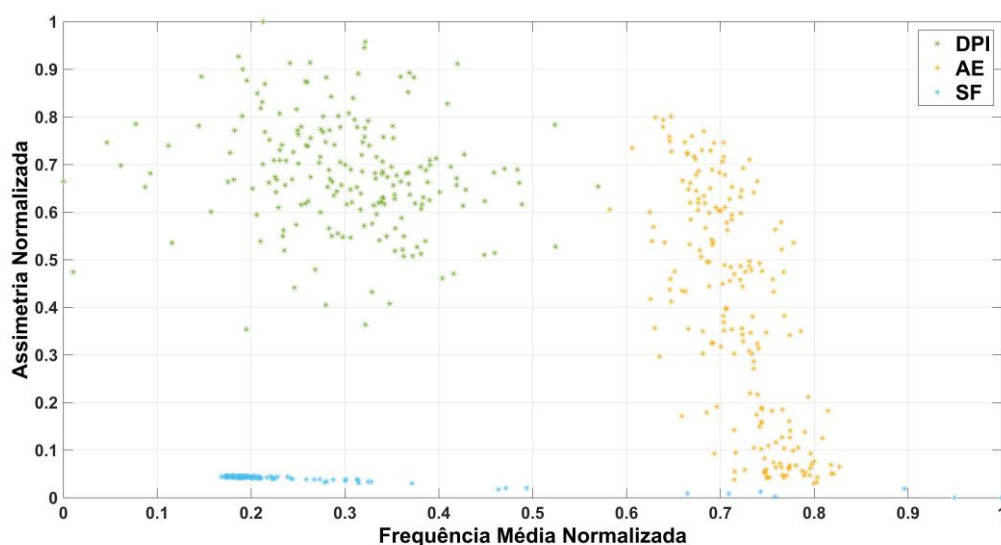
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 96. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou de 0 a 0,56, e a Curtose variou entre 0,19 e 1. Para o arco elétrico a Frequência Média variou de 0,58 a 0,82, e a Curtose variou entre 0 e 0,74. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,16 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 54 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4852
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5547
Arco elétrico e operação sem falha	0,5516

Figura 97 – Cruzamento entre Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



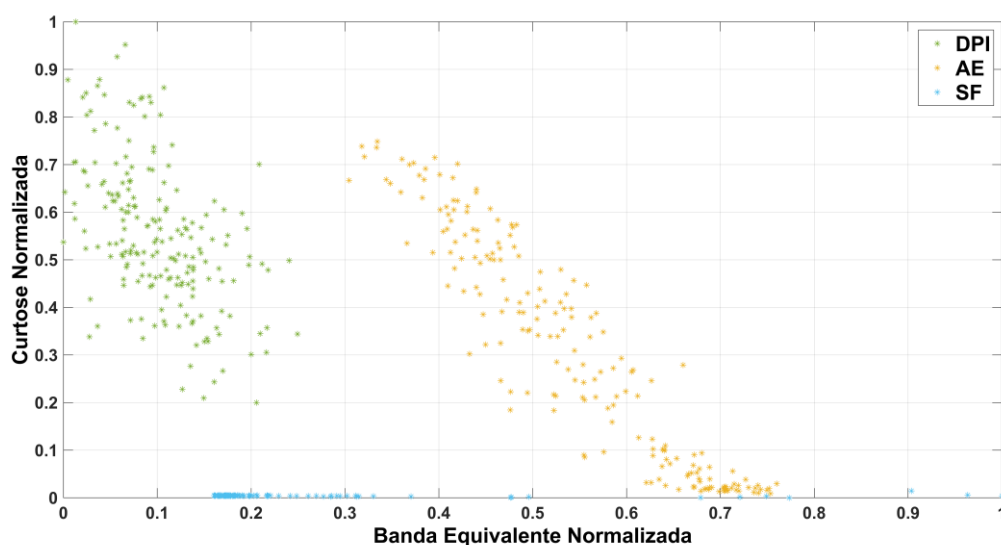
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média e Assimetria se apresenta na Figura 97. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,56, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,58 e 0,82, e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,16 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 55 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5130
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6461
Arco elétrico e operação sem falha	0,5752

Figura 98 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



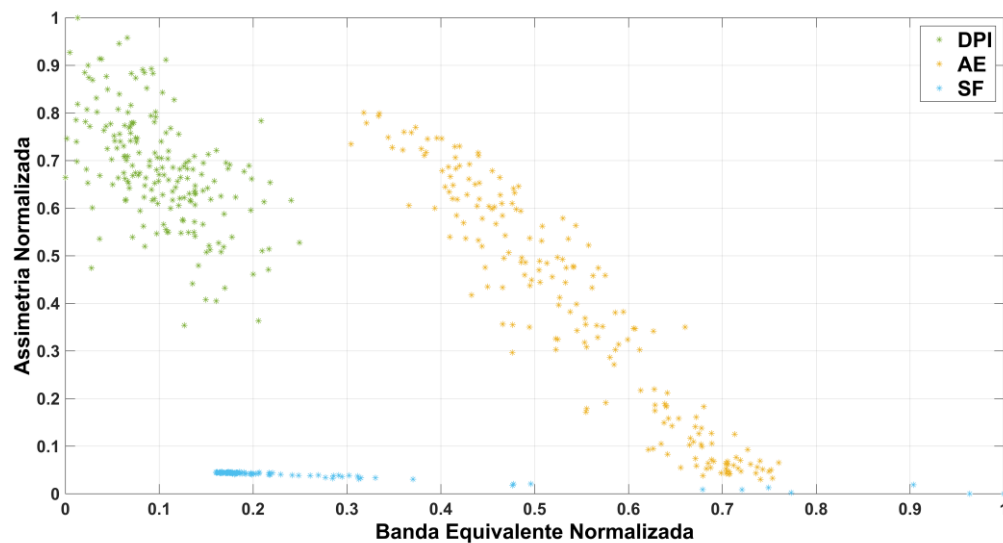
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose é ilustrado na Figura 98. Na descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente sofreu variação de 0 a 0,24, e a Curtose de 0,19 a 1. No arco elétrico houve variação da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76 e da Curtose entre 0 e 0,74. No transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,16 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 56 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5082
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5738
Arco elétrico e operação sem falha	0,4251

Figura 99 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



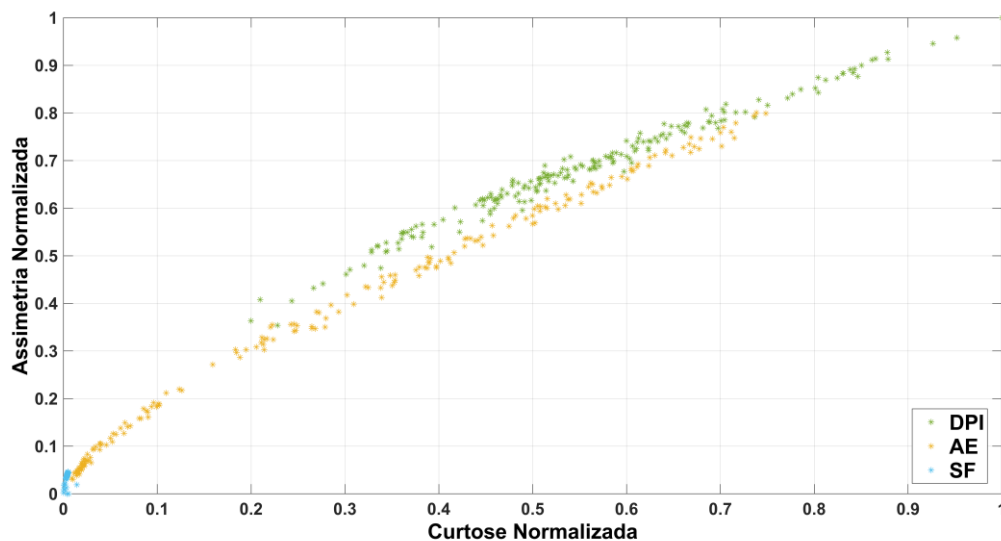
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 99. Para a descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente variou de 0 a 0,24, e a Assimetria variou entre 0,35 e 1. Para o arco elétrico a Banda Equivalente variou de 0,30 a 0,76, e a Assimetria variou entre 0,03 e 0,80. Já para o transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,16 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 57 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5348
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6626
Arco elétrico e operação sem falha	0,4552

Figura 100 – Cruzamento entre Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Curtose e Assimetria se apresenta na Figura 100. Na descarga parcial no isolador, a Curtose sofreu variação de 0,19 a 1, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação da Curtose entre 0,01 e 0,74, e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, a Curtose variou de 0 a 0,01, e a Assimetria variou entre 0 e 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

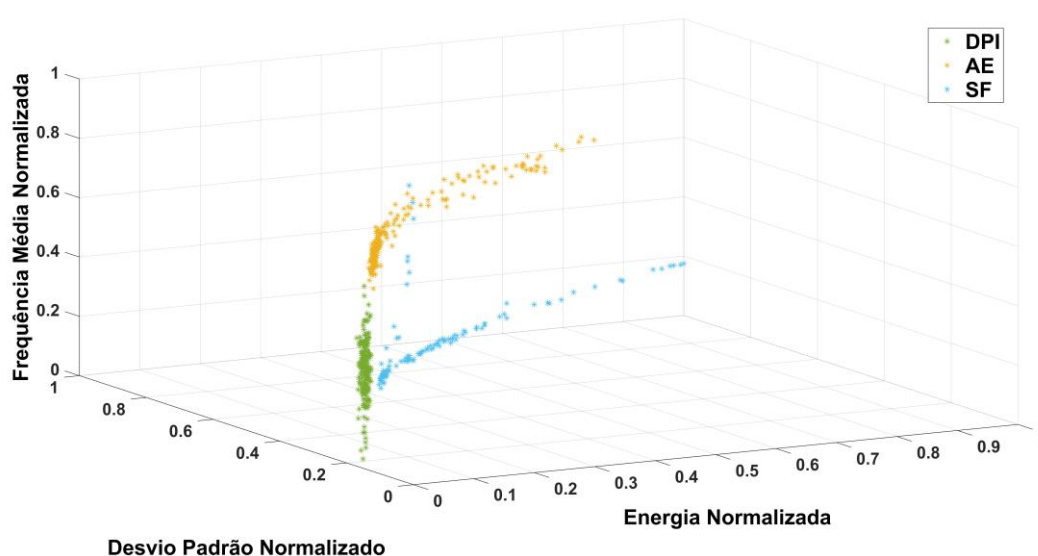
Tabela 58 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3851
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,8498
Arco elétrico e operação sem falha	0,4648

Observa-se que os cruzamentos em duas dimensões foram eficazes em duas situações distintas. A combinação entre Curtose e Assimetria foi eficaz na diferenciação do estado de falha e da operação sem falhas. Já os cruzamentos entre

Frequência Média e Banda Equivalente, Frequência Média e Curtose, Frequência Média e Assimetria, Banda Equivalente e Curtose, e Banda Equivalente e Assimetria foram eficazes tanto na identificação da falha quanto na sua classificação. As demais combinações não tiveram sucesso em nenhum dos aspectos avaliados, nem na identificação da ocorrência de uma falha.

Figura 101 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento acústico.



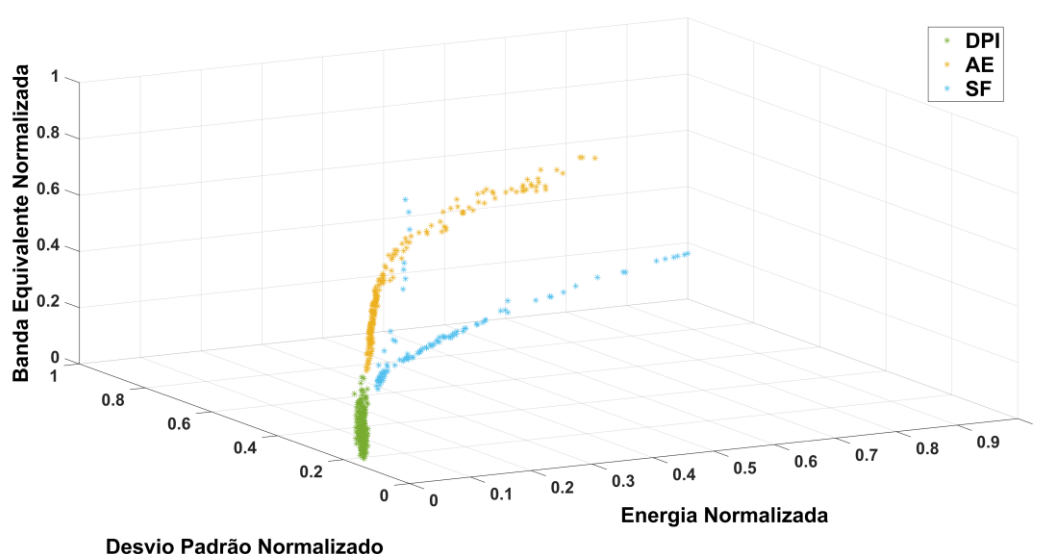
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média é ilustrado na Figura 101. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,02 a 0,10, o Desvio Padrão variou entre 0,16 e 0,34, e a Frequência Média variou de 0 a 0,56. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,03 a 0,64, o Desvio Padrão variou entre 0,17 e 0,65 e a Frequência Média variou de 0,58 a 0,82. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0 e 1 e a Frequência Média variou de 0,16 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 59 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4422
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3855
Arco elétrico e operação sem falha	0,5183

Figura 102 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.



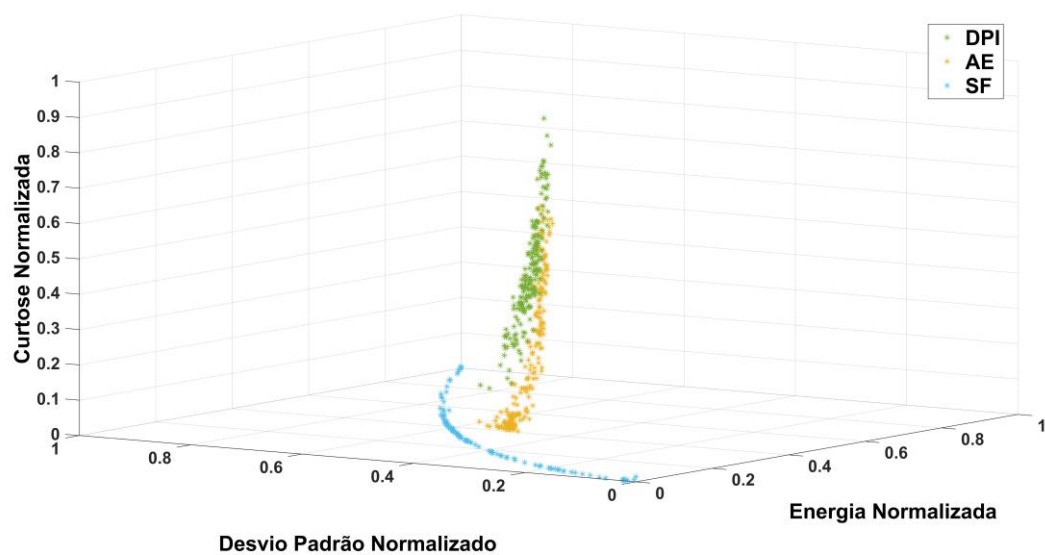
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 102. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,10, o Desvio Padrão de 0,16 a 0,34, e a Banda Equivalente de 0 a 0,24. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64, do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65 e da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,16 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 60 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4672
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4125
Arco elétrico e operação sem falha	0,3808

Figura 103 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



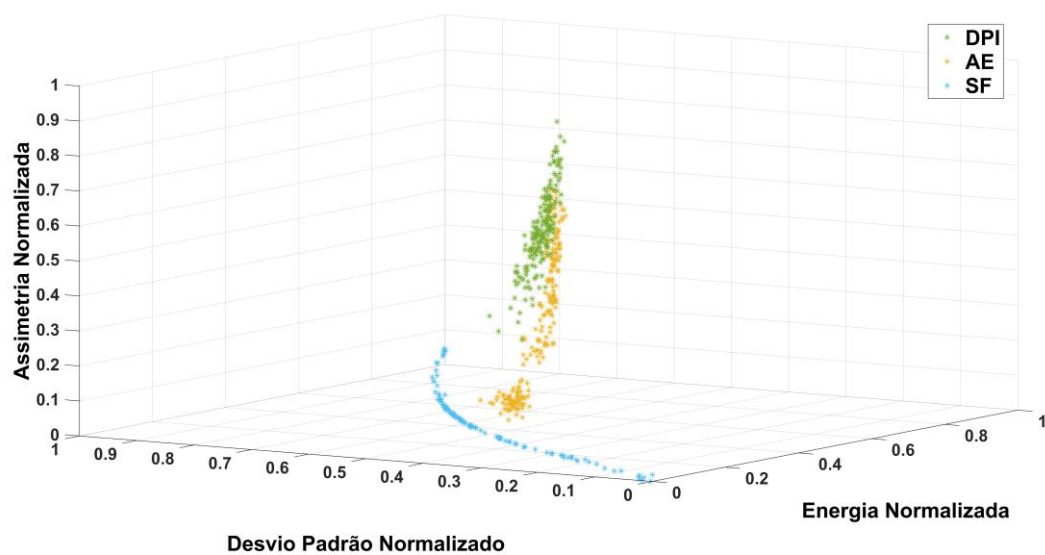
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 103 ilustra-se o cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,02 a 0,10, o Desvio Padrão variou entre 0,16 e 0,34, e a Curtose variou de 0,19 a 1. Para o arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,03 a 0,64, o Desvio Padrão de 0,17 e 0,65 e a Curtose de 0 a 0,74. Finalmente, para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou de 0 a 1 e a Curtose variou de 0 a 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 61 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2839
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6733
Arco elétrico e operação sem falha	0,3923

Figura 104 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



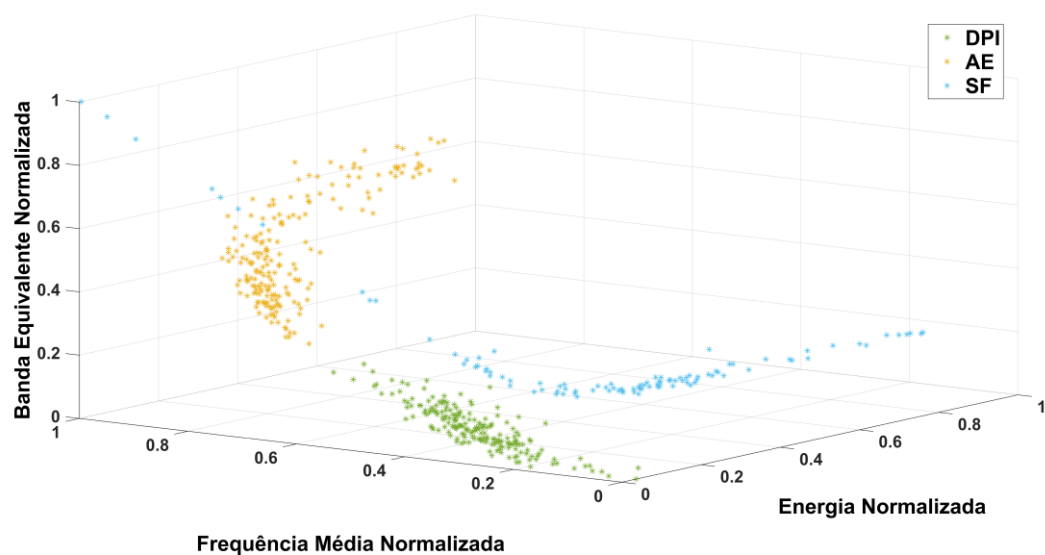
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria é ilustrado na Figura 104. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,02 a 0,10, o Desvio Padrão variou entre 0,16 e 0,34, e a Assimetria variou de 0,35 a 1. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,03 a 0,64, o Desvio Padrão variou entre 0,17 e 0,65 e a Assimetria variou de 0,03 a 0,80. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 62 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3291
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7504
Arco elétrico e operação sem falha	0,4247

Figura 105 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.



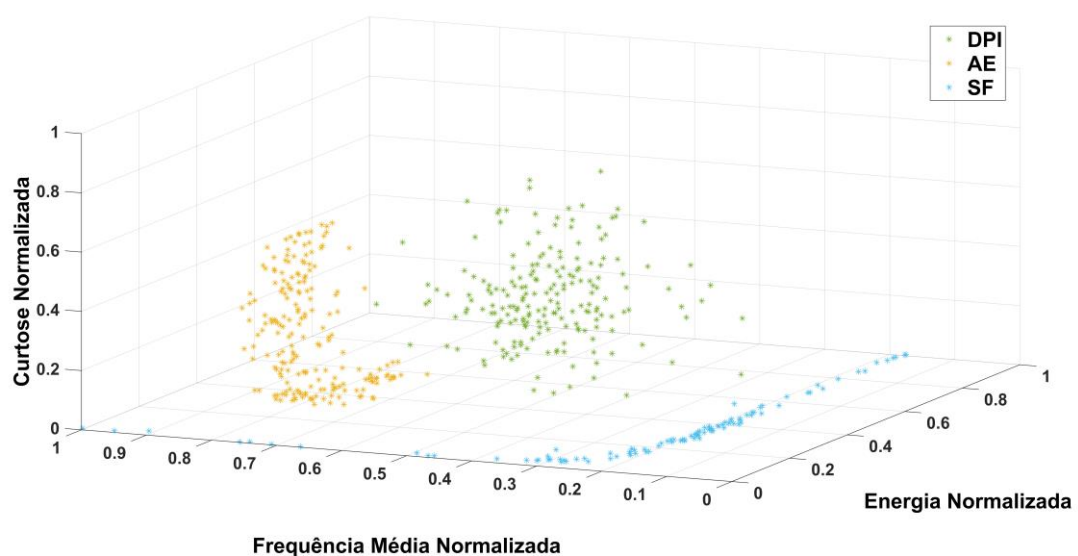
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente se apresenta na Figura 105. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,10, a Frequência Média de 0 a 0,56, e a Banda Equivalente de 0 a 0,24. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64, da Frequência Média entre 0,58 e 0,82 e da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,16 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,16 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 63 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,6219
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3211
Arco elétrico e operação sem falha	0,5676

Figura 106 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



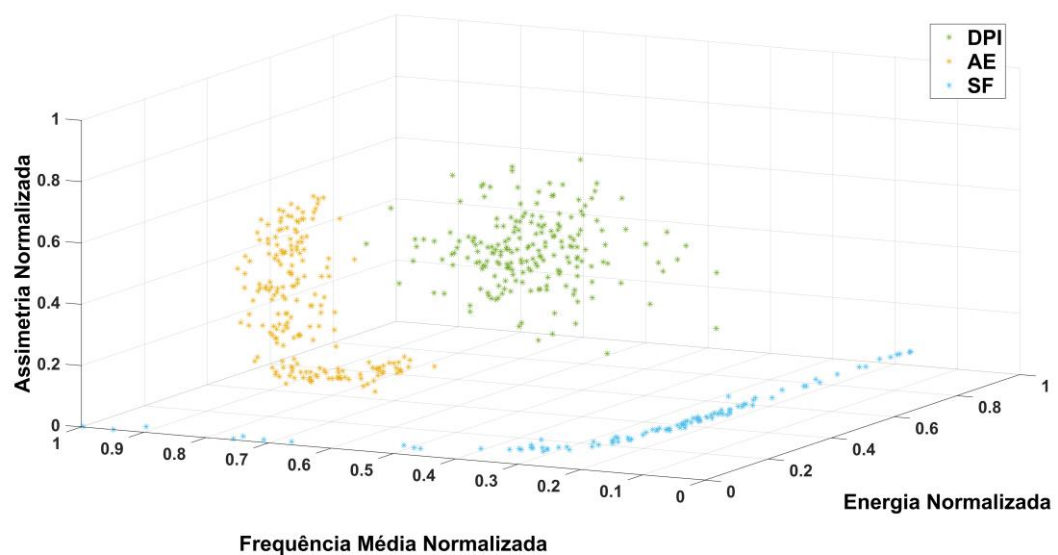
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 106. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,10, a Frequência Média de 0 a 0,56, e a Curtose de 0,19 a 1. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64, da Frequência Média entre 0,58 e 0,82 e da Curtose entre 0 e 0,74. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,16 e 1 e a Curtose variou de 0 a 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 64 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4990
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6215
Arco elétrico e operação sem falha	0,5754

Figura 107 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



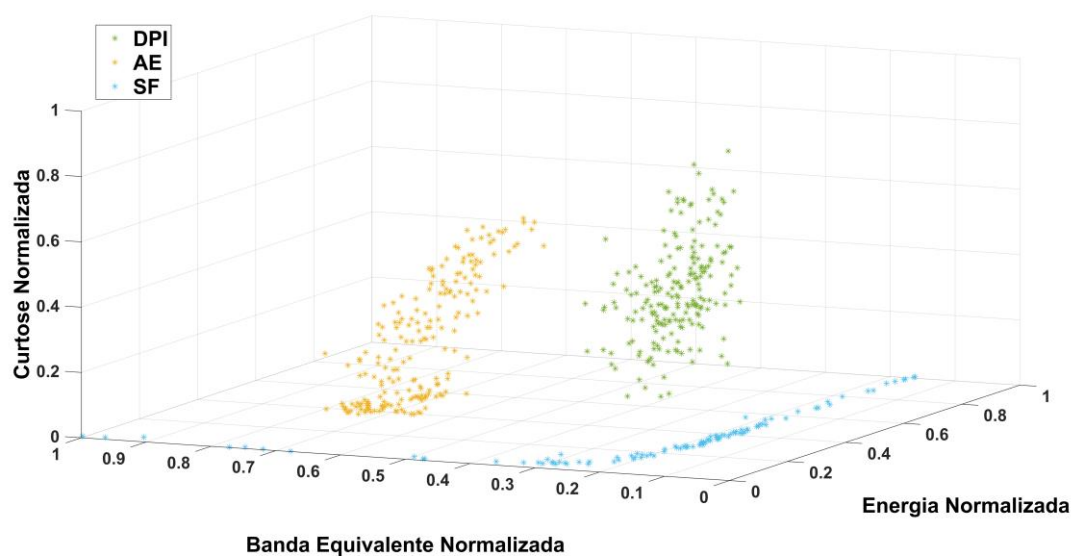
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria é ilustrado na Figura 107. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,02 a 0,10, a Frequência Média variou entre 0 e 0,56, e a Assimetria variou de 0,35 a 1. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,03 a 0,64, a Frequência Média variou entre 0,58 e 0,82 e a Assimetria variou de 0,03 a 0,80. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,16 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 65 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5261
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7043
Arco elétrico e operação sem falha	0,5980

Figura 108 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



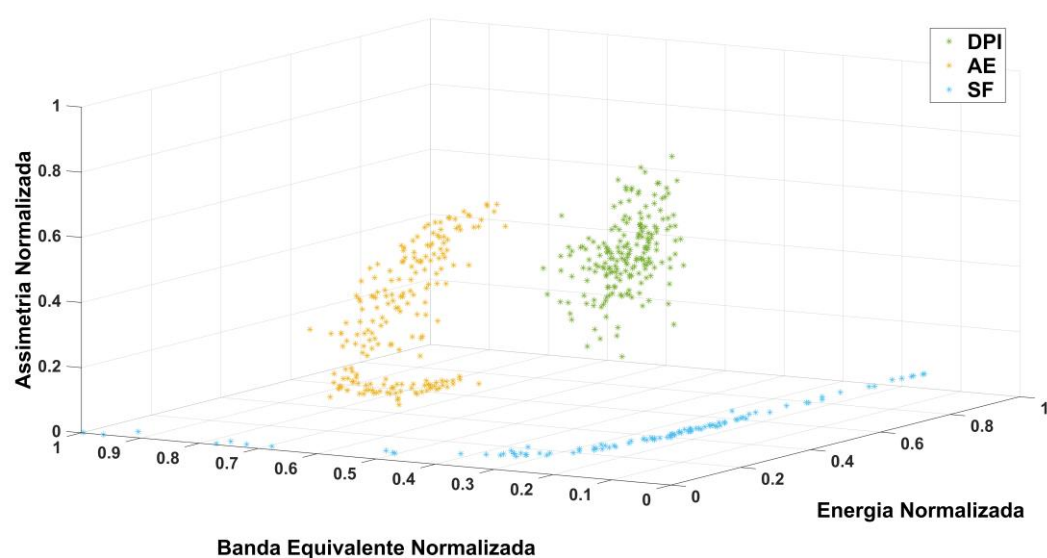
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 108. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,10, a Banda Equivalente de 0 a 0,24, e a Curtose de 0,19 a 1. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64, da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76 e da Curtose entre 0 e 0,74. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1 e a Curtose variou de 0 a 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 66 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5214
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6386
Arco elétrico e operação sem falha	0,4555

Figura 109 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



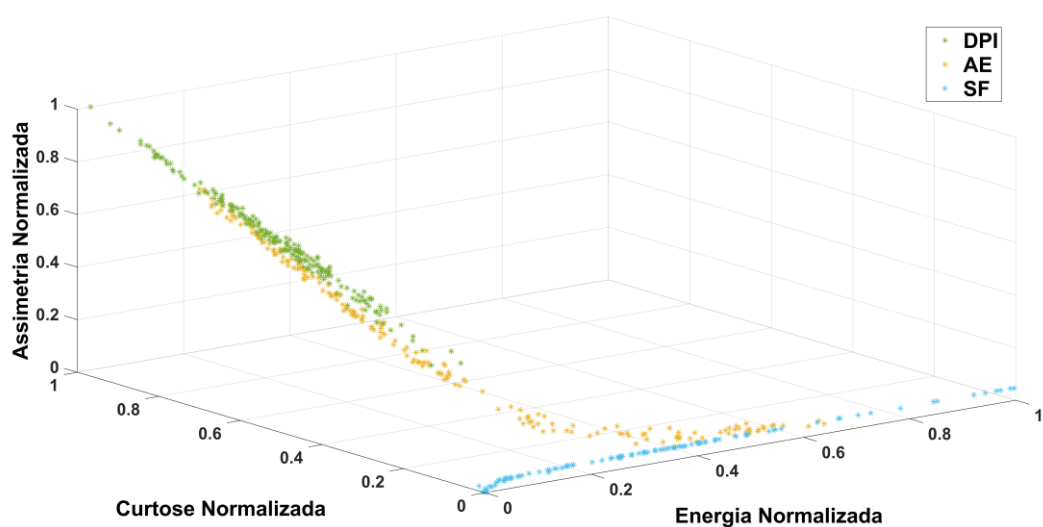
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 109. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,02 a 0,10, a Banda Equivalente de 0 a 0,24, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,03 e 0,64, da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76 e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 67 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5473
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7194
Arco elétrico e operação sem falha	0,4837

Figura 110 – Cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



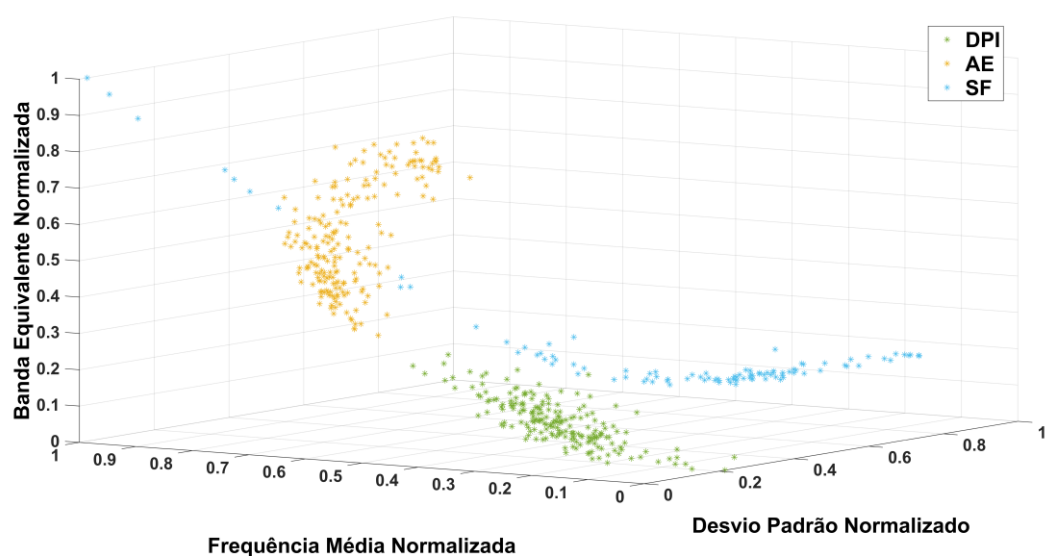
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 110. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,02 a 0,10, a Curtose variou entre 0,19 e 1, e a Assimetria variou de 0,35 a 1. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,03 a 0,64, a Curtose variou entre 0 e 0,74 e a Assimetria variou de 0,03 a 0,80. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Curtose variou entre 0 e 0,01 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 68 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4023
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,8948
Arco elétrico e operação sem falha	0,4928

Figura 111 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento acústico.



