

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DANIELE FURUSHIMA AKIYOSHI

**LOCALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM
TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA OPERANDO EM CONDIÇÕES
NOMINAIS ATRAVÉS DE SENSORES PIEZELÉTRICOS E SISTEMAS
INTELIGENTES**

**BAURU
2020**

DANIELE FURUSHIMA AKIYOSHI

**LOCALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM
TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA OPERANDO EM CONDIÇÕES
NOMINAIS ATRAVÉS DE SENSORES PIEZELÉTRICOS E SISTEMAS
INTELIGENTES**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru, como requisito para obtenção de título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Andreoli

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Albuquerque de Castro

BAURU

2020

Akiyoshi, Daniele Furushima.

Localização e Identificação de Descargas Parciais em Transformador de Potência Operando em Condições Nominais através de Sensores Piezelétricos e Sistemas Inteligentes / Daniele Furushima Akiyoshi - Bauru, 2020. 107 f.

Orientador: André Luiz Andreoli

Coorientador: Bruno Albuquerque de Castro

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2020.

1. Localização de DP. 2. Descargas Parciais. 3. Falhas em Transformadores. 4. Detecção Acústica. 5. Sensor Piezelétrico. I. Universidade Estadual Paulista. II. Título

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE DANIELE FURUSHIMA AKIYOSHI, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 26 dias do mês de maio do ano de 2020, às 14:10 horas, via sistemas de videoconferência e outras ferramentas para comunicação a distância, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI - Orientador do Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI do Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. MARCELO SUETAKE do Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de DANIELE FURUSHIMA AKIYOSHI, intitulada LOCALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA OPERANDO EM CONDIÇÕES NOMINAIS ATRAVÉS DE SENSORES PIEZELÉTRICOS E SISTEMAS INTELIGENTES. Após a exposição, a discente foi arguida oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADA. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ANDRE LUIZ ANDREOLI



Prof. Dr. PAULO JOSÉ AMARAL SERNI



Prof. Dr. MARCELO SUETAKE



Dedico aos meus pais, ao meu irmão e a toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que mais essa conquista fosse alcançada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me inspirou e me protegeu nesta jornada.

Ao Professor Dr. André Luiz Andreoli, pela confiança, pelo acolhimento, pela paciência, pela compreensão e pelos ensinamentos transmitidos durante esta caminhada.

Ao Professor Dr. Bruno Albuquerque de Castro, pelo incentivo, pelos ensinamentos e por não ter medido esforços para me ajudar em todos os momentos, o que foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, Minoru e Edna, e ao meu irmão André, por acreditarem no meu potencial e me darem todo apoio e incentivo para que eu obtivesse mais essa conquista.

Ao técnico de laboratório Osmar, por todo auxílio, empenho e dedicação que viabilizou a parte experimental desta pesquisa.

Aos colegas de laboratório, pelo companheirismo e apoio em todas as etapas desta jornada.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.”

José de Alencar

RESUMO

Os transformadores são equipamentos de suma importância no sistema elétrico de potência. Qualquer falha destes equipamentos, pode acarretar prejuízos e consequências graves tanto para as concessionárias de energia, quanto aos seus consumidores. A ocorrência de descargas parciais em transformadores de potência está diretamente relacionada às condições de seu sistema de isolamento. Elas podem se desenvolver ao longo do tempo e culminar na perda total do sistema de isolamento. Desta forma, o monitoramento das descargas parciais torna-se essencial para o planejamento de uma manutenção e a garantia do funcionamento adequado destes equipamentos. Neste contexto, o objetivo desta pesquisa é apresentar um método de localização e identificação de descargas parciais em transformador de potência operando com carregamento nominal, através de sensores piezelétricos de baixo custo e ferramentas como a transformada *wavelet* e os sistemas de inferência neuro-difuso adaptativos.

Palavras-chave: Transformador de potência. Localização de DP. Sensores de baixo custo.

ABSTRACT

Power transformers are an important equipment in electrical power system. Any failure of this equipment can cause serious losses and consequences for both energy utilities and their consumers. The occurrence of partial discharges in power transformers is directly related to the condition of their insulation system. It can develop over time and culminate in the total loss of the insulation system. Thus, partial discharges monitoring is essential for maintenance planning and ensuring the correct operation of this equipment. In this context, the objective of this research is to present a method of locating and identifying partial discharges in power transformers operating at full load, through low-cost piezoelectric sensors and tools such as the wavelet transform and adaptive neuro-diffuse inference systems.

Palavras-chave: Power Transformer. PD Location. Low-cost Sensors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva taxa de falhas de um transformador.	22
Figura 2 - Pontos de ocorrência de descargas parciais.	24
Figura 3 - Tipos de descargas parciais, segundo Mason (1995): (a) superficial; (b) externa; e (c) interna.	27
Figura 4 - Arborescência em polimetilmetacrilato.	29
Figura 5 - Modelo abc para descargas parciais em tensões alternadas em um isolante com uma cavidade.	30
Figura 6 - Circuito equivalente do modelo abc.	31
Figura 7 - Representação de uma isolação com cavidade submetida a uma diferença de potencial.	32
Figura 8 - Impedância de medição Z_m em série com o capacitor C_k	35
Figura 9 - Impedância de medição Z_m em série com o objeto de teste C_a	36
Figura 10 - Ponte balanceada utilizando o braço (C_{a2} , Z_{m2}) como referência em paralelo com o braço de teste (C_{a1} , Z_{m1}).	36
Figura 11 - Fenômeno piezoelétrico: (a) direto; e (b) inverso.	45
Figura 12 – Modelo do efeito piezoelétrico: (a) molécula em equilíbrio; (b) molécula submetida a uma força externa; (c) efeito de polarização na superfície, quando o material é submetido a uma força externa.	46
Figura 13 - Construção da cápsula piezelétrica de baixo custo.	47
Figura 14 - Sistema de oscilação de uma cápsula piezelétrica.	48
Figura 15 - Esquema para o equacionamento da localização de descargas parciais por triangulação de sinais.	49
Figura 16 - Intervalos de tempo entre as detecções da descarga parcial.	50
Figura 17 - Propagação da onda esférica no interior de um transformador de potência.	51
Figura 18 - Exemplo de sinal de emissão acústica com duas frentes de onda atingindo o sensor.	52
Figura 19 - Diagrama de decomposição <i>wavelet</i>	54
Figura 20 - Pontos de mínimo local para identificação dos instantes de chegada da onda acústica no sensor, segundo o critério de Akaike.	56
Figura 21 - Modelo não-linear de um neurônio artificial.	57
Figura 22 - Função de pertinência triangular.	60

Figura 23 - Função de pertinência trapezoidal.	60
Figura 24 - Função de pertinência gaussiana.	61
Figura 25 - Função de pertinência sigmoide.	61
Figura 26 - Função de pertinência unitária.	62
Figura 27 - Arquitetura típica do sistema ANFIS.	64
Figura 28 - Diagrama de blocos da metodologia proposta.	66
Figura 29 - Equipamentos utilizados no ensaio.	66
Figura 30 - Esquema de ligação dos equipamentos para os ensaios.	67
Figura 31 - Esquema de ligação dos terminais secundários do transformador em curto-circuito.	67
Figura 32 - Eletrodo desenvolvido para indução de descargas elétricas.	68
Figura 33 - Pontos de fixação dos eletrodos no núcleo para gerar as descargas.	68
Figura 34 - Ponto de referência utilizado para medir as coordenadas dos eletrodos e sensores PZT.	69
Figura 35 - Terminais acessíveis dos eletrodos em placa seletora.	70
Figura 36 - Medidor de rigidez dielétrica para indução de descarga parcial nos eletrodos.	70
Figura 37 - Cápsula piezelétrica de baixo custo.	71
Figura 38 - Cápsulas piezelétricas acoplados ao transformador.	72
Figura 39 - Circuito eletrônico do amplificador.	73
Figura 40 - Osciloscópio utilizado para aquisição dos sinais acústicos.	73
Figura 41 - Forma da onda acústica adquirida.	74
Figura 42 – Diagrama esquemático para extração das métricas.	75
Figura 43 - Diferença entre as coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2.	78
Figura 44 - Diferença entre as coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2.	78
Figura 45 - Diferença entre as coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2.	79
Figura 46 - Erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 2.	80
Figura 47 - Correlação entre os valores estimados e os desejados para o eixo x do eletrodo 2.	80

Figura 48 - Correlação entre os valores estimados e os desejados para o eixo y do eletrodo 2.	81
Figura 49 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 2....	81
Figura 50 - Diferença entre as coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6.....	82
Figura 51 - Diferença entre as coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6.....	83
Figura 52 - Diferença entre as coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6.....	84
Figura 53 - Erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 6.	84
Figura 54 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo x do eletrodo 6....	85
Figura 55 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo y do eletrodo 6....	85
Figura 56 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 6....	86
Figura 57 - Coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2, utilizando a <i>wavelet</i> do nível 7.	88
Figura 58 - Coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2, utilizando a <i>wavelet</i> do nível 7.	88
Figura 59 - Coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2, utilizando a <i>wavelet</i> do nível 7.	89
Figura 60 - Erros de localização dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 2, utilizando o nível 7 da TWD.	90
Figura 61 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo x do eletrodo 2, com o nível 7 da TWD.	90
Figura 62 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo y do eletrodo 2, com o nível 7 da TWD.	91
Figura 63 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 2, com o nível 7 da TWD.	91
Figura 64 - Diferença entre as coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6, utilizando a <i>wavelet</i> do nível 7.....	92
Figura 65 - Diferença entre as coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6, utilizando a <i>wavelet</i> do nível 7.....	93

Figura 66 - Diferença entre as coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6, utilizando a <i>wavelet</i> do nível 7.....	94
Figura 67 - Erros de localização dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 6, utilizando o nível 7 da TWD.	94
Figura 68 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo x do eletrodo 6, com o nível 7 da TWD.	95
Figura 69 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo y do eletrodo 6, com o nível 7 da TWD.	95
Figura 70 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 6, com o nível 7 da TWD.	96
Figura 71 - Comparação dos erros médios calculados para cada coordenada entre os dois métodos apresentados para localização da DP simulada no eletrodo 2.....	97
Figura 72 - Comparação dos erros médios calculados para cada coordenada entre os dois métodos apresentados para localização da DP simulada no eletrodo 6.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de identificação de descargas parciais.	40
Tabela 2 - Velocidade de propagação, densidade e impedância acústica do ar, aço, água e do óleo mineral isolante.....	43
Tabela 3 - Posicionamento dos eletrodos no núcleo em relação ao ponto de referência comum.	69
Tabela 4 - Especificação da cápsula PZT.....	71
Tabela 5 - Coordenadas dos sensores PZT	72
Tabela 6 - Configuração do sistema ANFIS.....	76
Tabela 7 – Coordenadas x, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 2.	77
Tabela 8 – Coordenadas y, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 2.	78
Tabela 9 – Coordenadas z, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 2.	79
Tabela 10 – Coordenadas x, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 6.	82
Tabela 11 – Coordenadas y, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 6.	83
Tabela 12 – Coordenadas z, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 6.	83
Tabela 13 - Erros médios para cada nível de detalhe <i>wavelet</i> do ensaio do eletrodo 2.....	87
Tabela 14 – Coordenadas x do eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.....	87
Tabela 15 – Coordenadas y do eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.....	88
Tabela 16 – Coordenadas z do eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.....	89
Tabela 17 – Coordenadas x do eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.....	92
Tabela 18 – Coordenadas y do eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.....	93

Tabela 19 – Coordenadas z do eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.....	93
Tabela 20 – Comparação dos erros médios de localização do eletrodo 2, utilizando duas metodologias diferentes.....	96
Tabela 21 – Comparação dos erros médios de localização do eletrodo 6, utilizando duas metodologias diferentes.....	97
Tabela 22 – Comparação dos erros médios percentuais de localização do eletrodo 2, utilizando duas metodologias diferentes.....	98
Tabela 23 – Comparação dos erros médios percentuais de localização do eletrodo 6, utilizando duas metodologias diferentes.....	98

LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIC	<i>Akaike Information Criterion</i> (Critério de Informação de Akaike)
ANFIS	<i>Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System</i> (Sistema de Inferência Neuro Difuso Adaptativo)
DP	Descarga Parcial
FIR	<i>Finite Impulse Response</i> (Resposta Finita ao Impulso)
IEC	<i>International Electrotechnical Comission</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentada
PCA	<i>Principal Component Analysis</i> (Análise de Componentes Principais)
PZT	Piezelétrico
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais

LISTA DE SÍMBOLOS

A_b	Coeficiente de absorção da onda acústica
BaTiO ₃	Titanato de bário
c	Velocidade de propagação da onda acústica
c_g	Velocidade de propagação da onda acústica no meio gasoso
c_{li}	Velocidade de propagação da onda acústica no meio líquido incompressível
c_{lc}	Velocidade de propagação da onda acústica no meio líquido compressível
c_s	Velocidade de propagação da onda acústica no meio líquido sólido
C_a	Capacitância do objeto de teste no método elétrico
C_a, C'_a, C''_a	Capacitância do dielétrico em bom estado do modelo abc
C_b, C'_b, C''_b	Capacitância do dielétrico em série com a capacitância da cavidade do modelo abc
C_c	Capacitância da cavidade do modelo abc
C_k	Capacitância de acoplamento no método elétrico
C_t	Capacitância da amostra do sistema de isolamento
C_2H_2	Acetileno
C_2H_4	Etileno
C_2H_6	Etano
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
D	Deslocamento elétrico
f	Frequência
H_2	Hidrogênio
i_t	Corrente da descarga parcial
n	Taxa de pulso da descarga parcial
R_0	Coeficiente de reflexão da onda acústica
R_c	Resistor limitador da corrente da descarga parcial
S	Deformação mecânica
PbTiO ₃	Titanato de chumbo
PbZrO ₃	Zirconato de chumbo
Pb[Zr _x Ti _{1-x}]O ₃	Titanato zirconato de chumbo

Q_t	Carga da descarga parcial
Q_i	Carga da descarga parcial individual
T	Tempo de excitação do sensor mais próximo à DP
T_0	Coefficiente de transmissão da onda acústica
V_i	Valor instantâneo da tensão de teste aplicada no momento da descarga
V_t	Valor de pico da tensão de pulso da descarga parcial
x	Coordenada x da descarga parcial
x_{si}	Coordenada x dos sensores
W_i	Energia da descarga parcial
w	Pesos sinápticos
y	Coordenada y da descarga parcial
y_{si}	Coordenada y dos sensores
z	Coordenada z da descarga parcial
z_{si}	Coordenada z dos sensores
Z_0, Z_1, Z_2	Impedância acústica
Z_m, Z_{m_1}, Z_{m_2}	Impedância de medição no método elétrico
Z_n	Impedância de filtro de ruídos no método elétrico
ΔS	Distância entre a fonte da DP e o sensor
$\Delta t, \Delta t_i$	Intervalo de tempo entre a ocorrência da DP e a excitação do sensor
ρ	Densidade volumétrica
θ	Energia do sinal acústico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	21
1.1. Considerações Iniciais	21
1.2. Objetivos.....	23
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. Descargas Parciais	24
2.1.1. Definição e Conceitos	25
2.1.2. Tipos de Descargas Parciais.....	26
2.1.2.1. Descargas Parciais Superficiais.....	27
2.1.2.2. Descargas Parciais Externas	28
2.1.2.3. Descargas Parciais Internas	28
2.1.3. Descargas Parciais em Tensão Alternada.....	30
2.1.3.1. Modelo do Circuito Equivalente.....	30
2.1.3.2. Modelo por Aproximação de Campo Elétrico.....	32
2.2. Descargas Parciais em Transformadores	33
2.3. Métodos de Identificação de Descargas Parciais.....	34
2.3.1. Método Elétrico.....	35
2.3.2. Método Eletromagnético	36
2.3.3. Método Químico	37
2.3.4. Método Óptico.....	38
2.3.5. Método Acústico	38
2.3.6. Considerações sobre os Métodos de Identificação de Descargas Parciais.....	39
2.4. Propagação da Onda Acústica	40
2.5. Ruídos em Transformadores de Potência Energizados.....	44
2.6. Piezoelectricidade	45

2.6.1. Cápsulas Piezelétricas	47
2.7. Localização de Descargas Parciais através do Método de Emissão Acústica	48
2.8. Transformada <i>Wavelet</i> Discreta	53
2.9. Estimativa do Tempo de Chegada	55
2.9.1. Critério de Informação de Akaike	55
2.10. Sistemas Inteligentes.....	56
2.10.1. Redes Neurais Artificiais	57
2.10.2. Sistemas <i>Fuzzy</i>	59
2.10.2.1. Funções de Pertinência	59
2.10.2.2. Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i>	62
2.10.2.3. Sistemas de Inferência Neuro-Difuso Adaptativos (ANFIS)	63
3. METODOLOGIA.....	66
3.1. Carregamento Nominal do Transformador de Potência	67
3.2. Geração das Descargas Parciais.....	68
3.3. Captação dos Sinais Acústicos.....	71
3.4. Amplificação e Aquisição dos Sinais Acústicos.....	73
3.5. Decomposição em Coeficientes <i>Wavelets</i>	74
3.6. Extração de Métricas	74
3.7. Treinamento do Sistema de Inferência Neuro-Difuso Adaptativo (ANFIS)	75
4. ANÁLISE E RESULTADOS.....	77
5. CONCLUSÕES	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

Com o crescente aumento da demanda de energia elétrica no mundo e a influência que esta tem na qualidade de vida dos seres humanos e no desenvolvimento da indústria, torna-se fundamental garantir a disponibilidade de energia elétrica e a continuidade no fornecimento, evitando, assim, transtornos sociais e prejuízos financeiros. Desta forma, a confiabilidade e a qualidade no fornecimento de energia elétrica, seja nos setores de geração, transmissão ou distribuição, devem ser asseguradas pela qualidade dos equipamentos utilizados e instalados no sistema.

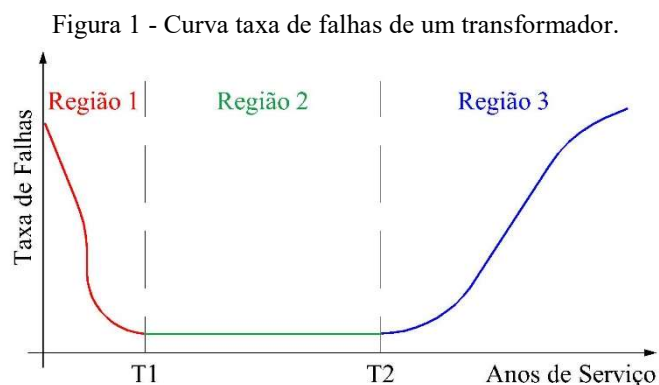
Os transformadores de potência são equipamentos essenciais na transmissão e distribuição de energia elétrica: propiciam a elevação da tensão nas usinas geradoras, permitindo a transmissão de energia por longas distâncias, com reduzidas perdas por efeito Joule; nas subestações de distribuição, próximos aos centros consumidores, possibilitam a redução da tensão de alta para média; e, próximos aos pontos de consumo, os transformadores de distribuição rebaixam a tensão a valores mais seguros.

Dentre os diversos dispositivos instalados no sistema elétrico, o transformador de potência representa o equipamento de maior importância estratégica e de investimento no sistema elétrico, além de desempenhar um papel de elevada significância operacional. A perda de sua função, seja por falha ou defeito, afeta a estabilidade e a confiabilidade do sistema, podendo deixar importantes cargas inoperantes, além da possibilidade de pagamento de multas elevadas por parte da empresa responsável pelo equipamento faltoso.

De acordo com Gonçalves Júnior (2018), a vida útil de um transformador em condições normais de operação varia de 20 a 35 anos, dependendo das condições de uso e deterioração do ambiente.

A Figura 1 apresenta o comportamento da taxa de falhas durante o período de vida de um transformador típico, conhecida como “curva da banheira”. No decorrer dos primeiros anos (região 1), a taxa de falhas é decrescente, pois a maioria das falhas tem suas causas em projetos mal elaborados, erros na manufatura do equipamento, problemas de montagem e transporte. Na região 2, entre T1 e T2, o transformador apresenta seu melhor rendimento. Desde que sejam

mantidas as devidas manutenções do equipamento, nesta região a taxa de falhas é praticamente constante. Na região 3, o equipamento começa a apresentar um aumento considerável na taxa de falhas, muitas vezes relacionadas ao desgaste dos componentes (GUTNIK, 2014). Grande parte dessas falhas está associada à degradação do sistema de isolamento do equipamento, que, por sua vez, está diretamente relacionada ao surgimento e à evolução de descargas parciais no interior do equipamento.



Fonte: Adaptado de Gutnik (2014).

A maioria dos transformadores de potência imersos em óleo mineral tem seu sistema de isolamento composto por dois tipos de materiais: a isolamento sólida, como o papel impregnado, o papel prensado e a madeira; e o próprio óleo, composto por óleo mineral ou vegetal (GONÇALVES JÚNIOR, 2018). Este último, além de servir como isolante, também compõe o sistema de arrefecimento, dissipando o calor gerado durante a sua operação (AZEVEDO, 2009).

O óleo, quando apresenta parâmetros de deterioração, pode ser substituído durante uma parada para manutenção. Por outro lado, o reparo no sistema de isolamento sólido demanda um trabalho muito mais demorado e árduo, pois exige a desmontagem do equipamento e não é garantido que a inspeção visual identifique o local exato do dano. Devido a essa dificuldade, o aumento no número de falhas nos enrolamentos está diretamente relacionado ao final da vida útil do equipamento (GONÇALVES JÚNIOR, 2018).

Na maioria das vezes, as falhas no sistema de isolamento dos transformadores são precedidas pela atividade de descarga parcial. Um aumento na intensidade da descarga parcial ou na taxa de ocorrência pode indicar problemas associados aos dielétricos (GUTNIK, 2014). A substituição de um transformador de potência é onerosa e envolve longos prazos, por isso a necessidade de aprimorar as suas técnicas de monitoramento. Com a avaliação das condições

operacionais reais do equipamento e a detecção de defeitos ainda em estágios incipientes, torna-se possível planejar as intervenções e garantir que elas sejam apropriadas, pertinentes e aconteçam nos momentos certos, prolongando ao máximo a vida útil da isolação, além de evitar que o problema evolua para condições mais severas e cause danos irreversíveis e prejuízos maiores. Caso a substituição do equipamento seja inevitável, deve-se garantir que a intervenção ocorra somente quando for efetivamente necessária, sem comprometer o bom desempenho do sistema (VELOSO, 2011).

1.2. Objetivos

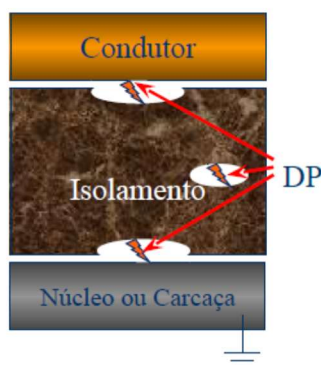
Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi apresentar um método de localização de descargas parciais no interior de um transformador de potência operando com carga nominal, através do emprego de cápsulas piezelétricas de baixo custo e de sistemas inteligentes. As cápsulas piezelétricas de baixo custo foram utilizadas como uma alternativa aos sensores acústicos para captar a emissão acústica decorrente da descarga parcial. Estes sinais foram devidamente tratados e utilizados para o treinamento de sistemas inteligentes computacionais para obter a localização da origem das descargas parciais. Os ensaios foram realizados com o transformador operando com carga nominal, com o propósito de criar situações mais próximas a realidade. Desta forma, pretende-se contribuir com o desenvolvimento e aprimoramento dos métodos não-invasivos a um custo reduzido, tornando-os mais acessíveis, além de possibilitar o monitoramento *online* sem afetar o funcionamento normal e contribuir para facilitar e agilizar a manutenção destes equipamentos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Descargas Parciais

A NBR IEC 60270 (2017) define uma descarga parcial como a “descarga elétrica localizada que faz a ligação parcial entre dois condutores através da isolação. Em geral, é a consequência de uma concentração de tensão elétrica local na isolação ou sobre a superfície de uma isolação”.

Figura 2 - Pontos de ocorrência de descargas parciais.



Fonte: Veloso (2011).

Nesse sentido, a descarga parcial é uma descarga elétrica localizada, que ocorre quando cargas elétricas se formam em decorrência de uma diferença de potencial que, com o surgimento de elétrons livres, resultam em um canal ionizado incompleto, ou seja, que não percorre o caminho da isolação de forma completa entre dois condutores.

Normalmente, essas descargas se apresentam em pulsos com duração inferior a $1\mu\text{s}$ (ABNT, 2017).

Como a carga elétrica é proporcional à energia liberada na ocorrência de uma descarga parcial, geralmente, são medidas em pico-Coulomb (pC).

Quando um dielétrico é submetido a um campo elétrico e sofre um estresse elétrico que excede a sua capacidade isolante, há a ruptura do mesmo, iniciando a ocorrência de descargas parciais. Devido a estas características, as descargas parciais tendem a ocorrer nas proximidades da alta tensão, onde o dielétrico está sujeito a uma diferença de potencial maior (AZEVEDO, 2009).

As descargas parciais são inerentes ao funcionamento de um transformador ao longo de sua vida útil. Como mencionado anteriormente, elas estão diretamente relacionadas às condições do sistema de isolamento do equipamento e podem surgir devido a problemas construtivos, desgaste por envelhecimento ou sobrecarga e representam uma fonte importante de problemas ao longo da vida útil do equipamento elétrico. Elas podem se desenvolver em qualquer tipo de isolamento seja ele sólido, líquido, gasoso, ou uma combinação destes (ARDILA-REY; MONTAÑA; CASTRO; SCHURCH; ULSON; MUHAMMAD-SUKKI; BANI, 2018; VELOSO, 2006).

A evolução da atividade de descargas parciais é o maior sintoma da deterioração da isolamento. A ocorrência delas também contribui para o envelhecimento do sistema dielétrico do equipamento. Assim, as descargas parciais não só são um sintoma de degradação da isolamento, mas também contribuem para o desenvolvimento das descargas parciais que podem levar a falha total do equipamento (CASTRO; BRUNINI; BAPTISTA; ANDREOLI; ULSON, 2017; ARDILA-REY; BARRUETO; ZERENE; CASTRO; ULSON; MAS'UD; VALDIVIA, 2018). Sua atividade se mantém em níveis aceitáveis por um longo período, sendo importante monitorá-la para permitir um desempenho apropriado do sistema de isolamento.

2.1.1. Definição e Conceitos

Para o entendimento das descargas parciais, Gutnik (2014) definiu alguns conceitos essenciais.

- Descarga parcial contínua: aquela que se repete em intervalos regulares de tempo;
- Nível da descarga parcial: a magnitude da maior descarga recorrente durante uma observação de descargas contínuas;
- Pulso de descarga parcial: pulso de tensão ou de corrente em decorrência de uma descarga parcial;
- Taxa de pulso da descarga parcial: é a média de pulsos que ocorre em um segundo ou em um determinado intervalo de tempo especificado.
- Tensão de pulso da descarga parcial: tensão de pulso terminal resultante de uma descarga parcial que é representada por uma fonte de tensão aplicada

repentinamente a uma capacitância série do sistema de isolamento sob teste, e que pode ser detectada nos terminais do sistema sob condições de circuito aberto. A forma, o tempo de subida e a magnitude da tensão do pulso de descarga parcial é dependente da geometria da cavidade, do seu tamanho, da natureza de seus limites, tipo de gás presente e pressão a que está submetido, bem como dos parâmetros e o meio de transmissão entre o local da descarga e o detector de pulso de descarga;

- Tensão de início: tensão mais baixa em que ocorre a repetitividade de descargas parciais;
- Tensão de extinção: tensão mais elevada na qual a repetitividade da descarga parcial é interrompida;

Os valores das tensões de início e extinção podem ser influenciados por diversos fatores, incluindo a taxa na qual a tensão é incrementada ou decrementada, bem como o histórico de tensão aplicada;

- Carga da descarga parcial: magnitude de uma descarga parcial em um sistema isolante expresso em termos da carga transferida que é medida nos terminais do sistema. Pode ser definida pela seguinte expressão:

$$Q_t = C_t V_t \quad (1)$$

onde C_t é a capacitância do sistema de isolamento expressa em Faraday [F] e V_t é o valor de pico da tensão de pulso expressa em Volt [V].

