UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Departamento de Engenharia Elétrica

Thamyres Tânulla Cavalcante Palitó

Detecção acústica de descargas parciais com
transdutor piezoelétrico

São Carlos
2015

Thamyres Tânulla Cavalcante Palitó

Detecção acústica de descargas parciais com transdutor piezoelétrico

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim.

São Carlos
2015

Trata-se da versão original.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Palit6, Thamyres T6mulla Cavalcante
Fl62d Detec66o ac6ustica de descargas parciais com
transdutor piezoel6trico / Thamyres T6mulla Cavalcante
Palit6; orientador Ruy Alberto Corr6a Altafim. S6o
Carlos, 2015.

Disserta66o (Mestrado) - Programa de P6s-Gradua66o
em Engenharia El6trica e 6rea de Concentra66o em
Sistemas El6tricos de Pot6ncia -- Escola de Engenharia
de S6o Carlos da Universidade de S6o Paulo, 2015.

1. gera66o de descargas parciais. 2. detec66o
ac6ustica de DPs. 3. transdutor ultrass6nico. 4.
piezoeletreto. I. T6tulo.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **THAMYRES TÂMULLA CAVALCANTE PALITÓ**.

Título da dissertação: "Detecção acústica de descargas parciais com transdutor piezoelétrico".

Data da defesa: 12/03/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Titular **Ruy Alberto Correa Altafim (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovada

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Associado **Hélio Tatizawa**
(Instituto de Energia e Ambiente/IEE-USP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela proteção diária, me iluminando e renovando a cada momento a minha força e disposição ao longo dessa jornada e a Nossa Senhora pela fiel interseção.

Ao meu Orientador e Professor Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim, agradeço a confiança em mim depositada, o acolhimento, a paciência e os ensinamentos transmitidos durante esta caminhada.

Ao Professor Dr. Ruy Alberto Pisani Altafin, pelas sugestões e discussões da pesquisa.

Aos colegas do Grupo de Alta Tensão e Materiais (GATM) pelo acolhimento e ajuda em muitos momentos. Agradeço, especialmente aos Mestres Yuri Andrey Olivato Assagra e Daniel Augusto Pagi Ferreira pelas discussões e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Ivanildo e Fatima e a minha irmã Thayse. Painho e Mainha obrigada pelo esforço constante em promover uma boa estrutura educacional e por me proporcionarem todas as condições necessárias para que eu obtivesse as vitórias de toda a minha vida. Vocês me deram o apoio e incentivo para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigada, por acreditarem junto comigo neste ideal e por compreender os inúmeros momentos de ausência.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos (SEL/EESC/USP), em especial, aos técnicos, Rui Bertho e César Domingues, pelo suporte técnico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro concedido no período da realização desse trabalho, na forma de bolsa de mestrado. E a ELEKTRO (projeto P&D – Piezoeletretos da ELEKTRO – ANEEL – USP) pelo apoio financeiro.

À Universidade de São Paulo, por ceder o espaço físico para realização deste trabalho.

Às verdadeiras amigas construídas em São Carlos, agradeço os momentos felizes, os de medo, os de dúvidas e os de alívios.

A todos que me incentivaram de forma intencional ou não, para que eu pudesse subir mais este degrau.

“Se enxerguei mais longe, foi porque estava sobre os ombros de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

PALITO, T. T. C. **Detecção acústica de descargas parciais com transdutor piezoelétrico**. 2015. 117f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Os equipamentos elétricos instalados em linhas de transmissão e distribuição de energia são normalmente submetidos a condições anormais e intensos campos elétricos, que, eventualmente, levam, entre outros fenômenos, as descargas parciais (DPs). Estas descargas têm sido apontadas como uma das principais causas de falhas de equipamentos e envelhecimento precoce. Portanto, detectar DPs se tornou uma questão importante na busca de uma energia elétrica eficiente e confiável. No que se refere a detecção de DPs existem vários sensores que podem ser aplicados, a exemplos: óptico, magnético ou acústico, e cada um deles apresentando vantagens particulares e limitações. Uma das desvantagens de tais sensores é o custo elevado, o que restringe o monitoramento de DPs no âmbito da distribuição de energia mais especificamente em transformadores de potência. Embora, se o foco do monitoramento é apenas detectar a ocorrência de DPs, uma nova classe de sensores acústicos implementados com piezoeletretos pode ser uma alternativa econômica viável. Deste modo, nesta dissertação, foi investigado o comportamento acústico de tais transdutores expostos a diferentes condições de DPs, onde o sensor piezoelétrico foi utilizado na detecção de DPs produzidas por uma configuração de eletrodos ponta - ponta separados por diferentes *gaps* de ar (único ou múltiplo) e excitado por altas tensões alternadas. As amplitudes dos sinais registrados foram correlacionadas com a distância do *gap* e com a amplitude da tensão aplicada. A partir dos resultados obtidos foi possível observar que a intensidade do som das DPs, capturado com o transdutor piezoelétrico, está relacionada com o tamanho do *gap* e da amplitude da tensão, como relatado na literatura.