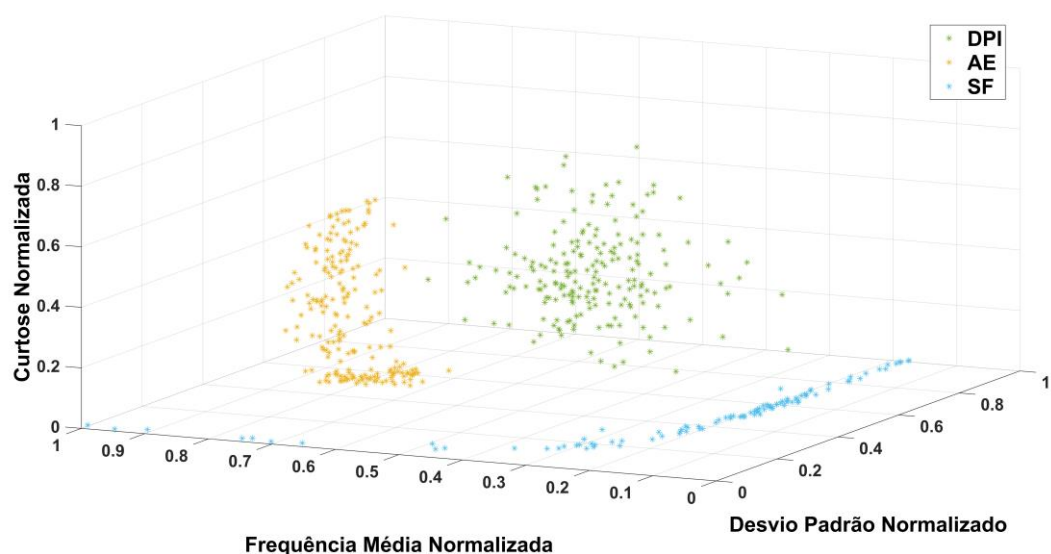
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente se apresenta na Figura 111. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,16 a 0,34, a Frequência Média de 0 a 0,56, e a Banda Equivalente de 0 a 0,24. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65, da Frequência Média entre 0,58 e 0,82 e da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,16 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,16 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 69 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,6163
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3052
Arco elétrico e operação sem falha	0,5725

Figura 112 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



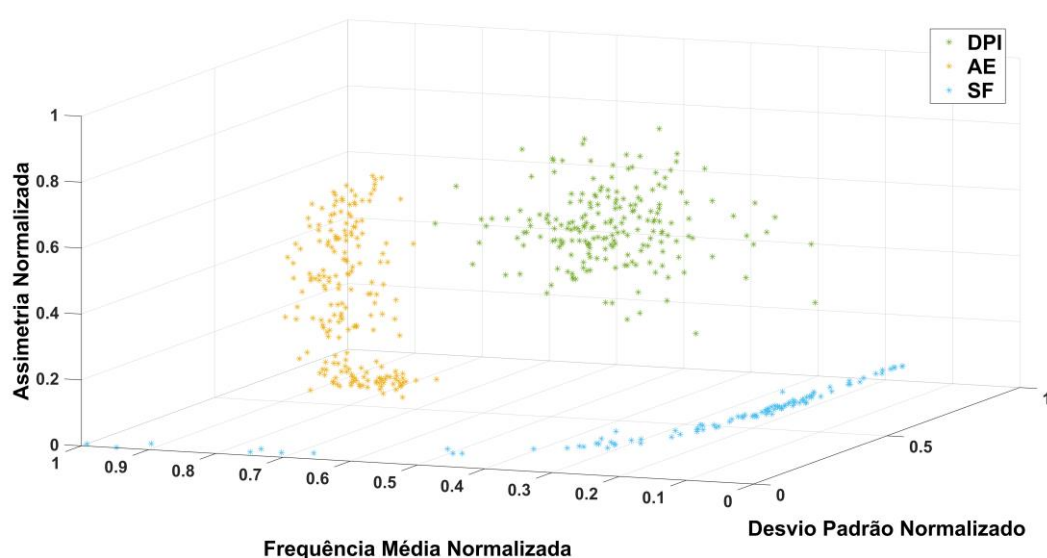
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 112. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,16 a 0,34, a Frequência Média de 0 a 0,56, e a Curtose de 0,19 a 1. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65, da Frequência Média entre 0,58 e 0,82, e da Curtose entre 0 e 0,74. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,16 e 1 e a Curtose variou de 0 a 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 70 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4921
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6134
Arco elétrico e operação sem falha	0,5802

Figura 113 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



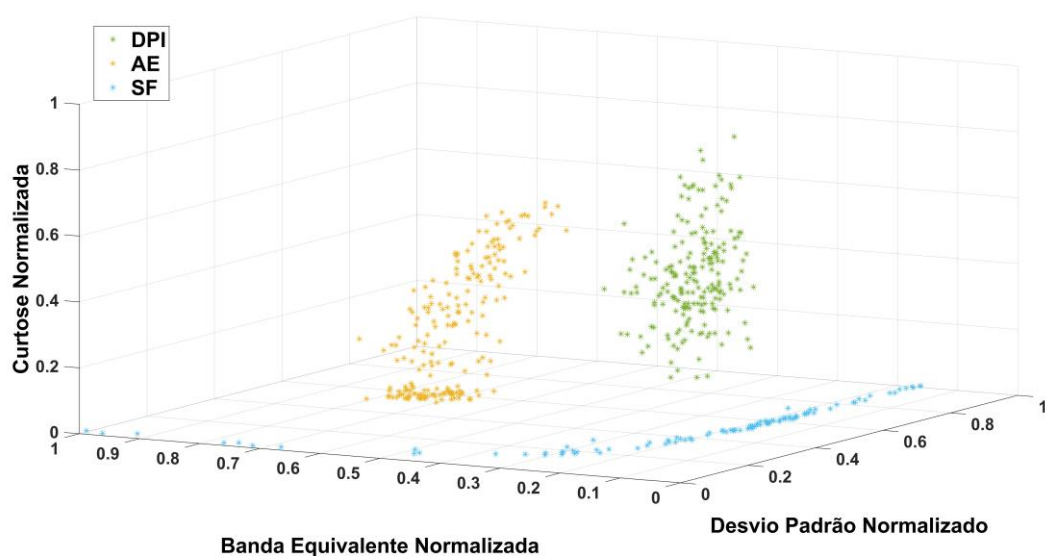
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria é ilustrado na Figura 113. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,16 a 0,34, a Frequência Média variou entre 0 e 0,56, e a Assimetria variou de 0,35 a 1. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,17 a 0,65, a Frequência Média variou entre 0,58 e 0,82 e a Assimetria variou de 0,03 a 0,80. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,16 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 71 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5195
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6972
Arco elétrico e operação sem falha	0,6026

Figura 114 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



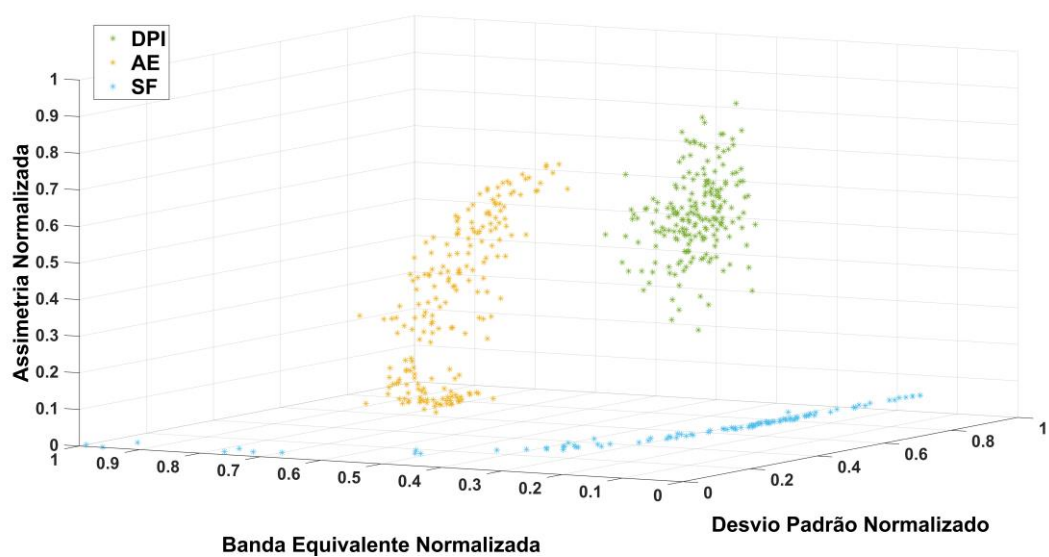
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 114. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,16 a 0,34, a Banda Equivalente de 0 a 0,24, e a Curtose de 0,19 a 1. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65, da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76 e da Curtose entre 0 e 0,74. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1 e a Curtose variou de 0 a 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 72 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5147
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6307
Arco elétrico e operação sem falha	0,4615

Figura 115 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



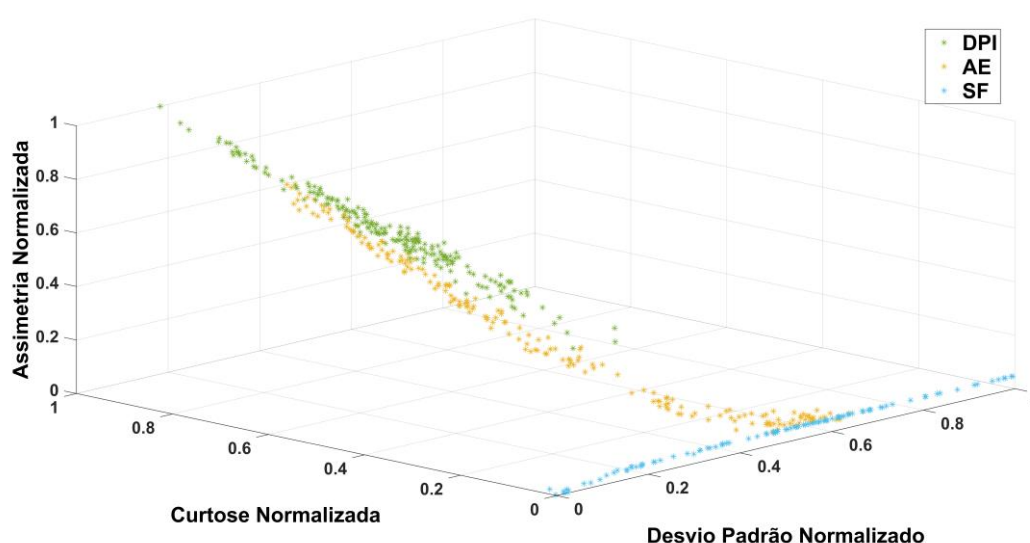
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 115. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,16 a 0,34, a Banda Equivalente de 0 a 0,24, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,17 e 0,65, da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76, e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 73 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5410
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,7124
Arco elétrico e operação sem falha	0,4894

Figura 116 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



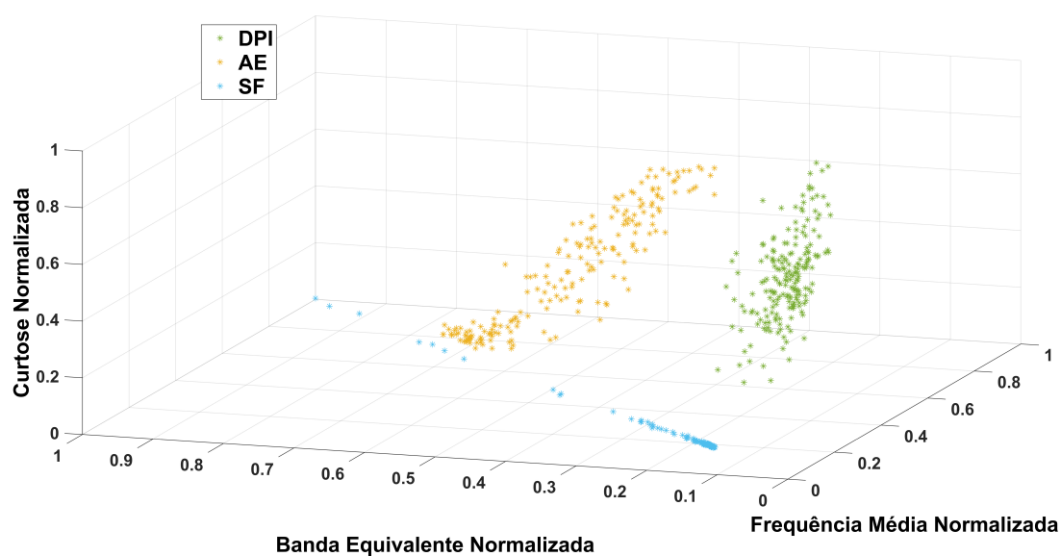
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 116. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,16 a 0,34, a Curtose variou entre 0,19 e 1, e a Assimetria variou de 0,35 a 1. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,17 a 0,65, a Curtose variou entre 0 e 0,74 e a Assimetria variou de 0,03 a 0,80. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Curtose variou entre 0 e 0,01 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 74 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3937
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,8892
Arco elétrico e operação sem falha	0,4984

Figura 117 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento acústico.



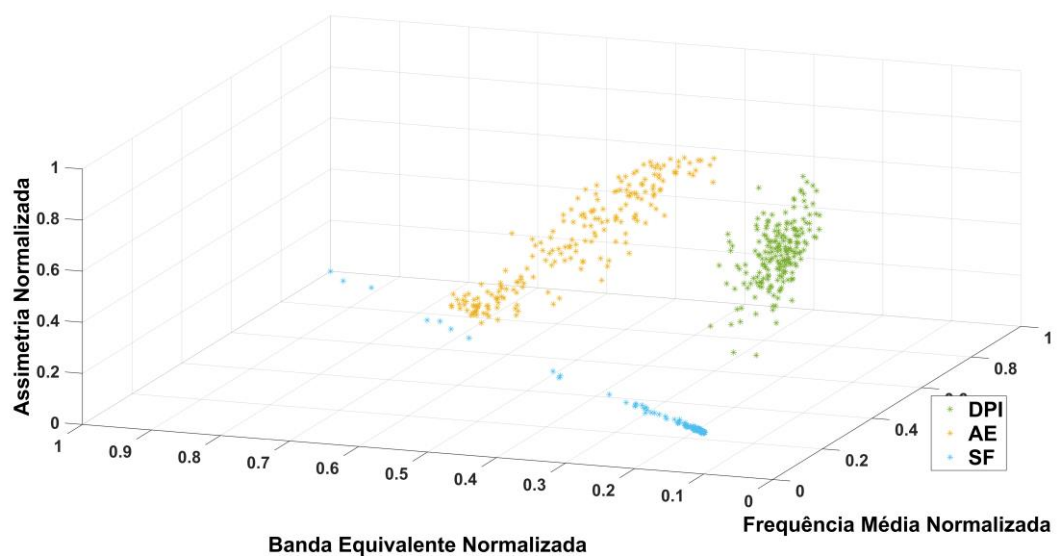
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 117. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,56, a Banda Equivalente de 0 a 0,24, e a Curtose de 0,19 a 1. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,58 e 0,82, da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76 e da Curtose entre 0 e 0,74. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,16 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1 e a Curtose variou de 0 a 0,01. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 75 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,6583
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5751
Arco elétrico e operação sem falha	0,6247

Figura 118 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



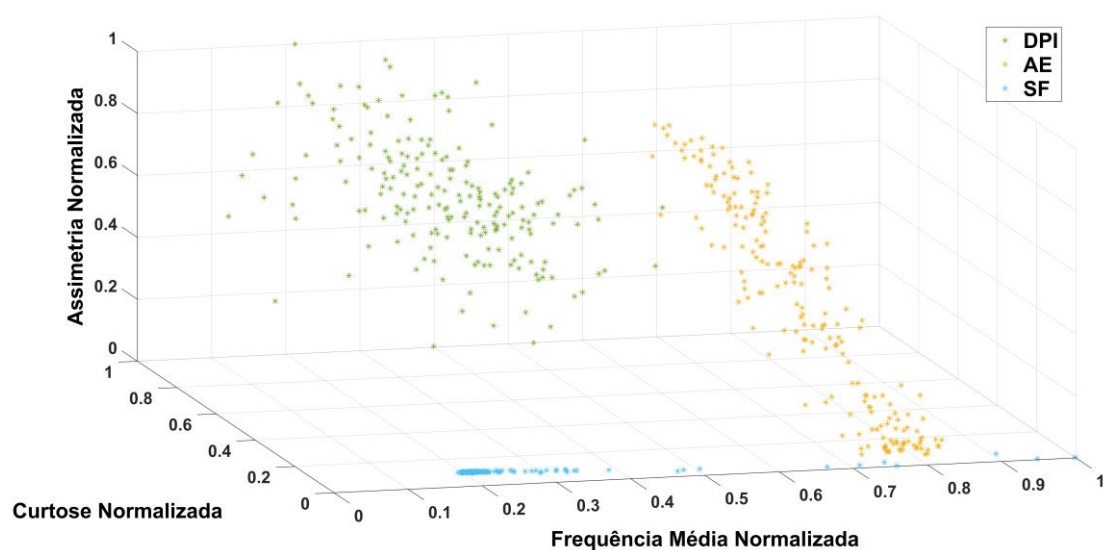
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 118. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,56, a Banda Equivalente de 0 a 0,24, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,58 e 0,82, da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76, e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,16 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,16 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 76 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,6791
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6637
Arco elétrico e operação sem falha	0,6455

Figura 119 – Cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoramento acústico.



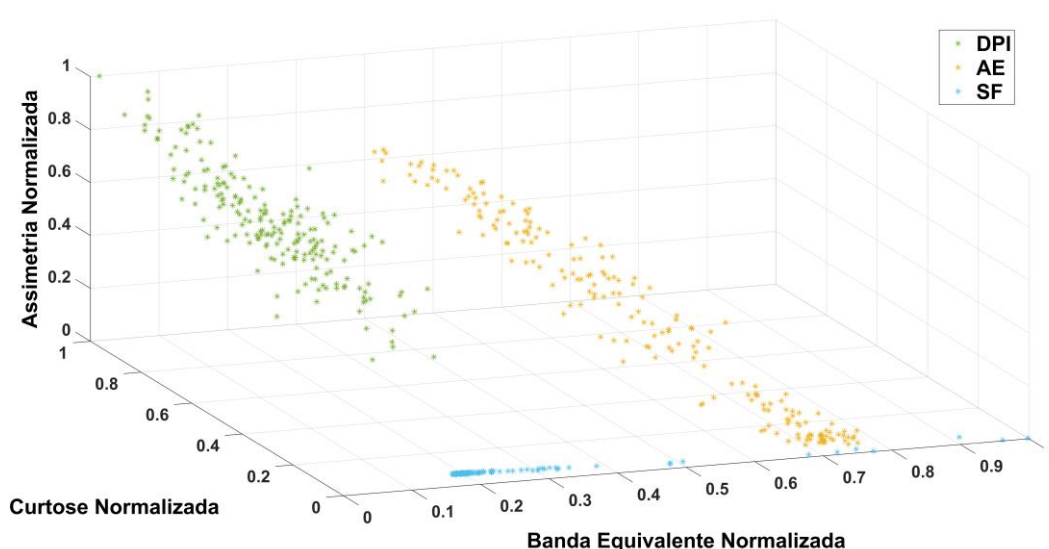
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 119. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou de 0 a 0,56, a Curtose variou entre 0,19 e 1, e a Assimetria variou de 0,35 a 1. Para o arco elétrico a Frequência Média variou de 0,58 a 0,82, a Curtose variou entre 0 e 0,74 e a Assimetria variou de 0,03 a 0,80. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,16 a 1, a Curtose variou entre 0 e 0,01 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 77 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5687
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,8507
Arco elétrico e operação sem falha	0,6524

Figura 120 – Cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento acústico.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria se apresenta na Figura 120. Na descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente sofreu variação de 0 a 0,24, a Curtose de 0,19 a 1, e a Assimetria de 0,35 a 1. No arco elétrico houve variação da Banda Equivalente entre 0,30 e 0,76, da Curtose entre 0 e 0,74 e da Assimetria entre 0,03 e 0,80. No transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,16 a 1, a Curtose variou entre 0 e 0,01 e a Assimetria variou de 0 a 0,04. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 78 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria

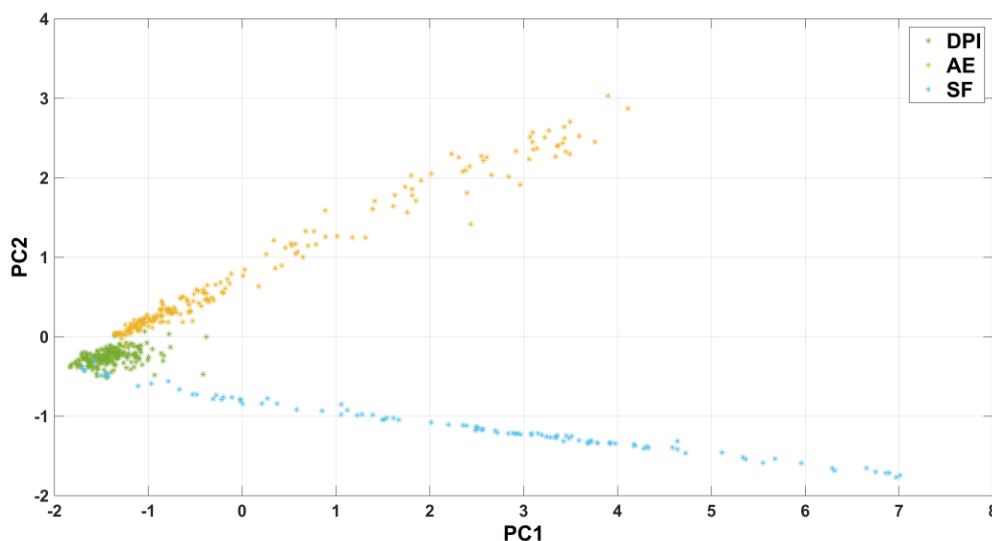
Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5884
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,8632
Arco elétrico e operação sem falha	0,5495

Observa-se que as combinações tridimensionais foram eficazes em duas situações distintas. As combinações entre Energia, Desvio Padrão e Curtose, e Energia, Desvio Padrão e Assimetria foram eficazes na distinção entre estados de falha e operação normal. No entanto, não foram satisfatórias para a classificação da falha, devido a sobreposição de pontos entre as regiões correspondentes aos tipos de falha. Por outro lado, os cruzamentos entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média; Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente; Energia, Frequência Média e Banda Equivalente; Energia, Frequência Média e Curtose; Energia, Frequência Média e Assimetria; Energia, Banda Equivalente e Curtose; Energia, Banda Equivalente e Assimetria; Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente; Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose; Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria; Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose; Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria; Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose; Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria; Frequência Média, Curtose e Assimetria; e Banda Equivalente, Curtose e Assimetria, foram eficazes tanto na identificação da falha quanto na sua classificação.

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada à matriz de espectros. Com as componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2), foi gerado um mapa bidimensional para classificar as três condições analisadas neste trabalho. Na Figura 121 é apresentada a ACP para o sinal acústico, aplicada à matriz da Transformada de

Fourier normalizada. Observa-se que a combinação entre a CP1 e a CP2 não foi eficaz na diferenciação entre os estados de falha e operação normal, pois há uma sobreposição significativa de pontos entre as regiões correspondentes a esses estados. Além disso, a classificação das falhas também se mostrou insatisfatória, uma vez que a distância euclidiana entre o centroide do cluster correspondente à DPI e o centroide do cluster do AE não é suficientemente grande. Essa proximidade aumenta o risco de falsos diagnósticos, comprometendo a confiabilidade do modelo. Para as descargas parciais no isolador, a Componente Principal 1 variou de -1,83 a -0,38 e a Componente Principal 2 de -0,47 a 0,01. Para o arco elétrico, a CP1 variou entre -1,36 e 4,11 e a CP2 entre -0,11 e 3,03. Finalmente, para o transformador operando sem falhas, a CP1 apresentou variação de -1,70 a 7 e a CP2 variou de -1,76 a -0,31. As distâncias euclidianas são apresentadas na Tabela 79.

Figura 121 – Cruzamento entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, para o sensoriamento acústico.



Fonte: Elaborado pela autora.

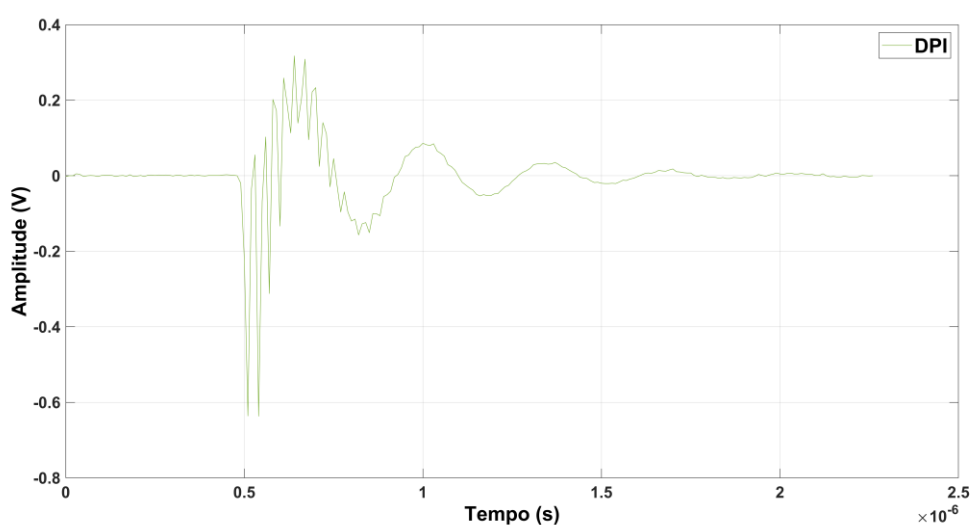
Tabela 79 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Análise de Componentes Principais

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,9043
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	4,0227
Arco elétrico e operação sem falha	3,0694

6.1.3 Sensoriamento por Corrente Elétrica

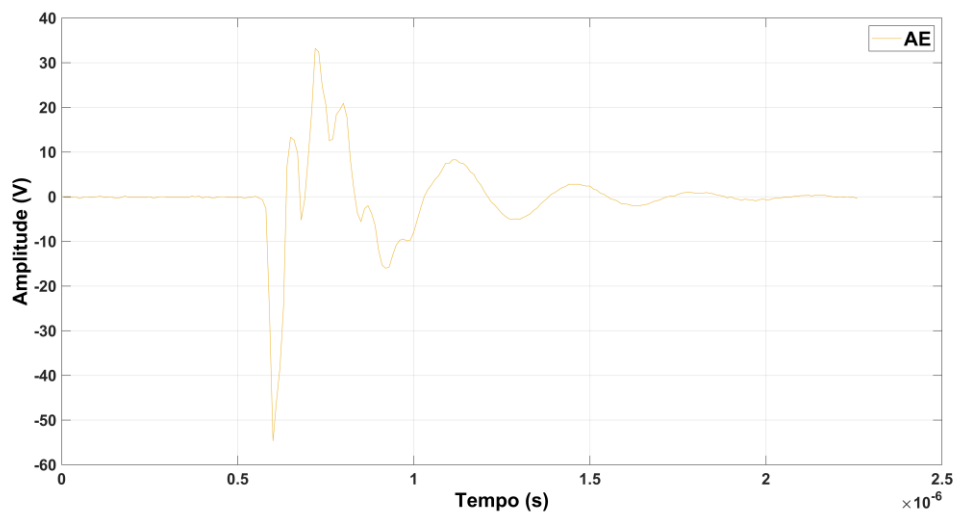
São apresentadas, nas Figuras 122, 123 e 124, amostras de sinal de corrente elétrica no domínio do tempo do transformador operando com uma descarga parcial no isolador, com um arco elétrico e operando sem falhas, respectivamente.

Figura 122 – Amostra de um sinal de corrente elétrica no domínio do tempo de uma descarga parcial no isolador.



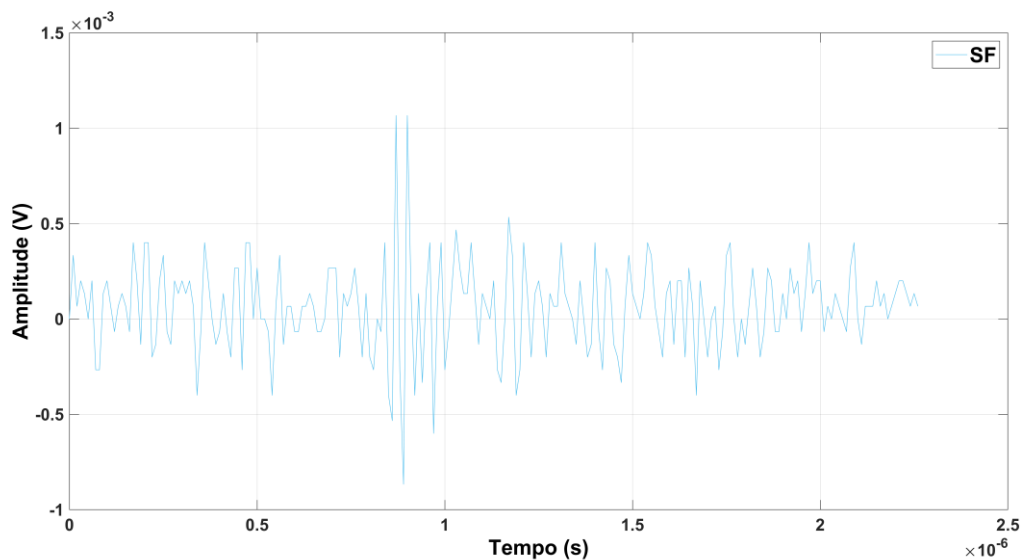
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 123 – Amostra de um sinal de corrente elétrica no domínio do tempo de um arco elétrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 124 – Amostra de um sinal de corrente elétrica no domínio do tempo do transformador operando sem falha.



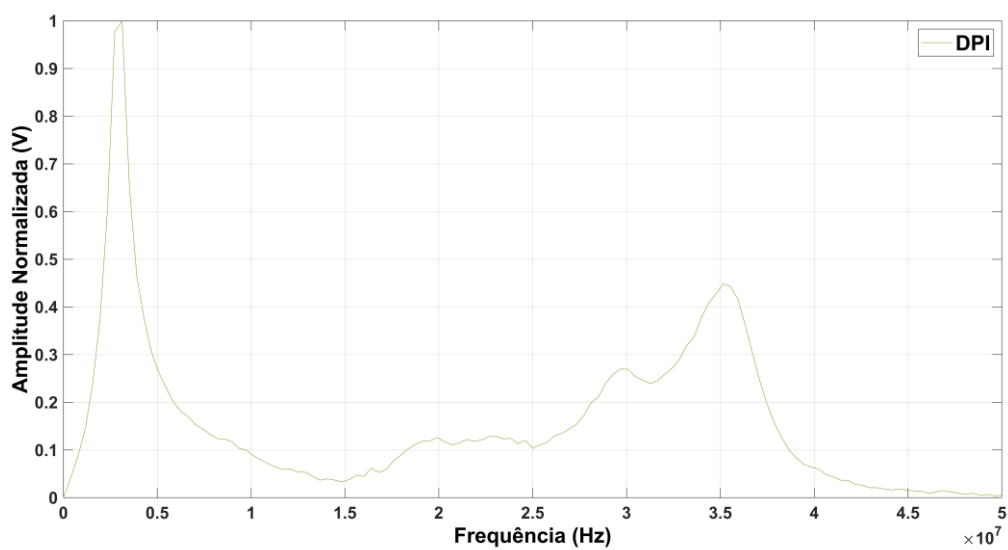
Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando os sinais no domínio do tempo, observa-se que ambas as falhas apresentam um caráter impulsivo. A descarga parcial no isolador (DPI) ocorre em um período curto, aproximadamente entre 0,3 e 1,2 μ s. A amplitude da corrente varia

significativamente, alcançando picos de cerca de $\pm 0,7$ V. A amplitude da corrente oscila rapidamente devido à descarga elétrica que não percorre todo o isolador, criando picos de corrente que gradualmente se dissipam. O gráfico correspondente ao arco elétrico mostra um sinal de uma descarga que ocorre ao longo de um período um pouco mais longo, entre 0,4 e 1,5 μ s. A amplitude neste caso é muito menor, variando em torno de $\pm 0,0015$ V. As oscilações são contínuas, mas de baixa intensidade. O arco produz flutuações de corrente contínuas e instáveis devido à interação do plasma com o campo elétrico, o que explica as oscilações contínuas de amplitude variável. Já o sinal do transformador operando sem falhas apresenta amplitude muito estável, variando ligeiramente em torno de $\pm 0,0005$ V. O sinal é uniforme e regular, com uma clara diminuição do ruído ao longo do tempo.

