

**UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

GUILHERME AUGUSTO MARABEZZI CLERICE

**LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA IMERSOS EM ÓLEO MINERAL
POR MEIO DE CÁPSULAS PIEZELÉTRICAS DE BAIXO CUSTO E
SISTEMAS INTELIGENTES**

**Bauru
2014**

Guilherme Augusto Marabezzi Clerice

**LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM
TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA IMERSOS EM ÓLEO MINERAL
POR MEIO DE CÁPSULAS PIEZELÉTRICAS DE BAIXO CUSTO E
SISTEMAS INTELIGENTES**

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

Orientador: Prof. Dr. José Alfredo Covolan
Ulson

Bauru
2014

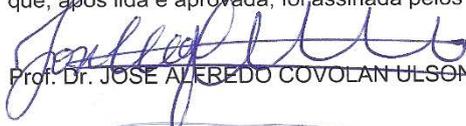
Clerice, Guilherme Augusto Marabezzi.
Localização de Descargas Parciais em
Transformadores de Potência Imersos em Oleo Mineral
por Meio de Cápsulas Piezelétricas de Baixo Custo e
Sistemas Inteligentes / Guilherme Augusto Marabezzi
Clerice, 2014
120 f.

Orientador: José Alfredo Covolan Ulson

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE GUILHERME AUGUSTO MARABEZZI CLERICE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de dezembro do ano de 2014, às 15:00 horas, no(a) Anfiteatro do S.T.I. da Faculdade de Engenharia de Bauru, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. JOSE ALFREDO COVOLAN ULSON do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. DANILO HERNANE SPATTI do(a) Departamento de Engenharia Elétrica/EESC-USP, Prof. Dr. FABRÍCIO GUIMARÃES BAPTISTA do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de GUILHERME AUGUSTO MARABEZZI CLERICE, intitulado "LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA IMERSOS EM ÓLEO MINERAL POR MEIO DE CÁPSULAS PIEZELÉTRICAS DE BAIXO CUSTO E SISTEMAS INTELIGENTES". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. JOSE ALFREDO COVOLAN ULSON



Prof. Dr. DANILO HERNANE SPATTI



Prof. Dr. FABRÍCIO GUIMARÃES BAPTISTA

Dedicatória

À minha esposa, Ana Claudia Visentin Clerice, pelo apoio, compreensão e dedicação que me tranquilizaram em dias difíceis. Ao meu pai, José Natal Clerice e minha mãe, Maria Silvia Marabezzi Clerice, que são minhas referências, proporcionando as condições fundamentais para que eu obtivesse as vitórias conquistadas na minha vida.

Dedico ao meu avô Sylvio Marabezzi (*in memoriam*), que me despertou interesse pela maravilhosa ciência da engenharia. Aos meus sogros, Claudio Visentin e Simoni Gissoni Visentin por todo apoio que necessitei. Ao meu padrinho Flavio Luiz Marabezzi e minha madrinha Maria Helena dos Santos Marabezzi por sempre rezarem por mim.

Agradecimentos

Para obter êxito em uma dissertação de mestrado é necessário dedicação e perseverança, dons que Deus me permitiu ter durante esta jornada de viagens constantes e dias conturbados. Além disso, o apoio e a colaboração do professor Dr. José Alfredo Covolan Ulson, pela orientação competente e atenção concedida que tenho a liberdade de chamar de Amigo.

Ao professor Dr. André Luiz Andreoli (FEB/UNESP) pelos diversos auxílios que precisei, agradeço também ao professor Dr. Fabrício Guimarães Baptista (FEB/UNESP) por consentir e apoiar o uso de sua linha de pesquisa pelos esclarecimentos das dúvidas. Aos professores Dr. Danilo Hernane Spatti (EESC/USP) por suas sugestões precisas, junto com Dr. Rogério Andrade Flauzino (EESC/USP) concederam o sensor de auto custo utilizado nesse trabalho. Agradeço a todos da sessão técnica de pós-graduação, funcionários e funcionárias do departamento de engenharia elétrica e do laboratório didático, pela disponibilidade e colaboração. Aos meus amigos de laboratório Bruno Albuquerque de Castro, Bruno Mancussi e Fernando de Almeida Borges pelo companheirismo. À CAPES pelo auxílio com a bolsa de estudos e aos professores Dr. Renato Crivellari Creppe (FEB/UNESP) e Dr. Fernando de Souza Campos (FEB/UNESP) por contribuírem com minhas pesquisas.

E finalmente, a todos da minha família e amigos que me motivaram e apoiaram para o desenvolvimento desse trabalho.

Epigrafe

“A engenharia não é apenas uma profissão aprendida, ela também é uma profissão de aprendizagem, na qual os praticantes iniciam-se estudantes e nessa condição permanecem ao longo de suas carreiras.”

-- William L. Everitt

RESUMO

Os transformadores de potência são equipamentos de alto custo e suma importância no sistema elétrico, em virtude de que o seu mau funcionamento impacta diretamente a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Portanto, sistemas de diagnósticos de falhas ocorridas nesses equipamentos podem auxiliar, tanto em manutenções corretivas, quanto preventivas. Este trabalho oferece um método eficiente para localização de descargas parciais em transformadores de potência que utilizam óleo mineral no seu interior, sem a necessidade de métodos intrusivos de diagnóstico. A localização da descarga parcial gerada no interior do transformador é feita por meio de cápsulas piezelétricas de baixo custo, fixadas externamente na caixa do transformador de potência, bem como, através do uso de sistemas inteligentes como redes neurais artificiais sem a utilização do TOA (*time of arrival*) exigindo triangulação do sinal, que demanda alta complexidade computacional, assim fornecendo as coordenadas de onde se originou a descarga parcial. Neste contexto, a redução do tempo de manutenção ou possível previsão da interrupção do serviço desse equipamento faz com que o fornecimento de energia seja feito com melhor qualidade, minimizando os impactos sofridos pelos consumidores pela descontinuidade do serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica.

Palavras-chave: Transformador de potência. Localização de falhas. Descarga parcial. Cápsula piezelétrica de baixo custo. Sistemas inteligentes.

ABSTRACT

The power transformers are equipments with high cost but paramount importance in the electric system as your bad operation can directly impact on the quality of the electric energy provided to the consumers. Therefore, diagnostic systems of occurred failures on this equipment can assist even on corrective maintenance or preventive. This work offers an efficient method to locate partial discharges on the power transformers which use mineral oil inside with no need to use intrusive methods of diagnoses. The location of the partial discharge generated inside of the transformer is made via piezoelectric capsules with low cost. It is fixed externally in the box of the power transformer, as well through the use of intelligent systems as neurotic artificial networks without the use of the TOA (time of arrival) requiring the triangulation signal which demands high computational complexity, thus providing the coordinates where the partial discharge was originated. On this context, the reduction of the time of maintenance or possible prediction of interruption of the service in this equipment results that the energy supply can be made with better quality, minimizing the impacts suffered by the consumers due the discontinuity of the service made by the concessionaires of electric energy.

Keywords: Low-cost piezoelectric capsule. Partial discharge. Power transformer. Intelligent systems. Occurrence failures.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E PUBLICAÇÕES	16
1.1. Motivação e Justificativa	16
1.2. Objetivos	18
1.3. Publicações relacionadas	19
CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1. Transformadores de Potência.....	20
2.2. Descarga Parcial	31
2.3. Piezoelectricidade	39
2.4. Sistemas Inteligentes.....	52
2.4.1. Redes Neurais Artificiais.....	52
2.4.2. Sistemas Nebulosos.....	61
CAPÍTULO 3- METODOLOGIA PROPOSTA.....	70
3.1. Geração das descargas parciais	72
3.2. Estudo da resposta da cápsula piezométrica a partir de um impulso unitário	75
3.3. Sistema de condicionamento e aquisição dos sinais.....	78
3.4. Detecção das descargas parciais.....	79
3.4.1. Pré-processamento dos sinais	82
3.4.2. Aplicação de RNA do tipo PMC para a estimação da localização das DPs	85
3.4.3. Aplicação do <i>ANFIS</i> para a estimação da localização das DPs	88
3.4.4. Validação das abordagens	88
CAPÍTULO 4- ANÁLISE E RESULTADOS	91
4.1. Comportamento da resposta da cápsula piezométrica	91
4.2. Resposta das redes neurais artificiais para localização da descarga parcial ..	95
4.3. Resposta do sistema nebuloso <i>ANFIS</i> para a localização da descarga parcial	99
.....	99
4.4. Análise dos dados adquiridos a partir das descargas parciais	106
CAPÍTULO 5- CONCLUSÃO	113
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	114
REFERÊNCIAS	115

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Diagrama simplificado dos transformadores no sistema elétrico de potência	17
Figura 1.2- Representação de como se inicia uma DP e a propagação da onda acústica em um transformador isolado com óleo mineral	18
Figura 2. 1- Transformadores de potência monofásico e trifásico	21
Figura 2. 2- Configuração construtiva de um transformador de potência	22
Figura 2. 3- Vista da parte ativa de transformador de 25 MVA, classe de tensão 138 kV	24
Figura 2. 4- Transformador submetido a esforços elétricos por falha na isolação	27
Figura 2. 5- Triângulo de DUVAL	29
Figura 2. 6- Fotografia dos canais de descargas parciais em óleo isolante	32
Figura 2. 7- Diferença entre a técnica de emissão acústica e o teste de ultrassom..	35
Figura 2. 8- Configuração de medição de descarga parciais conhecido como <i>induced test</i>	36
Figura 2. 9- Configuração de medição utilizando um transformador externo	37
Figura 2. 10- Representação do grupo dos dielétricos	40
Figura 2. 11- Ilustração da origem da piezeletricidade	40
Figura 2. 13- Diagrama das relações entre propriedades físicas, térmicas, elétricas e mecânicas	42
Figura 2. 12- Demonstração esquemática do efeito piezelétrico	44
Figura 2. 14- Classificação dos dielétricos.	47
Figura 2. 15- Domínios ferroelétricos	48
Figura 2. 16- Ciclo de Histerese ferroelétrica	49
Figura 2. 17- Construção da cápsula piezelétrica de baixo custo	49
Figura 2. 18- Sistema de oscilação da cápsula piezelétrica de baixo busto.....	50
Figura 2. 19- Sistema de suporte	51
Figura 2. 20- Representação organizacional dos sistemas inteligentes	52
Figura 2. 21- Modelo não linear de neurônio.....	55
Figura 2. 22- Função de ativação tangente hiperbólica e derivada	56
Figura 2. 23- Funções de ativação conhecidas	57
Figura 2. 24- Arquitetura das redes neurais artificiais	58

Figura 2. 25- Modelo do Perceptron para reconhecimento de padrões.	59
Figura 2. 26- Configuração do <i>Perceptron</i> multicamadas	60
Figura 2. 27- Operações com conjuntos Fuzzy	63
Figura 2. 28- Função de pertinência triangular	64
Figura 2. 29- Função de pertinência trapezoidal	64
Figura 2. 30- Função de pertinência gaussiana	65
Figura 2. 31- Função de pertinência sigmoide	65
Figura 2. 32- Função de pertinência unitária	66
Figura 2. 33- Modelo Fuzzy	67
Figura 2. 34- Arquitetura típica do sistema ANFIS	67
Figura 3. 1- Diagrama esquemático do sistema proposto	70
Figura 3. 2- Blocos funcionais sistematizando a estrutura do trabalho proposto para o treinamento da RNA	71
Figura 3. 3- Blocos funcionais sistematizando a estrutura do trabalho proposto para utilizar <i>ANFIS</i>	72
Figura 3. 4- Transformadores de potencial e transformador regulador de tensão utilizados no experimento	72
Figura 3. 5- Diagrama do circuito elevador de tensão elétrica	73
Figura 3. 6- Eletrodo confeccionado para gerar descargas parciais.	74
Figura 3. 7- Ponta atenuadora para medição de alta tensão	74
Figura 3. 8- Cápsula piezelétrica de baixo custo	75
Figura 3. 9- Representação do teste da quebra do grafite em uma barra de alumínio	76
Figura 3. 10- Sensor de emissão acústica modelo R151-AST	77
Figura 3. 11- Circuito de alimentação e aquisição de dados do sensor R151-AST...77	
Figura 3. 12- Diagrama eletrônico do circuito amplificador para cada cápsula piezelétrica.	78
Figura 3. 13- Circuito impresso com oito amplificadores INA128p	79
Figura 3. 14- Representação do tanque com os oito sensores e o eletrodo gerador das DPs	80
Figura 3. 15- Representação da assimetria calculada pelo Skewness	83
Figura 3. 16- Representação da concentração calculada pelo Kurtosis	84

Figura 4. 1- Sinal no domínio da frequência oriundo da quebra do grafite na cápsula piezelétrica de baixo custo	92
Figura 4. 2- Sinal no domínio da frequência oriundo da quebra do grafite do sensor da PASA.....	92
Figura 4. 3- Densidade espectral da cápsula piezelétrica de baixo custo	93
Figura 4. 4- Densidade espectral do sensor PASA R151-AST.....	93
Figura 4. 5- Sinal da DP na cápsula piezelétrica com filtro de 100 a 400 kHz.	94
Figura 4. 6- Resposta do filtro digital Butterworth 4 ^a ordem	95
Figura 4. 7- Representação tridimensional das medidas reais e estimadas pelo sistema ANFIS	105
Figura 4. 8- Corrente oriunda das descargas parciais.....	106
Figura 4. 9- Corrente oriunda de uma única descarga parcial	107
Figura 4. 10- Tensão elétrica instantânea no circuito de alta tensão	107
Figura 4. 11- Impulso criado pela DP em um sinal senoidal	108
Figura 4. 12- Crista de uma onda senoidal com surgimento de uma DP	108
Figura 4. 13- Transformada de Fourier na corrente	109
Figura 4. 14- Transformada de Fourier na tensão.....	109
Figura 4. 15- Assíntota da energia entre os sensores no instante da onda de frente	110
Figura 4. 16- Comparação entre sensores no instante de tempo da ocorrência da DP	111
Figura 4. 17- Regressão linear entre os sensores no instante de tempo da DP	111
Figura 4. 18- Assíntota da energia entre os sensores	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1- Representação das anormalidades e os gases chaves	39
Tabela 2. 2- Propriedade de alguns materiais piezelétricos	43
Tabela 3. 1- Parâmetros dos transformadores	73
Tabela 3. 2- Coordenadas das cápsulas piezelétricas	80
Tabela 3. 3- Coordenadas das DPs geradas no ensaio 1	81
Tabela 3. 4- Coordenadas das DPs geradas no ensaio 2	81
Tabela 3. 5- Coordenadas das DPs geradas no ensaio 3	82
Tabela 3. 6- Métricas para cada sensor e número de entradas na RNA	85
Tabela 3. 7- Número de neurônio nas camadas escondidas nos ensaios 1 e 2	85
Tabela 3. 8- Configurações da RNA do tipo PMC do ensaio 1	86
Tabela 3. 9- Configurações da RNA do tipo PMC do ensaio 2	86
Tabela 3. 10- Configurações da RNA do tipo PMC do ensaio 3	87
Tabela 3. 11- Configuração do sistema <i>ANFIS</i>	88
Tabela 4. 1- Valores referenciados no eixo x da coordenada retangular no ensaio 1.	96
Tabela 4. 2- Valores referenciados no eixo y da coordenada retangular no ensaio 1.	96
Tabela 4. 3- Valores referenciados no eixo z da coordenada retangular no ensaio 1.	96
Tabela 4. 4- Valores referenciados no eixo x da coordenada retangular no ensaio 2	97
Tabela 4. 5- Valores referenciados no eixo y da coordenada retangular no ensaio 2	97
Tabela 4. 6- Valores referenciados no eixo y da coordenada retangular no ensaio 2	98
Tabela 4. 7- Resultados obtidos da PMC (Tempo de chegada da DP e mínimo global do sistema)	98
Tabela 4. 8- Resultados obtidos da PMC (Energia do Sinal e RMS)	99
Tabela 4. 9- Resultados obtidos da PMC (Kurtosis e Skewness)	99

Tabela 4. 10- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e tempo de chegada da DP.....	99
Tabela 4. 11- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e Skewness	100
Tabela 4. 12- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e mínimo global do critério da energia.....	100
Tabela 4. 13- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e energia do sinal.....	100
Tabela 4. 14- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e kurtosis .	101
Tabela 4. 15- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e tempo de chegada da DP.....	101
Tabela 4. 16- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e tempo de chegada da DP e mínimo global da energia	101
Tabela 4. 17- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e energia do sinal e RMS.....	102
Tabela 4. 18- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e Skewness e Kurtosis	102
Tabela 4. 19- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo x (3 cápsulas piezelétricas).....	103
Tabela 4. 20- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo y (3 cápsulas piezelétricas).....	103
Tabela 4. 21- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo z (3 cápsulas piezelétricas).....	103
Tabela 4. 22- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo x (1 cápsula piezelétrica).....	104
Tabela 4. 23- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo y (1 cápsula piezelétrica).....	104
Tabela 4. 24- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo z (1 cápsula piezelétrica).....	105

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFIS	– <i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems</i>
CI	– Circuito integrado
dB/Hz	– <i>Decibel por Hertz</i>
DP	– Descarga parcial
DPs	– Descargas parciais
DpERM	– Desvio padrão do erro relativo médio
EAM	– Erro absoluto médio
EQM	– Erro quadrático médio
ERM	– Erro relativo médio
Hz	– Hertz
IEC	– <i>International Electrotechnical Commission</i>
IEPE	– <i>Integrated Electronic Piezoelectric</i>
kHz	– Quilohertz
kV	– Quilovolts
kVA	– Quilovolts-ampères
k Ω	– Quiloohm
ms	– Milissegundo
MS/s	– <i>Megasamples</i> por segundo
MVA	– Megavolts-ampères
PASA	– <i>Physical Acoustics South America</i>
pC	– Picocoulomb
PMC	– Perceptron Multicamadas
PZT	– Titanato Zirconato de Chumbo
R	– Coeficiente de determinação
REQM	– Raiz do erro quadrático médio
RNA	– Redes neurais artificiais
TP	– Transformador de potencial
V	– Volts
μ s	– Microssegundo
Ω	– Ohm

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E PUBLICAÇÕES

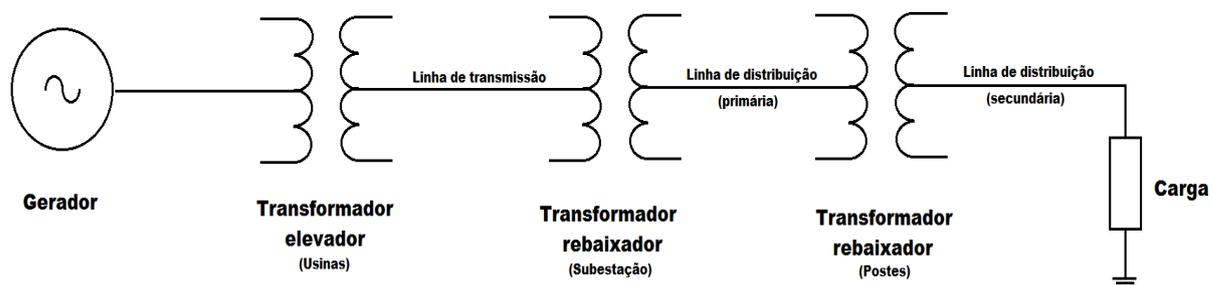
1.1. Motivação e Justificativa

No início do século XX a energia elétrica desempenhava somente a tarefa de suprir pequenas cargas. Contudo, com o crescimento da população e do consumo de bens de produção, a humanidade ficou extremamente dependente da eletricidade em seu cotidiano. Com a crescente demanda, quesitos de qualidade de fornecimento cada vez mais no limite de operação estão sendo exigidos das empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras de energia elétrica. Nesse contexto, metodologias que permitam a obtenção de informações sobre as falhas no sistema elétrico e suas causas tornar-se-ão de suma importância, à medida que poderão ser usadas preventivamente (CHEN, 2013).

Na operação do sistema elétrico de potência surgem, com frequência, anomalias em seus componentes que resultam em interrupções no fornecimento de energia aos consumidores. Órgãos reguladores das atividades do setor elétrico no país visam à integridade do sistema, impondo penalidades severas em caso de descontinuidade do fornecimento da energia elétrica ou má qualidade na prestação desse serviço.

O transformador é um dos componentes que faz parte desse sistema, sendo essencial no sistema de transmissão de energia elétrica. O transformador de potencial torna possível a elevação da tensão dos geradores, permitindo a transmissão de energia por longas distâncias, com reduzidas perdas por efeito Joule. Próximos aos centros consumidores, os transformadores são utilizados em subestações de distribuição, reduzindo a alta em média tensão, geralmente 11,2 kV a 13,8 kV. Junto aos pontos de consumo, transformadores de distribuição rebaixam a tensão a valores seguros e aplicáveis às cargas. Cargas domésticas usualmente empregam tensões entre 120 e 220 V; em algumas localidades do Brasil emprega-se 230 a 380 V. Cargas industriais podem empregar tensões entre 220 e 760 V e em alguns casos tensões da ordem de quilovolts (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2013). O diagrama ilustrado na Figura 1.1 é a hierarquia dos transformadores em um sistema elétrico de potência.

Figura 1.1- Diagrama simplificado dos transformadores no sistema elétrico de potência

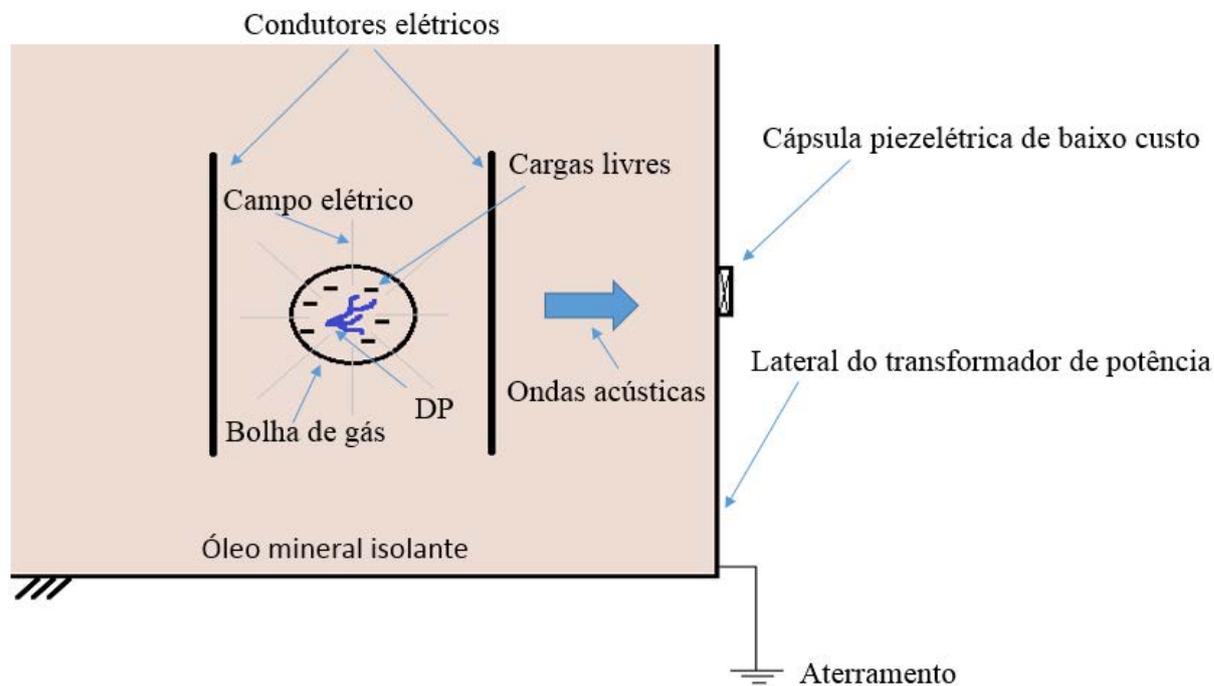


Neste contexto, os transformadores desempenham papel primordial no sistema elétrico. Os transformadores de potência estão sujeitos a diversos tipos de falhas tais como: deformação mecânica dos enrolamentos por esforços de curto-circuito, defeito de fabricação, defeito provocado pelo transporte do equipamento, falhas de comutadores, falhas de buchas e a deterioração dos materiais isolantes. O tipo de transformador mais utilizado em sistemas de potência são os refrigerados por óleo mineral que também atua como isolante elétrico.

Esse óleo pode se degradar como consequência do surgimento de descargas parciais, que é um fenômeno elétrico que atua diretamente na redução da vida útil dos transformadores de potência, podendo levar à interrupção do fornecimento de energia elétrica e reparos de altos custos às concessionárias do setor elétrico (WANDA *et al*, 2013). Dentre os defeitos de um transformador de grande porte, a descarga parcial (DP) assume grande importância, pois é um fenômeno que indica um defeito eminente e que pode evoluir para a saída de serviço do transformador, causando grandes prejuízos às concessionárias e aos consumidores.

Descargas parciais podem surgir quando cargas elétricas, geralmente da ordem de alguns *pico-Coulombs* (pC), se formam em decorrência da diferença de potencial elétrico em bolhas de gases, resultando em um canal ionizado incompleto com o surgimento de elétrons livres conforme ilustrado na Figura 1.2. Dessa forma, a onda acústica criada por uma descarga parcial pode ser utilizada como uma ferramenta de grande potencial no acompanhamento e diagnóstico para identificar falhas e estimar a sua localização em transformadores (Wang *et al*, 2006).

Figura 1.2- Representação de como se inicia uma DP e a propagação da onda acústica em um transformador isolado com óleo mineral



Assim, o monitoramento *on-line* das DP tem grande valia na operação do sistema elétrico, pois pode antever um defeito e, conseqüentemente, evitar uma interrupção prolongada no fornecimento (SHENG, 2014). A literatura correlata apresenta diversas abordagens para a estimativa da localização de DP em transformadores, entretanto, as abordagens propostas empregam sensores de custo elevado e metodologias de localização que ainda carecem de evolução no tocante à precisão e confiabilidade na identificação e localização da DP.

1.2. Objetivos

Diante do cenário anteriormente exposto, o objetivo desta pesquisa foi o estudo e desenvolvimento de uma abordagem para a localização de descargas parciais em transformadores de potência imersos em óleo mineral por meio de cápsulas piezelétricas de baixo custo e sistemas inteligentes. Mais especificamente, cápsulas piezelétricas do tipo titanato zirconato de chumbo (PZT), de baixo custo (comercialmente conhecidas como *buzzers*), foram empregadas para a captação da emissão acústica oriunda de uma DP. Estes sinais, após devidamente tratados, foram levados a sistemas inteligentes computacionais baseados em redes neurais do tipo

Perceptron Multicamadas (PMC) e sistemas nebulosos *ANFIS*, devidamente treinados para a localização da DP. Com isso reduzindo os custos no monitoramento de DPs por métodos não invasivos, tornando a técnica de emissão acústica um meio de baixo custo.

1.3. Publicações relacionadas

- CLERICE, G.A.M, CASTRO, B. A., ULSON, J.A.C, ANDREOLI, A.L., CAMPOS, F. S. Caracterização da Sensibilidade dos Sensores Piezelétricos do Sistema PZT para Identificação de Descarga Parcial em Transformadores. XXI INTERCON *Congreso Internacional de Ingeniería, Eléctrica y Computación*, p. 37-42, 2014, Arequipa, ISBN: 978-9972-825-67-5.
- CASTRO, B. A., CLERICE, G.A.M, ULSON, J.A.C, FLAUZINO, R.A, BAPTISTA, F.G. Monitoramento de Ondas Acústicas Geradas por Descargas Parciais em Óleo Isolante Mineral de Transformadores de Potência Por Meio de Sensores Piezelétricos de Baixo Custo. XXI INTERCON *Congreso Internacional de Ingeniería, Eléctrica y Computación*, p. 165-170, 2014, Arequipa, ISBN: 978-9972-825-67-5.
- CLERICE, G.A.M, CASTRO, B. A., ULSON, J.A.C, ANDREOLI, A.L., CAMPOS, F. S., RIEHL, R. Identificação de Descargas Parciais em Transformadores de Potência por Meio de Cápsulas Piezelétricas de Baixo Custo. INDUSCON 2014-*IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, 2014, Juiz de Fora.
- CASTRO, B. A., CLERICE, G.A.M, ULSON, J.A.C, BAPTISTA, F.G, CAMPOS, F. S, ANDREOLI, A.L. Identificação e Localização de Danos em Estruturas Metálicas pelo Método da Emissão Acústica, Análise Wavelet e Sensores Piezelétricos de Baixo Custo. INDUSCON 2014-*IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, 2014, Juiz de Fora.

CAPÍTULO 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será mostrado o estado do desenvolvimento dos temas envolvidos neste trabalho: transformadores de potência, descargas parciais, piezoeletricidade e sistemas inteligentes.

2.1. Transformadores de Potência

Os transformadores de potência são equipamentos empregados para elevar ou rebaixar as tensões elétricas, ou ainda podem ser utilizados para modificar a impedância no sistema elétrico. Esses dispositivos apresentam alta eficiência na transferência de energia e elevado fator de potência. São classificados como transformadores de larga potência, aqueles utilizados para transmissão de energia elétrica com potência de 5 até 300 MVA e com alta tensão de até 765 kV.

Os transformadores de potência são construídos de forma semelhante; de alguns kVA até os maiores tamanhos construídos. Mas, conforme o tamanho da unidade aumenta, o grau de sofisticação é cada vez mais requerido. Muitos fabricantes subdividem o processo de fabricação em transformadores de distribuição e transformadores de larga potência, embora essa divisão seja uma peculiaridade de cada fabricante (HEATHCOTE, 1998). Os transformadores de distribuição geralmente apresentam potência aparente de 1 até 5 MVA. Os transformadores de alta potência, como utilizados nas linhas de transmissão de 60 Hz do sistema elétrico brasileiro, conforme ilustrado na Figura 2. 1 existem dois tipos de transformadores de potência os monofásicos e os trifásicos. Normalmente utiliza transformadores de potência monofásicos em sistemas que demandam alta potência, por diversos motivos: reduz as dimensões do equipamento e a ocorrência de uma eventual falha, pode fazer manobra, tirando de operação o equipamento danificado por completo. Assim garantindo a segurança da equipe de manutenção e um menor tempo de interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Figura 2. 1- Transformadores de potência monofásico e trifásico



Transformador monofásico (à esquerda) e trifásico (à direita)
(Fonte: BECHARA, 2010)

Segundo Santos, Vellasco e Tanscheit (2009), transformadores de potência como os ilustrados na Figura 2.2 são, certamente, os equipamentos mais caros e críticos dentro de uma usina elétrica junto com às máquinas geradoras. Portanto, eles são de grande preocupação para a área de manutenção, que tenta mensurar sua integridade operacional durante seu ciclo de vida. A maioria dos transformadores de potência utiliza óleo mineral para o isolamento elétrico e como agente transferidor de calor para o arrefecimento do dispositivo.

Durante a operação, os transformadores são submetidos a esforços térmicos, elétricos e mecânicos, que podem dar origem a gases dissolvidos no óleo mineral. Isso afeta diretamente as propriedades dielétricas de todo o isolamento. Por isso, para avaliar o estado operacional de um transformador de potência, bem como a possibilidade de falhas, as suas condições de isolamentos sólidos e líquidos devem ser monitorizadas e avaliadas.

Figura 2. 2- Configuração construtiva de um transformador de potência



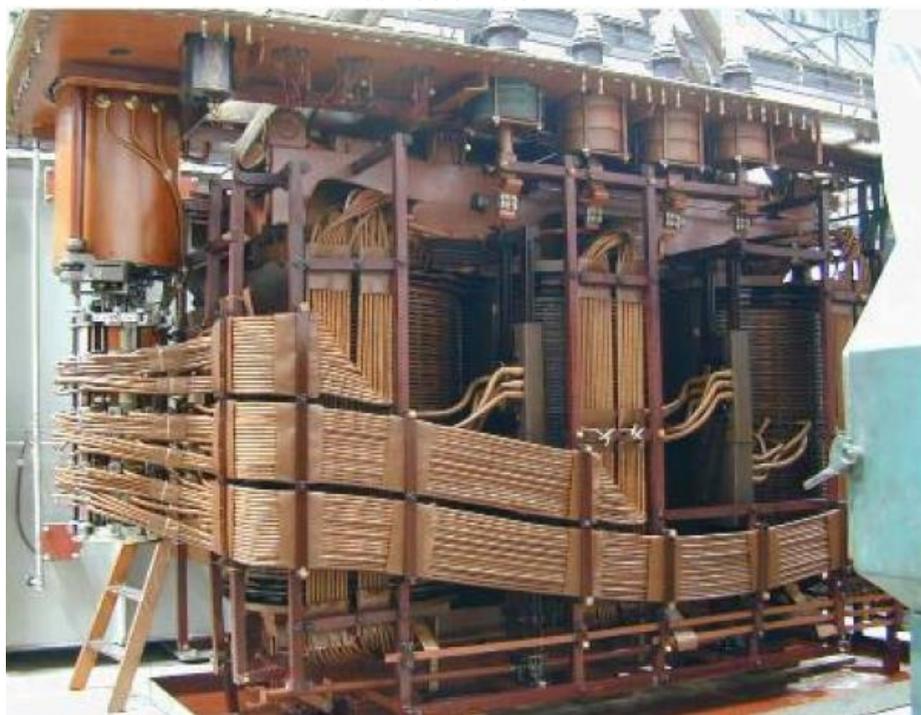
(Fonte: ABB, 1999)

- 1) Núcleo: é um conjunto de empacotamento de lâminas com o intuito de reduzir o efeito Foucault, no qual correntes parasitas originadas pela indução do campo magnético alternado sobre o próprio núcleo. Corrente parasita ou corrente de Foucault, é a corrente induzida em um material condutor na presença da variação do fluxo magnético que o percorre. Quando há esse efeito, ocorrem perdas em decorrência de dissipação de energia por efeito Joule, elevando a temperatura do material. Esse arranjo na forma de empacotamento de lâminas ou placas muito finas isoladas umas das outras, aumenta a resistência no trajeto da corrente que atravessa o material que constitui o núcleo;
- 2) Enrolamento: são encontrados em forma de bobinas cilíndricas formadas por condutores de cobre, podendo ser isolados com papel, verniz ou fibras sintéticas. As bobinas apresentam a disposição do tipo helicoidal, em camadas, discos entrelaçados ou contínuos. A relação entre número de

espiras entre os enrolamentos, define a diferença do potencial elétrico do transformador;

- 3) Tanque principal: é um tanque de aço preenchido com óleo isolante, onde o conjunto de bobinas e o núcleo é imerso;
- 4) Tanque de expansão de óleo: este permite a expansão do volume de óleo do transformador, responsável pelas variações de temperaturas a que o equipamento está submetido;
- 5) Buchas: feitas de porcelana com a finalidade de isolar os terminais das bobinas do tanque do transformado. São do tipo condensivas, onde o interior do dispositivo de porcelana está envolvido de papel e filme metálico imersos em óleo, formando assim um capacitor. Comumente encontradas em transformadores com classe de tensão superior a 13,8 kV;
- 6) Comutador sob carga: é um dispositivo eletromecânico que torna possível a variação dos níveis de tensão através da mudança dos terminais do enrolamento de regulação, sem a interrupção do serviço do transformador;
- 7) Acionamento do comutador sob carga: mecanismo eletromecânico que faz a alteração da posição do comutador de acordo com as tensões desejadas;
- 8) Trocadores de calor: localizados na parte externa do tanque, fazem que o óleo isolante através de aletas troque calor com o ambiente, diminuindo a temperatura do óleo;
- 9) Painel de controle: é uma interface que permite o controle e a monitoração do funcionamento do transformador ao centro de operação da subestação, como corrente, temperatura do óleo isolante, descarga parciais, etc;
- 10) Secador de ar: destinado a retirada de umidade do interior do transformador através de sílica-gel;
- 11) Termômetros: utilizados para monitorar a temperatura dos enrolamentos e do óleo isolante;

Figura 2. 3- Vista da parte ativa de transformador de 25 MVA, classe de tensão 138 kV



(Fonte: BECHARA, 2010)

Segundo Bechara (2010), apesar do fato de que os componentes aqui descritos se aplicarem a qualquer tipo de transformador, cada equipamento, dependendo da aplicação a que se destina e de padrões definidos pelo comprador, possui configurações construtivas específicas, não havendo, a menos daqueles fabricados na mesma série, transformadores idênticos. Além disso, há diferentes tipos de construção no que diz respeito à quantidade de enrolamentos, sistema de comutação, refrigeração, dimensões e dentre outros. O conjunto formado pelas bobinas imersas no núcleo é denominado como parte ativa do transformador, ilustrado na Figura 2.3.