Palavras-chave: geração de descargas parciais; detecção acústica de DPs; transdutor ultrassônico; piezoeletreto.

ABSTRACT

PALITO, T. T. C. **Acoustic detection of partial discharges with piezoelectrets transducers.** 2015. 117p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Electrical equipment installed in power transmission and distribution lines are usually subjected to abnormal conditions and intense electric fields, which eventually lead, among others phenomena, to partial discharges (PDs). These discharges have been pointed as one of the main causes of equipment failures and premature aging. Therefore, detect PDs became an important issue in the prospect of efficient and reliable electric energy. Concerning PD detection there are several sensors that can be employed e.g. optical, magnetic or acoustic, and each of them presenting particular advantages and limitations. One of the drawback of such sensors is their elevated cost, which restricts the PD monitoring within the distribution of energy more specifically in power transformers. Although, if the intention of monitoring is only to detect the PD occurrence a new class of acoustic sensors implemented with piezoelectrets may be a feasible economic alternative. Therefore, in this work was investigated the acoustic behavior of such transducers exposed to different PD conditions, for instance, the piezoelectret sensor was employed on the detection of PD produced by a single or multiple point-to-point electrode setup with different air gaps excited by high AC voltages. The recorded signals amplitudes were correlated with the gap distance and voltage amplitude applied. Based on the results obtained it was observed that the intensity of the DPs sound, captured with the piezoelectric transducer, is related to the size of the gap and voltage amplitude, as reported in the literature.

Keywords: *generation of partial discharges; acoustic detection of DPs; ultrasonic transducer; piezoelectret.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Fotografia dos canais de descargas parciais tipo: (a) <i>streamer</i> em ar e (b) <i>leader discharge</i> .	37
Figura 2.2 - Curva de Paschen: relação tensão x pd .	38
Figura 2.3 – Representação do início da ocorrência de uma descarga parcial.	39
Figura 2.4 - Relação entre o campo elétrico local e o campo elétrico médio no interior do material dielétrico para: (a) um vazio plano e (b) um esférico.	40
Figura 2.5 - Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. (a) Início; (b) formação de um par de elétrons – impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás (c) multiplicação – os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.	42
Figura 2.6 - Exemplo de isolamento com falhas que podem causar descargas parciais.	44
Figura 2.7 – Arborescência em polimetilmetacrilato.	44
Figura 2.8 – Exemplo de isolamento com falha que pode causar descargas superficiais.	45
Figura 2.9 – Exemplo de configuração que pode gerar descargas tipo corona.	46
Figura 2.10 – Circuito elétrico equivalente de um isolamento com cavidade interna.	47
Figura 2.11 – Circuito elétrico equivalente as descargas parciais.	47
Figura 2.12 – Processo de ocorrência de descargas parciais em tensão AC.	49
Figura 2.13 – Representação de um isolamento com falha submetido a uma diferença de potencial.	49
Figura 2.14 – Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.	50
Figura 2.15 – Representação do arranjo experimental empregado na medição de descargas parciais.	51
Figura 3.1 – Efeito piezoelétrico: (a) direto (b) inverso.	58
Figura 3.2 – Imagens microscópicas de filmes celulares: (a) polipropileno (PP) (b) politereftalato de etilenglicol (PETP).	60
Figura 3.3 – Esquema ilustrativo das cargas elétricas aprisionadas nos polímeros celulares após carregamento elétrico e a deformação das cavidades pela aplicação de uma pressão externa na estrutura.	61
Figura 3.4 – (a) Micrografia por escaneamento eletrônico da seção transversal de um filme EMFi de 70 μm de espessura. (b) distribuição das cargas no interior do filme.	62
Figura 3.5 – Sistema de preparo de amostras com bolhas de ar distribuídas de forma homogênea.	64
Figura 3.6 – Esquema do procedimento de fabricação em laboratório de piezoeletretos com estruturas padronizadas em canaletas.	66
Figura 3.7 – Micrografia ótica da seção transversal da estrutura padronizada em canaletas.	66
Figura 4.1 – Diagrama em blocos da nova metodologia proposta.	69
Figura 4.2 – Circuito elétrico de DPs com <i>gaps</i> (G1, G2 e G3).	70
Figura 4.3 – Caixa em acrílico com <i>gaps</i> : (a) vista lateral e; (b) vista superior.	70
Figura 4.4 – Ocorrência de descargas parciais utilizando a metodologia proposta.	71
Figura 4.5 – Ocorrência de descargas parciais nos <i>gaps</i> G1, G2 e G3 simultaneamente.	72
Figura 4.6 – Montagem do sistema de geração e detecção de DPs.	72
Figura 4.7 – Sinal elétrico quando: (a) não há DPs e; (b) há ocorrência de DPs.	73
Figura 4.8 – Circuito do sistema de alta tensão.	74
Figura 4.8 – Hipotronics HD125 AC/DC Hipot Tester do IEE-USP.	75