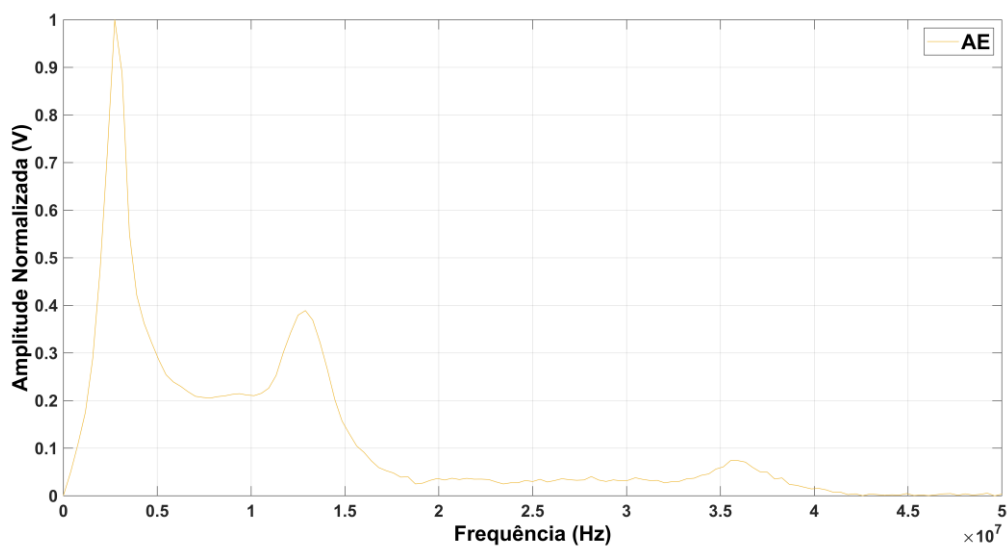
Os conteúdos espectrais dos três casos estudados são apresentados nas Figuras 125, 126 e 127, utilizando uma amostra de cada caso e normalizando os resultados. Na descarga parcial no isolador, observa-se um pico na frequência de 3,1 MHz. No arco elétrico, o pico ocorre na frequência de 2,7 MHz. O espectro de frequência da descarga parcial no isolador é significativo entre 3,1 MHz e 35 MHz, enquanto o arco elétrico apresenta um espectro de frequência significativo entre 2,7 MHz e 12,8 MHz. Quando o transformador opera sem falhas, o espectro de frequência apresenta uma distribuição uniforme, característica de um ruído branco gaussiano.

Figura 125 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal de corrente elétrica de uma descarga parcial no isolador.



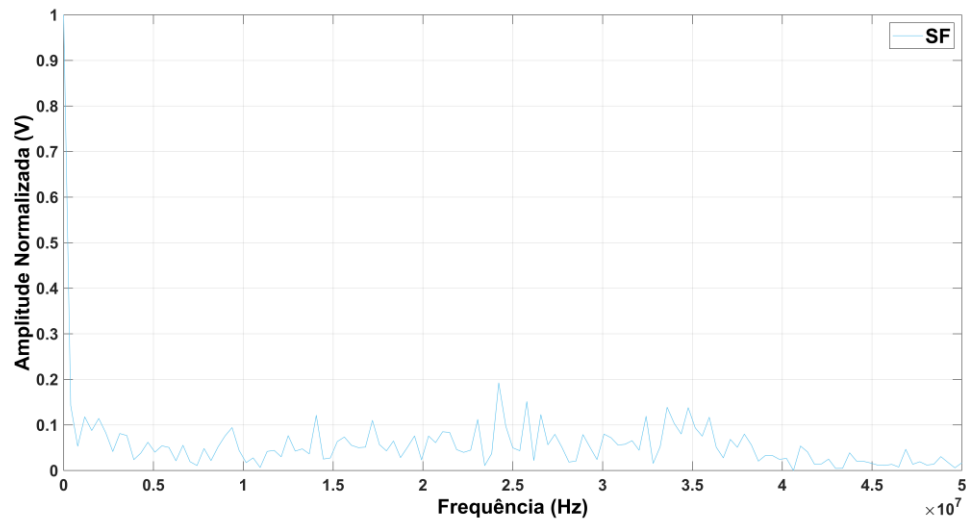
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 126 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal de corrente elétrica de um arco elétrico (AE).



Fonte: Elaborado pela autora.

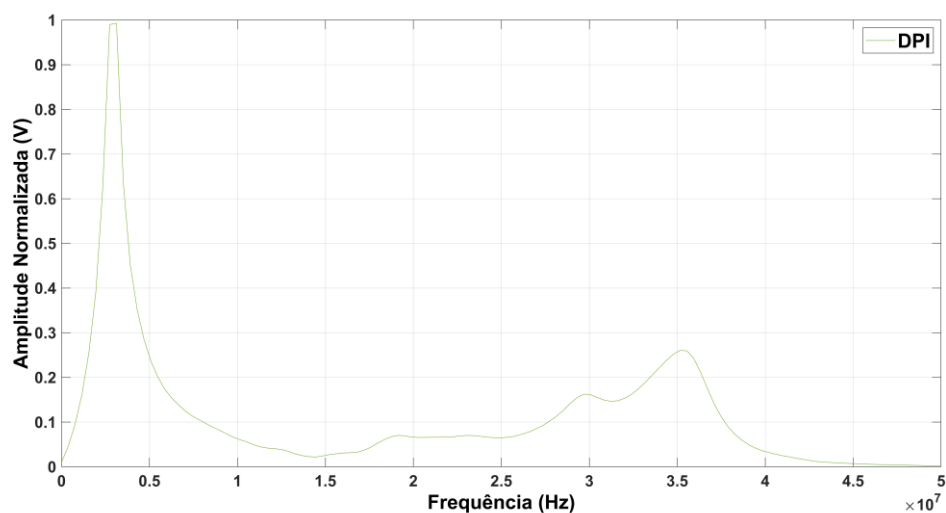
Figura 127 – Espectro de frequências de uma amostra de sinal de corrente elétrica do transformador operando sem falha.



Fonte: Elaborado pela autora.

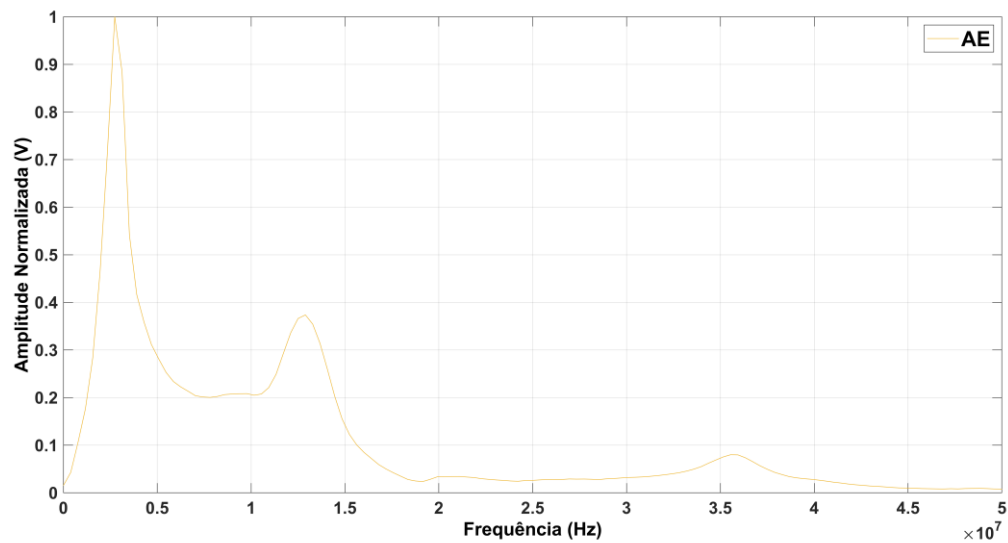
Para uma análise mais detalhada, tomou-se a média espectral do conjunto dos 200 sinais de cada tipo de falha estudada e dos 100 sinais do transformador operando sem falha, e normalizou-se os três resultados. São apresentados, nas Figuras 128, 129 e 130, os espectros de frequências médios de cada caso avaliado.

Figura 128 – Espectro médio do sinal de corrente elétrica de uma descarga parcial no isolador.



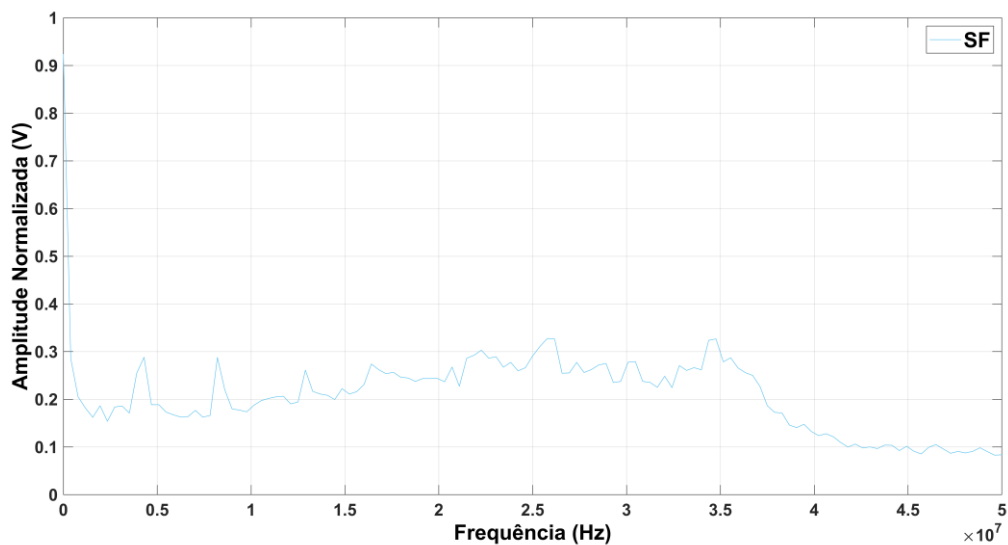
Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 129 – Espectro médio do sinal de corrente elétrica de um arco elétrico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 130 – Espectro médio do sinal de corrente elétrica do transformador operando sem falha.



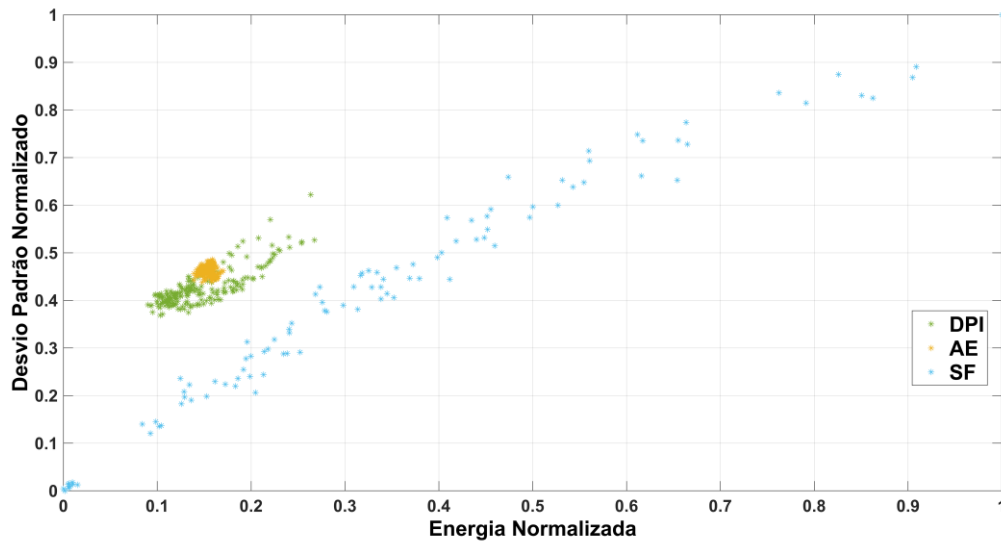
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 128 é apresentado que a maior parte da energia do sinal está concentrada nas frequências mais baixas, com um pico inicial significativo em 3,12 MHz. Há uma rápida diminuição na amplitude, com outro pequeno pico localizado em 35 MHz, e após isso as amplitudes tornam-se quase insignificantes. Na Figura 129,

observa-se um padrão semelhante ao da descarga parcial no isolador, com a energia concentrada nas baixas frequências e um pico inicial em 2,73 MHz. A presença de picos nas baixas frequências indica a natureza impulsiva do sinal do arco elétrico, mas com mais energia em comparação à descarga parcial. Há também um pico notável por volta de 12,89 MHz. Na Figura 130 ilustra-se um caso típico de ruído branco gaussiano. O conteúdo espectral de um ruído branco gaussiano é caracterizado por uma densidade espectral de potência que é constante ao longo de todas as frequências. Isso significa que todas as frequências dentro da faixa analisada possuem a mesma potência, e as amplitudes das componentes de frequência são distribuídas de acordo com uma distribuição normal (gaussiana), o que implica que a maior parte das amostras terá valores próximos da média, com poucas amostras assumindo valores extremos.

Para a análise da Combinação de estatísticas, efetuou-se o cruzamento de um conjunto de parâmetros estatísticos e espectrais após sua normalização, permitindo a comparação inicial entre duas e, e um segundo momento, entre três variáveis simultaneamente.

Figura 131 – Cruzamento entre Energia e Desvio Padrão normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



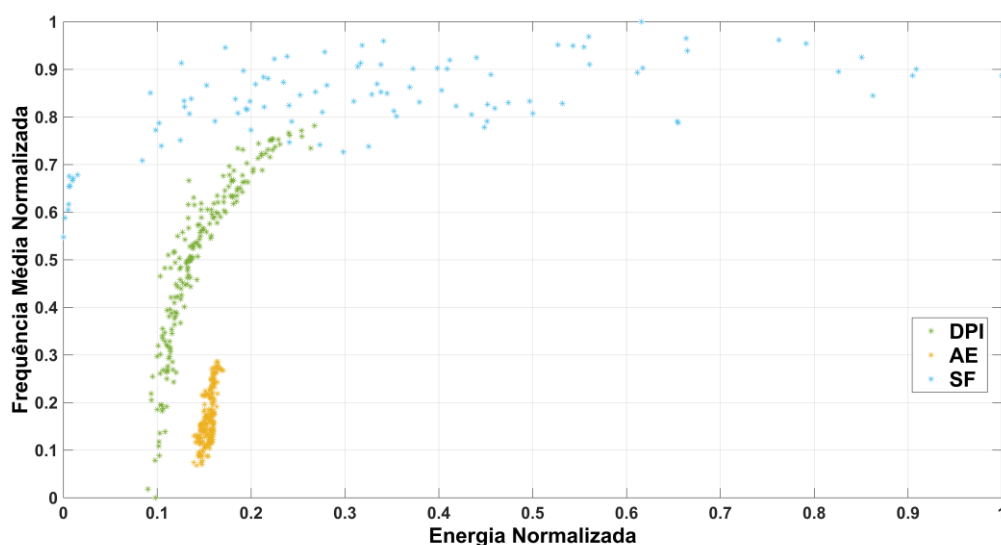
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Desvio Padrão é ilustrado na Figura 131. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, e o Desvio Padrão de 0,36 a 0,62. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17 e do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e o Desvio Padrão variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 80 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Desvio Padrão

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0377
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1952
Arco elétrico e operação sem falha	0,1935

Figura 132 – Cruzamento entre Energia e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



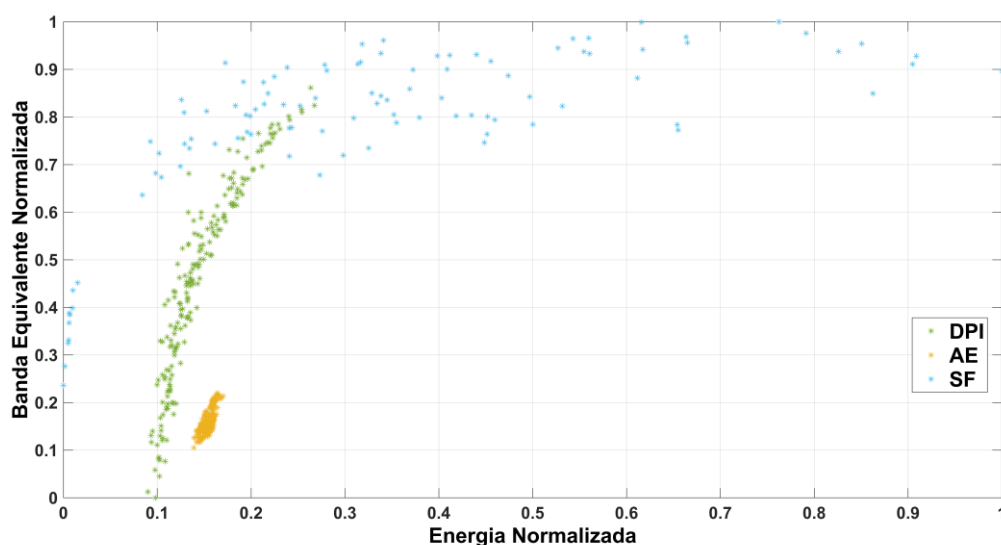
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Frequência Média é ilustrado na Figura 132. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26, e a Frequência Média variou entre 0 e 0,78. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,13 a 0,17, e a Frequência Média variou entre 0,06 e 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Frequência Média variou entre 0,55 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 81 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3288
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3907
Arco elétrico e operação sem falha	0,6931

Figura 133 – Cruzamento entre Energia e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



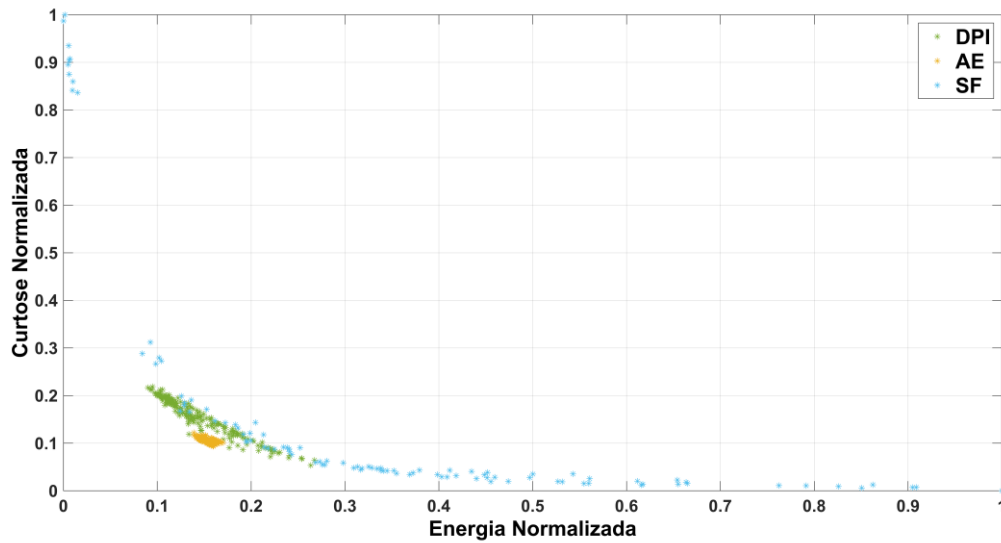
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Banda Equivalente se apresenta na Figura 133. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, e a Banda Equivalente de 0 a 0,86. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17, e da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 82 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2931
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3903
Arco elétrico e operação sem falha	0,6583

Figura 134 – Cruzamento entre Energia e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



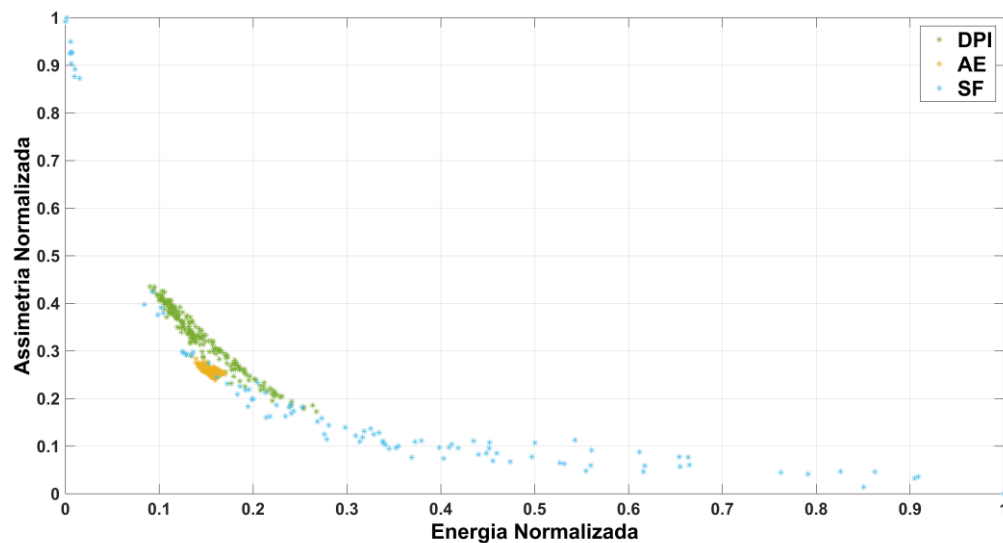
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Curtose é ilustrado na Figura 134. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17 e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 83 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0495
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1948
Arco elétrico e operação sem falha	0,1941

Figura 135 – Cruzamento entre Energia e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



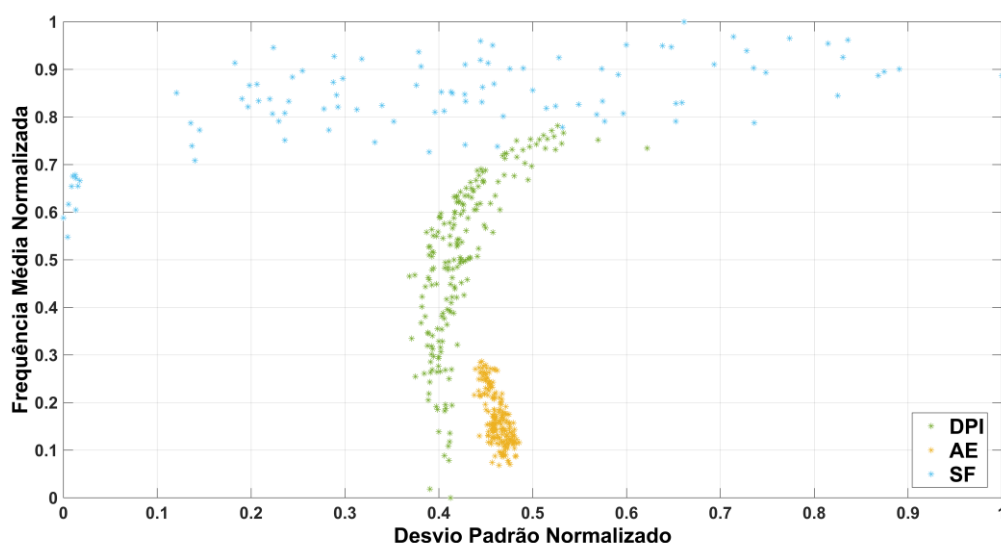
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia e Assimetria é ilustrado na Figura 135. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26, e a Assimetria variou entre 0,17 e 0,43. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,13 a 0,17, e a Assimetria variou entre 0,23 e 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 84 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0706
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2211
Arco elétrico e operação sem falha	0,1901

Figura 136 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



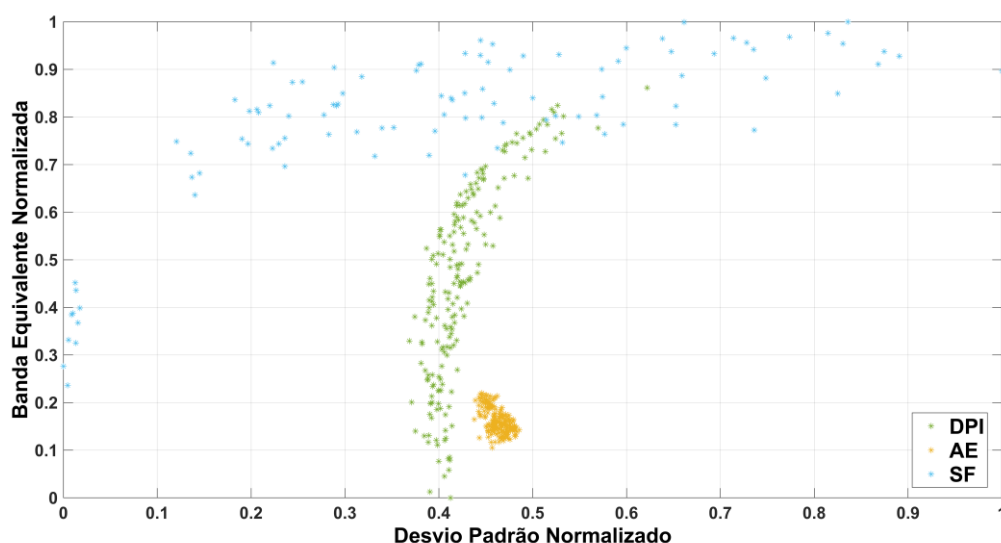
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Frequência Média se apresenta na Figura 136. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, e a Frequência Média de 0 a 0,78. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48, e da Frequência Média entre 0,06 e 0,28. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Frequência Média variou entre 0,54 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 85 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3308
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3390
Arco elétrico e operação sem falha	0,6693

Figura 137 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



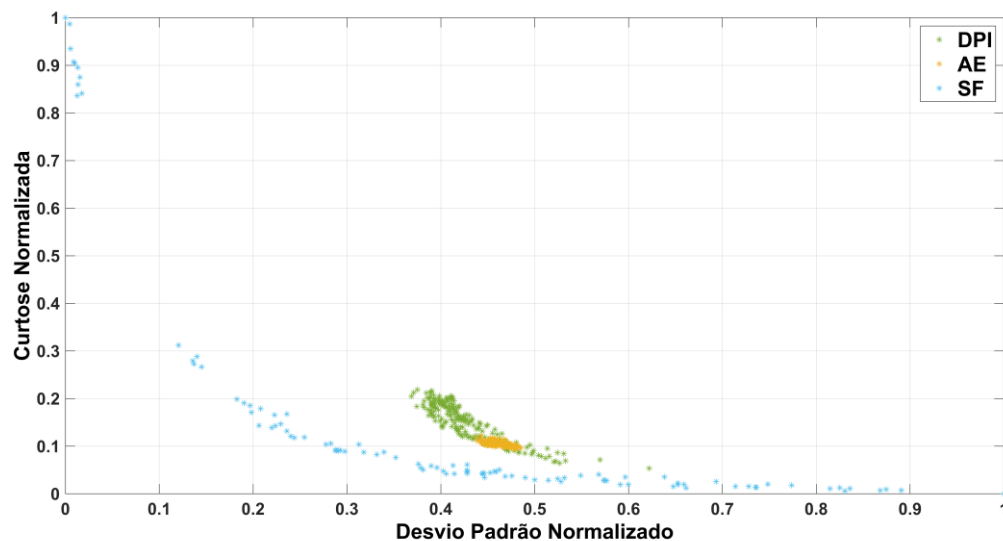
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 137. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, e a Banda Equivalente de 0 a 0,86. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48 e da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 86 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2953
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3384
Arco elétrico e operação sem falha	0,6332

Figura 138 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



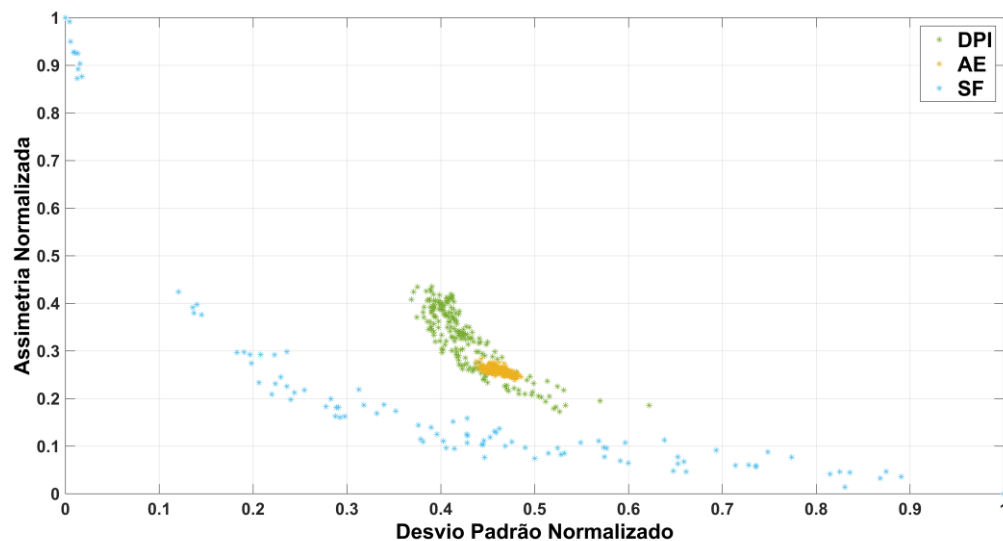
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Curtose é ilustrado na Figura 138. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,36 a 0,62, e a Curtose variou entre 0,05 e 0,21. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,43 a 0,48, e a Curtose variou entre 0,09 e 0,12. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 87 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0612
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,0134
Arco elétrico e operação sem falha	0,0720

Figura 139 – Cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



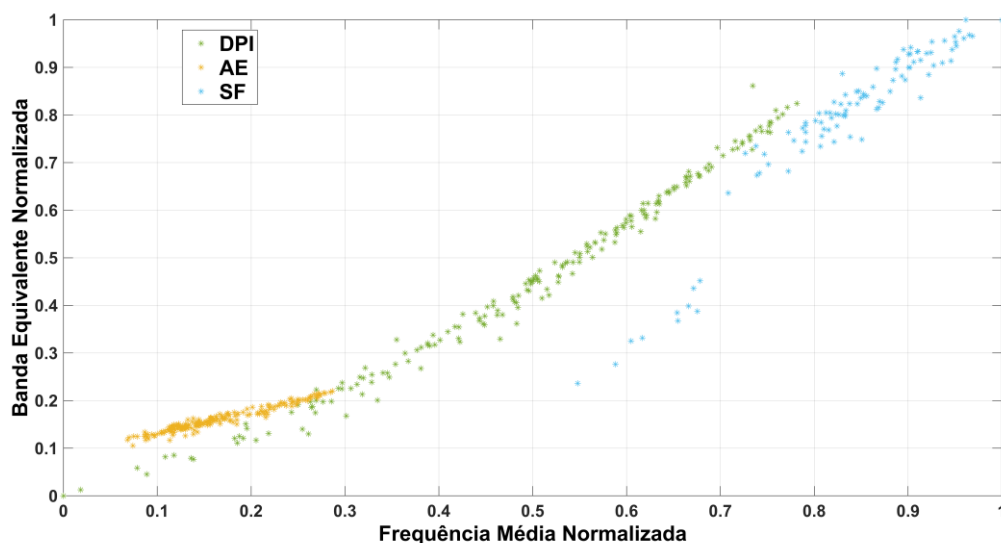
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão e Assimetria se apresenta na Figura 139. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48, e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 88 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0793
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1054
Arco elétrico e operação sem falha	0,0606

Figura 140 – Cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



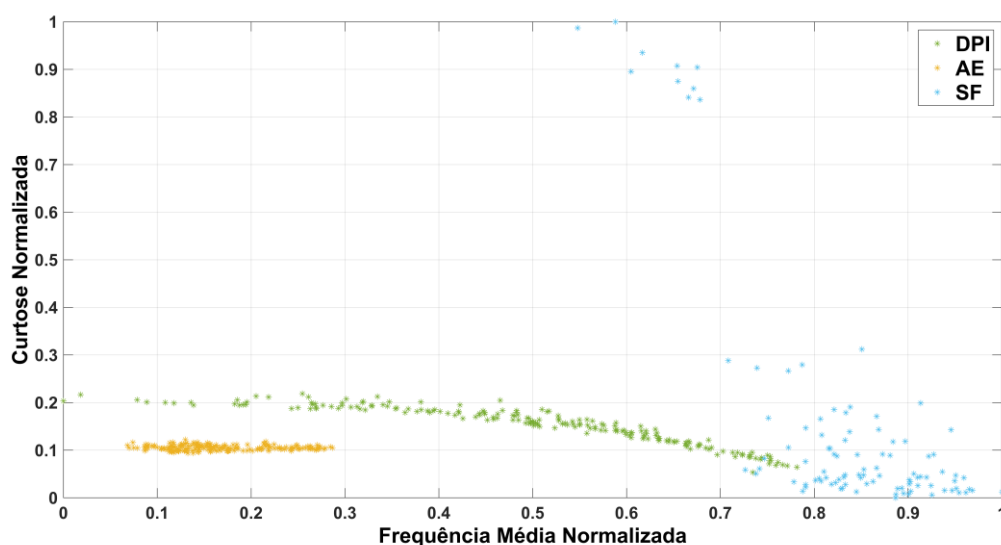
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 140. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,78, e a Banda Equivalente de 0 a 0,86. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,06 e 0,28 e da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,54 a 1, e a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 89 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4404
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4786
Arco elétrico e operação sem falha	0,9186

Figura 141 – Cruzamento entre Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



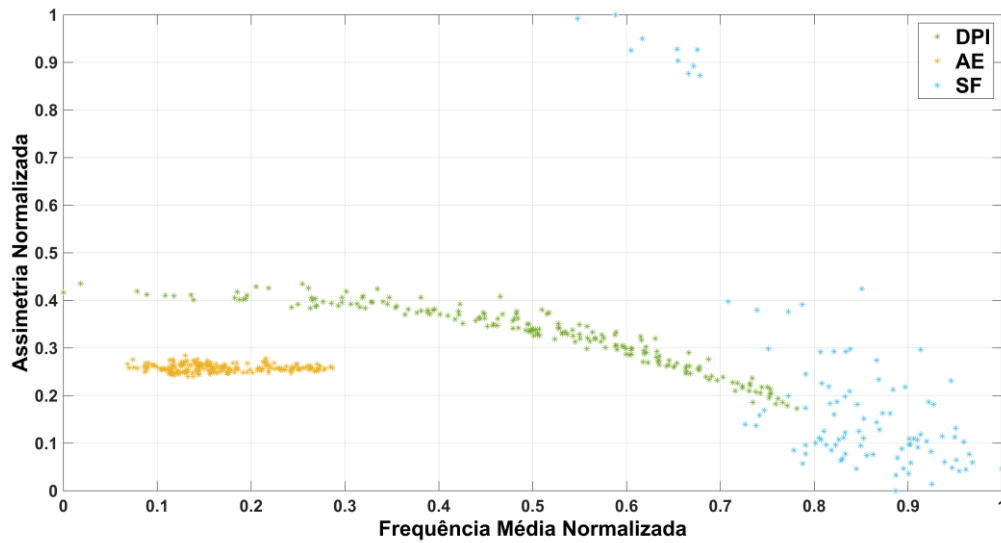
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 141. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou de 0 a 0,78, e a Curtose variou entre 0,05 e 0,21. Para o arco elétrico a Frequência Média variou de 0,06 a 0,28, e a Curtose variou entre 0,09 e 0,12. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,54 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 90 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3323
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3387
Arco elétrico e operação sem falha	0,6695