2.1.1. Falhas em transformadores de potência

Falhas em transformadores ocorrem devido à deterioração do isolamento, que pode perder suas características e com o tempo ocasionar curto-circuito nas bobinas. Durante a operação do transformador, sabe-se que intensos campos elétricos são aplicados sobre o material dielétrico responsável pelo isolamento entre as espiras, o que pode levar à degradação do dielétrico. O aquecimento interno, causado pelas perdas elétricas, devido à potência dissipada pelo fluxo de corrente no material

condutor, perdas por histerese e correntes de Foucault, somado ao aquecimento do ambiente onde o transformador está instalado, provoca, com o tempo, a redução da capacidade de isolamento do material dielétrico. Outro fator que contribui para a degradação do isolamento são as vibrações. Além disso, ainda existe, em alguns casos, o problema da umidade que pode afetar o material isolante reduzindo a sua capacidade de isolamento.

Fenômenos adversos, como falhas em equipamentos designados para a proteção dos transformadores mediante condições de trabalho anormais, podem contribuir ou mesmo gerar danos nestes. Tais anomalias, muitas vezes não são visíveis, obrigando os eletricitistas a fazerem testes que podem ser demorados ou mesmo imprecisos (SOUZA, 2006).

Os transformadores podem falhar por diversas causas, sem serem necessariamente de origem elétrica. Todos os parâmetros envolvidos no problema incluem desde as condições do ambiente até os componentes do transformador (FERREIRA, 2013).

Bartley (2003), por cinco anos, analisou as falhas dos transformadores de potência na *Hetford Steam Inspection & Security Co.* e propôs as classificações:

- a) Descargas atmosféricas (algumas confundidas com surtos de linha);
- b) Sobrecarga, situações nos quais os transformadores se encontram com carga acima da nominal;
- c) Sobretensões em linhas, advindas dos chaveamentos e curtos-circuitos, entre outras anormalidades da linha de transmissão;
- d) Falhas na Isolação, excluindo-se as ocorridas por descargas atmosféricas e sobretensões, concentrando por oxidação, acidez, pirolise. Umidade também causa falha na isolação, porém muitas vezes é descartada. Essas falhas normalmente ocorrem em transformadores com tempo de vida superior a 18 anos;
- e) Contaminação do óleo: situações em que o óleo fica carbonizado ou perde suas características físico químicas;
- f) Operações inadequadas e manutenções impróprias, resultando no acúmulo de sujeira, umidade, ninhos de pássaros e insetos, corrosões e perdas de conexão às carcaças dos transformadores;

- g) Fogo externo com o superaquecimento do transformador pode ocorrer falha interna nos dispositivos;
- h) Erros de projeto em que foram incluídas as perdas ou cargas nominais mal especificadas, isolação do núcleo inadequada ou a suportabilidade ao curto-circuito mal dimensionada;
- i) Umidade que penetrou nos transformadores devido a falhas de vedação dos anéis ou outros orifícios, resultantes de corrosões ou vandalismos.

Desse estudo foi possível elaborar um plano estratégico de reposição de transformadores para as companhias americanas, considerando a reforma, relocação para áreas com demandas menores e substituição por novos (FERREIRA, 2013).

2.1.2. Isolamento Elétrico

A isolação elétrica em equipamentos de alta tensão tem como função principal minimizar o fluxo de corrente entre os condutores submetidos a diferenças de potencial elétrico, suportando o campo elétrico resultante. Deve atuar também na transferência do calor gerado entre os condutores, apresentando boa estabilidade térmica, além de propriedades mecânicas que possam suportar os esforços eletromecânicos, quando há ocorrência de transitórios, e ainda apresentar uma estabilidade química dentro de níveis que possam garantir as suas funções como isolante elétrico (ZIRBES, 2003).

No decorrer do tempo, os isolamentos perdem sua capacidade de desempenhar sua função, mesmo quando submetidos às condições normais de projeto. Assim sendo, as condições da isolação dos transformadores são substancialmente alteradas. Obviamente, quando submetidos a condições severas de operações, sua vida útil é ainda mais afetada. De forma ampla, a determinação do estado do isolamento envolve também a estimativa e a avaliação da redução de sua capacidade, a determinação e identificação de falhas incipientes que possam estar instaladas e estabelecendo comparativas na redução da vida útil. O isolamento de papel impregnado é um isolamento composto de celulose e óleo isolante, em que cada um destes materiais apresenta seus processos naturais de degradação, podendo alterar parcialmente quando há interação entre eles. Esse processo envolve várias

reações físicas e químicas que, de forma conjunta, atuam no sentido de acelerar ainda mais os níveis de degradação (MORAIS, 2004).

O papel composto de celulose, ainda é muito utilizado na sua forma mais simples; as espiras podem ser impregnadas por óleo isolante ou vernizes. Observa uma tendência por substituição por materiais fibrosos sintéticos, como fibra de vidro ou fibras de poliamida ou outros sintéticos.

Como exemplo é apresentado na Figura 2.4 o dano sofrido por um transformador quando submetido à falha de isolamento.

Figura 2. 4- Transformador submetido a esforços elétricos por falha na isolação



(Fonte: ZIRBES, 2003)

De uma forma geral, água, oxigênio, produtos do envelhecimento do óleo (particularmente ácidos) e partículas de diferentes origens são agentes de degradação, os quais podem diminuir significativamente a vida do transformador através da ação térmica, elétrica, eletromagnética e eletrodinâmica (SOKOLOV, BULGAKOVA, BERLER, 2001).

Segundo Morais (2004), os métodos de avaliação da degradação podem medir diretamente as características do isolamento, identificar e avaliar os produtos de sua degradação, ou ainda seus efeitos em parâmetros físicos e químicos conhecidos. Os principais métodos utilizados nas concessionárias do setor elétrico são a análise dos

gases dissolvidos e ensaios físico-químicos no óleo, medições de fator de dissipação e medição de descargas parciais. A aplicação destas metodologias no processo de análise requer um prévio conhecimento das características individuais do papel isolante, do óleo isolante e do conjunto papel-óleo.

2.1.3. Métodos de diagnósticos de falhas em transformadores de potência

Segundo Bechara (2010), a análise do óleo mineral isolante é o principal e mais utilizado método para avaliar a condição de um transformador, dado a simplicidade no procedimento de coleta, o baixo custo dos testes e a possibilidade de se diagnosticar vários tipos de problemas. As análises de gases dissolvidos têm como objeto as pequenas quantidades de gases geradas pelo óleo isolante quando submetido a determinados tipos de fenômenos de natureza elétrica ou térmica. A composição dos gases depende do tipo da anormalidade e o diagnóstico é feito a partir da avaliação dos chamados gases chave, permitindo a identificação de quatro tipos de problemas em transformadores. São eles: óleos superaquecidos, celulose superaquecida, descargas parciais, arco elétrico e os gases chaves que são, respectivamente, etileno, monóxido de carbono, hidrogênio e acetileno.

Outras análises podem ser feitas tais como a análise físico-química, adotando-se as condições do óleo novo e mensurando-se as mudanças das propriedades do mesmo ao longo do tempo. Os resultados determinarão os procedimentos de manutenção preventiva que poderão evitar falhas futuras. A contagem de partículas é muito utilizada em transformadores com classe de tensão igual ou superior a 230 kV e podem ser classificadas com intervalos de contaminação nula, baixa, normal marginal ou alta (BECHARA, 2010).

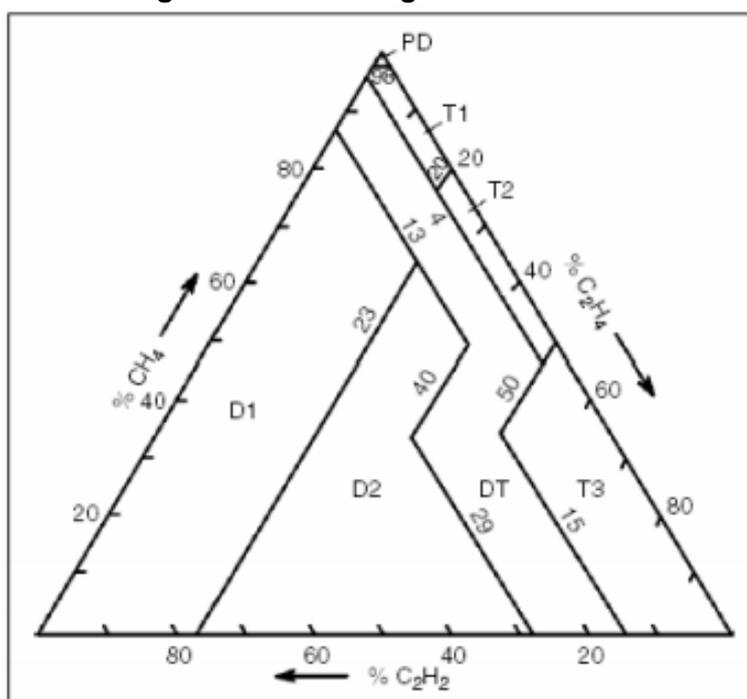
Com as análises de gases dissolvidos, físico-químicas e a contagem das partículas, é possível fazer a medição do teor de furaldeído presente no óleo mineral. A partir dessa medida é possível avaliar o quão deteriorado o papel está e, conseqüentemente, monitorar a conservação dos enrolamentos do transformador de potência.

O método de Rogers (1975) e a norma brasileira ABNT NBR 7274 (1982), são considerados convencionais no diagnóstico de falhas incipientes no óleo isolante de transformadores e na relação de concentração de gases. O método proposto por

Duval (2002), leva em conta apenas a concentração percentual relativa dos gases acetileno, etano e metano.

O critério é melhor ilustrado na Figura 2.5, na qual um triângulo é representado pela evolução dos gases gerados para determinadas falhas. O total de gases gerados em relação a cada percentual individual de cada gás define as coordenadas, podendo estabelecer três falhas de origem elétrica e três falhas de origem térmica criando, assim, um critério.

Figura 2. 5- Triângulo de DUVAL



(Fonte: DUVAL, 2002)

Cada código, apresentado no triângulo e descrito abaixo, representa uma condição de falha:

PD: descargas parciais;

T1: falha térmica com temperatura $T < 300^{\circ}\text{C}$;

T2: falha térmica com temperatura $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$;

T3: falha térmica com temperatura $T > 700^{\circ}\text{C}$;

D1: descargas de baixa energia;

D2: descargas de alta energia;

DT: mistura de falhas.

Segundo Morais (2004), técnicas de diagnósticos com Inteligência Artificial estão sendo cada vez mais utilizadas como método de diagnóstico do isolamento de equipamentos a partir dos dados de gases dissolvidos no óleo. Diante dessa realidade, técnicas computacionais estão sendo desenvolvidas e podem consistentemente diagnosticar condições de falhas incipientes e ainda vislumbrar novos conhecimentos aos especialistas (ZHANG, DING, LIU, 1996).

Porém, outros métodos de diagnósticos de transformadores de potência podem ser utilizados, tais como: elétrico, térmico/óptico e mecânico. Como comentado anteriormente, diversas técnicas de inteligência artificial foram e continuam a ser aplicadas para o diagnóstico do isolamento de equipamentos a partir dos dados de gases dissolvidos no óleo. Muitos fatores contribuem para o uso destas ao problema proposto, dentre as quais podemos citar: a facilidade de integração de várias informações e dados, não necessariamente de mesma origem; o aumento da quantidade de informações referentes ao supervisionamento dos equipamentos em operação e a necessidade de avaliação do estado de um equipamento em função de sua importância ao sistema, entre outras.

Atualmente, técnicas computacionais estão sendo desenvolvidas e podem consistentemente diagnosticar condições de falhas incipientes e ainda vislumbrar novos conhecimentos aos especialistas (ZHANG; DING; LIU, 1996). Normalmente, as técnicas mais utilizadas são as de sistemas especialistas, lógica *Fuzzy* e redes neurais artificiais. Todas estas são utilizadas de forma individual ou ainda na forma de sistemas híbridos, com a aplicação de sistemas neuro-fuzzy ou sistemas especialistas combinados com lógica *Fuzzy*. Os sistemas especialistas, de uma maneira geral, utilizam os critérios de diagnósticos tradicionais citados anteriormente para a formação de sua base de regras, além de incorporar algumas regras provenientes de experiência prévia na área. Podem conter ainda dados referentes aos modelos de cada equipamento e utilizar os dados característicos na análise final, sugerindo recomendações de intervenção ou reamostragens. Redes neurais já vinham sendo usadas extensivamente em aplicações, onde o reconhecimento de padrões é necessário. Elas são adaptativas, capazes de tratar com relações não lineares e úteis também para generalizar soluções para um novo conjunto de dados (MORAIS, 2004).

De forma resumida, os testes químicos consistem em análise dos gases dissolvidos, verificação da umidade no óleo isolante e atuação do relé de Buchholz também conhecidos como relé de pressão súbita. Outros importantes testes que

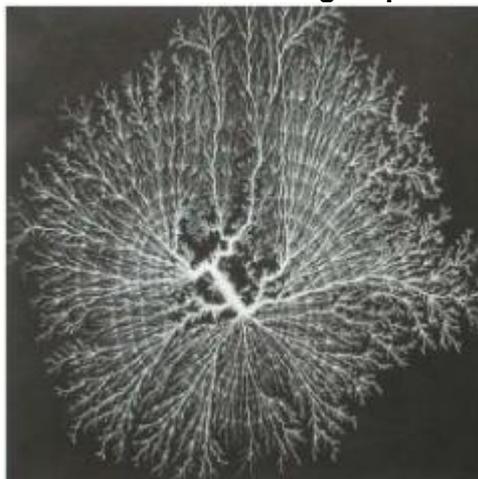
merecem menção são: a verificação de cor e aparência, acidez, valor de neutralização, tensão interfacial, conteúdo de sujeira, contagem de partículas e *sulphur corrosive*. Os métodos de testes elétricos são medições de descargas parciais, curva de polarização e despolarização e resposta em frequência. Há ainda o monitoramento de temperatura por testes térmico-ópticos, inspeção termográfica e visual. Por fim, testes mecânicos são feitos através de emissões acústicas e dinâmicas (FERREIRA, 2013).

2.2. Descarga Parcial

Segundo Diniz (2005), o monitoramento de descargas parciais tem se firmado cada vez mais como um dos principais meios para se avaliar a integridade de um equipamento elétrico. Um material isolante, quando submetido a grandes valores de diferença de potencial, criando um campo elétrico, pode permitir a ocorrência de descargas causadas por uma avalanche de elétrons ionizados nos espaços vazios. Se essas descargas ocorrerem no ar em torno de um condutor, são denominadas de efeito corona (coroa em latim). Quando essas descargas não são visíveis e estão no interior de algum equipamento são denominadas descargas parciais (DPs) ilustrada na Figura 2.6, podendo ocorrer nas cavidades ou nas bolhas existentes no interior de um material dielétrico. O termo descarga parcial é utilizado porque as descargas são localizadas, ou seja, não chegam a percorrer todo o caminho dentro de um material dielétrico colocado entre dois condutores submetidos a uma diferença de potencial.

O surgimento de DPs são extremamente prejudiciais tanto para o material dielétrico quanto para o equipamento que o envolve. Podem gerar calor, agentes oxidantes, ondas eletromagnéticas, interferindo nas recepções de rádio e causando deterioração do material dielétrico, sendo uma das maiores causas de falhas no isolamento. Há vários métodos de detecção de DPs: elétricos, acústicos, ópticos, químicos.

Figura 2. 6- Fotografia dos canais de descargas parciais em óleo isolante



(Fonte: HAUSCHILD, 1970)

A unidade mais utilizada para medir descargas parciais é o pico-Coulomb (pC), isto porque a carga elétrica é proporcional à energia destrutiva liberada no local da DP. A norma IEC 60270 (2011) faz referência à medida de descargas parciais em sistemas e equipamentos elétricos com tensões alternadas até 400 Hz. Portanto, descargas parciais são geralmente iniciadas se a intensidade do campo elétrico dentro do espaço vazio exceder a intensidade do campo do gás contido nesse espaço. Esse fenômeno cria um pulso de carga com duração menor que 1 μ s. O surgimento de frequências de limites de impedância de transferência $Z(f)$ decrescem com uma taxa de 6 dB a partir do valor de pico do filtro nessa faixa.

Segundo a norma IEC60270 (2011), a combinação com o dispositivo de acoplamento, tipo de instrumento que constitui um sistema de medição de largura de banda de DP, que é caracterizada por uma impedância $Z(f)$ de transferência terem valores fixos do limite inferior e as frequências superiores $f1$ e $f2$ nas Equações (2.1) e (2.2), e atenuação adequada abaixo de $f1$ e acima de $f2$. Os valores recomendados para a $f1$, $f2$ e Δf são: $30 \text{ kHz} \leq f1 \leq 100 \text{ kHz}$; $f2 \leq 500 \text{ kHz}$; $100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 400 \text{ kHz}$; e f_c é determinado como frequência central da DP.

$$f_c = \frac{f1 + f2}{2} \quad (2.1)$$

$$\Delta f = f2 - f1 \quad (2.2)$$

A medição de descargas parciais é uma das ferramentas mais importantes para o diagnóstico de equipamentos de alta tensão como hidrogeradores, transformadores e disjuntores. Os sinais de DP's auxiliam a identificar o envelhecimento prematuro dos materiais isolantes ou defeitos de fabricação, assim como previnem interrupções não programadas do sistema elétrico. A maioria dos casos de detecção e/ou medição dos sinais de DP's, que vêm sendo pesquisados por várias décadas, são comprometidos por outros fenômenos parasitas acoplados, como os sinais de ruído, que dificultam a detecção dos sinais desejados e, conseqüentemente, a sua caracterização (SOUZA, 2008).

2.2.1. Métodos para detecção de descargas parciais

a) Emissão acústica

Quando ocorre a descarga parcial, uma energia é liberada dentro da região e, conseqüentemente, o fluido contido nessa região é bruscamente vaporizado, resultando em ondas mecânicas que se propagam em todas as direções do tanque. O método de emissão acústica se baseia na detecção, através de sensor ultrassônico, de sinais de ondas mecânicas emitidas quando ocorre a descarga parcial.

A velocidade do som depende do meio onde ocorre a propagação e das características das variáveis intrínsecas ao meio, ou seja, se o meio é gasoso, líquido ou sólido. A velocidade de som no meio gasoso é definida na Equação (2.3):

$$V_g = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.3)$$

Sendo:

V_g é a velocidade do som do meio gasoso;

γ é razão do calor específico;

P é a pressão do gás;

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

A Equação 2.4 é para líquidos incompressíveis e a Equação 2.5 é para líquidos compressíveis.

$$V_l = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (2.4)$$

$$V_{lc} = \sqrt{\frac{\gamma K}{\rho}} \quad (2.5)$$

Sendo que K é a constante de volume de gás, e a velocidade do som no meio sólido é definida através da Equação 2.6.

$$V_s = \sqrt{\frac{Y}{\rho(1-c)}} \quad (2.6)$$

V_l é a velocidade do som do meio líquido incompressível;

V_{lc} é a velocidade do som do meio líquido compressível;

V_c é a velocidade do som do meio sólido;

Y é a constante de Young;

$c = 2\sigma^2(1-\sigma)$;

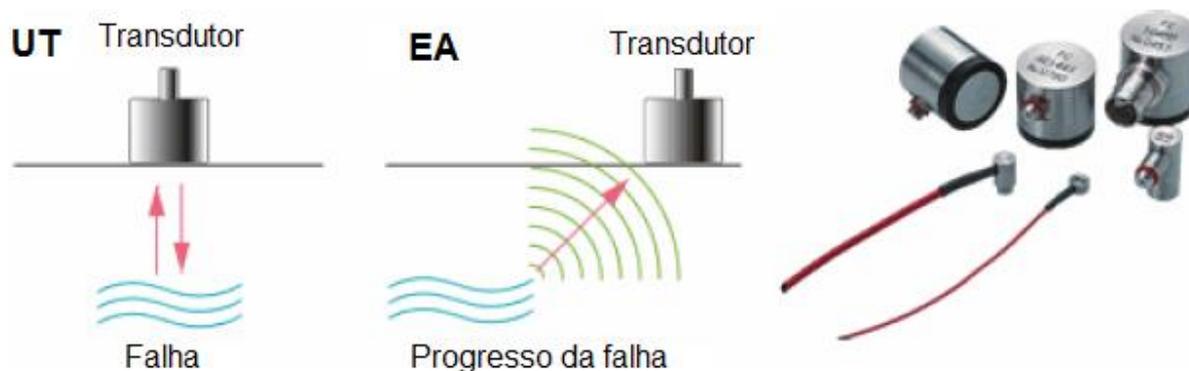
σ é a razão de Poisson

A onda acústica captada é fortemente deformada pela estrutura interna do transformador, além de inúmeras reflexões e refrações nos objetos internos ao tanque. As reflexões múltiplas causam a sobreposição dos picos dos sinais acústicos de descargas parciais quando a frequência de ocorrências de DPs é grande. A deformação do sinal também depende da viscosidade do meio, da distância e temperatura. O sinal deformado cria grandes dificuldades para localização da região de perda e estimação do sinal elétrico (SAMPA, 2013).

Segundo Veloso (2006), Emissão Acústica é o nome originalmente dado à onda elástica emitida por um sólido quando este sofre alguma deformação ou quando é golpeado. A técnica de emissão acústica (EA) consiste em detectar estes sons, que

estão normalmente na faixa do ultrassom, através de sensores piezelétricos, para monitorar a condição de resistência mecânica de estruturas sólidas. Ela difere de outras técnicas não-destrutivas, como o teste de ultrassom (UT), por ser passiva, ou seja, os sinais captados são emitidos pelo objeto de teste espontaneamente, conforme ilustrado na Figura 2.7. No teste de ultrassom, o sensor emite uma onda ultrassônica e detecta o sinal de eco.

Figura 2. 7- Diferença entre a técnica de emissão acústica e o teste de ultrassom



(Adaptado de ACOUSTIC Emission Sensors, 2014)

Segundo Veloso (2006), estas ondas percorrem todo o meio (seja ele sólido, líquido ou gasoso) podendo ser detectadas pelo sensor a uma distância que depende da intensidade da emissão e das características do meio, mas que pode chegar a algumas dezenas de metros. Os sensores utilizados na técnica de emissão acústica são, normalmente, do tipo piezelétricos. As ondas acústicas, quando atingem o sensor, causam pequenas deformações no material piezelétrico que, por sua vez, gera um sinal elétrico. Esses sensores respondem com uma grande sensibilidade, podendo detectar a ruptura de um único grão numa estrutura metálica. Com esta sensibilidade, a técnica de emissão acústica pode ser usada, com vantagens, em operações como: observar deformações plásticas e microscópicas em tempo real, localizar falhas usando vários sensores, diagnosticar equipamentos em plena operação. A técnica de emissão acústica se adapta muito bem ao problema da medição de descargas parciais em transformadores. Sua sensibilidade parece ser capaz de detectar atividade incipiente de descargas parciais. A capacidade de localização também adiciona uma grande vantagem em relação a outros métodos. Trata-se de uma técnica com características muito úteis para o campo da manutenção preditiva.

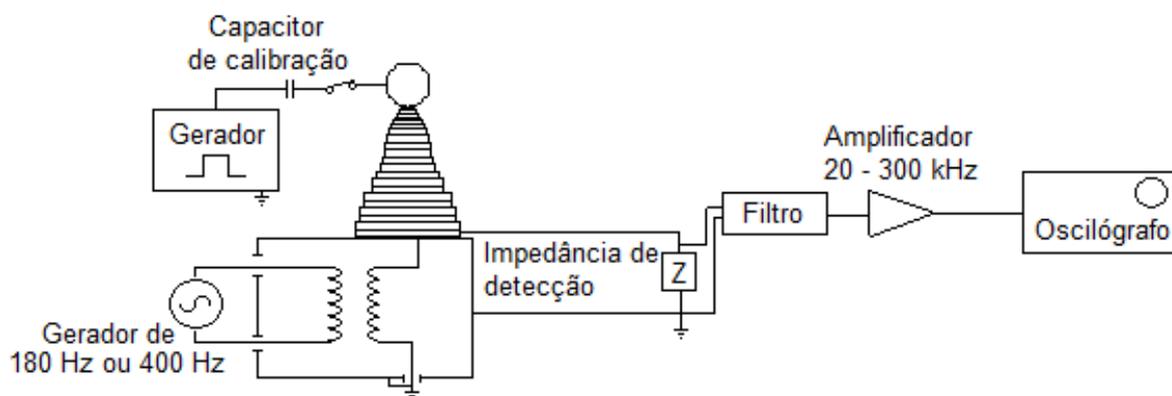
b) Medida elétrica

De acordo com Veloso (2006), a medição elétrica de descargas parciais é a forma mais comum. Já está bem estabelecida, com normas e equipamentos de medição disponíveis no mercado. Os sinais elétricos produzidos pelas descargas parciais em transformadores exigem muito dos equipamentos e técnicas de medição. Os pulsos produzidos têm tempo de subida em torno de 1 a 3 ns, o que praticamente impede a análise de pulsos individuais, restringindo este tipo de estudo apenas a pesquisas em laboratórios avançados, dada a exigência de equipamentos de medição na faixa de GHz (BARTNIKAS, 2002). Trata-se de medir apenas a quantidade de pulsos, suas intensidades e a distribuição dentro dos 360 graus do ciclo, além de determinar o nível de tensão onde se inicia a atividade de descarga parcial. Ainda assim, os equipamentos e o processamento dos sinais precisam ser robustos, pois as condições de medição são muito severas, devido à intensa interferência eletromagnética (VELOSO, 2006).

A medição pode ser feita através de distintas configurações de montagem sendo que na maioria delas é necessário a interrupção do serviço do transformador. As configurações mais utilizadas são:

- *Induced test*, ilustrado na Figura 2.8, consiste em aplicar uma tensão nos terminais de baixa tensão numa faixa de frequência de 180 Hz a 400 Hz com intuito de gerar descargas parciais sem saturar o circuito magnético, é muito usado em grandes transformadores;

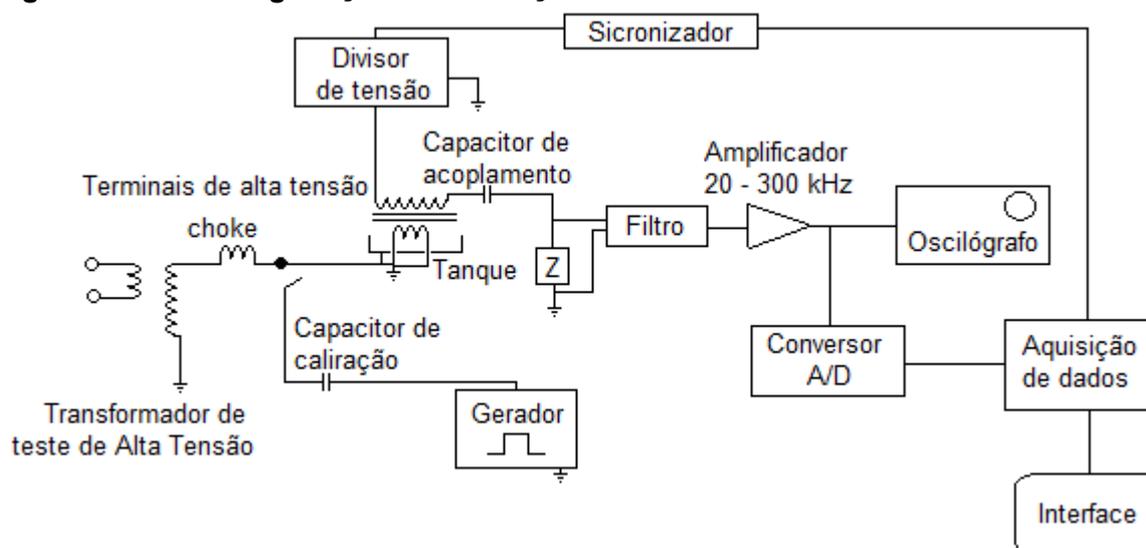
Figura 2. 8- Configuração de medição de descarga parciais conhecido como *induced test*



(Adaptado de BARTNIKAS, 2002)

- *Separate 60 Hz HV discharge-free teste source*, ilustrado na Figura 2.9, utiliza um transformador externo, livre de descargas parciais. É um método usado para aplicar uma diferença de potencial elétrico no terminal de alta tensão do transformador escolhido para o teste, sendo muito empregado em testes de pequenos transformadores;

Figura 2. 9- Configuração de medição utilizando um transformador externo



(Adaptado de BARTNIKAS, 2002)

De acordo com Veloso (2006), as descargas parciais são medidas em pC nos métodos elétricos, sendo uma forma de quantificar a carga elétrica retirada pela descarga parcial. Mas, trata-se apenas de uma carga aparente, pois se baseia em medições apenas nos terminais do transformador, desprezando a carga já acumulada na capacitância interna do equipamento. Para se obter este tipo de medida, é necessário calibrar o equipamento de medição. O benefício dessa calibração é a possibilidade de se estabelecer uma comparação entre equipamentos similares, mas não tem muito sentido quando utilizado como valor absoluto. As vantagens dos métodos elétricos de medição de descargas parciais se resumem em métodos bem estabelecidos, padronizados e na grande disponibilidade de equipamentos de medição no mercado. Porém, apresentam desvantagens, sendo, a grande maioria composta por sistemas *off-line*, são muito sensíveis a interferências eletromagnéticas, não são adequados para a localização da fonte de descargas parciais no interior do transformador e os esquemas e equipamentos são muito complexos.

Portanto, apesar de serem métodos muito usados, suas deficiências, principalmente à incapacidade de localização das descargas parciais, aumentam o interesse no método acústico de medição.

c) Medição Óptica

De acordo com Chaurasia (1999), as descargas parciais geram radiação na faixa do ultravioleta. Receptores de sinais neste espectro podem ser utilizados como método direto de detecção óptica dos sinais produzidos durante o impulso gerado pela DP. As emissões ultravioletas podem ser detectadas e quando as imagens feitas no comprimento de ondas ultravioletas são sobrepostas às imagens feitas com uma câmara de vídeo normal, as localizações espaciais das emissões podem ser determinadas e pode-se fazer uma correlação entre a radiação detectada e a presença das descargas elétricas (OLIVEIRA, 2008).

Segundo Gutnik (2014), é um método invasivo, que necessita de transdutores fotossensíveis para detectar o fenômeno luminoso emitido pela descarga parcial (DP) internamente ao transformador. Comprimentos de onda de 350 nm a 700 nm são característicos das descarga parcial em óleo.

A medições de DPs pelo método óptico possuem vantagens, sendo que uma delas é a medição isolada galvanicamente. Não há interferências eletromagnéticas nas medições, porém apresentam desvantagens, são elas: perda de calibração, acessibilidade da área que há interesse de avaliar e campo de medição de cobertura limitada (SCHWARZ *et al.*, 2008).

d) Análise química

A existência de gases chaves para determinar a falha que ocorreu no transformador é o princípio do método de análise físico-química. De acordo com a Tabela 2.1, a composição dos gases depende do tipo da anormalidade e o diagnóstico é feito a partir da avaliação química.