Figura 4.9 – Eletrodo cilíndrico de tungstênio puro com ponta cônica.	76
Figura 4.10 – Projeto do transdutor a base de piezoelitreto.	77
Figura 4.11 – Projeto do transdutor piezoelétrico e compartimento de interface e baterias.	77
Figura 4.12 – Piezoelitreto de FEP laminado.	78
Figura 4.13 – Esquema do circuito eletrônico.	79
Figura 4.14 – Circuito eletrônico montado.	79
Figura 4.15 – Protótipo da caixa em acrílico	80
Figura 4.16 – Caixa metálica: (a) vista lateral; (b) tampa revestida com tela de alumínio; (c) vista superior e (d) caixa completa.	81
Figura 4.17 – Métodos convencionais de geração de descargas parciais.	82
Figura 4.18 – Fotografia do corpo de prova construído com Polyjet/Fulcure 720.	82
Figura 5.1 – Circuito utilizado na classe de único <i>gap</i>	85
Figura 5.2 – Curva média do <i>gap</i> G1 para a tensão de 3kV.	86
Figura 5.3 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o <i>gap</i> 1.	87
Figura 5.4 – Curva média do <i>gap</i> G2 para a tensão de 4,0 kV.	88
Figura 5.5 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o <i>gap</i> 2.	89
Figura 5.6 – Curva média do <i>gap</i> G3 para a tensão de 5,0 kV.	89
Figura 5.7 – Curva da medida 1 do <i>gap</i> G3 para a tensão de 2,5 kV.	90
Figura 5.8 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o <i>gap</i> 3.	91
Figura 5.9 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os <i>gaps</i> G1, G2 e G3.	91
Figura 5.10 – Representação do circuito da configuração de <i>gaps</i> G1 + G2.	92
Figura 5.11 – Curva média da configuração G1 + G2 para a tensão de 3,0 kV.	93
Figura 5.12 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G1 + G2.	94
Figura 5.13 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os <i>gaps</i> G1, G2 e G1 + G2.	94
Figura 5.14 – Representação do circuito da configuração de <i>gaps</i> G1 + G3.	95
Figura 5.15 – Curva média da configuração G1 + G3 para a tensão de 4,0 kV.	95
Figura 5.16 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G1 + G3.	96
Figura 5.17 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os <i>gaps</i> G1, G3 e G1 + G3.	97
Figura 5.18 – Representação do circuito da configuração de <i>gaps</i> G2 + G3.	97
Figura 5.19 – Curva média da configuração G2 + G3 para a tensão de 5,0 kV.	98
Figura 5.20 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G2 + G3.	99
Figura 5.21 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os <i>gaps</i> G2, G3 e G2 + G3.	99
Figura 5.22 – Representação do circuito da configuração de <i>gaps</i> G1 + G2.	100
Figura 5.23 – Curva média da configuração G1 + G2 + G3 para a tensão de 6,0 kV.	100
Figura 5.24 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G1 + G2 + G3.	101
Figura 5.25 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os <i>gaps</i> G1, G2, G3 e G1 + G2 + G3.	102
Figura 5.26 – Gráfico das médias RMS para todas as configurações.	102
Figura 5.27 – Antes e depois das pontas dos eletrodos de tungstênio.	104
Figura 5.28 – Detalhe do alinhamento das pontas dos eletrodos.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Constantes mínimas de ignição para alguns gases.....	39
Tabela 5.1 – Médias RMS para o <i>gap</i> G1 com os osciloscópios Agilent e Tektronix.	84
Tabela 5.2 – Médias para o <i>gap</i> G1.	86
Tabela 5.3 – Médias para o <i>gap</i> G2.	88
Tabela 5.4 – Médias para o <i>gap</i> G3.	90
Tabela 5.5 – Médias para o <i>gap</i> G1 + G2.	93
Tabela 5.6 – Médias para a configuração de <i>gaps</i> G1 + G3.	96
Tabela 5.7 – Médias para a configuração de <i>gaps</i> G2 + G3.	98
Tabela 5.8 – Médias para o <i>gap</i> G1 + G2 + G3.	101
Tabela 5.9 – Conicidade e angulação das pontas dos eletrodos.	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Alternada
<i>BNC</i>	<i>Bayonet Neil Concelman</i>
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Cabo coaxial
<i>CEIDP</i>	<i>Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena</i>
CI	Circuito integrado
DC	Contínua
DP	Descarga parcial
DPs	Descargas parciais
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
FEP	Poli (Tetrafluoretileno-co-hexapropileno)
<i>FET</i>	<i>Field Effect Transistor</i>
GATM	Grupo de Alta Tensão e Materiais
<i>GIL</i>	<i>Gas Insulated Lines</i>
<i>GIS</i>	<i>Gas Insulated Switchgear</i>
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IM	Instrumento de medição
LATM	Laboratório de Alta Tensão e Materiais
NBR	Norma Brasileira
PETP	Politereftalato de etilenglicol
PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
PVDF	Polifluoreto de vinilideno
PZT	Titanato zirconato de chumbo
RC	Resistor e Capacitor
RF	Radiofrequência
RLC	Resistor, Indutor e Capacitor
<i>RMS</i>	<i>Root Mean Square</i>
SEL	Departamento de Engenharia Elétrica e Computação