Figura 142 – Cruzamento entre Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



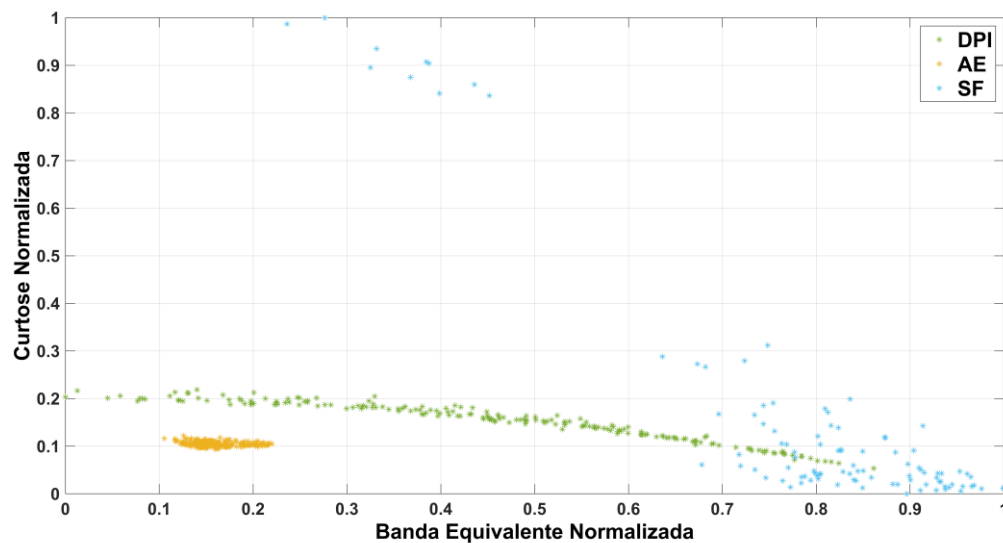
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média e Assimetria se apresenta na Figura 142. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,78, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,06 e 0,28, e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,54 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 91 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3361
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3545
Arco elétrico e operação sem falha	0,6683

Figura 143 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



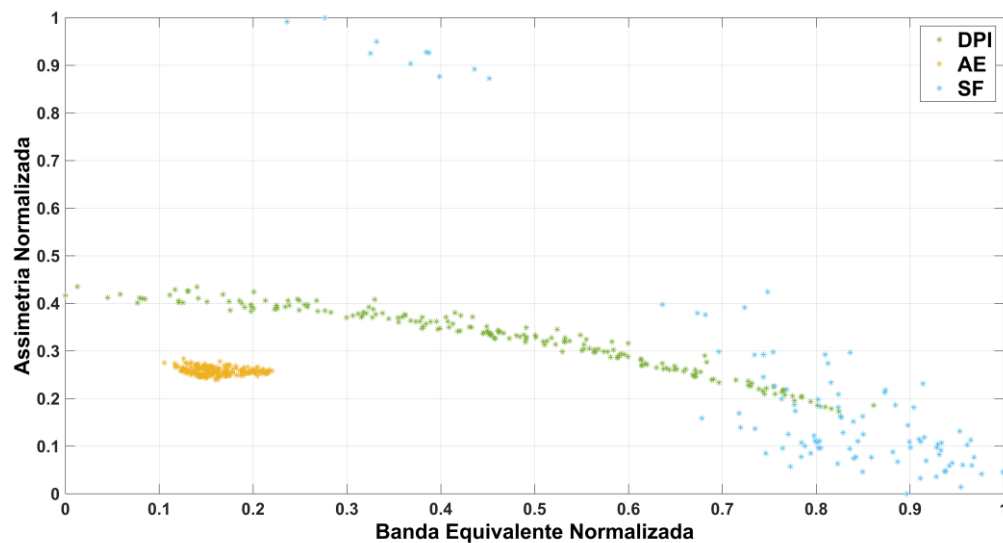
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente e Curtose é ilustrado na Figura 143. Na descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente sofreu variação de 0 a 0,86, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22 e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,23 a 1, e a Curtose variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 92 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2970
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3382
Arco elétrico e operação sem falha	0,6333

Figura 144 – Cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



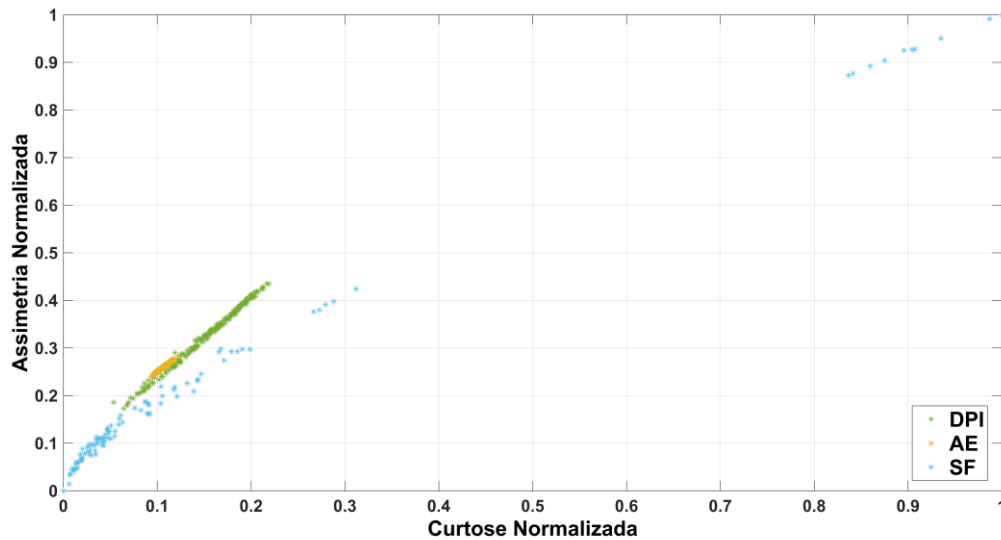
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 144. Para a descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente variou de 0 a 0,86, e a Assimetria variou entre 0,17 e 0,43. Para o arco elétrico a Banda Equivalente variou de 0,10 a 0,22, e a Assimetria variou entre 0,23 e 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,23 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 93 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3013
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3540
Arco elétrico e operação sem falha	0,6321

Figura 145 – Cruzamento entre Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Curtose e Assimetria se apresenta na Figura 145. Na descarga parcial no isolador, a Curtose sofreu variação de 0,05 a 0,21, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação da Curtose entre 0,09 e 0,12, e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, a Curtose variou de 0 a 1, e a Assimetria variou entre 0 e 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

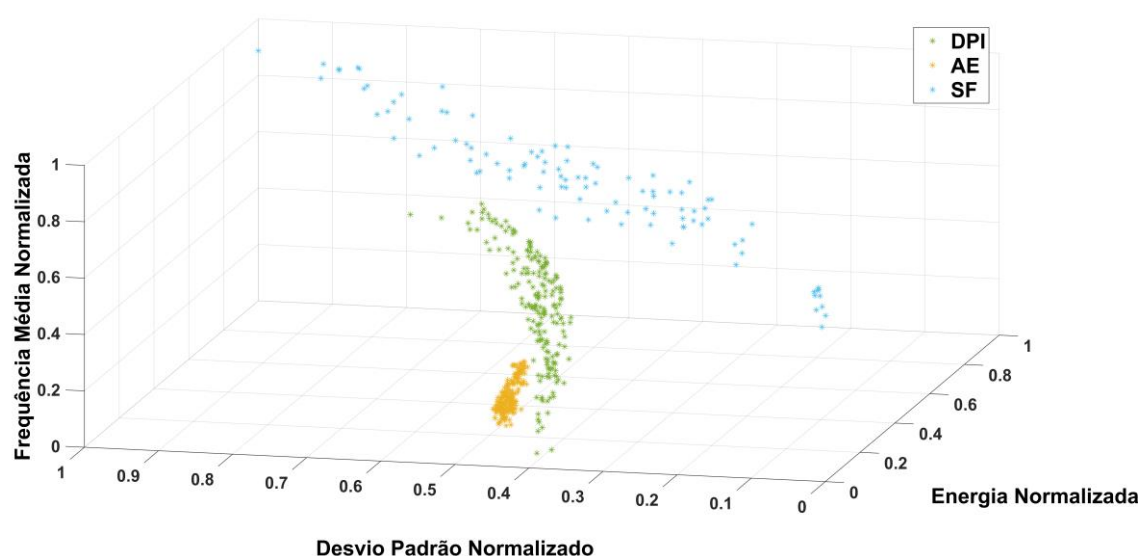
Tabela 94 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0855
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1047
Arco elétrico e operação sem falha	0,0624

Observa-se que os cruzamentos bidimensionais foram eficazes em duas situações distintas. As combinações entre Energia e Desvio Padrão; Desvio Padrão e Curtose; Desvio Padrão e Assimetria; e Frequência Média e Banda Equivalente foram

eficientes apenas para a identificação da ocorrência de alguma falha. Nenhuma combinação foi eficaz na detecção e classificação das falhas simultaneamente, visto que não houve nenhum caso em que clusters com áreas bem definidas e sem sobreposição de pontos foram observados.

Figura 86 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



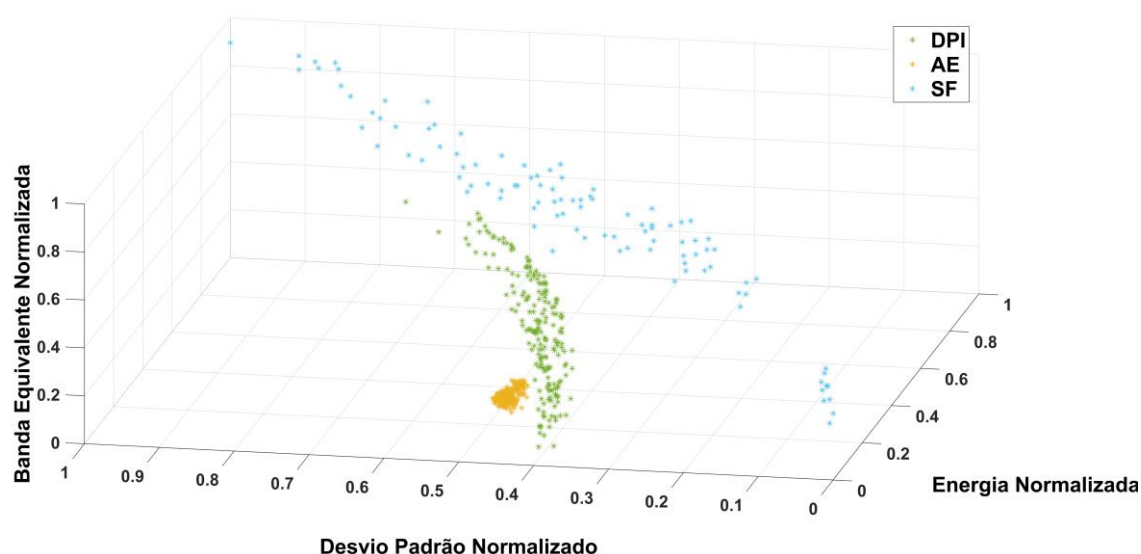
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média é ilustrado na Figura 146. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26, o Desvio Padrão variou entre 0,36 e 0,62, e a Frequência Média variou de 0 a 0,78. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,13 a 0,17, o Desvio Padrão variou entre 0,43 e 0,48 e a Frequência Média variou de 0,06 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0 e 1 e a Frequência Média variou de 0,54 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 95 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3309
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3910
Arco elétrico e operação sem falha	0,6949

Figura 147 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



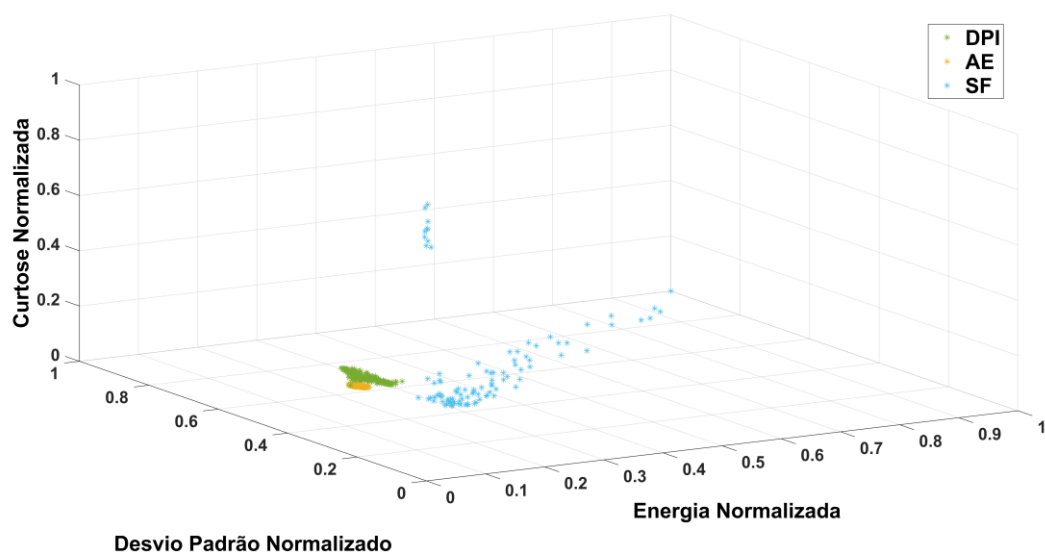
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente é ilustrado na Figura 147. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, o Desvio Padrão de 0,36 a 0,62, e a Banda Equivalente de 0 a 0,86. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17, do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48 e da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,23 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 96 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2954
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3905
Arco elétrico e operação sem falha	0,6602

Figura 148 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



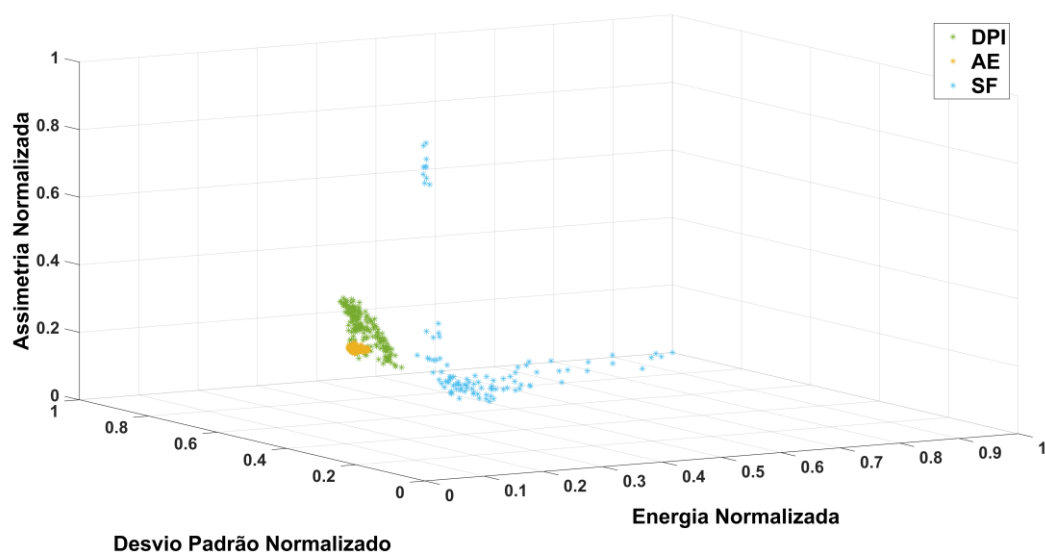
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 148 ilustra-se o cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Curtose. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26, o Desvio Padrão variou entre 0,36 e 0,62, e a Curtose variou de 0,05 a 0,21. Para o arco elétrico a Energia sofreu variação de 0,13 a 0,17, o Desvio Padrão de 0,43 e 0,48 e a Curtose de 0,09 a 0,12. Finalmente, para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou de 0 a 1 e a Curtose variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 97 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0617
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1953
Arco elétrico e operação sem falha	0,2004

Figura 149 – Cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



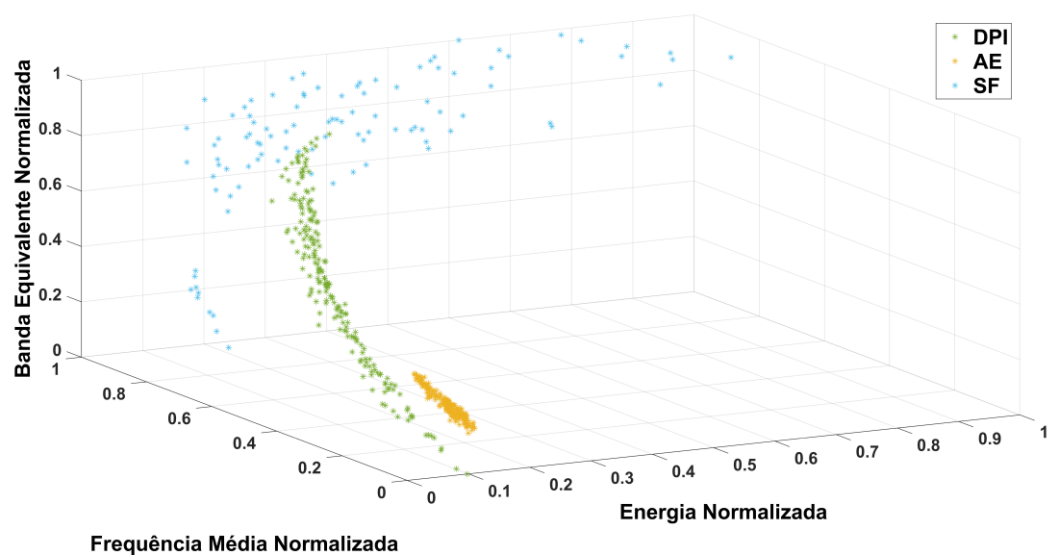
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria é ilustrado na Figura 149. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26 o Desvio Padrão variou entre 0,36 e 0,62, e a Assimetria variou de 0,17 a 0,43. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,13 a 0,17, o Desvio Padrão variou entre 0,43 e 0,48 e a Assimetria variou de 0,23 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, o Desvio Padrão variou entre 0 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 98 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Desvio Padrão e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0797
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2215
Arco elétrico e operação sem falha	0,1965

Figura 150 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



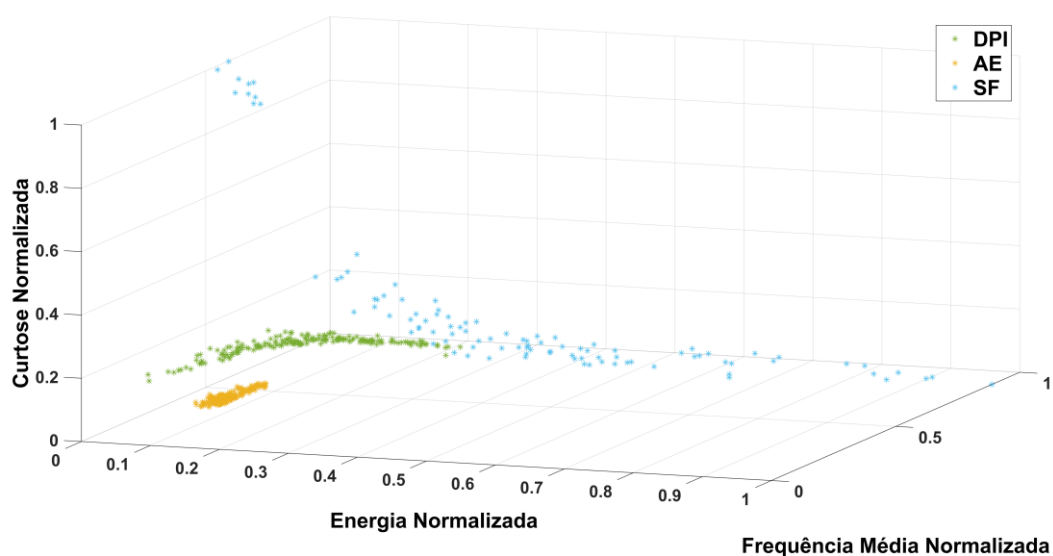
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente se apresenta na Figura 150. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, a Frequência Média de 0 a 0,78, e a Banda Equivalente de 0 a 0,86. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17, da Frequência Média entre 0,06 e 0,28 e da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,54 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,23 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 99 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4404
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5168
Arco elétrico e operação sem falha	0,9375

Figura 151 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



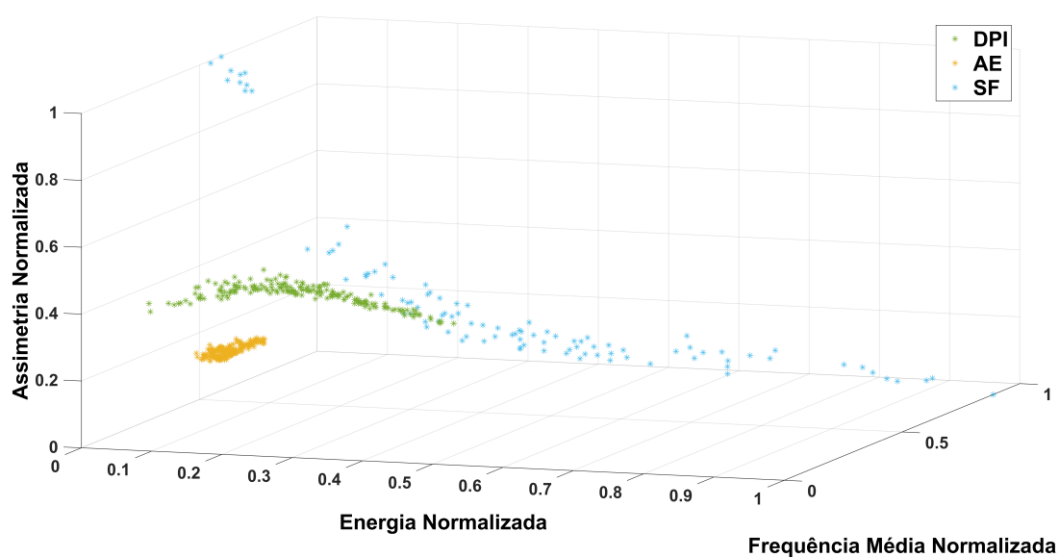
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 151. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, a Frequência Média de 0 a 0,78, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17, da Frequência Média entre 0,06 e 0,28 e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,54 e 1 e a Curtose variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 100 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3324
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3908
Arco elétrico e operação sem falha	0,6951

Figura 152 – Cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



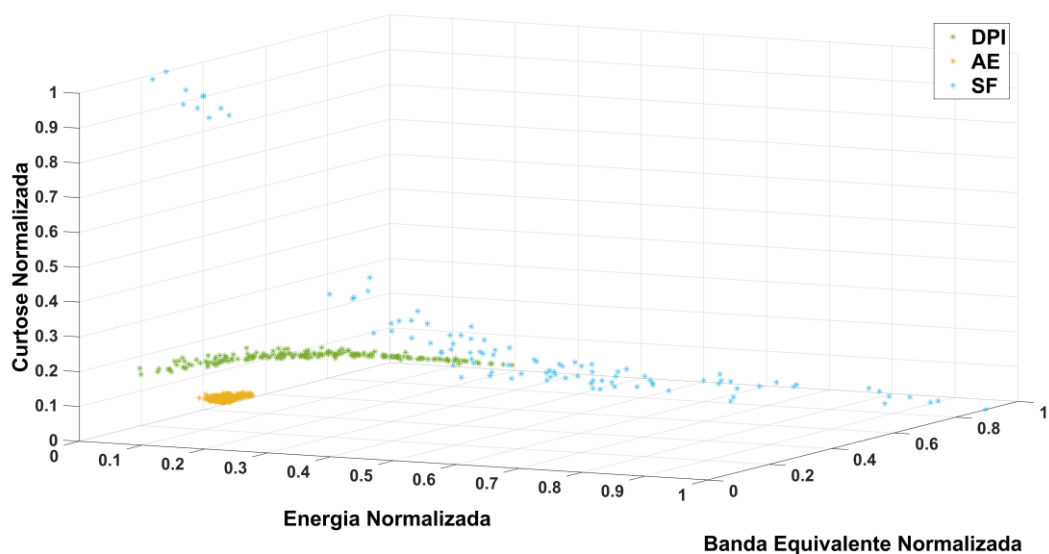
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Frequência Média e Assimetria é ilustrado na Figura 152. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26, a Frequência Média variou entre 0 e 0,78, e a Assimetria variou de 0,17 a 0,43. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,13 a 0,17, a Frequência Média variou entre 0,06 e 0,28 e a Assimetria variou de 0,23 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,54 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 101 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3362
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4045
Arco elétrico e operação sem falha	0,6940

Figura 153 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



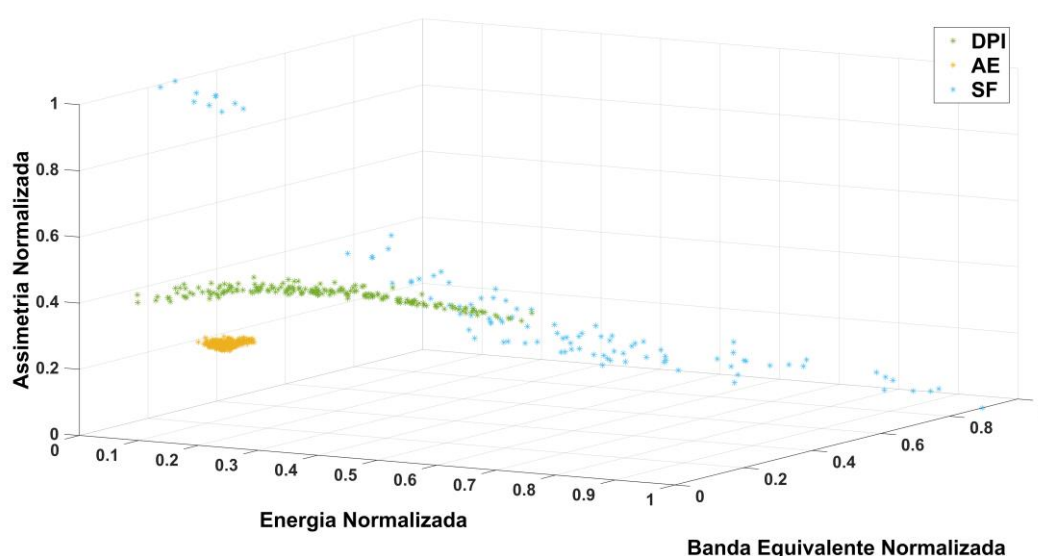
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 153. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, a Banda Equivalente de 0 a 0,86, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17, da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22 e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1 e a Curtose variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 102 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2972
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3903
Arco elétrico e operação sem falha	0,6603

Figura 154 – Cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



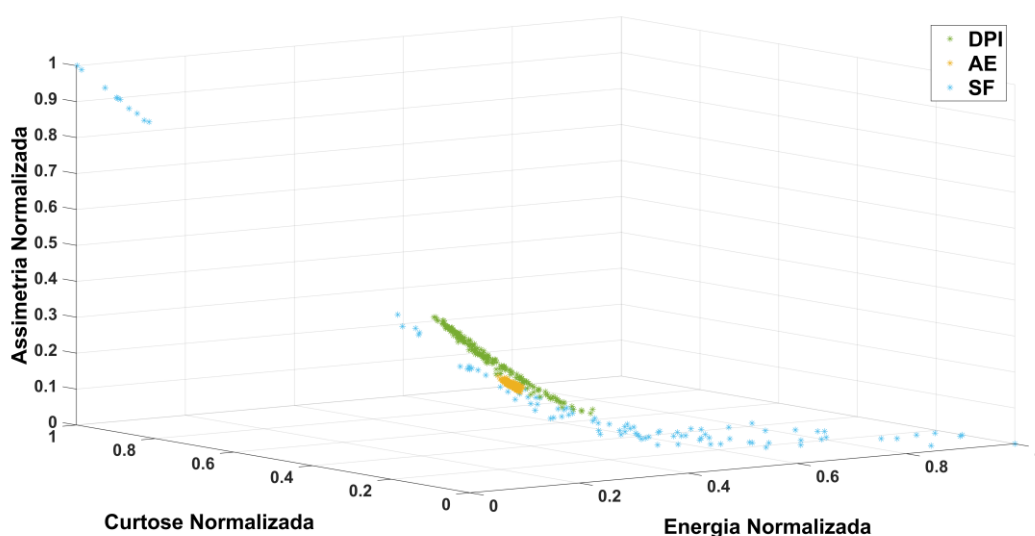
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 154. Na descarga parcial no isolador, a Energia sofreu variação de 0,09 a 0,26, a Banda Equivalente de 0 a 0,86, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação da Energia entre 0,13 e 0,17, da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22 e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 103 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3014
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4041
Arco elétrico e operação sem falha	0,6592

Figura 155 – Cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



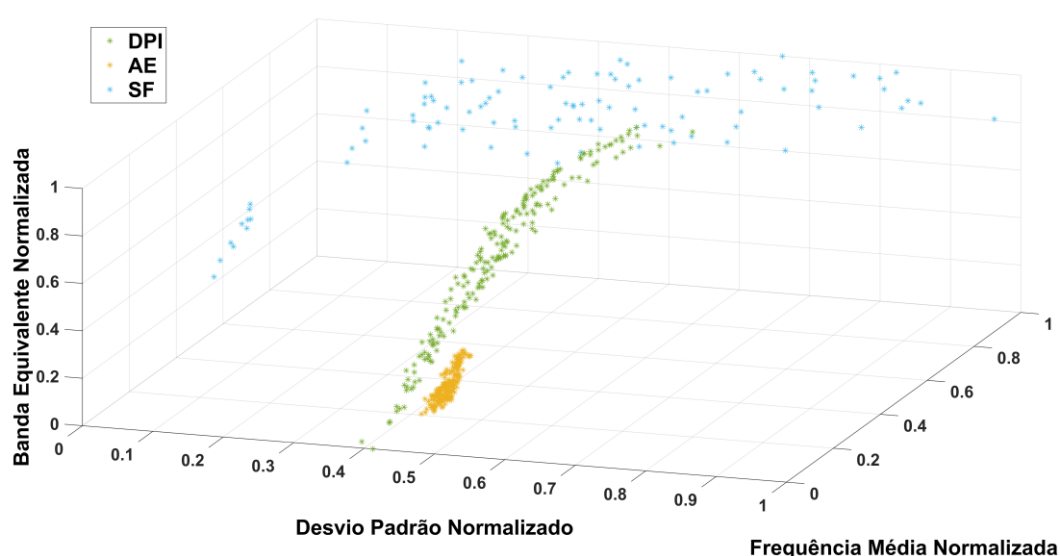
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Energia, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 155. Para a descarga parcial no isolador, a Energia variou de 0,09 a 0,26, a Curtose variou entre 0,05 e 0,21, e a Assimetria variou de 0,17 a 0,43. Para o arco elétrico a Energia variou de 0,13 a 0,17, a Curtose variou entre 0,09 e 0,12 e a Assimetria variou de 0,23 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Energia variou de 0 a 1, a Curtose variou entre 0 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 104 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Energia, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0859
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2211
Arco elétrico e operação sem falha	0,1971

Figura 156 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



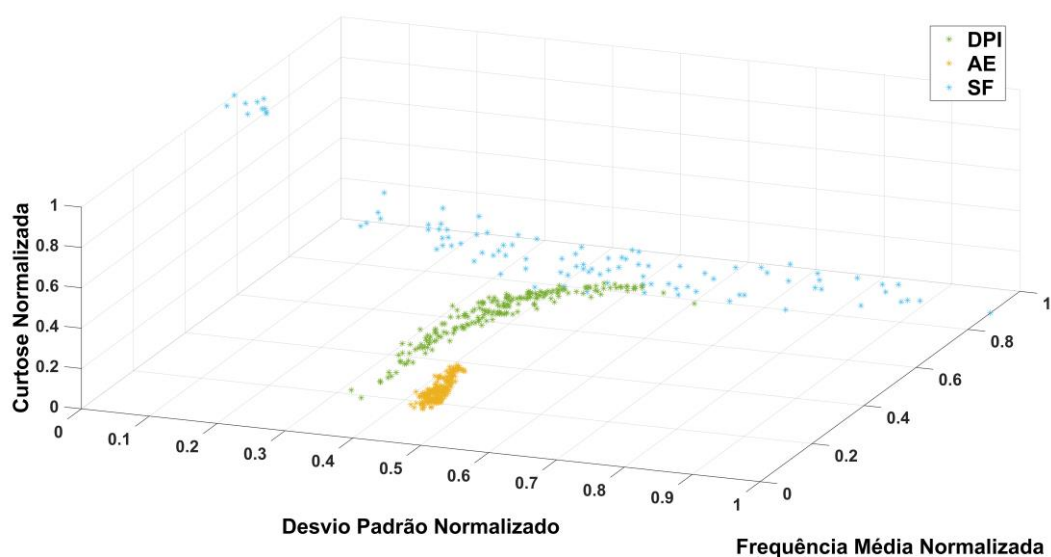
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente se apresenta na Figura 156. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, a Frequência Média de 0 a 0,78, e a Banda Equivalente de 0 a 0,86. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48, da Frequência Média entre 0,06 e 0,28 e da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,54 e 1 e a Banda Equivalente variou de 0,23 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 105 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4419
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4788
Arco elétrico e operação sem falha	0,9200