Tabela 2. 1- Representação das anormalidades e os gases chaves

ANORMALIDADES	GASES CHAVES
Óleos superaquecidos	Etileno
Celulose superaquecida	Monóxido de Carbono
Descargas parciais	Hidrogênio
Arco elétrico	Acetileno

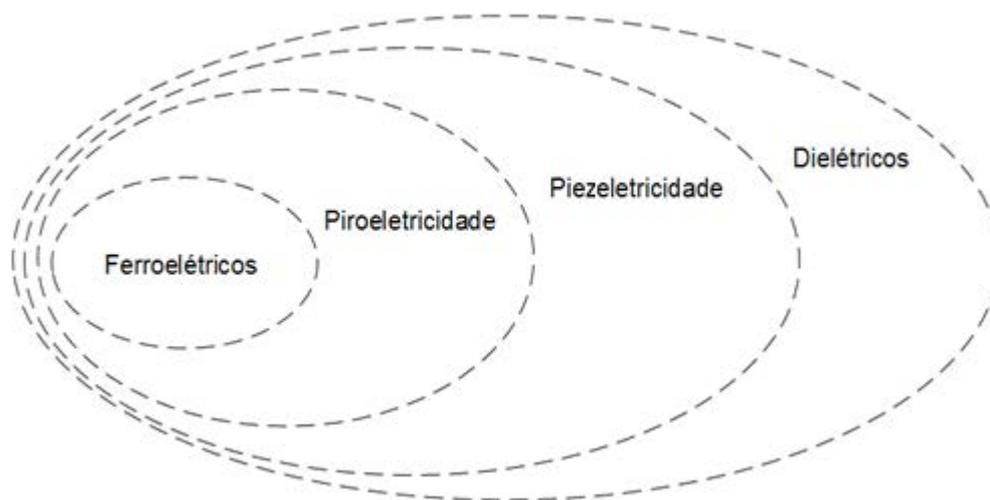
Segundo Azevedo (2009), no início da década de 1980, a análise físico-química e a utilização de gases dissolvidos em óleo isolante (AGD) foram implantadas pelas concessionárias como técnica de manutenção preditiva voltadas para o acompanhamento das condições do isolante elétrico de transformadores de potência imersos em óleo mineral. A análise de gases dissolvidos em óleo isolante por meio de cromatografia (AGD) é uma técnica muito utilizada por empresas que prestam manutenções às concessionárias de energia elétrica, mas, mesmo assim, os diagnósticos não são conclusivos, principalmente quando há ocorrência de descargas parciais. Além disso, a AGD não permite a localização onde a falhas incipientes ocorrem no interior de um transformador de potência.

2.3. Piezoeletricidade

Piezoeletricidade é a propriedade que alguns dielétricos têm de desenvolver uma polarização quando submetidos a uma tensão mecânica. Assim, o grupo dos dielétricos está ilustrado na Figura 2.10. A polarização produzida pela tensão cria cargas e, portanto, um campo elétrico. Reciprocamente, a aplicação de um campo elétrico num material piezolétrico resulta numa deformação mecânica (chamado efeito piezolétrico reverso). Nos dois casos, a mudança no sentido da perturbação produz uma inversão no sentido do efeito. A Figura 2.11 apresenta, através de um modelo bidimensional, como a compressão de um cristal induz um momento de dipolo elétrico na direção da deformação. No cristal sem deformação, em (a), os três dipolos formados pelo íon A e seus vizinhos (cada carga $\pm e$ é repartida em três) têm momento total nulo. Entretanto, quando o cristal é deformado como indicado em (b), os ângulos

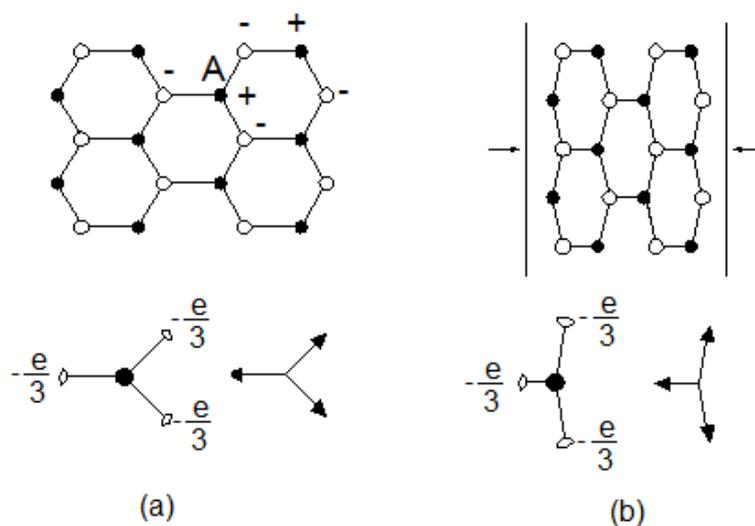
entre os dipolos produzem um momento resultante na direção da deformação (REZENDE, 2004).

Figura 2. 10- Representação do grupo dos dielétricos



De acordo com Venkatragavaraj *et al* (2001), os materiais ferroelétricos exibem uma sensibilidade caracterizada como piezeletricidade muito adequada para fazer aplicações como transdutores. Uma vez que esses materiais agem como sensores e atuadores, eles pertencem à classe dos materiais inteligentes.

Figura 2. 11- Ilustração da origem da piezeletricidade



(a) No cristal em equilíbrio o momento de dipolo elétrico é nulo; (b) o dipolo resultante da deformação mecânica não é nulo.

Fonte: (REZENDE, 2004)

O efeito piezelétrico foi descoberto pelos irmãos Pierre Curie e Jacques Curie no final do Século XIX. Em grego a palavra piezo significa pressão. Uma tensão mecânica em direção ao cristal resulta numa polarização em diferente direção. As grandezas envolvidas na piezeletricidade são tensoriais, não obstante algumas direções particulares dos cristais, os vetores estão na mesma direção. As relações das grandezas escalares podem ser expressas conforme as Equações (2.7) e (2.8):

$$[D] = [d][T] + [\epsilon^T][E] \quad (2.7)$$

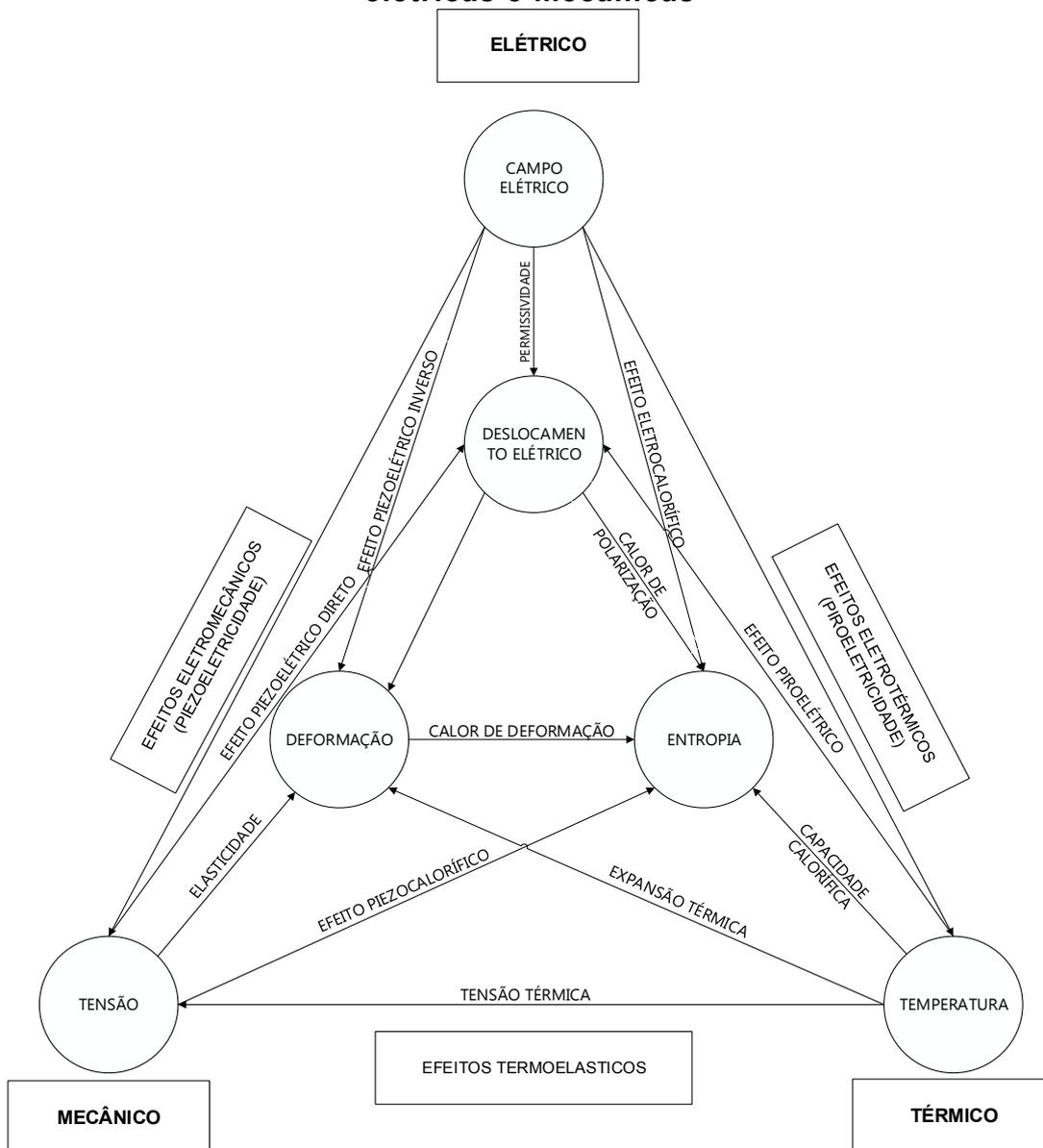
$$[S] = [s^E][T] + [d]^T[E] \quad (2.8)$$

Sendo D o tensor de a densidade de fluxo elétrico, S o tensor de deformação mecânica, s^E a constante elástica do material, d a constante dielétrica do material, e ϵ^T representa a constante de permissividade dielétrica (BAPTISTA, 2010) .

Segundo Ibrahim (1991), um tensor é um objeto geométrico representando uma propriedade física inerente a um material, e, portanto é independente de um sistema de coordenadas utilizado; os componetes do tensor é que devem seguir as leis de transformação, para uma determinda mudança no sistema de coordenadas. Essa lei de transfomação, que forma a base para definição exata de um tensor. Os tensores, normalmente, são utilizados para relacionar propriedades físicas demonstradas em diagramas clássicos, exceto em propriedades magnéticas, essa propriedades são ilustradas na Figura 2.13. O efeito piezelétrico é conhecido como tensores de terceira ordem.

Os parâmetros químicos e tensoriais estão listados na Tabela 2.2 para alguns tipos de materiais piezelétricos.

Figura 2. 12- Diagrama das relações entre propriedades físicas, térmicas, elétricas e mecânicas



(Fonte: IBRAHIM, 1991)

Tabela 2. 2- Propriedade de alguns materiais piezelétricos

Material	Formula	Origem	Constante piezelétrica (pm/V ou pC/N)
Fosfato de di-hidrogenofosfato de amônio (ADP)	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	Único cristal	$d_{36}=48$
Titanato de bário	BaTiO_3	Único cristal	$d_{15}=587$
Titanato de bário	BaTiO_3	Cerâmica policristalina	$d_{15}=270$
Titanato zirconato de chumbo (PZT)	$\text{PbZr}_{0,6}\text{Ti}_{0,4}\text{O}_3$	Cerâmica policristalina	$d_{33}=117$
Lantânio titanato zirconato de chumbo (PLZT)	$\text{Pb}_{0,925}\text{La}_{0,5}\text{Zr}_{0,56}\text{Ti}_{0,44}\text{O}_3$	Cerâmica policristalina	$d_{33}=545$
Fluoreto de polivinilideno	$(\text{CH}_2\text{CF}_2)_n$	Filme orientado	$d_{31}=28$
Dihidrogenofosfato de potássio	KH_2PO_4	Único cristal	$d_{36}=21$
Quartzo	SiO_2	Único cristal	$d_{11}=2.3$
Óxido de zinco	ZnO	Único cristal	$d_{33}=12$

(Fonte: ABRAHAMS; NASSAU, 1991)

Os materiais piezelétricos são utilizados em transdutores, dispositivos que convertem energia elétrica em deformação mecânica, ou vice-versa. Dentre as aplicações que empregam materiais piezelétricos incluem-se as agulhas de fonógrafos, os microfones e os dispositivos de geração de imagem ultrassônica. Em uma agulha fonográfica, à medida que a agulha se desloca pelas canaletas em um disco, uma variação de pressão é imposta sobre o elemento piezelétrico que está localizado na agulha, a qual é transformada em um sinal elétrico e amplificado antes de ir para o alto-falante.

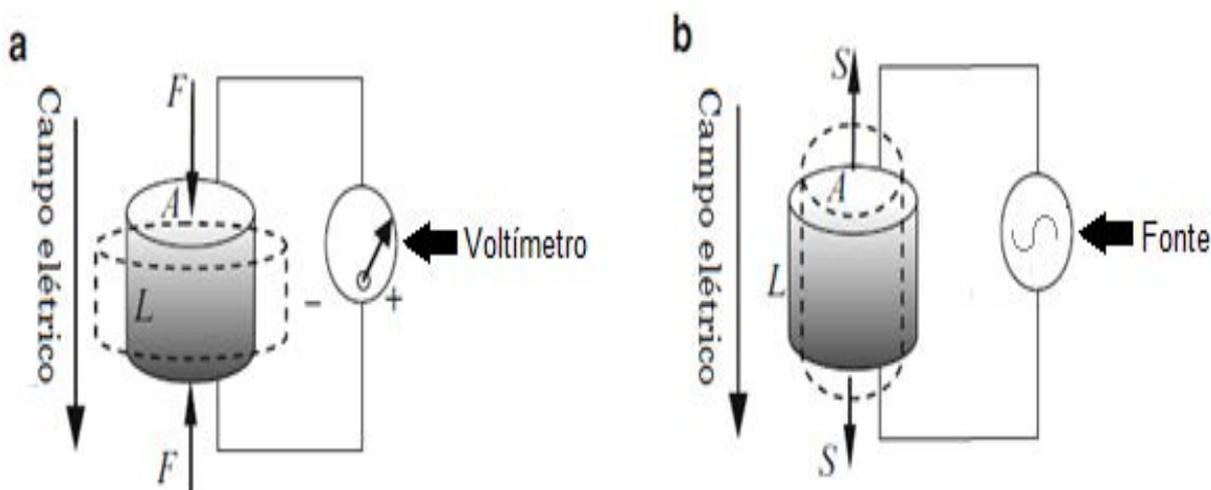
Entre os materiais piezelétricos incluem os titanatos de bário e chumbo, o zirconato de chumbo (PbZrO_3), o di-hidrogenofosfato de amônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) e o quartzo. Todos esses materiais são caracterizados por baixo grau de simetria. O comportamento piezelétrico de uma amostra policristalina pode ser aprimorado mediante o aquecimento do material acima da sua temperatura Curie, seguido pelo seu resfriamento até a temperatura ambiente, na presença de um forte campo elétrico (CALLISTER, 2006).

Os irmãos Curie observaram que, como reação a uma pressão mecânica, os cristais se tornam eletricamente polarizados. Subsequentemente, a tensão e compressão geram tensões de polaridades opostas que são proporcionais à força aplicada conforme demonstrado na Figura 2.12-a. A tensão aplicada na estrutura do piezelétrico pode ser demonstrada com a Equação (2.9):

$$V_s = -g \left(\frac{L}{A} \right) \cdot F \quad (2.9)$$

Sendo que g é referido constante de tensão piezelétrica ou carga piezelétrica e L e A são, respectivamente, o comprimento e área de secção transversal da estrutura e F a força aplicada no material piezelétrico.

Figura 2. 13- Demonstração esquemática do efeito piezelétrico



(a) direta e (b) inversão do efeito piezelétrico.
(Fonte: JALILI, 2010).

Verificou-se mais tarde que, quando um campo elétrico é aplicado a um material piezelétrico, que leva à deformação mecânica do material, conforme ilustrado na Figura 2.12-b, esse efeito é considerado piezelétrico inverso. Essa relação pode ser demonstrada a partir da expressão (2.10).

$$S = a \left(\frac{1}{L} \right) V_a \quad (2.10)$$

Sendo que α é referido como uma constante de esforço piezelétrico e V_a sendo a fonte de tensão elétrica externa. Como indicado nas configurações apresentadas na Figura 2.12, o campo elétrico é paralelo à direção de polarização. Como anteriormente mencionado, o efeito piezelétrico é anisotrópico, e por isso existe apenas em materiais com cristalografia assimétrica (JALILI, 2010).

Segundo Tichý *et al* (2010), ao estudar o efeito piezelétrico podemos tomar tanto o estudo macroscópico (fenomenológico) quanto a abordagem microscópica (atomística). Ambas as visualizações foram importantes para o desenvolvimento de problemas físicos. O estado sólido da relação entre piroeletricidade e piezoeletricidade foi objeto de muitas discussões, este trabalho foi feito principalmente por Voigt.

A teoria da piezeletricidade fenomenológica baseia-se nos princípios da termodinâmica formulada por Lord Kelvin. Só em 1890, Waldemar Voigt publicou a primeira formulação completa e rigorosa da piezeletricidade. A formulação usada na física dos cristais de hoje deve muito ao monumental trabalho publicado por Voigt em 1910, com o título "*Lehrbuch der Kristallphysik*", como também a teoria dos potenciais termodinâmicos para piezeletricidade.

Os fundamentos da teoria termodinâmica dos dielétricos elásticos e de piezeletricidade foram estabelecidas por Toupin, Eringen, Hajicek, Grindlay e outros pesquisadores (TICHÝ e GAUTSCH, 1980) na segunda metade do século XX. Atualmente, tanto a pesquisa experimental e teórica dos efeitos não-lineares em dielétricos estão sendo continuados para desenvolver materiais cada vez mais eficientes (KITTINGER e TICHÝ, 1992; NELSON, 1979).

Segundo TICHÝ *et al* (2010), no final dos anos quarenta, Ginzburg e Devonshire produziram uma fenomenológica descrição das propriedades piezelétricas e ferroelétricas. Uma teoria termodinâmica explica o comportamento de cristais; podem ser ferroelétricas obtidas considerando a forma de expansão da energia livre como uma função da polarização. A teoria de Landau é a teoria complementar do crítico fenômeno. Oferece a possibilidade de trabalhar fora das propriedades universais de sistemas, passando por transições de fase apenas com base em considerações de simetria.

Algumas classes de transições estruturais foram exaustivamente investigadas durante as décadas passadas, como transições ferroelétricas e ferroelásticas que, na fase reconstitutiva foram deixadas de lado no quadro teórico anterior. Constituem o tipo mais fundamental e generalizada de transições estruturais existentes na natureza (TOLEDANO; DMITRIEV, 1996).

A primeira tentativa de estabelecer uma teoria atômica da piezeletricidade foi considerada no trabalho de Lord Kelvin. Usando a teoria de polarização elétrica de Debye Schrödinger, tentou determinar a ordem de grandeza das constantes piezelétricas de turmalina e quartzo. No entanto, o primeiro a ter sucesso nasceu em 1920 em seu livro "*Lattice-dynamical theory*". Um modelo atômico para a explicação, qualitativamente a polarização de quartzo piezelétrico, foi descoberto pelo método de raios X, análise feita por Bragg e Gibbs em 1925 (TICHÝ *et al*, 2010).

2.3.1. Piroeletricidade

Segundo Tichý *et al* (2010), a aplicação da tensão mecânica total influencia em mudanças na polarização vetorial, devido ao efeito piezelétrico e a polarização espontânea ser também dependente da temperatura. A variação da polarização espontânea, gerada pelo aumento ou diminuição de temperatura, é chamada de efeito piroelétrico ("piro" significa incêndio em idioma Grego). O efeito inverso, isto é, a variação da temperatura gerada pelo campo elétrico externo, é chamado de efeito eletro-calórico. Embora ambos os efeitos sejam propriedades piezelétricas inseparáveis (de forma semelhante ao efeito piezelétrico direto e inverso), e os materiais constantes que descrevem os efeitos sejam iguais, ambos os efeitos são geralmente chamados de piroelétricos.

Todo material piroelétrico é necessariamente um piezelétrico. As condições de contorno da amostra livre mecanicamente, com eletrodos encurtados, são assumidas por campo elétrico constante e estresse mecânico.

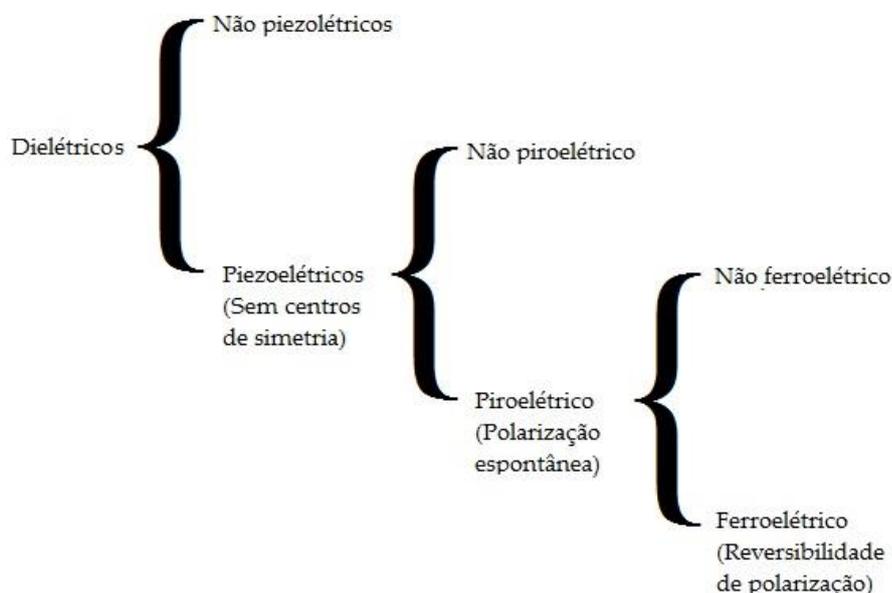
As mudanças de temperatura na constante de rede estão conectadas com as mudanças dos momentos de dipolo elementares e, portanto, resultam na polarização. O efeito piroelétrico total para dielétricos lineares na temperatura ambiente é apenas ligeiramente dependente da temperatura. O coeficiente piroelétrico diminui com a diminuição da temperatura e atinge valor muito baixo perto da temperatura de 0 K (ZHELUDEV, 1975).

Aplicações do efeito piroelétrico incluem principalmente o próprio piroelétrico (infravermelho), sensores de detecção, visualização, controles remotos para equipamentos de áudio/vídeo, sensores de proximidade, sensores de abertura de porta automática, equipamentos para militares de visão noturna e câmeras térmicas para monitoramento dos campos de temperatura (TICHÝ et al, 2010).

2.3.2. Ferroeletricidade

De acordo com Ibrahim (1991), um material ferroelétrico se caracteriza por apresentar polarização elétrica espontânea dentro de certo intervalo de temperatura, sendo passivo de reversão de direção do dipolo em ação a um campo elétrico. O nome ferroeletricidade é uma analogia ao ferromagnetismo e foi utilizado pela primeira vez por Müller em 1935, disposto conforme a Figura 2.14.

Figura 2. 14- Classificação dos dielétricos.



(Fonte: WADA, 1987)

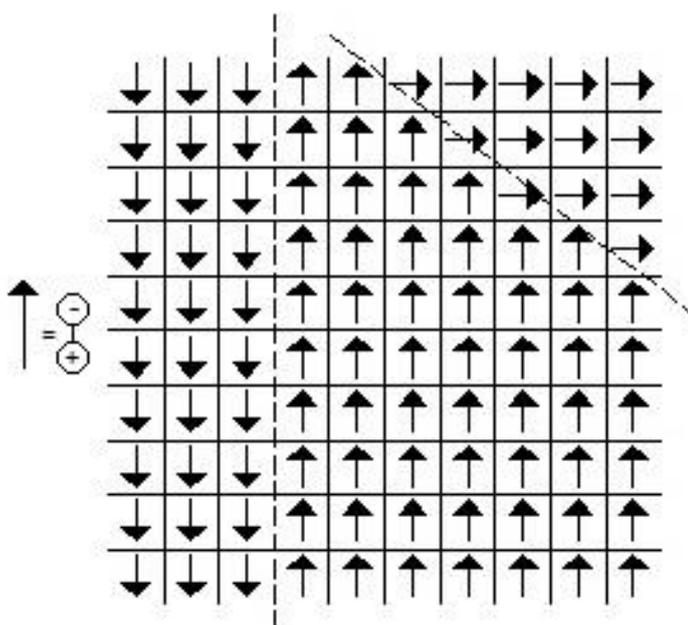
O material ferroelétrico está classificado no grupo dos dielétricos que se caracterizam pela habilidade de armazenar carga elétrica. Uma propriedade fundamental de todos os dielétricos é a polarização de suas partículas elementares quando sujeitas à ação de um campo elétrico externo. Define-se por polarização

elétrica o deslocamento reversível dos centros de cargas positivas e negativas na direção do campo elétrico externo aplicado. Esse assunto fica mais bem explicado com o auxílio de vetores de campo, de tal forma que em cada dipolo elétrico existe uma separação entre uma carga positiva e negativa. Na realidade, um momento de dipolo elétrico é um vetor que está direcionado da carga negativa para a carga positiva (REIS, 2009).

Materiais ferroelétricos contêm muitos domínios de alinhamentos, conforme a Figura 2.15 e são orientados ao acaso. Ao se aplicar um campo elétrico externo, as fronteiras entre os domínios vão se mover de forma que os orientados mais favoráveis se expandem e os orientados menos favoráveis se contraem, dando origem a uma polarização total não nula que aumenta rapidamente, como mostra a parte *O-A* da curva do diagrama *P-E* da Figura 2.16. Como o alinhamento tende a um valor máximo, atinge-se uma situação na qual o aumento adicional no campo elétrico melhora ligeiramente; corresponde à parte *A-B* da curva na Figura 2.16 (VLACK, 1989).

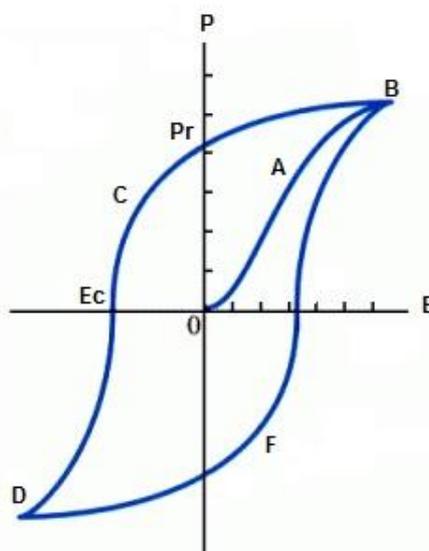
A remoção do campo elétrico externo não elimina totalmente os alinhamentos ferroelétricos, assim, assume-se uma polarização remanente, mantendo a polarização de *Pr*. A aplicação de campos cíclicos produz um ciclo de histerese, tal o percurso *BCDFB* da curva *P-E*. O comportamento do ferroelétrico é semelhante ao ferromagnético (VLACK, 1970).

Figura 2. 15- Domínios ferroelétricos



(Fonte: VLACK, 1970)

Figura 2. 16- Ciclo de Histerese ferroelétrica

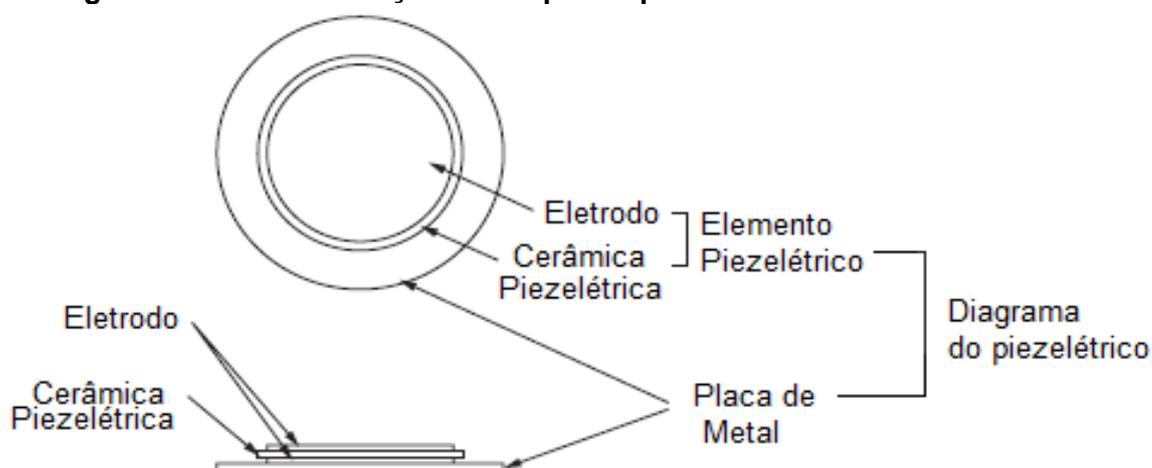


(Fonte: VLACK, 1970)

2.3.3. Cápsulas piezelétricas de baixo custo

Segundo Barreto Neto *et al* (2012), as campainhas piezelétricas são dispositivos de baixo custo que podem ser utilizados com sucesso como atuadores em micro bombas de diafragma. Essas cápsulas piezelétricas (titanato zirconato de chumbo-PZT) são construídas como ilustrado na Figura 2.17. O material piezelétrico é colado sobre uma fina lâmina de latão, e que estão disponíveis em diferentes tamanhos e espessuras.

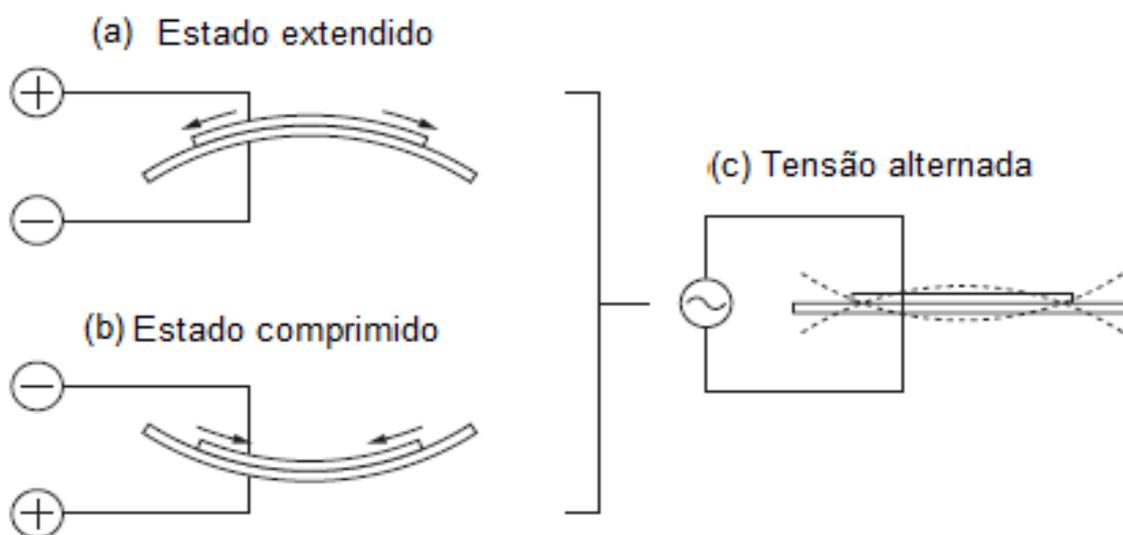
Figura 2. 17- Construção da cápsula piezelétrica de baixo custo



(Adaptado de: MURATA, 2014)

Para um elemento piezelétrico deformado, a distorção se expande numa direção radial. E o diafragma piezelétrico se curva no sentido ilustrado na Figura. 2.18 (a). A placa de metal, geralmente de latão, ligado ao elemento piezelétrico não se expande. Inversamente, quando o elemento piezelétrico diminui, o diafragma se curva no sentido mostrado na Figura 2.18 (b). Assim, quando à tensão alternada é aplicada através dos eletrodos, a flexão mostrada na Figura 2.18 (a) e Figura 2.18 (b) é cíclica, ilustrada na Figura 2.18 (c), produz ondas sonoras que se propagam no ar (MURATA, 2014).

Figura 2. 18- Sistema de oscilação da cápsula piezelétrica de baixo busto

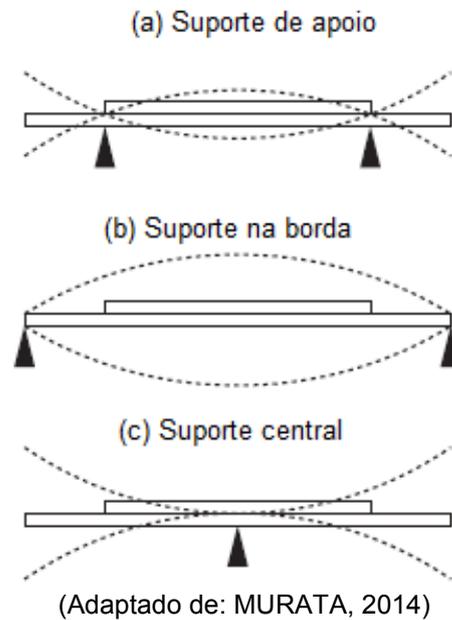


(Adaptado de: MURATA, 2012)

Em geral, a faixa de frequência audível do homem é de cerca de 20 Hz a 20 kHz. As faixas de frequência de 2kHz a 4kHz são mais facilmente ouvidas. Por esta razão, a maioria dos componentes sonoros piezelétricos são utilizados nesta gama de frequências, e a frequência de ressonância (f_0) é geralmente selecionada no espectro.

De acordo com Murata (2014) a faixa da frequência central pode ser alterada conforme a Figura 2.19, e expressas pela Equação 2.11, 2.12 e 2.13 respectivamente (a), (b) e (c).