TRI	Teste de tensão de rádio interferência
USP	Universidade de São Paulo
UV	Ultravioleta
VAC	Vinilacetato
VDCN	Cianeto de vinilideno

LISTA DE SÍMBOLOS

E_l	Campo elétrico local ou na cavidade
E_r	Campo elétrico de ruptura
E_i	Campo de ignição
E_e	Campo de extinção
p	Pressão
d	Distância
V_i	Tensão de ignição
V_r	Tensão de ruptura
V_{imin}	Tensão de ignição mínima
pd	Produto entre a pressão e a distância
pd_{min}	Produto mínimo entre a pressão e a distância
τ_a	Tempo de atraso
ΔV	Sobretensão
E_a	Campo aplicado
V_a	Tensão aplicada
ϵ_r	Permissividade relativa do meio
γ	Gama
$\delta(t)$	Delta de dirac
$U_t(t)$	Tensão alternada
C_c	Capacitância da cavidade
C_b	Capacitância adjacente
C_a	Capacitância do material sem falhas
Z	Impedância
C_k	Capacitor de acoplamento
C_p	Capacitância de prova
Z_m	Impedância de medição
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
$BaTiO_3$	Titanato de bário
d_{33}	Coefficiente piezoelétrico
dB	Decibéis

N	Número de amostras positivas e negativas
i_k	Valor de i do índice k

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	9
RESUMO	13
ABSTRACT.....	15
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	17
LISTA DE TABELAS	19
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	21
LISTA DE SÍMBOLOS.....	23
Introdução	29
1.1 Considerações iniciais	29
1.2 Estrutura do trabalho	29
1.3 Motivação.....	30
1.4 Objetivos	32
Descargas Parciais	35
2.1 Considerações iniciais	35
2.2 Descargas Parciais.....	35
2.2.1 Condições para ocorrência de descargas parciais	37
2.2.2 Classificação das descargas parciais	43
2.2.3 Descargas Parciais em tensões alternadas.....	46
2.2.4 Métodos de medição das descargas parciais	50
2.3 Considerações Finais.....	54
Eletretos, piezoeletricidade e piezoeletreto.....	55
3.1 Considerações iniciais	55
3.2 Eletreto	55
3.3 Piezoeletricidade	57
3.4 Piezoeletretos	61

3.4.1	Piezoeletretos Termoformados	63
3.5	Considerações Finais.....	67
	Nova metodologia proposta	69
4.1	Metodologia.....	69
4.1.1	Geração de DPs em laboratório	69
4.1.2	Aquisição do sinal acústico.....	72
4.1.3	Amplificação do sinal	73
4.1.4	Avaliação dos sinais de DPs	73
4.2	Materiais utilizados	74
4.2.1	Sistema de Alta Tensão.....	74
4.2.2	Eletrodos	75
4.2.3	Transdutor de Piezoeletreto	76
4.2.4	Caixa de Acrílico	79
4.2.5	Caixa metálica.....	80
4.3	Considerações Finais.....	81
	Resultados e Discussões	83
5.1	Considerações Iniciais.....	83
5.2	Único <i>gap</i>	85
5.2.1	<i>Gap</i> G1.....	85
5.2.2	<i>Gap</i> G2.....	87
5.2.3	<i>Gap</i> G3.....	89
5.2.4	<i>Comparação entre os gaps G1, G2 e G3</i>	91
5.3	Múltiplos <i>gaps</i>	92
5.3.1	<i>Gaps</i> G1+G2	92
5.3.2	<i>Gaps</i> G1+G3	95
5.3.3	<i>Gaps</i> G2+G3	97
5.3.4	<i>Gaps</i> G1+G2+G3.....	100

5.4	Comparação entre os <i>gaps</i>	102
5.5	Discussões	103
	Considerações finais	107
6.1	Artigo publicado.....	108
	Referências Bibliográficas	109

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Esta dissertação consiste em parte integrante da pesquisa desenvolvida pelo Grupo de Alta Tensão e Materiais (GATM) na produção de uma nova metodologia acústica com transdutores por piezoeletretos (projeto P&D ELEKTRO – ANEEL – USP), onde aqui se busca desenvolver os circuitos de ensaios em laboratório, que simulem as descargas parciais e seu comportamento e também uma interpretação digital desses sinais, criando um dos pilares dessa nova metodologia acústica.

1.2 Estrutura do trabalho

Encontram-se descritos neste capítulo o escopo geral dos capítulos desta dissertação, a motivação do trabalho de pesquisa e os seus objetivos.