Figura 157 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



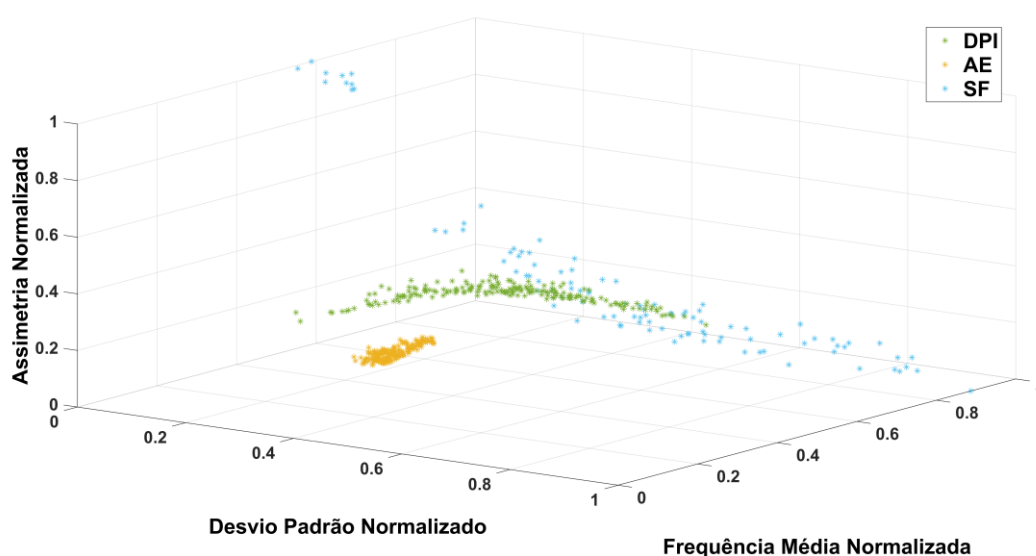
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose é ilustrado na Figura 157. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, a Frequência Média de 0 a 0,78, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48, da Frequência Média entre 0,06 e 0,28, e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,54 e 1 e a Curtose variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 106 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3344
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3390
Arco elétrico e operação sem falha	0,6713

Figura 158 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



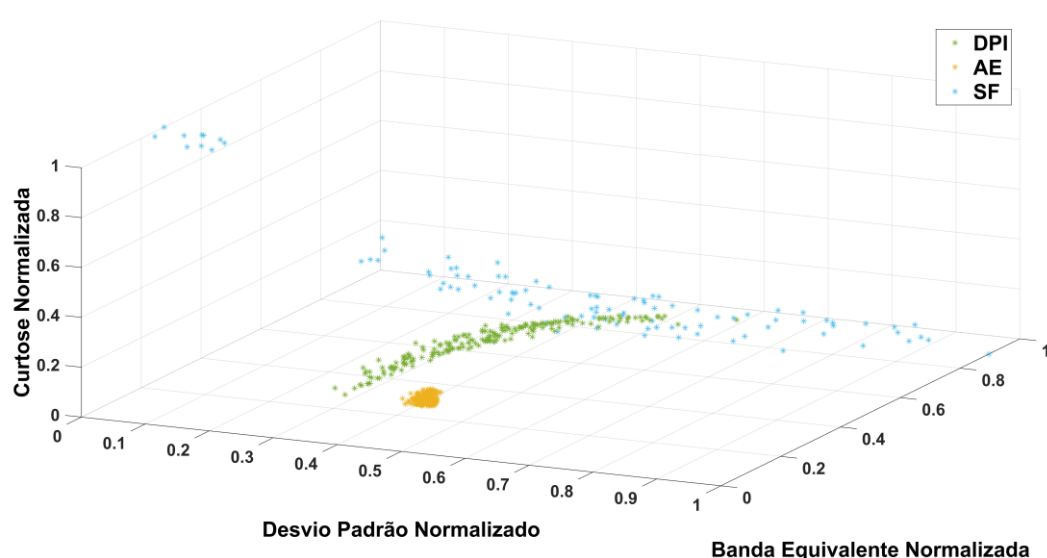
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria é ilustrado na Figura 158. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,36 a 0,62, a Frequência Média variou entre 0 e 0,78, e a Assimetria variou de 0,17 a 0,43. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,43 a 0,48, a Frequência Média variou entre 0,06 e 0,28 e a Assimetria variou de 0,23 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Frequência Média variou entre 0,54 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 107 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3382
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3547
Arco elétrico e operação sem falha	0,6702

Figura 159 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



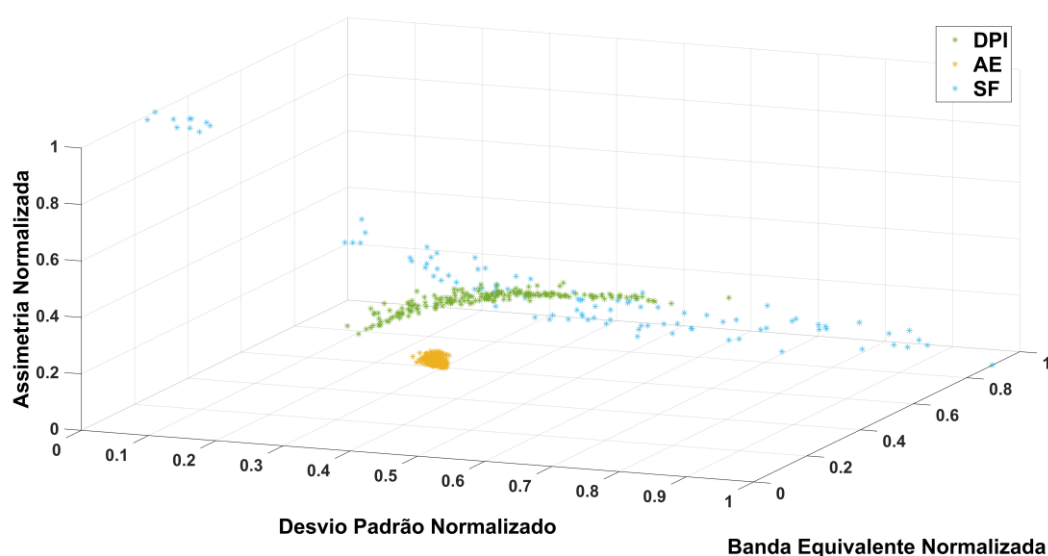
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 159. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, a Banda Equivalente de 0 a 0,86, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48, da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22 e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1 e a Curtose variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 108 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2993
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3385
Arco elétrico e operação sem falha	0,6353

Figura 160 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



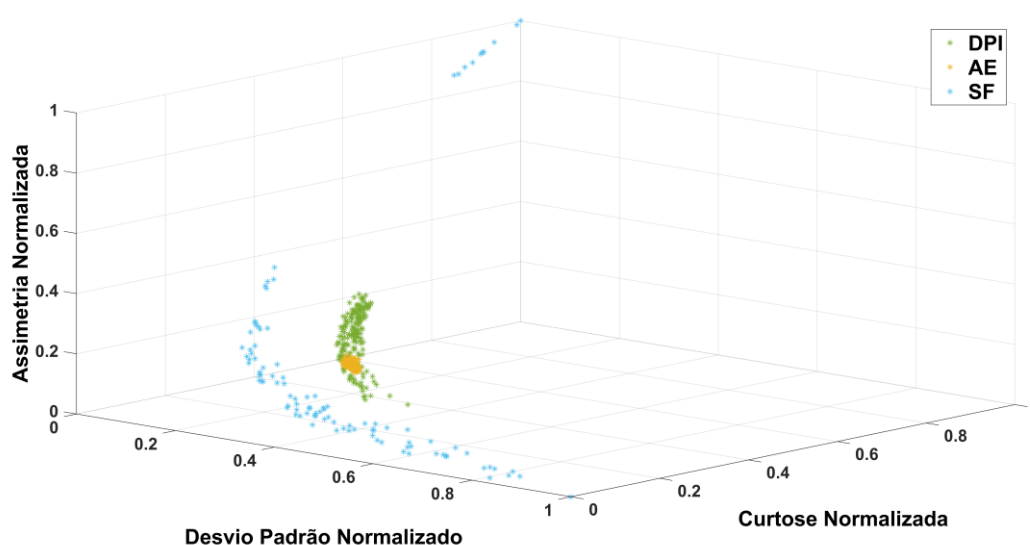
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 160. Na descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão sofreu variação de 0,36 a 0,62, a Banda Equivalente de 0 a 0,86, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação do Desvio Padrão entre 0,43 e 0,48, da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22, e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 109 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3035
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3542
Arco elétrico e operação sem falha	0,6341

Figura 161 – Cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



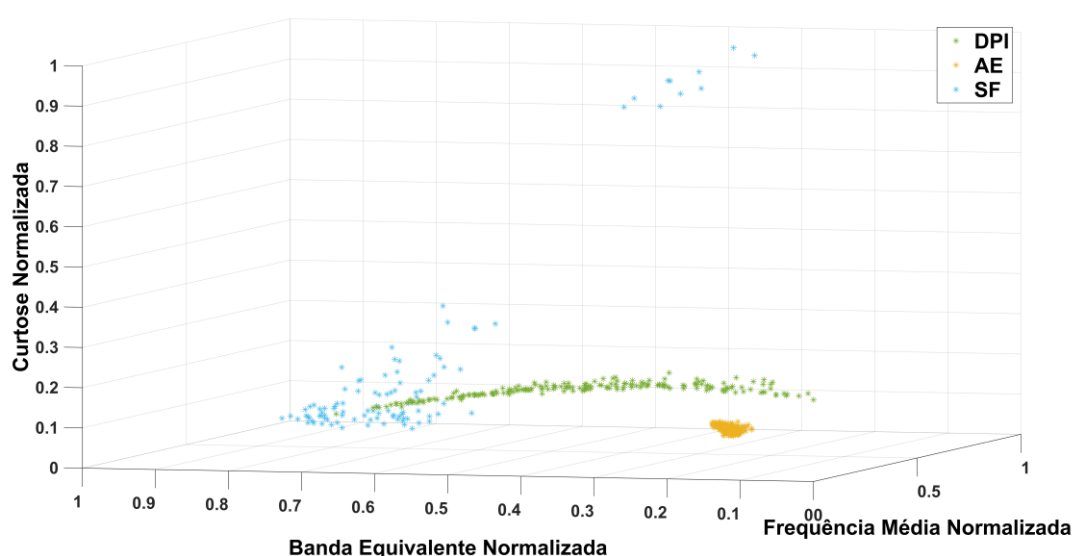
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 161. Para a descarga parcial no isolador, o Desvio Padrão variou de 0,36 a 0,62, a Curtose variou entre 0,05 e 0,21, e a Assimetria variou de 0,17 a 0,43. Para o arco elétrico o Desvio Padrão variou de 0,43 a 0,48, a Curtose variou entre 0,09 e 0,12 e a Assimetria variou de 0,23 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, o Desvio Padrão variou de 0 a 1, a Curtose variou entre 0 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 110 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0931
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1055
Arco elétrico e operação sem falha	0,0798

Figura 162 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



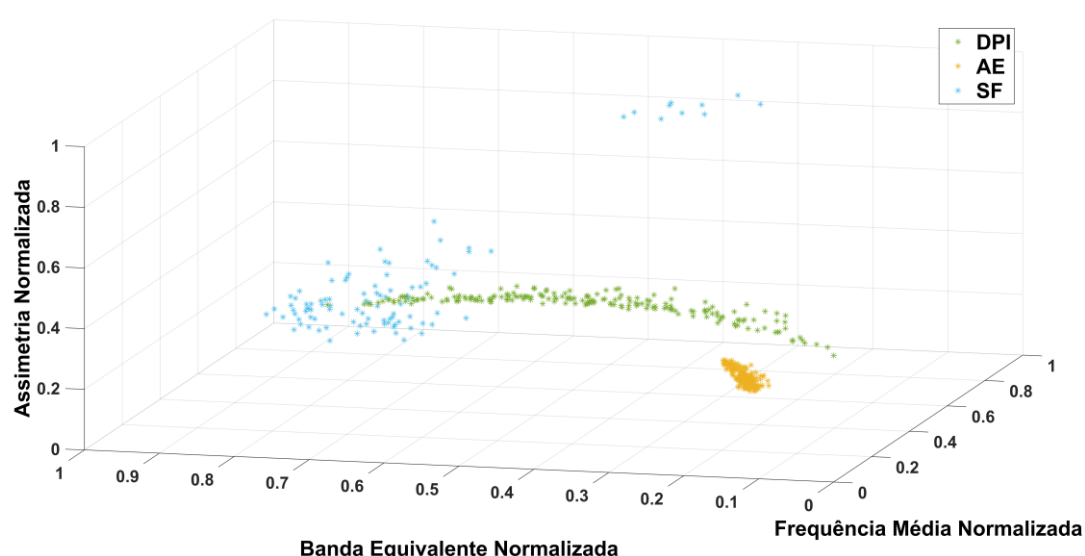
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose se apresenta na Figura 162. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,78, a Banda Equivalente de 0 a 0,86, e a Curtose de 0,05 a 0,21. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,06 e 0,28, da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22 e da Curtose entre 0,09 e 0,12. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,54 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1 e a Curtose variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 111 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4431
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4787
Arco elétrico e operação sem falha	0,9201

Figura 163 – Cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



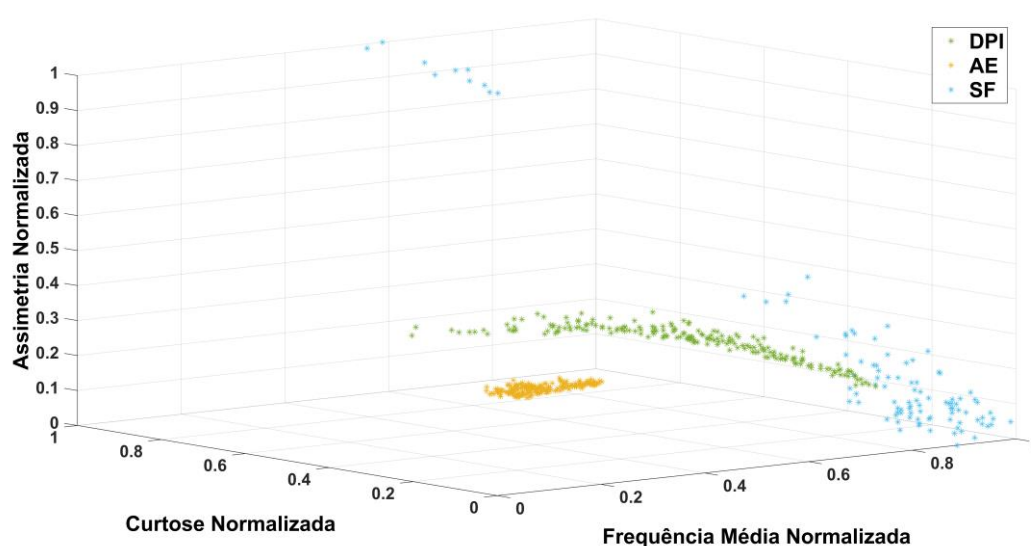
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria é ilustrado na Figura 163. Na descarga parcial no isolador, a Frequência Média sofreu variação de 0 a 0,78, a Banda Equivalente de 0 a 0,86, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação da Frequência Média entre 0,06 e 0,28, da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22, e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,54 a 1, a Banda Equivalente variou entre 0,23 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 112 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,4459
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4899
Arco elétrico e operação sem falha	0,9193

Figura 164 – Cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



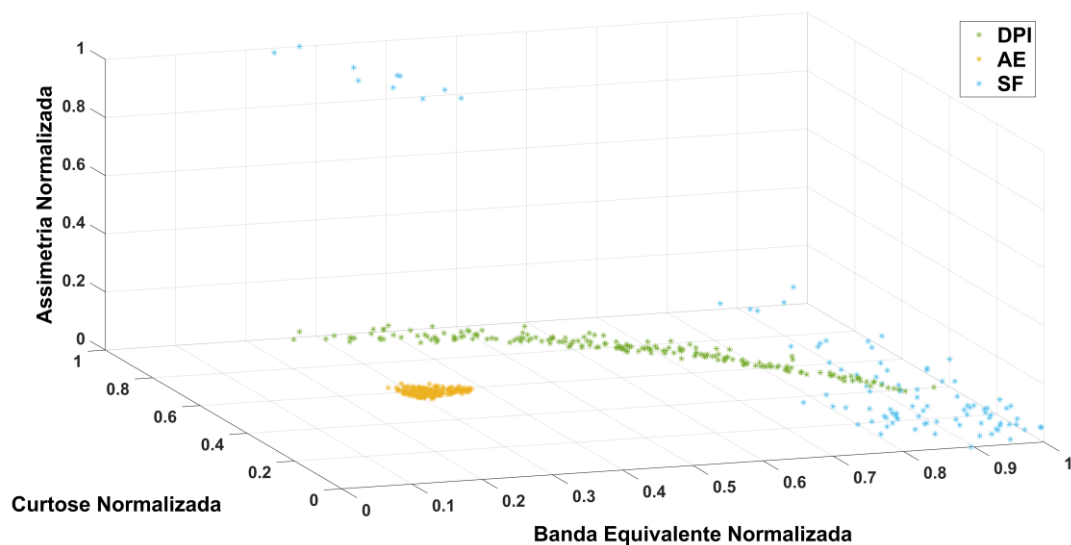
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Frequência Média, Curtose e Assimetria é ilustrado na Figura 164. Para a descarga parcial no isolador, a Frequência Média variou de 0 a 0,78, a Curtose variou entre 0,05 e 0,21, e a Assimetria variou de 0,17 a 0,43. Para o arco elétrico a Frequência Média variou de 0,06 a 0,28, a Curtose variou entre 0,09 e 0,12 e a Assimetria variou de 0,23 a 0,28. Já para o transformador operando sem falha, a Frequência Média variou de 0,54 a 1, a Curtose variou entre 0 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 113 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Frequência Média, Curtose e Assimetria

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3397
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3545
Arco elétrico e operação sem falha	0,6704

Figura 165 – Cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria normalizados, para o sensoriamento de corrente elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria se apresenta na Figura 165. Na descarga parcial no isolador, a Banda Equivalente sofreu variação de 0 a 0,86, a Curtose de 0,05 a 0,21, e a Assimetria de 0,17 a 0,43. No arco elétrico houve variação da Banda Equivalente entre 0,10 e 0,22, da Curtose entre 0,09 e 0,12 e da Assimetria entre 0,23 e 0,28. No transformador operando sem falha, a Banda Equivalente variou de 0,23 a 1, a Curtose variou entre 0 e 1 e a Assimetria variou de 0 a 1. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 114 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Combinação de estatísticas entre Banda Equivalente, Curtose e Assimetria

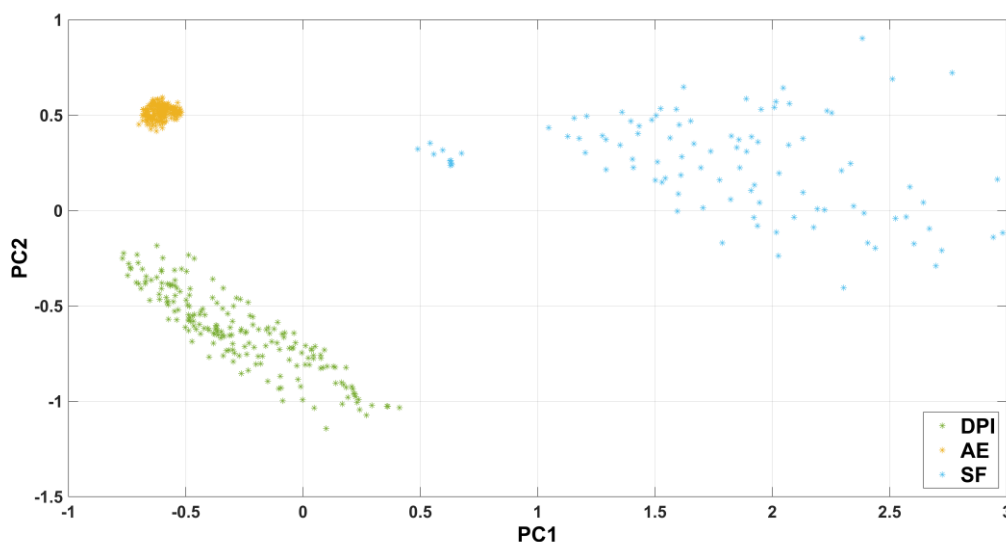
Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,3052
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3540
Arco elétrico e operação sem falha	0,6343

Observa-se que as combinações tridimensionais foram eficazes em três situações distintas. Os cruzamentos entre Desvio Padrão, Curtose e Assimetria; Energia, Desvio Padrão e Assimetria; e Energia, Desvio Padrão e Curtose se mostraram eficazes apenas para a detecção de estado de falha. Já os cruzamentos entre Energia, Desvio Padrão e Frequência Média; e Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente foram eficazes tanto na identificação da falha quanto na sua classificação visto a formação de clusters bem definidos para cada caso estudado.

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada à matriz de espectros. Com as componentes principais 1 (CP1) e 2 (CP2), foi gerado um mapa bidimensional para classificar as três condições analisadas neste trabalho. Na Figura 166 é apresentada a ACP para o sinal de corrente elétrica, aplicada à matriz da Transformada de Fourier normalizada. Observa-se que a combinação entre a CP1 e a CP2 foi eficaz tanto na diferenciação entre os estados de falha e operação normal, quanto na classificação das falhas, uma vez que os clusters da descarga parcial no isolador, do arco elétrico e da operação sem falhas apresentam regiões muito bem definidas e não possuem pontos em comum. Para as descargas parciais no isolador, a Componente Principal 1 variou de -0,76 a 0,41 e a Componente Principal 2 de -1,14 a -0,18. Para o arco elétrico, a CP1 variou entre -0,69 e -0,51 e a CP2 entre 0,41 e 0,59. Finalmente, para o transformador operando sem falhas, a CP1 apresentou variação de 0,48 a 2,98 e a CP2 variou de -0,40 a 0,90. As distâncias euclidianas são

apresentadas na Tabela 115.

Figura 166 – Cruzamento entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, para o sensoriamento de corrente elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 115 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Análise de Componentes Principais

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,1908
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	2,2393
Arco elétrico e operação sem falha	2,4069

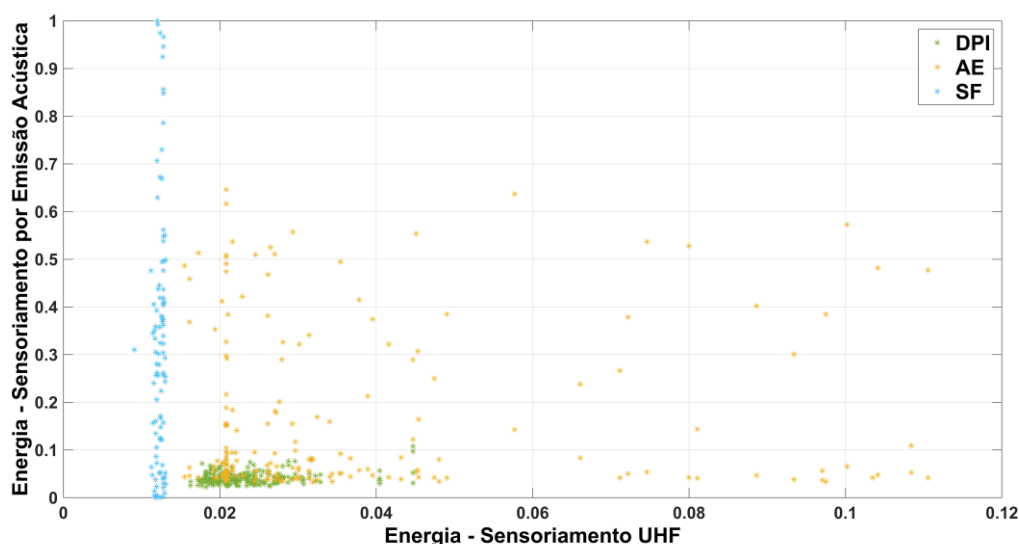
6.2. Sensoriamento Híbrido

Os resultados a seguir foram obtidos utilizando dois ou mais métodos de sensoriamento que monitoraram paralelamente o transformador em operação sob as condições de descarga parcial no isolador (DPI), arco elétrico (AE) e operação sem falha (SF). Estes resultados são organizados em subseções, correspondendo a cada grupo de sensoriamento comparado.

6.2.1 Sensoriamento UHF cruzado com Sensoriamento por Emissão Acústica

São apresentados a seguir os cruzamentos bidimensionais entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica, tanto dos parâmetros estatísticos e espectrais quanto das componentes principais.

Figura 167 – Cruzamento entre Energia para o sensoriamento UHF e Energia para o sensoriamento por Emissão Acústica.



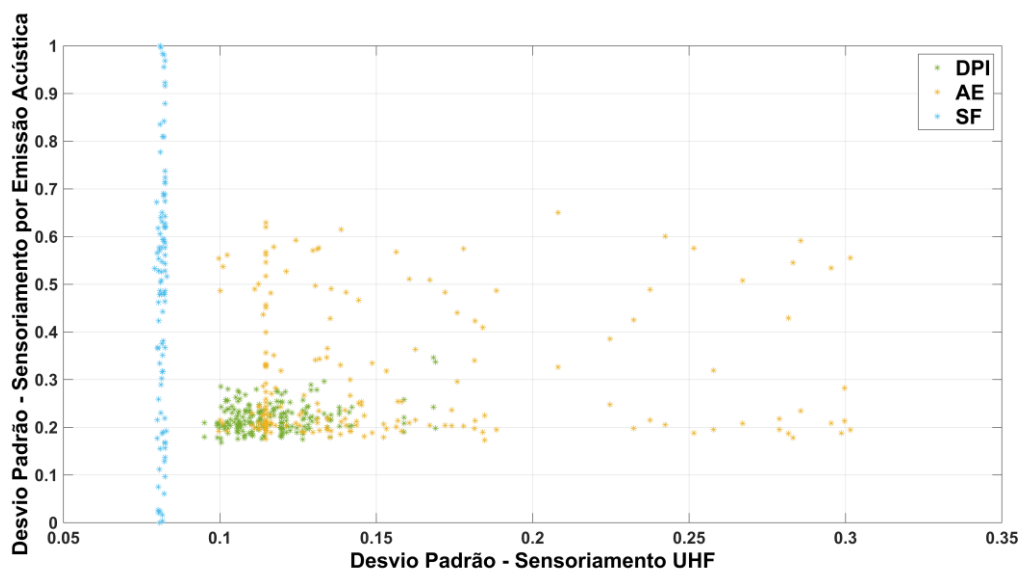
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento da Energia para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica se apresenta na Figura 167. No sensoriamento UHF, a Energia houve variação de 0,016 a 0,045 para a DPI, de 0,016 a 0,11 para o AE e de 0,01 a 0,012 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Emissão Acústica, a Energia houve variação de 0,02 a 0,12 para a DPI, de 0,03 a 0,64 para o AE e de 0 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 116 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1179
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2856
Arco elétrico e operação sem falha	0,1699

Figura 168 – Cruzamento entre Desvio Padrão para o sensoriamento UHF e Desvio Padrão para o sensoriamento por Emissão Acústica.



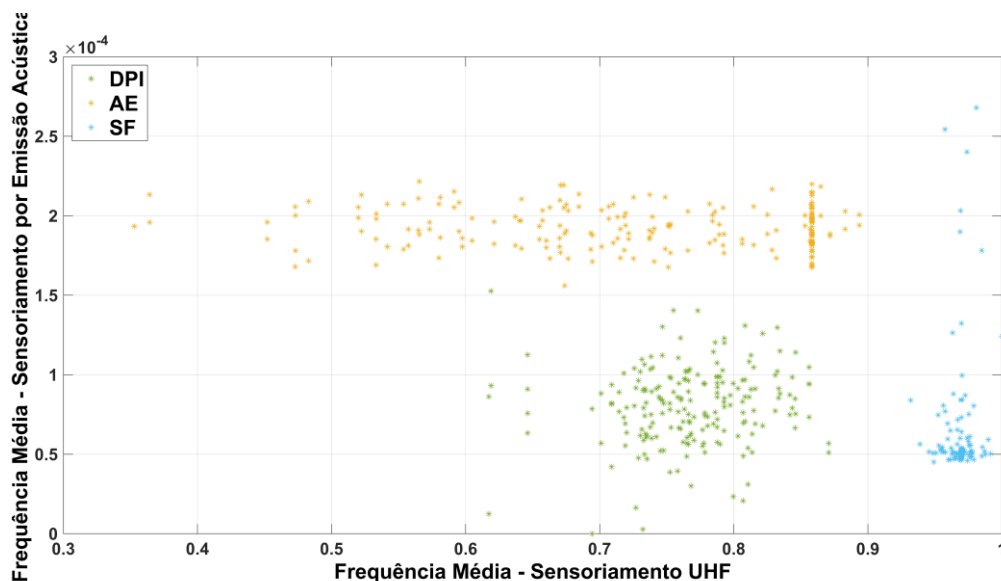
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 168 é apresentado o cruzamento do Desvio Padrão para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica. Para o sensoriamento UHF, o Desvio Padrão apresentou variação entre 0,09 e 0,16 para a DPI, entre 0,10 e 0,30 para o AE e entre 0,07 e 0,08 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Emissão Acústica, o Desvio Padrão apresentou variação de 0,16 a 0,34 para a DPI, de 0,17 a 0,65 para o AE e de 0 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 117 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0899
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2702
Arco elétrico e operação sem falha	0,1984

Figura 169 – Cruzamento entre Frequência Média para o sensoriamento UHF e Frequência Média para o sensoriamento por Emissão Acústica.



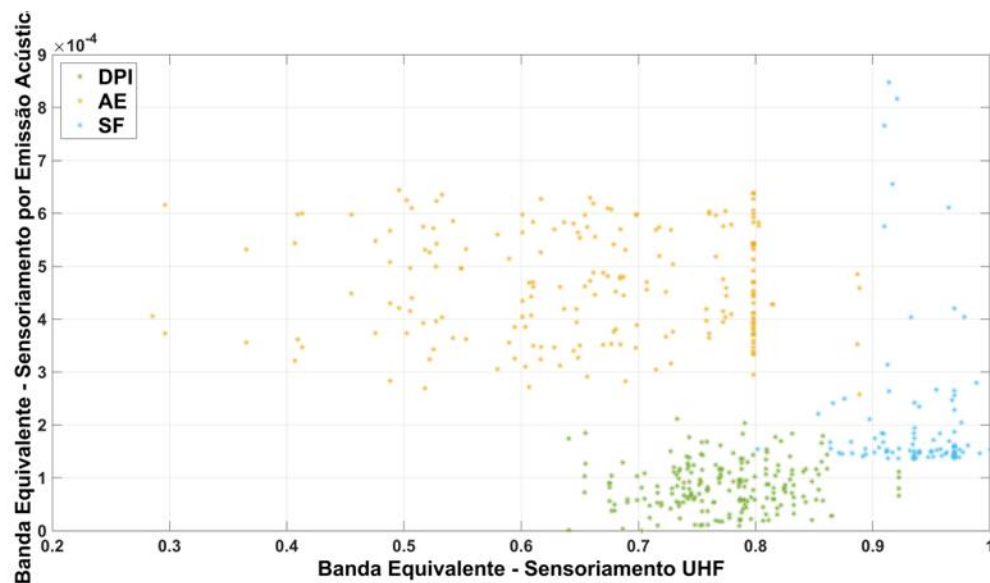
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 169 é apresentado o cruzamento da Frequência Média para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica. No sensoriamento UHF, a Frequência Média variou de 0,62 a 0,87 para a DPI, entre 0,35 e 0,89 para o AE e entre 0,93 e 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Emissão Acústica, a Frequência Média variou de 0 a 0,00015 para a DPI, de 0,00016 a 0,00023 para o AE e de 0,00004 a 0,00027 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 118 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0466
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1986
Arco elétrico e operação sem falha	0,2432

Figura 170 – Cruzamento entre Banda Equivalente para o sensoriamento UHF e Banda Equivalente para o sensoriamento por Emissão Acústica.