Figura 2. 19- Sistema de suporte



$$f_0 = \frac{0,412t}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \sigma^2)}} \quad (2.11)$$

$$f_0 = \frac{0,233}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \sigma^2)}} \quad (2.12)$$

$$f_0 = \frac{0,172t}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \sigma^2)}} \quad (2.13)$$

Sendo que f_0 é a frequência de ressonância, t é a espessura, E o módulo de Young, ρ é a densidade do material, σ é a razão de Poisson e r o raio da placa de metal. A cápsula piezelétrica apresenta baixo custo uma ampla gama de pesquisa e fácil acesso. São geralmente utilizadas como companhias em telefones entre outro dispositivo que necessitam a emissão de áudio em circuitos eletrônicos de baixa potência.

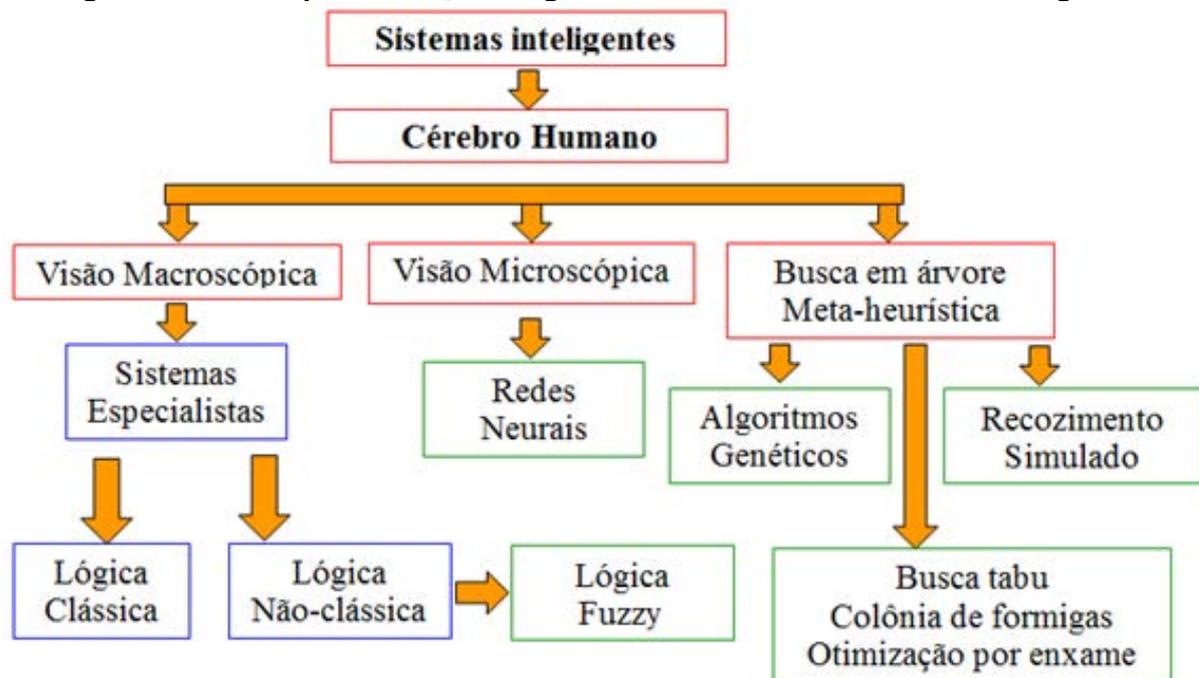
2.4. Sistemas Inteligentes

Segundo Charniak e McDermott (1985), inteligência computacional ou artificial é o estudo das faculdades mentais através do uso de modelos computacionais. A partir da segunda guerra mundial e com o avanço no desenvolvimento tecnológico dos computadores, essa área de conhecimento sofreu grande desenvolvimento e, atualmente, os sistemas inteligentes estão organizados de acordo com a Figura 2.20.

Sistemas inteligentes (SI) fornecem um método padronizado para resolução de problemas importantes e de bastante complexidade a fim de obter resultados consistentes e confiáveis ao longo do tempo (BYRD; HAUSER, 1991).

Segundo Krishnakumar (2003), na perspectiva da computação, a inteligência de um determinado sistema pode ser caracterizada por sua habilidade, adaptabilidade, memória, aprendizagem, dinâmica temporal, raciocínio e capacidade de gerenciar informações incertas e imprecisas.

Figura 2. 20- Representação organizacional dos sistemas inteligentes



2.4.1. Redes Neurais Artificiais

Em 1943, Warren McCulloch e Walter Pitts juntos desenvolveram o primeiro modelo do neurônio artificial. McCulloch era psiquiatra e neuroanatomista e Pitts um matemático recém-formado. Após estudos, publicaram o trabalho chamado “*A Logical*

Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity”, cujo foco principal era a descrição de um modelo artificial de um neurônio e a apresentação de técnicas de aprendizado e capacidades computacionais. Donald Hebb, em 1949, desenvolveu o primeiro trabalho, que se tem notícia, sobre a ligação direta com o aprendizado. Hebb notou a facilidade de aprendizado das redes neurais através da variação dos pesos de entrada, propondo uma teoria que explica o aprendizado em nodos biológicos, baseados no reforço das ligações sinápticas entre os nodos excitados, hoje denominada regra de Hebb (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 2000).

Várias topologias (estruturas) e algoritmos de aprendizagem foram desenvolvidos por diversos pesquisadores através de modelos matemáticos fundamentados no neurônio biológico. Após vários trabalhos pioneiros, diversas pesquisas na época foram desenvolvidas com Redes Neurais Artificiais (RNAs) até que em 1969, a neurocomputação sofreu um revés, com a publicação do livro *“Perceptrons – an introduction to computational geometry”* escrito por Minsky & Papert (1969). O livro demonstrou de forma clara os limites da RNAs, constituídas de apenas uma única camada, em aprender o relacionamento entre as entradas e saídas de funções lógicas como o XOR (ou-exclusivo), a demonstração de Minsky & Papert provando a impossibilidade de as RNAs realizarem a classificação de padrões para classes não lineares separáveis com uma única camada de neurônio (EYNG, 2008).

Após a publicação do livro, pouquíssimas pesquisas foram desenvolvidas. Então, surgiram os algoritmos de predição e a proposição das redes recorrentes em funções de energia, com a retomada das pesquisas na área de redes neurais artificiais. No final da década de 80, após o impulso inicial, os pesquisadores voltaram a mostrar interesse nesta área. O desenvolvimento de computadores com maior capacidade de processamento e a criação de algoritmos de otimização eficientes e robustos facilitaram os estudos e desenvolvimentos das RNAs, modelo do neurônio artificial ilustrado na Figura 2.21.

Com a publicação do livro *“Parallel distributed processing”* em 1986 por Rumelhart, Hinton e Williams, os autores desenvolveram um algoritmo que permitia o ajuste dos pesos em uma rede com várias camadas, solucionando assim o antigo problema do aprendizado do padrão XOR (ou-exclusivo). Esta solução foi denominada *backpropagation*, despertando o interesse definitivo nas redes neurais artificiais. As potenciais áreas de aplicações estão relacionadas às engenharias e ciências (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010), como segue:

a) Aproximador universal de funções: consiste em mapear o funcionamento entre variáveis de um sistema, cujas modelagens convencionais são de difícil obtenção;

b) Controle de processos: consiste em identificar ações de controle que permitem a qualidade, eficiência e segurança de processo. Aplicados em robótica, aeronaves, eletrodomésticos;

c) Classificação de padrões: consiste em associar padrões de amostras para uma das classes previamente definidas. Aplicadas em reconhecimento de voz, imagem, etc. O problema deve possuir um conjunto discreto e conhecimento das possíveis saídas desejadas;

d) Agrupamento de dados (clusterização): A identificação e detecção de similaridades entre diversos padrões para o agrupamento;

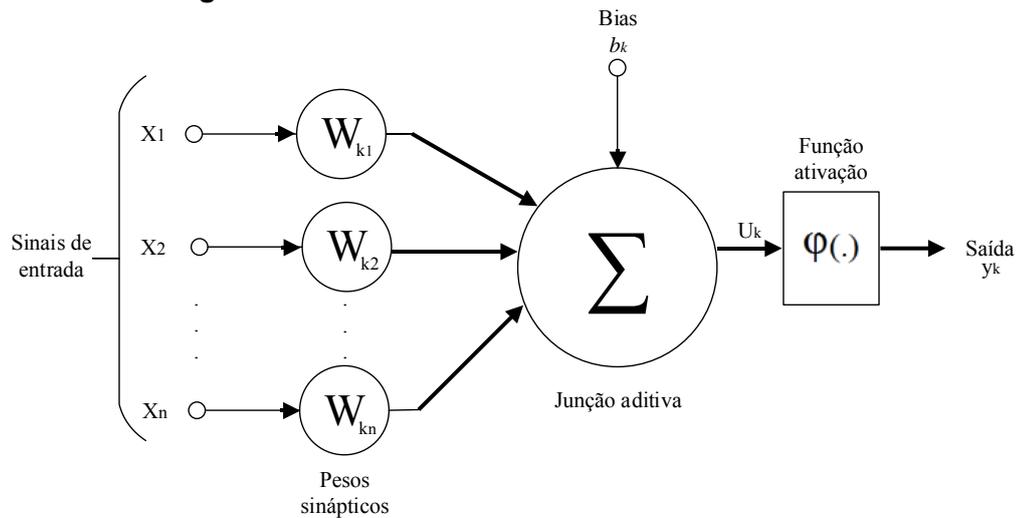
e) Sistemas de previsão: têm o objetivo de estimar valores futuros de um determinado processo considerando medidas prévias observadas em seu domínio.

Nas aplicações enquadram-se: a previsão de séries temporais, previsões de mercados financeiros, previsões climáticas, etc;

f) Otimização de sistemas: tende a minimizar ou maximizar uma função custo obedecendo as restrições impostas pelo problema, sendo tratados com otimização restrita, programação dinâmica e otimização combinatorial;

g) Memória Associativas: a recuperação de padrões corretos mesmo se os elementos que o constituem se apresentam de forma incerta ou imprecisa. Aplicados a processamento de imagens, transmissão de dados e identificação de caracteres, etc.]

Figura 2. 21- Modelo não linear de neurônio



(Fonte: HAYKIN, 2001)

O conjunto de *sinapses* é caracterizado por pesos, um sinal X_j na entrada na sinapse j conectada ao neurônio k é multiplicado pelo peso sináptico W_{kj} . A junção aditiva tem a função de somar os sinais de entrada, ponderados pelo peso ou força das sinapses; as operações constituem um combinador linear. A função de ativação ou função restritiva, limita a amplitude do sinal de saída a um valor finito, normalizado com a saída do neurônio no intervalo unitário fechado $[0, 1]$ ou $[-1, 1]$. A inclusão do *bias*, representado por b_k , tem o efeito de aumentar ou diminuir a entrada da função de ativação, dependendo se negativo ou positivo (HAYKIN, 2001).

Segundo Carrara (1997), nem sempre na modelagem do neurônio há dinâmica linear. Aplicando uma integral de convolução no valor de entrada, na forma das equações de 2.14 a 2.19:

$$z(t) = \int_{-\infty}^t h(t - t') \bar{x}(t') dt' \quad (2.14)$$

Sendo que, \bar{x} constitui em uma somatória das entradas ponderadas, dado por:

$$\bar{x}(t) = \sum_{i=1}^n w_i x_i(t) \quad (2.15)$$

Sendo que x_i , $i = 1, \dots, n$, constituem as entradas do neurônio e o somatório através dos pesos w_1, w_2, \dots, w_n .

Com a transformação $h(t)$ representa uma função exponencial, resultando em uma convolução válida para sistemas contínuos, com α_0 e α_1 constantes:

:

$$\alpha_0 \dot{z}(t) + \alpha_1 z(t) = \bar{x}(t), \quad (2.16)$$

Válida somente para sistemas contínuos, com α_0 e α_1 constantes. Em caso discreto, a integral resulta:

$$\alpha_0 z(t+1) = \bar{x}(t) - \alpha_1 z(t), \quad (2.17)$$

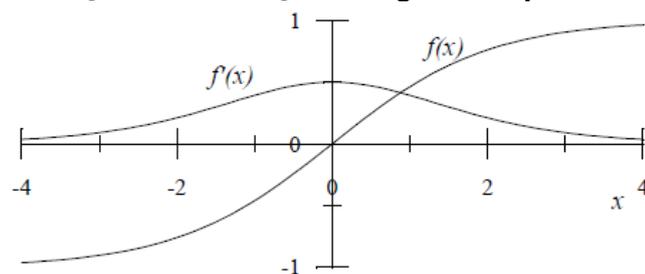
Sendo o atraso introduzido pela dinâmica linear fica evidente. Sistemas contínuos não-lineares utilizam funções contínuas e não lineares, e agrupam na saída de forma linear. Esta função é denominada função sigmoide:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\alpha x}} \quad (2.18)$$

E as variações como a função tangente hiperbólica, cujo gráfico é apresentado na Figura 2.22.

$$f(x) = \frac{1 - e^{-\alpha x}}{1 + e^{\alpha x}} \quad (2.19)$$

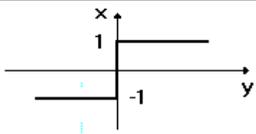
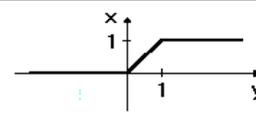
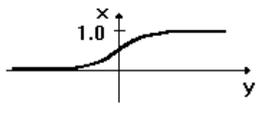
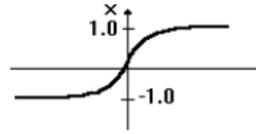
Figura 2. 22- Função de ativação tangente hiperbólica e derivada



(Fonte: CARRARA, 1997).

Existem diversas ferramentas já implementadas no *software* MATLAB que permitem a construção e o treinamento de redes com diversas configurações (DEMUTH e BEALE, 1992; NORGAARD, 1995; 1996). Segundo Tafner (1995,1999), em alguns modelos de redes, o nível da saída reproduzido pela função de ativação, pode ser a soma ponderada, podendo ser caracterizadas como sigmas ou ríspidas. Assim, o neurônio não reproduz o efeito no neurônio seguinte se o valor de ativação for inferior ao valor mínimo para sua ativação, conforme representado na Figura 2.23.

Figura 2. 23- Funções de ativação conhecidas

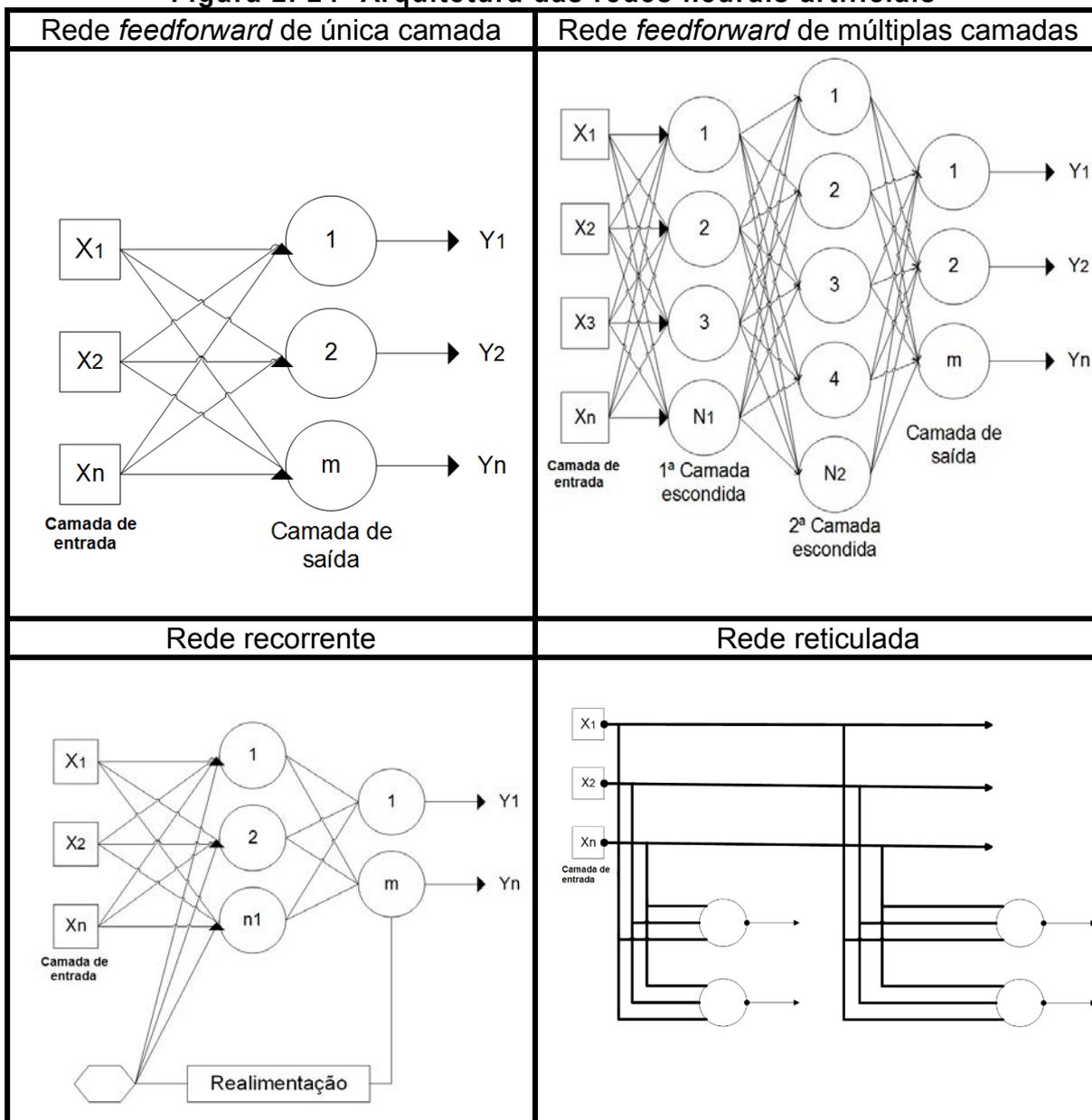
Hard Limiter (limite ríspido)	Ramping Function (função de rampa)
 $y = f(x) = \begin{cases} -1 & x < 0 \\ 1 & x \geq 0 \end{cases}$	 $y = f(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ x & 0 \leq x \leq 1 \\ 1 & x > 1 \end{cases}$
Sigmoide Function (função sigma)	Sigmoide Function (função sigma)
 $y = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	 $y = f(x) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{1+x} & x \geq 0 \\ -1 + \frac{1}{1-x} & x < 0 \end{cases}$

(Fonte: TAFNER, 1995)

O aprendizado de rede é capaz de ser supervisionado e pode ser feito de duas maneiras; *off-line* ou *on-line*. No primeiro caso os dados de treinamento não mudam. Se necessária a inclusão de novos dados, um novo banco de dados deve ser elaborado, contendo os dados antigos acrescidos dos novos. Já no modo *on-line*, a rede se adapta com o processo constantemente, sendo atualizada continuamente (EYNG, 2008).

As redes neurais possuem várias arquiteturas, definindo a maneira em que os neurônios estão dispostos um em relação do outro, como apresentado na Figura 2.24.

Figura 2. 24- Arquitetura das redes neurais artificiais

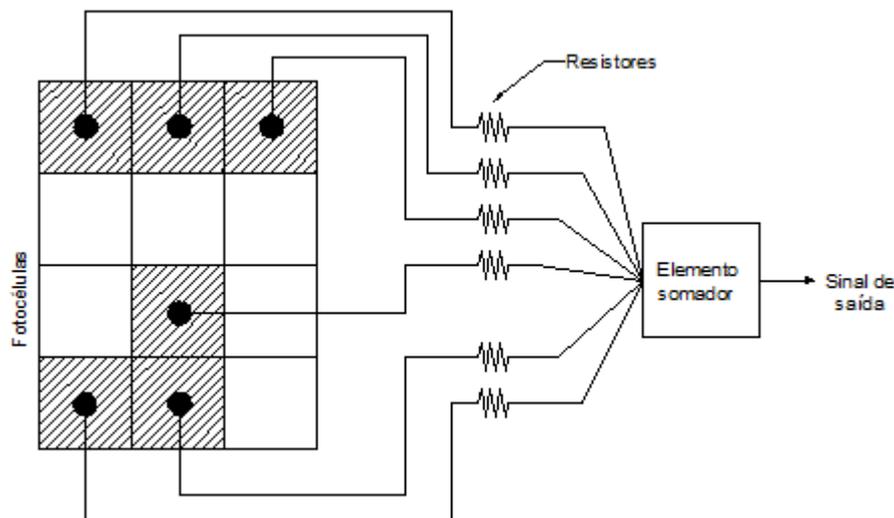


a) Rede *Perceptron* de camada única

Segundo Silva; Spatti; Flauzino (2010), a idealização do *Perceptron* foi desenvolvida por Rosenblat em 1958, como sendo a configuração mais simples de uma rede neural artificial, cujo o foco era implementar um modelo computacional inspirado na retina, com o desenvolvendo de um elemento de percepção eletrônica de sinais, tendo como uma de suas aplicações a identificação de padrões geométricos.

O exemplo demonstrado na Figura 2.25 mostra a concepção inicial do *Perceptron*, cujos sinais elétricos, adquiridos de fotocélulas mapeando padrões geométricos eram ponderados por elementos resistivos sintonizáveis, assim ajustando-se durante o treinamento da rede. Desta forma o *Perceptron* reconhecia diferentes padrões geométricos (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Figura 2. 25- Modelo do Perceptron para reconhecimento de padrões.



(Fonte: SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010)

O *Perceptron* é constituído por um neurônio não-linear, seguindo o modelo do neurônio de McCulloch-Pitts de um único neurônio.

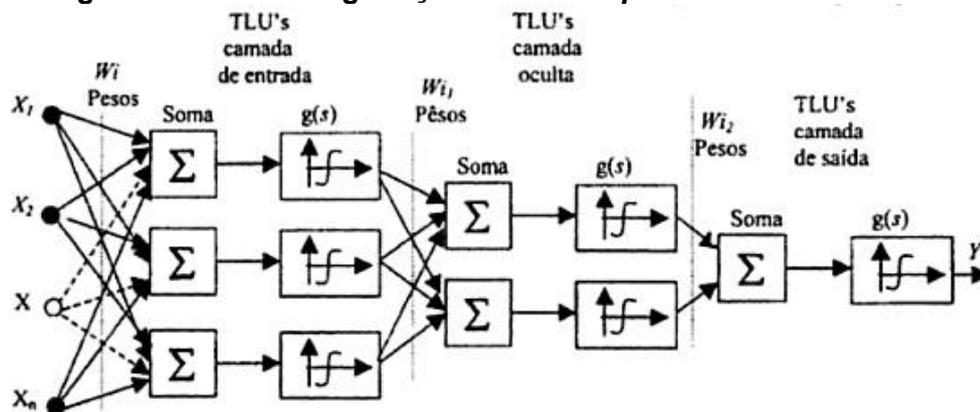
b) Rede *Perceptron* Multicamadas

Segundo Silva Filho e Abe (2001), devido às dificuldades encontradas pelo modelo inicial do *Perceptron*, foi necessário um aperfeiçoamento, transformando-o em múltiplas camadas. O *Perceptron* passou a ser configurado utilizando os neurônios dispostos em várias camadas onde os sinais têm um único fluxo, sendo direcionados das camadas de entrada para as camadas de saída. As camadas de entrada, constituídas de neurônios que recebem os primeiros sinais, são ligadas às camadas intermediárias ou camadas ocultas. As camadas recebem os sinais das camadas de entrada, analisa-os e direciona-os para as camadas de saída.

As redes em múltiplas camadas, ilustradas na Figura 2.26, inovaram porque trouxeram a possibilidade de serem treinadas através de um algoritmo. As variáveis

de entrada podem assumir qualquer valor real e a saída foi aproximada ao modelo do neurônio biológico por uma função de ativação $g(s)$.

Figura 2. 26- Configuração do *Perceptron* multicamadas



(Fonte: SILVA FILHO; ABE, 2001)

As entradas x_1, x_2, \dots, x_n e os pesos das conexões $W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{in}$ são valores reais, tanto positivos como negativos. Quando as entradas trazem características de disparar um neurônio o seu respectivo peso é positivo. Se a característica for inibir o disparo, então o seu peso será negativo. O Processo de treinamento da rede para o reconhecimento de padrões é obtido pela variação dos valores dos pesos das conexões e dos limites.

c) Método de Levenberg Marquardt

O método Levenberg-Marquardt é uma modificação do método Gauss-Newton, no sentido de que usa a estratégia de região de confiança ao invés da estratégia de busca linear. A direção de busca do método Levenberg-Marquardt é definida como a solução das equações:

$$(\mathbf{J}(x_k)^T \mathbf{J}(x_k) + \eta_k \mathbf{I}) p_k^{LM} = -\mathbf{J}(x_k)^T \mathbf{r}(x_k) \quad (2.20)$$

Na Equação (2.20) η_k é um escalar não-negativo.

Pode-se mostrar na Equação (2.21) que, dado $\eta_k > 0$ existe $\Delta = \Delta(\eta_k) > 0$ tal que o vetor p_k^{LM} é a solução do subproblema restrito.

$$\min_{p \in R^n} \frac{1}{2} \|\mathbf{J}(x_k)p + \mathbf{r}(x_k)\|_2^2 \quad (2.21)$$

Para que as condições sejam satisfeitas na Equação (2.22) deve:

$$\|p\|_2 \leq \Delta \quad (2.22)$$

O uso de técnicas baseadas em região de confiança evita uma das fragilidades do método Gauss-Newton, isto é, adequado quando o jacobiano $\mathbf{J}(x)$ tem posto deficiente, ou está próximo disto. Outra vantagem é que quando o passo de Gauss-Newton é muito longo, o passo de Levenberg-Marquardt está próximo de estar em uma direção do gradiente de descida (GAVA, 2007).

2.4.2. Sistemas Nebulosos

A teoria da lógica nebulosa é um sistema de inteligência artificial que se consiste na resolução de problemas complexos mediante mecanismos que tratem informações imprecisas. Na teoria clássica de conjuntos, um elemento pertence a um determinado agregado, segundo uma função característica para mapear um universo com critérios que fornecem respostas discretas baseadas em fronteiras e conjuntos definidos. Como exemplo, seja um conjunto universo U e um subconjunto S , tal que S está contido em U , e x um elemento pertencente em S . Define-se uma função característica sendo: $U \rightarrow \{0,1\}$ como na Equação 2.23:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \in S \\ 1, & \text{se } x \notin S \end{cases} \quad (2.23)$$

Observa-se que a função $\mu(x)$, define dois conjuntos assumindo valores discretos e, o universo U mapeado. A teoria dos conjuntos *Fuzzy*, introduzida por Zadeh (1965), surgiu mediante a necessidade de manipulação de dados imprecisos. São conjuntos cuja característica se dá por não possuir fronteiras bem delimitadas

como na teoria clássica. A abordagem proposta, se deu pela função característica generalizada, que pode assumir infinitos valores situados entre 0 e 1. Assim sugerindo que alguns elementos são mais representativos que outros. Por definição, o grau de pertinência que representa valores entre 0 e 1, sendo o nível 0 usado para representar total impertinência e 1, total pertinência de uma classe de dados (BENINI, 2007).

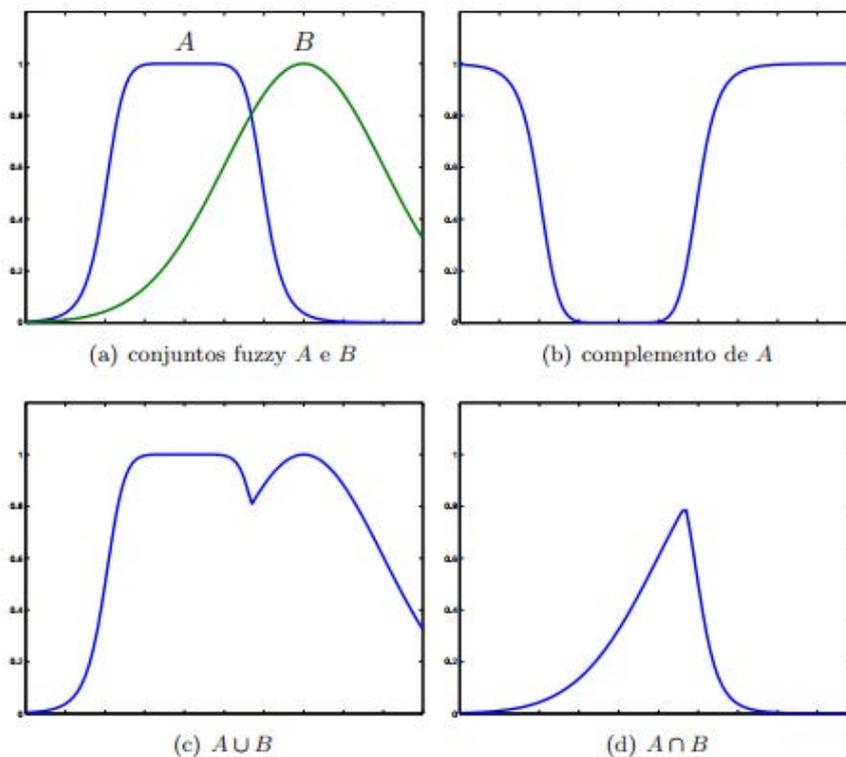
O modelo proposto no ano de 1965 por Zadeh, idealiza uma função de inclusão flexibilizada, indicando que um elemento pode pertencer mais em um dado conjunto que outro elemento. Por conseguinte, definiu-se a função de pertinência de um determinado conjunto *Fuzzy*, que pondera as características originadas dos elementos em estudo. Sendo assim, a lógica *Fuzzy* pode ser aplicada em problemas com alto grau de complexidade, como também em problemas em que resultados aproximados são aceitáveis (BENINI, 2007).

Sendo uma ferramenta de inteligência artificial, a lógica nebulosa possui mecanismos de modelagem de conhecimento de senso comum e ambíguo, robustez e transigir falhas. Diferentemente das redes neurais artificiais, um sistema puramente nebuloso não possui técnicas de aprendizado. E a definição de pertinência é baseada na avaliação do usuário desse sistema.

a) Conjuntos *Fuzzy* e suas funções de pertinência

Um conjunto *Fuzzy*, F de um discurso U é representado por uma função pertinência $\mu: U \rightarrow [0,1]$, que associa um elemento $x \in U$, a um número $\mu(x)$. Cujo intervalo varia de 0 a 1, continuamente, e também representa grau de pertinência de x em F . As operações básicas entre os conjuntos *Fuzzy* são de complemento, união e intersecção, ilustrado na Figura 2.27. As funções pertinentes se caracterizam por uma classe restrita de funções tais como: linear por partes (triangular, Figura 2.28 e trapezoidal, Figura 2.29), sigmoide (Figura 2.30), gaussiana (Figura 2.31) e *singleton* (Figura 2.32), de acordo com Mozelli (2008).