- Energia da descarga parcial: energia utilizada a partir da fonte de tensão de teste como resultado de uma descarga individual. É o produto da magnitude da descarga e do valor instantâneo da tensão na amostra de teste no início da descarga. Assim, a energia do pulso de descarga é dada por:

$$W_i = Q_i V_i \quad (2)$$

onde W_i é a energia da descarga parcial expressa em Joule [J], Q_i é a magnitude da descarga parcial expressa em Coulomb [C] e V_i é o valor instantâneo da tensão de teste aplicada no momento da descarga, expressa em Volt [V].

2.1.2. Tipos de Descargas Parciais

Segundo Niemayer (1991), as descargas parciais podem ser classificadas de acordo com o tipo de material:

- Em gases isolantes e na superfície de uma interface entre isolantes no estado gasoso e sólido;
- Em líquidos isolantes e na superfície de uma interface entre isolantes no estado líquido e sólido;
- Em sólidos, tais como arborescência, injeção de cargas elétricas e *water trees*.

Há uma outra classificação, definida por Mason (1995), mais usual e que divide as descargas parciais de acordo com a sua localização e o seu mecanismo de formação. Segundo esse critério, as descargas parciais são classificadas em: internas, externas e superficiais. A Figura 3 apresenta os tipos de descargas parciais descritas a seguir.

Figura 3 - Tipos de descargas parciais, segundo Mason (1995): (a) superficial; (b) externa; e (c) interna.



Fonte: Gutnik (2014).

2.1.2.1. Descargas Parciais Superficiais

As descargas superficiais ocorrem em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, geralmente partindo do eletrodo em direção à superfície. Isso acontece pelo fato de, geralmente, a tensão de ruptura do gás ou do líquido ser menor que a do meio sólido (VELOSO, 2011). Para a ocorrência deste tipo de descarga parcial, a componente de campo elétrico que tangencia a superfície deve exceder o limiar da capacidade dielétrica do isolante (GULSKI, 1995). Este tipo de descarga altera a superfície do dielétrico e cria caminhos condutores ao longo da direção do campo elétrico, fenômeno conhecido como trilhamento (MASON, 1995; GUTNIK, 2014). A passagem de corrente de fuga na superfície do isolamento por caminhos formados por um filme contaminado ou rachaduras contaminadas, gera um intenso calor localizado que faz evaporar este filme, formando pequenas ilhas. Com a interrupção do circuito,

há o aparecimento de pequenos arcos de descargas parciais que geram calor e carbonizam o isolante. A magnitude destas descargas parciais, muitas vezes, é pequena durante toda a sua formação até instantes antes da falha total (VELOSO, 2011). A ocorrência deste tipo de descarga é comum em cabos protegidos e terminações de cabos isolados, em saias de isoladores e no sistema de alívio de barras de geradores (KREUGER, 1989; SILVA, 2005).

2.1.2.2. Descargas Parciais Externas

As descargas parciais externas são as que ocorrem em meios gasosos, como o ar ambiente, também conhecidas como descargas do tipo corona. São comuns em eletrodos dotados de pontas ou que possuem pequenas curvaturas em suas terminações, onde há formação de regiões ionizadas com campo elétrico elevado. Uma vez que a rigidez dielétrica do gás é superada, há o aparecimento de elétrons livres, criando uma avalanche de outros elétrons livres e, obviamente, de íons positivos, dando origem à formação de descargas parciais. A tensão de iniciação das descargas depende do raio de curvatura da ponta do eletrodo e da tensão aplicada (PALITÓ, 2015). Ela é considerada um tipo de descarga parcial, porque a ruptura do gás se inicia em uma posição onde o campo elétrico é muito alto, mas desaparece devido à intensidade do campo decair rapidamente em função da distância. O motivo do decréscimo do campo elétrico pode ser o tamanho diminuto da região de campo de alta intensidade, o que inibe a formação de um canal completo, ou a natural redução da intensidade devido à distância para o condutor, impedindo a propagação do canal de ruptura (VELOSO, 2011). Este tipo de descarga parcial desencadeia processos químicos e produz gás ozônio, que pode causar fissuras na isolação e degradar as suas propriedades isolantes. Além disso, os óxidos de nitrogênio, formados a partir deste fenômeno, em contato com vapores de água, podem corroer os metais e formar depósitos condutores na superfície do dielétrico, provocando o trilhamento da isolação (GUTNIK, 2014; SILVA, 2005).

2.1.2.3. Descargas Parciais Internas

As descargas parciais internas ocorrem devido a imperfeições observadas dentro dos materiais que compõe a isolação de um dispositivo, ou seja, cavidades ou vazios preenchidos com gases de baixa rigidez dielétrica, que podem ocorrer durante o processo de fabricação ou

por estresse químico, ou também defeitos na estrutura molecular do isolante (BOGGS, 1990; PALITÓ, 2015). Elas são resultado de uma perturbação provocada por um campo elétrico intenso que ioniza um gás ou ar dentro de um vazio ou gap, que pode ser totalmente circundada por meio isolante ou na interface entre um meio isolante e um eletrodo (AZEVEDO, 2009). Em meios isolantes líquidos, como no óleo mineral, geralmente, a descarga parcial aparece em bolhas de gases originárias a partir de fenômenos térmicos e elétricos, que liberam gases, ou também pela presença de vapor d'água, que se infiltram através de aberturas ou folgas nas vedações (GJAERDE, 1997; SILVA, 2005; GUTNIK, 2014; CASTRO, 2016). As menores rigidez dielétrica e permissividade elétrica dos gases em relação aos meios isolantes sólidos e líquidos e a consequente intensificação do campo elétrico no interior da cavidade com menor tensão de ruptura dão condições a formação das descargas parciais (PALITÓ, 2015).

Um elétron livre em uma cavidade submetida a um campo elétrico suficientemente intenso provoca a disrupção do gás dentro da mesma, com a consequente ionização. Esta ionização tende a derrubar a intensidade do campo elétrico para sustentar a disrupção, podendo chegar a valores próximos de zero, o que faz a cavidade parecer um condutor, levando a um aumento na capacitância entre os eletrodos (BOGGS, 1990). Devido à queda da intensidade do campo elétrico, ocorre a extinção da descarga. Na tentativa de manter o campo elétrico reduzido, os íons restantes se encaminham para as paredes da cavidade. Isto faz com que as cargas elétricas que fluíram da fonte de potência para os eletrodos permaneçam neles após a descarga (VELOSO, 2011).

Figura 4 - Arborescência em polimetilmetacrilato.



Fonte: Pilling (1976)

A arborescência elétrica, mostrada na Figura 4, é um tipo particular de descargas parciais internas. É um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no material dielétrico, devido a ocorrência contínua de descargas parciais internas (AZEVEDO, 2009; PALITÓ, 2015).

2.1.3. Descargas Parciais em Tensão Alternada

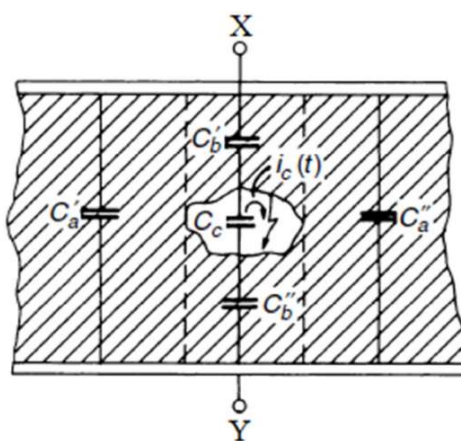
De acordo com Gutnik (2014), o comportamento das descargas parciais em cavidades pode ser descrito através de duas aproximações distintas: o modelo do circuito equivalente e o modelo por aproximação de campo elétrico.

2.1.3.1. Modelo do Circuito Equivalente

Este modelo, desenvolvido por Gemant e Philippoff (1932), permite determinar de forma aproximada o valor da carga aparente gerada por uma descarga parcial em uma cavidade (BARTNIKAS, 1979). Ele descreve o fenômeno das descargas parciais em uma isolamento defeituosa representado por um circuito equivalente de capacitâncias, denominado modelo abc, mostrado na Figura 5.

Considera-se o meio isolante, sólido ou líquido, submetido a uma tensão alternada entre os pontos X e Y. A capacitância da cavidade é representada no circuito equivalente pela capacitância C_c . As regiões adjacentes a cavidade são caracterizadas pelas capacitâncias C_b' e C_b'' , que podem ser representadas por uma capacitância série equivalente C_b . As regiões do isolamento sem falhas são representadas pelas capacitâncias C_a' e C_a'' , que, da mesma forma, podem ser expressas por uma única capacitância C_a .

Figura 5 - Modelo abc para descargas parciais em tensões alternadas em um isolante com uma cavidade.



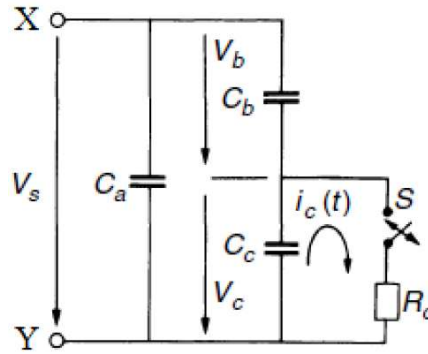
Fonte: Gutnik (2014).

Com o aumento da tensão aplicada e a ocorrência da descarga parcial, a superfície da cavidade é ionizada e formam-se dipolos no material, aumentando o gradiente elétrico, que

pode ser acentuado devido à geometria da cavidade ou à diferença entre as permissividades dos materiais. Desta forma, a tensão na cavidade é reduzida, o que causa a descarga do capacitor C_c no modelo descrito (CASTRO, 2016).

A Figura 6 mostra o circuito equivalente para o modelo abc.

Figura 6 - Circuito equivalente do modelo abc.



Fonte: Gutnik (2014).

A chave S , em paralelo com a capacitância C_c , representa a descarga parcial no circuito. Ela é controlada pela tensão V_c , sobre o capacitor da cavidade. Quando a chave é fechada, a corrente $i_c(t)$ passa a circular por um curto período de tempo e é limitada pelo resistor R_c , que simula o período de tempo durante a ocorrência da descarga e é finalizada (KUFFEL; ZAENGL; KUFFEL, 2014).

A tensão V_c na cavidade no instante anterior a ocorrência da descarga parcial é dada pela Equação 3.

$$V_c(t) = V_s(t) \frac{C_b}{C_b + C_c} \quad (3)$$

Quando a descarga parcial ocorre, a carga transferida (Q_t) ao meio da cavidade pode ser expressa pela Equação 4.

$$Q_t = (C_a + C_b) \cdot V_s = C_b \cdot V_c \quad (4)$$

Logo após a ocorrência da descarga parcial, a tensão na cavidade torna a aumentar. Esta tensão é a superposição do campo elétrico aplicado e o campo residual formado pelas cargas superficiais que foram deixadas na parede da cavidade depois da última descarga. Quando a

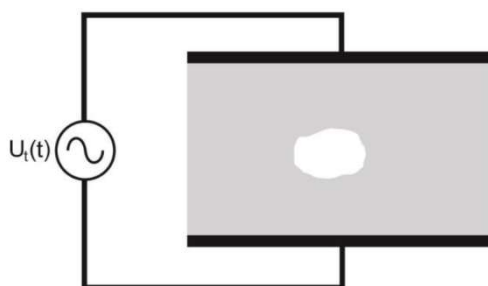
tensão sobre a cavidade atingir novamente a tensão de início, dará origem a uma nova descarga. Este fenômeno pode se repetir diversas vezes durante os semiciclos da tensão alternada, conhecidas como descargas recorrentes (BARTNIKAS; McMAHON, 1979; KREUGER, 1989; GUTNIK, 2014).

É importante ressaltar que este modelo não considera fatores como a geometria, localização da cavidade ou mesmo presença de cargas espaciais. Portanto, a operação do circuito equivalente não corresponde aos processos físicos que se desenvolvem no sistema real (KELEN; DANIKAS, 1995; McALLISTER, 1997; PEDERSEN; CRICHTON, McALLISTER, 1991).

2.1.3.2. Modelo por Aproximação de Campo Elétrico

Este modelo considera uma cavidade esférica em um material dielétrico, que é submetido a uma tensão alternada, aplicada por meio de dois eletrodos metálicos, conforme apresenta a Figura 7.

Figura 7 - Representação de uma isolação com cavidade submetida a uma diferença de potencial.



Fonte: Palitó (2015).

Inicialmente não há presença de cargas superficiais e espaciais. Antes da ocorrência da primeira descarga, considera-se o campo na cavidade aproximadamente uniforme e que o mesmo varia proporcionalmente à tensão aplicada. Após ocorrer a primeira descarga, as cargas liberadas por este fenômeno se dirigem para as paredes da cavidade. Assim, o campo local passa a ser a soma do campo devido à tensão aplicada e do campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais. Quando esta superposição de campos exceder o campo de início, surgirá uma nova descarga parcial (PALITÓ, 2015).

Neste modelo, o processo de formação de uma descarga parcial pode ocorrer mesmo quando a tensão aplicada ao eletrodo for nula, pois as cargas depositadas nas paredes podem gerar um campo suficientemente grande para causar uma nova descarga. Assim, a formação de descargas parciais depende somente do campo interno à cavidade, não mais pela tensão aplicada como no modelo anterior (BOGGS, 1990; EDIN, 2001, GUTNIK, 2014; CASTRO, 2016).

2.2. Descargas Parciais em Transformadores

As falhas incipientes no sistema isolante de transformadores dão origem às descargas parciais e ocorrem predominantemente em cavidades no material isolante, em bolhas no óleo e ainda em bolhas dentro das camadas de papel. Estes problemas geralmente ocorrem durante o processo de fabricação ou de impregnação, devido à sobrecarga térmica ou pela presença de umidade (CASTRO; CLERICE; ANDREOLI; CAMPOS; ULSON, 2016).

Nos transformadores de potência, cujo sistema de isolamento é composto de celulose e óleo, as descargas parciais surgem na forma de pulsos, que consistem numa série de pulsos discretos de corrente. Se o campo elétrico, ao qual o dielétrico está sujeito, for suficientemente elevado, poderá haver descargas parciais recorrentes, que causam a gradual degradação física e química do material isolante (POMPILI; MAZZETTI; BARTNIKAS, 2005; AZEVEDO, 2009).

Azevedo (2009) descreve as principais causas de ocorrência de descargas parciais em transformadores de potência:

- Cavidades na delaminação de papel isolante;
- Cavidades no isolante das buchas;
- Formação de bolhas em virtude da evolução de gases, decorrente de descargas, e evaporação de gotículas de água no interior do óleo;
- Partículas metálicas livres, em suspensão no óleo;
- Umidade;
- Má conexão nas blindagens eletrostáticas;
- Carga estática, que provoca um aumento de concentração de cargas elétricas em um determinado local da isolação; e
- Trilhas em isolantes sólidos.

Portanto, mesmo sendo projetados e fabricados dentro dos padrões de qualidade, os transformadores são passíveis de imperfeições. Além disso, durante a sua vida útil, eles estão sujeitos à ocorrência de fatores críticos na sua operação: esforços térmicos, mecânicos e elétricos, além de reações físico-químicas, que ocorrem internamente. Os esforços térmicos decorrem de correntes elétricas que circulam no transformador e da temperatura ambiente. Os esforços mecânicos decorrem de vibrações e esforços eletrodinâmicos. Por fim, os esforços ambientais estão vinculados à contaminação e à degradação da isolamento. Ressalta-se que esses esforços podem ocorrer de forma independente ou combinados (AZEVEDO, 2009). Mesmo sendo projetados para suportar tais esforços, estes levam à ocorrência de superaquecimentos, arcos ou descargas parciais, fatores que contribuem ainda mais para a deterioração da isolamento.

As falhas relacionadas ao sistema de isolamento de um transformador de potência são frequentemente precedidas por atividades de descargas parciais. Porém, pouco antes da falha total do sistema de isolamento, observa-se uma queda na atividade das descargas parciais. Isto se deve à carbonização do dielétrico, que reduz a resistência do isolamento e aumenta a corrente de fuga. Este aumento consome parte da energia usada nas descargas parciais e aumenta o calor dissipado no local, que acelera a deterioração do isolamento (VELOSO, 2011).

Como visto anteriormente, um aumento significativo do número de ocorrências, da intensidade ou da taxa de crescimento das descargas parciais nos transformadores de potência pode indicar problemas associados ao isolamento. Desta forma, através do monitoramento, da identificação e da localização das descargas parciais torna-se possível avaliar o estado do sistema de isolamento do equipamento e, assim, garantir uma boa estratégia de manutenção (AZEVEDO, 2009). Sendo assim, é de grande relevância o desenvolvimento de técnicas e ferramentas que executem essas tarefas.

2.3. Métodos de Identificação de Descargas Parciais

As descargas parciais em transformadores de potência imersos em óleo isolante produzem pulsos elétricos, que liberam ondas eletromagnéticas e acústicas, calor, gases e emissão de luz. Existem diversos métodos de identificação desses fenômenos decorrentes da atividade das descargas parciais, cada um deles apresentando as suas vantagens e desvantagens. Os itens a seguir apresentam cada um dos métodos disponíveis, com maior enfoque no método acústico, no qual esta pesquisa é baseada.

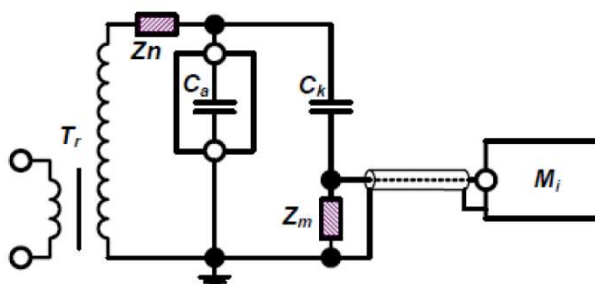
2.3.1. Método Elétrico

A norma NBR IEC 60270 (2017) descreve esse método e apresenta três circuitos básicos que podem ser utilizados para medir descargas parciais pelo método elétrico. A devida escolha do circuito a ser utilizado deve levar em conta as características do equipamento que terá as descargas parciais medidas.

O objetivo deste método é detectar a queda de tensão sobre uma impedância de medição Z_m conhecida, causada por impulsos de corrente no circuito exterior à amostra. Nestes circuitos M_i representa o instrumento de medição e eles são formados por um capacitor C_a , representando a capacitância do objeto de teste, um capacitor de acoplamento C_k , cuja função é dar caminho de retorno aos pulsos transientes de alta frequência gerados pelas descargas parciais e bloquear as tensões nas frequências industriais para o circuito de medição, impedância de medição Z_m e um filtro de ruídos Z_n , com a função de bloquear os ruídos oriundos do lado de alta tensão.

A Figura 8 apresenta o circuito, no qual o objeto de teste tem uma de suas extremidades aterradas e a impedância de medição Z_m está em série com o capacitor de acoplamento C_k . Nesta configuração o equipamento é protegido de falhas provenientes do objeto de ensaio. Por este motivo, esta configuração é a mais utilizada (GUTNIK, 2014; CASTRO, 2016).

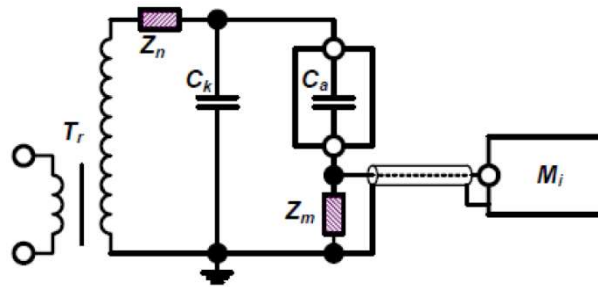
Figura 8 - Impedância de medição Z_m em série com o capacitor C_k .



Fonte: Gutnik (2014)

Já no circuito apresentado pela Figura 9, o objeto de teste encontra-se em série com a impedância de medição Z_m . O capacitor de acoplamento C_k serve de caminho de retorno para os transientes de alta frequência. Desta forma, tem-se a sensibilidade na detecção aumentada. Uma das desvantagens apresentadas por esta configuração é de que na conexão do lado de alta tensão com o aterramento o circuito é interrompido, fazendo com que o lado de baixa tensão também o seja (GUTNIK, 2014; CASTRO, 2016).

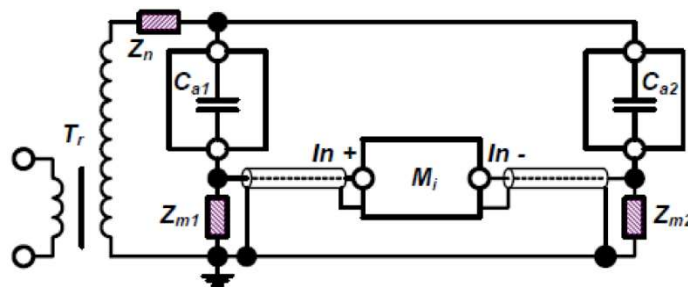
Figura 9 - Impedância de medição Z_m em série com o objeto de teste C_a .



Fonte: Gutnik (2014)

Por fim, na configuração do circuito da Figura 10, tem-se os ruídos eletromagnéticos eliminados das medições de descargas parciais devido à ponte equilibrada, através do ajuste das impedâncias Z_{m1} e Z_{m2} até a obtenção da melhor simetria e da utilização de um circuito amplificador em modo diferencial (GUTNIK, 2014; CASTRO, 2016).

Figura 10 - Ponte balanceada utilizando o braço (C_{a2}, Z_{m2}) como referência em paralelo com o braço de teste (C_{a1}, Z_{m1}) .



Fonte: Gutnik (2014)

A vantagem deste método é de possuir grande disponibilidade de equipamentos no mercado e por já serem padronizados por normas de grande relevância. Também possibilita quantificar a intensidade das descargas. Entretanto, não é capaz de localizar a origem da descarga parcial nos transformadores de potência. Além disso, por ser sensível a quaisquer interferências eletromagnéticas, tem a limitação de apenas poder ser executado em ambientes com ruído controlado, não sendo possível a aplicação em campo (AZEVEDO, 2009; CLERICE, 2014; CASTRO, 2016).

2.3.2. Método Eletromagnético

Na ocorrência de descargas parciais, ondas eletromagnéticas em altas frequências, que variam de 300 MHz a 3 GHz, são irradiadas no interior do transformador. Para captar estes sinais são acoplados sensores capacitivos, similares a antenas, na estrutura do transformador.

Em alguns casos, estes sensores são inseridos através de válvulas no interior do tanque (CASTRO, 2016).

Este método apresenta como vantagens: a possibilidade do monitoramento *online*, sem a necessidade de desligamentos; a reduzida susceptibilidade a ruídos, visto que a faixa de frequência das medições é distinta da faixa de frequência dos ruídos, que se encontra abaixo de 1 MHz; a reduzida susceptibilidade às interferências externas, como o efeito corona de linhas de transmissão próximas, devido à blindagem promovida pelo próprio tanque do transformador; e a possibilidade de determinação da origem das descargas parciais, através da diferença entre os tempos de chegada da onda eletromagnética nos diversos sensores, em conjunto com a técnica de triangulação dos sinais. Porém, por se tratar de um método muitas vezes invasivo, possui limitações quanto ao número de sensores instalados, necessitando de técnicas de amplificação dos sinais, para obtenção de resultados mais satisfatórios (GONÇALVES JÚNIOR, 2018).

2.3.3. Método Químico

Este método baseia-se na análise cromatográfica dos subprodutos gerados durante o processo de degradação de materiais isolantes. Quando há a ocorrência de arcos elétricos ou descargas parciais em transformadores imersos em óleo isolante, há a formação de gases devido à decomposição do material isolante. Por causa da circulação do óleo, os gases são dissolvidos e, após um período de homogeneização, estão presentes em todo o volume de óleo (MYERS, S. D.; KELLY, J.J.; PERRISH, R.H., 1981; AZEVEDO, 2009).

Segundo a NBR 7274, na decomposição do óleo isolante de um transformador, os gases mais significativos resultantes desse processo são: hidrogênio (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2). Já na degradação de materiais celulósicos, gases como o monóxido de carbono (CO) e o dióxido de carbono (CO_2) podem ser produzidos.

A presença de gases e a respectiva concentração possibilitam inferir sobre as falhas que podem estar ocorrendo no interior do equipamento. Assim, para o diagnóstico através deste método foram desenvolvidos diversos métodos, hoje normatizados e reconhecidos, tais como: o Método do Gás Chave, o Método de Dornenburg, o Método de Duval e o Método de Rogers.

Esta é uma técnica amplamente utilizada e permite estimar a degradação do isolamento causada pela ocorrência de descargas parciais, apesar da baixa sensibilidade (CUENCA, 2005). Ademais, este método não permite a localização do local onde a falha incipiente ocorreu. Além disso, para a correta identificação da falha é necessária uma concentração suficiente de gases e que muitas vezes torna os diagnósticos não conclusivos. Para contornar estes problemas, geralmente implementa-se uma técnica preditiva complementar para um melhor diagnóstico sobre as condições do sistema isolante do equipamento.

2.3.4. Método Óptico

Na ocorrência de descargas parciais são liberadas radiações na faixa do ultravioleta que podem ser captadas e transmitidas através de receptores instalados no interior do equipamento. Este método necessita de um contato visual direto com a fonte emissora de luz, que pode estar escondida atrás de algum aparato. Além disso, segundo Forsyth (1998), nos gases isolantes a baixa pressão apenas 1% da energia liberada por uma descarga parcial é convertida em luz. Nos isolantes sólidos e líquidos essa taxa ainda é menor, o que pode prejudicar ainda mais a medição (CASTRO, 2016).

Este método apresenta como vantagem a isolamento galvânica, ou seja, não há influência eletromagnética nas medições e, portanto, a detecção é imune a sinais indesejados. Por outro lado, por se tratar de um método invasivo, necessita que receptores sejam instalados no seu interior e apresenta limitações quanto à acessibilidade e à cobertura (SCHWARZ; JUDENDORFER; MUHR, 2008; PALITÓ, 2015).

2.3.5. Método Acústico

Este método consiste em detectar as ondas acústicas, que normalmente estão na faixa do ultrassom, através de sensores acoplados à parede externa do equipamento em análise.

No interior dos transformadores de potência, a descarga parcial se assemelha a uma microexplosão que dão origem a ondas mecânicas que se propagam pelo óleo isolante e pela sua estrutura. Estas ondas são captadas por sensores acoplados às paredes externas do equipamento e processados através de ferramentas adequadas (GUTNIK, 2014).