No Capítulo 2 apresenta-se de forma resumida a fundamentação teórica básica necessária para o entendimento deste trabalho. Dentre os assuntos abordados, são discutidos os conceitos básicos, as condições de ocorrência, a classificação, o circuito equivalente e os métodos de medição relacionados às descargas parciais.

Em seguida, no Capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica dos eletretos, piezoeletricidade e piezoeletretos.

No Capítulo 4 descrevem-se os procedimentos e materiais utilizados na geração de sinais de descargas parciais. Adicionalmente, apresenta-se a metodologia utilizada na detecção dos sinais dessas descargas e por fim, são apresentados os procedimentos realizados na avaliação das descargas parciais em únicos e múltiplos *gaps*.

No Capítulo 5, são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos com a pesquisa.

As considerações finais são apresentadas no Capítulo 6. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento desta dissertação.

1.3 Motivação

Nas últimas décadas, a grande expansão tecnológica e a proliferação dos equipamentos eletrônicos, altamente sensíveis a variações de tensões de curta duração, têm levado as concessionárias de energia elétrica a preocuparem-se cada vez mais com a melhoria da qualidade e continuidade do fornecimento de energia. Essas duas características do fornecimento estão intimamente ligadas à confiabilidade dos equipamentos instalados nas linhas de transmissão e distribuição. Portanto, a verificação regular das condições desses equipamentos torna-se cada vez mais importante, seja no comissionamento, nas atividades de manutenção preventiva ou processos de reparo e também na administração de seu tempo de vida útil. Assim, torna-se imprescindível a busca de procedimentos e ferramentas que possibilitem a obtenção de dados das instalações de forma rápida e precisa. Neste contexto, torna-se evidente a necessidade de identificar as principais causas de perturbações nos sistemas elétricos e mitigar seus efeitos com monitoramentos constantes.

Estudos têm crescido tanto em qualidade quanto em quantidade nessa área como destacado na literatura (LUNDGAARD, 1992ab; LUNDGAARD; HANSEN, 1998; STONE, 2005; SCHWARZ; JUDENDORFER; MUHR, 2008; CARVALHO, 2009; CAVALLINI; MONTANARI; TOZZI, 2010; MONTANARI; CAVALLINI, 2013; KIIZA et al., 2014). Um tópico ressaltado consiste na detecção das descargas parciais (DPs), apontadas como uma das principais causas de falhas na isolação e envelhecimento precoce dos equipamentos (TESTA, 2009; KIIZA, 2014). Portanto, detectar DPs se tornou uma questão importante para a perspectiva de energia elétrica eficiente e confiável.

As descargas parciais são rupturas elétricas que podem ocorrer em falhas existentes em uma isolação sólida ou líquida e que normalmente são preenchidos por gases (a exemplo do ar), quando estes são submetidos à intensos campos elétricos não uniformes (IEC 60270, 2000; STONE, 2005). A intensidade e constância dessas DPs podem originar carbonizações dos dielétricos e criar trilhas condutoras reduzindo sobremaneira a suportabilidade das isolações elétricas. O conhecimento prévio da evolução deste fenômeno tem feito com que as concessionárias dediquem considerável atenção ao monitoramento e detecção dessas DPs em transformadores de potência, cabos de alta tensão, transformadores, capacitores e disjuntores.

A medição de descargas parciais é considerada uma solução consolidada para o diagnóstico e detecção prévia de possíveis defeitos nos isolamentos que são partes constituintes de equipamentos de alta tensão como hidrogeradores, transformadores e

disjuntores (MONTANARI; CAVALLINI, 2013). Testes por DP são realizados em praticamente todos os dispositivos utilizados no sistema elétrico de potência, seja na fabricação, após a instalação ou durante a operação (MOTA, 2011). Os sinais das DPs ajudam a revelar o envelhecimento precoce dos materiais isolantes, defeitos de fabricação, assim como previnem saídas de serviços não programadas (CUENCA, 2005).

A medição de DPs em equipamentos de alta tensão não só é dificultada pela acessibilidade e complexidade dos circuitos internos, como também por diversas fontes de ruído poluentes, que se acoplam ao sinal e ao sistema de medição. Instituições de pesquisa e fabricantes de equipamentos de medição de DPs trouxeram avanços significativos na eliminação de alguns tipos de ruídos, através de técnicas de processamento digital de sinais. Porém, estes avanços tecnológicos estão conduzindo para a diversificação que, se por um lado abre novas formas possíveis de ver o fenômeno de DPs, por outro, inibe o estabelecimento de procedimentos padrão com relação à identificação de fontes características de DPs (CUENCA, 2005).

Durante a ocorrência de uma descarga parcial (DP), o rápido fluxo de elétrons e íons produz diferentes efeitos como: interferências eletromagnéticas, ondas de pressão de gás e flash de luzes, que podem ser detectadas por sensores ópticos, eletromagnéticos ou acústicos (IEC 60270, 2000; MARKALOUS; TENBOHLEN; FESER, 2008; LUNDGAARD, 1992a).