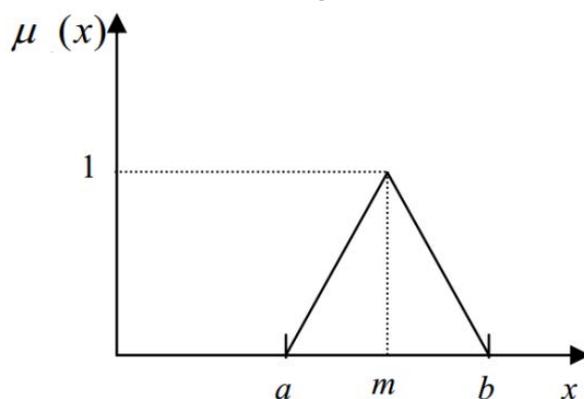
Figura 2. 27-Operações com conjuntos Fuzzy



Dado um universo U , tem-se uma função de pertinência $\mu(x)$, em que a , b e m pertencem ao conjunto U com $a \leq m \leq b$, definida pela Equação 2.24. Sendo a , b e m , ilustrados na Figura 2.28 e 2.29.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}; & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}; & \text{se } x \in [m, b] \\ 0; & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (2.24)$$

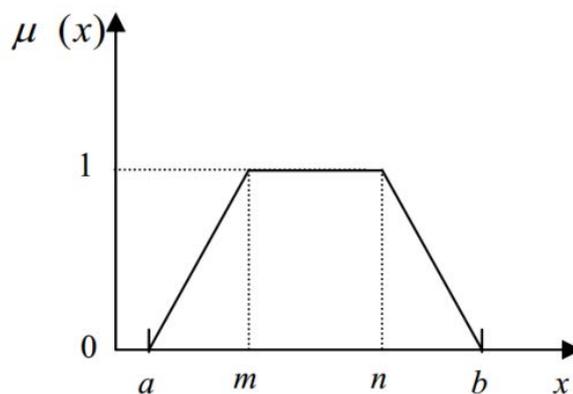
Figura 2. 28-Função de pertinência triangular



Dado um universo U , tem-se uma função de pertinência $\mu(x)$, em que a, b, m e x pertencem ao conjunto U com $a \leq m, n \leq b$ e $m \leq n$ definida na Equação 2.25.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & \text{se } x < a \\ \frac{x - a}{m - a}; & \text{se } x \in [a, m] \\ 1; & \text{se } x \in [m, n] \\ \frac{b - x}{b - n}; & \text{se } x \in [n, b] \\ 0; & \text{se } x > b \end{cases} \quad (2.25)$$

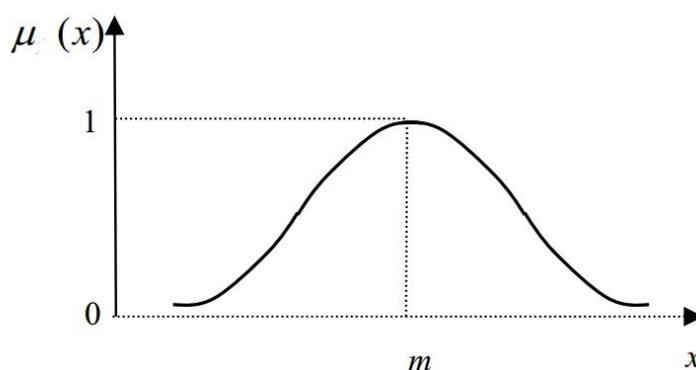
Figura 2. 29- Função de pertinência trapezoidal



A equação que rege a função de pertinência gaussiana é dada, para k maior que 1, dado na Equação 2.26.

$$\mu(x) = e^{-k(x-m)^2} \quad (2.26)$$

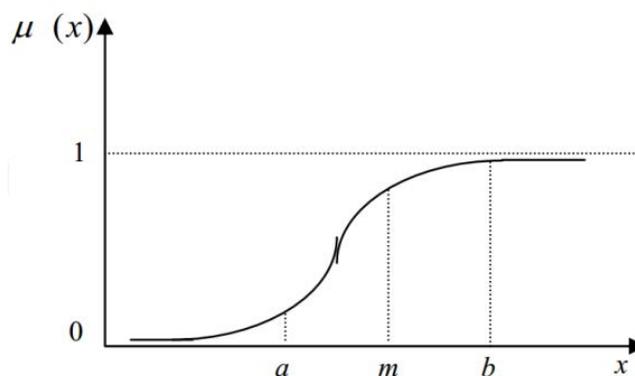
Figura 2. 30- Função de pertinência gaussiana



A função sigmóide, sendo m , o ponto médio entre o intervalo $[a,b]$, é dada segundo a Equação 2.27.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0; & \text{se } x \leq a \\ 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2; & \text{se } x \in [a, m] \\ 1 - 2 \cdot \left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2; & \text{se } x \in [m, b] \\ 1; & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (2.27)$$

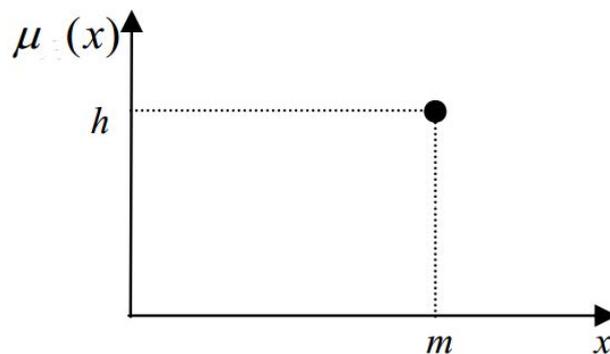
Figura 2. 31- Função de pertinência sigmoide



A função pertinência *singleton*, ou função unitária, é dada pela Equação 2.28.

$$\mu(x) = \begin{cases} h, & \text{se } x = m \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.28)$$

Figura 2. 32- Função de pertinência unitária



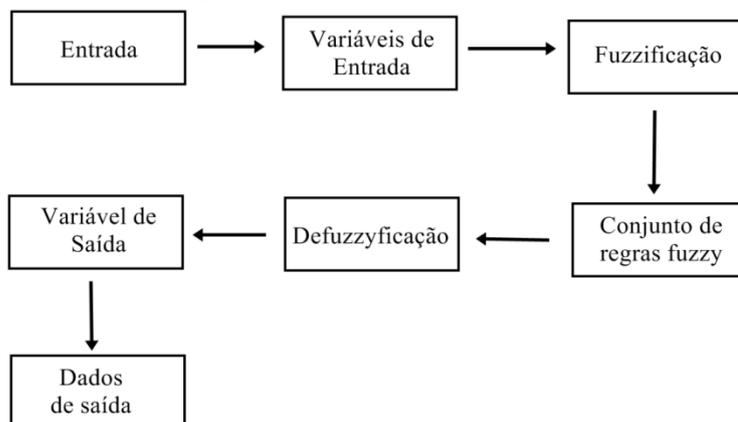
b) Sistema de inferência Fuzzy

Os sistemas de inferência mapeiam as entradas de dados, convertendo-as em saídas precisas. São baseados em um conjunto de regras *Fuzzy*, que possuem quatro componentes principais, sendo: fuzzyficador, a base de conhecimento, o método de inferência e o defuzzyficador. A primeira etapa do processo de fuzzyficar, coloca os padrões nas entradas do sistema nebuloso, gerados pelas variáveis linguísticas. Esses dados são os conceitos de um dado problema e definidos pelo usuário do sistema *Fuzzy*. A função de pertinência translada as variáveis linguísticas para o sistema. Já a base de conhecimento, consiste em um conjunto de regras, condensando o conjunto de funções pertinência e declarações linguísticas definidas pelo usuário, fornecendo uma descrição qualitativa do sistema em estudo.

Segundo Mozelli (2008), o conhecimento é baseado em regras compostas pelos termos antecedente e consequente, como também pelas operações nebulosas ilustradas na Figura 2.33. O antecedente é composto por um conjunto envolvendo variáveis *Fuzzy* e expressões linguísticas que, quando satisfeitas, mesmo que parcialmente, determinam o processamento da parte consequente através da inferência *Fuzzy*. Sendo assim, o método da inferência aplica o raciocínio *Fuzzy* para

obter uma saída. A etapa do defuzzyficador traduz a saída para um valor numérico (BENINI, 2007).

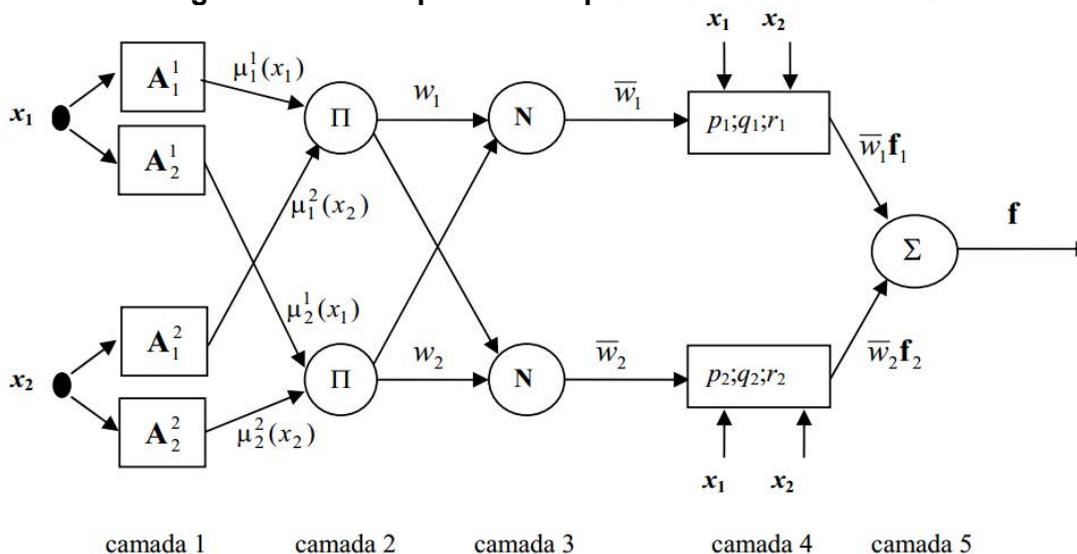
Figura 2. 33- Modelo Fuzzy



c) Sistema de inferência Adaptativo neuro-fuzzy (ANFIS)

Os sistemas neuro-fuzzy, propostos por Jang (1993), combinam a capacidade de aprendizado das redes neurais artificiais, com os padrões de treinamento, juntamente com a capacidade Fuzzy de interpretação linguística. Como exemplo, a arquitetura ANFIS é composta por cinco camadas, conforme ilustrada na Figura 2.34.

Figura 2. 34- Arquitetura típica do sistema ANFIS



Na primeira camada do sistema *ANFIS*, os nós são constituídos pelos conjuntos Fuzzy A_i^j e associados às entradas x_i . A saída de cada nó é a pertinência do valor x_i no conjunto Fuzzy. De acordo com Benini (2007), os nós podem ser ajustados e as funções de pertinência podem ser definidas desde que elas sejam diferenciáveis. Na segunda camada, os nós não são adaptativos e não podem ser ajustados, tendo como saída o produto dos sinais de entrada da primeira camada. Conforme ilustra a Figura 2.34, cada saída w_j , corresponde à intensidade do disparo de uma regra. Assim, a saída se caracteriza pela Equação 2.29.

$$w_j = \prod_{i=1}^2 \mu_i^j, \text{ para } j = 1,2 \quad (2.29)$$

Para a terceira camada, a saída desse nó é normalizada para um pré-processamento de defuzzyficação. 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 2.30.

$$\bar{w}_j = \frac{w_j}{\sum_{i=1}^2 w^i} = \frac{w_j}{w_1 + w_2}, \text{ para } j = 1,2 \quad (2.30)$$

A camada de número quatro, é adaptativa e seus parâmetros p , q e r correspondem a parte consequente de cada regra do modelo. Desta maneira, 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 2.31.

$$f_j = \bar{w}_j(p_j x_1 + q_j x_2 + r_j) \quad (2.31)$$

Para a quinta camada, constituída por um único nó não adaptativo, calcula-se a saída do sistema e promove a defuzzyficação do sistema. Sendo assim, a saída é definida como a soma de todas as saídas parciais representado na Equação 2.32 (BENINI, 2007).

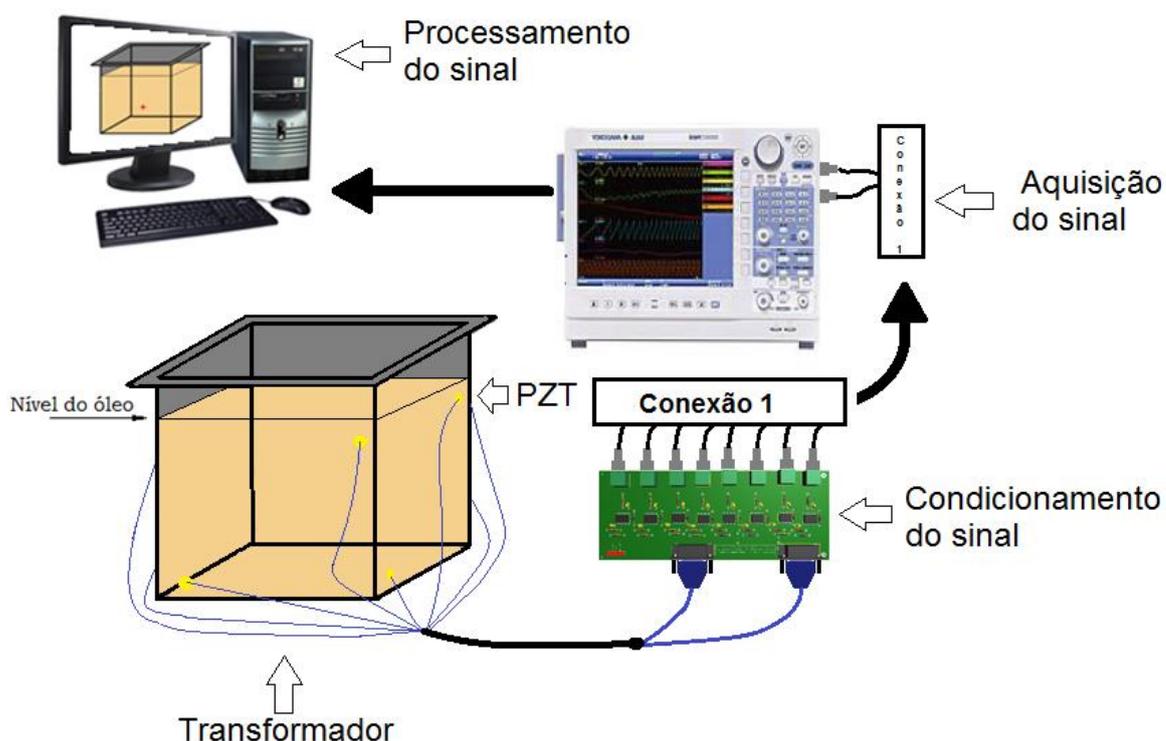
$$f = \sum_{j=1}^2 f_j \quad (2.32)$$

A aprendizagem do sistema *ANFIS* tem dois conjuntos que devem 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. Sendo assim, o treinamento é realizado por duas etapas. Primeiramente, os parâmetros dos antecedentes permanecem fixos e utiliza-se o método dos mínimos quadrados como regra. Na segunda etapa, com os consequentes constantes e fixos, utiliza o algoritmo *backpropagation* sobre o parâmetro do precedente.

CAPÍTULO 3- METODOLOGIA PROPOSTA

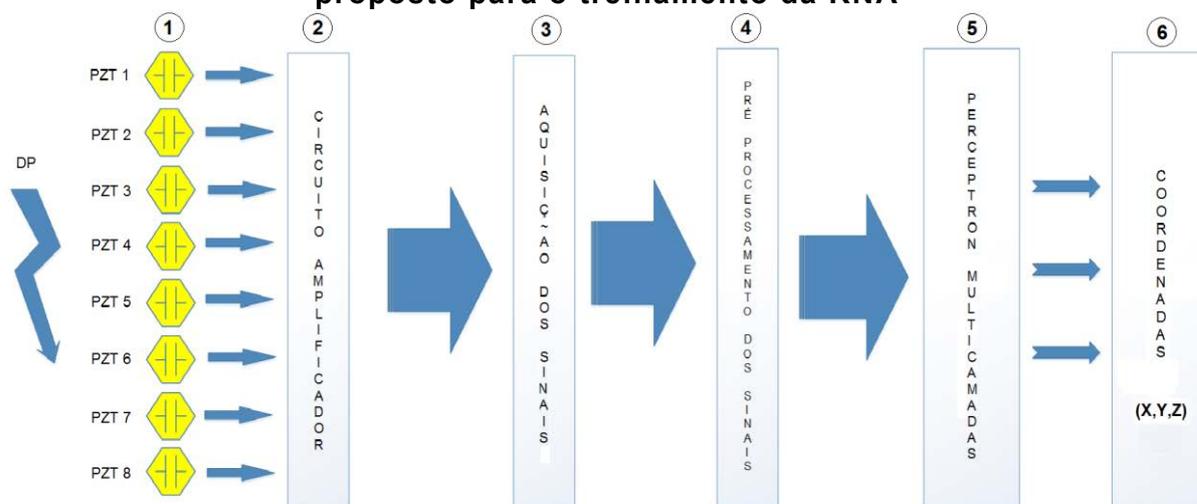
Neste capítulo serão abordados os aspectos metodológicos e materiais para a localização de descargas parciais em transformadores de potência por meio de cápsulas piezelétricas do tipo PZT de baixo custo e sistemas inteligentes. A Figura 3.1 mostra o diagrama esquemático do sistema proposto neste trabalho.

Figura 3. 1- Diagrama esquemático do sistema proposto



Para a localização de uma descarga parcial (DP) foi proposta uma abordagem sem a técnica de triangulação do sinal oriundo da mesma, visto que a utilização deste método envolve maior complexidade computacional. Foram feitos três ensaios: contendo 21, 100 e 72 pontos de DPs respectivamente. A Figura 3.2 resume, em forma de blocos funcionais, a abordagem proposta neste trabalho.

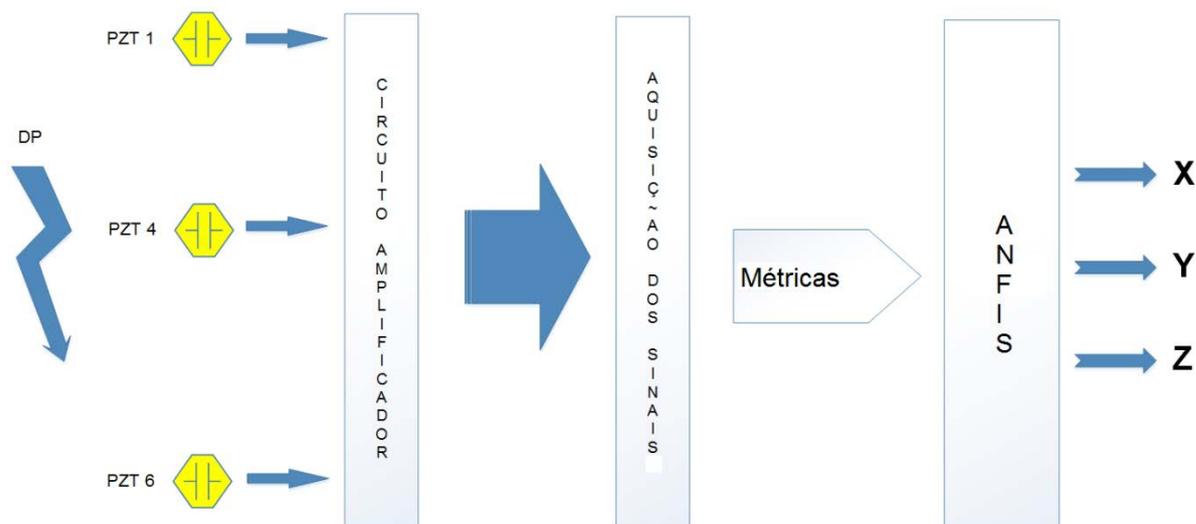
Figura 3. 2- Blocos funcionais sistematizando a estrutura do trabalho proposto para o treinamento da RNA



A Figura 3. 2 apresenta a sequência do fluxo do sinal. (1) Os sensores piezelétricos, conhecidos comercialmente como PZT-5A, substituindo os titanato de bário ou *Navy Type II "Soft"* (BUCHANAN, 2004), captam o sinal oriundo da vibração mecânica gerada pela descarga parcial (DP). (2) A tensão elétrica gerada pelo PZT, como resultado da deformação mecânica do sensor, advinda da DP, é de baixa amplitude, somente alguns *mili-Volts* (mV). Com isso, para um sinal mais rico de detalhe é necessário um ganho. (3) Os sinais, já condicionados na etapa anterior, foram registrados no disco rígido do oscilógrafo. Métricas foram utilizadas nesses dados para o treinamento da rede neural artificial do tipo *Perceptron* multicamadas e representadas nas etapas (4) e (5) da Figura 3. 2. Assim, obtendo os valores referentes ao ponto em que a DP foi gerada em relação à coordenada retangular (6).

Utilizando sistemas nebulosos, exemplificados na Figura 3.3, a sequência do fluxo do sinal é o mesmo da Figura 3.2 até a etapa 3. A etapa seguinte é a utilização do sistema *ANFIS*, com cada saída e sua respectiva coordenada retangular.

Figura 3. 3- Blocos funcionais sistematizando a estrutura do trabalho proposto para utilizar ANFIS



Nos próximos subcapítulos serão abordados, de forma acurada, os métodos empregados neste trabalho.

3.1. Geração das descargas parciais

Com o intuito de gerar uma descarga parcial no interior do transformador foi necessário desenvolver um aparato para criar as condições ideais para ocorrer a DP, como visto na Figura 3.4.

Figura 3. 4- Transformadores de potencial e transformador regulador de tensão utilizados no experimento



O diagrama elétrico, na Figura 3.5, ilustra o circuito elétrico utilizado para gerar DPs no tanque do transformador. Os transformadores de potencial adquiridos para o experimento são do fabricante Alston com as descrições na Tabela 3.1. Também foi somado ao circuito um transformador regulador de tensão ou variac de 0 a 240 Vca. Uma resistência elétrica de níquel-cromo foi integrada ao terminal de baixa tensão do transformador de potencial (TP) para limitar a passagem de alta corrente elétrica, tanto no enrolamento de alta quanto no de baixa tensão. Desta maneira, a impedância elétrica do enrolamento do secundário do TP será refletida no primário, conforme a Equação (3.1).

Tabela 3. 1- Parâmetros dos transformadores

Grupo 2	Tensão máxima: 15 Kv	Potência térmica: 400 VA
Tensão do primário: 8.050 V	Tensão do secundário: 115 V	Relação: 70:1

$$Z_{\text{primário}} = a^2 * Z_{\text{secundário}} \quad (3.1)$$

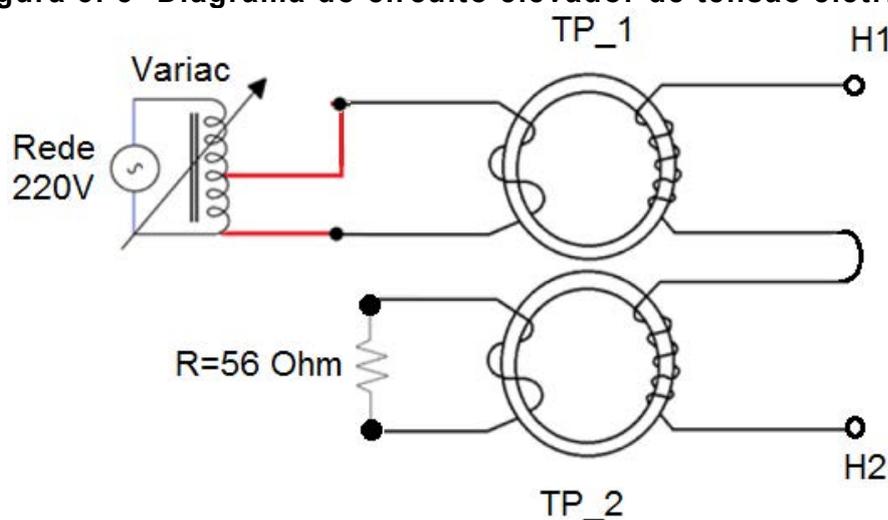
Sendo:

a é a relação de transformação;

$Z_{\text{primário}}$ é a impedância elétrica no enrolamento de alta tensão do TP;

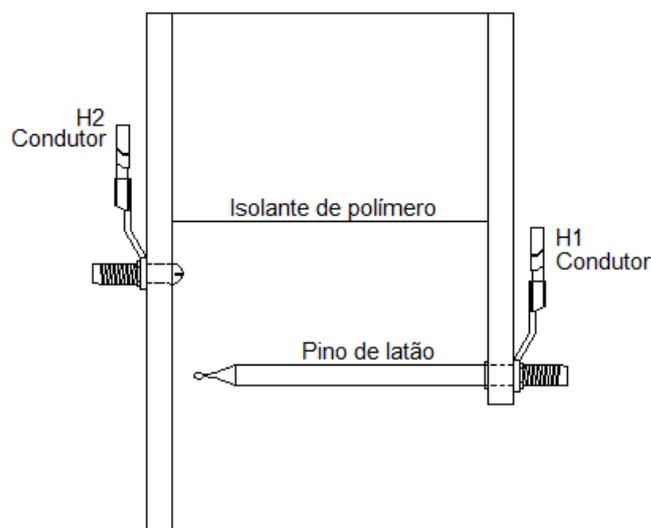
$Z_{\text{secundário}}$ é a impedância elétrica no enrolamento de baixa tensão do TP.

Figura 3. 5- Diagrama do circuito elevador de tensão elétrica



Há um eletrodo, com *gap* de aproximadamente 2 mm de distância, entre o pino de latão adjacente ao barramento de cobre. H1 e H2 são os terminais de saída da alta tensão dos transformadores de potencial. Um condutor elétrico para média tensão foi conectado ao eletrodo de acordo com a Figura 3.6.

Figura 3. 6- Eletrodo confeccionado para gerar descargas parciais.



Entre *H1* e *H2* foi inserida uma ponta atenuadora para medição alta tensão da marca Instrutherm modelo PPA-440, ilustrada na Figura 3.7. Não só para medir a tensão instantânea, como também, para identificar quando ocorrida uma DP, gerada pelo aparato de elevação da tensão da rede elétrica.

Figura 3. 7- Ponta atenuadora para medição de alta tensão



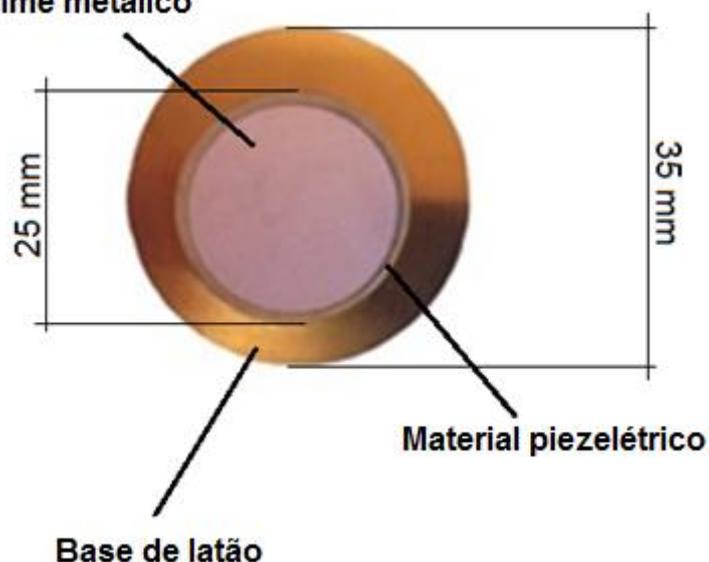
(Fonte: INSTRUTHERM, 2014)

Com o intuito de medir a corrente elétrica que circula no momento em que as DPs ocorrem, utilizou-se uma garra de efeito Hall do fabricante Tektronix modelo A662 (TEKTRONIX, 2014), com faixa de frequência 0 kHz a 100 kHz.

3.2. Estudo da resposta da cápsula piezelétrica a partir de um impulso unitário

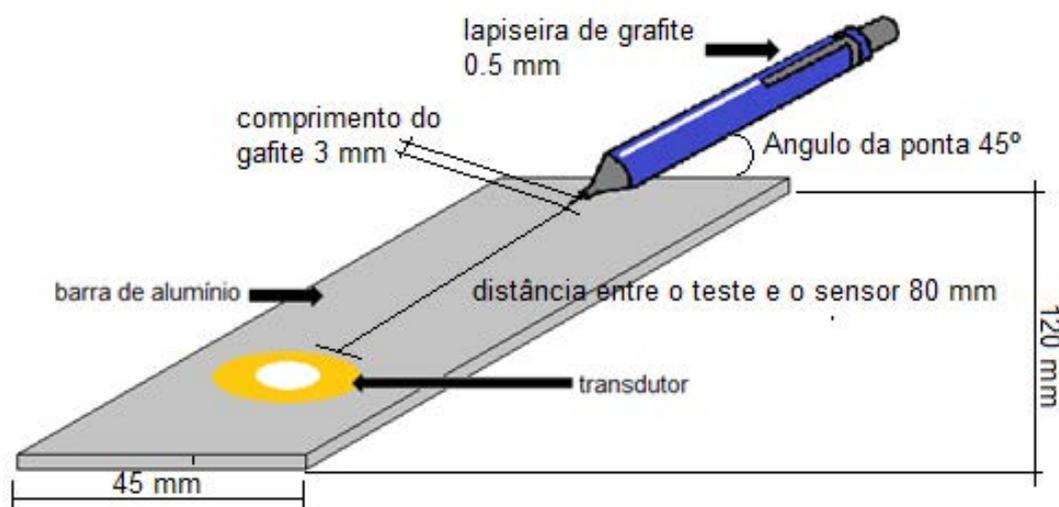
A cápsula piezelétrica PZT apresentada na Figura 3.8, proposta neste trabalho, é muito utilizada em circuitos eletrônicos, como campainhas ou simples sensores de impactos. Neste contexto, fez-se necessário o estudo da resposta obtendo a faixa de frequências alcançada pelo dispositivo. Uma vez que para validar a aplicação de um sensor é imprescindível que apresente respostas às frequências do sinal desejado. A importância da utilização do método conhecido como teste de quebra do grafite, demonstrado na Figura 3.9, é alcançar um sinal mais próximo de um impulso unitário teórico, já que é muito difícil sua obtenção na prática, pois o sinal impulso descrito na literatura é um sinal com amplitude infinita e com tempo de duração quase inexistente.

Figura 3. 8- Cápsula piezelétrica de baixo custo



O impulso criado na estrutura é estabelecido através de uma fonte mecânica, ou seja, o mesmo princípio da descarga parcial. Apesar de uma DP ser um fenômeno elétrico, quando ocorre gera uma onda mecânica que se propaga por uma estrutura.

Figura 3. 9- Representação do teste da quebra do grafite em uma barra de alumínio



Ao pressionar a lapiseira contra a estrutura em que o sensor está devidamente fixado, um diferencial de potencial elétrico se estabelecerá nos terminais do transdutor e, assim que ocorrer a ruptura do grafite, quase que instantaneamente essa tensão elétrica será extinta. Desta forma conseguimos gerar um impulso no laboratório de maneira simples e robusta, pois não depende de dispositivos eletrônicos que podem sofrer interferências e comprometer o resultado final. Esse teste é consolidado pelo padrão ASTM E976-10 (2010). A importância de conhecer a faixa de frequência do transdutor neste trabalho é devida às frequências que ocorrem em uma descarga parcial, conforme citado no Capítulo 2.

Para o teste direto na cápsula piezelétrica de baixo custo é necessário utilizar um filtro *antialiasing*, já que o sinal é impulsivo e, portanto, apresenta teoricamente frequências tendendo ao infinito. No presente trabalho, o filtro que garante a teoria da amostragem é garantido pelo amplificador de instrumentação INA128p, que responde até 2 MHz. Portanto, para garantir o teorema de Nyquist, utilizou uma taxa de aquisição de 10 MS/s. O sensor de emissão acústica do fabricante PASA (*Physical Acoustic South America*), modelo R151-AST de acordo com o manual técnico (PASA, 2014), demonstrando na Figura 3.10, foi desenvolvido para detecção de emissões acústicas que ocorrem em frequências superiores a 20 kHz, e podendo chegar a 500 kHz. Os dados coletados por este dispositivo serão adotados com valores de referência para validar a eficiência da cápsula piezelétrica proposta nesta dissertação.

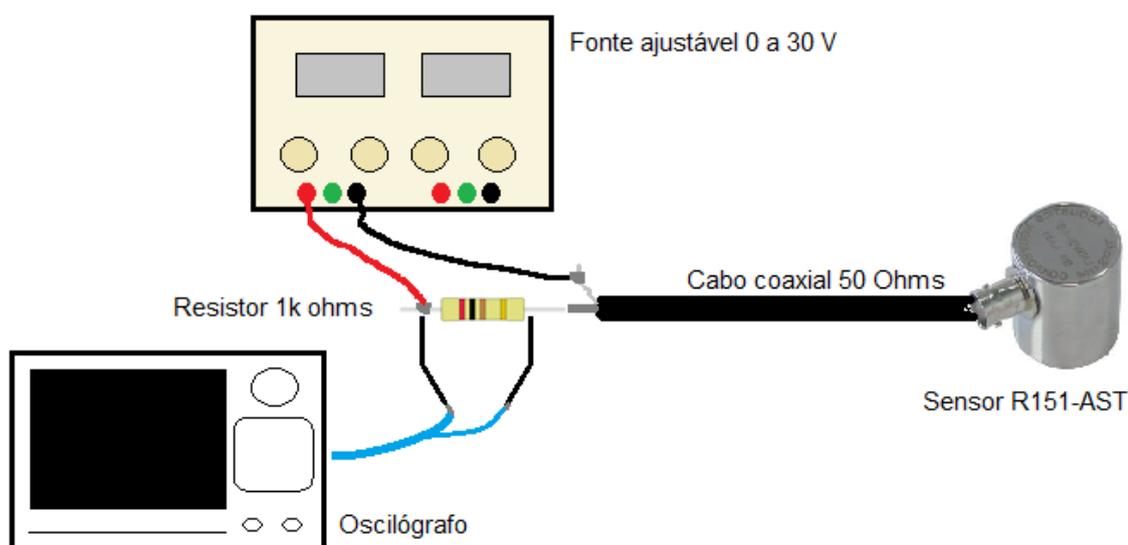
Figura 3. 10- Sensor de emissão acústica modelo R151-AST



(Fonte: PASA, 2014)

O diagrama esquematizado na Figura 3.11, ilustra a forma de conexão do sensor para adquirir o sinal. Como o sensor da PASA contém circuito eletrônico interno ou, conhecido como sensor ativo, é necessário utilizar uma fonte de tensão externa. A tensão elétrica parametrizada para este experimento foi de 18 Vcc e um resistor de 1 k Ω , a fim de obter a diferença de potencial elétrico nos terminais do resistor. Isso se fez necessário, pois o R151-AST utiliza em sua saída a interface *IEPE* (*Integrated Electronic Piezoelectric Accelerometer*), ou seja, a saída do sensor é uma fonte de corrente modulada. Para a condução do sinal e alimentação do dispositivo empregou-se um cabo coaxial de 50 Ω ao oscilógrafo da marca *Yokogawa* modelo DL-850, com uma taxa de aquisição de 10 MS/s.