Assim como o método eletromagnético, este método também possibilita monitorar a atividade das descargas parciais *on-line*, bem como localizar as descargas parciais através de ferramentas adequadas. Além disso, possui a vantagem de não ter limitação no número de sensores acoplados. No entanto, este método é susceptível a ruídos e interferências externas, além de apresentar atenuação dos sinais devido à propagação nos diferentes meios no interior do transformador.

A medição acústica de descargas parciais em transformadores abre novas possibilidades para a manutenção preditiva destes equipamentos. Por se tratar de uma técnica não-invasiva, ou seja, pode ser realizada com o equipamento em operação, este método tem se mostrado bastante promissor e, por isso, nos últimos anos, diversas técnicas e ferramentas têm sido desenvolvidas para atingir resultados mais eficazes.

Assim sendo, visando contribuir no aprimoramento dessas técnicas, este trabalho apresenta uma nova metodologia para identificação e localização de descargas parciais que amplia as possibilidades deste método de monitoramento, viabilizando a aplicação em um transformador de potência, operando com carga nominal.

2.3.6. Considerações sobre os Métodos de Identificação de Descargas Parciais

Vários métodos têm surgido na literatura de modo a suprir os diversos problemas encontrados no diagnóstico de descargas parciais. No entanto, ainda não há disponível um único método que apresente todas as características desejáveis na localização de descargas parciais, sendo necessário a combinação de dois ou mais métodos que se complementem de forma a atingir o resultado esperado.

Uma comparação entre os métodos existentes é apresentada na Tabela 1, com as vantagens e desvantagens de cada um deles.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de identificação de descargas parciais.

Vantagens / Desvantagens	Método Elétrico	Método Químico	Método Eletromagnético	Método Óptico	Método Acústico
Grande disponibilidade no mercado	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Padronizado por normas	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Permite estimar o nível de degradação da isolação	Sim	Sim	Sim	Não	Sim
Monitoramento <i>online</i>	Não	Não	Sim	Sim	Sim
Susceptível a ruídos e interferências externas	Sim	Não	Não	Não	Sim
Permite localizar DPs	Não	Não	Sim	Não	Sim
Baixa sensibilidade na identificação de DP	Sim	Sim	Sim	Sim	Não
Método invasivo	Não	Não	Sim	Sim	Não

2.4. Propagação da Onda Acústica

Alguns parâmetros influenciam na propagação da onda acústica, como a velocidade de propagação da onda no meio sob observação, a sua temperatura e a impedância acústica característica em cada meio de propagação.

A velocidade depende do meio onde ocorre a propagação, ou seja, se o meio é gasoso, líquido ou sólido.

No meio gasoso, a velocidade de propagação de uma onda é expressa por c_g na Equação 5:

$$c_g = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (5)$$

onde:

γ é a razão do calor específico;

P a pressão do gás; e

ρ a densidade definida pela relação $\rho = m/V$, sendo m a massa e V o volume do gás.

No meio líquido, a velocidade de propagação de uma onda acústica é expressa por c_{li} (Equação 6) para líquidos incompressíveis e por c_{lc} (Equação 7) para líquidos compressíveis.

$$c_{li} = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (6)$$

$$c_{lc} = \sqrt{\frac{\gamma K}{\rho}} \quad (7)$$

onde K representa a constante de volume do gás.

A Equação 8 define a velocidade da onda acústica no meio sólido (c_s).

$$c_s = \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-c)}} \quad (8)$$

onde:

Y é a constante de Young;

c é definido pela expressão $c = 2\sigma^2(1 - \sigma)$, sendo σ a razão de Poisson.

A impedância acústica característica (Z_0), dada em $\text{kg/m}^2\text{s}$, depende do resultado produzido pelo produto da densidade do material pela velocidade do som no meio, conforme a Equação 9. Ela está relacionada com a resistência do meio à transmissão do som.

$$Z_0 = \rho \cdot c \quad (9)$$

A impedância acústica influencia na transmissão e reflexão numa interface entre dois meios diferentes e na absorção de energia no meio. O coeficiente de reflexão (R_0) é dado pela Equação 10.

$$R_0 = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (10)$$

onde Z_1 e Z_2 representam as impedâncias acústicas dos meios.

O coeficiente de transmissão (T_0), quando a incidência é perpendicular, é dado pela Equação 11.

$$T_0 = \frac{4Z_2Z_1}{(Z_2+Z_1)^2} \quad (11)$$

Analisando a Equação 11, verifica-se que quanto maior a diferença entre as impedâncias acústicas, menor será a intensidade da onda transmitida.

Quando a incidência da onda é oblíqua, o ângulo da onda transmitida é alterado e definido pela Lei de Snell:

$$\frac{\text{sen}(\varphi_i)}{c_i} = \frac{\text{sen}(\varphi_t)}{c_t} \quad (12)$$

onde:

c_i é a velocidade de propagação no meio da onda incidente;

c_t é a velocidade de propagação no meio da onda transmitida;

φ_i é o ângulo da onda incidente; e

φ_t é o ângulo da onda transmitida.

A atenuação da propagação de ondas acústicas é bastante complexa e depende da absorção molecular, viscosidade e temperatura do meio. No entanto, os matemáticos Stokes e Kirchoff desenvolveram um modelo que define o coeficiente de absorção de energia pelo meio, representada pela Equação 13 (apud SIVIAN, 1947):

$$A_b = \frac{4\pi^2 f^2}{c^3 \rho} \left[\frac{4}{3} \eta + \frac{(\gamma-1)}{c_p} k \right] \quad (13)$$

onde:

A_b é o coeficiente de absorção de onda plana;

η é o coeficiente de viscosidade;

f é a frequência;

ρ é a densidade do meio;

c a velocidade do som no meio sob observação;

γ é a razão do calor específico;

C_p é o calor específico à pressão constante;

k é a condutividade térmica do meio.

A Equação 13 demonstra que a onda sonora é atenuada pela viscosidade do meio, bem como pela densidade e velocidade de propagação da onda. Além disso, a atenuação da onda

sonora em meios sólidos é aproximadamente proporcional ao quadrado da frequência. Sendo assim, a velocidade de deslocamento do sinal sonoro não é constante no caminho percorrido, visto que a energia ao longo da trajetória se modifica pelos diferentes efeitos apresentados acima, como a reflexão, a refração, a atenuação do meio (HAROLD, 1979; KUNDU; KISHORE; SINHA, 2006; CASTRO, 2016).

As características de alguns meios são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Velocidade de propagação, densidade e impedância acústica do ar, aço, água e do óleo mineral isolante.

Meio	c [m/s]	ρ [Kg/m ³]	Z [Kg/m ² .s]
Ar	330	1,3	430
Aço	5900	7700	$45 \cdot 10^6$
Água	1480	1000	$1,5 \cdot 10^6$
Óleo mineral isolante	1390	866	$1,3 \cdot 10^6$

Fonte: Noronha, 2012.

Segundo Veloso (2011), a propagação da onda acústica ocorre de quatro modos principais, considerando a direção de vibração.

- Ondas longitudinais: quando as partículas do meio de propagação vibram perpendicularmente à direção de propagação da onda;
- Ondas transversais: quando as partículas do meio de propagação vibram na mesma direção em que a onda se propaga;
- Ondas de superfície: quando as partículas superficiais do meio de propagação descrevem um movimento oscilatório com órbita elíptica;
- *Plate waves*: quando as partículas do meio oscilam perpendicularmente à direção de propagação em chapas muito finas. Elas são classificadas em *Lamb*, quando o movimento é perpendicular à superfície, e em *Love*, quando o movimento é paralelo ao plano da superfície e perpendicular à direção de propagação.

O modo de propagação depende do estado físico da matéria. Nos líquidos, como no caso do óleo isolante dos transformadores de potência, ocorrem apenas as ondas longitudinais.

Nos transformadores de potência imersos em óleo, a onda acústica irá se propagar no modo longitudinal no óleo isolante e, ao atingir a parede de aço do transformador, quando não for uma incidência perpendicular, além de excitar as partículas na direção de propagação, parte de sua energia poderá ser convertida em outro modo de propagação, a onda de superfície. A velocidade de cada onda refratada dependerá da diferença entre as impedâncias acústicas dos dois meios. Como o aço possui velocidade de propagação em torno de 5.900m/s, a propagação da onda na parede do transformador será muito superior à do óleo, que tem velocidade em torno de 1.390m/s.

2.5. Ruídos em Transformadores de Potência Energizados

Segundo a *Federal Pacific Company*, quando um transformador está energizado, ele emite ruídos causados por um fenômeno conhecido como magnetostrição. Este fenômeno ocorre quando alguns materiais metálicos, por exemplo o ferro, são submetidos à um campo magnético. Os dipolos magnéticos do metal se orientam, buscando o alinhamento com o campo magnético externo, resultando na expansão do material. Quando o campo magnético é cessado, o material retorna a sua condição original. Como os transformadores de potência são excitados por correntes alternadas, haverá a expansão e a compressão do núcleo a cada meio ciclo, resultando na vibração do núcleo com o dobro da frequência de alimentação da rede.

Para evitar as perdas causadas pelas correntes de *Foucault*, o núcleo é constituído por várias placas metálicas finas e sobrepostas. A expansão e a contração de cada placa não são uniformes, causando uma vibração desigual no interior do transformador. Dessa forma, o espectro harmônico do ruído produzido, além da componente fundamental, possui também componentes harmônicas com frequências múltiplas pares (FEDERAL PACIFIC CO., 2018).

Além disso, quando uma corrente elétrica percorre um condutor imerso em um campo magnético, uma força mecânica atua sobre esse condutor. Como as bobinas são excitadas por corrente alternada, essas forças geram vibrações e ruídos com o dobro da frequência de excitação. Como o núcleo está fisicamente em contato com a estrutura do transformador, as vibrações causadas por ele também serão transmitidas à base e às paredes do transformador (MASIERO, 2007).

Os ruídos produzidos pelo núcleo ferromagnético e entre as bobinas se propagam no óleo como onda longitudinal e nas paredes do transformador como ondas longitudinais e de superfície.

2.6. Piezoeletricidade

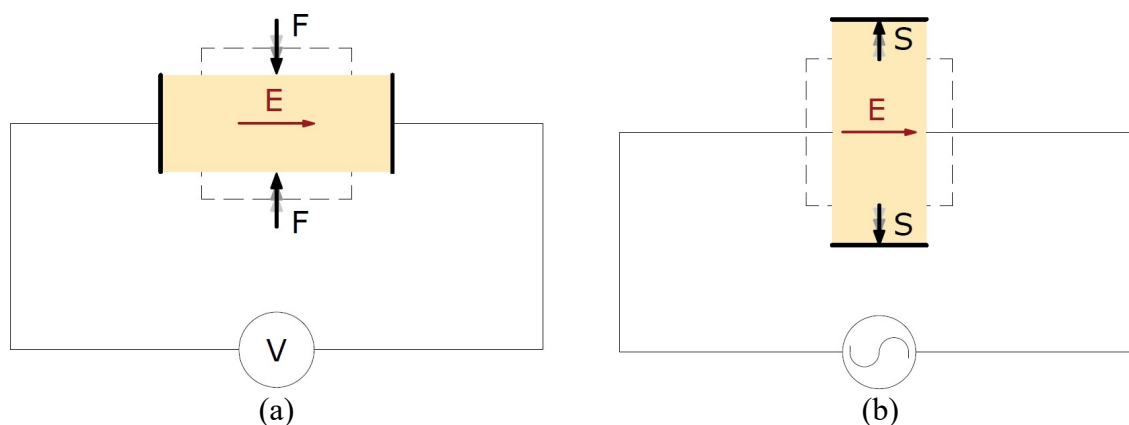
O prefixo piezo deriva do grego *piezin*, que significa pressionar. A terminologia piezoeletricidade se deve à combinação de fenômenos elétricos e elásticos, que relaciona um deslocamento mecânico a uma tensão elétrica (modo direto) ou uma tensão elétrica a um deslocamento mecânico (modo inverso).

Este fenômeno foi descoberto em 1880 pelos irmãos Curie, quando notaram que, em certos materiais que apresentavam uma geometria molecular bipolar com alinhamento assimétrico, quando uma tensão mecânica era aplicada, uma polarização capaz de produzir cargas na sua superfície era gerada (PALITÓ, 2015).

No ano seguinte, em 1881, o efeito inverso foi previsto por Gabriel Lippman, no qual os cristais sofrem uma deformação mecânica quando submetidos a uma excitação elétrica (DAHIYA, 2013).

A Figura 11 ilustra a forma como ocorrem os efeitos piezoelétricos direto e inverso.

Figura 11 - Fenômeno piezoelétrico: (a) direto; e (b) inverso.



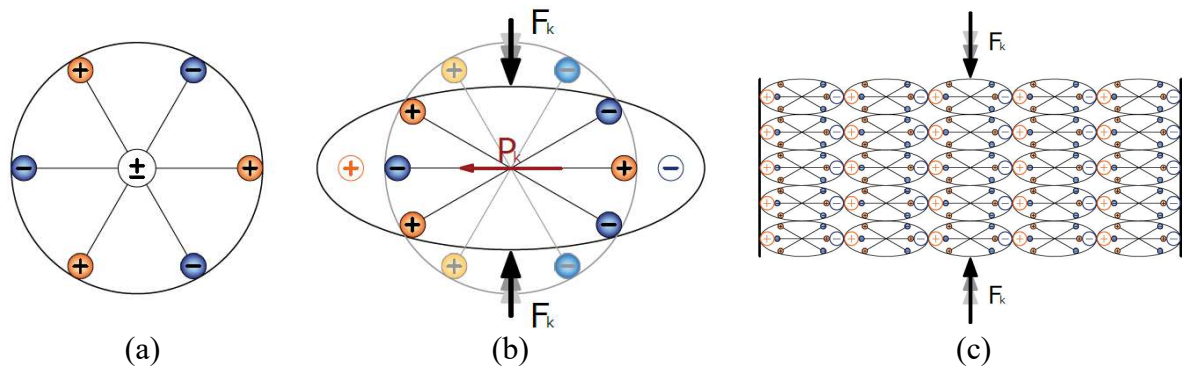
Fonte: Adaptado de Dahiya (2013).

Para que um material seja considerado piezoelétrico, é necessário que ele não possua centro de simetria, visto que esta característica garante que a resposta do material não será a mesma em todas as direções. Entre os principais materiais piezoelétricos estão o titanato de bário

(BaTiO₃) e o titanato zirconato de chumbo (Pb[Zr_x Ti_{1-x}](O₃) conhecido como PZT. O primeiro foi bastante utilizado até o início da década de 50, a partir de quando foi desenvolvido o segundo, que consiste em cristais mistos de zirconato de chumbo (PbZrO₃) e titanato de chumbo (PbTiO₃), sendo atualmente este mais utilizado, por se tratar de uma cerâmica mais eficiente e de menor custo (CADY, 1964).

O efeito piezoelétrico pode ser verificado no modelo de uma única molécula mostrado na Figura 12. Quando o cristal se encontra em equilíbrio, os centros das cargas positivas e negativas de cada molécula coincidem, resultando em uma molécula eletricamente neutra, como ilustra a Figura 12(a). No entanto, quando o material é submetido a uma deformação mecânica externa, os centros das cargas positivas e negativas das moléculas são separados, gerando pequenos dipolos, ilustrado na Figura 12(b). Com isso, os polos opostos internos se cancelam e a distribuição das cargas surge na superfície do material, polarizando o material, como pode ser observado na Figura 12(c).

Figura 12 – Modelo do efeito piezoelétrico: (a) molécula em equilíbrio; (b) molécula submetida a uma força externa; (c) efeito de polarização na superfície, quando o material é submetido a uma força externa.



Fonte: Adaptado de Dahiya (2013).

De acordo com teoria da piezoeletricidade linear, o efeito piezoelétrico pode ser representado pela Equação 14 no modo direto e pela Equação 15 no modo inverso (DAYIHA, 2013; CASTRO; BAPTISTA; REY; CIAMPA, 2019).

$$D_i = d_{iq}T_q + \varepsilon_{ik}^T E_k \quad (14)$$

$$S_p = s_{sp}^E T_q + d_{pk} E_k \quad (15)$$

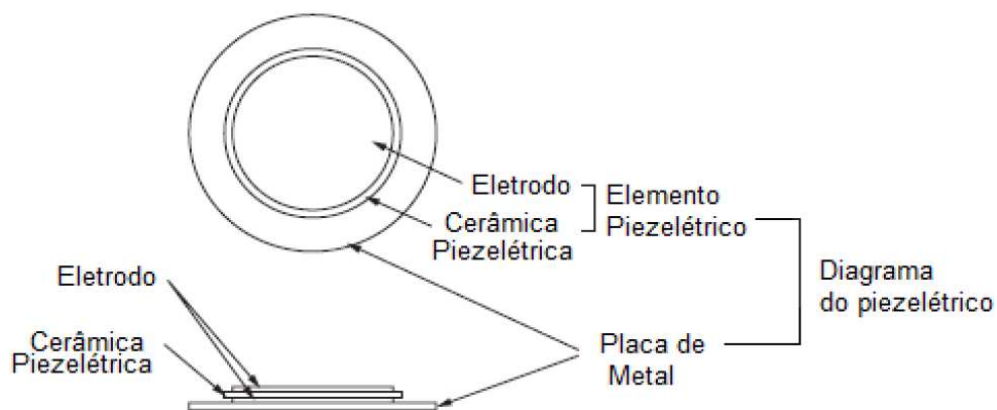
sendo:

D_i : deslocamento elétrico na direção i ;
 d_{pk} : tensor de constante piezelétrica;
 T_q : tensão mecânica na direção q ;
 ε_{ik}^T : tensor da constante dielétrica sob tensão constante;
 E_k : campo elétrico na direção k ;
 S_p : deformação mecânica na direção p ; e
 s_{pq}^E : tensor de deslocamento elástico em um campo elétrico constante.

2.6.1. Cápsulas Piezelétricas

As cápsulas piezelétricas (PZT) são constituídas por uma placa de cerâmica piezelétrica, revestida por um filme metálico, que possui a função de eletrodo, colado em uma fina lâmina de latão, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Construção da cápsula piezelétrica de baixo custo.

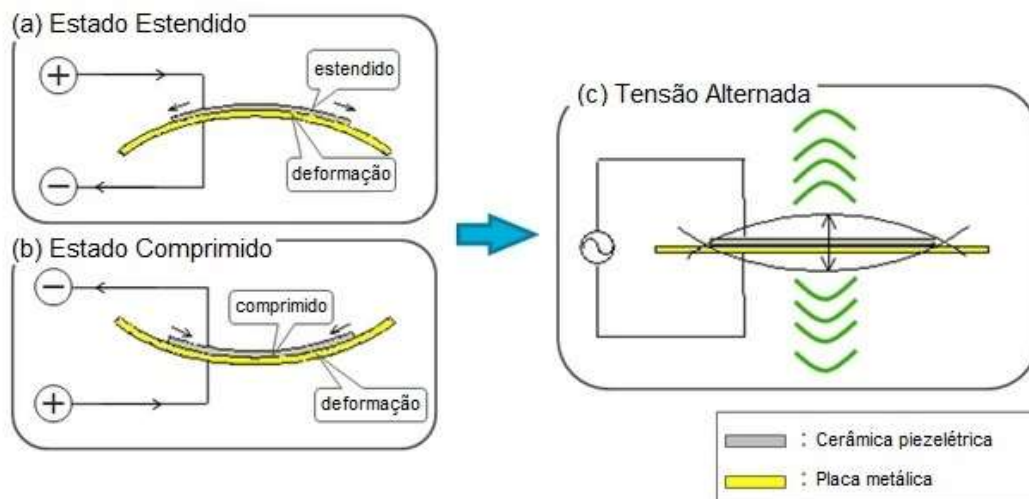


Fonte: Adaptado de Murata (2018).

A Figura 14 ilustra o processo de oscilação de uma cápsula piezelétrica de baixo custo que será utilizada nesta pesquisa. Essas cápsulas são facilmente encontradas no mercado a um custo muito inferior em relação aos sensores específicos para estas aplicações (CASTRO, 2019). Quando a cápsula piezelétrica é submetida a uma tensão elétrica, a placa de metal não se expande, mas a cápsula piezelétrica se expande na direção radial, no sentido apresentado na Figura 14(a). Quando há a inversão da tensão aplicada, o material piezelétrico é comprimido e a cápsula se curva no sentido apresentado na Figura 14(b). Portanto, ao aplicar uma tensão alternada nos eletrodos, essa flexão torna-se cíclica e produz ondas sonoras, conforme mostrado na Figura 14(c).

As cápsulas piezelétricas de baixo custo serão utilizadas neste trabalho como sensores para captar sinais elétricos proporcionais às ondas acústicas geradas pelas descargas parciais originadas em um transformador de potência.

Figura 14 - Sistema de oscilação de uma cápsula piezelétrica.



Fonte: Adaptado de Murata (2018).

2.7. Localização de Descargas Parciais através do Método de Emissão Acústica

Como visto anteriormente, a ocorrência de uma descarga parcial no interior de um transformador de potência propaga ondas acústicas que se deslocam em várias direções até serem captadas por sensores fixados à face externa do tanque. A distância ΔS , percorrida pelo sinal acústico através do óleo, depende da velocidade da onda c e do tempo de propagação Δt , definida pela Equação 16.

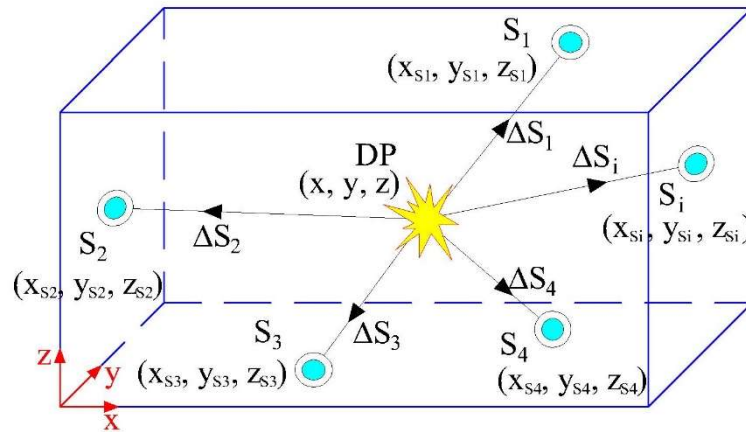
$$\Delta S = c \cdot \Delta t \quad (16)$$

Desta forma, o cálculo da distância entre a origem da descarga parcial e o sensor pode ser obtido através da estimativa do tempo de propagação da onda acústica até atingir o sensor. Geralmente, na aplicação desta técnica considera-se a onda sonora propagando-se em uma linha reta. No entanto, as reflexões e refrações das ondas em diferentes materiais no interior do transformador provocam desvios de suas direções, fazendo com que o sinal chegue com maior ou menor tempo de propagação, repetido e/ou distorcido, podendo produzir inconsistências na detecção do sinal.

Segundo Azevedo (2009), para contornar estes problemas, faz-se necessário o uso de um número maior de sensores piezelétricos acoplados à estrutura do transformador para obtenção de melhor definição e precisão dos sinais captados.

A utilização de diversos sensores para captação dos sinais acústicos permite calcular as diferenças de tempos de detecção entre eles e, assim, estimar a localização da descarga parcial pela triangulação de sinais, conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema para o equacionamento da localização de descargas parciais por triangulação de sinais.



Fonte: Adaptado de Veloso (2006).

Este método, apresentado por Markalous, Tenbohlen e Feser (2008), consiste na solução de um sistema não-linear através dos instantes de tempo em que os sensores são atingidos, no qual as variáveis conhecidas são as posições dos sensores, a velocidade de propagação da onda nos meios e o tempo de chegada da onda em cada sensor. O sistema, composto pelas Equações 17, 18, 19 e 20, é obtido através da distância euclidiana entre a origem da descarga parcial e os n sensores acoplados à parede externa do transformador.

$$(x + x_{S1})^2 + (y + y_{S1})^2 + (z + z_{S1})^2 = (c \cdot \Delta t_1)^2 \quad (17)$$

$$(x + x_{S2})^2 + (y + y_{S2})^2 + (z + z_{S2})^2 = (c \cdot \Delta t_2)^2 \quad (18)$$

$$(x + x_{S3})^2 + (y + y_{S3})^2 + (z + z_{S3})^2 = (c \cdot \Delta t_3)^2 \quad (19)$$

...

$$(x + x_{Sn})^2 + (y + y_{Sn})^2 + (z + z_{Sn})^2 = (c \cdot \Delta t_n)^2 \quad (20)$$

onde x , y e z representam as coordenadas da descarga parcial; x_{Si} , y_{Si} e z_{Si} são as coordenadas dos sensores; c é a velocidade acústica do óleo mineral; e Δt_i é o intervalo de tempo entre a origem da DP e o instante que a onda incide no sensor.

Este método apresenta uma dificuldade na identificação do instante de tempo que a descarga ocorre, pois seria necessário a utilização do método elétrico em conjunto. Desta forma, o método foi aprimorado acrescentando a variável de tempo de excitação do sensor mais próximo à descarga parcial, denotado por T (MARKALOUS; TENBOHLEN; FESER, 2008; VELOSO, 2006). O sistema pode ser descrito pelas Equações 21, 22, 23 e 24:

$$(x + x_{S1})^2 + (y + y_{S1})^2 + (z + z_{S1})^2 = (c \cdot T)^2 \quad (21)$$

$$(x + x_{S2})^2 + (y + y_{S2})^2 + (z + z_{S2})^2 = (c(T + \tau_2))^2 \quad (22)$$

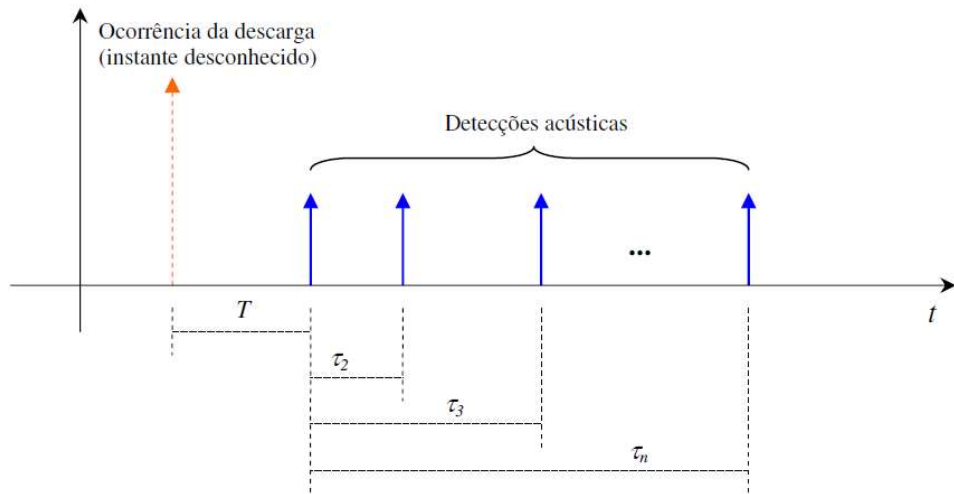
$$(x + x_{S3})^2 + (y + y_{S3})^2 + (z + z_{S3})^2 = (c(T + \tau_3))^2 \quad (23)$$

...

$$(x + x_{Sn})^2 + (y + y_{Sn})^2 + (z + z_{Sn})^2 = (c(T + \tau_n))^2 \quad (24)$$

onde τ_i representa a diferença entre o tempo de excitação do sensor i e o sensor mais próximo, o primeiro a ser excitado.

Figura 16 - Intervalos de tempo entre as detecções da descarga parcial.



Fonte: Veloso (2006).