Nos transformadores de potência ou em chaves de classe de distribuição, apenas detectar a DP não é suficiente para prevenir graves danos. Em tais equipamentos as DPs são normalmente causadas por falhas de isolamento, portanto, é desejável que os sistemas de medição e detecção possam indicar a localização da DP. No entanto, alguns dos métodos, como o teste elétrico dos sinais eletromagnéticos, sofrem várias atenuações e interferências com estorno, reduzindo sua eficácia na localização de fontes de DPs. A situação não é diferente com sistemas ópticos, uma vez que os flashes de descarga não estão sempre visíveis ao sensor (LUNDGAARD, 1992a). O método que tem sido utilizado com sucesso em tais casos é a detecção acústica, que pode localizar a DP através de triangulação de sensor, sendo não invasiva e imune ao ruído eletromagnético (LUNDGAARD, 1992a).

No entanto, os métodos de detecção de DPs são normalmente caros para linhas de distribuição e sistemas de monitoramento estão restritos a equipamentos de grande porte e custo elevado (LUNDGAARD, 1992b). Contudo, a demanda por qualidade e confiabilidade chama atenção para as linhas de distribuição que estão carentes de dispositivos de monitoramento de baixo custo.

Devido ao baixo custo relativo dos equipamentos de distribuição, tais como: transformadores de distribuição, as concessionárias optaram por substituí-los quando uma falha é apresentada em vez de executar a manutenção preventiva. Porém, se falhas precoces pudessem ser detectadas a um baixo custo, a substituição de equipamentos danificados poderia ser realizada antes que um evento mais grave ocorresse, evitando assim, posteriores gastos e melhorando a continuidade do fornecimento de energia elétrica.

A vantagem da detecção de DPs nos sistemas de distribuição é que a localização precisa da DP é menos relevante do que nos sistemas de potência e a simples detecção da ocorrência de uma DP pode fornecer informações significativas para uma manutenção preventiva. Portanto, métodos complexos não são necessários e DPs podem ser detectadas por meio de sensores acústicos mais simples.

Nesta dissertação são investigados os sinais acústicos produzidos pelas DPs geradas por tensões alternadas e capturados com um transdutor piezoelétrico. Para isso, foram construídos diferentes circuitos elétricos para testes em laboratórios, onde as falhas gasosas ou *gaps* com diferentes espaçamentos foram associados a capacitores para obter uma extensa gama de sinais acústicos de DPs, que foram correlacionados com os sinais elétricos oriundos dos transdutores. Esses dados permitem não só avaliar a sensibilidade acústica do sensor, mas também identificar qual a melhor métrica associada.

Uma característica que também deve ser salientada está relacionada ao custo de produção do elemento sensor e os acessórios. O transdutor piezoelétrico tem sido apresentado como uma alternativa economicamente viável para a detecção de DPs. Além disso, a escolha dos materiais para simular a ocorrência de DPs compreende não somente os aspectos técnicos inerentes à construção do dispositivo, mas também atendem aos requisitos financeiros, como o custo do protótipo.

1.4 Objetivos

Objetivo geral:

Este trabalho tem como objetivo principal propor uma nova metodologia para modelar um sistema para testes de descargas parciais em laboratório e, além disso, propõe a caracterização de um piezoeletrico para detecção acústica das descargas parciais geradas em laboratório.

Objetivos Específicos:

- Desenvolver um protótipo de múltiplos *gaps* capaz de produzir descargas parciais;
- Capturar, por meio de um transdutor ultrassônico, os sinais sonoros produzidos a partir das descargas parciais, a fim de formar um banco de dados para estudo;
- Avaliar os sinais sonoros, com o propósito de diagnosticar a ocorrência de descargas parciais em equipamentos ligados às redes de distribuição - classe 15 kV.

Capítulo 2

Descargas Parciais

2.1 Considerações iniciais

Para um melhor entendimento do trabalho, que possui um caráter multidisciplinar, são apresentados a seguir os conceitos básicos de DPs, as condições de sua ocorrência, sua classificação, os circuitos equivalentes existentes e as técnicas de medição a elas relacionadas.

2.2 Descargas Parciais

Segundo as normas IEC 60270 (2000) e NBR 6940 (1981), o termo descarga parcial pode ser definido como sendo uma descarga elétrica localizada que curto-circuita parcialmente um meio isolante entre dois meios condutores, podendo ou não ocorrer adjacientemente ao eletrodo, ou a outra parte de isolamento. Ainda de acordo com a norma IEC 60270 (2000), também pode-se definir um pulso de descarga parcial como sendo um pulso de tensão ou corrente resultante de uma descarga parcial que ocorreu em um determinado isolamento sob teste.