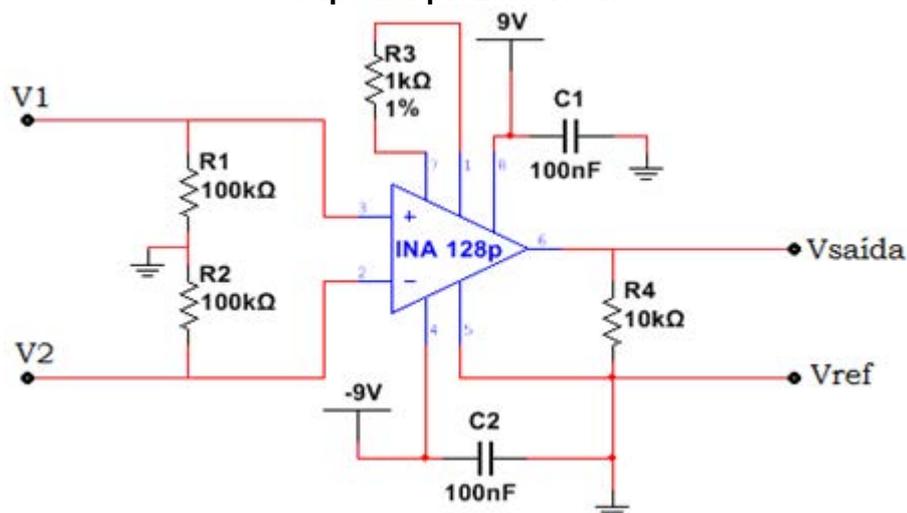
Figura 3. 11- Circuito de alimentação e aquisição de dados do sensor R151-AST



3.3. Sistema de condicionamento e aquisição dos sinais

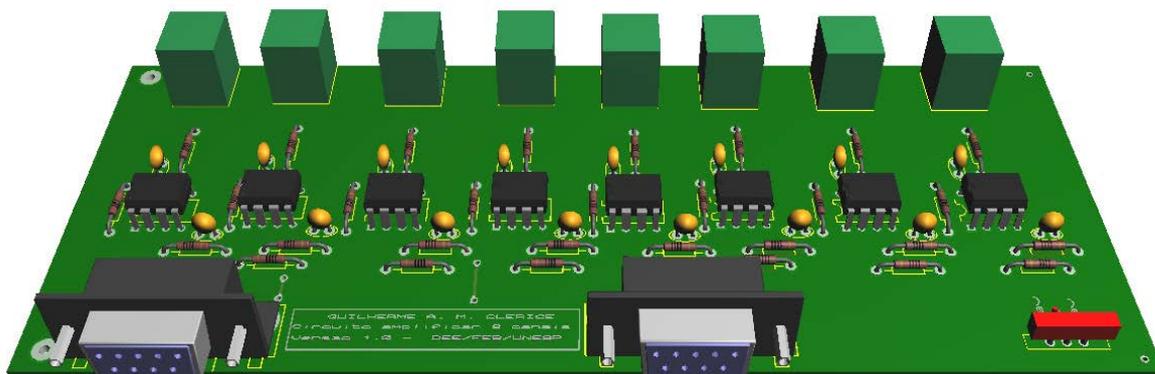
Para melhor resolução dos dados oriundos dos sensores PZTs foi desenvolvido um circuito eletrônico amplificador representado na Figura 3.12. A amplificação dos sinais foi feita através do amplificador de instrumentação INA128p do fabricante *Texas Instruments*. Na Figura 3.12, R3 é o resistor que determina o ganho do amplificador em conformidade com o manual técnico do CI. Portanto, necessita ser um resistor de precisão. O ganho escolhido para o condicionamento do sinal obtido através da cápsula piezelétrica foi de 34 dB. Ganhos maiores, de acordo com a frequência máxima de 400 kHz da descarga parcial, entram na região não linear do circuito integrado (CI), ocorrendo erros de leitura e interpretação dos sinais.

Figura 3. 12- Diagrama eletrônico do circuito amplificador para cada cápsula piezelétrica.



Para a amplificação dos oito sinais necessários neste trabalho, foi confeccionada uma placa de circuito impresso contendo oito amplificadores de instrumentação, conforme a Figura 3.13. As interligações entre sensores e a placa, foram feitas por meio de cabos blindados, todos de mesmo tamanho, para que as impedâncias e capacitâncias não influenciassem nos resultados. Após adquirir o sinal, foi utilizada a ferramenta de manipulação dos dados arquivados no disco rígido do oscilógrafo de extensão WDF para o *software* MATLAB.

Figura 3. 13- Circuito impresso com oito amplificadores INA128p

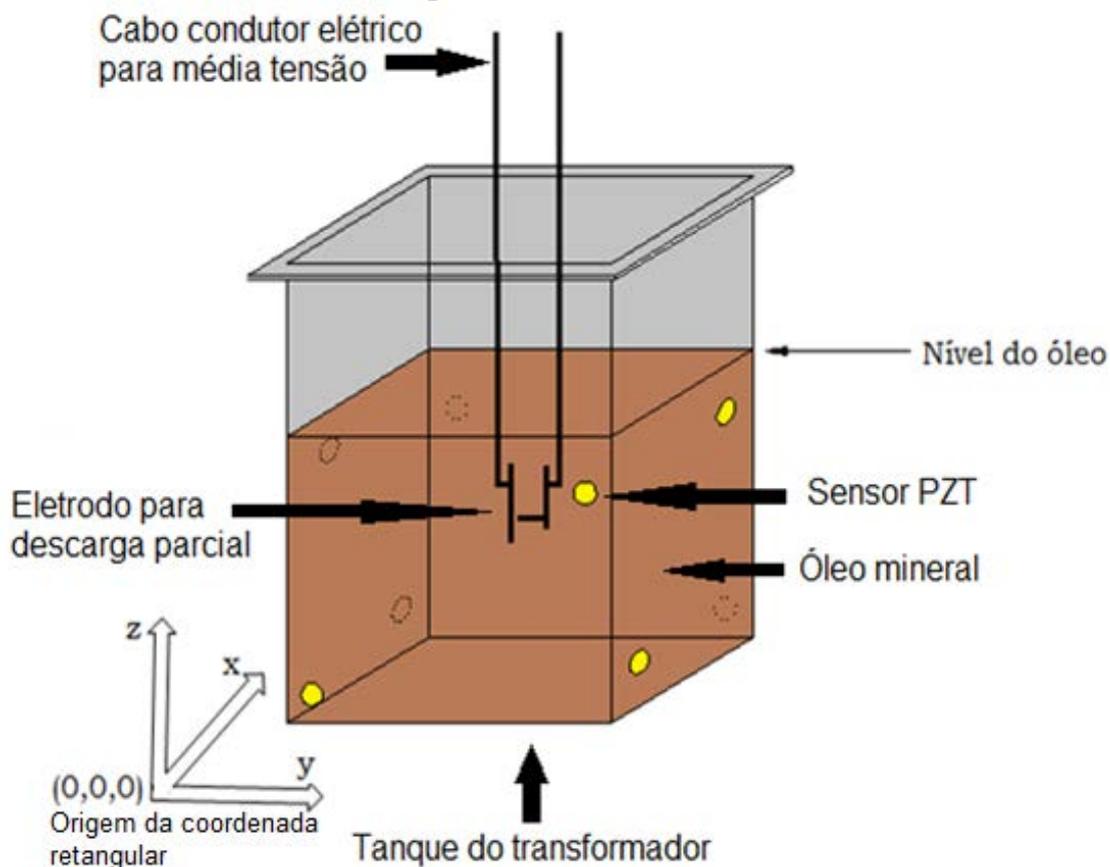


No MATLAB foi desenvolvido uma rotina de programação que identificava o maior valor de pico do sinal em cada sensor e considerando 3 μ s antes e depois desse valor detectado. Desta forma criando uma janela com a forma do sinal centralizado de 6 μ s, garantindo assim somente o sinal da descarga parcial. A fim de atenuar as frequências indesejadas, foi feito um filtro passa-banda digital com frequências de cortes baseado na norma IEC 60270 (2011) de 100 kHz a 400 kHz.

3.4. Detecção das descargas parciais

No tanque de transformador com dimensões 270x540x720 mm foi retirada a parte superior contendo as buchas de alta tensão, bem como o núcleo. Os oito sensores piezelétricos foram distribuídos conforme mostrado na Figura 3.14. Isto é, duas cápsulas piezelétricas em cada face do tanque. As cápsulas piezelétricas foram fixadas com vaselina sólida, apenas pela tensão superficial. No fundo e na tampa do tanque não foram fixados sensores. Um sistema de coordenada retangular foi adotado para referenciar as posições das cápsulas piezelétricas em relação ao eletrodo gerador das DPs. Na Tabela 3.2 estão relacionadas, respectivamente, as posições das cápsulas piezelétricas de baixo custo e pontos variados de geração das descargas parciais. No canto inferior esquerdo do tanque foi conceitualmente adotada a origem da coordenada retangular, sendo (0,0,0) em x , y e z respectivamente.

Figura 3. 14- Representação do tanque com os oito sensores e o eletrodo gerador das DPs



Conforme as Tabela 3.3 a 3.5, foram gerados 21, 100 e 72 pontos de DPs, respectivamente, de forma aleatória, procurando varrer todo o volume do óleo isolante contido no interior do tanque.

Tabela 3. 2- Coordenadas das cápsulas piezelétricas

CÁPSULA Nº	ENSAIO 1			ENSAIO 2			ENSAIO 3		
	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	0	30	30	0	40	40	0	80	80
2	0	540	450	0	500	400	0	560	410
3	30	0	30	40	540	40	80	540	80
4	250	0	450	230	540	400	200	540	410
5	30	540	30	270	500	40	280	460	80
6	250	540	30	270	40	400	280	80	410
7	250	540	30	230	0	40	200	0	80
8	250	30	450	40	0	400	80	0	410

Tabela 3. 3- Coordenadas das DPs geradas no ensaio 1

DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)	DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	210	270	380	12	190	90	290
2	90	270	380	13	200	100	290
3	200	100	380	14	100	100	290
4	100	100	380	15	100	100	190
5	200	450	380	16	100	100	190
6	100	450	380	17	250	100	190
7	110	440	280	18	100	450	190
8	100	450	290	19	190	440	180
9	200	450	290	20	200	450	190
10	100	250	290	21	200	100	190
11	200	250	290				

Tabela 3. 4- Coordenadas das DPs geradas no ensaio 2

DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)	DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)	DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	200	90	350	35	190	480	180	69	210	170	20
2	180	210	350	36	140	90	180	70	180	320	20
3	80	390	350	37	220	240	180	71	120	160	100
4	70	100	350	38	130	100	180	72	200	330	100
5	210	430	350	39	120	370	180	73	70	400	100
6	160	270	350	40	190	120	180	74	220	290	100
7	60	90	350	41	90	200	130	75	130	90	100
8	120	400	350	42	70	440	130	76	240	220	100
9	90	270	350	43	90	180	130	77	100	460	100
10	170	180	350	44	210	170	130	78	110	250	100
11	90	320	280	45	120	90	130	79	200	100	100
12	220	490	280	46	200	80	130	80	190	450	100
13	100	100	280	47	210	330	130	81	190	200	100
14	200	260	280	48	130	130	130	82	120	180	190
15	150	90	280	49	70	460	130	83	150	370	190
16	150	420	280	50	100	220	130	84	80	500	190
17	60	470	280	51	170	190	80	85	160	340	190
18	180	170	280	52	120	370	80	86	70	180	190
19	200	410	280	53	130	140	80	87	90	310	190
20	100	170	280	54	150	360	80	88	140	130	190
21	240	270	230	55	70	470	80	89	210	400	190
22	170	440	230	56	140	200	80	90	90	340	190
23	210	340	230	57	180	90	80	91	130	350	240
24	140	110	230	58	210	210	80	92	140	500	240
25	220	300	230	59	180	160	80	93	130	350	240
26	260	470	230	60	100	70	80	94	140	500	240
27	80	170	230	61	200	200	20	95	50	190	240
28	60	50	230	62	120	420	20	96	180	370	240
29	160	320	230	63	80	240	20	97	80	330	240
30	70	190	230	64	160	50	20	98	190	180	240
31	170	450	180	65	230	390	20	99	130	260	240
32	60	90	180	66	200	70	20	100	190	250	240
33	210	110	180	67	240	480	20				
34	80	300	180	68	160	210	20				

Tabela 3. 5- Coordenadas das DPs geradas no ensaio 3

DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)	DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)	DP N°	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	80	140	450	25	80	140	100	49	80	140	320
2	80	290	450	26	80	290	100	50	80	290	320
3	80	430	450	27	80	430	100	51	80	430	320
4	180	410	450	28	180	410	100	52	180	410	320
5	180	260	450	29	180	260	100	53	180	260	320
6	180	90	450	30	180	90	100	54	180	90	320
7	180	90	350	31	180	90	200	55	180	90	240
8	180	260	350	32	180	260	200	56	180	260	240
9	180	410	350	33	180	410	200	67	180	410	240
10	80	430	350	34	80	430	200	68	80	430	240
11	80	290	350	35	80	290	200	69	80	290	240
12	80	140	350	36	80	140	200	60	80	140	240
13	80	140	250	37	80	140	300	61	80	140	160
14	80	290	250	38	80	290	300	62	80	290	160
15	80	430	250	39	80	430	300	63	80	430	160
16	180	410	250	40	180	410	300	64	180	410	160
17	180	260	250	41	180	260	300	65	180	260	160
18	180	90	250	42	180	90	300	66	180	90	160
19	180	90	150	43	180	90	400	67	180	90	80
20	180	260	150	44	180	260	400	68	180	260	80
21	180	410	150	45	180	430	400	69	180	410	80
22	80	430	150	46	80	410	400	70	80	430	80
23	80	290	150	47	80	290	400	71	80	290	80
24	80	140	150	48	80	90	400	72	80	140	80

3.4.1. Pré-processamento dos sinais

Em vista à utilização de rede neural artificial (RNA), do tipo *Perceptron* Multicamadas (PMC) e *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems* (ANFIS), os sinais foram pré-processados utilizando as métricas definidas nas Equações de (3.3) a (3.7):

- a) **RMS ou valor eficaz:** É o valor da intensidade de uma corrente contínua que produziria, numa resistência elétrica, a mesma dissipação de potência que a corrente alternada.

$$V_{eficaz} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (V_m(t))^2 dt} \quad (3.3)$$

- b) **Energia de sinal:** Toda atividade física é medida por uma transferência de energia. No estudo sobre sinais e sistemas, os sinais são normalmente

tratados como abstrações matemáticas. Neste caso, definem uma constante de proporcionalidade à energia física.

$$\theta = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} |V_m(t)|^2 dt \quad (3.4)$$

Sendo:

T é o período do sinal;

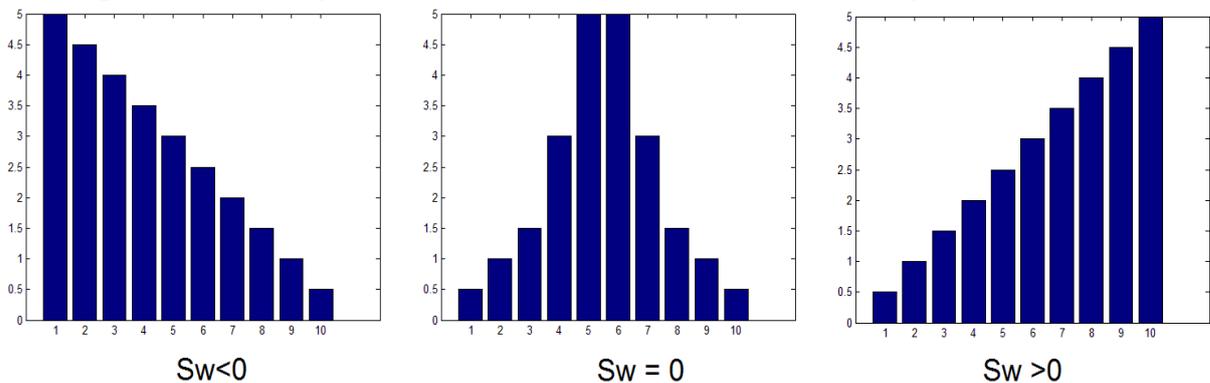
t é o instante de tempo;

V_m é a amplitude instantânea do sinal;

Θ é a energia do sinal.

c) Skewness: É usado para caracterizar uma distribuição não-normal. O coeficiente de Skewness próximo de zero indica simetria, caso contrário, uma tendência à esquerda, para número negativos e à direita, para números positivos, ilustrado na Figura 3.15 e na Equação 3.5.

Figura 3. 15- Representação da assimetria calculada pelo Skewness

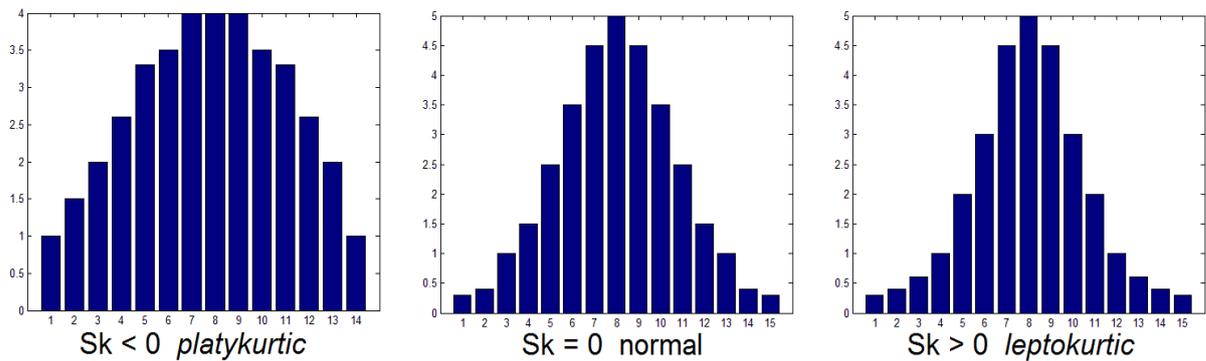


$$S_w = \frac{1}{(n-1)s^3} \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^3 \quad (3.5)$$

Sendo que V é o valor instantâneo, n é o número de amostras, i é o índice do valor, \bar{V} representa a média aritmética e s é a variância entre os dados.

- d) Kurtosis:** É um coeficiente que indica a concentração próxima a média (ou pico) de uma curva. Com um coeficiente menor que três, a distribuição é mais achatada, conhecida como *platykurtic*, porém, coeficientes maiores que três indicam que o pico é acentuado e a distribuição é chamada *leptokurtic*. O cálculo de Kurtosis é ilustrado na Figura 3.16 e na Equação 3.6.

Figura 3. 16- Representação da concentração calculada pelo Kurtosis



$$S_k = \frac{1}{(n-1)} \frac{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^4}{s^4} \quad (3.6)$$

Sendo que V é o valor instantâneo, i é o índice deste valor, \bar{V} representa a média aritmética, n o número de amostras e s é a variância entre os dados.

- e) Valor de pico:** É o maior valor de tensão obtida em função do tempo. Sendo que na Equação (3.7), V_m é o valor da amplitude da tensão instantânea e t é o instante de tempo.

$$V_p = \max(|V_m(t)|) \quad (3.7)$$

- f) Critério da energia:** De acordo com Markalous (2008), a Equação 3.8 indica o mínimo global, indicando o instante de tempo no qual há eminência, de ocorrer a DP.

$$S'_i = \sum_{k=0}^i \left(V_k^2 - i \frac{S_N}{N} \right) \quad (3.8)$$

Sendo i , o índice da amostra e S_N , a energia total acumulada e N o número total de amostras.

3.4.2. Aplicação de RNA do tipo PMC para a estimação da localização das DPs

Para estimar a localização da descarga parcial (DP), foi treinada a rede neural artificial (RNA) do tipo *Perceptron* Multicamadas (PMC), com as entradas obtidas através dos dados utilizando as Equações (3.3) a (3.8), conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3. 6- Métricas para cada sensor e número de entradas na RNA

Número	Métricas para cada sensor	Número de entradas na RNA
1	a, b, c, d, e	40
2	a, b, e	24
3	b, c, d	24
4	a, b	16
5	a, d	16
6	c, d	16
7	b, d	16
8	b	8
9	f	1 e 3

O treinamento da RNA foi feito por meio de várias configurações dos números de neurônios nas camadas escondidas, de acordo com a Tabela 3.7, 3.8 e 3.9.

Tabela 3. 7- Número de neurônio nas camadas escondidas nos ensaios 1 e 2

Número de neurônios na camada escondida 1	Número de neurônios na camada escondida 2	Número de neurônios na camada escondida 3
27	15	11
15	9	5
0	27	13
0	13	7
0	0	27
0	0	10

A estrutura da rede neural artificial (RNA), do tipo *Perceptron* Multicamadas, de acordo com a Tabela 3.8, 3.9 e 3.10, estabelece a relação entre o número de saídas

e seu respectivo plano cartesiano x , y e z , representado respectivamente em cada saída.

Tabela 3. 8- Configurações da RNA do tipo PMC do ensaio 1

Número de entradas	Neurônios na camada escondida			Número de saídas	Critério de parada	Algoritmo de treinamento
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 (Tabela 3.6)	27	15	11	03 (Estima o ponto em que ocorreu a DP)	EQM ou n° de épocas	<i>Levenberg-Marquardt</i> (obs: funções de ativação do tipo 'sigmóide')
	15	9	5			
	0	27	13			
	0	13	7			
	0	0	27			
	0	0	10			
	0	0	10			

Tabela 3. 9- Configurações da RNA do tipo PMC do ensaio 2

Número de entradas	Neurônios na camada escondida			Número de saídas	Critério de parada	Algoritmo de treinamento
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 (Tabela 3.6)	27	15	11	01 (Estima o ponto em que ocorreu a DP em cada eixo)	EQM ou n° de épocas	<i>Levenberg-Marquardt</i> (obs: funções de ativação do tipo 'sigmóide')
	15	9	5			
	0	27	13			
	0	13	7			
	0	0	27			
	0	0	10			
	0	0	10			

Para o ensaio 3, o treinamento da PMC foi diferente dos anteriores. Essa metodologia foi estabelecida para estimar a diferença entre os sistemas inteligentes utilizados nesta dissertação.

Tabela 3. 10- Configurações da RNA do tipo PMC do ensaio 3

Número de entradas	Neurônios na camada escondida			Número de saídas	Critério de parada	Algoritmo de treinamento
	1 ^a	2 ^a	3 ^a			
Cápsula piezométrica 1; 4 e 6 Tempo de chegada da onda da DP (Critério da energia)				01 (Estima o ponto em que ocorreu a DP em cada eixo)	EQM ou n° de épocas	<i>Levenberg-Marquardt</i> (obs: funções de ativação do tipo 'sigmóide')
	27	11	6			
	25	7	0			
	37	0	0			

Dois modos foram estabelecidos como critérios de parada; um deles por erro quadrático médio (EQM), visto na Equação (3.9), e o outro por número máximo de épocas. O erro quadrático médio desejado foi de 1.10^{-3} e a quantidade de épocas máximas foi de 100.

$$EQM = \frac{\sum_{i=1}^n (r_n - e_n)^2}{n} \quad (3.9)$$

Sendo que r_n refere-se ao valor real ou observado para uma determinada distância em relação à origem da coordenada retangular, e_n refere-se à distância estimada para a mesma amostra e n é o número de amostras.

Um treinamento mais rápido foi obtido por meio do algoritmo de Levenberg-Marquardt. Como função de ativação utilizou-se a função logística sigmoide, por apresentar uma variação entre 0 a 1 de forma suave, ou seja, um crescimento exponencial em forma de 'S'.

Após obter os dados de entradas, foram separados 15% dos dados que foram apresentados após o treinamento do ensaio 1 e 20% para os ensaios 2 e 3. De forma a testar a capacidade de aprendizado da RNA. Para verificar a precisão do ANFIS, foram separados 20% dos dados para teste com os mesmos índices, tanto para os treinamentos dos sistemas nebulosos quanto para o terceiro ensaio da PMC. Deste modo garantindo uma comparação entre as mesmas coordenadas apresentadas, para ambos os sistemas inteligentes.

3.4.3. Aplicação do ANFIS para a estimação da localização das DPs

Para o treinamento do sistema nebuloso foram utilizadas as métricas (3.3), (3.4), (3.5), (3.6) e (3.8) do subcapítulo 3.4.1. O modelo ANFIS trata-se de uma ferramenta para a construção de um sistema de inferência *Fuzzy*, do tipo Takagi-Sugeno, quando não são conhecidas características das funções de pertinência de entrada e saída e suas respectivas quantidades. Portanto, para a utilização do ANFIS, há a necessidade de alimentar o algoritmo com o tipo de função de pertinência e sua quantidade, bem como, com o método de agrupamento para o ajuste das funções de pertinência e da base de dados. Neste trabalho o ANFIS foi caracterizado, conforme mostra a Tabela 3.11.

Tabela 3. 11- Configuração do sistema ANFIS

Descrição	Configuração
Tipo de sistema <i>Fuzzy</i>	Takagi-Sugeno
Número de entradas	1 e 1;4;6 (ver Tabela 3.12)
Número de saída	01 (coordenada no eixo escolhido)
Função de pertinência	Gaussiana 2
Número de funções de pertinência	02; 03; 05; 08 e 10
Particionamento	<i>Grid partition</i>
Método "AND"	Prod
Método "OR"	Max
Método de implicação	Prod
Método de agregação	Max
"Defuzzificação"	<i>weighted average</i>
Tipo da saída	Linear e Híbrido

3.4.4. Validação das abordagens

Como validação das abordagens, foram considerados quatro métodos estatísticos de desempenho, sendo aplicados na ratificação dos resultados obtidos por ensaios. São eles:

a) Raiz do erro quadrático médio (REQM): Este índice mostra, em unidades da variável que está sob análise, a dispersão média dos valores das amostras reais e estimadas ao redor da linha de regressão. Quanto menor o valor da REQM, melhor é a qualidade da previsão feita pelo sistema inteligente. A REQM é obtida pela Equação (3.10):

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_n - e_n)^2}{n}} \quad (3.10)$$

Sendo que r_n refere-se ao valor real ou observado para uma determinada amostra, e_n refere-se ao valor estimado para a mesma amostra e n é o número de amostras.

b) Erro absoluto médio (EAM): Corresponde à diferença algébrica entre o valor medido e o valor estimado, divididas pelo número de amostras.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |r_n - e_n|}{n} \quad (3.11)$$

c) Erro relativo médio (ERM%): Quando se exprimem erros de medições. O modo mais usual é em percentagem, sendo obtido pela divisão do erro absoluto pelo valor real, visto na Equação (3.12).

$$ERM = 100 \frac{\sum_{i=1}^n |r_n - e_n|}{|e_n|} \quad (3.12)$$

d) Desvio padrão do erro relativo médio (DpERM%): Este índice mostra o quanto de variação ou dispersão existe em relação à média (ou valor esperado). Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média; um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores. O desvio padrão é calculado pela Equação (3.13):

$$DpERM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_n - \bar{r})^2}{n - 1}} \quad (3.13)$$

Sendo que r_n refere-se ao valor real para uma determinada amostra, \bar{r} refere-se à média dos valores reais das amostras e n é o número de amostras.

e) Coeficiente de determinação (R^2): É o quadrado do coeficiente de correlação linear (R) e pode ser definido como o grau de ajuste da reta estimada pelo conjunto de dados. O coeficiente de correlação linear (R) é utilizado para verificar o grau de linearidade entre os valores estimados pelo sistema inteligente e os valores reais medidos em laboratório, sendo calculado pela Equação 3.14:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (r_n - \bar{r})(e_n - \bar{e})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (r_n - \bar{r})^2 \sum_{i=1}^n (e_n - \bar{e})^2)}} \quad (3.14)$$

Sendo que r_n refere-se ao valor real para uma determinada amostra, \bar{r} refere-se à média dos valores reais das amostras, e_n refere-se ao valor estimado para uma determinada amostra, \bar{e} refere-se à média dos valores estimados e n é o número de amostras. Os resultados dos coeficientes de determinação próximos de 1 indicam uma qualidade melhor do grau de ajuste da reta estimada pelo conjunto de dados.

CAPÍTULO 4- ANÁLISE E RESULTADOS

Após a abordagem da metodologia para o desenvolvimento do trabalho no Capítulo 3, neste capítulo são apresentadas as análises realizadas até o presente momento, bem como os resultados obtidos.

Primeiramente, foram analisados os comportamentos da resposta da cápsula piezelétrica, utilizada neste trabalho, em comparação com o sensor consolidado no mercado para captação das descargas parciais, usando seus valores como um referencial. Em seguida, foi apresentada, estatisticamente, a resposta das redes neurais artificiais (RNA) e dos sistemas nebulosos (*ANFIS*), para a localização das descargas parciais (DPs), determinando os pontos de ocorrência em diversas configurações de camadas ocultas, número de neurônios e funções de pertinência.

Por fim, os pontos estimados pelas RNA ou *ANFIS* foram demonstrados e comparados com os pontos reais em que ocorreram as DPs. Em figura tridimensional, simulando o tanque do transformador de potência, foi ilustrado o melhor sistema inteligente.

4.1. Comportamento da resposta da cápsula piezelétrica

Nesta etapa do trabalho, foi analisado o comportamento da cápsula piezelétrica em comparação a um sensor de emissão acústica, já consolidado para a detecção e localização das descargas parciais, pelo ensaio da quebra do grafite. Os valores obtidos dos sensores, tanto a cápsula piezelétrica quanto o sensor de emissão acústica da *PASA*, foram confrontados, assim determinando se o sensor PZT de baixo custo proposto é sensível às descargas parciais.

Após comparar a resposta do sensor PZT com sensor de emissão acústica da *PASA* no domínio da frequência, ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2, concluiu-se que a magnitude da tensão gerada nos terminais da cápsula piezelétrica em frequências superiores a 20 kHz, no caso o sensor PZT, foi em torno de 50 vezes menor que tensão do sensor de emissão acústica (EA) da *PASA*. Assim foi estabelecido o uso do amplificador de instrumentação com ganho de aproximadamente 34 dB na cápsula piezelétrica.

As Figuras 4.1 e 4.2 comprovam a resposta ao impulso inferido pela quebra do grafite, com as magnitudes normalizadas entre os sensores estudados. O passo seguinte, foi estimar a densidade espectral de potência, através do periodograma de Welch ilustrado na Figura 4.3 e 4.4.

Figura 4. 1- Sinal no domínio da frequência oriundo da quebra do grafite na cápsula piezelétrica de baixo custo

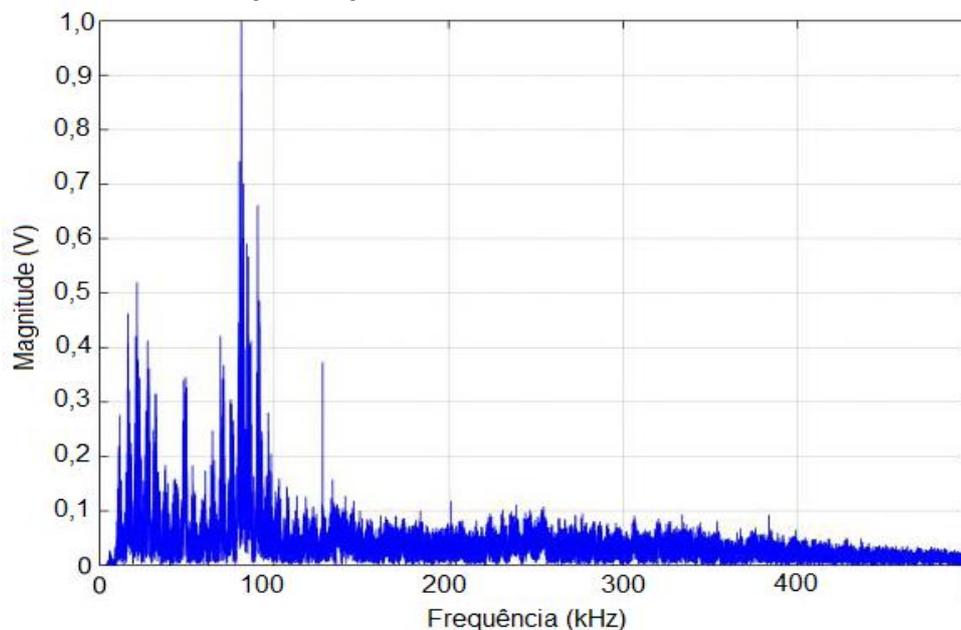


Figura 4. 2- Sinal no domínio da frequência oriundo da quebra do grafite do sensor da PASA

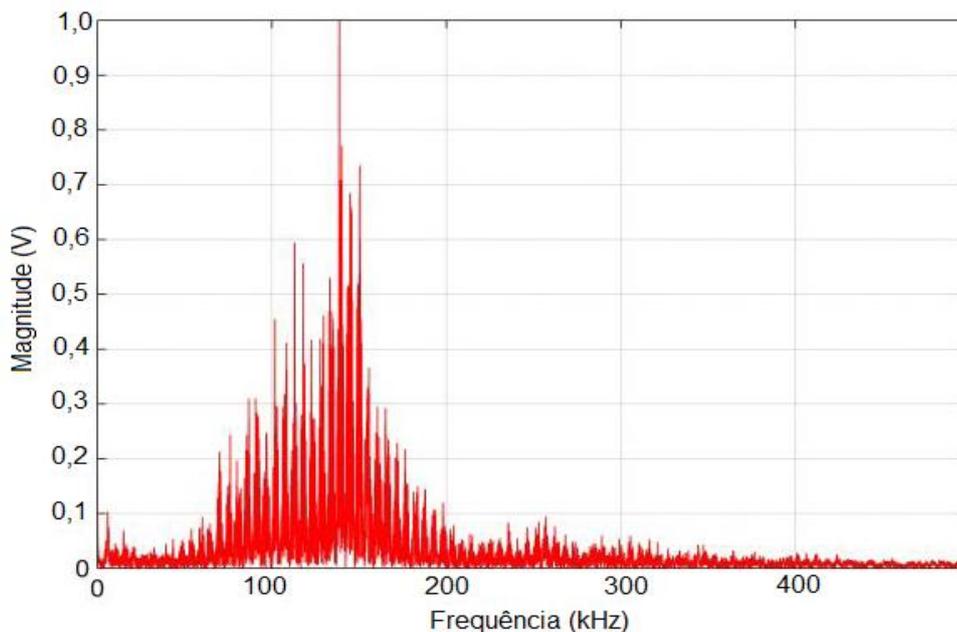


Figura 4. 3- Densidade espectral da cápsula piezelétrica de baixo custo

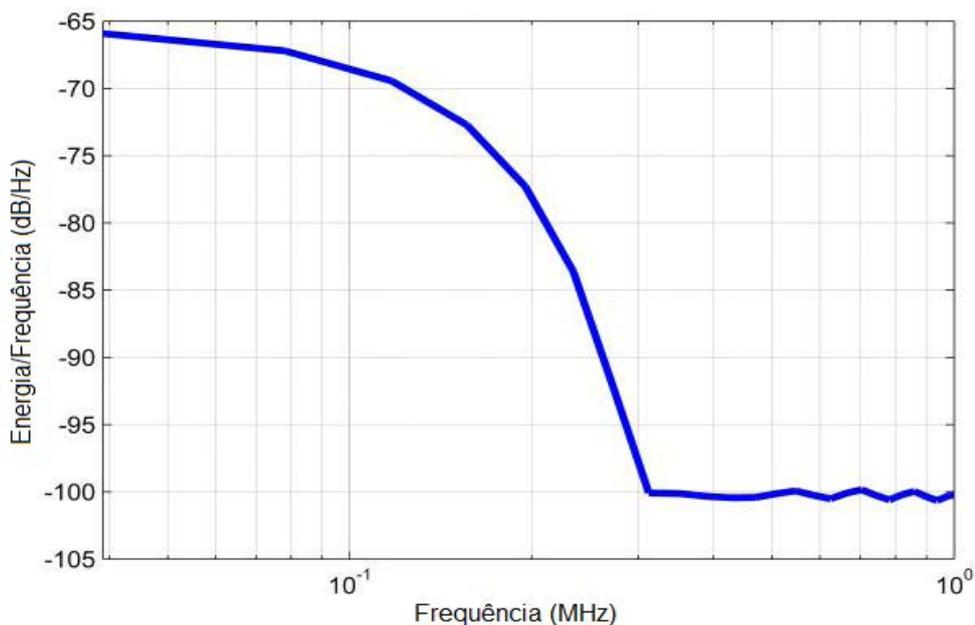
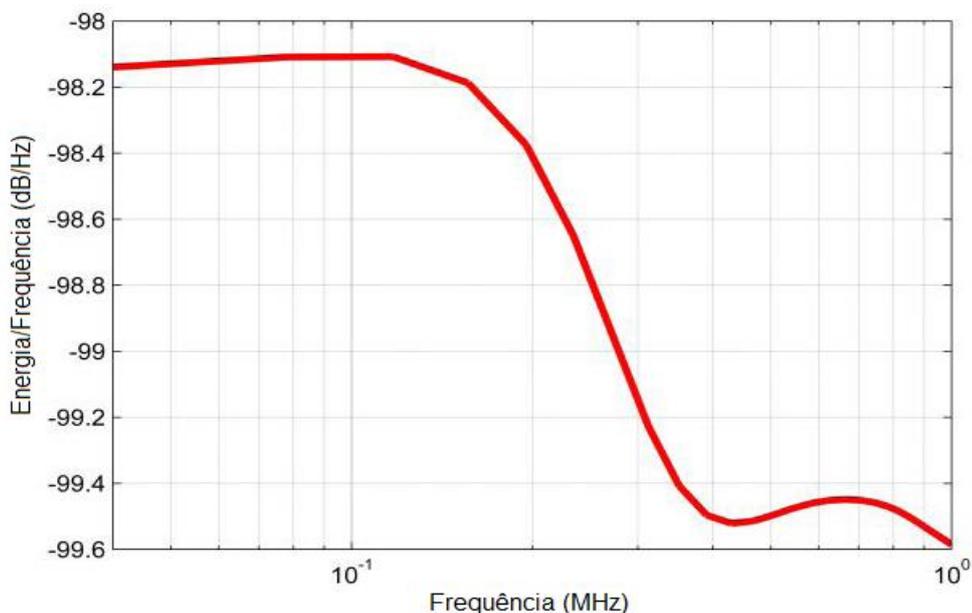


Figura 4. 4- Densidade espectral do sensor PASA R151-AST



A cápsula piezelétrica apresentou resposta em frequências superiores a 100 kHz, conforme definida a norma da IEC 60270 (2011) sobre descargas parciais (DPs). Com isso, é possível identificar uma descarga parcial (DP) utilizando estes sensores de baixo custo, se comparados com os sinais advindos do sensor da *PASA*, sendo os comportamentos dos sensores semelhantes no domínio do tempo. A cápsula piezelétrica de baixo custo utilizada neste trabalho, apresenta as frequências de

ressonância na faixa de 150 kHz observado no sensor de emissão acústica do fabricante *Physical Acoustic South America*. Por outro lado, este sensor consolidado pelas empresas que empregam a emissão acústica como análise de DPs, demonstram que as DPs podem gerar frequências a partir de 70 kHz a 150 kHz. Com isso, é possível detectar as emissões acústicas na cápsula de baixo custo, pois esta possui uma faixa de frequência superiores a 100 kHz.