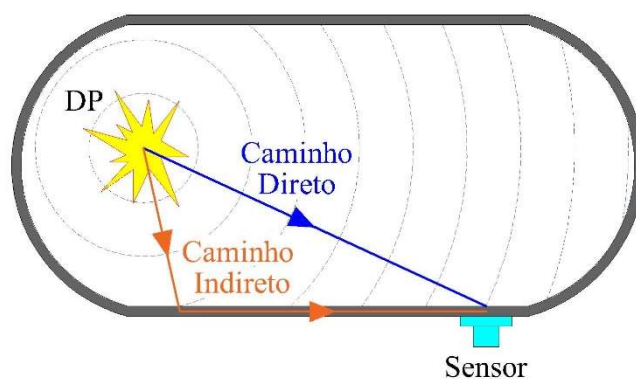
A Figura 16 ilustra o novo sistema com os diferentes intervalos de tempo de detecção da descarga parcial de cada sensor acoplado.

Este método exige que os parâmetros de tempo de chegada da onda acústica em cada sensor sejam precisos para obtenção de resultados satisfatórios. Isso se torna uma tarefa difícil, visto que o sinal não é estacionário e contém informações de diversas frentes de onda.

O sinal acústico captado pelos sensores transporta informações não somente da distância do sensor para a fonte da descarga parcial, mas também informações sobre o caminho percorrido no interior do transformador.

A descarga parcial originada no interior de um transformador de potência gera uma onda acústica esférica, que se propaga em todas as direções e atinge a parede do transformador em diferentes instantes de tempo. Deste modo, dependendo da localização do sensor, ele poderá ser excitado primeiro pela onda de superfície, pelo caminho indireto, visto que a velocidade de propagação no aço é muito maior que a o óleo mineral. A Figura 17 ilustra os caminhos percorridos pela onda de forma direta e indireta (VELOSO, 2006).

Figura 17 - Propagação da onda esférica no interior de um transformador de potência.



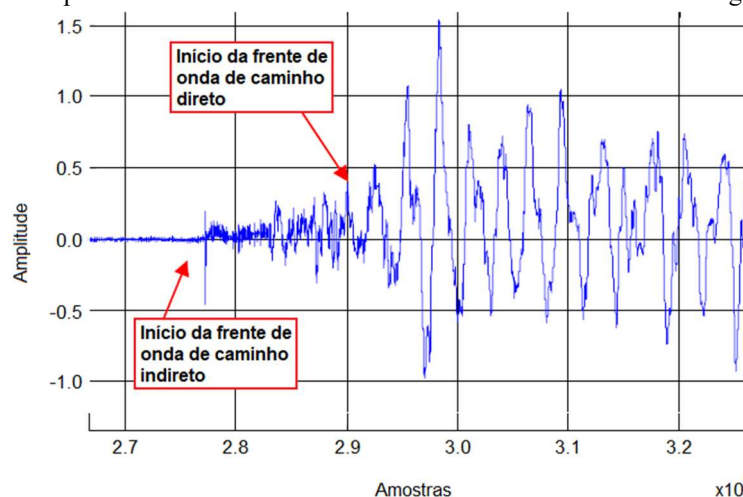
Fonte: Compilação da autora.

Segundo Veloso (2006), um sinal acústico possui pelo menos duas frentes de onda nos primeiros instantes, como pode ser visto no sinal na Figura 18. Desta forma, fazer a distinção entre elas e identificar a frente de onda de caminho direto são etapas necessárias para conseguir estimar a origem da descarga parcial de forma mais exata.

Em seu trabalho, Veloso (2011) apresentou uma solução utilizando a transformada *wavelet* para extrair as características de tempo de chegada nos sensores e no uso da Análise de

Componentes Principais (PCA) para interpretação dos dados extraídos. A transformada *wavelet* possui a capacidade de analisar sinais não-estacionários, que variam seus parâmetros ao longo do tempo, como por exemplo, a frequência e a amplitude. A PCA é uma técnica estatística normalmente utilizada na identificação de padrões contidos em grandes conjuntos de dados. Além de detectar padrões, o PCA pode organizá-los em função de sua contribuição na formação do conjunto de dados.

Figura 18 - Exemplo de sinal de emissão acústica com duas frentes de onda atingindo o sensor.



Fonte: Veloso (2006).

No trabalho desenvolvido por Markalous (2008), o tempo de chegada foi calculado utilizando dois parâmetros extraídos do sinal captado pelos sensores acoplados: o critério de energia e o critério estatístico de Akaike.

Clerice (2014) demonstrou que através de sistemas inteligentes também é possível obter a localização de descargas parciais em transformadores de potência. Em sua pesquisa, foram extraídas métricas dos sinais acústicos, como: energia, valor RMS, tempo de pico, tempo de subida e critério de energia, e aplicadas a redes neurais artificiais (RNA) e sistemas de inferência neuro-difuso adaptativo (ANFIS).

Os trabalhos desenvolvidos por Veloso (2006), Markalous (2008) e Clerice (2014), apesar de terem apresentado resultados satisfatórios, abrangeram apenas o tanque do transformador sem a sua parte ativa.

Já a pesquisa de Castro (2016) propôs uma solução que considera a parte ativa do transformador imersa no óleo isolante. Quando o núcleo do transformador é inserido no óleo,

cria-se uma barreira adicional para a aquisição dos parâmetros dos sinais acústicos necessários para localização das descargas parciais. Apesar disso, através das métricas extraídas dos sinais acústicos, de técnicas de processamento dos sinais e da utilização sistemas inteligentes, os resultados atingidos foram promissores.

Neste trabalho, pretende-se combinar a utilização da transformada wavelet discreta, o critério de informação de Akaike e a utilização de sistemas inteligente para atingir o objetivo de localizar de forma mais exata a origem da descarga parcial.

2.8. Transformada *Wavelet* Discreta

As funções *wavelets* e suas transformadas são ferramentas matemáticas usadas para analisar e decompor funções hierarquicamente, isto é, permitem a representação da função em diferentes níveis de resolução, permitindo uma análise mais genérica até o detalhe mais específico.

Os sinais de emissão acústica têm seus parâmetros, como frequência e amplitude, variados ao longo do tempo. A transformada *wavelet* discreta, por possuir a capacidade de analisar sinais não estacionários, permite analisar o instante em que ocorrem essas variações dos sinais (VELOSO, 2006).

Para um sinal discreto, os coeficientes dos níveis de aproximação e detalhe são calculados aplicando-se pares de filtros FIR (Filtros de Resposta Finita ao Impulso), sendo um filtro passa-baixa e outro passa-alta. As filtragens sucessivas produzem níveis de aproximação e detalhes cada vez maiores (CASTRO; BAPTISTA; CIAMPA, 2019; DAUBECHES, 1992; LUCAS, 2020).

Dada uma sequência discreta $y(t)$ e o sinal de resposta $y[n]$ para uma frequência de amostragem F_S , a decomposição *wavelet* produzirá duas sequências com a metade da taxa de amostragem, denominadas coeficiente de aproximação e coeficiente de detalhe .

O coeficiente de aproximação $c_1[k]$ é produzido pelo filtro passa-baixa e possui resposta ao impulso h_1 dada pela Equação 25.

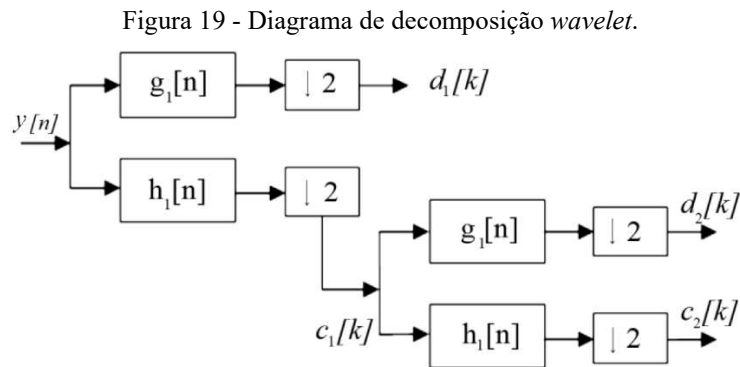
$$c_1[k] = \sum_n h_1[n - 2k]. y[n] \quad (25)$$

O coeficiente de detalhe $d_1[k]$ é produzido pelo filtro passa-alta e possui resposta ao impulso g_1 dada pela Equação 26.

$$d_1[k] = \sum_n g_1[n - 2k] \cdot y[n] \quad (26)$$

Desta forma, as informações relativas às baixas frequências serão mantidas nos coeficientes de aproximação, enquanto os coeficientes de detalhe preservarão as informações relativas às altas frequências.

A decomposição do sinal deve ser feita até atingir o nível desejado, sendo que o maior número de níveis que um sinal pode ser decomposto é dado por $\log_2 N$, para uma sequência com N amostras (DAUBECHES, 1992; CASTRO, 2019). A Figura 19 ilustra a sequência de decomposições *wavelets* para o sinal de resposta amostrado $y[n]$.



Fonte: Castro (2019).

Devido ao sensor ser atingido por diferentes frentes de ondas, originadas de uma mesma fonte, mas produzidas por processos de reflexões e refrações, torna-se necessário distinguir as diferentes frentes de ondas. Cada frente de onda possui uma característica espectral particular e, conforme atingem o sensor, aparecem como rupturas ou descontinuidades no sinal captado (VELOSO, 2011).

A transformada *wavelet* discreta será empregada nesta metodologia devido a sua capacidade de identificar os instantes em que essas alterações ocorrem e torna possível identificar a frente de onda de caminho direto, que possui a informação da distância entre a origem da descarga e o sensor.

2.9. Estimativa do Tempo de Chegada

Utilizar diretamente os sinais do domínio do tempo, além de ser um processo demorado, pode não apresentar as características necessárias para o correto entendimento do fenômeno analisado. Para contornar este problema, a extração de parâmetros que caracterizem o sinal adquirido pode facilitar o processo de localização das descargas parciais.

2.9.1. Critério de Informação de Akaike

O critério de informação de Akaike, conforme mencionado por Robles, Fresno e Tarifa (2015), considera os sinais como um processo auto-regressivo, no qual cada amostra é uma combinação linear de amostras passadas.

Este critério pode ser utilizado para determinar os instantes de chegada de ondas acústicas nos sensores, através da comparação de dois segmentos do sinal, sendo o primeiro segmento formado por amostras de 1 a n e o segundo, por amostras $n + 1$ a N , conforme expresso pela Equação 27.

$$AIC(n) = n \cdot \ln[\sigma^2(1, n)] + (N - n - 1) \cdot \ln[\sigma^2(n + 1, N)] \quad (27)$$

onde n é uma amostra do sinal, N é o número total de amostras e σ^2 é a variância das amostras dos segmentos, que são definidas pelas Equações 28 e 29.

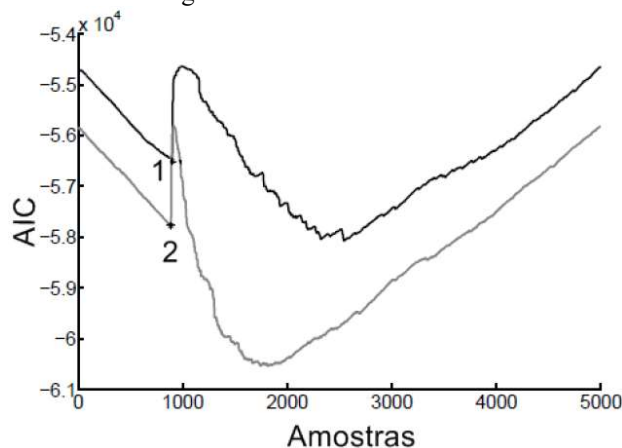
$$\sigma^2(1, n) = \frac{1}{n} \sum_{m=0}^n [s(m) - \bar{s}(1, n)]^2 \quad (28)$$

$$\sigma^2(n + 1, N) = \frac{1}{N - n - 1} \sum_{m=n+1}^N [s(m) - \bar{s}(n + 1, N)]^2 \quad (29)$$

sendo $\bar{s}$ é o valor médio do sinal considerado neste intervalo.

A Figura 20 ilustra o sinal de dois sensores segundo o critério de informação de Akaike, onde os pontos 1 e 2 representam os instantes que em cada sensor foi excitado.

Figura 20 - Pontos de mínimo local para identificação dos instantes de chegada da onda acústica no sensor, segundo o critério de Akaike.



Fonte: Castro (2016).

2.10. Sistemas Inteligentes

Os sistemas inteligentes buscam, através de técnicas inspiradas na natureza, o desenvolvimento de inteligência computacional que imitem aspectos do comportamento humano, tais como: aprendizado, percepção, raciocínio, evolução e adaptação.

O estudo e desenvolvimento da inteligência artificial tiveram início durante a Segunda Guerra Mundial. Em 1943, Warren McCulloch e Walter Pitts escreveram um artigo que citou pela primeira vez as redes neurais, estruturas de raciocínio artificiais em forma de modelo matemático que imitam o sistema nervoso humano. Desde então, com a evolução computacional, a inteligência artificial ganhou força, possibilitando que diversos pesquisadores desenvolvessem novas técnicas muito utilizadas nos dias de hoje.

Segundo Haykin (2001), um sistema inteligente deve ser capaz de armazenar conhecimento, aplicá-lo para resolver problemas e adquirir novos conhecimentos através da experiência. Essas características podem ser resumidas em três componentes fundamentais: representação, raciocínio e aprendizagem (SAGE, 1990).

A representação consiste no uso de uma linguagem simbólica para representar tanto o conhecimento genérico quanto um conhecimento específico de determinado problema. O conhecimento refere-se aos dados de um problema. Já o raciocínio compreende a habilidade de resolver problemas e deve satisfazer a algumas condições, tais como: ser capaz de expressar e resolver uma vasta gama de problemas; ser capaz de tornar conhecidas as informações implícitas e explícitas; e possuir um mecanismo de controle que determine o que fazer e quando

finalizar o processamento de um problema, assim que uma solução for encontrada (HAYKIN, 2001).

Por fim, a aprendizagem de um sistema inteligente ocorre a partir de informações fornecidas pelo ambiente. O elemento de aprendizagem manipula esta informação para melhorar a base de conhecimento e o elemento de desempenho utiliza a base de conhecimento para realizar sua tarefa. Caso seja necessário, o sistema avalia suas hipóteses e as revisa através de um mecanismo de realimentação (HAYKIN, 2001).

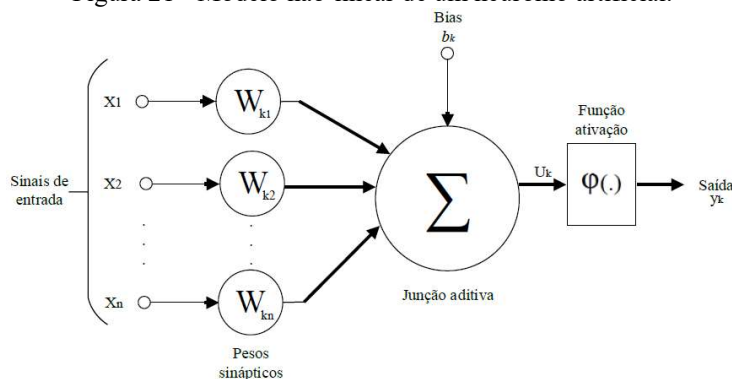
Para a aprendizagem de um sistema inteligente, é necessário alimentá-lo com informações para formar a base de conhecimento, que podem ser manipuladas a fim de aprimorar a execução da tarefa.

2.10.1. Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNAs) representam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência.

O neurônio artificial é uma estrutura lógico-matemática que procura simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. Fazendo uma analogia, os dentritos são análogos às entradas, as sinapses são representadas pelos pesos, os estímulos são captados e processados pela função de soma e o disparo do neurônio biológico é representado pela função de transferência ou função de ativação. A Figura 21 apresenta um modelo de um neurônio artificial.

Figura 21 - Modelo não-linear de um neurônio artificial.



Fonte: Haykin (2001).

Uma rede neural artificial é composta por várias unidades de processamento, denominadas neurônios artificiais, conectadas por canais de comunicação, chamadas de sinapses artificiais, que são representadas matematicamente por vetores e matrizes de pesos sinápticos (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). O conhecimento das redes é adquirido por meio de um algoritmo de treinamento que ajusta os pesos sinápticos para produzir saídas cada vez mais próximas às desejadas, de forma a obter a melhor modelagem de um sistema desconhecido descrito por um conjunto de pares de entrada-saída.

As características principais envolvidas nas aplicações das Redes Neurais são (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010):

- Adaptabilidade: os pesos sinápticos são ajustados às alterações do ambiente;
- Aprendizado: através do treinamento, uma RNA consegue correlacionar as informações entre as diversas características apresentadas;
- Generalização: uma RNA treinada é capaz de generalizar o conhecimento adquirido e encontrar soluções ainda não conhecidas;
- Tolerância a falhas: uma RNA tolera pequenas falhas, devido à sua natureza distribuída;
- Facilidade de protipagem: a maioria das arquiteturas podem ser facilmente prototipadas em *hardwares* e *softwares*.

As redes neurais artificiais são consideradas boas técnicas computacionais para estimar funções, já que podem aproximar um comportamento desejado, sem a necessidade de especificar uma função particular, ou seja, são eficientes no tratamento de problemas nos quais a relação entre variáveis não é totalmente conhecida.

As redes neurais artificiais podem ser combinadas com a lógica *Fuzzy*, resultando em um sistema neuro-difuso com uma grande vantagem sobre a lógica *Fuzzy* convencional: as funções de pertinência, o número de regras e as próprias regras são produzidas por um processo automático (SUGENO, 1988).

2.10.2. Sistemas *Fuzzy*

A lógica *Fuzzy*, também conhecida como lógica difusa ou lógica nebulosa, surgiu em 1965 quando Lotfi Zadeh percebeu a necessidade de os sistemas inteligentes identificarem situações não fundamentadas na lógica clássica ou booleana, isto é, que suportassem modos de raciocínio aproximados. Estes sistemas se caracterizam pelo tratamento de informações qualitativas, ou seja, são capazes de tratar informações vagas e aproximadas, expressas por variáveis linguísticas (CASTRO, 2016).

Na lógica clássica, a pertinência de um elemento a um determinado conjunto é dada pelo valor verdadeiro ou falso. Exemplificando, dado um conjunto S em um universo U , pode-se representar a pertinência do elemento x por uma função característica $f(x)$, dada pela Equação 30.

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in U \\ 0, & \text{se } x \notin U \end{cases} \quad (30)$$

A função $f(x)$ define dois conjuntos bem definidos, ou seja, o elemento pertence totalmente ao conjunto ou não pertence.

Na lógica *fuzzy*, os valores lógicos podem possuir valores intermediários no intervalo entre 0 e 1, que representam o grau de veracidade das proposições. O nível 0 é usado para representar total impertinência e o nível 1, total pertinência (WITOLD; GOMIDE, 2007).

Dado um determinado conjunto *fuzzy* S em um universo U , a pertinência de um elemento x a este conjunto é representada pela função característica $\mu(x)_S$, dada pela Equação 31.

$$\mu(x)_S: U \rightarrow [0,1] \quad (31)$$

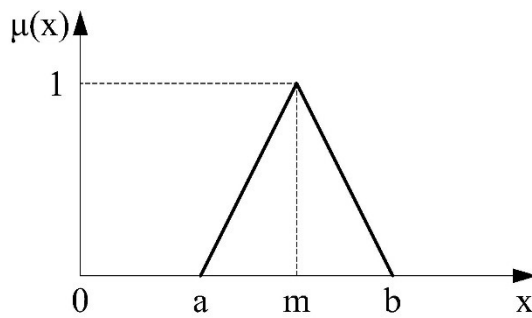
2.10.2.1. Funções de Pertinência

O grau de compatibilidade de um elemento a um determinado conjunto *fuzzy* é dado de acordo com a função de pertinência escolhida. As mais comumente utilizadas são as trapezoidais, triangulares, gaussiana, sigmoide e unitária.

As funções triangulares, representadas pela Figura 22, são definidas pela Equação 32, onde a, b e m pertencem ao conjunto U , sendo $a < m < b$.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m, b] \\ 0, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (32)$$

Figura 22 - Função de pertinência triangular.

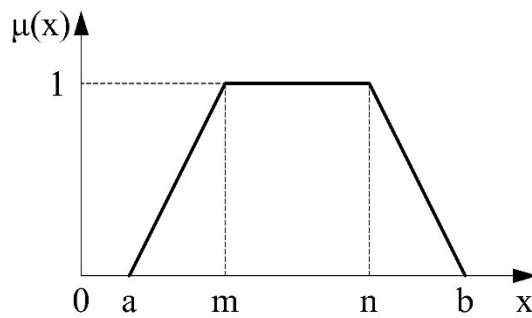


Fonte: Compilação da autora.

As funções trapezoidais são definidas pela Equação 33, onde a, b, m e n pertencem ao conjunto U , sendo $a < m, n < b$ e $m < n$, e ilustrada na Figura 23.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (33)$$

Figura 23 - Função de pertinência trapezoidal.

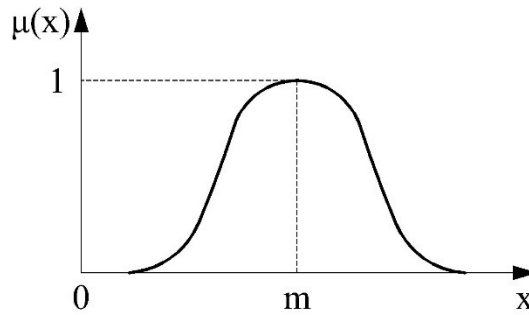


Fonte: Compilação da autora.

As funções gaussianas são dadas para $k > 1$, conforme Equação 34.

$$\mu(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad (34)$$

Figura 24 - Função de pertinência gaussiana.

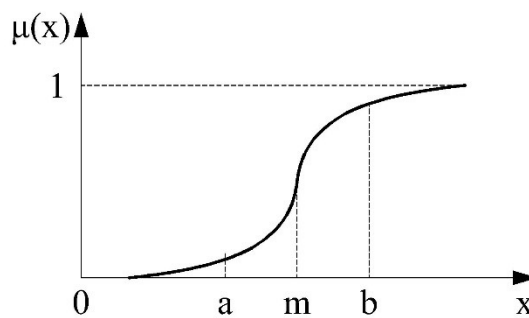


Fonte: Compilação da autora.

A função sigmoide é dada segundo a Equação 35, sendo m o ponto médio entre o intervalo $[a, b]$.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a \\ 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & \text{se } x \in [m, b] \\ 1, & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (35)$$

Figura 25 - Função de pertinência sigmoide.

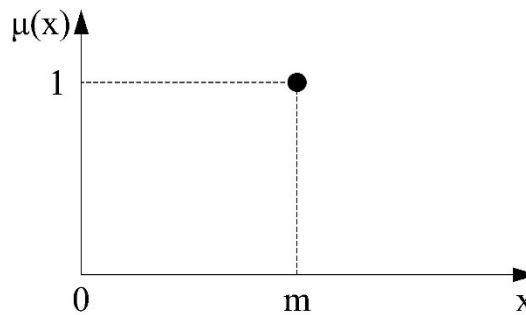


Fonte: Compilação da autora.

A Equação 36 representa a função pertinência *singleton*, ou função unitária, ilustrada na Figura 26.

$$\mu(x) = \begin{cases} h, & \text{se } x = m \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (36)$$

Figura 26 - Função de pertinência unitária.



Fonte: Compilação da autora.

2.10.2.2. Sistemas de Inferência *Fuzzy*

Os sistemas de inferência são baseados em um conjunto de regras *fuzzy* divididos em quatro componentes: um processador de entrada, uma base de regras, uma máquina de inferência e um processador de saída.

O processador de entrada realiza a fuzzificação dos dados de entrada, ou seja, a tradução das entradas do sistema em conjuntos *fuzzy* em seus respectivos domínios. São construídas as funções de pertinência para cada entrada.

A base de regras estabelece a relação entre as variáveis, ou seja, combina os valores de pertinência e fornece uma descrição qualitativa do sistema em estudo.

A máquina de inferência *fuzzy*, por meio de métodos de inferência, traduz matematicamente as proposições criadas na base de regras, tais como o Método de Mamdani e Takagi-Sugeno.

No Método de Mandani as saídas dos termos consequentes são combinadas de forma a se criar um único conjunto difuso. Assim, a entrada do processo de agregação consiste de uma lista de funções de pertinência dos termos consequentes e a saída é um único conjunto difuso para cada variável de saída. Já no sistema de inferência Takagi-Sugeno somente o termo antecedente das regras é formado por variáveis *fuzzy*. Sendo assim, no método de Takagi-Sugeno o consequente de cada regra é expresso por uma função linear dos valores observados das variáveis que descrevem um determinado problema.

O processador de saída realiza a defuzzificação do sistema, isto é, traduz a saída em um valor numérico. Um método de defuzzificação deve ser escolhido de acordo com cada problema. Entre os mais conhecidos, podemos citar (LEEKWIJCK; KERRE, 1999):

- Média dos Máximos: o valor de saída é igual a média dos n elementos que correspondem aos maiores valores de pertinência do conjunto *fuzzy* de saída;
- Média Ponderada dos Máximos: o valor de saída é igual a média dos n elementos que correspondem aos maiores valores de pertinência do conjunto *fuzzy* de saída ponderado pelos graus de pertinência;
- Centro de Gravidade: o valor de saída é igual ao centro de gravidade do conjunto de saída do sistema *fuzzy*; e
- Critério de Máximo ou de Mínimo: o valor de saída é igual ao valor máximo (ou mínimo) de ativação do conjunto de saída do sistema *fuzzy*.

2.10.2.3. Sistemas de Inferência Neuro-Difuso Adaptativos (ANFIS)

Os sistemas neuro-difuso adaptativos são sistemas híbridos que combinam Redes Neurais Artificiais com Sistemas de Inferência *Fuzzy*. Nestes sistemas são incorporadas a capacidade de aprendizagem das redes neurais artificiais com a capacidade *fuzzy* de interpretação linguística. Derivado do termo em inglês *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), estes sistemas se caracterizam por serem uma rede neural com múltiplas camadas, em que cada uma delas é associada a uma etapa do processo de inferência *fuzzy* (NEGNEVITSKY, 2005).

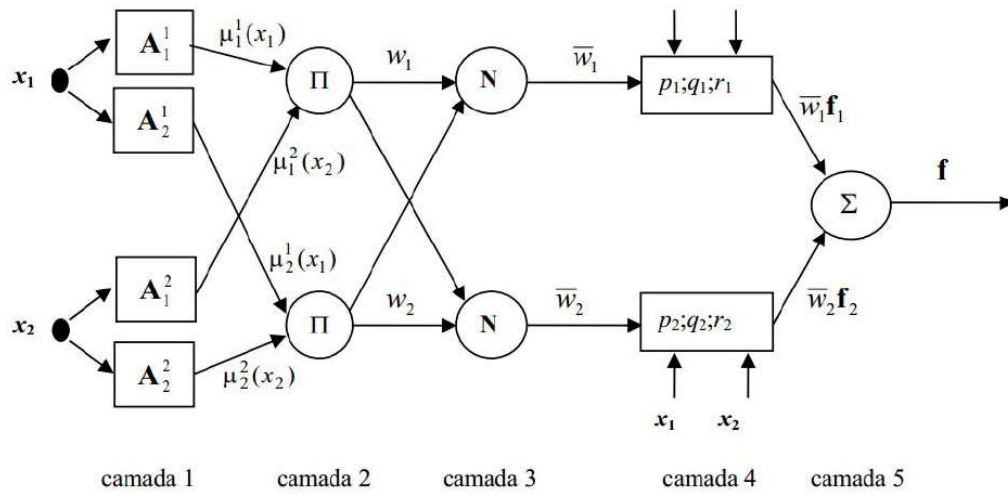
Um exemplo destes sistemas é apresentado na Figura 27, compostos por cinco camadas, onde cada uma delas possui tipos diferentes de neurônios, descritos por funções específicas.