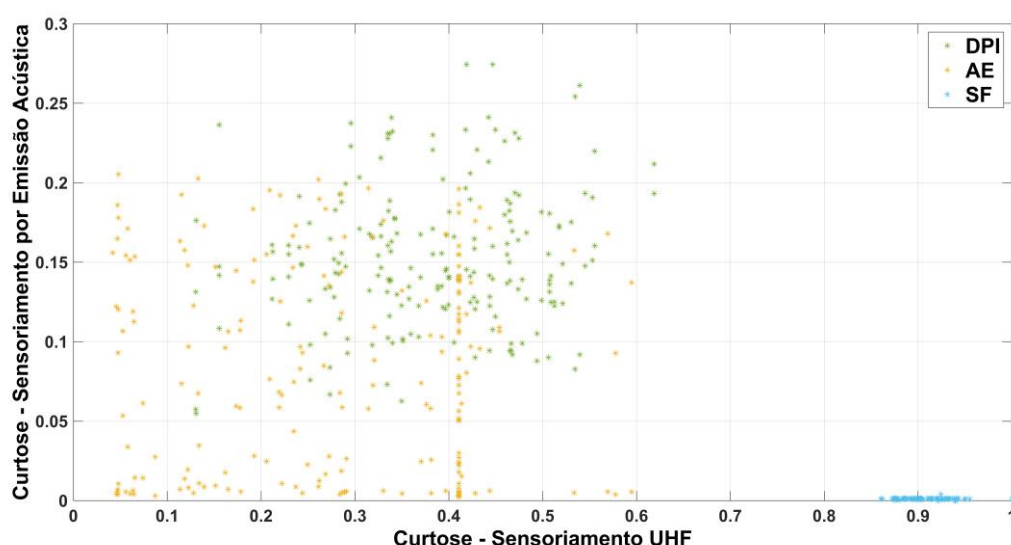
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento da Banda Equivalente para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica se apresenta na Figura 170. No sensoriamento UHF, a Banda Equivalente houve variação de 0,64 a 0,92 para a DPI, de 0,28 a 0,88 para o AE e de 0,80 a 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Emissão Acústica, a Banda Equivalente houve variação de 0 a 0,0002 para a DPI, de 0,00025 a 0,00064 para o AE e de 0,00015 a 0,00085 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 119 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1095
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1645
Arco elétrico e operação sem falha	0,2740

Figura 171 – Cruzamento entre Curtose para o sensoriamento UHF e Curtose para o sensoriamento por Emissão Acústica.



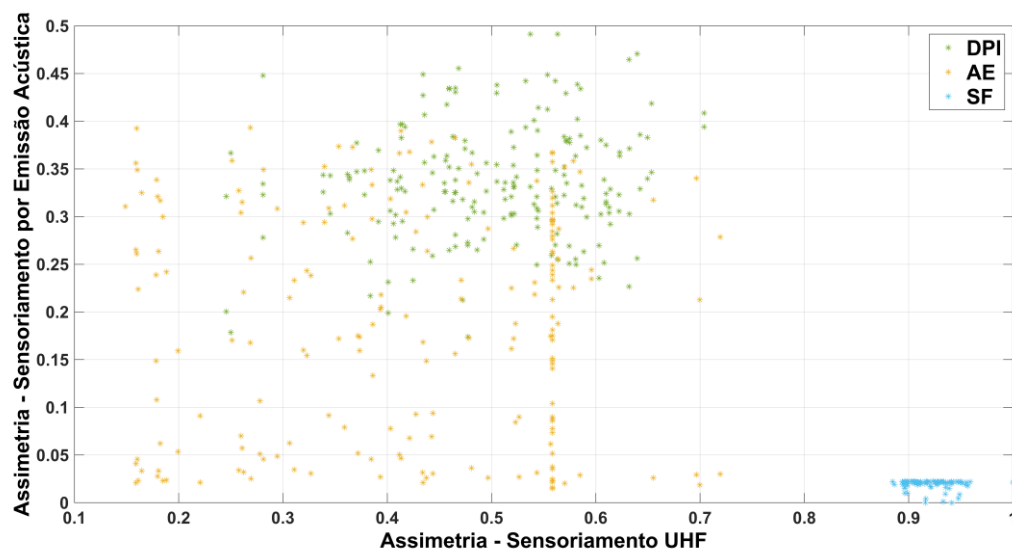
Fonte: Elaborado pela autora.

Apresenta-se, na Figura 171, o cruzamento da Curtose para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica. Para o sensoriamento UHF, a Curtose apresentou variação entre 0,13 e 0,62 para a DPI, entre 0,04 e 0,59 para o AE e entre 0,86 e 1 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Emissão Acústica, a Curtose apresentou variação de 0,05 a 0,27 para a DPI, de 0 a 0,20 para o AE e de 0 a 0,0039 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 120 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1260
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5345
Arco elétrico e operação sem falha	0,6244

Figura 172 – Cruzamento entre Assimetria para o sensoriamento UHF e Assimetria para o sensoriamento por Emissão Acústica.



Fonte: Elaborado pela autora.

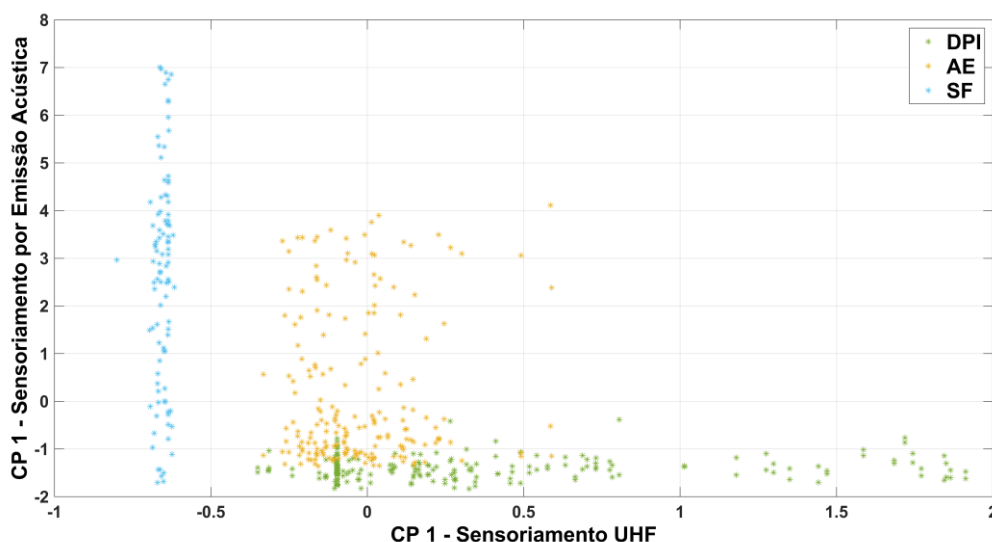
Na Figura 172 é apresentado o cruzamento da Assimetria para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica. No sensoriamento UHF, a Assimetria variou de 0,24 a 0,71 para a DPI, entre 0,14 e 0,73 para o AE e entre 0,88 e 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Emissão Acústica, a Assimetria variou de 0,17 a 0,49 para a DPI, de 0,01 a 0,39 para o AE e de 0 a 0,02 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 121 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1684
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5183
Arco elétrico e operação sem falha	0,5226

Os resultados apresentados indicam que o cruzamento das métricas entre o sensoriamento UHF e por emissão acústica teve êxito tanto na detecção quanto na classificação da falha ao utilizar a Frequência Média. Além disso, os cruzamentos das métricas de Energia, Desvio Padrão, Curtose e Assimetria mostraram-se eficazes na detecção da ocorrência de falhas.

Figura 173 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica.



Fonte: Elaborado pela autora.

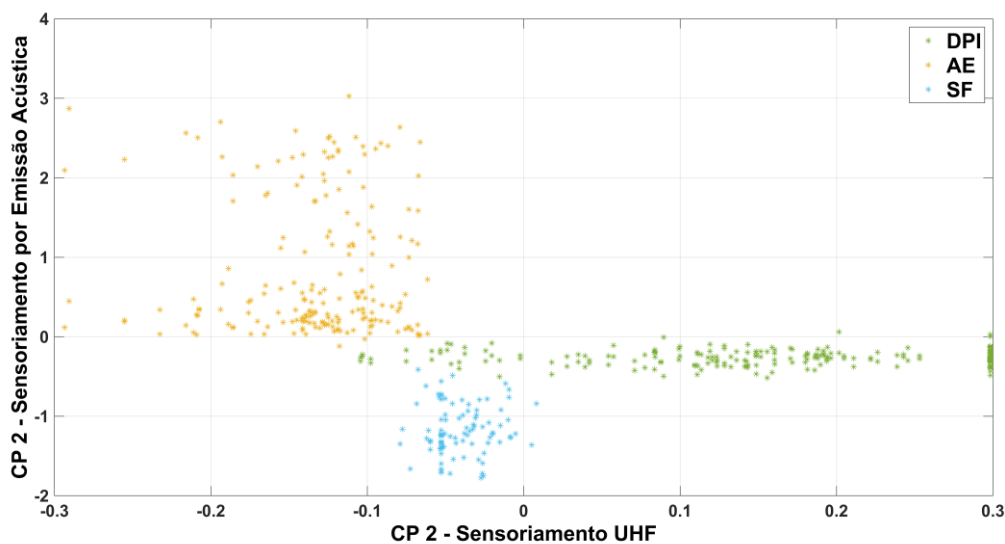
Na Figura 173 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 1 para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica. No sensoriamento UHF, a CP 1 variou de -0,41 a 1,91 para a DPI, entre -0,39 e 0,65 para o AE e entre -0,80 e -0,61 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Emissão Acústica,

a CP 1 variou de -1,90 a -0,40 para a DPI, de -1,25 a 4,1 para o AE e de -1,77 a -7 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 122 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,6183
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	4,0075
Arco elétrico e operação sem falha	2,4892

Figura 174 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 174 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 2 para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por emissão acústica. No sensoriamento UHF, a CP 2 variou de -0,12 a 0,3 para a DPI, entre -0,29 e -0,06 para o AE e entre -0,08 e 0,02 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Emissão Acústica, a CP 2 variou de -0,4 a 0,1 para a DPI, de -0,02 a 3,1 para o AE e de -1,8 a -0,4 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 123 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre o sensoriamento UHF e por Emissão Acústica

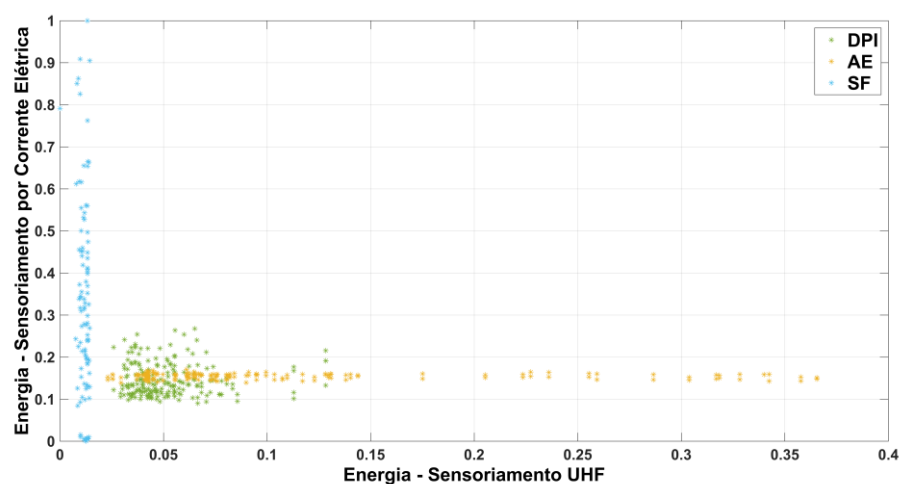
Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,1250
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,9004
Arco elétrico e operação sem falha	1,9730

Observa-se que, na Análise das Componentes Principais, o cruzamento da Componente Principal 1 se mostrou eficaz na detecção da ocorrência da falha. Já o cruzamento da Componente Principal 2 obteve êxito tanto na detecção da falha, quanto na sua classificação.

6.2.2 Sensoriamento UHF cruzado com Sensoriamento por Corrente Elétrica

São apresentados a seguir os cruzamentos bidimensionais entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica, tanto dos parâmetros estatísticos e espectrais quanto das componentes principais.

Figura 175 – Cruzamento entre Energia para o sensoriamento UHF e Energia para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



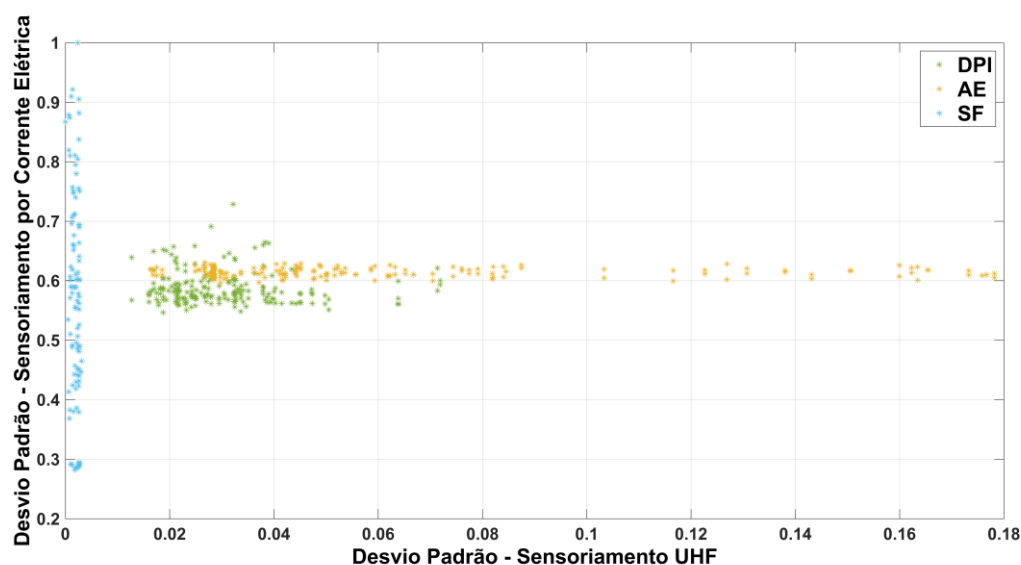
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento da Energia para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 175. No sensoriamento UHF, a Energia houve variação de 0,025 a 0,13 para a DPI, de 0,02 a 0,37 para o AE e de 0 a 0,01 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Energia houve variação de 0,09 a 0,26 para a DPI, de 0,13 a 0,17 para o AE e de 0 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 124 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0476
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2000
Arco elétrico e operação sem falha	0,2074

Figura 176 – Cruzamento entre Desvio Padrão para o sensoriamento UHF e Desvio Padrão para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

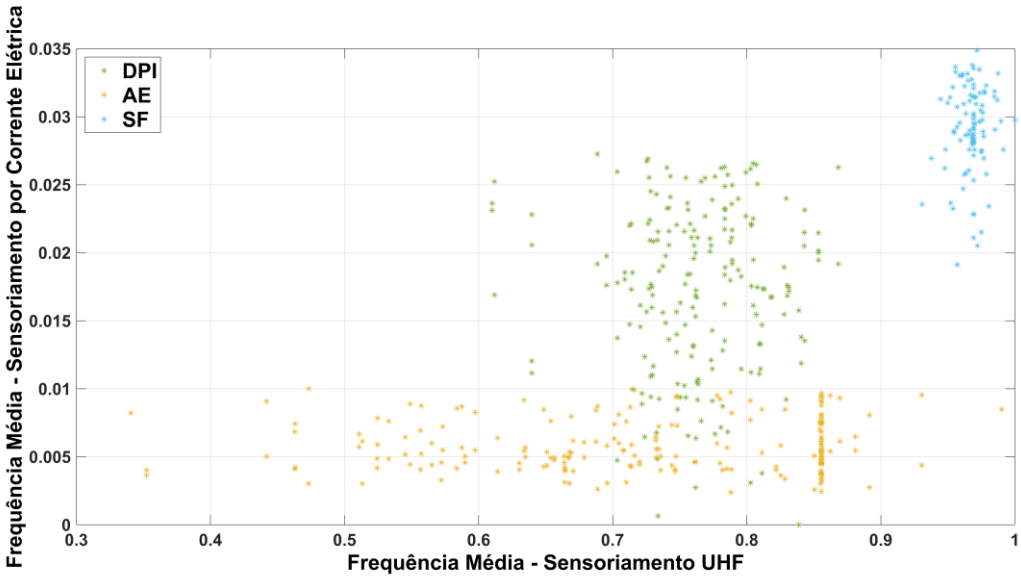
Na Figura 176, apresenta-se o cruzamento do Desvio Padrão para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. Para o

sensoriamento UHF, o Desvio Padrão apresentou variação entre 0,01 e 0,07 para a DPI, entre 0,017 e 0,178, para o AE e entre 0 e 0,0031 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Corrente Elétrica, o Desvio Padrão apresentou variação de 0,54 a 0,72 para a DPI, de 0,59 a 0,63 para o AE e de 0,28 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 125 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0389
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,0292
Arco elétrico e operação sem falha	0,0664

Figura 177 – Cruzamento entre Frequência Média para o sensoriamento UHF e Frequência Média para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

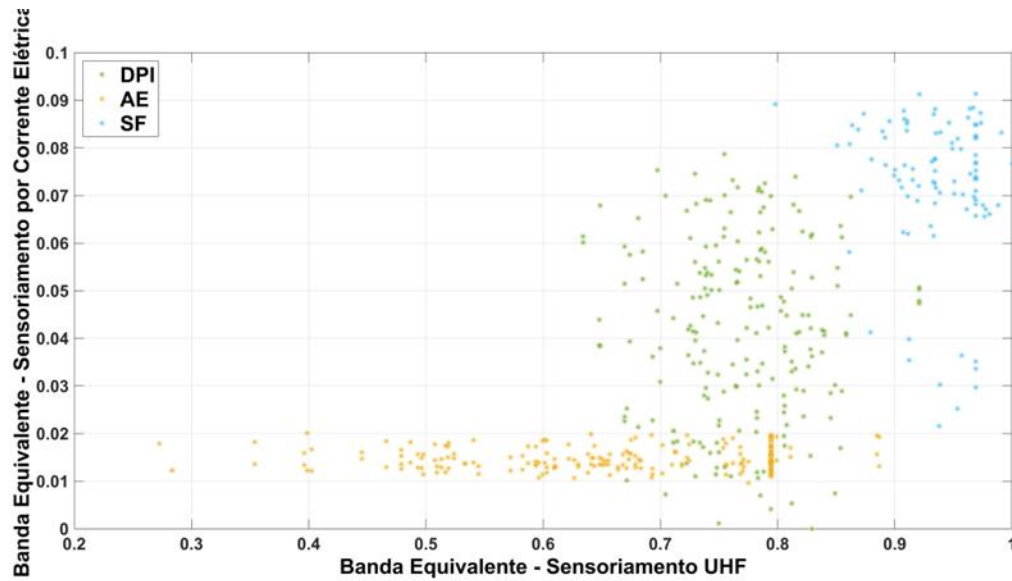
Na Figura 177 é apresentado o cruzamento da Frequência Média para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. No sensoriamento UHF, a Frequência Média variou de 0,61 a 0,88 para a DPI, entre 0,34 e 0,93 para o

AE e entre 0,93 e 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Frequência Média variou de 0 a 0,027 para a DPI, de 0,002 a 0,01 para o AE e de 0,018 a 0,035 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 126 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0469
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2027
Arco elétrico e operação sem falha	0,2489

Figura 178 – Cruzamento entre Banda Equivalente para o sensoriamento UHF e Banda Equivalente para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

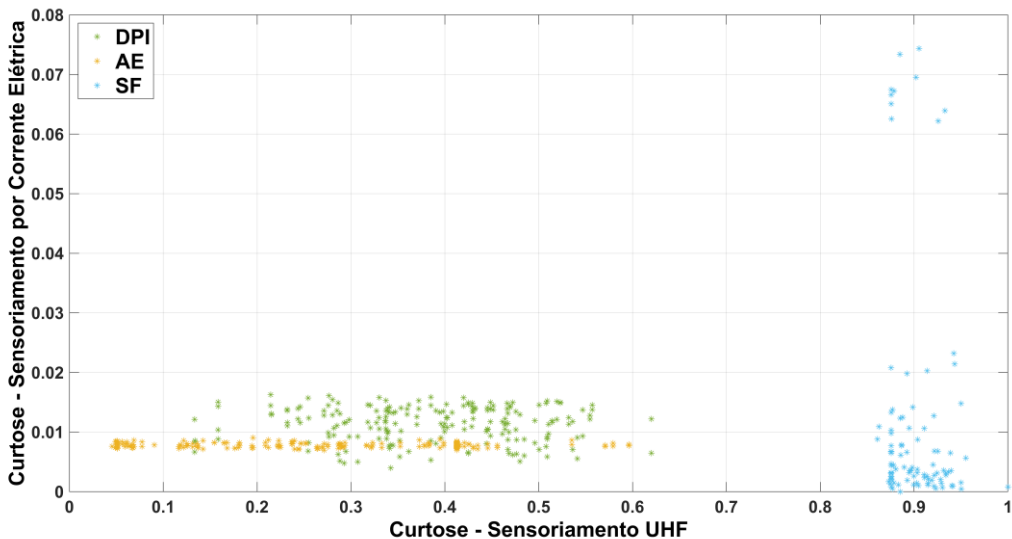
O cruzamento da Banda Equivalente para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 178. No sensoriamento UHF, a Banda Equivalente houve variação de 0,62 a 0,92 para a DPI, de 0,28 a 0,88 para o AE e de 0,80 a 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Banda Equivalente houve variação de 0 a 0,08 para a DPI, de 0,01 a 0,02

para o AE e de 0,02 a 0,09 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 127 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1147
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1702
Arco elétrico e operação sem falha	0,2849

Figura 179 – Cruzamento entre Curtose para o sensoriamento UHF e Curtose para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



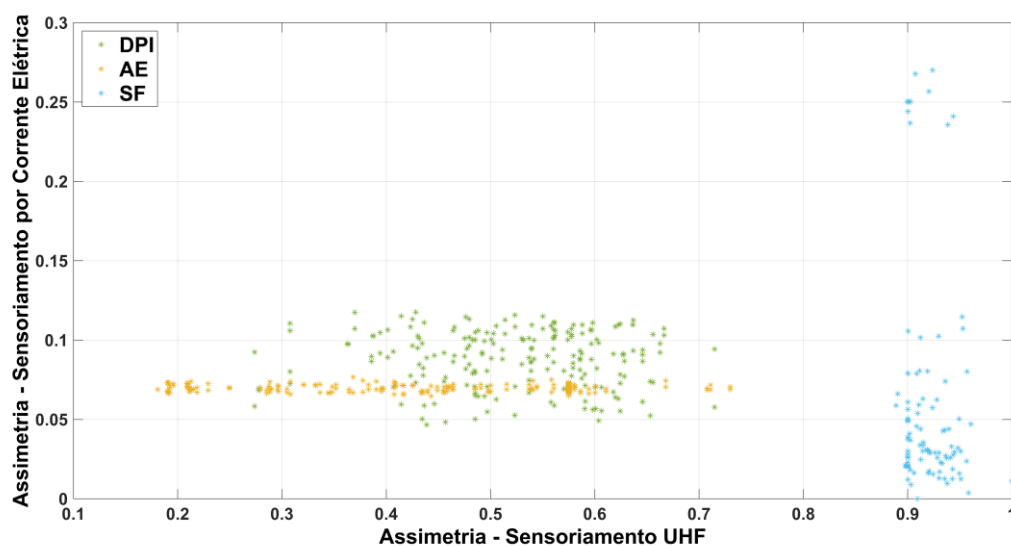
Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 179 apresenta o cruzamento da Curtose para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. Para o sensoriamento UHF, a Curtose apresentou variação entre 0,13 e 0,62 para a DPI, entre 0,04 e 0,6 para o AE e entre 0,86 e 1 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Corrente Elétrica, a Curtose apresentou variação de 0,005 a 0,017 para a DPI, de 0,0070 a 0,0091 para o AE e de 0 a 0,075 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 128 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1060
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5105
Arco elétrico e operação sem falha	0,6165

Figura 180 – Cruzamento entre Assimetria para o sensoriamento UHF e Assimetria para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

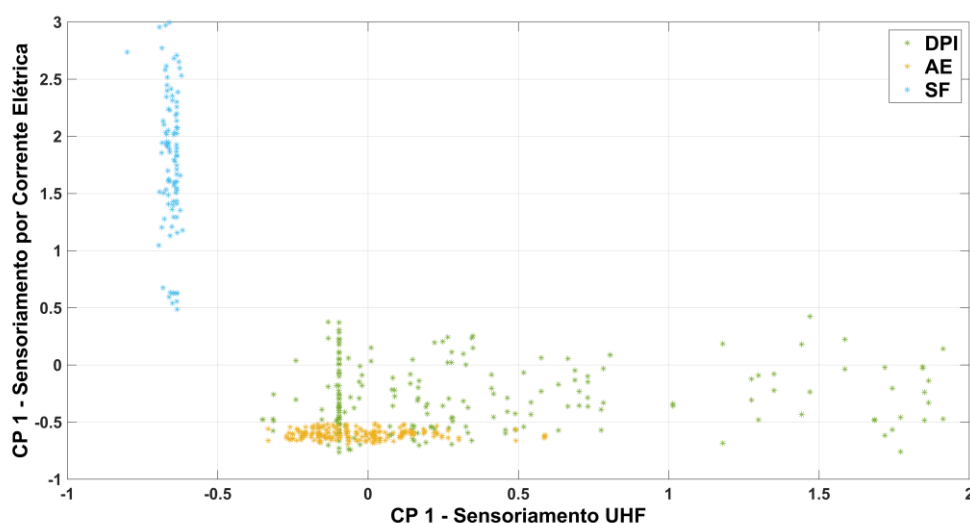
O cruzamento da Assimetria para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 180. No sensoriamento UHF, a Assimetria houve variação de 0,27 a 0,72 para a DPI, de 0,18 a 0,73 para o AE e de 0,88 a 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Assimetria houve variação de 0,04 a 0,11 para a DPI, de 0,06 a 0,07 para o AE e de 0 a 0,27 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 129 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0828
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,3958
Arco elétrico e operação sem falha	0,4755

Os resultados apresentados indicam que o cruzamento das métricas normalizadas entre o sensoriamento UHF e por corrente elétrica teve êxito apenas na detecção da falha ao utilizar a Energia, Desvio Padrão, Frequência Média, Curtose e a Assimetria.

Figura 181 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

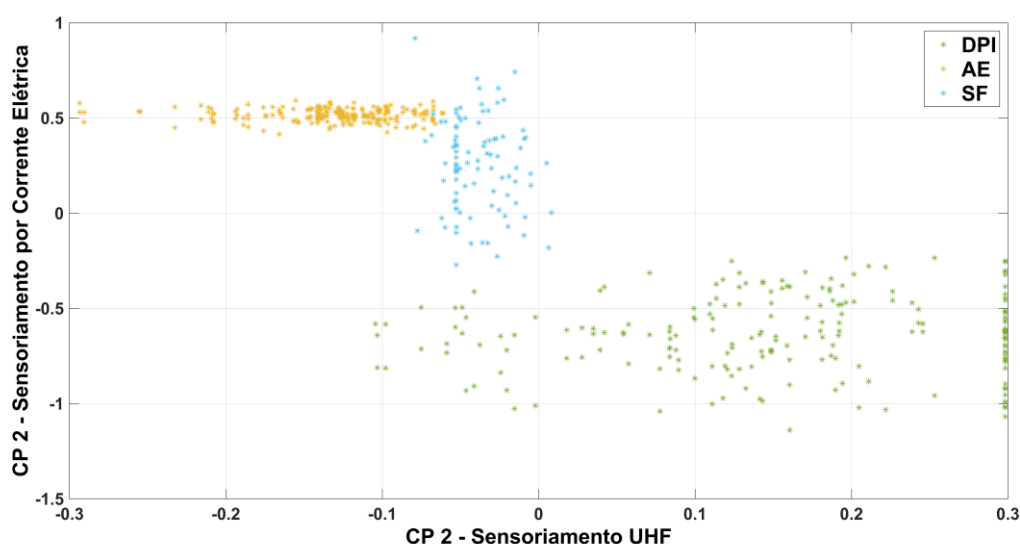
Na Figura 181 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 1 para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. No sensoriamento UHF, a CP 1 variou de -0,35 a 1,91 para a DPI, entre -0,33 e 0,58 para o AE e entre -0,80 e -0,62 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a CP 1 variou de -0,76 a 0,47 para a DPI, de -0,7 a -0,47 para o AE e de 0,48 a 3 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se

apresentam a seguir:

Tabela 130 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,5167
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	2,2927
Arco elétrico e operação sem falha	2,4703

Figura 182 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 182 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 2 para o sensoriamento UHF e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. No sensoriamento UHF, a CP 2 variou de -0,10 a 0,29 para a DPI, entre -0,29 e -0,06 para o AE e entre -0,07 e 0,01 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a CP 2 variou de -1,3 a -0,23 para a DPI, de 0,41 a 0,59 para o AE e de -0,27 a 0,91 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 131 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

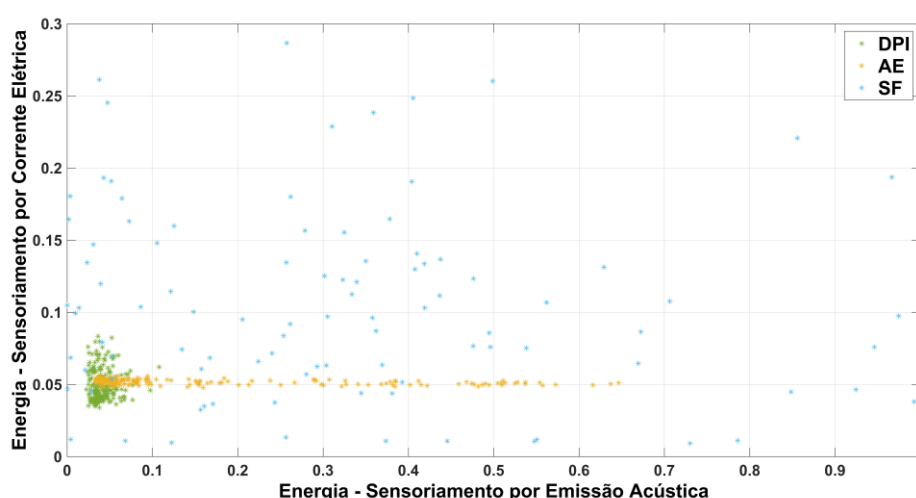
Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,1250
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,9004
Arco elétrico e operação sem falha	1,9730

Observa-se que, na Análise das Componentes Principais, a Componente Principal 1 foi eficaz apenas na detecção da falha. A Componente Principal 2, por sua vez, não apresentou resultados favoráveis, visto a interposição de pontos entre os clusters do estado sem falhas e do arco elétrico.

6.2.3 Sensoriamento por Emissão Acústica cruzado com Sensoriamento por Corrente Elétrica

São apresentados a seguir os cruzamentos bidimensionais entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica, tanto dos parâmetros estatísticos e espectrais quanto das componentes principais.

Figura 183 – Cruzamento entre Energia para o sensoriamento por Emissão Acústica e Energia para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



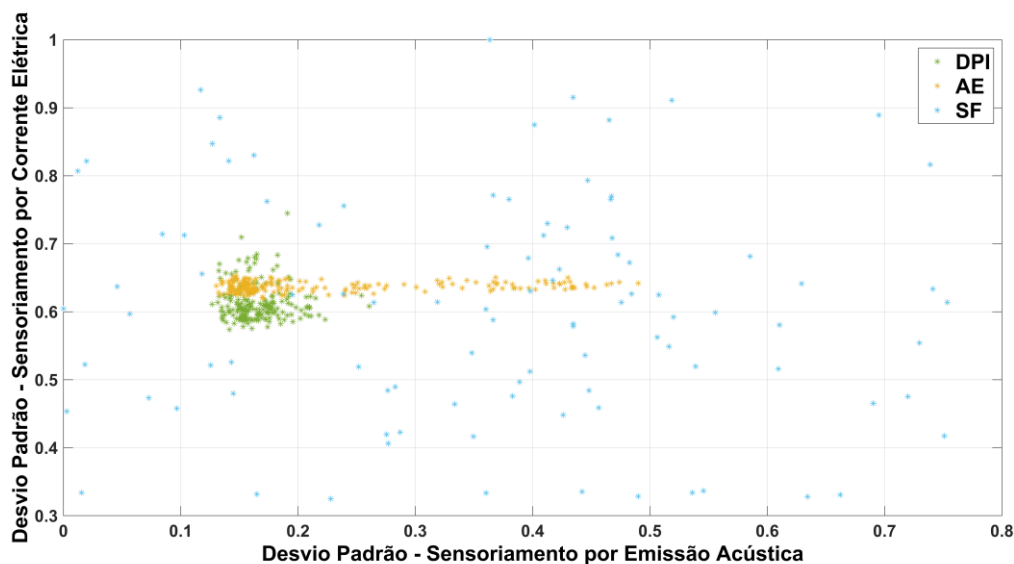
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento da Energia para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 183. No sensoriamento por Emissão Acústica, a Energia houve variação de 0,02 a 0,10 para a DPI, de 0,03 a 0,64 para o AE e de 0 a 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Energia houve variação de 0,03 a 0,08 para a DPI, de 0,04 a 0,06 para o AE e de 0,009 a 0,28 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 132 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1172
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2905
Arco elétrico e operação sem falha	0,1761

Figura 184 – Cruzamento entre Desvio Padrão para o sensoriamento por Emissão Acústica e Desvio Padrão para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

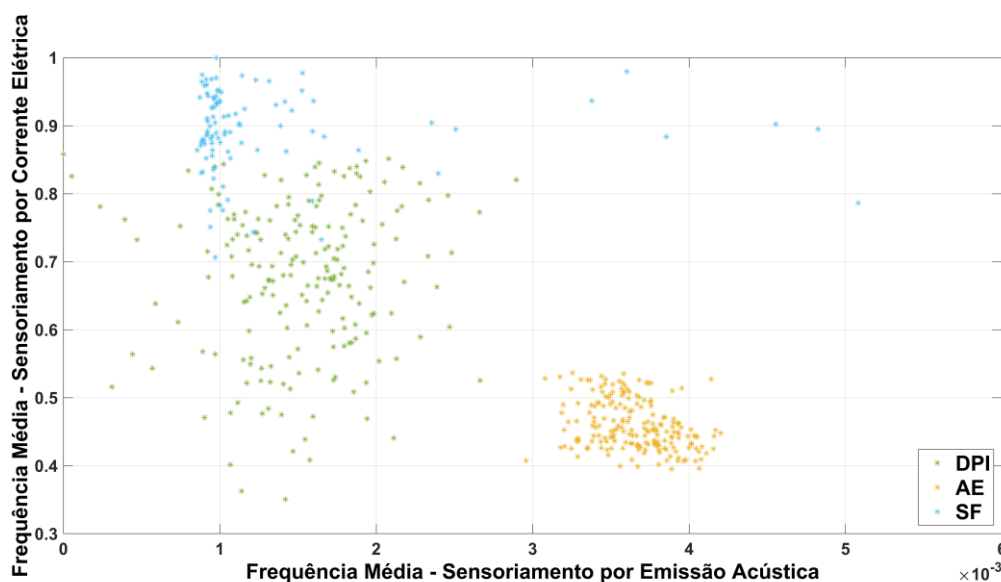
Na Figura 184, apresenta-se o cruzamento do Desvio Padrão para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica.