Após os testes das respostas em frequência dos sensores com a quebra do grafite, deu-se início às gerações das DPs dentro do tanque do transformador. Obtendo-se então, a identificação destas, conforme mostrado na Figura 4.5, em que, após o condicionamento do sinal, foi aplicado um filtro digital passa-banda do tipo *Butterworth* de 4ª ordem, na faixa de frequências 100 kHz a 400 kHz ilustrado na Figura 4.6.

Figura 4. 5- Sinal da DP na cápsula piezelétrica com filtro de 100 a 400 kHz.

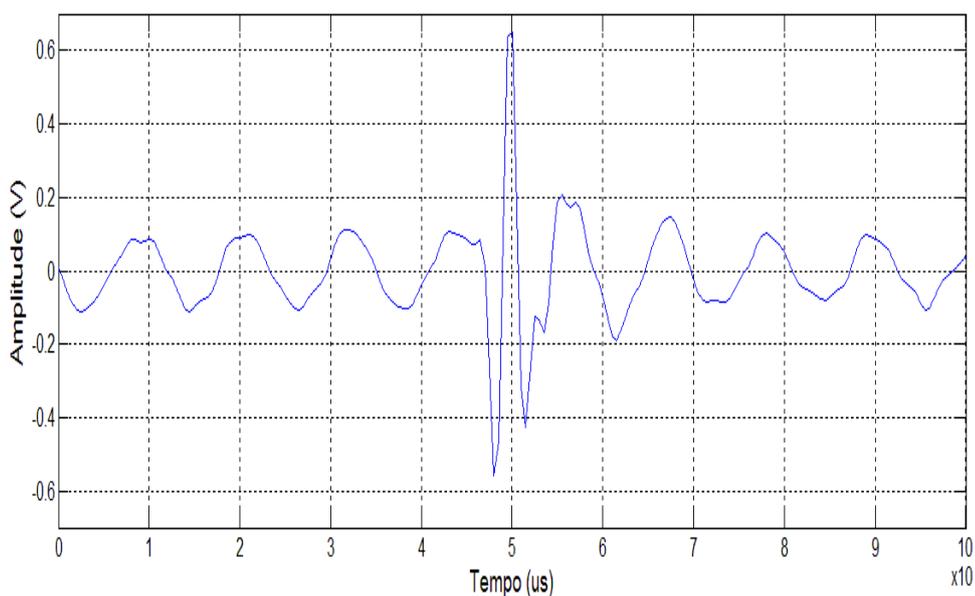
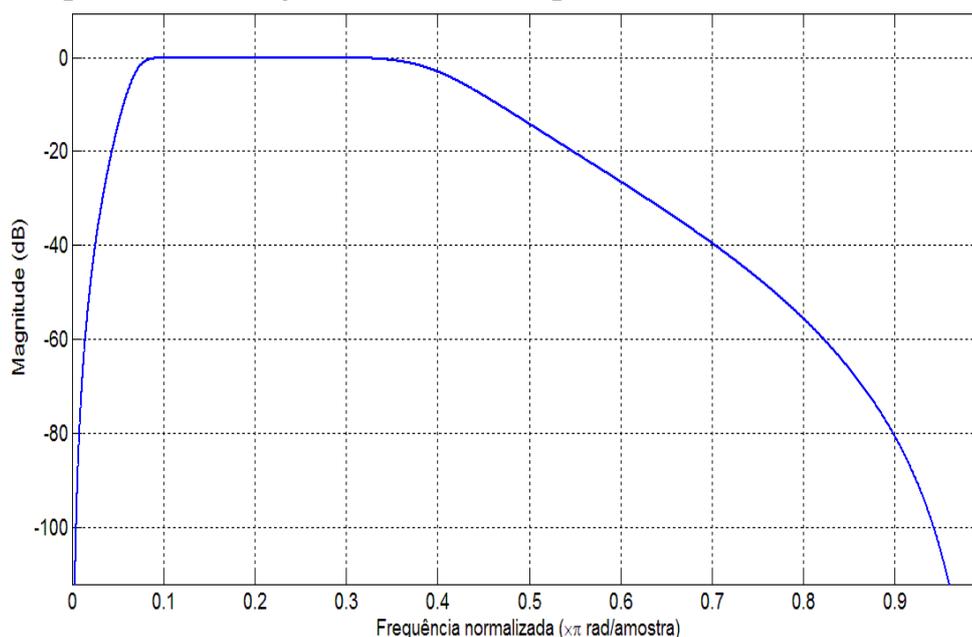


Figura 4. 6- Resposta do filtro digital Butterworth 4ª ordem



4.2. Resposta das redes neurais artificiais para localização da descarga parcial

As redes neurais artificiais foram estruturadas, treinadas, conforme indicado na Tabela 3.6 a 3.10, e validadas com as Equações (3.10) a (3.14).

As Tabelas de 4.1 a 4.9 resumem o comportamento das RNAs, do tipo PMC, e seus desempenhos para cada uma das configurações de entrada da Tabela 3.6. Para cada configuração de entrada, o número de neurônios e camadas escondidas variou conforme a Tabela 3.7 e 3.10.

O objetivo de encontrar uma arquitetura neural adequada e que exigisse o mínimo esforço computacional, foram empregadas as arquiteturas constantes nos treinamentos. Deve ser lembrado que não existe um método determinístico que permita conhecer de antemão o número de neurônios e o número de camadas escondidas, para mapear um determinado problema. Dessa forma, torna-se necessário avaliar o desempenho de várias arquiteturas que estão indicadas nas Tabelas de 3.6 a 3.10.

Tabela 4. 1- Valores referenciados no eixo x da coordenada retangular no ensaio 1.

DP	RNA x (mm)	Real x (mm)	Erro (mm)
9	99	100	1
14	190	200	10
17	90	100	10

Tabela 4. 2- Valores referenciados no eixo y da coordenada retangular no ensaio 1.

DP	RNA y (mm)	Real y (mm)	Erro (mm)
9	450	450	0
14	99	100	1
17	99	100	1

Tabela 4. 3- Valores referenciados no eixo z da coordenada retangular no ensaio 1.

DP	RNA z (mm)	Real z (mm)	Erro (mm)
9	290	290	0
14	280	290	10
17	190	190	0

Sob o ponto de vista dos resultados obtidos nos ensaios 1, verificou-se que a arquitetura da rede neural artificial, do tipo PMC, apresentou potencial para localização de descargas parciais (DPs). Entretanto, a massa de dados é pequena para o treinamento da RNA, não se podendo então afirmar a exatidão do aprendizado da mesma.

A rede neural artificial foi treinada com as métricas: valor eficaz e energia do sinal, tornando-se de fácil utilização em sistemas embarcados, exigindo baixo esforço computacional e demandando pouco tempo de processamento.

O método estatístico, como *Skewness*, foi testado e não demonstrou resultados satisfatórios para o treinamento da rede neural artificial. Porém *Kurtosis* apresentou boa correlação entre os dados. No ensaio 2, utilizando 100 pontos de DPs, conforme as Tabelas 4.4 a 4.6, a RNA não obteve um bom resultado. A onda propagada, após a descarga parcial, não decai com o inverso do quadrado da distância, pois há ondas de reflexão e refração que se somam ou anulam. Portanto, era de se esperar que;

quanto mais pontos de DPs, maior o erro da rede neural artificial. Sendo que a região entre o erro de um ponto de uma DP, invade outra região de erro da outra DP.

Tabela 4. 4- Valores referenciados no eixo x da coordenada retangular no ensaio 2

DP	RNA x (mm)	Real x (mm)	Erro (mm)
16	129	150	21
22	207	170	37
24	54	140	86
33	266	210	56
40	61	190	129
42	134	70	64
46	234	200	43
47	190	210	20
49	147	70	77
50	159	100	59
53	93	130	37
56	183	140	43
62	180	120	60
66	195	200	5
67	230	240	10
70	185	180	5
73	199	70	129
78	78	110	32
87	299	90	209
93	163	130	33

Tabela 4. 5- Valores referenciados no eixo y da coordenada retangular no ensaio 2

DP	RNA y (mm)	Real y (mm)	Erro (mm)
16	270	420	150
22	351	440	89
24	103	110	7
33	302	110	192
40	82	120	38
42	513	440	73
46	114	80	34
47	132	330	198
49	851	460	391
50	167	220	53
53	353	140	213
56	158	200	42
62	112	420	308
66	313	70	243
67	848	480	368
70	320	320	0
73	180	400	220
78	168	250	82
87	129	310	181
93	457	250	207

Tabela 4. 6- Valores referenciados no eixo y da coordenada retangular no ensaio 2

DP	RNA z (mm)	Real z (mm)	Erro (mm)
16	298	280	18
22	286	230	56
24	146	230	84
33	252	180	72
40	373	180	193
42	85	130	45
46	340	130	210
47	253	130	123
49	206	130	76
50	319	130	189
53	65	80	15
56	117	80	37
62	154	20	134
66	116	20	96
67	65	20	45
70	197	20	177
73	324	100	224
78	96	100	4
87	165	190	25
93	176	240	64

Os resultados obtidos, através dos treinamentos do ensaio 3 com as cápsulas piezelétricas 1; 4 e 6 e suas métricas identificadas nas Tabelas 4.7 a 4.9, serão confrontados com os resultados inferidos pelo sistema *ANFIS* nas Tabelas 4.10 e 4.14. A comparação entre os resultados de ambos os sistemas inteligentes empregados nesse trabalho, onde foram utilizados os mesmos índices para todos os treinamentos e testes, garantiu que os sistemas inteligentes fossem treinados com os mesmos dados.

Tabela 4. 7- Resultados obtidos da PMC (Tempo de chegada da DP e mínimo global do sistema)

Entradas: Tempo de chegada da DP e Mínimo global da energia do sinal																
Nº de neurônios																
Camadas Escondidas			REQM			EAM			ERM %			DpERM %			R ²	
1 ^a	2 ^a	3 ^a	x	y	z	x	y	z	x	y	z	X	y	z		
27	11	6	160,2	266,4	182,4	134,4	296,6	147,1	145,4	103,9	60,9	115,4	119,5	54,1	0,27	
25	7	0	163,3	297,8	153,4	134,9	219,1	126,9	139,3	108,1	64,5	129,4	121,8	77,9	0,13	
35	0	0	127,9	379,9	269,9	100,7	287,6	228,7	99,8	136,6	102,3	108,4	155,4	102,2	0,17	

Tabela 4. 8- Resultados obtidos da PMC (Energia do Sinal e RMS)

Entradas: Energia do sinal e RMS															
Nº de neurônios															
Camadas escondidas			REQM			EAM			ERM %			DpERM %			R ²
1ª	2ª	3ª	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	
27	11	6	84,1	420,5	136,1	65,3	340,9	101,8	61,8	164,1	51,8	63,8	128,9	91,1	0,09
25	7	0	151,7	292,3	224,6	113,3	215,3	169,7	89,9	155,3	86,3	78,2	184,3	147,6	0,28
35	0	0	132,4	335,5	231,3	91,8	288,5	166,2	80,7	148,7	78,5	77,5	174,7	109,2	0,10

Tabela 4. 9- Resultados obtidos da PMC (Kurtosis e Skewness)

Entradas: Kurtosis e Skewness															
Nº de neurônios															
Camadas escondidas			REQM			EAM			ERM %			DpERM %			R ²
1ª	2ª	3ª	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	
27	11	6	64,4	188,1	168,1	57,1	166,5	138,2	52,6	94,2	74,6	41,8	90,7	114,6	0,04
25	7	0	81,1	553,5	190,8	62,4	388,1	136,7	54,7	180,1	75,9	48,4	207,8	164,7	0,01
35	0	0	170,1	373,8	196,8	121,1	306,5	162,2	95,2	167,1	172,6	83,9	198,6	68,7	0,15

4.3. Resposta do sistema nebuloso ANFIS para a localização da descarga parcial

Os resultados demonstrados nas Tabelas 4.10 a 4.14 são provenientes apenas da cápsula piezelétrica mais próxima à coordenada retangular de referência. Essa metodologia foi estabelecida a fim de analisar apenas o comportamento do ANFIS com um único sensor.

Tabela 4. 10- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e tempo de chegada da DP

Cápsula piezelétrica 1 Tempo de chegada da DP						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	3,9	1,6	1,5	3,7	0,99	10
y	2,3	0,9	0,3	0,8	0,99	
z	3,9	1,6	0,7	1,9	0,99	
x	20,8	9,0	8,0	20,2	0,82	8
y	6,97	3,15	1,15	12,75	0,86	
z	47,4	20,8	9,76	24,1	0,81	
x	21,7	12,9	12,7	17,6	0,89	5
y	43,9	34,6	15,9	12,7	0,86	
x	59,7	44,4	17,3	20,9	0,69	

Tabela 4. 11- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e Skewness

Cápsula piezelétrica 1 Skewness						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	26,3	14,3	13,6	20,5	0,71	10
y	64,1	43,6	21,8	30,6	0,72	
z	57,14	37,55	12,88	16,2	0,72	
x	44,15	39,1	35,2	19,4	0,20	8
y	73,92	54,0	28,3	32,7	0,63	
z	88,1	69,8	35,4	56,4	0,34	
x	43,2	37,9	34,2	19,74	0,23	5
y	80,9	65,7	31,5	33,21	0,55	
x	83,7	72,3	30,9	28,4	0,40	

Tabela 4. 12- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e mínimo global do critério da energia

Cápsula piezelétrica 1 Mínimo global do critério da energia						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	38,5	33,6	31,1	18,73	0,40	10
y	97,2	73,2	37,7	53,2	0,35	
z	100,2	72,8	39,2	73,2	0,15	
x	39,3	34,6	32,2	17,7	0,36	8
Y	97,2	72,4	37,1	53,3	0,35	
z	100,0	71,4	39,0	73,2	0,15	
x	43,3	37,6	33,9	19,3	0,23	5
y	97,4	71,6	36,4	54,8	0,35	
x	100,2	69,2	38,8	75,8	0,14	

Tabela 4. 13- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e energia do sinal

Cápsula piezelétrica 1 Energia do sinal						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	47,4	20,8	9,7	24,1	0,81	10
y	102,2	75,2	44,8	61,5	0,28	
z	102,0	80,9	41,4	59,3	0,11	
x	41,2	34,1	30,8	22,6	0,30	8
y	102,2	74,4	44,1	61,6	0,28	
z	102,7	81,1	41,7	60,8	0,10	
x	41,5	35,2	31,7	22,5	0,29	5
y	103,4	74,8	44,5	61,0	0,27	
x	102,3	80,5	41,6	61,4	0,11	

Tabela 4. 14- Resultado do ANFIS utilizando uma cápsula piezelétrica e kurtosis

Cápsula piezelétrica 1 Kurtosis						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	21,8	12,8	11,7	14,4	0,80	10
y	78,6	50,1	24,4	35,0	0,57	
z	68,6	48,0	17,9	20,1	0,60	
x	28,9	21,3	19,1	17,3	0,66	8
y	78,9	49,9	24,3	35,6	0,57	
z	75,2	59,2	23,2	21,0	0,52	
x	35,2	26,4	23,3	16,7	0,49	5
y	108,5	87,9	44,7	37,8	0,19	
x	76,1	59,5	22,8	22,6	0,51	

As Tabelas 4.15 a 4.18, apresentam os resultados utilizando as cápsulas piezelétricas de baixo custo (1; 4; 6). Esses sensores foram escolhidos por estarem de forma mais distribuída no tanque do transformador utilizado nos ensaios.

Tabela 4. 15- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e tempo de chegada da DP

Cápsulas piezelétricas 1; 4 e 6 Tempo de chegada da DP						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	8
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	5
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	3
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	

Tabela 4. 16- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e tempo de chegada da DP e mínimo global da energia

Cápsulas piezelétricas 1; 4 e 6 Tempo de chegada da DP e Mínimo global da energia						
	REQM	EAM	ERM	DpERM	R ²	Função pertinência
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	3
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	2
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	

Tabela 4. 17- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e energia do sinal e RMS

Cápsulas piezelétricas 1; 4 e 6 Energia e RMS						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	3
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	2
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	

Tabela 4. 18- Resultado do ANFIS utilizando três cápsulas piezelétricas e Skewness e Kurtosis

Cápsulas piezelétricas 1; 4 e 6 Skewness e Kurtosis						
	REQM	EAM	ERM %	DpERM %	R ²	Função pertinência
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	3
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
x	0,1	0,1	0,1	0,1	1	2
y	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
z	0,1	0,1	0,1	0,1	1	

As Tabelas 4.19 a 4.21, demonstram a precisão e a exatidão para localizar as descargas parciais com três cápsulas piezelétricas de baixo custo. O número de função de pertinência do sistema *Fuzzy* é menor, à medida que se adicionam mais sensores. As unidades de medidas, REQM e EAM, são expressas em milímetros.

Conforme comprovado nas Tabelas 4.15 a 4.18, os sistemas que obtiveram melhores resultados foram àqueles que utilizaram três sensores. Assim, foi possível gerar as Tabelas 4.19 a 4.21 para representar as coordenadas retangulares estimadas pelo sistema *ANFIS*, com função de pertinência 5, e a coordenada real da DP, com seus respectivos erros.

Tabela 4. 19- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo x (3 cápsulas piezelétricas)

DP	ANFIS x (mm)	Real x (mm)	Erro (mm)
1	80,0	80	0,0
3	79,9	80	0,1
10	79,9	80	0,1
13	79,9	80	0,1
23	80,0	80	0,0
42	179,9	180	0,1
44	180,0	180	0,0
46	79,9	80	0,1
50	79,9	80	0,1
53	180	180	0,0
54	179,9	180	0,1
60	79,9	80	0,1
65	180,0	180	0,0
69	180,0	180	0,0

Tabela 4. 20- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo y (3 cápsulas piezelétricas)

DP	ANFIS y (mm)	Real y (mm)	Erro (mm)
1	140,1	140	0,1
3	429,9	430	0,1
10	429,9	430	0,1
13	139,9	140	0,1
23	290,0	290	0,0
42	90,0	90	0,0
44	260,0	260	0,0
46	409,9	410	0,1
50	289,9	290	0,1
53	260,0	260	0,0
54	89,9	90	0,1
60	139,9	140	0,1
65	260,0	260	0,0
69	410,0	410	0,0

Tabela 4. 21- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo z (3 cápsulas piezelétricas)

DP	ANFIS z (mm)	Real z (mm)	Erro (mm)
1	450,0	450	0,0
3	499,9	450	0,1
10	349,9	350	0,1
13	249,9	250	0,1
23	150,0	150	0,0
42	299,9	300	0,1
44	400,0	400	0,0
46	399,9	400	0,1
50	319,9	320	0,1
53	320,0	320	0,0
54	319,9	320	0,1
60	239,9	240	0,1
65	160,0	160	0,0
69	80,0	80	0,0

As Tabelas 4.19 a 4.21 e 4.22 a 4.24, têm o propósito de estabelecer uma comparação entre o sistema ANFIS, com três cápsulas piezelétrica de baixo custo, e o mesmo com apenas uma cápsula. As Tabelas 4.22 a 4.24 representam os resultados advindos do treinamento do sistema ANFIS. Utilizando a cápsula piezelétrica de baixo custo mais próxima ao referencial (0; 0; 0) da coordenada retangular e empregando a métrica do tempo de chegada da DP, estabelecido pelo critério da energia. A função de pertinência 5 do sistema *Fuzzy* foi adotada para confrontar valores, com os mesmos índices de descargas parciais utilizados.

Tabela 4. 22- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo x (1 cápsula piezelétrica)

DP	ANFIS x (mm)	Real x (mm)	Erro (mm)
1	100,3	80	20,4
3	98,7	80	18,8
10	132,3	80	52,8
13	107,3	80	27,3
23	110,2	80	30,2
42	166,3	180	13,7
44	119,3	180	60,9
46	137,6	80	57,6
50	118,3	80	38,2
53	129,4	180	50,6
54	112,0	180	67,9
60	98,5	80	18,5
65	180,3	180	0,3
69	109,7	180	70,3

Tabela 4. 23- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo y (1 cápsula piezelétrica)

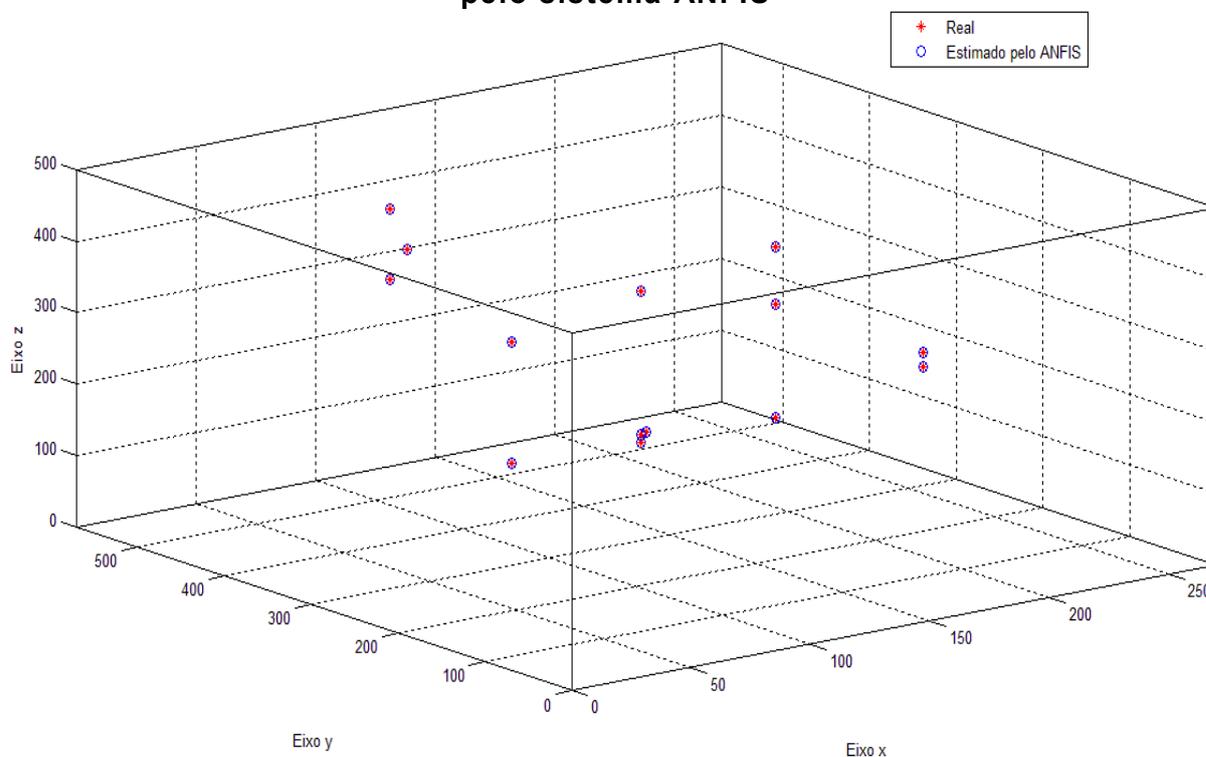
DP	ANFIS y (mm)	Real y (mm)	Erro (mm)
1	230,4	140	90,4
3	214,4	430	215,6
10	344,5	430	85,5
13	155,9	140	15,9
23	276,5	290	13,5
42	92,3	90	2,3
44	305,8	260	45,8
46	358,9	410	51,1
50	303,3	290	13,3
53	336,3	260	76,3
54	283,0	90	193,0
60	204,2	140	64,2
65	259,9	260	0,1
69	274,6	410	135,4

Tabela 4. 24- Coordenadas reais e estimadas pelo sistema ANFIS com tempo de chegada da DP no eixo z (1 cápsula piezelétrica)

DP	ANFIS z (mm)	Real z (mm)	Erro (mm)
1	294,9	450	115,1
3	291,3	450	158,7
10	333,3	350	16,7
13	286,2	250	36,1
23	308,3	150	158,3
42	303,2	300	3,1
44	318,6	400	81,4
46	338,9	400	61,1
50	317,7	320	2,3
53	330,1	320	10,1
54	310,6	320	9,5
60	289,5	240	49,4
65	159,8	160	0,2
69	307,7	80	227,7

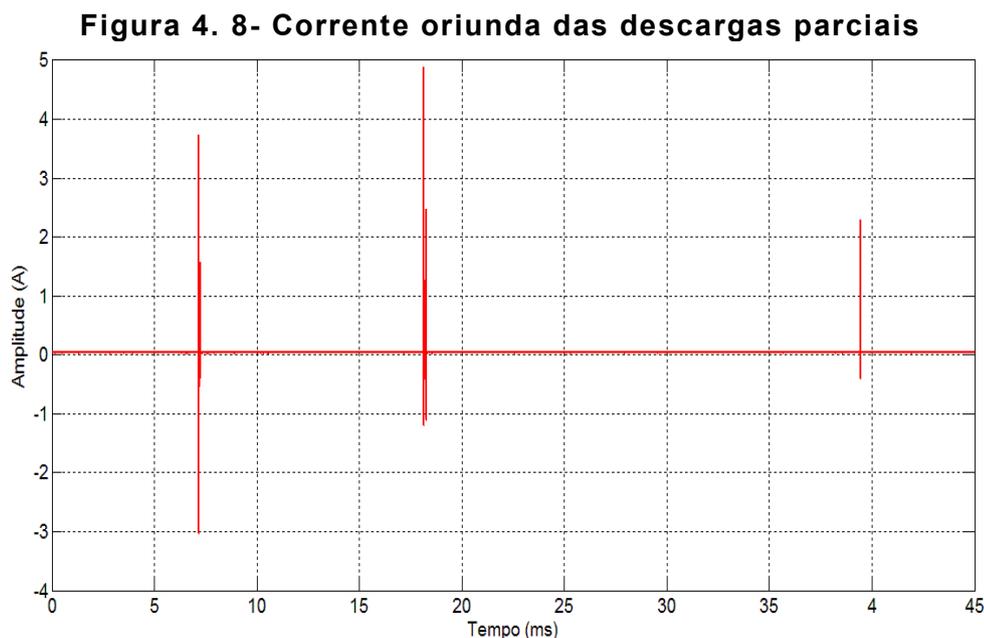
Na Figura 4.7, estão ilustrados os resultados estimados pelo sistema ANFIS com as cápsulas piezelétricas de baixo custo (1; 4; 6) e as coordenadas retangulares reais oriundas das DPs.

Figura 4. 7- Representação tridimensional das medidas reais e estimadas pelo sistema ANFIS

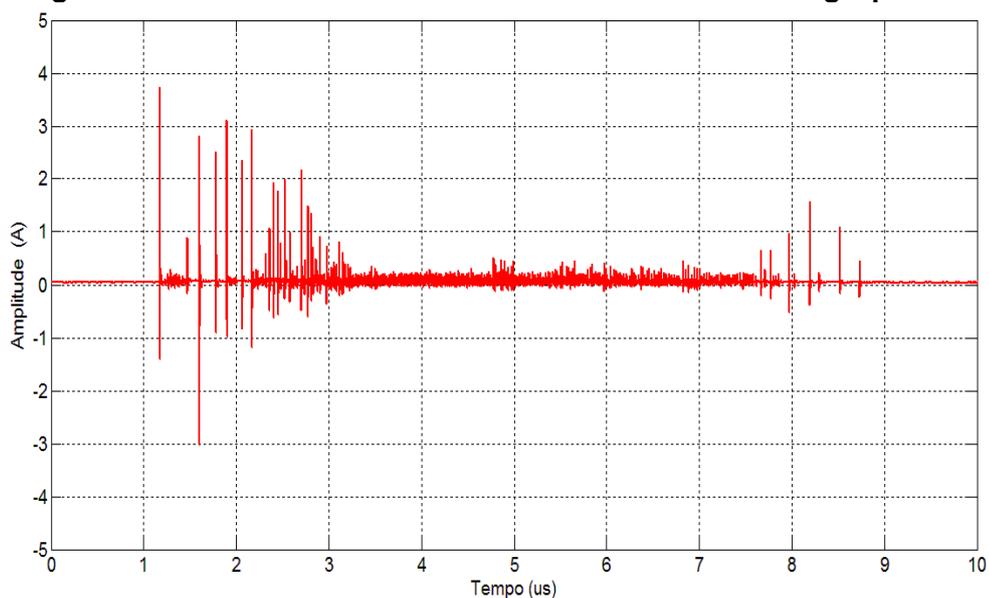


4.4. Análise dos dados adquiridos a partir das descargas parciais

A Figura 4.8 constata que ocorrem descargas parciais, indicando que não há corrente elétrica passando pelo eletrodo, até as condições ideais para tal fenômeno ocorrer, estabelecendo assim, a passagem do fluxo de elétrons no circuito de alta tensão.



Analisando isoladamente apenas uma DP, a forma de onda da corrente elétrica, ilustrada na Figura 4.9, indica diversos impulsos. Desta forma, comprova o surgimento da DP e não uma ruptura completa do óleo mineral isolante.

Figura 4. 9- Corrente oriunda de uma única descarga parcial

Como ilustrado na Figura 4.10, quando advirem as DPs, elas apresentarão impulsos na forma de onda senoidal do circuito de alta tensão. A Figura 4.11 ilustra que a DP surge na crista da onda, onde a diferença de potencial é elevada, criando assim um maior campo elétrico.