A primeira camada é caracterizada pela codificação dos sinais de entrada, em que os nós são constituídos pelos conjuntos *fuzzy* A_j^i e associados às entradas x_i . A saída de cada nó é a pertinência do valor x_i ao conjunto *fuzzy*. Nesta camada, os nós podem ser ajustados e as funções de pertinência podem ser definidas desde que elas sejam diferenciáveis.

A segunda camada tem como saída o produto dos sinais de entrada da primeira camada, em que os nós não podem ser ajustados. Assim, cada saída w_j corresponde à intensidade do disparo de uma regra, representada pela Equação 37.

$$w_j = \prod_{i=1}^2 \mu_i^j, \text{ para } j = 1, 2 \quad (37)$$

Figura 27 - Arquitetura típica do sistema ANFIS.



Fonte: Clerice (2014).

Na terceira camada, a saída é definida pelo quociente entre a intensidade de disparo da j -ésima regra e a soma dos disparos de todas as demais regras, conforme Equação 38. Cada neurônio recebe como entrada todas as saídas dos neurônios da camada de regras e calcula o valor normalizado de cada regra, que representa a contribuição de cada regra ao resultado final.

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^2 w_i} = \frac{w_j}{w_1 + w_2}, \text{ para } j = 1, 2 \quad (38)$$

A quarta camada é adaptativa e seus parâmetros p , q e r correspondem a parte consequente de cada regra do modelo. Assim, as saídas $f_j = f_j(\bar{w}_j, x_1, x_2, p_j, q_j, r_j)$ são o produto das normalizações da terceira camada com o valor do consequente da regra na Equação 39.

$$f_j = \bar{w}_j(p_j x_1 + q_j x_2 + r_j) \quad (39)$$

Por fim, a quinta camada é constituída por um único nó não adaptativo. Nesta camada, a saída é a soma de todas as saídas parciais, representada pela Equação 40. Após o cálculo da saída, é realizada a defuzzificação do sistema.

$$f = \sum_{j=1}^2 f_j \quad (40)$$

Para a aprendizagem do sistema ANFIS, dois conjuntos precisam ser treinados: os parâmetros do antecedente, que são as constantes que caracterizam as funções descendentes, e os parâmetros do consequente, que são os parâmetros lineares da saída do modelo de inferência. Essa aprendizagem emprega algoritmos do gradiente descendente para aperfeiçoar o antecedente, e se vale do método dos mínimos quadrados para determinar os parâmetros lineares dos consequentes. Desta forma, o treinamento é realizado por duas etapas. Na primeira, os parâmetros dos antecedentes permanecem fixos e utiliza-se o método dos mínimos quadrados como regra. Na segunda, com os consequentes constantes e fixos, utiliza-se o algoritmo *backpropagation* sobre o parâmetro do precedente (CLERICE, 2014).

3. METODOLOGIA

A Figura 28 apresenta um diagrama de blocos que sintetiza a metodologia empregada nesta pesquisa. Cada etapa do processo será melhor detalhada subseções seguintes.

Figura 28 - Diagrama de blocos da metodologia proposta.

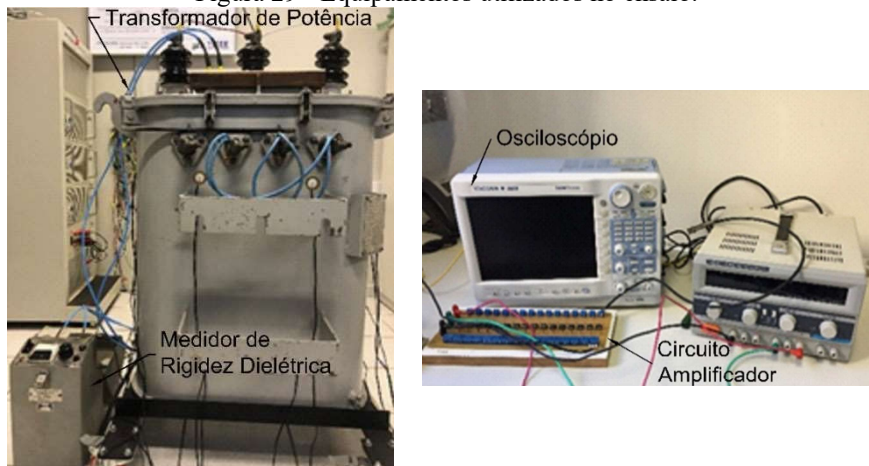


Fonte: Compilação da autora.

Com o objetivo de localizar as descargas parciais originadas no interior de um transformador de potência, foram geradas descargas parciais através de 14 (quatorze) eletrodos fixados ao núcleo. Foram acoplados 16 (dezesesseis) cápsulas piezelétricas na parede externa do transformador, que atuaram como sensores, para captação dos sinais de emissão acústica. Os sinais obtidos foram amplificados com um ganho de 28 dB por um circuito eletrônico, devido à baixa amplitude do sinal original. Utilizou-se um osciloscópio com taxa de amostragem de cinco milhões de amostras por segundo para a aquisição dos dados. As formas de onda obtidas foram processadas utilizando filtros digitais na faixa entre 20kHz, para eliminar as vibrações do meio, e 400kHz, faixa de operação do amplificador. A partir dos sinais, foi extraída o tempo de mínimo, segundo o critério de informação de Akaike, para serem utilizadas no treinamento supervisionado de um sistema ANFIS, que apresentou como resultado as coordenadas de localização da origem das descargas parciais.

As fotos da Figura 29 apresentam os equipamentos utilizados neste trabalho.

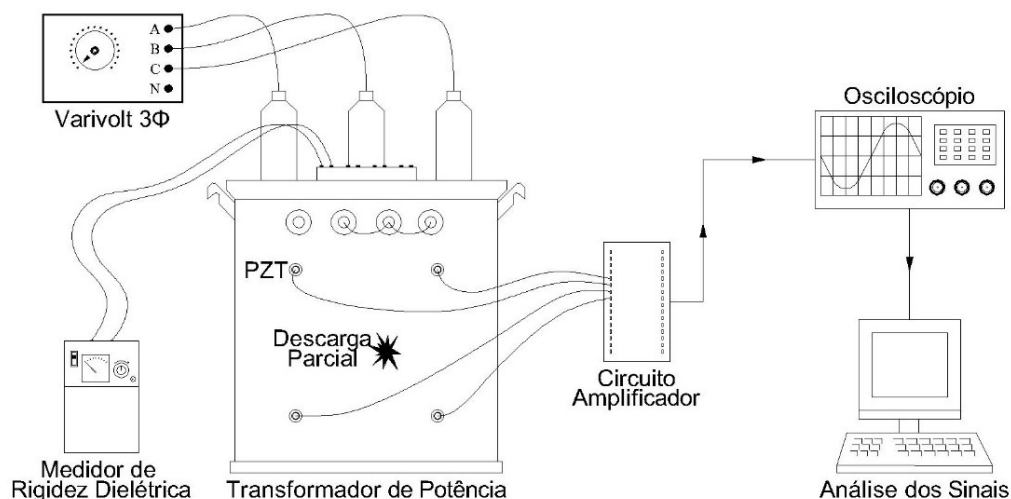
Figura 29 - Equipamentos utilizados no ensaio.



Fonte: Compilação da autora.

A Figura 30 ilustra os equipamentos e as conexões realizadas para a execução dos ensaios.

Figura 30 - Esquema de ligação dos equipamentos para os ensaios.



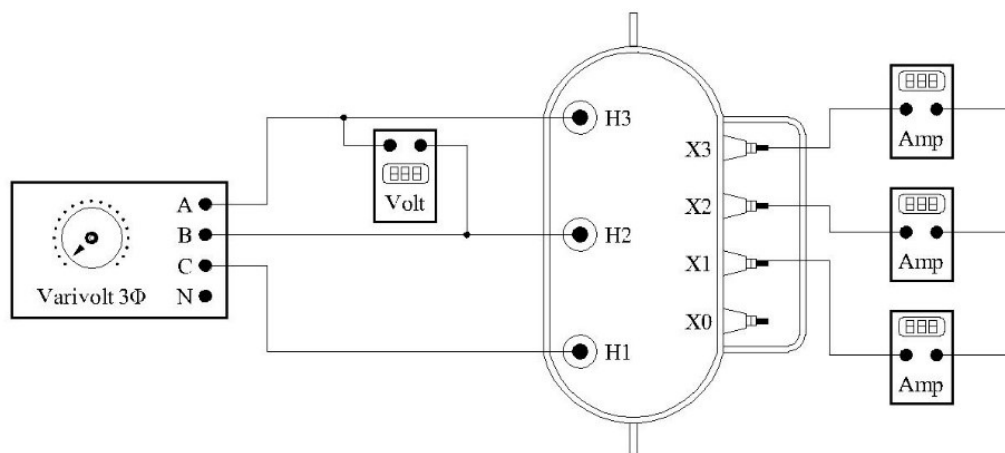
Fonte: Compilação da autora.

3.1. Carregamento Nominal do Transformador de Potência

Nesta pesquisa foi utilizado um transformador de distribuição de potência de 30kVA, 13,8kV/220-127V, imerso em óleo isolante, com dimensões 830x650x360mm.

Para o carregamento nominal do transformador, os terminais do secundário foram colocados em curto-circuito e foi aplicada tensão no primário até atingir a corrente nominal do secundário. A figura 31 ilustra o esquema de ligação utilizado.

Figura 31 - Esquema de ligação dos terminais secundários do transformador em curto-circuito.

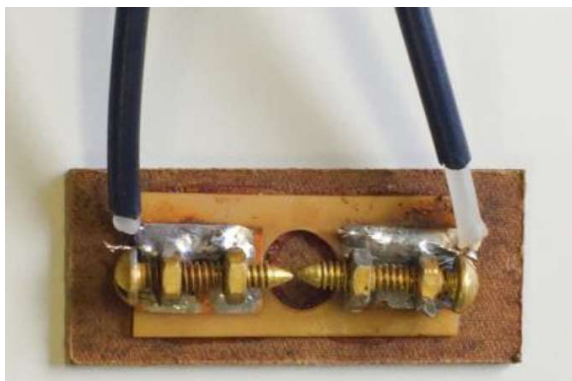


Fonte: Compilação da autora.

3.2. Geração das Descargas Parciais

Foram desenvolvidos 16 (dezesseis) eletrodos de latão com gaps de 0,3 mm, responsáveis por gerar descargas elétricas no óleo, de modo a simular a ocorrência de uma descarga parcial. A Figura 32 mostra o eletrodo utilizado.

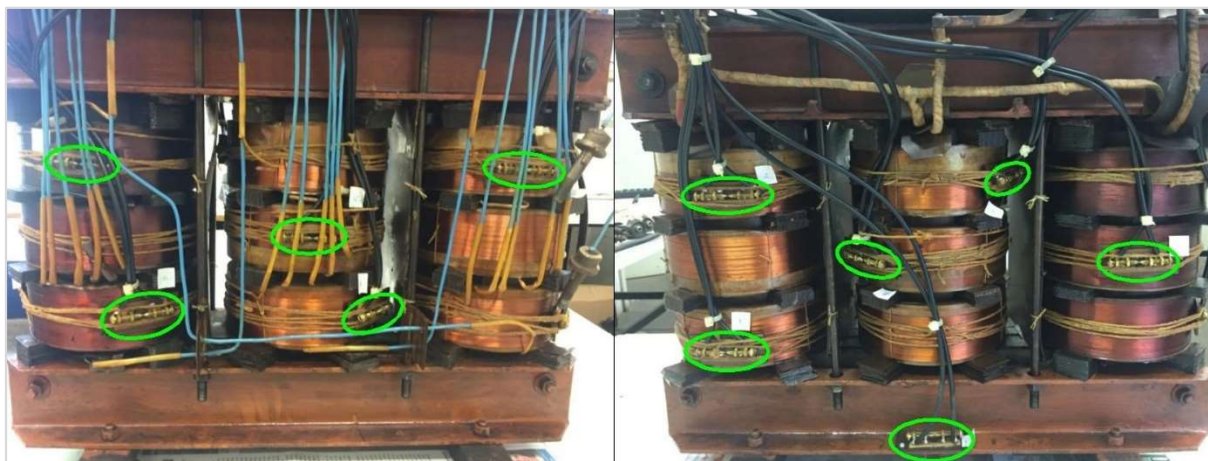
Figura 32 - Eletrodo desenvolvido para indução de descargas elétricas.



Fonte: Compilação da autora.

Os eletrodos foram fixados em diversos pontos do núcleo do transformador, como mostrado nas fotos da Figura 33.

Figura 33 - Pontos de fixação dos eletrodos no núcleo para gerar as descargas.



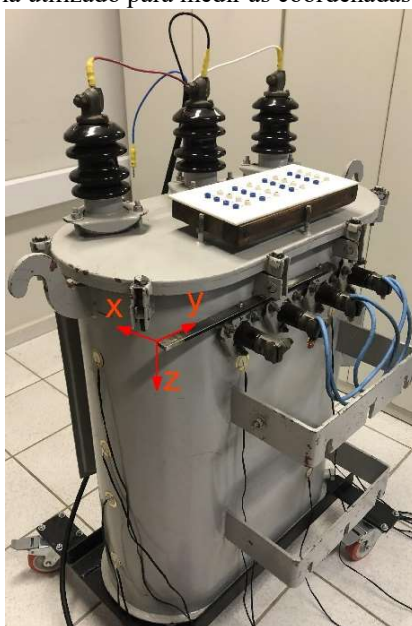
Fonte: Compilação da autora.

As coordenadas de cada eletrodo foram medidas em relação a um ponto comum externo, adotado como referência, mostrado na Figura 34. As medidas foram anotadas e são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 3 - Posicionamento dos eletrodos no núcleo em relação ao ponto de referência comum.

Eletrodo	x [m]	y [m]	z [m]
1	0,082	0,324	0,264
2	0,095	0,254	0,489
3	0,098	0,321	0,669
4	0,068	0,509	0,489
5	0,136	0,603	0,556
6	0,114	0,408	0,417
7	0,224	0,573	0,279
8	0,243	0,521	0,421
9	0,238	0,474	0,552
10	0,246	0,325	0,479
11	0,216	0,256	0,552
12	0,212	0,114	0,191
13	0,243	0,139	0,416
14	0,213	0,059	0,567
15	0,072	0,129	0,572
16	0,072	0,146	0,427

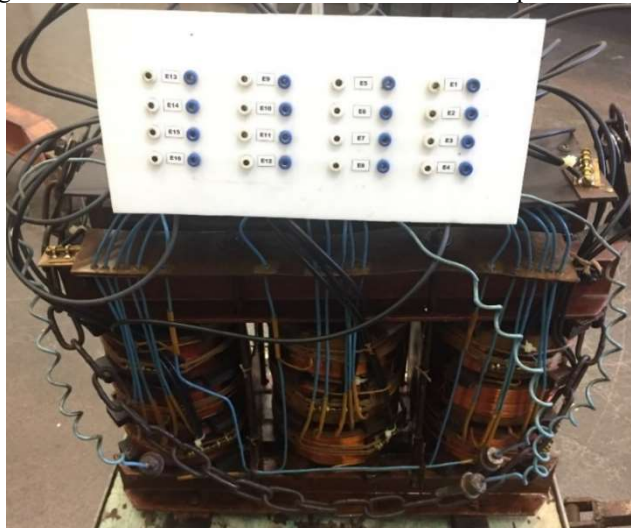
Figura 34 - Ponto de referência utilizado para medir as coordenadas dos eletrodos e sensores PZT.



Fonte: Compilação da autora.

Os terminais de cada eletrodo foram conectados à uma placa seletora externa ao transformador, como mostrado nas Figura 35.

Figura 35 - Terminais acessíveis dos eletrodos em placa seletora.



Fonte: Compilação da autora.

Foi utilizado o medidor de rigidez dielétrica de óleo isolante, apresentado na Figura 36, que teve seus terminais conectados a cada eletrodo através da placa seletora, para elevar a diferença de potencial aplicada ao gap de cada eletrodo e, assim, induzir a ocorrência da descarga elétrica no interior do transformador. Observou-se que o valor de tensão em que o fenômeno ocorreu variou de 10kV a 12kV.

Figura 36 - Medidor de rigidez dielétrica para indução de descarga parcial nos eletrodos.



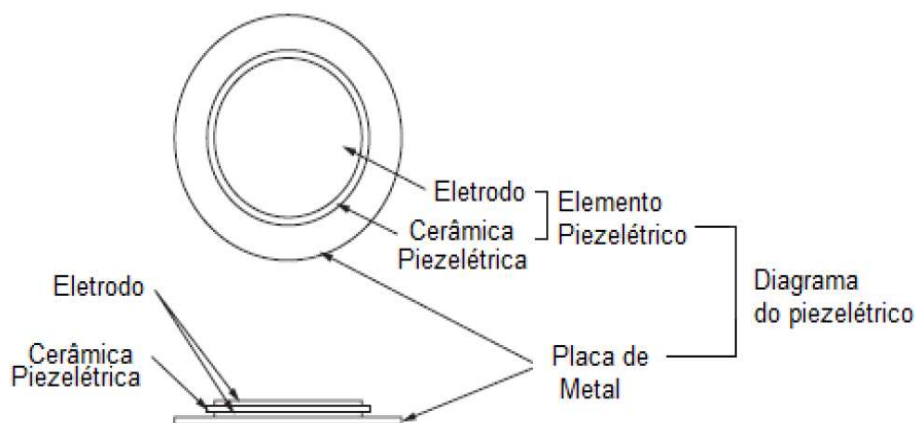
Fonte: Compilação da autora.

Durante a realização dos ensaios, os eletrodos identificados na Tabela 3 como 15 e 16 não geraram a descarga parcial. Portanto, os dados destes eletrodos não foram utilizados nesta pesquisa.

3.3. Captação dos Sinais Acústicos

Para captar os sinais acústicos emitidos pela descarga, foram utilizadas cápsulas piezelétricas, iguais a ilustrada na Figura 37, atuando como sensores.

Figura 37 - Cápsula piezelétrica de baixo custo.



Fonte: Castro (2016).

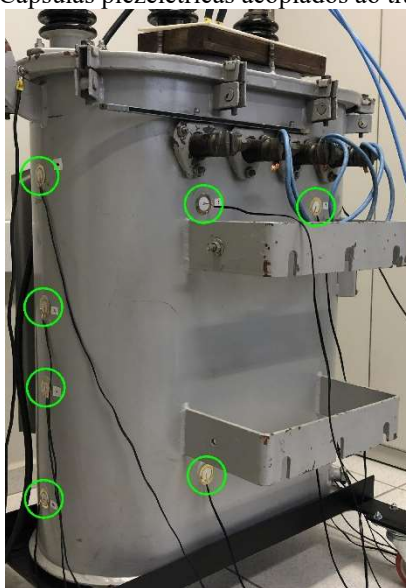
As especificações técnicas da cápsula PZT utilizado neste ensaio são mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 - Especificação da cápsula PZT.

Fabricante	Murata
Modelo	7BB-35-3
Cerâmica PZT	Titanato Zirconato de Chumbo ($\text{Pb}[\text{Zr}_x \text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$)
Frequência de ressonância	$2,8 \pm 0,5 \text{ kHz}$
Impedância de ressonância	$200 \text{ (máx)} \Omega$
Capacitância [1kHz]	$30,0 \pm 30\% \text{ nF}$
Diâmetro	35mm
Material da placa	Latão

Um total de 16 cápsulas piezelétricas foram acopladas à parede externa do transformador, como mostra a Figura 38. O número de sensores foi escolhido empiricamente, a fim de fornecer um número significativo de massa de dados para alimentar os sistemas inteligentes. As coordenadas de cada sensor foram medidas utilizando a mesma referência adotada para as coordenadas dos eletrodos, mostrada na Figura 34, e são apresentadas na Tabela 5.

Figura 38 - Cápsulas piezelétricas acoplados ao transformador.



Fonte: Compilação da autora.

Tabela 5 - Coordenadas dos sensores PZT

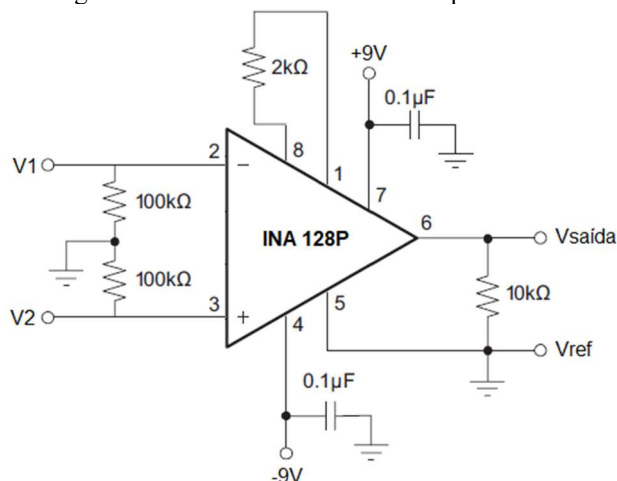
Sensor PZT	x [m]	y [m]	z [m]
1	0,000	0,205	0,575
2	0,150	0,670	0,100
3	0,305	0,165	0,500
4	0,150	0,000	0,455
5	0,000	0,180	0,125
6	0,150	0,670	0,625
7	0,305	0,190	0,240
8	0,150	0,000	0,290
9	0,000	0,475	0,130
10	0,150	0,670	0,460
11	0,305	0,445	0,140
12	0,150	0,000	0,605
13	0,000	0,475	0,570
14	0,150	0,670	0,300
15	0,305	0,480	0,500
16	0,150	0,000	0,090

Para cada descarga induzida em um eletrodo, 16 sinais acústicos foram obtidos.

3.4. Amplificação e Aquisição dos Sinais Acústicos

Os sinais oriundos das cápsulas piezelétricas foram amplificados com um ganho de 28 dB, utilizando um amplificador de instrumentação da Texas, modelo INA 128P. A Figura 39 apresenta o circuito eletrônico do amplificador.

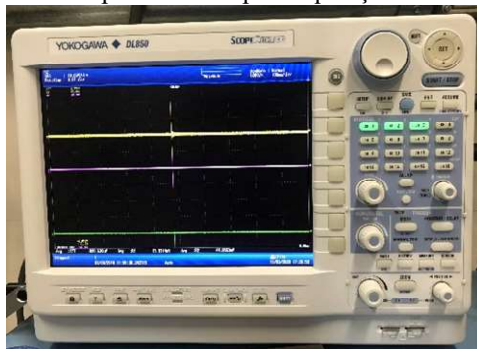
Figura 39 - Circuito eletrônico do amplificador.



Fonte: Compilação da autora.

Em cada eletrodo foi gerada uma descarga e, para cada descarga, foram obtidos 16 sinais, que foram armazenados em um oscilógrafo a uma taxa de aquisição de 5 milhões de amostras por segundo. O oscilógrafo utilizado é da marca Yokogawa, modelo DL-850, como mostrado na Figura 40. Por possuir resposta em frequência até 400kHz, o circuito amplificador garante que não ocorra o fenômeno de *aliasing*, visto que os sinais são captados em 5MHz. Em seguida, um filtro digital passa-faixa de 20kHz a 400kHz foi implementado, através do Matlab, a fim de assegurar a faixa de frequências desejadas e eliminar as interferências abaixo de 20kHz.

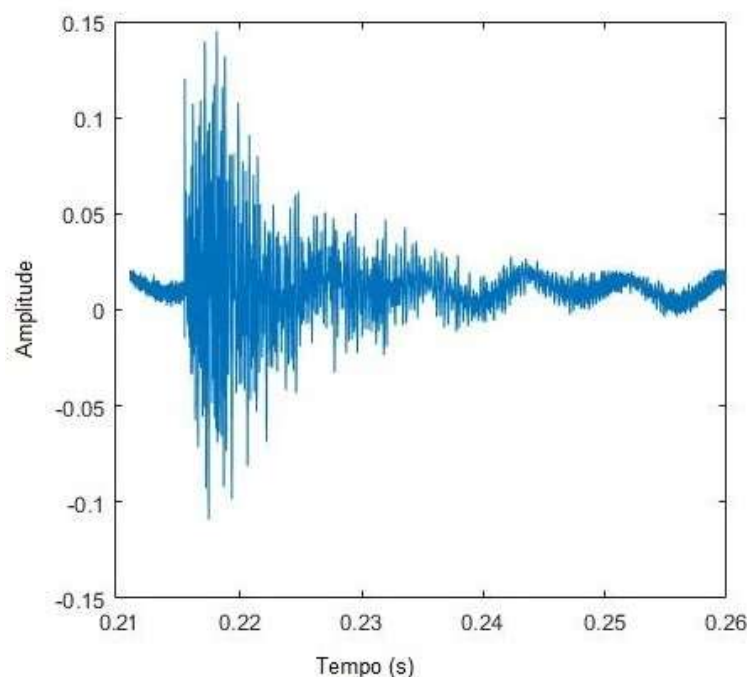
Figura 40 - Osciloscópio utilizado para aquisição dos sinais acústicos.



Fonte: Compilação da autora.

A Figura 41 mostra uma das formas de onda adquiridas durante o ensaio.

Figura 41 - Forma da onda acústica adquirida.



Fonte: Compilação da autora.

3.5. Decomposição em Coeficientes *Wavelets*

Como foi visto na Seção 2.7, a primeira frente de onda detectada pelos sensores nem sempre é aquela que percorreu o caminho direto entre o ponto de ocorrência da descarga e o sensor. Para aprimorar os resultados obtidos com os sinais completos, utilizou-se a transformada *wavelet* discreta, com o objetivo de identificar o nível *wavelet* que melhor caracterizasse o caminho direto, apresentando o menor erro de localização. Assim, todos os sinais acústicos obtidos foram decompostos em 10 níveis de detalhe *wavelet*. Após a extração das métricas, os dados obtidos foram aplicados no treinamento do sistema ANFIS e foi selecionado o nível que apresentou os menores erros.

3.6. Extração de Métricas

Para demonstrar a melhora nos resultados obtidos através da utilização da transformada *wavelet* discreta, foram utilizados dois métodos distintos para a extração das métricas, como ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Diagrama esquemático para extração das métricas.



Fonte: Compilação da autora.

Primeiramente, foi extraído o tempo de mínimo segundo o Critério de Informação de Akaike das ondas completas, sem a decomposição em níveis *wavelets*, e utilizado como parâmetro de entrada para o treinamento do sistema ANFIS.

Em seguida, com o objetivo de identificar os coeficientes ligados à frente de onda de caminho direto, os sinais captados pelas cápsulas PZT foram decompostos em 10 níveis de detalhe da TWD. O tempo de mínimo, segundo o Critério de Informação de Akaike, foi extraído dos níveis de detalhe da TWD e utilizados como parâmetros de entrada para o treinamento do sistema ANFIS.

3.7. Treinamento do Sistema de Inferência Neuro-Difuso Adaptativo (ANFIS)

Aleatoriamente, foram selecionadas as métricas extraídas dos sinais gerados pelas descargas elétricas de 12 eletrodos para o treinamento do sistema ANFIS. Os dados dos 2 eletrodos restante foram omitidos e utilizados posteriormente para o teste e validação do treinamento.