Já de acordo com Bartnikas (1979), descargas parciais podem ser sintetizadas como sinais elétricos pulsantes incompletos, intermitentes e rápidos, que ocorrem pela proximidade entre duas partes condutoras de eletricidade e o meio isolante, através do efeito de ionização em cavidades gasosas, no interior dos materiais isolantes e nas interfaces condutor - isolante ou isolante – isolante. O tempo de crescimento de uma DP é da ordem de poucos nanossegundos e sua duração pode chegar à centenas de nanossegundos (PEDERSEN; CHICHTON; McALLISTER, 1991; FRUTH; NIEMEYER, 1992; BARTNIKAS, 2002).

De modo geral, as descargas parciais ocorrem devido a imperfeições presentes nos materiais isolantes, que geram intensos campos elétricos tanto nas superfícies quanto internamente a estes materiais. Logo, a ocorrência de uma descarga parcial depende da intensidade do campo nas proximidades destas imperfeições, bem como do tipo de tensão elétrica aplicada, ou seja, alternada (AC) ou contínua (DC), tal como tensões transitórias de chaveamento e de impulsos (LEMKE, 2008).

Eventualmente as DPs só ocorrem quando um campo elétrico aplicado a um dielétrico excede a sua rigidez dielétrica, o que significa que a tensão a que esse dielétrico está submetido é superior ao seu nível de suportabilidade. De modo geral, as descargas parciais são iniciadas quando o campo elétrico dentro dos vacúolos gasosos excede o campo elétrico intrínseco do gás presente (LEMKE, 2008).

A tensão inicial em que acontecem as descargas parciais é definida como sendo a tensão aplicada, a partir da qual começa a ocorrer repetitividade de DPs. Analogamente, a tensão na qual ocorre a extinção das DPs é definida como sendo aquela em que a repetitividade da descarga parcial é interrompida. Procedem dessas tensões, esforços de campos elétricos, sobre o dielétrico, que podem ser definidos como campos iniciais e de extinção (BARTNIKAS, 2002; NIEMAYER, 1995).

Em sistemas isolantes, as DPs resultam em uma grande variedade de fenômenos físicos, podendo ser de baixa, média ou alta intensidade (NIEMAYER, 1995). Do ponto de vista físico, a criação de uma avalanche de elétrons autossustentada ocorre somente em gases. Consequentemente, descargas em dielétricos sólidos e líquidos ocorrem somente em vacúolos gasosos, como vazios ou fissuras em sólidos, assim como bolhas de ar em líquidos. Logo, o fenômeno de DP, que ocorre em ar ambiente, como o *glow*, o *streamer* e a *leader discharge*, também pode acontecer em compartimentos gasosos fechados. O pulso de carga criado pela descarga *glow*, geralmente referido como descargas Townsend, é normalmente da ordem de poucos picocoulombs (baixa intensidade). A descarga *streamer* cria pulsos de carga entre 10 e 100 pC (média intensidade). A transição da descarga parcial tipo *streamer* para a *leader discharge* ocorre se a carga do pulso da descarga excede o valor de 1000 pC (alta intensidade) (LEMKE, 2008). A Figura 2.1 apresenta fotografias dos canais de descargas parciais tipo *streamer* e *leader discharge*.

Figura 2.1 – Fotografia dos canais de descargas parciais tipo: (a) *streamer* em ar e (b) *leader discharge*.

Fonte: (a) LEMKE, 1967 e (b) HAUSCHILD, 1970.

2.2.1 Condições para ocorrência de descargas parciais

A ocorrência de uma descarga parcial depende, a princípio, que duas condições sejam satisfeitas. Uma dessas condições, é que haja um campo elétrico intenso o suficiente para acelerar as cargas livres com energia necessária para iniciar um processo de avalanche. E a outra, é que haja cargas livres (elétrons e/ou íons positivos) em um vazio preenchido com algum tipo de gás. Uma breve descrição destas duas condições é apresentada a seguir.

Influência do Campo Elétrico

O campo elétrico no interior da cavidade (E_i) deve ser superior a um campo elétrico crítico de ruptura (E_r), determinando assim, o campo de ignição (E_i) da ocorrência das descargas. (BOGGS, 1990; FUJIMOTO; RIZZETTO; BRAUN, 1992; MORSHUIS, 1993, 1995). Além disto, deve haver um campo elétrico, denominado campo de extinção (E_e), abaixo do qual interromperá a ocorrência das descargas parciais (NIEMEYER; FRUTH; GUTFLEISCH, 1991).

A condição de que o campo elétrico local deve ultrapassar certo valor de campo elétrico crítico pode ser vista de forma similar ao caso de descargas entre eletrodos metálicos, dada pela curva de Paschen (KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000). Nesse caso, a ocorrência da descarga depende do produto entre a pressão (p) e a separação dos eletrodos (d) para um determinado gás e material, bem como da temperatura, geometria e tamanho da

cavidade e do mecanismo específico da descarga (DRUYVESTYEN; PENNING, 1940; DISSADO; FOTHERGILL, 1992; FUJIMOTO; RIZZETTO; BRAUN, 1992; MORSHUIS, 1993, 1995; NIEMEYER; FRUTH; GUTFLEISCH, 1991).