Para o sensoriamento por Emissão Acústica, o Desvio Padrão apresentou variação entre 0,12 e 0,26 para a DPI, entre 0,13 e 0,48, para o AE e entre 0 e 0,75 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Corrente Elétrica, o Desvio Padrão apresentou variação de 0,57 a 0,72 para a DPI, de 0,62 a 0,66 para o AE e de 0,32 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 133 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0669
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2020
Arco elétrico e operação sem falha	0,1435

Figura 185 – Cruzamento entre Frequência Média para o sensoriamento por Emissão Acústica e Frequência Média para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

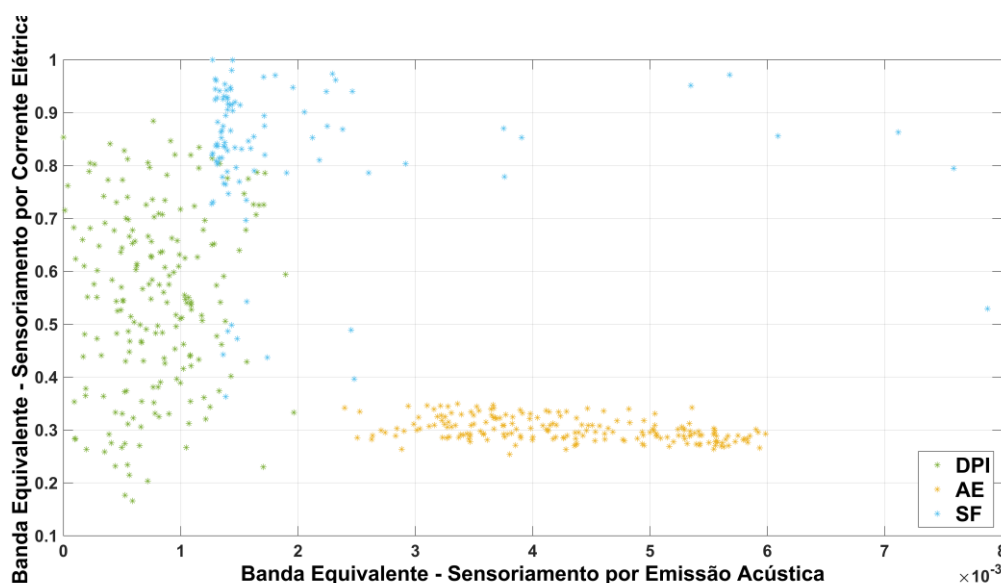
Na Figura 185 é apresentado o cruzamento da Frequência Média para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. No sensoriamento por Emissão Acústica, a Frequência Média variou de 0 a 0,0029

para a DPI, entre 0,0030 e 0,0042 para o AE e entre 0 e 0,0051 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Frequência Média variou de 0,35 a 0,85 para a DPI, de 0,39 a 0,53 para o AE e de 0,70 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 134 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2149
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2185
Arco elétrico e operação sem falha	0,4334

Figura 186 – Cruzamento entre Banda Equivalente para o sensoriamento por Emissão Acústica e Banda Equivalente para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

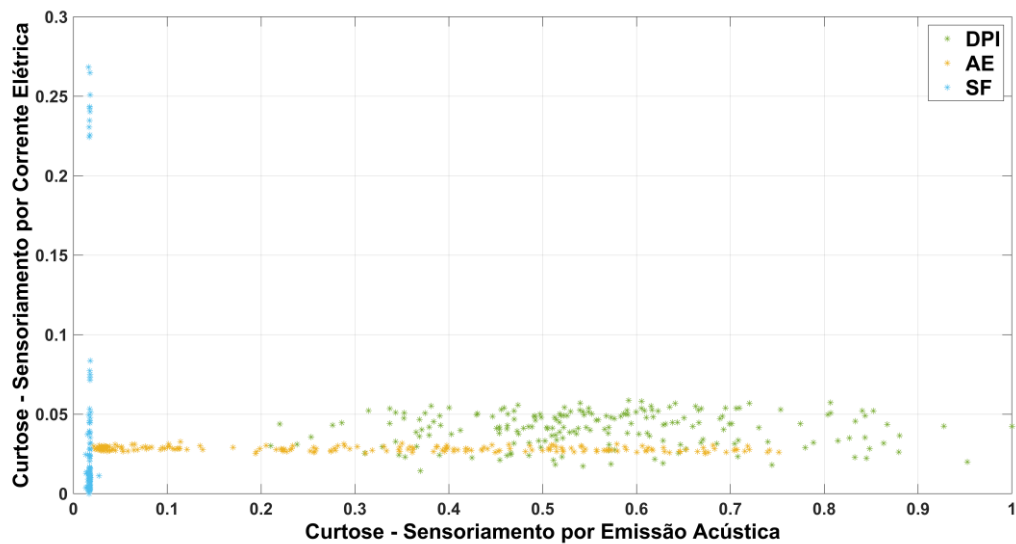
O cruzamento da Banda Equivalente para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 186. No sensoriamento por Emissão Acústica, a Banda Equivalente houve variação de 0 a 0,002 para a DPI, de 0,0024 a 0,006 para o AE e de 0,0013 a 0,0079 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Banda Equivalente houve

variação de 0,16 a 0,88 para a DPI, de 0,25 a 0,34 para o AE e de 0,36 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 135 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2461
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2801
Arco elétrico e operação sem falha	0,5262

Figura 187 – Cruzamento entre Curtose para o sensoriamento por Emissão Acústica e Curtose para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

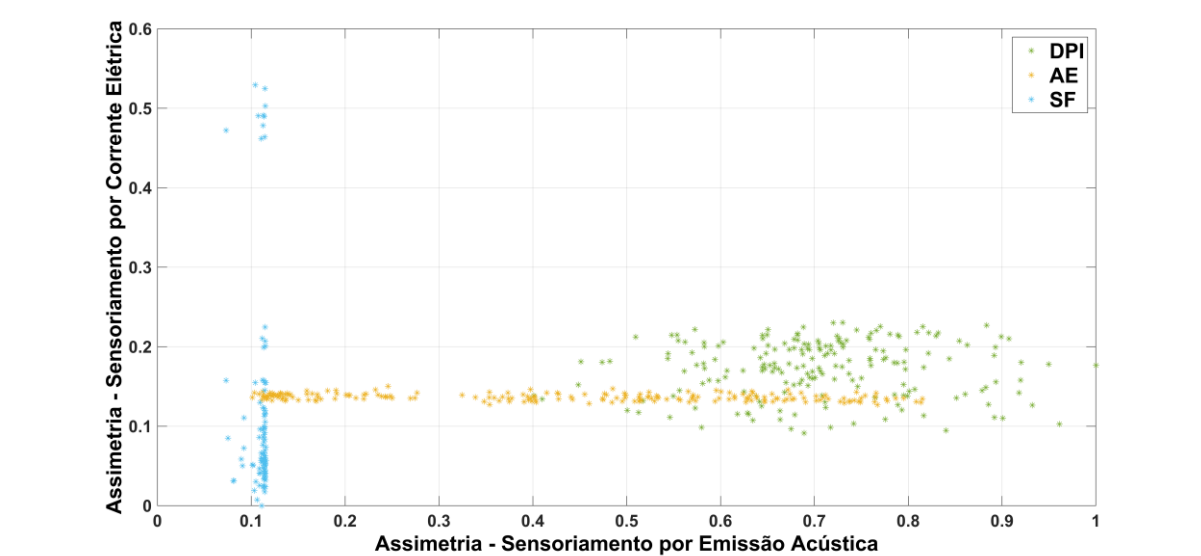
Apresenta-se na Figura 187 o cruzamento da Curtose para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. Para o sensoriamento por Emissão Acústica, a Curtose apresentou variação entre 0,21 e 1 para a DPI, entre 0,02 e 0,75 para o AE e entre 0,01 e 0,02 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Corrente Elétrica, a Curtose apresentou variação de 0,01 a 0,06 para a DPI, de 0,02 a 0,03 para o AE e de 0 a 0,26 para a operação

sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 136 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2436
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5466
Arco elétrico e operação sem falha	0,3037

Figura 188 – Cruzamento entre Assimetria para o sensoriamento por Emissão Acústica e Assimetria para o sensoriamento por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

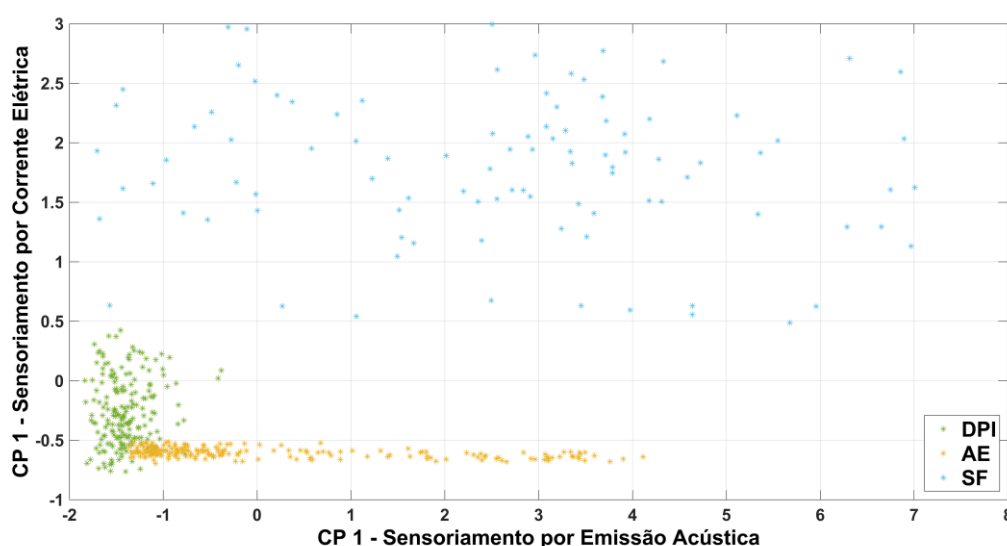
O cruzamento da Assimetria para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 188. No sensoriamento UHF, a Assimetria houve variação de 0,40 a 1 para a DPI, de 0,10 a 0,81 para o AE e de 0,07 a 0,11 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Assimetria houve variação de 0,09 a 0,23 para a DPI, de 0,12 a 0,15 para o AE e de 0 a 0,52 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 137 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre o sensoriamento UHF e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,2782
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,6003
Arco elétrico e operação sem falha	0,3226

Os resultados apresentados indicam que o cruzamento das métricas normalizadas entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica não obteve êxito quanto a detecção ou classificação das falhas devido a interposição de pontos de um cluster em outro.

Figura 189 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

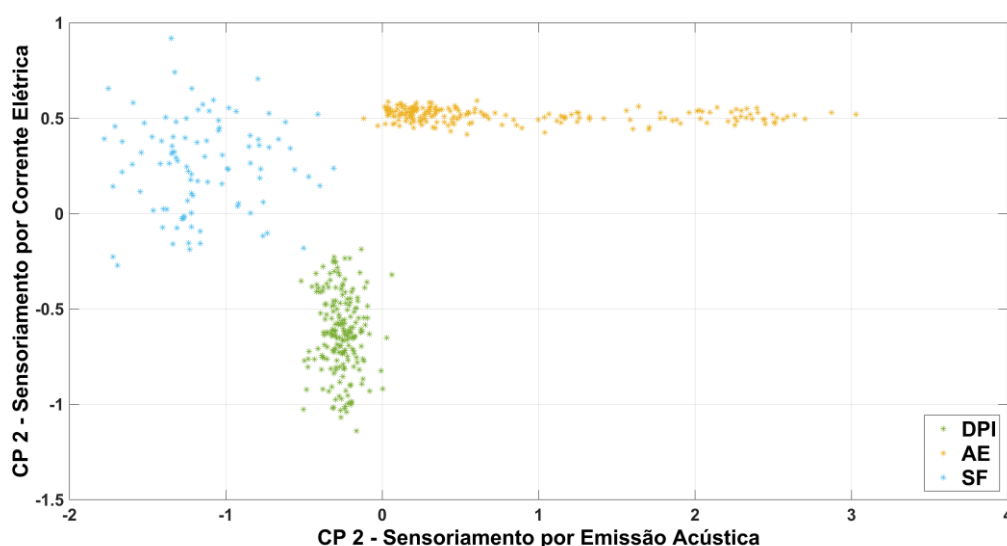
Na Figura 189 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 1 para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. No sensoriamento por Emissão Acústica, a CP 1 variou de -1,87 a -0,38 para a DPI, entre -1,36 e 4,11 para o AE e entre -1,70 e 7,00 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a CP 1 variou de -0,75 a 0,42 para a DPI, de -

0,69 a -0,51 para o AE e de 0,5 a 3 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 138 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,6050
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	4,4804
Arco elétrico e operação sem falha	3,3956

Figura 190 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 190 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 2 para o sensoriamento por Emissão Acústica e para o sensoriamento por Corrente Elétrica. No sensoriamento por Emissão Acústica, a CP 2 variou de -0,51 a 0,06 para a DPI, entre -0,11 e 3,02 para o AE e entre -1,77 e -0,31 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a CP 2 variou de -1,13 a -0,18 para a DPI, de 0,41 a 0,59 para o AE e de -0,27 a 0,91 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 139 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre o sensoriamento por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

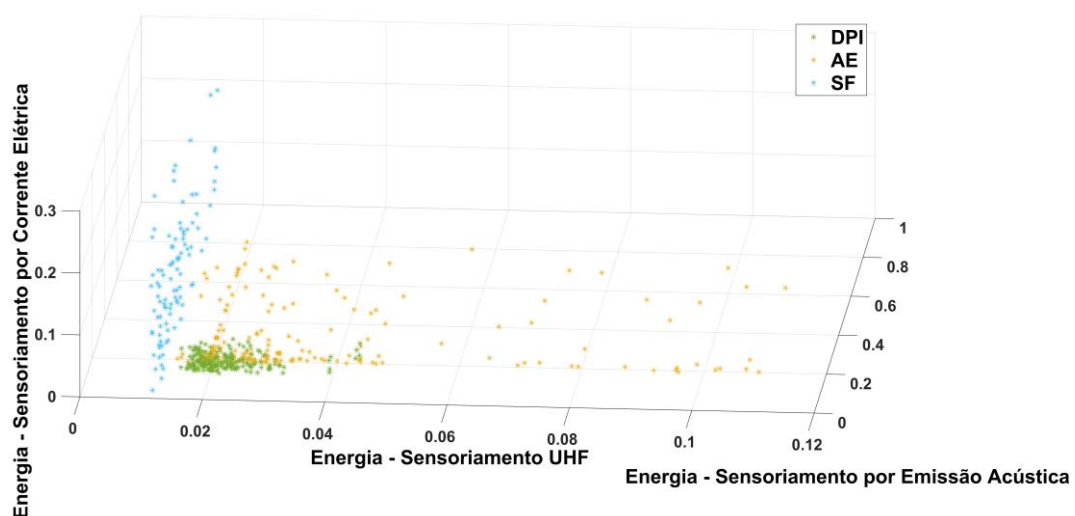
Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,5812
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	1,2428
Arco elétrico e operação sem falha	1,9891

Observa-se que, na Análise das Componentes Principais, a Componente Principal 1 foi eficaz apenas na detecção de falhas. A Componente Principal 2, por sua vez, obteve sucesso tanto na detecção quanto na classificação das falhas.

6.2.4 Sensoriamento UHF cruzado com Sensoriamento por Emissão Acústica e Sensoriamento por Corrente Elétrica

São apresentados a seguir os cruzamentos bidimensionais entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica, tanto dos parâmetros estatísticos e espectrais quanto das componentes principais.

Figura 191 – Cruzamento entre Energia para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



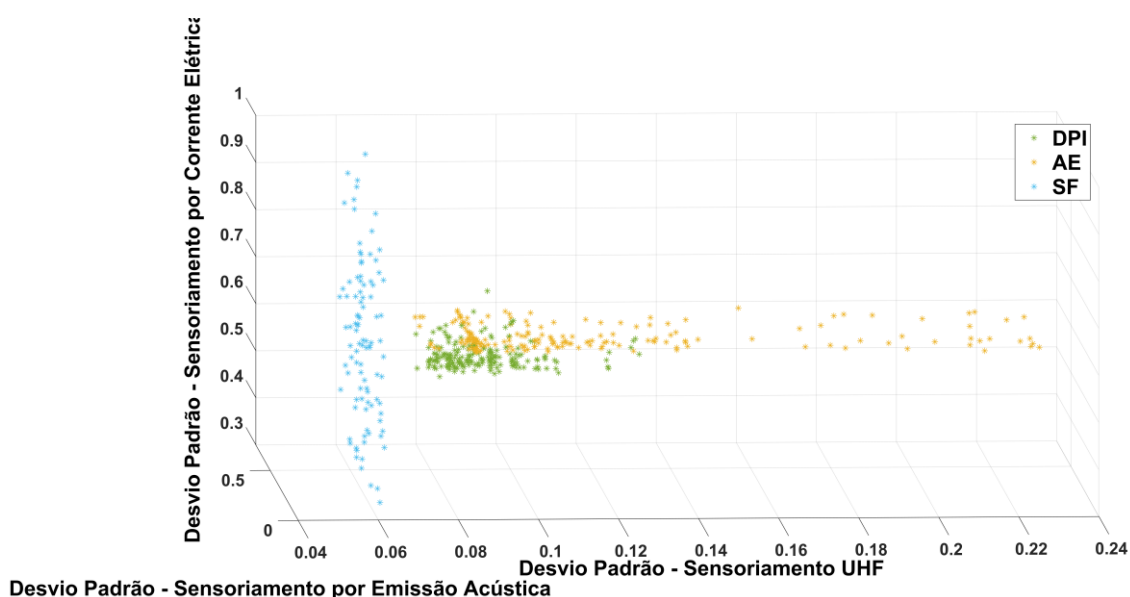
Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento da Energia para os sensoriamentos por UHF, Emissão Acústica e por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 191. No sensoriamento UHF, a Energia houve variação de 0,016 a 0,11 para a DPI, de 0,016 a 0,04 para o AE e de 0,01 a 0,012 para a operação sem falhas. No sensoriamento por Emissão Acústica, a Energia houve variação de 0,02 a 0,11 para a DPI, de 0,03 a 0,64 para o AE e de 0 a 1 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Energia houve variação de 0,03 a 0,08 para a DPI, de 0,05 a 0,06 para o AE e de 0,01 a 0,28 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 140 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Energia entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1179
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2907
Arco elétrico e operação sem falha	0,1778

Figura 192 – Cruzamento entre Desvio Padrão para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



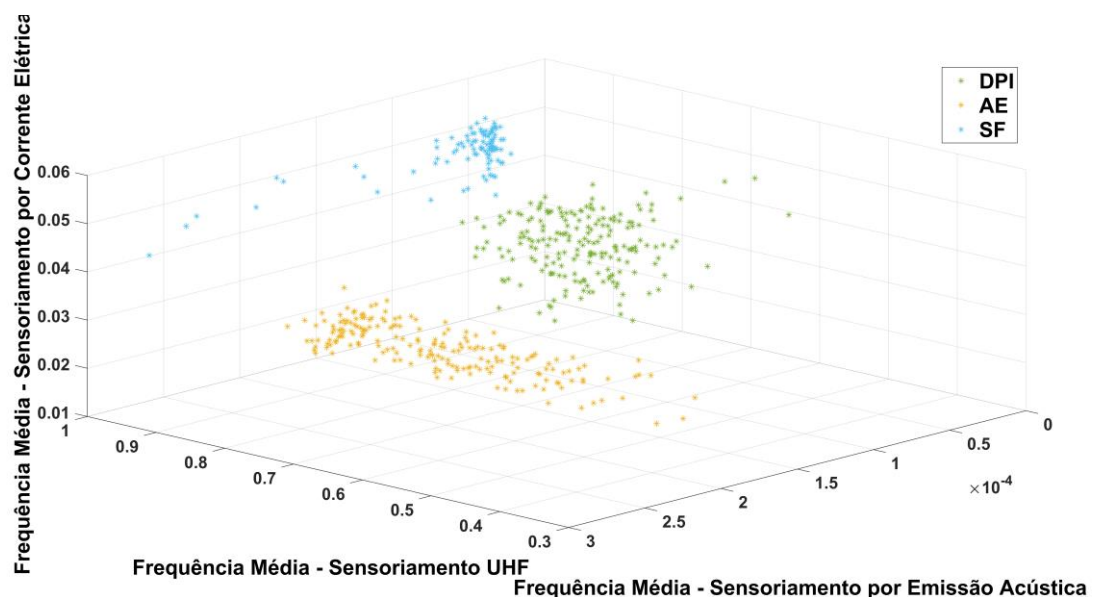
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 192, apresenta-se o cruzamento do Desvio Padrão para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica. Para o sensoramento UHF, o Desvio Padrão apresentou variação entre 0,07 a 0,23 para a DPI, entre 0,07 e 0,13, para o AE e entre 0,06 e 0,065 para a operação sem falhas. Para o sensoramento por Emissão Acústica, o Desvio Padrão apresentou variação de 0,12 a 0,26 para a DPI, de 0,13 a 0,48, para o AE e de 0 a 0,75 para a operação em falhas. Já para o sensoramento por Corrente Elétrica, o Desvio Padrão apresentou variação de 0,57 a 0,68 para a DPI, de 0,62 a 0,65 para o AE e de 0,32 a 1 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 141 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para o Desvio Padrão entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0721
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,2037
Arco elétrico e operação sem falha	0,1530

Figura 193 – Cruzamento entre Frequência Média para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



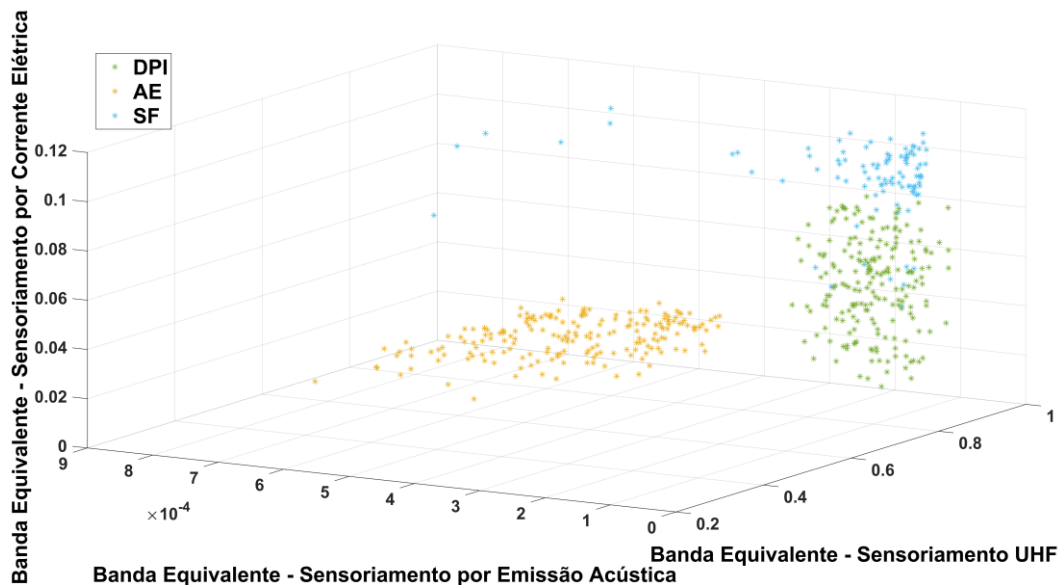
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 193 é apresentado o cruzamento da Frequência Média para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica. No sensoramento UHF, a Frequência Média variou de 0,35 a 0,90 para a DPI, entre 0,62 e 0,87 para o AE e entre 0,93 e 1 para a operação sem falhas. No sensoramento por Emissão Acústica, a Frequência Média variou de 0 a 0,0001 para a DPI, entre 0,0001 e 0,0002 para o AE e entre 0,00005 e 0,0002 para a operação sem falhas. Já no sensoramento por Corrente Elétrica, a Frequência Média variou de 0,01 a 0,04 para a DPI, de 0,02 a 0,028 para o AE e de 0,038 a 0,052 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 142 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Frequência Média entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,0460
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1989
Arco elétrico e operação sem falha	0,2443

Figura 194 – Cruzamento entre Banda Equivalente para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



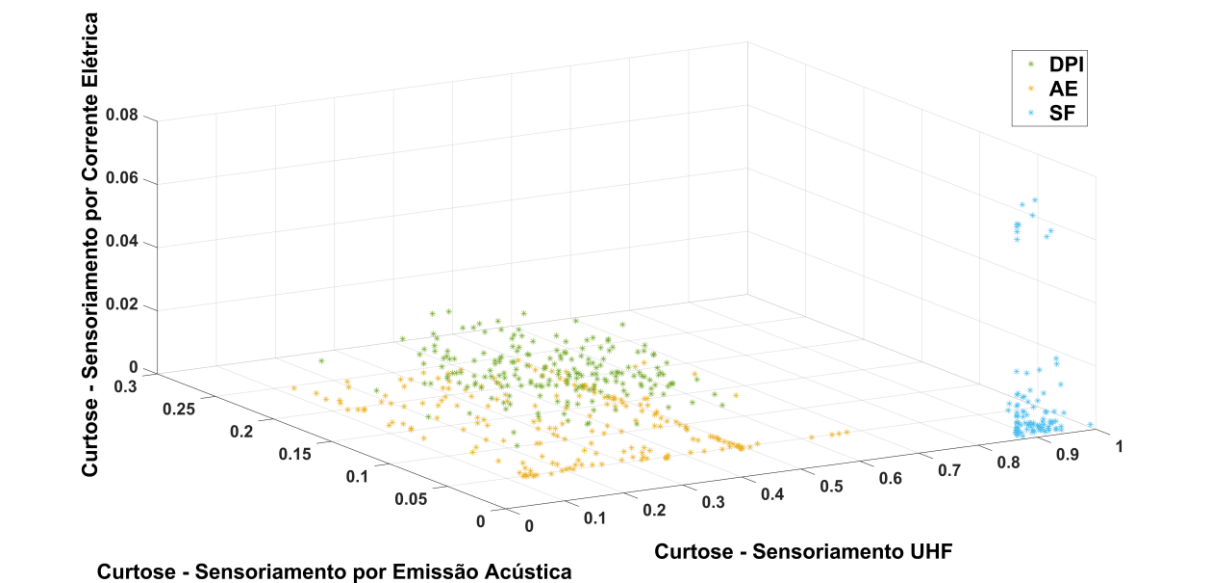
Fonte: Elaborado pela autora.

Emissão Acústica e por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 194. No sensoriamento UHF, a Banda Equivalente houve variação de 0,28 a 0,88 para a DPI, de 0,64 a 0,92 para o AE e de 0,80 a 1 para a operação sem falhas. No sensoriamento por Emissão Acústica, a Banda Equivalente houve variação de 0 a 0,0002 para a DPI, de 0,0002 a 0,0006 para o AE e de 0,0001 a 0,0008 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Banda Equivalente houve variação de 0,02 a 0,09 para a DPI, de 0,03 a 0,04 para o AE e de 0,04 a 0,10 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 143 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Banda Equivalente entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1127
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,1672
Arco elétrico e operação sem falha	0,2798

Figura 195 – Cruzamento entre Curtose para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

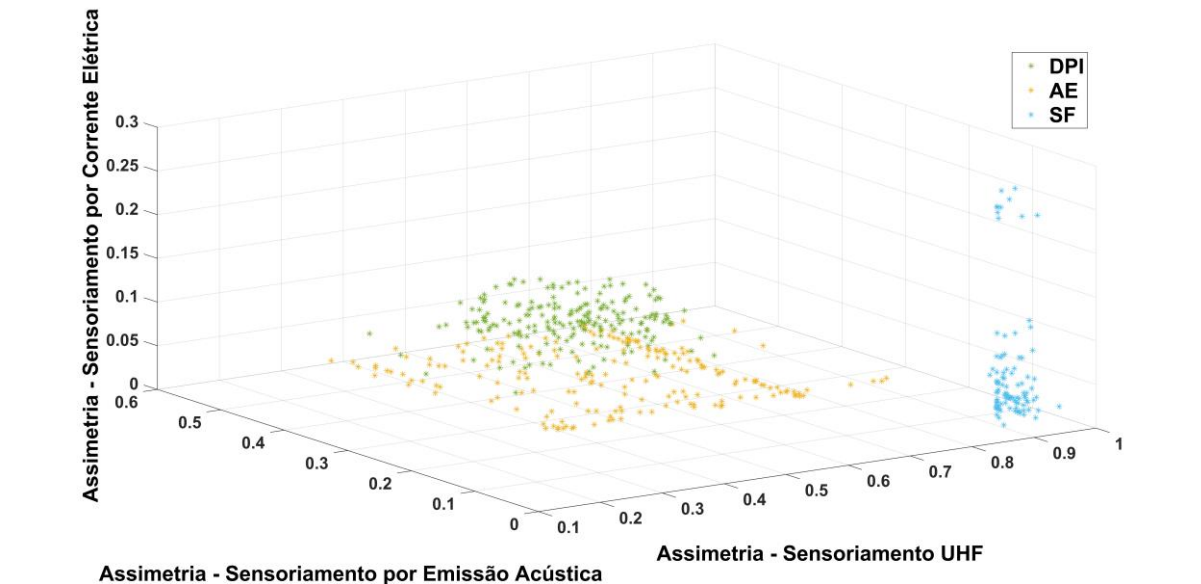
Na Figura 195 apresenta-se o cruzamento da Curtose para os sensoriamentos

UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica. Para o sensoriamento UHF, a Curtose apresentou variação entre 0,04 e 0,58 para a DPI, entre 0,13 e 0,62 para o AE e entre 0,86 e 1 para a operação sem falhas. Para o sensoriamento por Emissão Acústica, a Curtose apresentou variação entre 0,05 e 0,27 para a DPI, entre 0 e 0,20 para o AE e entre 0,0036 e 0,0075 para a operação sem falhas. Já para o sensoriamento por Corrente Elétrica, a Curtose apresentou variação de 0,0040 a 0,01 para a DPI, de 0,0070 a 0,0091 para o AE e de 0 a 0,07 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 144 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Curtose entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1256
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,5325
Arco elétrico e operação sem falha	0,6222

Figura 196 – Cruzamento entre Assimetria para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

O cruzamento da Assimetria para os sensoriamentos UHF, por Emissão

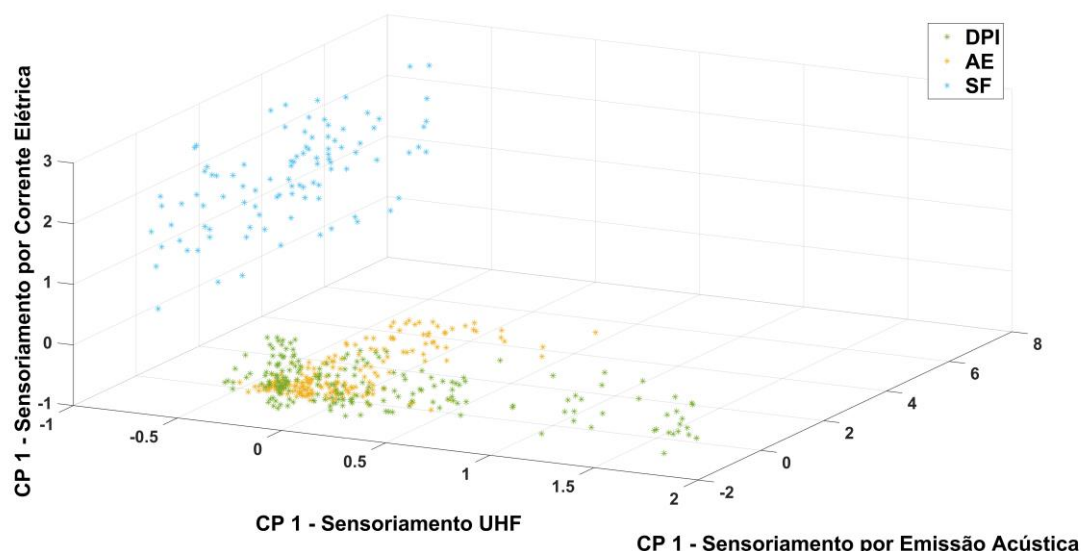
Acústica e por Corrente Elétrica se apresenta na Figura 196. No sensoriamento UHF, a Assimetria houve variação de 0,18 a 0,72 para a DPI, de 0,28 a 0,72 para o AE e de 0,88 a 1 para a operação sem falhas. No sensoriamento por Emissão Acústica, a Assimetria houve variação de 0,20 a 0,51 para a DPI, de 0,05 a 0,41 para o AE e de 0,03 a 0,05 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a Assimetria houve variação de 0,04 a 0,11 para a DPI, de 0,06 a 0,07 para o AE e de 0 a 0,27 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 145 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Assimetria entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	0,1632
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	0,4998
Arco elétrico e operação sem falha	0,5031

Os resultados apresentados indicam que o cruzamento das métricas normalizadas entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica obteve êxito nas duas situações possíveis analisadas. A Energia, Desvio Padrão, Curtose e a Assimetria foram eficazes na detecção da presença de uma falha. Já a Frequência Média possibilitou tanto a detecção quanto a classificação da falha.