De modo a apresentar as vantagens de utilização da transformada *wavelet* discreta, primeiramente, foi realizado o treinamento de uma rede ANFIS a partir da extração do tempo de mínimo segundo o critério de Akaike da onda completa, sem a decomposição do sinal. Em seguida, uma nova rede ANFIS foi treinada com os parâmetros extraídos a partir das ondas *wavelets* de decomposição.

Nos treinamentos também foram executadas diferentes topologias, variando-se arbitrariamente o número de funções de pertinência de 10 a 300 até obter aquela que apresentasse os melhores resultados. A topologia utilizada foi com 250 funções de pertinência.

No treinamento foi utilizado o método Takagi-Sugeno, com função de pertinência gaussiana. O método de treinamento foi o *backpropagation* supervisionado e o critério de parada foi o número de 300 épocas. A Tabela 6 apresenta a configuração do sistema ANFIS.

Tabela 6 - Configuração do sistema ANFIS.

Descrição	Configuração
Tipo de sistema <i>fuzzy</i>	Takagi-Sugeno
Número de entradas	1
Número de saídas	1 (coordenada do eixo escolhido)
Função de pertinência	Gausiana
Número de funções de pertinência	250
Tipo de saída	Linear

Para a configuração com o melhor treinamento, foram apresentados os gráficos de correlação entre os valores reais da posição dos eletrodos e os valores estimados pela rede com as entradas de seu próprio treinamento para comprovar o treinamento correto do sistema ANFIS e calculado o erro quadrático médio.

Os resultados obtidos, com o sinal completo e com a utilização a transformada *wavelet* discreta, foram comparados e apresentados na próxima seção.

4. ANÁLISE E RESULTADOS

Os parâmetros dos eletrodos 2 e 6 foram omitidos nos treinamentos do sistema ANFIS e posteriormente foram utilizados para teste e validação da metodologia.

Desta forma, as análises e resultados que serão aqui apresentados foram baseados no tempo de mínimo, segundo o critério estatístico de Akaike, tanto para o sinal completo, quanto para os níveis de detalhe da transformada *wavelet*, para o treinamento dos sistemas ANFIS na topologia com 250 funções de pertinência.

Primeiramente, o estudo foi realizado extraíndo-se o tempo de mínimo segundo o critério de Akaike dos sinais completos dos eletrodos 2 e 6, obtidos pelas cápsulas piezelétricas PZT, sem a decomposição dos sinais. Foram realizados cinco testes para cada coordenada de cada eletrodo, utilizando os parâmetros extraídos como variáveis de entrada da rede ANFIS treinada e os resultados são apresentados a seguir.

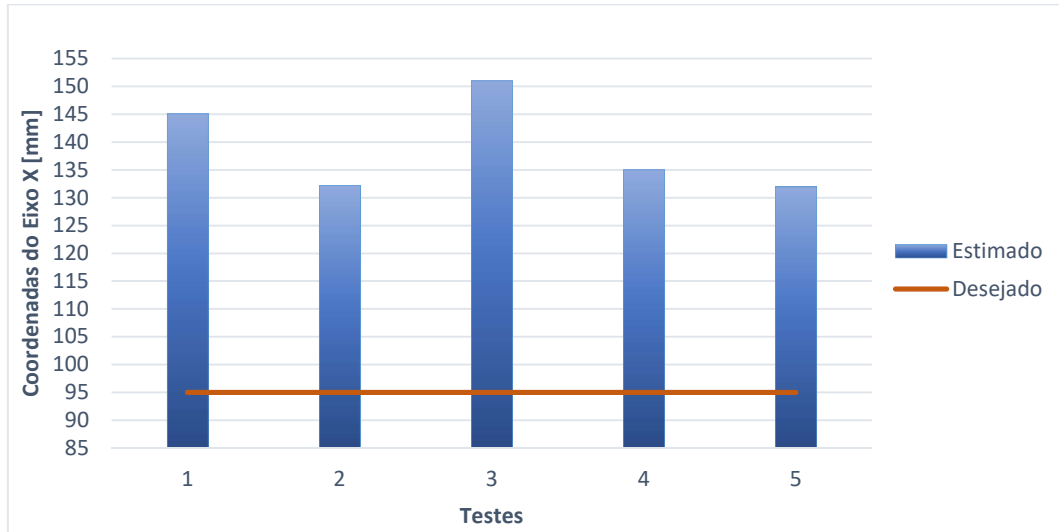
As Tabelas 7, 8 e 9 apresentam as coordenadas x, y e z, respectivamente, da descarga parcial originada no eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS a partir dos sinais completos. Também apresentam as coordenadas reais e fornecem os respectivos erros absolutos.

Tabela 7 – Coordenadas x, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 2.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	145,1	95,0	50,1
2	132,2	95,0	37,2
3	151,0	95,0	56,0
4	135,0	95,0	40,0
5	132,0	95,0	37,0

Os gráficos das Figuras 43, 44 e 45 ilustram as diferenças entre os valores desejados e os encontrados pelo sistema para as coordenadas x, y e z, respectivamente.

Figura 43 - Diferença entre as coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2.

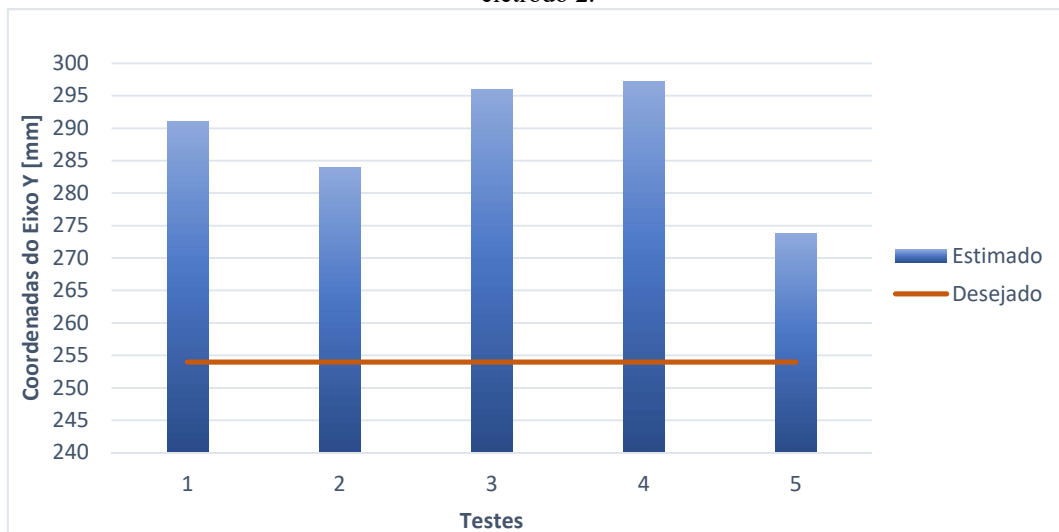


Fonte: Compilação da autora.

Tabela 8 – Coordenadas y, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 2.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	291,1	254,0	37,1
2	284,0	254,0	30,0
3	296,0	254,0	42,0
4	297,2	254,0	43,2
5	273,9	254,0	19,9

Figura 44 - Diferença entre as coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2.

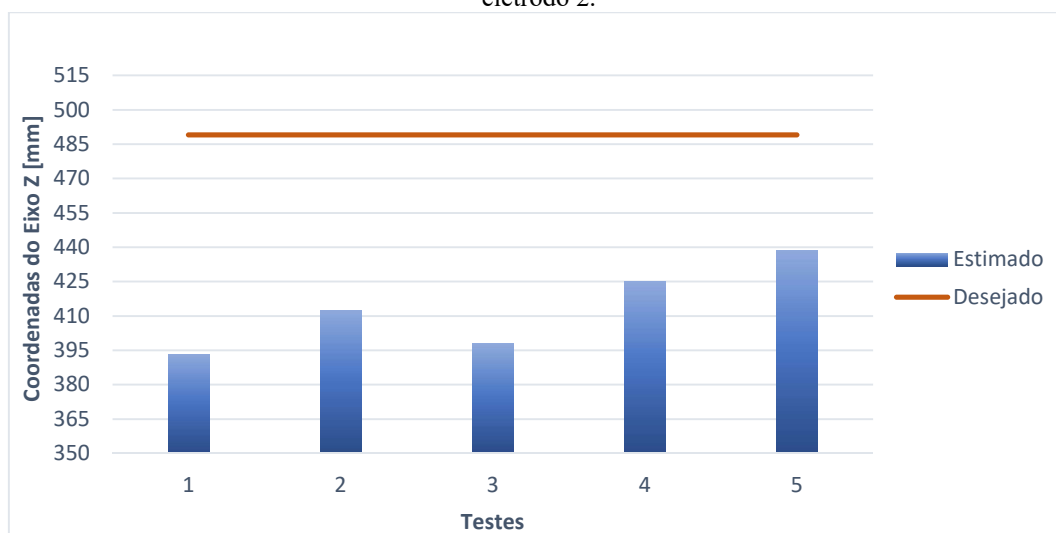


Fonte: Compilação da autora.

Tabela 9 – Coordenadas z, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 2.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	393,2	489,0	95,8
2	412,7	489,0	76,3
3	297,8	489,0	191,2
4	424,9	489,0	64,1
5	438,8	489,0	50,2

Figura 45 - Diferença entre as coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2.

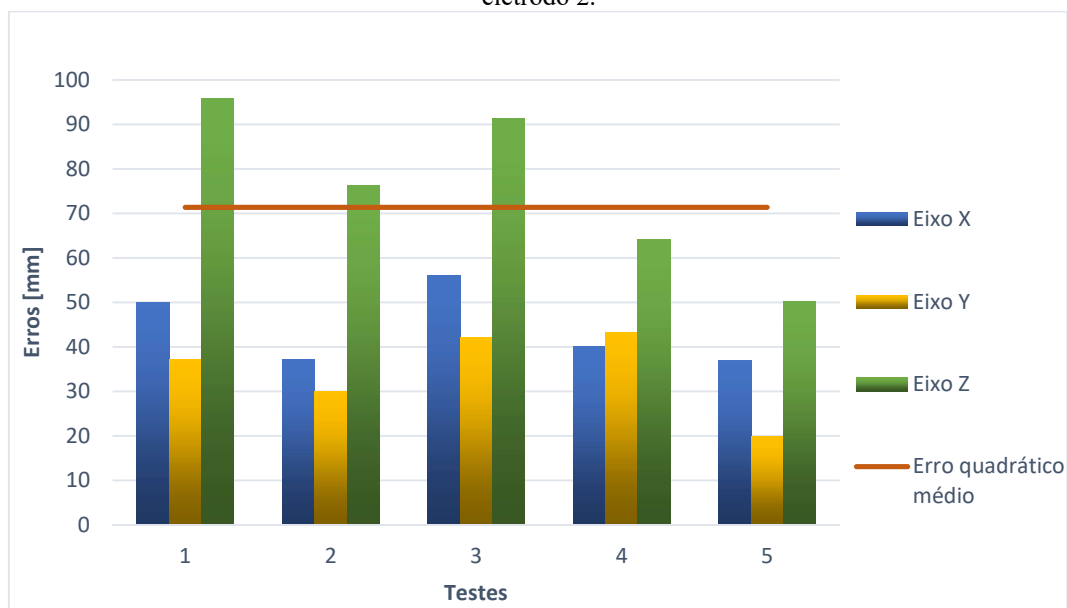


Fonte: Compilação da autora.

O erro quadrático médio calculado para o ensaio do eletrodo 2 nesta metodologia foi de 71,3mm.

A Figura 46 mostra o gráfico dos erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 2.

Figura 46 - Erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 2.

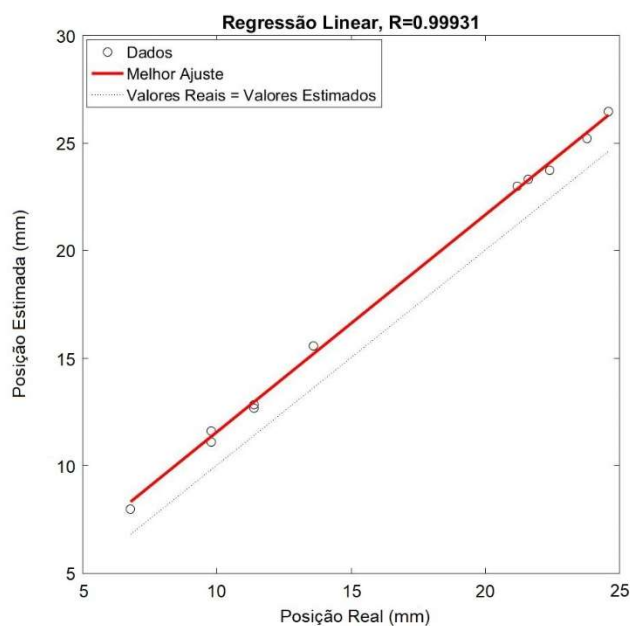


Fonte: Compilação da autora.

Como pode-se observar na Figura 46, as coordenadas retornadas para o eixo z foram as que apresentaram maiores erros de localização e que mais contribuíram para elevar o valor do erro quadrático médio, visto que os erros de localização em todos os testes para este eixo foram maiores que 50mm.

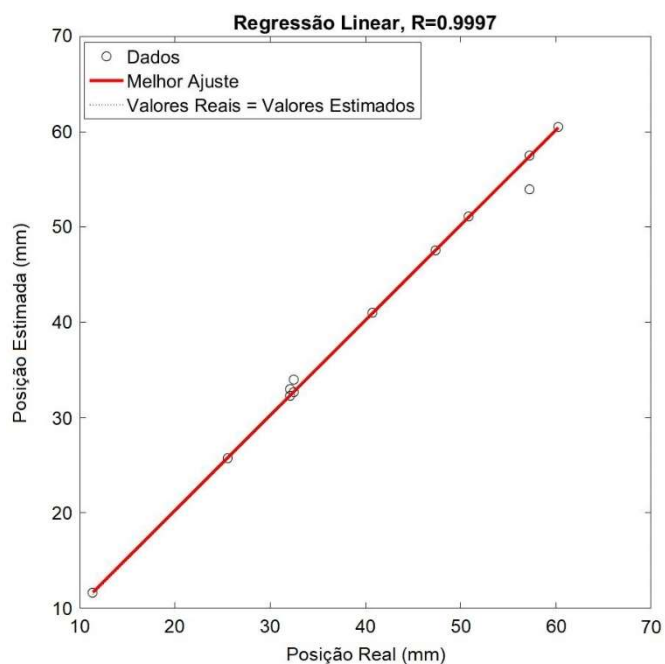
As Figuras 47, 48 e 49 mostram os gráficos de correlação para esta configuração.

Figura 47 - Correlação entre os valores estimados e os desejados para o eixo x do eletrodo 2.



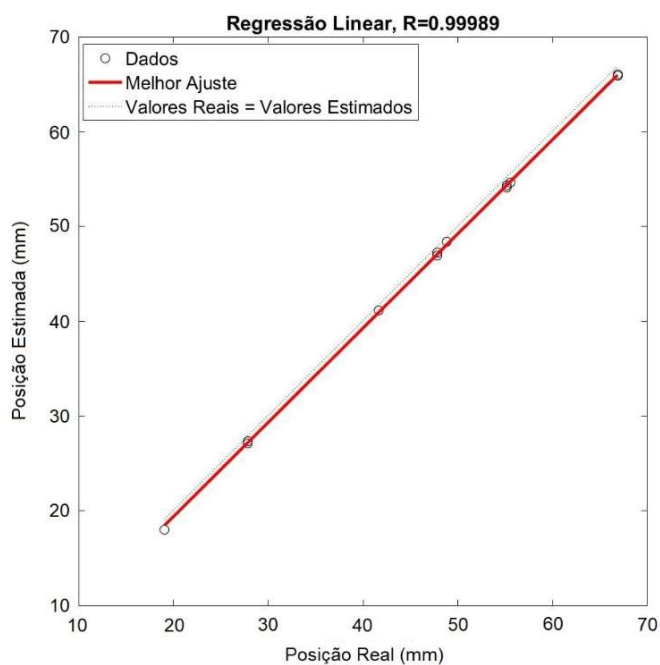
Fonte: Compilação da autora.

Figura 48 - Correlação entre os valores estimados e os desejados para o eixo y do eletrodo 2.



Fonte: Compilação da autora.

Figura 49 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 2.



Fonte: Compilação da autora.

Observando-se as Figuras 47, 48 e 49, verifica-se um grau de similaridade elevado, com o coeficiente de correlação R maior que 0,99, conforme previsto nas Tabelas 7, 8 e 9. Isso

demonstra que o treinamento utilizado está apto para ser utilizado na localização das descargas parciais.

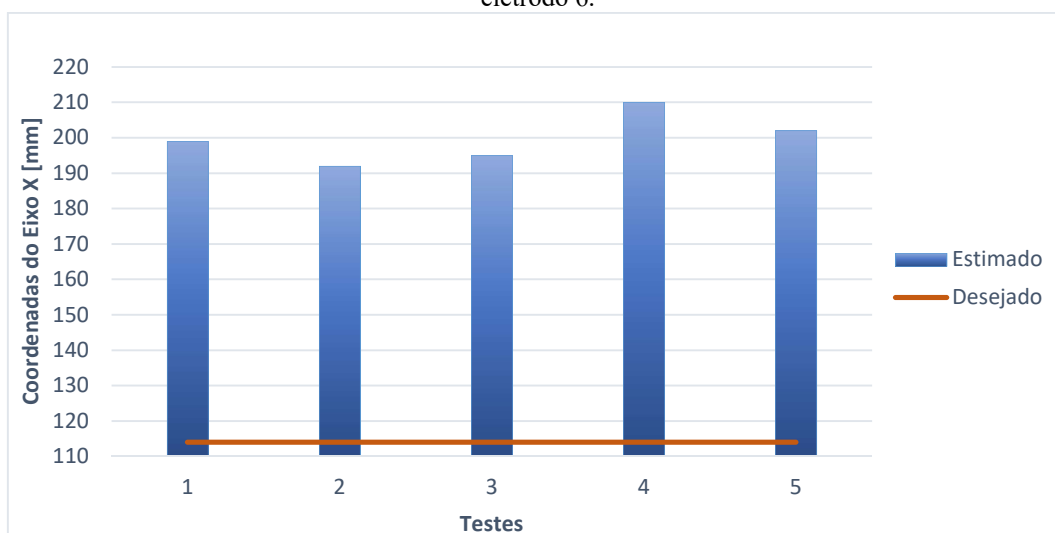
As coordenadas estimadas x, y e z da descarga parcial originada no eletrodo 6 são apresentadas nas Tabelas 10, 11 e 12, utilizando o sinal completo, juntamente com as coordenadas desejadas e os respectivos erros absolutos.

Os gráficos das Figuras 50, 51 e 52 ilustram as diferenças entre os valores desejados e os encontrados pelo sistema para as coordenadas x, y e z, respectivamente, para este caso.

Tabela 10 – Coordenadas x, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 6.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	199,0	114,0	85,0
2	192,0	114,0	78,0
3	195,0	114,0	81,0
4	210,0	114,0	96,0
5	202,0	114,0	88,0

Figura 50 - Diferença entre as coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6.

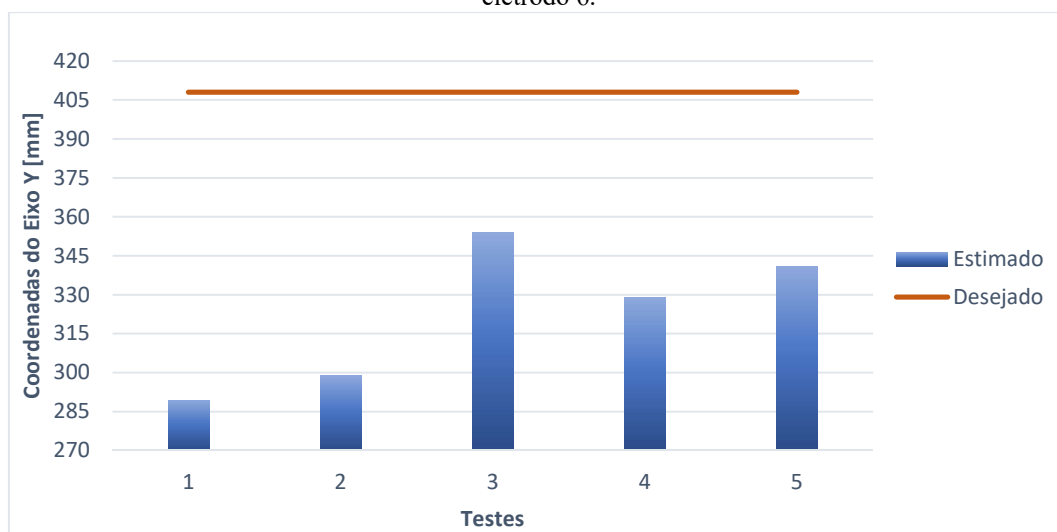


Fonte: Compilação da autora.

Tabela 11 – Coordenadas y, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 6.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	289,5	408,0	118,5
2	298,9	408,0	109,1
3	354,0	408,0	54,0
4	329,0	408,0	79,0
5	341,0	408,0	67,0

Figura 51 - Diferença entre as coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6.

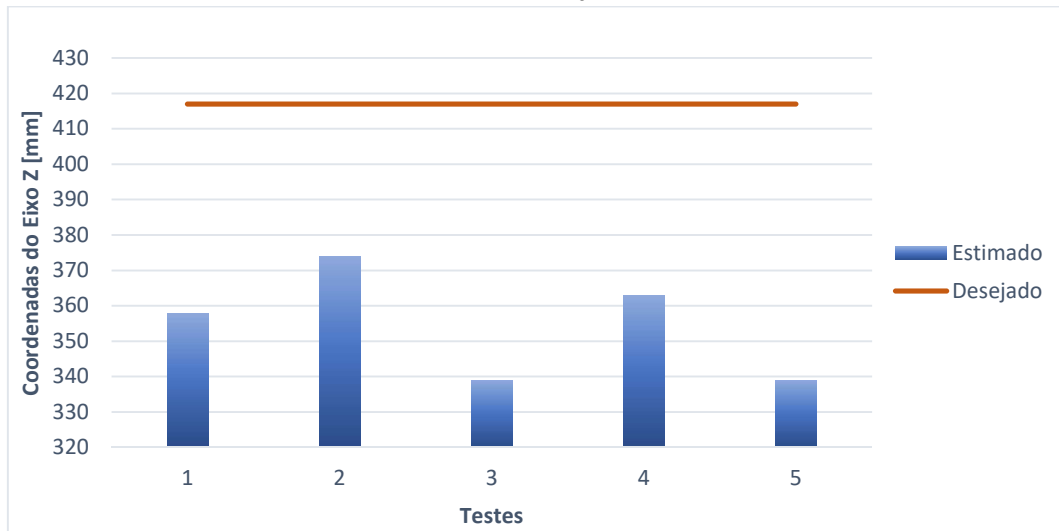


Fonte: Compilação da autora.

Tabela 12 – Coordenadas z, estimadas pelo sistema ANFIS e reais da DP, originada no eletrodo 6.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	358,0	417,0	59,0
2	374,0	417,0	43,0
3	339,0	417,0	78,0
4	363,0	417,0	54,0
5	339,0	417,0	78,0

Figura 52 - Diferença entre as coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6.

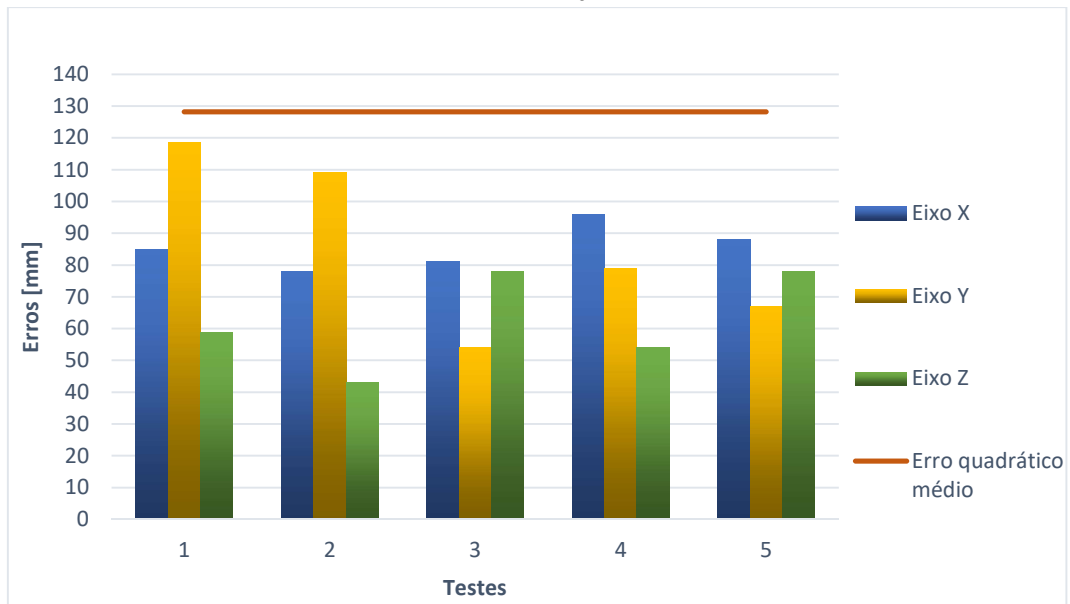


Fonte: Compilação da autora.

O erro médio calculado para o ensaio do eletrodo 6 com o sinal completo foi de 128,2mm.

A Figura 53 mostra o gráfico dos erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 6.

Figura 53 - Erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 6.

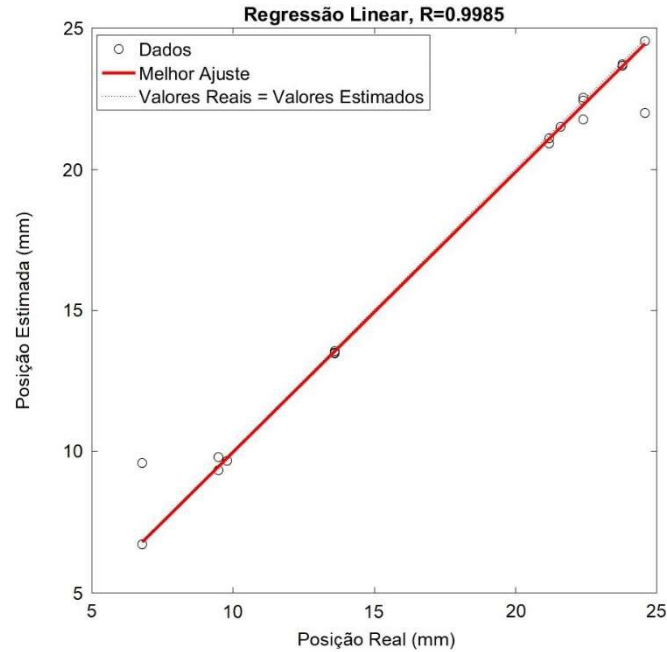


Fonte: Compilação da autora.

Na análise da Figura 53, verifica-se que todos os eixos apresentaram uma parcela de contribuição relevante para o erro quadrático médio elevado, visto que os erros de localização para este treinamento variam de 43,0 a 118,5mm.