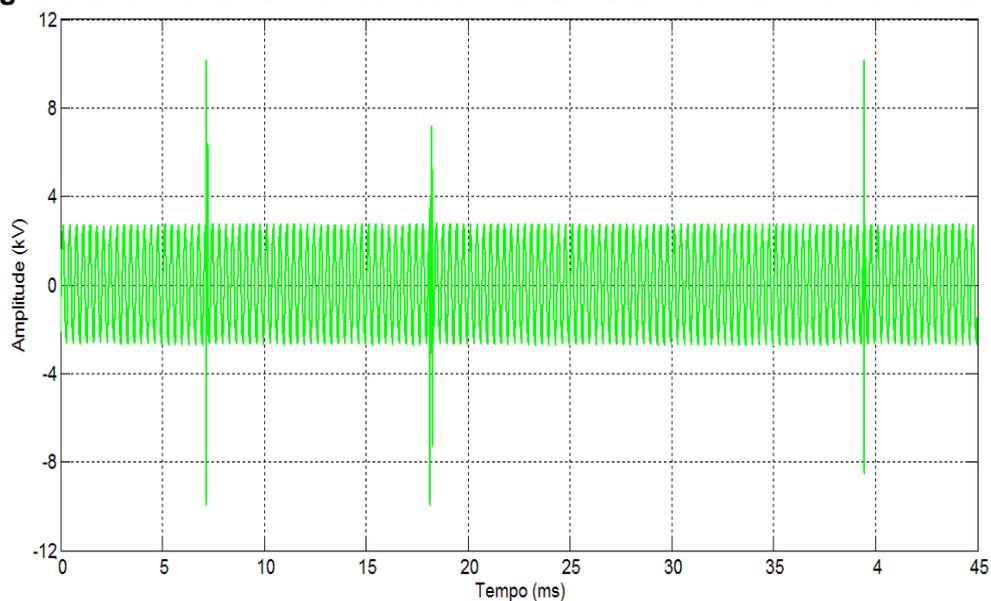
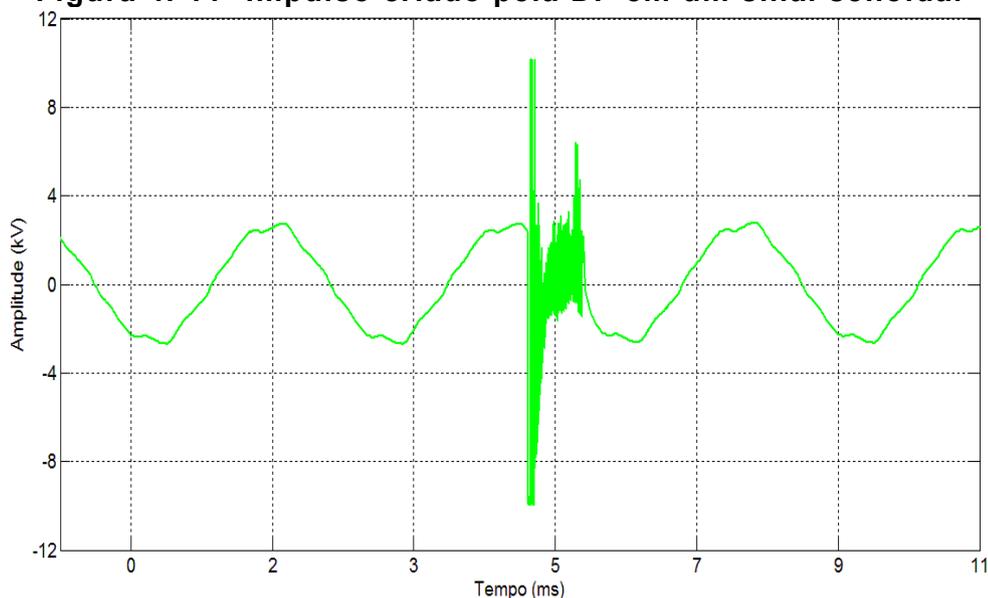
Figura 4. 10- Tensão elétrica instantânea no circuito de alta tensão

Figura 4. 11- Impulso criado pela DP em um sinal senoidal

Dispondo de uma janela no exato instante que ocorre a DP, conforme ilustrado na Figura 4.12, acontece um afundamento da tensão elétrica. Em seguida, surgem impulsos que atingem aproximadamente 10 kV, cerca de 3,5 vezes o valor estabelecido nos testes. Com isso, pode-se afirmar que além da degradação no óleo mineral, ocorrem estresses nos materiais condutores, elevando estes à uma diferença de potencial elétrico acima do valor nominal.

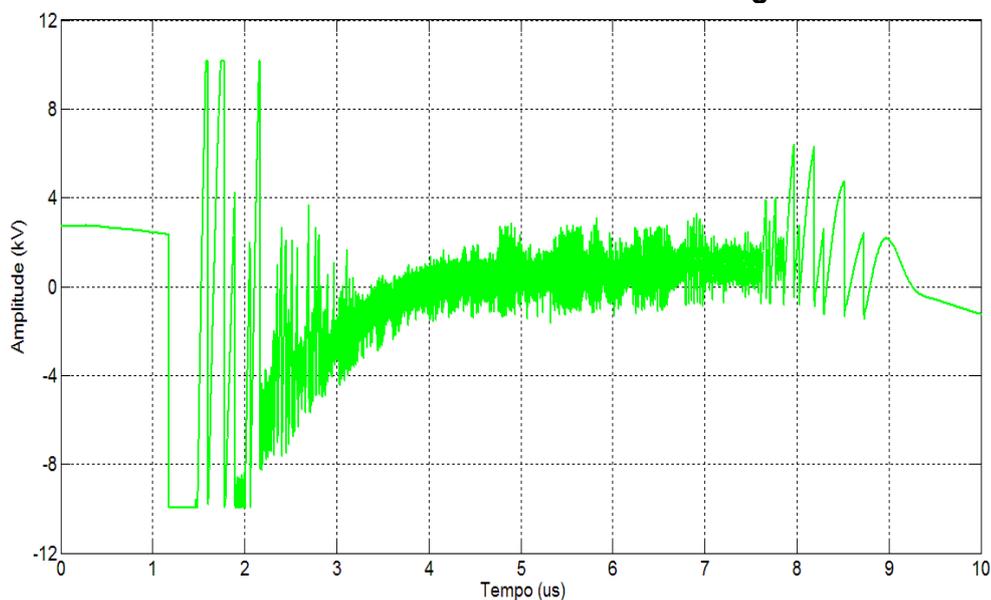
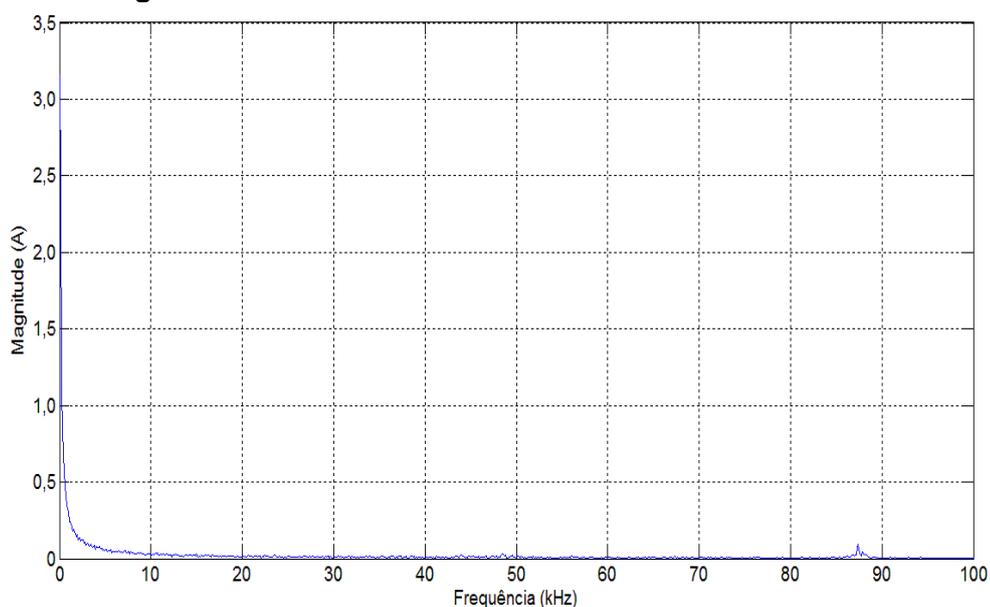
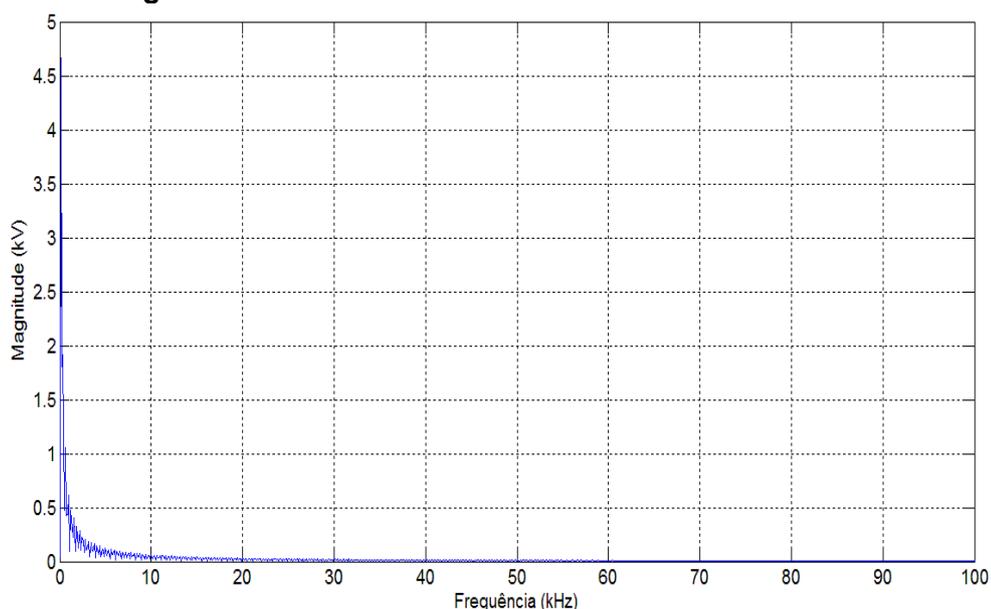
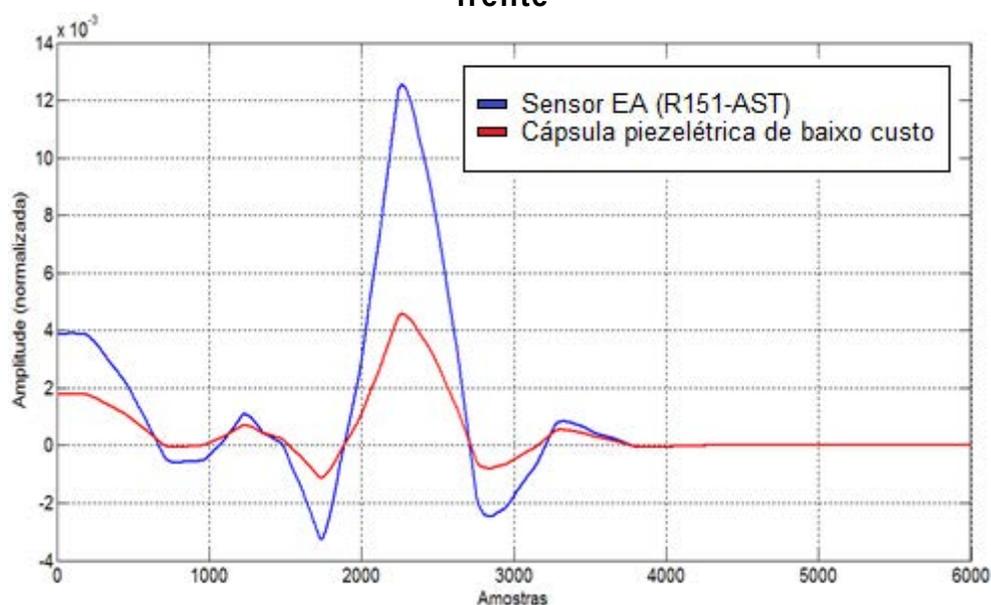
Figura 4. 12- Crista de uma onda senoidal com surgimento de uma DP

Figura 4. 13- Transformada de Fourier na corrente**Figura 4. 14- Transformada de Fourier na tensão**

Utilizando a transformada de Fourier nos sinais da corrente e tensão elétrica, conforme ilustrados nas Figuras 4.13 e 4.24, na corrente, aparece uma componente próxima da frequência de 90 kHz, que não foi observada na tensão elétrica. A frequência fundamental de 60 Hz é predominante, mesmo com a presença da descarga parcial (DP). Segundo Markalous (2008), existem duas ondas que se propagam no sistema. Uma é a onda de frente, ou seja, a produzida pela energia direta que se propaga com a menor distância entre o ponto da DP e o tanque do transformador, produzindo a vibração da estrutura. A segunda onda é a energia da

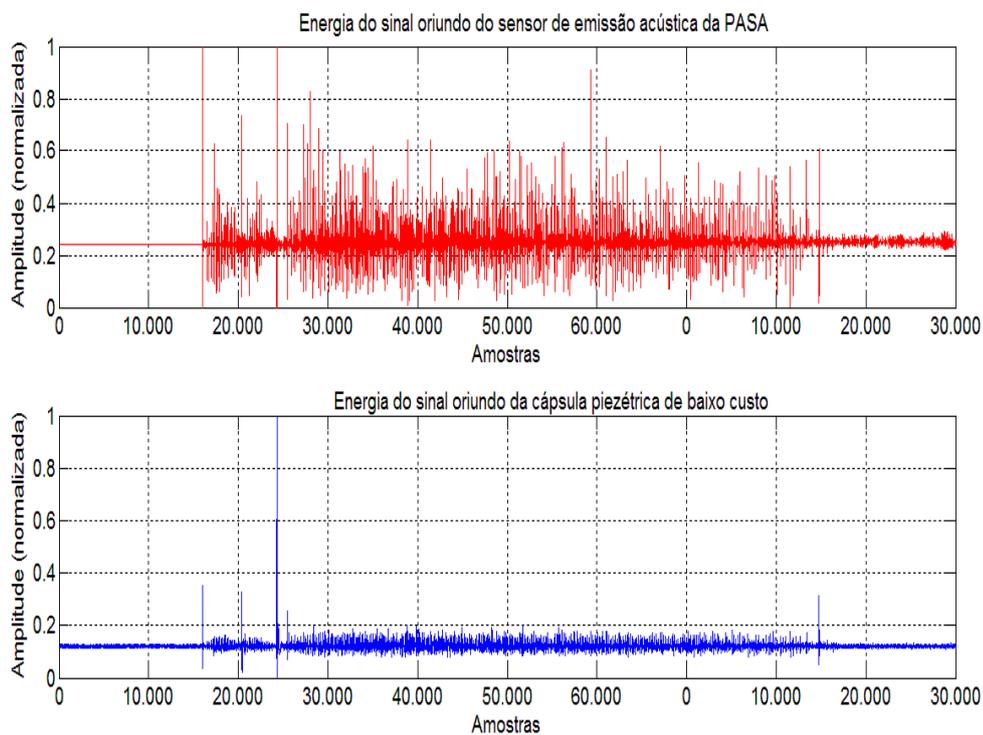
emissão acústica da DP que percorre o sistema pela distância euclidiana. Conforme estudado por Iliuk (2012), os transdutores piezelétricos apresentam um tempo de decaimento, classificado como um fenômeno não-linear caótico, o que não ocorre no sensor de EA da PASA, apesar de ser um sensor piezelétrico. Na Figura 4.15, ilustrada em vermelho aparece a energia do sinal da cápsula piezelétrica e, em azul, o sensor de EA da PASA. Pode-se observar que a segunda onda é um impulso, portanto é fiel a DP. O eixo das abcissas está representado em amostras, pois os valores estão normalizados.

Figura 4. 15- Assíntota da energia entre os sensores no instante da onda de frente



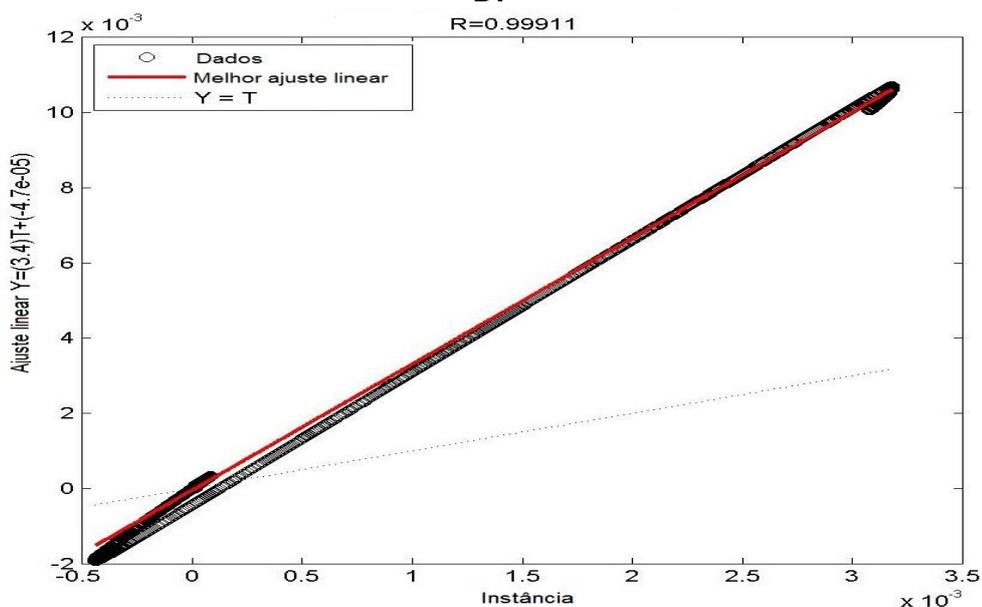
A Figura 4.16 faz uma comparação entre os sensores estudados nesse trabalho, utilizando a energia do sinal no instante de tempo da ocorrência da DP, ou seja, o impulso gerado, estabelecido pelo critério da energia.

Figura 4. 16- Comparação entre sensores no instante de tempo da ocorrência da DP

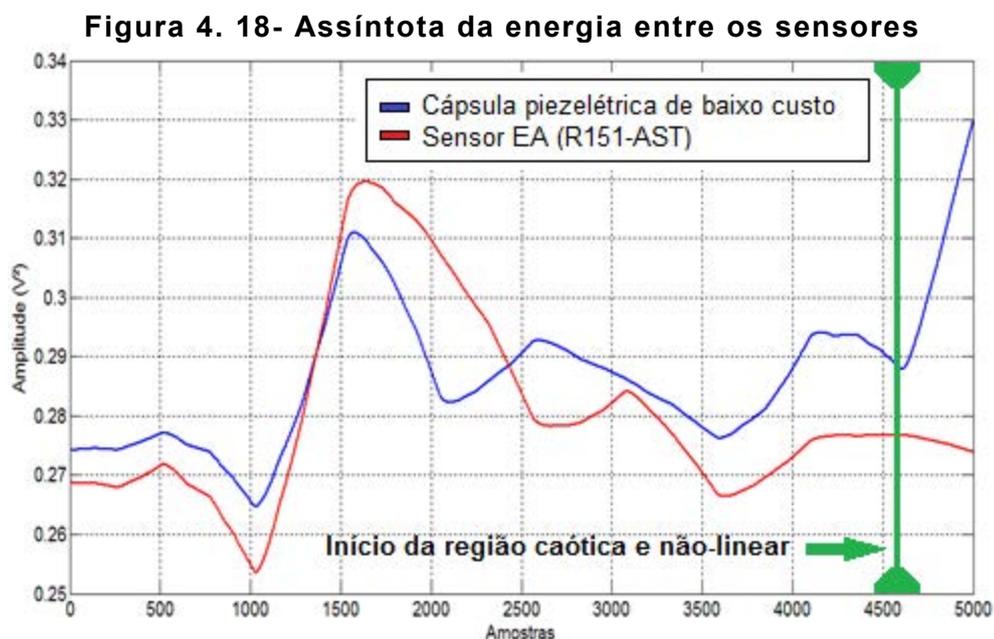


Observa-se, na Figura 4.17, que há correlação entre os sensores no instante em que ocorre a DP.

Figura 4. 17- Regressão linear entre os sensores no instante de tempo da DP



Na Figura 4.18, está ilustrado o comportamento dos sensores até a extinção do tempo de amortecimento, ratificando que a cápsula piezelétrica de baixo custo, após ser atingida pela energia da onda oriunda da DP, entra em uma região caótica e não linear, isso se deve por ser um sensor passível.



O alto índice de erro do segundo ensaio demonstra que o tanque do transformador, utilizado nesse trabalho, possui um volume muito pequeno para o treinamento de uma rede neural artificial. O primeiro ensaio, contendo 21 pontos de DPs, apresentou um desempenho satisfatório obtido com o treinamento da RNA. Entretanto, há poucos dados de teste para comprovar a eficácia do treinamento. O segundo ensaio, contendo 100 pontos de DPs, não obteve bom resultado entre o valor real e o estimado pela PMC. As energias de reflexão e refração das ondas oriundas das DPs fizeram com que as métricas determinísticas e estatísticas não representassem uma relação entres os pontos de DPs.

CAPÍTULO 5- CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um sistema para localização de descargas parciais em transformadores de potência, com isolamento a óleo mineral. Para isso, utilizou os sistemas inteligentes, conhecidos como: rede neural artificial (RNA), do tipo *Perceptron* Multicamadas (PMC) e sistema nebuloso do tipo *ANFIS*, nos quais são muito utilizados para reconhecimentos de padrões. Bem como, os sinais advindos de sensores piezelétricos de baixo custo ou cápsulas piezelétricas de baixo custo do tipo PZT. O trabalho de localização de descargas parciais (DPs) foi desenvolvido a partir de aquisições de dados das ocorrências de tal fenômeno, produzidos no tanque do transformador utilizado nos ensaios, sem a presença do núcleo, sendo o método mais utilizado na atual literatura. A partir destes registros, um filtro passa-banda foi necessário para obedecer a norma vigente da IEC 60270 (2011) sobre o assunto. Assim, garantindo que o sinal analisado pelos sistemas inteligentes fosse uma descarga parcial. Métricas determinísticas e estatísticas foram adotadas, como dados de entradas, gerados por cada descarga parcial (DP).

Fundamentado nos resultados obtidos no treinamento dos sistemas inteligentes, foi possível a comparação entre os pontos reais de ocorrência das DPs e os pontos estimados pela PMC e o sistema *ANFIS*. O modelo proposto se fez eficiente, utilizando sistemas nebulosos, para localizar o fenômeno estudado através da cápsula piezelétrica de baixo custo. Porém, não foi possível confirmar a precisão da localização das DPs utilizando RNA, pois as dimensões do tanque do transformador utilizado, influenciaram no treinamento da PMC. De forma que, a(s) somatória(s) e subtrações de ondas propagadas pelo sistema induziram aos erros nos dados de entradas das RNAs. Ressaltando que foram utilizados sensores de baixo custo, comparando os dados obtidos com os de um sensor consolidado para detecção de emissões acústicas (EA). Os resultados obtidos nessa dissertação visam contribuir com o desenvolvimento de localização de DPs em transformadores de potência, utilizando métodos não intrusivos nos equipamentos em análise e, principalmente, com custo muito inferior ao utilizado atualmente no mercado. Cabe-se destacar que estes sensores não foram desenvolvidos para esta finalidade, o que os torna um ponto chave para pesquisas futuras, nesta ou em outras áreas, que se utilizem as técnicas de emissão acústica.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

- Utilização de outras ferramentas para processamento dos sinais, por exemplo, filtros adaptativos, como por exemplo Wavelet;
- Inserir o núcleo no tanque do transformador e um tanque com maiores dimensões;
- Utilizar ferramentas determinísticas como critério da energia e equações de refração, reflexão e atenuações de ondas acústicas em meios líquidos;
- Realizar estudos sobre o aquecimento que o transformador de potência sofre e abordar o efeito piroelétrico; com estudos sob o ponto de vista a temperatura de Curie.

REFERÊNCIAS

ABB. **Catálogo de Transformadores de potência**, 1999.

ABRAHAMMS, S.C; NASSAU, N. **In Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials**. RJ Brook. Cambridge, MA: MIT Press, pp 351-354, 1991.

ACOUSTIC Emission Sensors. **Fuji Ceramics Corporation**, Tokio, Japão. Disponível em: <<http://www.fujicera.co.jp>>. Acesso em 7 Outubro 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7274: Interpretação da Análise dos Gases de Transformadores em Serviço**, 1982.

ASTM. **Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response**, E976-10, 2010.

AZEVEDO, C. H. B. **Metodologia para a eficácia de detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção em transformadores de potência imersos em óleo isolante**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

BAPTISTA, F. G. **Uma contribuição aos sistemas de monitoramento de integridade estrutural baseados na impedância eletromecânica**. 2010. 91 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, Brasil. 2010.

BARRETO NETO A.G.S.; LIMA A.M.N; TEJO F.; PRECKER C.; MOREIRA C.S. **Piezoelectric Buzzer Optimization for Micropumps**. Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Boston, 2012.

BARTLEY, P. **Analysis of transformer failures**. [S.l: S.n]. p.1-13, 2003.

BARTNIKAS, R. **Partial discharge: their mechanism, detection and measurement**, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 9, no. 5, pp. 763-808, 2002.

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

BENINI, L. C. **Estimação da densidade de solos utilizando sistemas de inferência Fuzzy**. 2007. 194 f. Tese (Doutorado em Energia da Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu. 2007.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e aplicação**. Rio de Janeiro: Ltc, 2000. 262 p.

BUCHANAN, R.C. **Ceramic Materials for Electronics**. 3. ed. Nova York: Marcel Dekker, 2004. 683 p.

BYRD, T. A.; HAUSER, R. D. **Expert systems in production and operations management: research directions in assessing overall impact**. Int. J. Prod. Res., Vol. 29, pp. 2471-2482, 1991.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. 2. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. 702 p.

CARRARA, V. **Redes Neurais Aplicadas ao Controle de Atitude de Satélites com Geometria Variável**, Tese de Doutorado em Mecânica Espacial e Controle, INPE, São José dos Campos, Junho de 1997.

CHARNIAK, E.A; MCDERMOTT, D.V. **Introduction to Artificial Intelligence**. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, 1985.

CHAURASIA D. C. **Scintillation Modeling for insulator String under Polluted Conditions**, Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, vol. 4, pp. 224-227, IEEE, Agosto 23-27, 1999.

CHEN, Hung-Cheng. **Partial discharge identification system for highvoltage power transformers using fractal featurebased extension method**. IET Science, Measurement and Technology, vol. 7, pp. 77-84, ISSN 1751-8822, 2013.

DEMUTH, H; BEALE, M. **Neural network toolbox user's guide**. Natick, MA: Math Works, 1992.

DINIZ, Filipe Castello da Costa Beltrão. **Supressão de ruído, detecção e classificação de sinais de descargas parciais em transformadores de potência**. 2005. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DUVAL, M. **A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis Using New IEC Publication 60599 and IEC TC 10 Databases**. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol 17, nº 6, p. 22-27, 2002.

EYNG, E. **Controle Feedforward-Feedback aplicado às colunas de absorção do processo de produção de etanol por fermentação**. Tese de doutorado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.

FERREIRA, Daniel A. P. **Análise de falhas em transformadores de distribuição por metodologia forense**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Curso Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

GAVA, Grasielli. **Alternativas para Resolução de Sistemas Não-Lineares Especiais**. 2007. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

GUTNIK, Yvan. **Estudos dos Piezoelretos na Detecção de Descargas Parciais em transformadores**. 2014. 292 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

HAUSCHILD, W. **Zum Öldurchschlag in inhomogen Feld bei Schaltspannungen**. 1970. Tese – Technical University Dresden, Dresden, 1970.

HAYKIN, S.S. **Redes Neurais: princípios e prática**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.

HEATHCOTE, Martin J. **The J & P Transformer Book**. 12. ed. Oxford: Newnes, 1998. 945 p.

IBRAHIM, Ricardo Cury. **Caracterização de Propriedades Físicas de um Material Cerâmico Ferroelétrico do Sistema PZT**. 1991. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1991.

ILIUK, Itamar. **Fenômenos não-lineares, incluindo-se os não ideais, em captura de energia utilizando-se dispositivos piezoelétricos**. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

INSTRUTHERM. **Catálogo de produtos**. Disponível em <<http://www.instrutherm.com.br/>>, acessado em 1 de outubro de 2014.

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

JALILI, N. **Piezoelectric-Based Vibration Control: From Macro to Micro/Nano Scale Systems**. New York: Llc, 2010. 517 p.

JANG, J.S.R., **ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference Systems**. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.

KITTINGER E.; TICHÝ J. **Explicit angular dependence of electroelastic effect of singly rotated extensional mode quartz resonators**. Journal Acoustics Society of America, 91:1484–1488, 1992.

KRISHNAKUMAR, K. **Intelligent systems for aerospace engineering – an overview**. NASA Technical Report, ID: 20030105746, 2003.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 593 p.

MARKALOUS, Sacha M.; TENBOHLEN, Stefan; FESER, Kurt. **Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals**. IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation, v. 15, n. 6, p.1576-1583, dez. 2008.

MINSKY, M; PAPER, S. **Perceptrons - An Introduction to Computational Geometry**. Editora: Massachusetts institute of Technology andwritten, 1969.

MORAIS, Diogo Roberto. **Ferramenta Inteligente para Detecção de Falhas Incipientes em Transformadores Baseada na Análise de Gases dissolvidos no Óleo Isolante**. 2004. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOZELLI, L. A. **Controle fuzzy para sistemas Takagi-Sugeno: condições aprimoradas e aplicações**. 2008. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

MURATA. Murata manufacturing Co. Ltd. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <<http://www.murata.com/>>, acessado em 7 de Outubro de 2014.

NELSON DF. **Electric, optic and acoustic interactions in dielectrics**. Wiley: New York, 1979.

NORGAARD, M. **Neural network based control system design toolbox** [online], Institute of Automation, Denmark, Technical University of Denmark, 1996, [cited 1996], Technical Report 96-E-830, Available in Post Script from World Wide Web: <http://www.iau.dtu.dk/Projects/proj/nnctrl.html>.

NORGAARD, M. **Neural network based system identification toolbox** [online], Institute of Automation, Denmark, Technical University of Denmark, 1995, [cited 1996], Technical Report 95-E-773, Available in Post Script from World Wide Web: <http://www.iau.dtu.dk/Projects/proj/nnsysid.html>.

OLIVEIRA, Sérgio C. **Sistema de Detecção Óptica de Descargas Parciais em Cadeia Isoladores de Linhas de Transmissão de Alta Tensão**. 2008. 113 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PASA. Physical Acoustics South America. **Catálogo de produtos**. Disponível em: <<http://www.pacndt.com/downloads/Sensors/AE%20Sensor%20Catalog.pdf>>, acessado 7 de Outubro de 2014

REIS, R. N. **Síntese e propriedades físicas de cerâmicas ferroelétricas de PMN-PT**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2009.

REZENDE, S. M. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004. 547 p.

ROGERS, R.R. **Experiences in the interpretation of incipient faults in power transformers by dissolved gas-in-oil chromatography analysis**. Minutes of Forty-second International Conference of Double Clients, 1975, 10-201.

SAMPA, Dunian C. **Estimação dos Sinais Elétricos das Descargas Parciais Através da Deconvolução dos Sinais Acústicos Gerados por Estes**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

SANTOS, Leonardo T. B.; VELLASCO, Marley M. B. R.; TANSCHKEIT, Ricardo. **Decision Support System for Diagnosis of Power Transformers**. In: 2009 15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 2009, Curitiba: IEEE, 2009. p. 1 - 6.

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, pp 400-403, 2008.

SILVA FILHO, João Inácio da; ABE, Jair Minoro. **Fundamentos Das Redes Neurais Artificiais Paraconsistentes**: Destacando aplicações em neurocomputação. São Paulo: Editora Arte & Ciência, 2001. 303 p.

SHENG, B; ZHOU, W; YU, J; MENG, S; ZHOU, C; HEPBURN, D. **On-line PD Detection and Localization in Cross-bonded HV Cable Systems**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, pp. 2217-2224, 2014.

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

SOKOLOV, V.; BULGAKOVA, V.; BERLER, Z.; 2001. **Assessment of Power Transformer Insulation Condition**. Electrical Insulation Conference and Electrical manufacturing & Coil Winding Conference. pp. 605-613.

SOUZA, Denise Cascão Poli. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso.** 2008. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

SOUZA, Leandro Mendes de. **Método de Detecção de Falhas em Transformadores de Distribuição de Poste com Proteção Operada.** 2006. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

TAFNER, M. A. **Estagiamento automático do sono utilizando um canal de EEG e uma rede neural artificial com alta representação cortical.** Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

TAFNER, M; XEREZ, M.; RODRIGUES FILHO, I. W. **Redes Neurais Artificiais: Introdução e princípios de neurocomputação.** Blumenau: EKO, 1995

TEKTRONIX. **Catálogo de produtos.** Disponível em: <<http://www.tek.com/datasheet/current-probe/a621-a622>>, acessado em 3 de Outubro de 2014.

TICHÝ J.; GAUTSCHI G. **Piezelektrische Messtechnik.** Springer: Heidelberg, 1980.

TICHÝ, J.; KITTINGER, E.; PRÍVRATSKÁ, J. **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials.** Springer Heidelberg Dordrecht: Heidelberg, 2010, 205 p.

TOLÉDANO, P.; DMITRIEV, V. **Reconstructive phase transitions.** World Scientific, Singapore, 1996.

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.

VENKATRAGAVARAJ, E.; SATISH, B; VINOD, P. R; VIJAYA, M. S. **Piezoelectric properties of ferroelectric PZT-polymer composites.** Journal of physics D: Applied Physics, Vol 34, pp 487-492, 2001.

VLACK, V. **Elements of materials Science and Engineering.** 6 ed. New Jersey: Prentice Hall. pp 610, 1989.

VLACK, V. **Princípios de ciência dos materiais.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda. pp.467, 1970.

WADA, J; UETA, G; OKABE, S; AMIMOTO, T. **Inhibition Technique of Transformer Insulating Oil Degradation - Evaluation of the Effectiveness of Oxidation Degradation Inhibitors**. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 20, pp. 1641-1648, 2013.

WADA, Y. **Ferro-, Piezo-, and Pyroelectricity**. IEEE Trans. Elec. Insul. EI-22, pp. 255-259, 1987.

WANG, X; LI, B; ROMAN T. H; RUSSO, L. O; CHIN K; FARMER R. K. **Acousto-optical PD Detection for Transformers**. IEEE Transactions on power delivery, Vol. 21, No. 3, Julho 2006.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets**. Information and Control, 8, 338-353, University of California, Berkeley, California, 1965.

ZHANG, Y.; DING, X; LIU, Y. **An Artificial Neural Network Approach to Transformer Fault Diagnosis**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, nº 4, p. 1836-1841, 1996.

ZHELUDEV IS. **Elektrische Kristalle**. Akademire: Berlin, 1975.

ZIRBES, Roberto. **Metodologias para Avaliação e Diagnóstico do Estado de Isolamentos de Papel Impregnado com Óleo Mineral**. Florianópolis. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.