Figura 197 – Cruzamento entre Componente Principal 1 para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



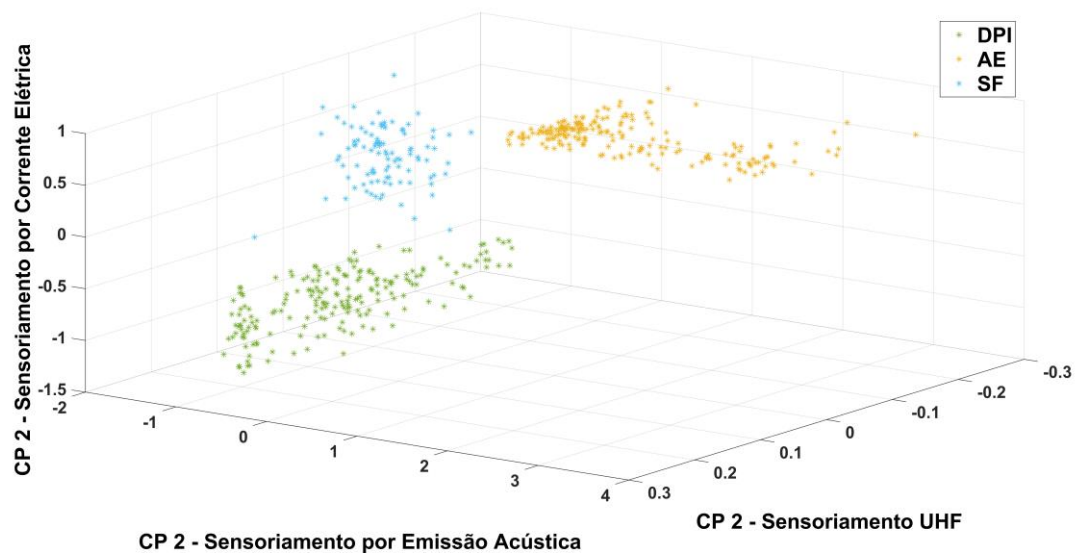
Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 197 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 1 para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica. No sensoriamento UHF, a CP 1 variou de -0,40 a 1,91 para a DPI, entre -0,40 e 0,58 para o AE e entre -0,80 e -0,61 para a operação sem falhas. No sensoriamento por Emissão Acústica, a CP 1 variou de -1,83 a -0,38 para a DPI, entre -1,36 e 4,11 para o AE e entre -1,70 e 7,00 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a CP 1 variou de -0,76 a 0,42 para a DPI, de -0,69 a -0,51 para o AE e de 0,48 a 2,99 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 146 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 1 entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,6526
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	4,5936
Arco elétrico e operação sem falha	3,4517

Figura 198 – Cruzamento entre Componente Principal 2 para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 198 é apresentado o cruzamento da Componente Principal 2 para os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica. No sensoriamento UHF, a CP 2 variou de -0,10 a 0,29 para a DPI, entre -0,29 e 0,11 para o AE e entre -0,07 e 0,14 para a operação sem falhas. No sensoriamento por Emissão Acústica, a CP 2 variou de -0,51 a 0,06 para a DPI, entre -0,11 e 3,02 para o AE e entre -1,77 e -0,31 para a operação sem falhas. Já no sensoriamento por Corrente Elétrica, a CP 2 variou de -1,13 a -0,18 para a DPI, de 0,41 a 0,59 para o AE e de -0,27 a 0,91 para a operação sem falhas. As distâncias euclidianas entre os conjuntos de dados se apresentam a seguir:

Tabela 147 – Distâncias Euclidianas entre os conjuntos de dados para a Componente Principal 2 entre os sensoriamentos UHF, por Emissão Acústica e por Corrente Elétrica

Falhas	Distância Euclidiana (unidade)
Arco elétrico e descarga parcial no isolador	1,6056
Descarga parcial no isolador e operação sem falha	1,2567
Arco elétrico e operação sem falha	1,9913

Observa-se que, na Análise das Componentes Principais, a Componente Principal 1 foi eficaz na detecção de falhas. A Componente Principal 2, por sua vez, obteve sucesso tanto na detecção quanto na classificação das falhas.

6.3. Discussões

A tabela a seguir apresenta um resumo de todos os cruzamentos discutidos nas seções 6.1 e 6.2, detalhando a eficácia de cada caso.

Tabela 148 – Resumo dos resultados

Sensor	Medida	Distância Euclidian a entre DPI e AE (unidade)	Distância Euclidiana entre DPI e SF (unidade)	Distância Euclidiana entre AE e SF (unidade)	Observações
UHF	Energia e Desvio Padrão	0,2101	0,4006	0,1907	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia e Frequência Média	0,1501	0,4488	0,3259	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia e Banda Equivalente	0,2042	0,4547	0,2543	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia e Curtose	0,1731	0,6905	0,5460	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia e Assimetria	0,1655	0,6299	0,4944	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para

					detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão e Frequência Média	0,1787	0,4965	0,3451	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão e Banda Equivalente	0,2260	0,5018	0,2785	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão e Curtose	0,1984	0,7224	0,5577	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão e Assimetria	0,1918	0,6647	0,5072	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Frequência Média e Banda Equivalente	0,1717	0,5411	0,3839	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Frequência Média e Curtose	0,1332	0,7502	0,6171	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Frequência Média e Assimetria	0,1231	0,6949	0,5719	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Banda Equivalente e Curtose	0,1921	0,7537	0,5825	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Banda Equivalente	0,1853	0,6987	0,5344	Apresentou pontos intercalados dos tipos de

	e Assimetria				falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Curtose e Assimetria	0,1503	0,8707	0,7205	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Desvio Padrão e Frequência Média	0,2221	0,3617	0,5516	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente	0,2617	0,2989	0,5563	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Desvio Padrão e Curtose	0,2382	0,5682	0,7613	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Desvio Padrão e Assimetria	0,2327	0,5187	0,7068	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Frequência Média e Banda Equivalente	0,2165	0,3989	0,5920	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Frequência Média e Curtose	0,1874	0,6266	0,7877	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Frequência Média e Assimetria	0,1804	0,5821	0,7352	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para

					detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Banda Equivalente e Curtose	0,2330	0,5925	0,7911	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Banda Equivalente e Assimetria	0,2274	0,5453	0,7388	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Energia, Curtose e Assimetria	0,1999	0,7286	0,9033	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente	0,2372	0,4148	0,6289	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose	0,2110	0,6368	0,8158	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria	0,2048	0,5931	0,7653	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão, Banda Equivalente e Curtose	0,2524	0,6033	0,8191	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria	0,2472	0,5570	0,7687	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Desvio Padrão,	0,2222	0,7374	0,9279	Apresentou pontos intercalados dos tipos de

	Curtose e Assimetria				falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose	0,2051	0,6586	0,8437	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria	0,1987	0,6165	0,7949	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Frequência Média, Curtose e Assimetria	0,1666	0,7833	0,9497	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	Banda Equivalente, Curtose e Assimetria	0,2166	0,7563	0,9525	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF	CP 1 e CP 2	0,4886	0,6299	1,0419	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia e Desvio Padrão	0,1426	0,3835	0,2431	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Energia e Frequência Média	0,4345	0,4861	0,7833	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Energia e Banda Equivalente	0,4600	0,3187	0,3357	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Energia e Curtose	0,2718	0,6203	0,3486	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Energia e Assimetria	0,3188	0,7032	0,3848	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem

Emissão Acústica	Desvio Padrão e Frequência Média	0,4265	0,2647	0,4918	falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos. Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Desvio Padrão e Banda Equivalente	0,4524	0,3027	0,3439	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Desvio Padrão e Curtose	0,2588	0,6122	0,3565	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Desvio Padrão e Assimetria	0,3078	0,6961	0,3920	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Frequência Média e Banda Equivalente	0,6108	0,1568	0,5435	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Frequência Média e Curtose	0,4852	0,5547	0,5516	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Frequência Média e Assimetria	0,5130	0,6461	0,5752	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Banda Equivalente e Curtose	0,5082	0,5738	0,4251	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Banda Equivalente e Assimetria	0,5348	0,6626	0,4552	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Curtose e Assimetria	0,3851	0,8498	0,4648	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Emissão Acústica	Energia, Desvio Padrão e Frequência Média	0,4422	0,3855	0,5183	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente	0,4672	0,4125	0,3808	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.

Emissão Acústica	Energia, Desvio Padrão e Curtose	0,2839	0,6733	0,3923	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Emissão Acústica	Energia, Desvio Padrão e Assimetria	0,3291	0,7504	0,4247	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Emissão Acústica	Energia, Frequência Média e Banda Equivalente	0,6219	0,3211	0,5676	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia, Frequência Média e Curtose	0,4990	0,6215	0,5754	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia, Frequência Média e Assimetria	0,5261	0,7043	0,5980	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia, Banda Equivalente e Curtose	0,5214	0,6386	0,4555	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia, Banda Equivalente e Assimetria	0,5473	0,7194	0,4837	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Energia, Curtose e Assimetria	0,4023	0,8948	0,4928	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Desvio Padrão, Frequência Média e Banda Equivalente	0,6163	0,3052	0,5725	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose	0,4921	0,6134	0,5802	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria	0,5195	0,6972	0,6026	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Desvio Padrão, Banda	0,5147	0,6307	0,4615	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz

					tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Equivalente e Curtose Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria	0,5410	0,7124	0,4894	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Desvio Padrão, Curtose e Assimetria	0,3937	0,8892	0,4984	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica	Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose	0,6583	0,5751	0,6247	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria	0,6791	0,6637	0,6455	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Frequência Média, Curtose e Assimetria	0,5687	0,8507	0,6524	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	Banda Equivalente, Curtose e Assimetria	0,5884	0,8632	0,5495	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Emissão Acústica	CP 1 e CP 2	1,9043	4,0227	3,0694	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia e Desvio Padrão	0,0377	0,1952	0,1935	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Energia e Frequência Média	0,3288	0,3907	0,6931	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia e Banda Equivalente	0,2931	0,3903	0,6583	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia e Curtose	0,0495	0,1948	0,1941	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.

Corrente Elétrica	Energia e Assimetria	0,0706	0,2211	0,1901	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Desvio Padrão e Frequência Média	0,3308	0,3390	0,6693	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Desvio Padrão e Banda Equivalente	0,2953	0,3384	0,6332	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Desvio Padrão e Curtose	0,0612	0,0134	0,0720	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Desvio Padrão e Assimetria	0,0793	0,1054	0,0606	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Frequência Média e Banda Equivalente	0,4404	0,4786	0,9186	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Frequência Média e Curtose	0,3323	0,3387	0,6695	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Frequência Média e Assimetria	0,3361	0,3545	0,6683	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Banda Equivalente e Curtose	0,2970	0,3382	0,6333	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Banda Equivalente e Assimetria	0,3013	0,3540	0,6321	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Curtose e Assimetria	0,0855	0,1047	0,0624	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem

					falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia, Desvio Padrão e Frequência Média	0,3309	0,3910	0,6949	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Corrente Elétrica	Energia, Desvio Padrão e Banda Equivalente	0,2954	0,3905	0,6602	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
Corrente Elétrica	Energia, Desvio Padrão e Curtose	0,0617	0,1953	0,2004	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Energia, Desvio Padrão e Assimetria	0,0797	0,2215	0,1965	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Energia, Frequência Média e Banda Equivalente	0,4404	0,5168	0,9375	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia, Frequência Média e Curtose	0,3324	0,3908	0,6951	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia, Frequência Média e Assimetria	0,3362	0,4045	0,6940	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia, Banda Equivalente e Curtose	0,2972	0,3903	0,6603	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia, Banda Equivalente e Assimetria	0,3014	0,4041	0,6592	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Energia, Curtose e Assimetria	0,0859	0,2211	0,1971	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Desvio Padrão, Frequência Média e	0,4419	0,4788	0,9200	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem

Corrente Elétrica	Banda Equivalente Desvio Padrão, Frequência Média e Curtose Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria	0,3344	0,3390	0,6713	falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos. Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Banda Equivalente Desvio Padrão, Frequência Média e Assimetria	0,3382	0,3547	0,6702	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Banda Equivalente e Curtose Desvio Padrão, Banda Equivalente e Assimetria	0,2993	0,3385	0,6353	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Banda Equivalente e Assimetria	0,3035	0,3542	0,6341	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Desvio Padrão, Curtose e Assimetria	0,0931	0,1055	0,0798	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Corrente Elétrica	Frequência Média, Banda Equivalente e Curtose	0,4431	0,4787	0,9201	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria	0,4459	0,4899	0,9193	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Frequência Média, Curtose e Assimetria	0,3397	0,3545	0,6704	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	Banda Equivalente, Curtose e Assimetria	0,3052	0,3540	0,6343	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Corrente Elétrica	CP 1 e CP 2	1,1908	2,2393	2,4069	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
UHF e Emissão Acústica	Energia	0,1179	0,2856	0,1699	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para

UHF e Emissão Acústica	Desvio Padrão	0,0899	0,2702	0,1984	detectar a presença da falha. Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Emissão Acústica	Frequência Média	0,0466	0,1986	0,2432	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
UHF e Emissão Acústica	Banda Equivalente	0,1095	0,1645	0,2470	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
UHF e Emissão Acústica	Curtose	0,1260	0,5345	0,6244	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Emissão Acústica	Assimetria	0,1684	0,5183	0,5226	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Emissão Acústica	CP 1	1,6183	4,0075	2,4892	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Emissão Acústica	CP 2	1,1250	0,9004	1,9730	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
UHF e Corrente Elétrica	Energia	0,0476	0,2000	0,2074	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Corrente Elétrica	Desvio Padrão	0,0389	0,0292	0,0664	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Corrente Elétrica	Frequência Média	0,0469	0,2027	0,2489	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o

					estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Corrente Elétrica	Banda Equivalente	0,1147	0,1702	0,2849	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
UHF e Corrente Elétrica	Curtose	0,1060	0,5105	0,6165	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Corrente Elétrica	Assimetria	0,0828	0,3958	0,4755	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Corrente Elétrica	CP 1	0,5167	2,2927	2,4703	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF e Corrente Elétrica	CP 2	1,1250	0,9004	1,9730	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Energia	0,1172	0,2905	0,1761	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Desvio Padrão	0,0669	0,2020	0,1435	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Frequência Média	0,2149	0,2185	0,4334	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Banda Equivalente	0,2461	0,2801	0,5262	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.

Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Curtose	0,2436	0,5466	0,3037	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Assimetria	0,2782	0,6003	0,3226	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	CP 1	1,6050	4,4804	3,3956	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
Emissão Acústica e Corrente Elétrica	CP 2	1,5812	1,2428	1,9891	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Energia	0,1179	0,2907	0,1778	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Desvio Padrão	0,0721	0,2037	0,1530	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Frequência Média	0,0460	0,1989	0,2443	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Banda Equivalente	0,1127	0,1672	0,2798	Apresentou pontos intercalados tanto das falhas quanto da operação sem falhas, não sendo eficaz em nenhum dos casos.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Curtose	0,1256	0,5325	0,6222	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.

UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	Assimetria	0,1632	0,4998	0,5031	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	CP 1	1,6526	4,5936	3,4517	Apresentou pontos intercalados dos tipos de falha porém distinguiu o estado de falha e sem falha, sendo eficaz apenas para detectar a presença da falha.
UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica	CP 2	1,6056	1,2567	1,9913	Apresentou três clusters bem definidos, sendo eficaz tanto na detecção quanto na classificação da falha.

Analisando os resultados apresentados, quando o sensoriamento é individual, o sensoriamento por Emissão Acústica oferece o melhor desempenho. Esse método é eficaz tanto na detecção de falhas quanto em sua classificação, sendo bem-sucedido em vinte e um cruzamentos de métricas, em comparação com três cruzamentos para o sensoriamento por Corrente Elétrica e um para o sensoriamento UHF.

Para o sensoriamento UHF, o único cruzamento que se mostrou eficaz na detecção e classificação das falhas foi entre a Componente Principal 1 e a Componente Principal 2. No caso do sensoriamento por Corrente Elétrica, o cruzamento mais eficaz também foi entre Componente Principal 1 e Componente Principal 2, pois apresentou distâncias euclidianas maiores em comparação com os outros cruzamentos que também apresentaram eficácia. Já para o sensoriamento por Emissão Acústica, o cruzamento mais favorável envolveu a Frequência Média, Banda Equivalente e Assimetria, uma vez que resultou em regiões de clusters mais bem delimitadas, além de uma maior distância euclidiana em comparação aos demais cruzamentos eficazes.

No entanto, o uso de sensoriamento individual apresenta algumas limitações,

pois é altamente suscetível a ruídos no sistema, resultantes, por exemplo, de choques mecânicos de partículas que podem colidir com a parede do transformador e gerar sinais impulsivos não originados por descargas elétricas, ou picos de energia causados por manobras de chaves e equipamentos na rede elétrica, o que pode levar a diagnósticos incorretos.

Por outro lado, o sensoriamento híbrido garante maior confiabilidade em um diagnóstico correto, pois sempre há uma dupla ou tripla verificação de que o sinal analisado realmente se origina de uma descarga parcial ou de um arco elétrico. Dessa forma, recomenda-se que o monitoramento de falhas em transformadores seja realizado por meio de sensoriamento híbrido, utilizando dois ou mais métodos distintos.

Portanto, analisando os resultados obtidos para o sensoriamento híbrido, os melhores desempenhos foram observados nos métodos que utilizaram o sensoriamento UHF combinado com Emissão Acústica, e nos que utilizaram os três tipos de sensoriamento (UHF, Emissão Acústica e Corrente Elétrica), ambos com dois casos eficazes. Em seguida, o método que combinou Emissão Acústica e Corrente Elétrica apresentou um caso eficaz. Apenas o método que utilizou o sensoriamento UHF junto com Corrente Elétrica não foi eficaz na detecção e classificação de falhas, mas ainda assim foi satisfatório no caso de detecção da falha.

Para o sensoriamento UHF combinado com Emissão Acústica, o melhor resultado foi obtido com a Frequência Média, pois os clusters formados apresentaram maior separação em comparação com o outro caso eficaz. No método que utiliza os três sensores, o cruzamento mais eficaz foi o da Componente Principal 2, pelo mesmo motivo do caso anterior. Por fim, no método que combinou Emissão Acústica com Corrente Elétrica, o único caso que se mostrou eficiente na detecção e classificação

das falhas foi o da Componente Principal 2.

Entre os três casos discutidos no sensoriamento híbrido, o método que utiliza os três sensores apresentou as regiões de clusters mais bem delimitadas e maiores distâncias euclidianas. No entanto, essa vantagem foi mínima, com apenas uma diferença irrisória nas distâncias euclidianas em comparação ao cruzamento entre Emissão Acústica e Corrente Elétrica.

De acordo com Tenbohlen et al. (2023), o espectro de frequência das falhas de transformadores não ultrapassa 1,8 GHz, tendo seus valores de pico inferiores a 1 GHz. Por sua vez, a literatura técnico-científica destaca frequências de UHF de até 3 GHz, de 100 MHz a 1 GHz, como também, mais recentemente, faixas entre 400 MHz e 900 MHz para a caracterização das falhas em transformadores.

Em seu estudo para avaliar se a restrição de banda pode limitar a classificação de falhas em transformadores, Schiewaldt (2023) realiza a aquisição de sinais de um transformador em operação através de um conversor analógico digital dedicado para sistema de aquisição de dados, com uma taxa de aquisição de 4 GHz, porém esse sistema se faz custoso devido a um *hardware* mais robusto, e conclui que a metodologia que apresenta melhor classificação dentre as metodologias analisadas foi a metodologia de Análise de Componentes Principais combinada com a faixa de frequência de 400 MHz a 900 MHz.

Portanto, ao considerar essa faixa de frequência, a utilização de um detector de envoltória torna-se viável para a identificação e classificação de falhas em transformadores, operando em baixíssimas frequências com a envoltória dos sinais obtidos e alcançando os mesmos resultados de sistemas de alto custo. Dessa forma, esta dissertação conduziu análises de sensoriamento UHF utilizando uma faixa de frequência que varia de 1,8 MHz a, no máximo, 156 MHz, possibilitada pelo uso do

detector de envoltória, que torna o sistema de aquisição de dados mais economicamente viável.

CAPÍTULO VII – CONCLUSÃO

O monitoramento e o diagnóstico de falhas incipientes em transformadores são essenciais para garantir a qualidade do fornecimento de energia e prolongar a vida útil dessas máquinas, além de contribuir para a redução de custos com manutenção. Diversas técnicas de diagnóstico de falhas são aplicadas em transformadores, como a análise de gases chave, reconhecimento de padrões de descargas parciais, análise de corrente elétrica, sensoriamento acústico, entre outras. Este trabalho avaliou três técnicas de sensoriamento aplicadas ao diagnóstico de falhas em transformadores, sendo elas o sensoriamento UHF, acústico e de corrente elétrica, combinadas com duas técnicas de processamento de sinais, com o objetivo de identificar e classificar essas falhas.

Os resultados demonstraram que as três técnicas de sensoriamento são eficazes, tanto quando utilizadas de forma individual quanto em configurações híbridas, combinando dois ou três tipos de sensores. No sensoriamento individual, o sensoriamento acústico mostrou maior eficácia, apresentando 21 cruzamentos de métricas que permitiram tanto a identificação quanto a classificação do tipo de falha. O transformador de corrente de alta frequência obteve 3 cruzamentos que também possibilitaram simultaneamente a identificação e classificação das falhas, enquanto a antena UHF apresentou os mesmos resultados em apenas 1 caso, no cruzamento das Componentes Principais 1 e 2.

No sensoriamento híbrido, a única combinação de sensores que não se mostrou eficaz na identificação e classificação das falhas simultaneamente foi a do sensor UHF com o de corrente elétrica, porém obteve resultados favoráveis quando da detecção da falha. Por outro lado, a combinação entre o sensor UHF e o sensor acústico

apresentou eficácia utilizando tanto a Frequência Média quanto a Componente Principal 2, tendo o melhor resultado utilizando o cruzamento da estatística de Frequência Média de cada sensor. A combinação entre o sensor acústico e o de corrente foi eficaz apenas com o cruzamento entre a Componente Principal 2 de cada sensor, e, por fim, a combinação dos três sensores obteve êxito na diferenciação tanto da ocorrência da falha quanto na sua classificação utilizando a Frequência Média e a Componente Principal 2, sendo o melhor resultado observado no cruzamento da Componente Principal 2 de cada sensor. Dessa forma, observa-se que a Componente Principal 2 obteve os melhores resultados no contexto do sensoriamento híbrido.

Embora as três técnicas sejam promissoras quando utilizadas de forma individual, constatou-se que o uso simultâneo dos três sensores resulta em um desempenho superior, tendo em vista que os mapas agrupados demonstraram maiores distâncias euclidianas entre os centroides dos clusters formados. Isso ocorre porque a utilização de um único tipo de sensoriamento pode gerar falsos diagnósticos, já que diferentes sensores podem captar falsos sinais de maneira semelhante. Por exemplo, um transitório causado por uma manobra na rede seria detectado tanto pelo sensoriamento UHF quanto pelo de corrente elétrica, mas não pelo acústico. Da mesma forma, ruídos ambientais, como um choque mecânico causado por um impacto na estrutura do transformador, seriam detectados pelo sensoriamento acústico, mas não pelos outros. Em suma, os três sensores em conjunto são menos sensíveis à ruídos, isto é, na ocorrência de uma falha, todos os sensores acionarão. Portanto, apesar de ser eletronicamente mais custosa, a combinação dos três sensores torna o sistema mais imune a ruídos, garantindo que apenas falhas reais sejam identificadas, assegurando assim a confiabilidade do sistema.

A detecção da envoltória do sinal UHF demonstrou eficácia tanto na identificação

quanto na classificação de falhas, tornando viável a redução da taxa de aquisição de dados por meio de um detector de envoltória com uma eletrônica simples e de baixo custo. Isso permite uma diminuição nos custos de aquisição de sinais, uma vez que a faixa de frequência manipulada nos sinais UHF foi reduzida de 300 MHz a 3 GHz (faixa nominal do UHF) para uma faixa observada entre 1,8 MHz e 156 MHz, utilizando apenas a envoltória dos sinais. Portanto, tendo em vista os limites da envoltória das descargas parciais no isolador e dos arcos elétricos, é possível utilizar um hardware com uma taxa de aquisição de 312 MHz, respeitando o Teorema de Nyquist.

Para trabalhos futuros, outros tipos de falhas que acometem transformadores poderão ser incluídos, visando avaliar a eficácia das técnicas estudadas na detecção e classificação dessas falhas. Além disso, recomenda-se a investigação de outras metodologias de processamento de dados para aprimorar a análise e aumentar a robustez dos resultados. Da mesma forma, há ainda a possibilidade de relacionar a detecção de gases chave com outros métodos de sensoriamento, além de se analisar múltiplas descargas ocorrendo simultaneamente.

Referências

- ABBASI, Ali Reza. Fault detection and diagnosis in power transformers: a comprehensive review and classification of publications and methods. *Electric Power Systems Research*, v. 210, 2022.
- ABRAHÃO, K. C. de F. J.; SOUZA, R. G. V. de. Estimativa da evolução do uso final de energia elétrica no setor residencial do Brasil por região geográfica. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 383-408, abr./jun. 2021. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. ISSN 1678-8621.
- ALBARRACÍN, Ricardo. et al. Partial discharges: Keys for condition monitoring and diagnosis of power transformers. **Power transformer condition monitoring and diagnosis**, v.104, p.39-79, 2018.
- ALBARRACÍN, R. et al. Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time–power ratio maps. *ISA Transactions*, v. 58, p. 389-397, 2015.
- ARDILA-REY, Jorge Alfredo et al. A comparison of inductive sensors in the characterization of partial discharges and electrical noise using the chromatic technique. *Sensors*, v. 18, n. 4, p. 1021, 2018.
- AMERICO, Jonatas Policarpo; CABRAL, Sérgio Henrique Lopes; STEFENON, Stéfano Frizzo; SALVADOR, Marcos Antônio; OLIBONI, Carlos Roberto Pereira; MADRUGA, Gabriel Granzotto. Um estudo qualitativo das técnicas utilizadas para medição e localização de descargas parciais em transformadores de potência. *Revista Espacios*, v. 38, n. 34, p. 14, 2017.
- BARRETO, Guilherme Keiti Inoue. *Um estudo comparativo sobre a influência da temperatura em transdutores piezelétricos aplicados ao diagnóstico de falhas em transformadores por meio de emissão acústica*. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus de Bauru, 2023.
- BARTLEY, W. H. *Failure analysis of transformers*. The Hartford Steam Boiler Inspection & Insurance, 2003.
- BESHARATIFARD, H.; HASANZADEH, S.; HEYDARIAN-FORUSHANI, E.; ALHELOU, H. H.; SIANO, P. *Detection and analysis of partial discharges in oil-immersed power transformers using low-cost acoustic sensors*. *Applied Sciences*, v. 12, n. 6, p. 3010, 2022.
- BOCK, D. E.; DE VEAUX, R. D. *Introductory statistics*. 6. ed. Pearson, 2016.
- CASTRO, Bruno Albuquerque et al. A comparative analysis applied to the partial discharges identification in dry-type transformers by hall and acoustic emission sensors. *Sensors*, v. 22, n. 5, p. 1716, 2022.
- CASTRO, Bruno Albuquerque et al. New algorithm applied to transformers' failures

detection based on Karhunen-Loève transform. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023.

CAVALLINI, A.; CHEN, X.; MONTANARI, G. C.; CIANI, F. Diagnosis of EHV and HV transformers through an innovative partial-discharge-based technique. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 25, n. 2, p. 814-824, abr. 2010.

FRANZEN, A.; KARLSSON, S. Failure modes and effects analysis of transformers. Royal Institute of Technology, KTH School of Electrical Engineering, Stockholm, Sweden, jan. 2013.

FRITSCH, Martin; WOLTER, Martin. High-frequency current transformer design and construction guide. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Magdeburg, 2022.

GAMEZ., Carlos et al. Dissolved gas analysis, measurements and interpretations. **Power transformer condition monitoring and diagnosis**, v.104, p.1-35, 2018.

GAZIT, Ehud. Improved design of the Vivaldi antenna. *IEE Proceedings H (Microwaves, Antennas and Propagation)*, v. 135, n. 2, p. 89-92, abr. 1988.

HUSSAIN, M. R.; REFAAT, S. S.; ABU-RUB, H. Overview and partial discharge analysis of power transformers: a literature review. *IEEE Access*, v. 9, p. 119825-119842, 2021.

IEC 6020. *High-voltage test techniques - Insulation coordination*. 2000.

IEC 60270. *High-voltage test techniques: partial discharge measurements*. 2000.

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

JAN, S. T.; AFZAL, R.; KHAN, A. Z. Transformer failures, causes & impact. In: *International Conference on Data Mining, Civil and Mechanical Engineering*, 2015. p. 49–52.

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, 1 ago. 2021.

JOLLIFFE, I. T. *Principal component analysis*. New York: Springer, 2002.

JORDÃO, R. G. *Transformadores*. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 197 p. ISBN 978-85-212-0316-2.

KHORSAND ZAK, A.; YAZDI, S. T.; ABRISHAMI, M. E.; et al. *A review on piezoelectric ceramics and nanostructures: fundamentals and fabrications*. *Journal of the Australian Ceramic Society*, v. 60, n. 4, p. 723–753, 2024.

KUMAR, R. et al. A condition monitoring and fault detection in the windings of power transformer using impulse frequency response analysis. *International Journal of*

System Assurance Engineering and Management, p. 1-13, 2022.

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.; SCHAFER, R. W. *Signals and systems*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.

OPPENHEIM, A. V.; VERGHESE, C. *Signals, systems & inference*. 1. ed. Hoboken: Pearson, 2017.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. U. *Probability, random variables, and stochastic processes*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

ROCHA, Marco Aurélio. Identificação e classificação de curto entre espiras e desbalanço de tensão em motores de indução trifásicos utilizando sensores de corrente, emissão acústica e vibração com emprego de transformada Hilbert e transformada wavelet. 2022. 125 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, 2022.

ROMANO, M. A. d. A.; DE MORAIS, A. M.; NUNES, M. V. A.; MARESCH, K.; FREITAS-GUTIERRES, L. F.; CARDOSO, G., Jr.; OLIVEIRA, A. d. L.; MARTINS, E. F.; CORREA, C. H.; FONTOURA, H. C. *A novel method for online diagnostic analysis of partial discharge in instrument transformers and surge arresters from the correlation of HFCT and IEC methods*. *Energies*, v. 17, n. 19, p. 4921, 2024.

RONCERO-CLEMENTE, C.; ROANES-LOZANO, E. A multi-criteria computer package for power transformer fault detection and diagnosis. *Applied Mathematics and Computation*, v. 319, p. 153-164, 2018.

SCHIEWALDT, Karl. *Técnicas de processamento de sinais aplicadas a separação de dados e análise em frequência de sinais UHF emitidos por falhas de transformadores*. 2024. Qualificação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Campus de Bauru, 2024.

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

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

SIKORSKI, W.; WIELEWSKI, A. Low-cost online partial discharge monitoring system for power transformers. *Sensors*, v. 23, n. 7, p. 3405, 2023.

SOUSA, Herbet Filipe dos Santos. Desenvolvimento de técnica de detecção otimizada de sinais do arco elétrico para o monitoramento de disjuntores de alta tensão. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Campina Grande, Paraíba,

2018.

TANG, S.; HALE, C.; THAKER, H. Reliability modeling of power transformers with maintenance outage. *Systems Science & Control Engineering*, p. 316-324, 2014.

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

TIKAKOSOL, K.; TANITTEERAPAN, T.; MUNGGKUNG, N. Application of the integrated AE and HFCT sensors for online Dry-type Transformer Partial Discharge Monitoring. *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 97, n. 2, p. 126-130, 2021.

UWIRINGIYIMANA, J. P.; KHAYAM, U.; SUWARNO; MONTANARI, G. C. Comparative analysis of partial discharge detection features using a UHF antenna and conventional HFCT sensor. *IEEE Access*, v. 10, p. 107214-107226, 2022.

ZHANG, J. et al. Chromatic classification of RF signals produced by electrical discharges in HV transformers. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, v. 152, n. 5, p. 629-634, 2005.