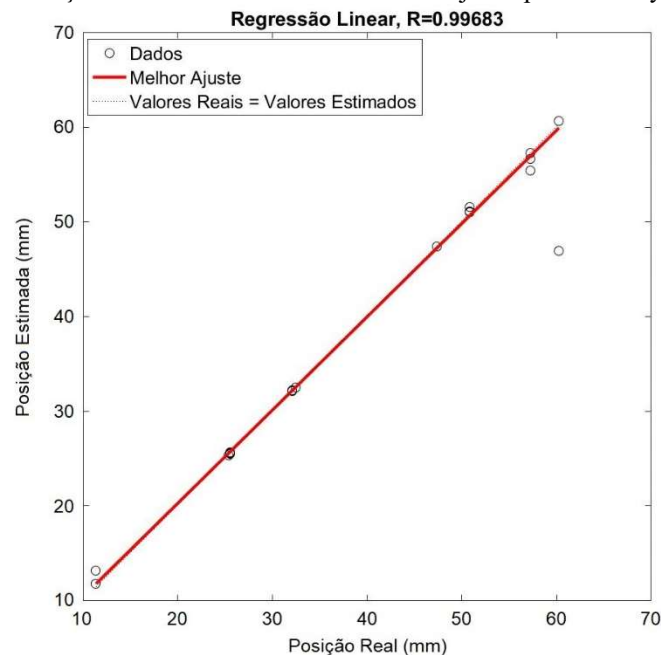
As Figuras 54, 55 e 56 mostram os gráficos de correlação entre as coordenadas reais do eletrodo 6 e os valores estimados pela rede para esta configuração.

Figura 54 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo x do eletrodo 6.



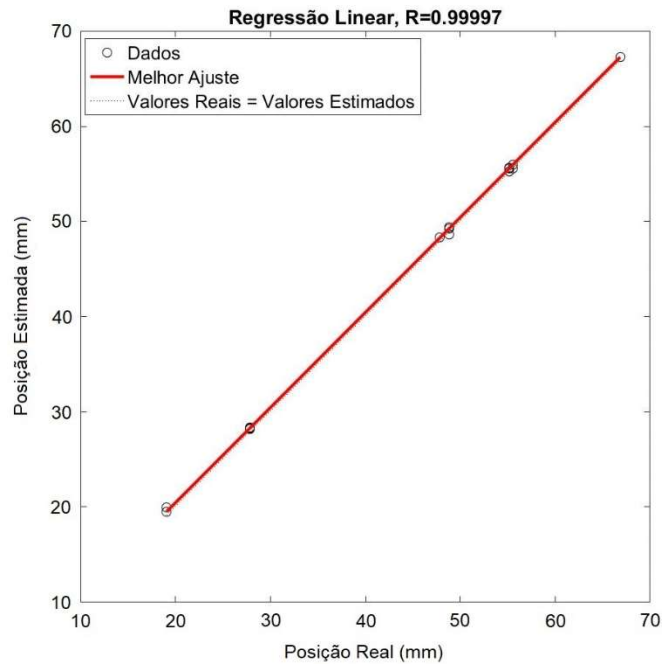
Fonte: Compilação da autora.

Figura 55 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo y do eletrodo 6.



Fonte: Compilação da autora.

Figura 56 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 6.



Fonte: Compilação da autora.

Observando-se as Figuras 54, 55 e 56, verifica-se um grau de similaridade elevado, com o coeficiente de correlação R maior que 0,99, conforme previsto nas Tabelas 10, 11 e 12. Isso demonstra que o treinamento utilizado está apto para ser utilizado na localização das descargas parciais.

Analisando os dados obtidos a partir do sinal completo para os eletrodos 2 e 6, pode-se verificar que os resultados apresentaram erros de localização bastante elevados, grande parte maiores que 50mm.

Com o objetivo de melhorar os resultados obtidos, introduziu-se a transformada *wavelet* discreta (TWD). Desta forma, os sinais oriundos das cápsulas piezelétricas foram decompostos em 10 níveis de detalhes da TWD, com o intuito de identificar o nível que apresente os menores erros de localização. Em seguida, foram extraídos os tempos de mínimo, segundo o critério de Akaike, dos sinais em cada nível e utilizados para o treinamento de um sistema ANFIS. A Tabela 13 mostra os erros quadráticos médios resultantes em cada nível de detalhe.

Tabela 13 - Erros médios para cada nível de detalhe *wavelet* do ensaio do eletrodo 2.

Nível de Detalhe	Erro Quadrático
	Médio [mm]
1	50,3
2	64,5
3	38,8
4	58,1
5	51,2
6	84,3
7	9,5
8	86,7
9	81,7
10	56,8

Como pode ser notado na Tabela 13, o nível que apresentou o menor erro quadrático médio foi o nível 7. Desta forma, os resultados obtidos para este nível serão apresentados a seguir.

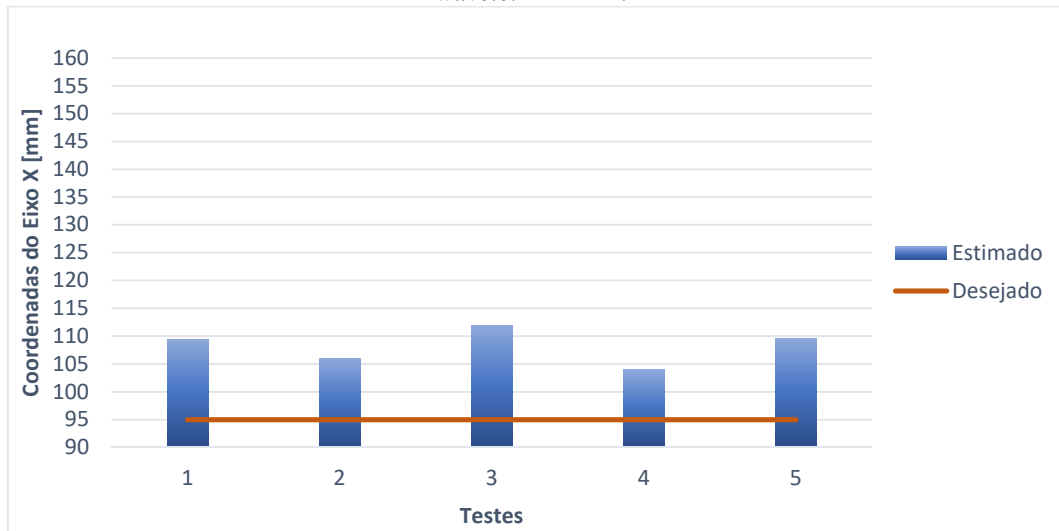
As Tabelas 14, 15 e 16 apresentam os resultados obtidos da descarga parcial originada no eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS, utilizando o nível de detalhe 7 da TWD.

Os gráficos das Figuras 57, 58 e 59 ilustram as diferenças entre os valores desejados e os fornecidos pelo sistema para as coordenadas x, y e z, respectivamente.

Tabela 14 – Coordenadas x do eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	109,5	95,0	14,5
2	106,0	95,0	11,0
3	112,0	95,0	17,0
4	104,0	95,0	9,0
5	109,7	95,0	14,7

Figura 57 - Coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2, utilizando a *wavelet* do nível 7.

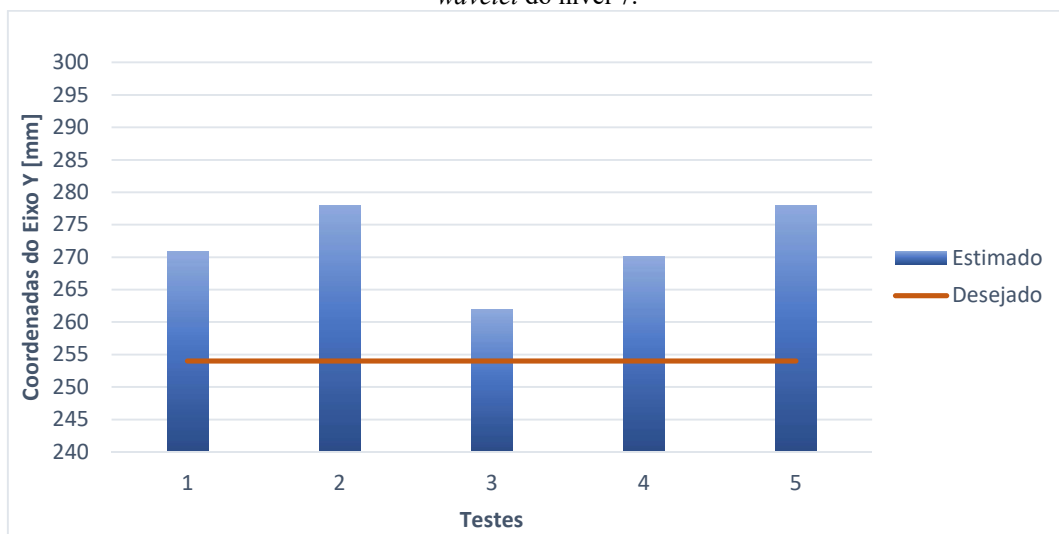


Fonte: Compilação da autora.

Tabela 15 – Coordenadas y do eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	270,9	254,0	16,9
2	278,0	254,0	24,0
3	262,0	254,0	8,0
4	270,1	254,0	16,1
5	278,0	254,0	24,0

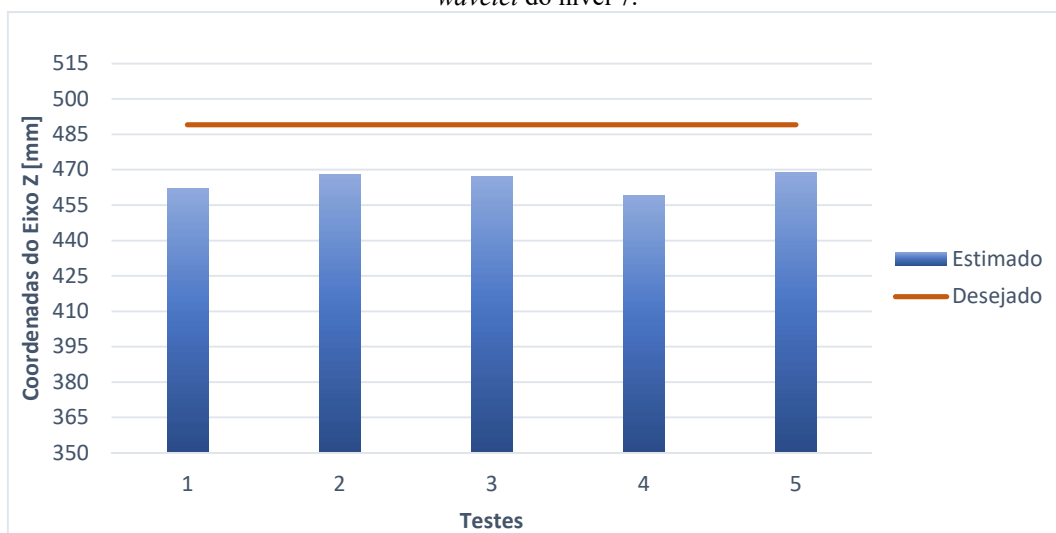
Figura 58 - Coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2, utilizando a *wavelet* do nível 7.



Fonte: Compilação da autora.

Tabela 16 – Coordenadas z do eletrodo 2, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.

Teste	Estimada [mm]	Real [mm]	Erro [mm]
1	462,0	489,0	27,0
2	468,0	489,0	21,0
3	467,0	489,0	22,0
4	459,0	489,0	30,0
5	469,0	489,0	20,0

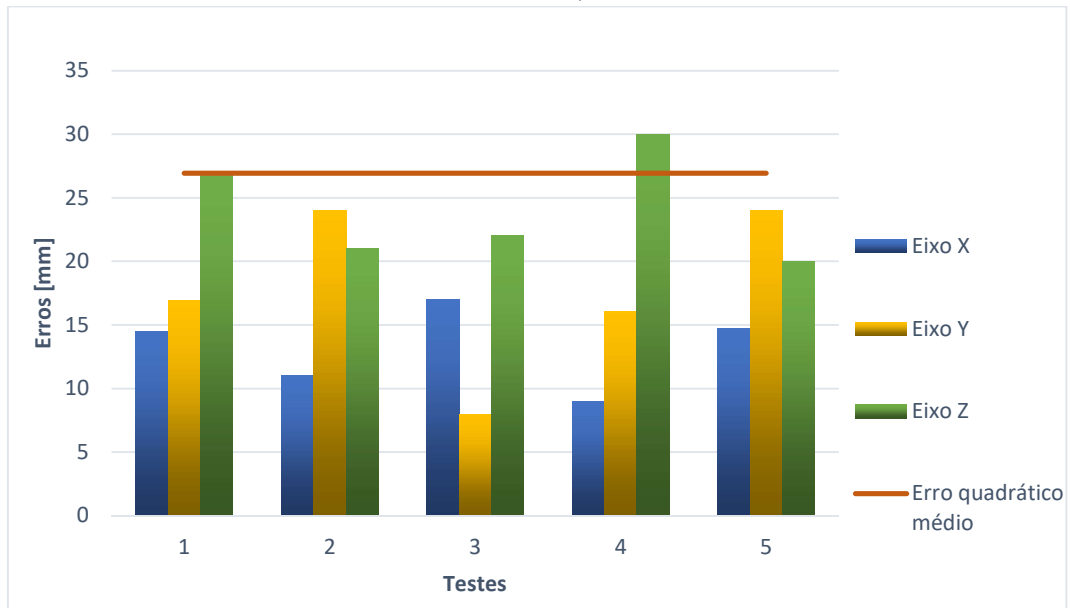
Figura 59 - Coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 2, utilizando a *wavelet* do nível 7.

Fonte: Compilação da autora.

O erro quadrático médio calculado para o ensaio do eletrodo 2 com o nível de detalhe 7 da TWD foi de 26,93mm.

A Figura 60 mostra o gráfico dos erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 2, com a introdução da TWD para a extração do tempo de chegada.

Figura 60 - Erros de localização dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 2, utilizando o nível 7 da TWD.

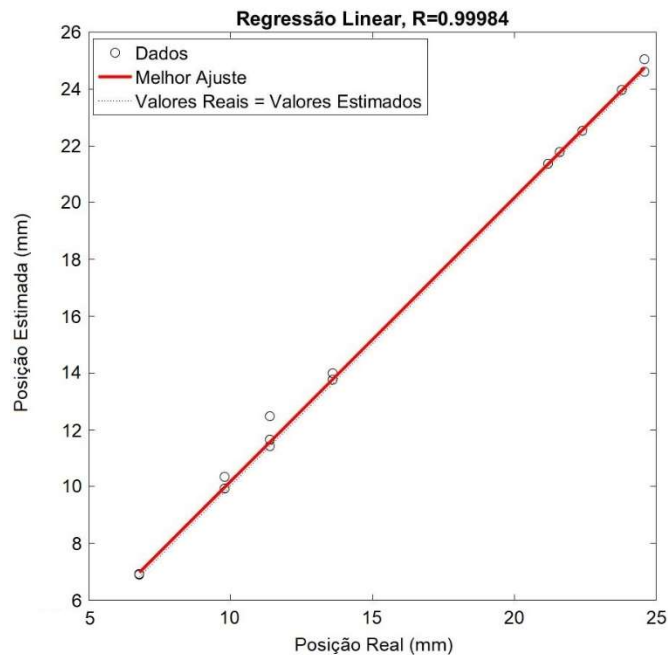


Fonte: Compilação da autora.

Pela análise dos erros apresentados para o eletrodo 2 nesta configuração verifica-se resultados bastante satisfatórios, visto que se mantiveram abaixo de 30mm, como pode ser visto na Figura 60.

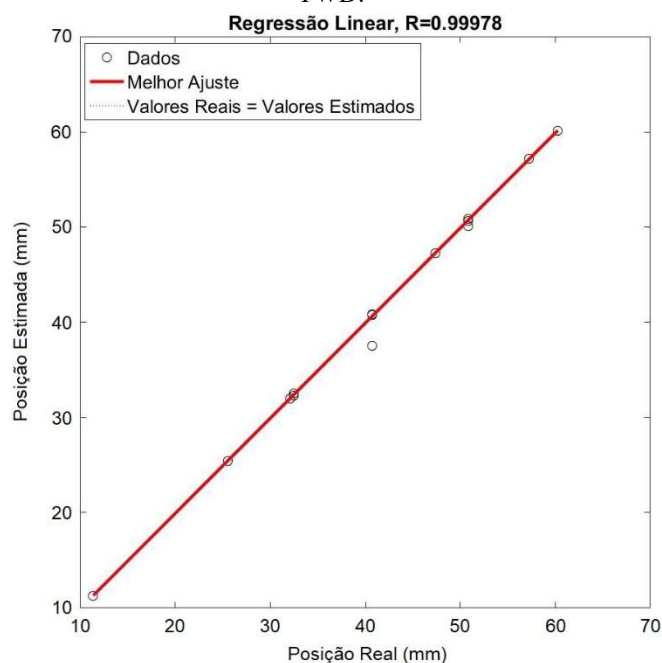
As Figuras 61, 62 e 63 mostram os gráficos de correlação para esta configuração.

Figura 61 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo x do eletrodo 2, com o nível 7 da TWD.



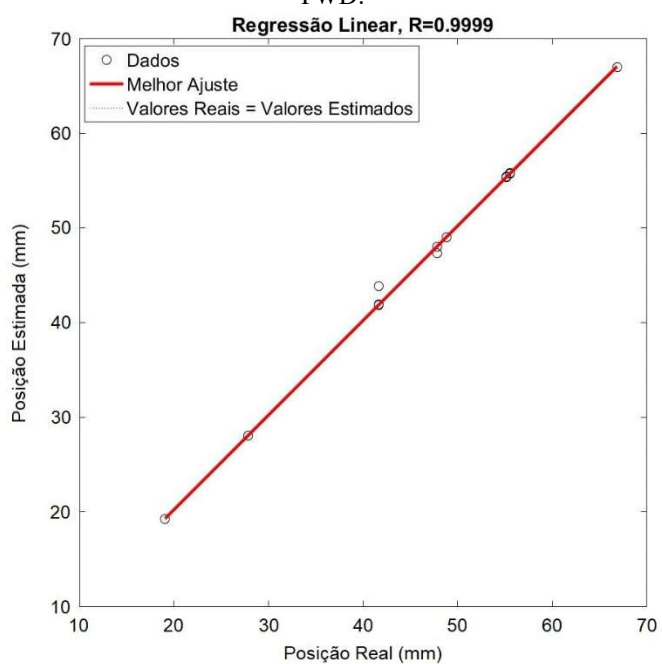
Fonte: Compilação da autora.

Figura 62 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo y do eletrodo 2, com o nível 7 da TWD.



Fonte: Compilação da autora.

Figura 63 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 2, com o nível 7 da TWD.



Fonte: Compilação da autora.

Observando-se as Figuras 61, 62 e 63, verifica-se um grau de similaridade elevado, com o coeficiente de correlação R maior que 0,99, conforme previsto nas Tabelas 14, 15 e 16. Isso

demonstra que este treinamento utilizado está apto para ser utilizado na localização das descargas parciais.

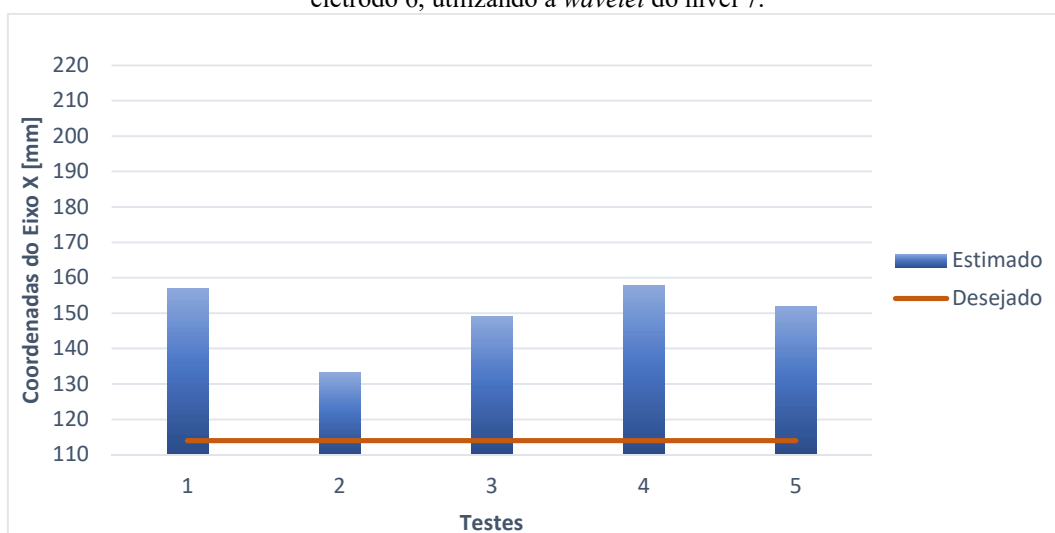
As Tabelas 17, 18 e 19 apresentam os resultados obtidos da descarga parcial originada no eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS utilizando o nível 7 da transformada *wavelet* discreta.

Os gráficos das Figuras 64, 65 e 66 ilustram as diferenças entre os valores desejados e fornecidos pelo sistema para as coordenadas x, y e z, respectivamente.

Tabela 17 – Coordenadas x do eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.

Teste	Estimada [m]	Real [m]	Erro [m]
1	157,0	114,0	43,0
2	133,2	114,0	19,2
3	149,2	114,0	35,2
4	158,0	114,0	44,0
5	152,0	114,0	38,0

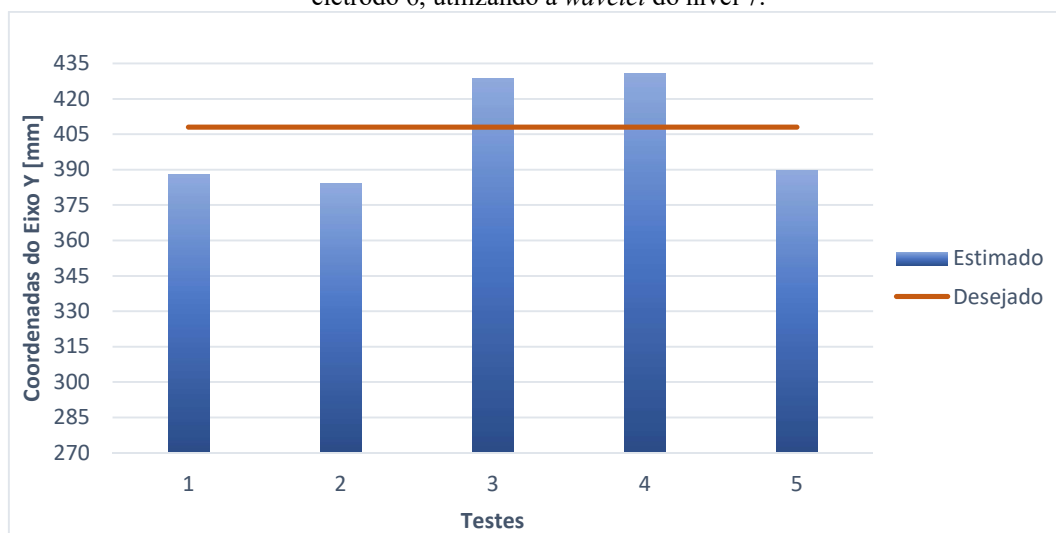
Figura 64 - Diferença entre as coordenadas do eixo x desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6, utilizando a *wavelet* do nível 7.



Fonte: Compilação da autora.

Tabela 18 – Coordenadas y do eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.

Teste	Estimada [m]	Real [m]	Erro [m]
1	388,0	408,0	20,0
2	384,0	408,0	24,0
3	428,7	408,0	20,7
4	431,0	408,0	23,0
5	389,6	408,0	18,4

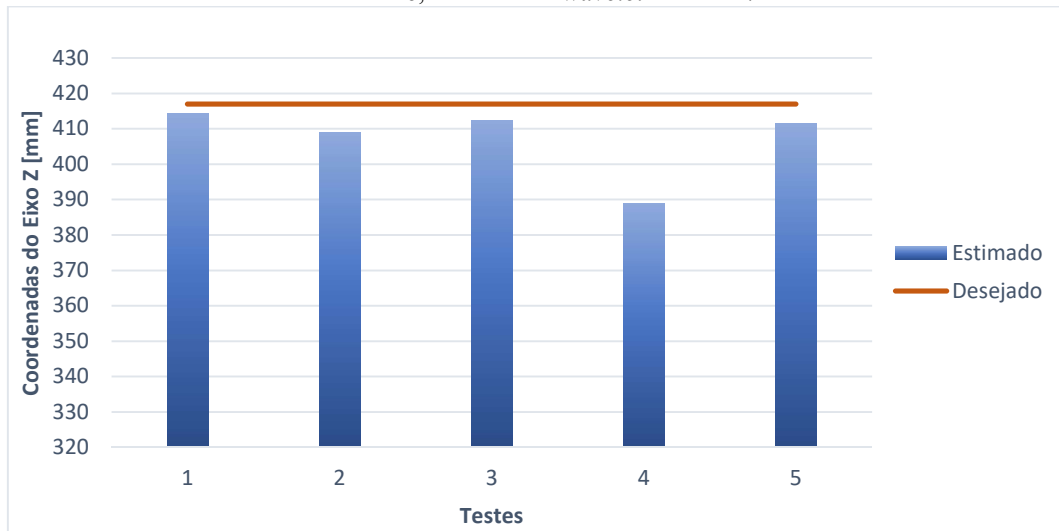
Figura 65 - Diferença entre as coordenadas do eixo y desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6, utilizando a *wavelet* do nível 7.

Fonte: Compilação da autora.

Tabela 19 – Coordenadas z do eletrodo 6, estimadas pelo sistema ANFIS com o nível 7 da TWD.

Teste	Estimada [m]	Real [m]	Erro [m]
1	414,2	417,0	2,8
2	409,0	417,0	8,0
3	412,4	417,0	4,6
4	389,0	417,0	28,0
5	411,5	417,0	5,5

Figura 66 - Diferença entre as coordenadas do eixo z desejadas e as estimadas pelo sistema ANFIS para o eletrodo 6, utilizando a *wavelet* do nível 7.

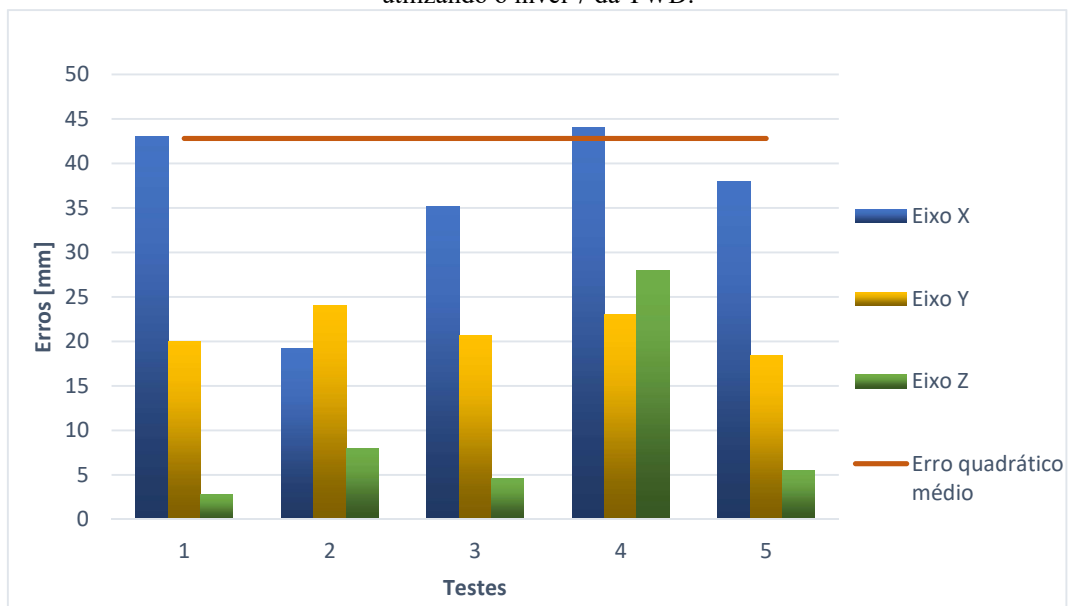


Fonte: Compilação da autora.

O erro médio calculado para o ensaio do eletrodo 6 com o nível de detalhe 7 foi de 42,80mm.

A Figura 67 mostra o gráfico dos erros de localização das coordenadas dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 6, com a introdução da transformada wavelet discreta para a extração do tempo de chegada.

Figura 67 - Erros de localização dos eixos x, y e z em relação ao erro quadrático médio para o eletrodo 6, utilizando o nível 7 da TWD.

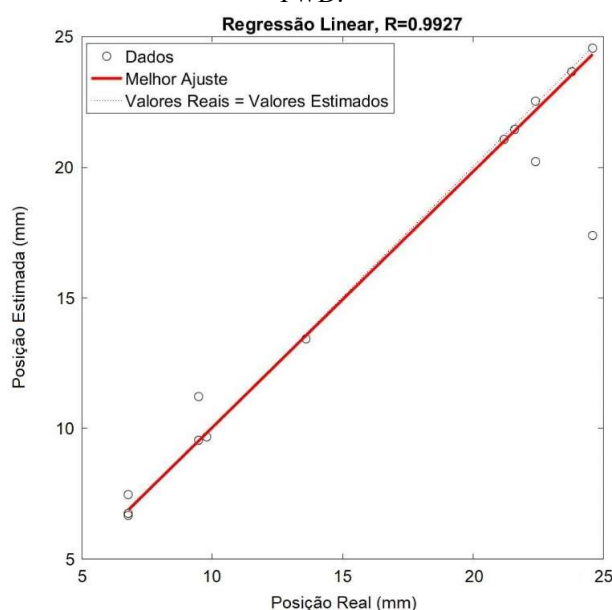


Fonte: Compilação da autora.

Nota-se na Figura 67 que o eixo x é o que apresentou os maiores erros absolutos, acima de 19mm. Os erros de localização obtidos para eixo y se mantiveram em torno de 20mm e, no eixo z, foram menores que 10mm, exceto no teste 4 que apresentou um erro de 28mm. Estes resultados, quando comparados aos resultados obtidos sem a decomposição da onda pela TWD, verifica-se uma melhora bastante significativa e podem ser considerados satisfatórios.

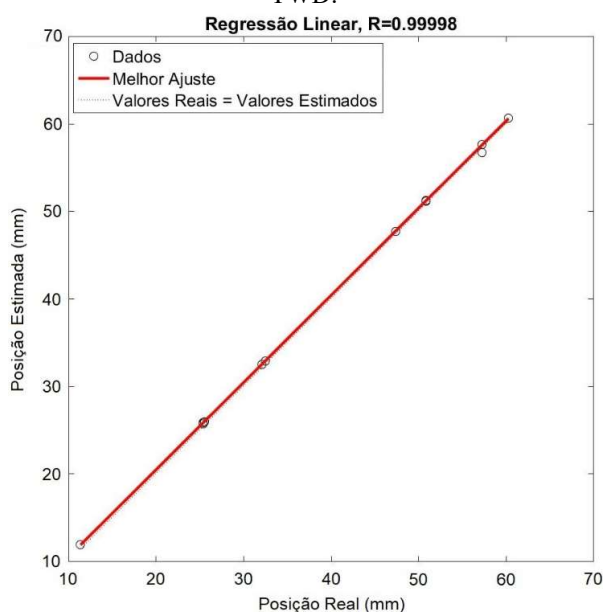
As Figuras 68, 69 e 70 mostram os gráficos de correlação para esta configuração.

Figura 68 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo x do eletrodo 6, com o nível 7 da TWD.



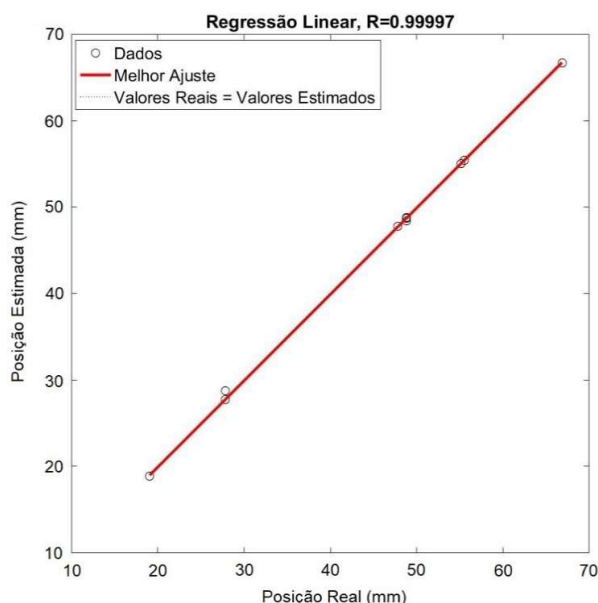
Fonte: Compilação da autora.

Figura 69 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo y do eletrodo 6, com o nível 7 da TWD.



Fonte: Compilação da autora.

Figura 70 - Correlação entre os valores estimados e desejados para o eixo z do eletrodo 6, com o nível 7 da TWD.



Fonte: Compilação da autora.

Observando-se as Figuras 68, 69 e 70 verifica-se um grau de similaridade elevado, com o coeficiente de correlação R maior que 0,99, conforme previsto nas Tabelas 17, 18 e 19. Isso demonstra que este treinamento utilizado está apto para ser utilizado na localização das descargas parciais.

Analisando os dados de uma forma geral, nota-se que, com a introdução da transformada *wavelet* discreta, os erros de localização das descargas parciais apresentaram uma melhora significativa e se mantiveram abaixo de 50mm.

As Tabelas 20 e 21 trazem a comparação dos erros médios de localização obtidos para o sinal completo e com a utilização do nível de detalhe 7 da transformada *wavelet* discreta para os ensaios realizados para o eletrodo 2 e para o eletrodo 6, respectivamente.

Tabela 20 – Comparação dos erros médios de localização do eletrodo 2, utilizando duas metodologias diferentes.

Eixo	Sinal Completo	Nível de Detalhe 7
	[mm]	[mm]
X	44,06	13,24
Y	34,44	17,80
Z	75,52	24,00

Tabela 21 – Comparação dos erros médios de localização do eletrodo 6, utilizando duas metodologias diferentes.

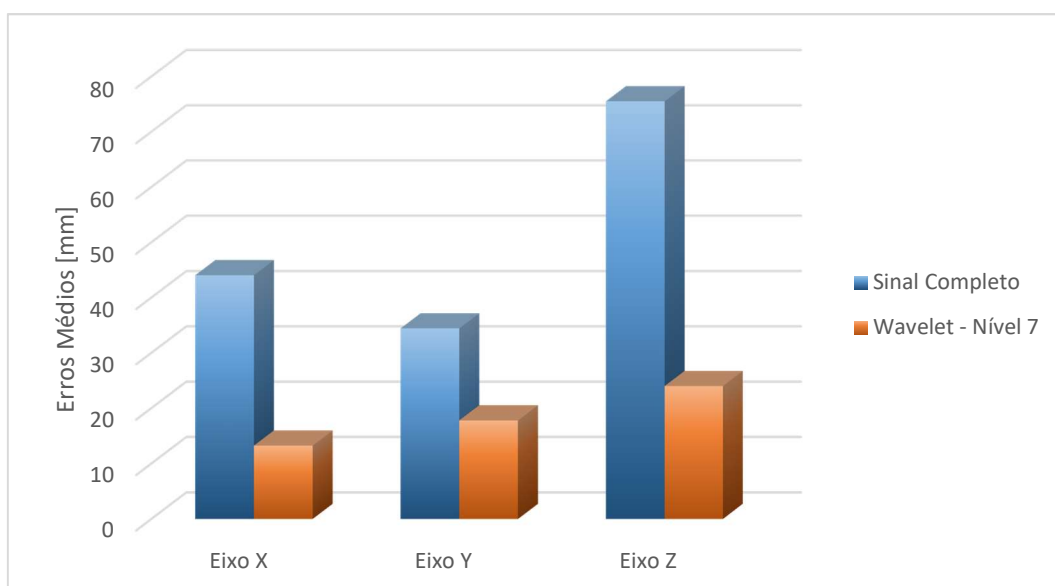
Eixo	Sinal Completo	Nível de Detalhe 7
	[mm]	[mm]
X	85,60	35,88
Y	85,52	21,22
Z	62,40	9,78

Os gráficos das Figuras 71 e 72 ilustram a redução nos valores dos erros médios de cada coordenada, quando se introduz a transformada *wavelet* discreta no método.

Em geral, comparando os resultados obtidos nas duas metodologias utilizadas, observa-se que, utilizando o nível 7 de detalhe *wavelet*, houve uma melhora muito significativa, com erros de localização menores que 50mm, reduzindo os erros médios de localização em média em 68% para os ensaios de ambos os eletrodos.

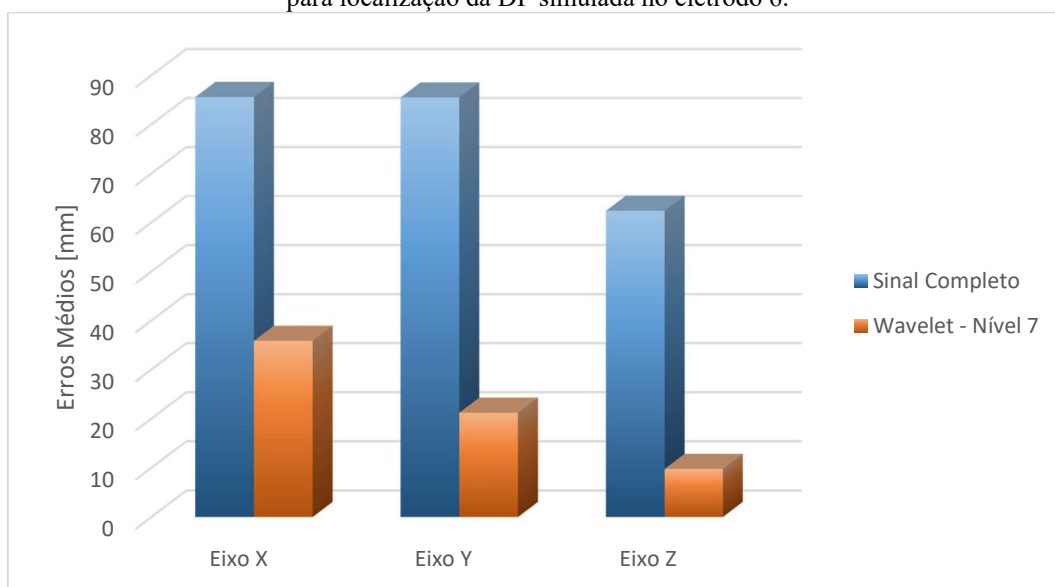
Isso demonstra que os instantes de chegada calculados dos sinais completos podem não ter sido das frentes de onda de caminho direto, o que causou erros elevados na localização das descargas parciais. Portanto, a decomposição do sinal acústico para identificar a frente de onda de caminho direto se faz necessária para obtenção de resultados mais exatos.

Figura 71 - Comparação dos erros médios calculados para cada coordenada entre os dois métodos apresentados para localização da DP simulada no eletrodo 2.



Fonte: Compilação da autora.

Figura 72 - Comparação dos erros médios calculados para cada coordenada entre os dois métodos apresentados para localização da DP simulada no eletrodo 6.



Fonte: Compilação da autora.

As Tabelas 22 e 23 mostram os erros médios percentuais de localização obtidos para o sinal completo e com a utilização do nível de detalhe 7 da transformada *wavelet* discreta para o ensaio realizado no eletrodo 2 e no eletrodo 6, respectivamente.

Tabela 22 – Comparação dos erros médios percentuais de localização do eletrodo 2, utilizando duas metodologias diferentes.

Eixo	Sinal Completo	Nível de Detalhe 7
	[%]	[%]
X	46,38	13,94
Y	13,56	7,01
Z	15,44	4,91

Tabela 23 – Comparação dos erros médios percentuais de localização do eletrodo 6, utilizando duas metodologias diferentes.

Eixo	Sinal Completo	Nível de Detalhe 7
	[%]	[%]
X	70,09	31,47
Y	20,96	5,20
Z	14,96	2,35

Analisando os dados das Tabelas 22 e 23, observa-se que o eixo x é o que apresenta os maiores erros médios percentuais, mesmo com na metodologia que utiliza a TWD. Isso se deve ao fato de a dimensão do transformador nesta coordenada ser menor, 360mm. Desta forma, os erros absolutos de 13,24mm e 35,88mm, apesar de serem satisfatórios, representam valores de exatidão percentual elevados, de 13,94% e 31,47%, respectivamente.

Apesar de os erros de localização serem inevitáveis, alguns fatores podem ter contribuído nos resultados obtidos.

O primeiro fator pode ser atribuído aos erros de medição das coordenadas dos eletrodos e sensores em relação ao ponto de referência comum.

Outra causa pode ser atribuída ao núcleo do transformador ser um obstáculo para a propagação das ondas acústicas no interior do transformador. Desta forma, as reflexões, refrações e atenuações podem ter diminuído a sensibilidade deste método.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa apresentou um sistema para a localização de descargas parciais em um transformador de potência operando em condições nominais, isolado a óleo mineral, através de cápsulas piezelétricas e ferramentas como a transformada *wavelet* discreta e sistemas inteligentes.

Algumas descargas foram simuladas no interior de um transformador de potência energizado com carregamento nominal, através de eletrodos construídos e fixados em coordenadas conhecidas ao núcleo do transformador, simulando a ocorrência de descargas parciais. Os sinais gerados por essas descargas foram captados por cápsulas piezelétricas acoplados à parede externa do transformador, atuando como sensores.

Duas metodologias foram aplicadas, visando demonstrar a importância da distinção das frentes de onda que chegam aos sensores. Na primeira metodologia o instante de chegada foi calculado a partir do sinal completo. Na segunda, o sinal foi decomposto em 10 níveis de detalhe *wavelet* e extraído o tempo de chegada do nível 7. Os parâmetros obtidos alimentaram um sistema de inferência neuro-difuso adaptativo. Os dados retornados por este sistema foram comparados às coordenadas reais dos eletrodos.

Analisando-se os resultados obtidos em ambas as metodologias, pode-se verificar a importância da utilização da transformada *wavelet* discreta, que ao discriminar as frentes de onda apresentou erros de localização menores que 5cm e, quando comparado a primeira metodologia, nota-se uma melhora na exatidão de 68% em média.

Deste modo, pode-se considerar que, mesmo as cápsulas piezelétricas de baixo custo, utilizados nesta pesquisa como sensores acústicos, não terem sido desenvolvidos para este propósito, o método proposto demonstrou a viabilidade da utilização dos mesmos na localização de descargas parciais em transformadores operando com carregamento nominal. Apesar dos ruídos gerados pela sua energização, os filtros utilizados conseguiram eliminar grande parte desses ruídos. Assim, os sensores piezelétricos, que apresentam custo de centavos de real, se mostram como uma alternativa econômica com grande potencial para a detecção de descargas parciais em transformadores energizados através do método de emissão acústica.

Apesar de o método não ter retornado o ponto de ocorrência da descarga de forma exata, verifica-se que um erro de localização menor que 5cm, dadas as dimensões do transformador de potência, é capaz de nortear a região de ocorrência da descarga parcial no interior do transformador.

Sendo assim, pode-se afirmar que o método proposto demonstrou a viabilidade de aplicação da técnica de emissão acústica para localização de descargas parciais, através de sensores de baixo-custo, e apresentou resultados que podem contribuir com o desenvolvimento de técnicas de monitoramento *online* e localização de descargas parciais, fornecendo informações para auxiliar e melhorar as manutenções de transformadores de potência.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Utilizar novas combinações de métricas aplicadas ao sistema ANFIS, associadas a novas topologias, visando melhorar a exatidão dos resultados.
- Realizar um estudo com a redução no número de sensores aplicados.
- Desenvolver um protótipo para monitoramento e localização de descargas parciais em transformadores de potência em campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDILA-REY, J. A.; MONTAÑA, J.; CASTRO, B. A.; SCHURCH, R.; ULSON, J. A. C.; MUHAMMAD-SUKKI, F.; BANI, N. A. A Comparison of Inductive Sensors in the Characterization of Partial Discharges and Electrical Noise Using the Chromatic Technique. *Sensors*, v. 18, n. 4, 2018.

ARDILA-REY, J. A.; BARRUETO, A.; ZERENE, A.; CASTRO, B. A.; ULSON, J. A. C.; MAS'UD, A. A.; VALDIVIA, P. Behavior of an Inductive Loop Sensor in the Measurement of Partial Discharge Pulses with Variations in Its Separation from the Primary Conductor. *Sensors*, v. 18, n. 7, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60270: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão: medição de descargas parciais**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7274: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço**. Rio de Janeiro, 1982.

AZEVEDO, C.H.B. **Metodologia para a Eficácia da Detecção de Descargas Parciais por Emissão Acústica como Técnica Preditiva de Manutenção em Transformadores de Potência Imersos em Óleo Isolante**. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, Brasil. 2009.

BARTNIKAS, R; McMAHON, E. J. **Engineering Dielectrics: Corona Measurement and Interpretation**. Philadelphia: ASTM, V. 1, chapters 1-2. (ASTM STP - 669), 1979.

BECHARA, R. **Análise de Falhas de Transformadores de Potência**. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BOGGS, S. A. **Partial Discharge – Part III: Cavity-Induced PD in Solid Dielectrics**. IEEE Electrical Insulation Magazine, v.6, n.6, p. 11-20, 1990.

BRUNINI, D. M. **Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência por Meio de Sistemas Inteligentes e Emissão Acústica**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2017.

CADY, W. G. **Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals**. Dover Press, 1964.

CASTRO, B. A. **Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência por Meio de Sensores Piezelétricos de Baixo Custo e Sistemas Inteligentes**. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2016.

CASTRO, B. A. **Uma Contribuição aos Sistemas de Monitoramento de Integridade Estrutural Baseados na Impedância Eletromecânica sob Aplicações de Baixa Relação Sinal-Ruído**. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2019.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; CIAMPA, F. A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by Piezoelectric Sensor. Comparative analysis of signal processing techniques for impedance-based SHM applications in noisy environments. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 126, p. 326-340, 2019.

CASTRO, B. A.; BAPTISTA, F. G.; REY, J. A. A.; CIAMPA, F. A chromatic technique for structural damage detection under noise effects based on impedance measurements. **Measurement Science and Technology**, v. 30, n. 07, 2019.

CASTRO, B. A.; BRUNINI, D. M.; BAPTISTA, F. G.; ANDREOLI, A. L. ; ULSON, J. A. C. Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, no. 18, pp. 6090-6099, 2017.

CASTRO, B. A.; CLERICE, G. A. M.; ANDREOLI, A. L.; CAMPOS, F. S.; ULSON, J. A. C. A low cost system for acoustic monitoring of partial discharge in power transformer by Piezoelectric Sensor. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 7, pp. 3225-3231, 2016.

CLERICE, G. A. M. **Localização de Descargas Parciais por Meio de Cápsulas Piezelétricas de Baixo Custo e Sistemas Inteligentes**. 2014. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

CUENCA, W. M. H. **Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais**. 2005. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DAHIYA, R. S.; VALLE M. **Robotic Tactile Sensing**. Genova: Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013.

DAUBECHIES, I. Ten Lectures on Wavelets, **SIAM**, 1992.

EDIN, H. **Partial Discharges Studied with Variable Frequency of the Applied Voltage**. 2001. Thesis (Ph.D.) – Electrical Engineering, Kungl Tekniska Hogskolan, Stockholm, 2001.

FALCONI, D. R. **Sensor Piezelétrico Baseado na Tecnologia dos Eletretos Termo-Formados: Aprimoramentos dos Processos de Produção**. 99f. Dissertação (Mestrado em Processamento de Sinais de Instrumentação). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

FEDERAL PACIFIC CO. **Understanding Transformer Noise**. 2007. Disponível em: <https://federalpacific.com/wp-content/uploads/2019/01/2016-FP-Understanding-Transformer-Noise.pdf>. Acesso em: 25 março 2019.

FORSYTH, K. W. **Optical Partial Discharge Detection**. In: Iris Rotating Machine Technical Conference, 1998.

GEMANT, A.; PHILIPPOFF, W. Die Funkenstrecke mit Vorkondensator. **Zeitschrift Physik**, v.13 p. 425–430, 1932.

GJAERDE, A. C. **Multifactor Aging Models – Origin and Similarities**. IEEE Eletrical Insulation Magazine, v.13. n.1, p. 6-13, 1997.

GONÇALVES JÚNIOR, A. M. **Localização de Descargas Parciais nos Enrolamentos de Transformadores por meio da Análise de Pulsos de Corrente**. 2018. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Brasil. 2018.

GULSKI, E. Digital Analysis of Partial Discharges. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2, n. 5, p. 822 – 837.

GUTNIK, Y. **Estudo dos Piezelétricos na Detecção de Descargas Parciais**. 2014. 298 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil. 2014.

HAROLD, R.T. **Acoustical Techniques for Detecting and Locating Electrical Discharges**. West Conshohocken: ASTM Publication, v.1: Engineering Dielectrics, 1979.

HAYKIN, S.S. **Redes Neurais: Princípios e Prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 P.

HETTIWATTE, S. N; WANG, Z. D; CROSSLEY, P. A. **Investigation of Propagation of Partial Discharges in Power Transformers and Techniques for Locating the Discharge**. IEEE Proceedings Science, Measurement and Technology, vol. 152(1):pp. 25 – 30. 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60270: High-Voltage Teste Techniques - Partial Discharge Measurements**, 2011.

KELEN, A. DANIKAS, M. G. **Evidence and Presumption in PD Diagnostic**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 2, n. 5, p.780-795, 1995.

KREUGER, F. H. **Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment**. London: Butterworths, p. 193, 1989.

KREUGER, F. H.; GULSKI, E.; KRIVDA, A. Classification of Partial Discharges. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 28, n. 6, Dec. 1993.

KUFFEL, R.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering: Fundamentals**. London: Butterworth-Heinemann, 2000.

KUNDU, P. KISHORE, N. K.; SINHA, A. K. **Simulation and Analysis of Acoustic Wave Propagation Due to Partial Discharge Activity**. In: IEEE Annual Report Conference Electrical Insulation and Dielectrics Phenomena, Kansas City, p.607-610, 2006.

LEEKWIJCK, W. V.; KERRE, E. E. Defuzzification: Criteria and Classification. **Fuzzy Sets and Systems**, Elsevier, v. 108, n. 2, p. 159-178, 1999.

LUCAS, G. B.; CASTRO, B. A.; ROCHA, M. A.; ANDREOLI, A. L. Three-Phase Induction Motor Loading Estimation Based on Wavelet Transform and Low-Cost Piezoelectric Sensors. *Measurements*, v. 164, n. 107956, novembro 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107956>. Acesso em: 29 jun. 2020.

MASIERO, B. S. **Controle Ativo de Ruído para Transformadores de Potência em Campo**. 2007. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

MASON, H. M. Enhancing the Significance of PD Measurements. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2, n. 5, p. 876 – 888.

MASIERO, B. S. **Controle Ativo de Ruído para Transformadores de Potência em Campo**. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

McALLISTER, I.M. **Partial Discharge in Spheroidal Voids – Void Orientation**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 4, n. 4, p.456-461, 1997.

MURATA. Murata manufacturing Co. Ltd. Catálogo de produtos. Disponível em: <<http://www.murata.com/>>, acessado em 15 de Dezembro de 2018.

MYERS, S. D.; KELLY, J.J.; PERRISH, R.H. **A Guide to Transformer Maintenance**. 1st ed. Akron: S.D. Inc, 1981.

NEGNEVITSKY, M. **Artificial Intelligence**. A guide to intelligent systems.2. Ed. England: Addison Wesley, 2005.

NIEMEYER, L. A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling. In: IEEE TRANSACTION ON DIELECTRICS AND INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2 n. 4. p. 510-528.

NORONHA, I. **Sistema de Avaliação da Contaminação, por Umidade, de Óleo Isolante de Transformador Usando Técnicas de Ultrassom**. 117 f. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2012.

PALITÓ, T. T. C. **Detecção Acústica de Descargas Parciais com Transdutor Piezoelétrico**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

PEDERSEN, A.; CRICHTON, G. C.; McALLISTER, I. W. **The Theory and Measurement of Partial Discharge Transients**. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 26, n. 3, p.487-497, 1991.

PILLING, J. **Ein Beitrag zur Interpretation der Lebensdauer kennlinien von Feststoffisolierungen**. Thesis (Habilitation) – Technical University Dresden, Dresden, 1976.

POMPILI, M.; MAZZETTI, C.; BARTNIKAS, R. Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under ac conditions. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 12, n. 2. Apr. 2005.

ROBLES, G.; FRESNO, J. M.; MARTÍNEZ-TARIFA, J. M. **Separation of Radio-Frequency Sources and Localization of Partial Discharges in Noisy Environments**. Sensors, 2015, 15, 9882-9898.

SAGE, A.P. **Concise Enciclopedia of Information Processing in Systems and Organizations**, New York, Pergamon, 1990.

SCHWARZ, R.; JUDENDORFER, T.; MUHR, M. **Review of Partial Discharge Monitoring Techniques Used in High Voltage Equipment**. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2008. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 400 – 403.

SILVA, G. C. **Descargas Parciais Estimuladas por Raios-X Contínuo e Pulsado em Materiais Dielétricos Similaridades e Diferenças**. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais: para Engenharia e Ciências Aplicadas**. São Paulo: Artliber, 2010. 399 p.

SIVIAN, L. J. **High Frequency Absorption in Air and other Gases**. The Journal of The Acoustic Society of America, v.19, n.5, p. 914-916, 1947.

SUGENO, M.; KANG, G. T. **Structure Identification of Fuzzy Models**. Fuzzy Sets Syst., v. 28, n. 15, 1988

TANSCHKEIT, R. **Sistemas Fuzzy. Inteligência Computacional: Aplicada à Administração, Economia e Engenharia em Matlab**, p. 229-264, 2004.

VELOSO, G. F C. **Localização de Descargas Parciais em Transformadores pela Análise da Emissão Acústica**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Itajubá. Itajubá, Brasil. 2006.

VELOSO, G. F. C; da SILVA, L.E.B.; LAMBERT-TORRES, G.; PINTO, J.O.P. **Localization of Partial Discharges in Transformers by the Analysis of the Acoustic Emission**. IEEE ISIE 2006, 9-12 de Julho 2006.

VELOSO, G. F. C. Identificação de Padrões de Contaminação em Óleo de Transformador Através da Monitoração Acústica das Descargas Parciais. 2011. 103 f. Tese (Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual de Itajubá. Itajubá, Brasil. 2011.

WITOLD, P.; GOMIDE, F. Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing. IEEE/Wiley Interscience, 2007