A relação entre a tensão de ignição (V_i) e o produto pd toma a forma mostrada na Figura 2.2. A tensão de ruptura (V_r) passa por um valor mínimo (V_{imin}) a um determinado valor do produto (pd_{min}) (KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000).

Figura 2.2 - Curva de Paschen: relação tensão x pd .

Fonte: Adaptado de KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000.

Qualquer que seja a distância entre eletrodos em um meio gasoso, existe uma pressão crítica na qual a descarga de ruptura se dá com um valor mínimo de tensão aplicada entre os eletrodos. Com pressões acima e abaixo destes valores críticos, aumenta a tensão necessária para produzir a ruptura do gás, tanto no aumento como na diminuição das pressões. A tensão de ruptura do gás isolado depende da massa do gás entre os eletrodos. Se o produto pd for constante, a tensão disruptiva também será constante (KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000).

Na prática, as constantes de ignição (V_{imin} e pd_{min}) são os valores medidos, e alguns destes estão apresentados na Tabela 2.1 (KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000).

Tabela 2.1 – Constantes mínimas de ignição para alguns gases.

Gás	pd_{min} (Toor×cm)	V_{imin} (Volts)
<i>Ar</i>	0,55	352
<i>Nitrogênio</i>	0,65	240
<i>Hidrogênio</i>	1,05	230
<i>Oxigênio</i>	0,70	450
<i>Hexafluoreto de Enxofre</i>	0,26	507
<i>Dióxido de Carbono</i>	0,57	420
<i>Neônio</i>	4,00	245

Fonte: KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000.

O valor da tensão de ignição (V_i) não é obrigatoriamente igual ao valor da tensão de ruptura (V_r) em razão da existência de um tempo de atraso (τ_a) para a ocorrência da primeira descarga. Logo, a diferença entre V_i e V_r é denominada sobretensão ΔV (BOGGS, 1990; DEVINS, 1984; MORSHUIS, 1993). Nestes termos, apresenta-se na Figura 2.3 o início da ocorrência de uma descarga parcial.

Figura 2.3 – Representação do início da ocorrência de uma descarga parcial.

Fonte: SILVA, 2005.

O campo elétrico local (E_l), no interior da cavidade, pode ser determinado em função do campo elétrico macroscópico médio no restante do material dielétrico ou do campo aplicado (E_a). A determinação de E_l é possível em cavidades com geometria simples e considerando que o restante do material dielétrico seja homogêneo. Para uma cavidade plana (Figura 2.4a) com campo elétrico perpendicular ao plano, E_l é dado pela Equação 1 e para um

vazio esférico (Figura 2.4b), E_l é dado pela Equação 2. Onde E_a , é proporcional à tensão aplicada V_a e ϵ_r é a permissividade relativa do meio (KREUGER, 1989; GUTFLEISCH; NIEMEYER, 1995).

$$E_l = \epsilon_r E_a \quad (1)$$

$$E_l = \frac{3\epsilon_r}{1 + 2\epsilon_r} \times E_a \quad (2)$$

Figura 2.4 - Relação entre o campo elétrico local e o campo elétrico médio no interior do material dielétrico para: (a) um vazio plano e (b) um esférico

Ionização

Satisfeita a condição do campo elétrico, a segunda condição para ocorrência das descargas é a disponibilidade de elétrons livres na região da cavidade onde o campo elétrico local está acima do campo elétrico crítico. Estes elétrons são necessários para dar início à formação de uma avalanche eletrônica e, conseqüentemente, o início do processo de descarga. Existem dois mecanismos de geração de elétrons iniciais, são eles: a fotoionização do gás no interior da cavidade e a emissão de elétrons a partir da superfície interna da cavidade.

O processo de fotoionização consiste na ionização das partículas de gás a partir da absorção de radiação proveniente de uma fonte externa (HOWATSON, 1970; NASSER, 1971). Ao aplicar uma diferença de potencial entre dois eletrodos paralelos, é criado um fluxo de corrente sobre os elétrons e íons já existentes. Esses íons e elétrons podem ser originados através da radiação cósmica ou da radiação natural, também denominada de radiação de fundo, ou ainda por radiação ultravioleta (UV), raios X e raios γ (NIEMEYER; FRUTH; GUTFLEISCH, 1991; GUTFLEISCH, 1995).

O processo de fotoionização decorre do processo de fotoabsorção, que consiste na interação entre um fóton e um átomo ou molécula e resulta na absorção deste. Se durante o processo de fotoabsorção, a energia do fóton for suficiente para promover a excitação de um elétron de uma banda de menor energia para uma banda de maior energia, a molécula passa para um estado denominado excitado e este processo é conhecido como foto-excitação. Caso a energia do fóton absorvido seja suficiente para vencer as forças que mantêm o elétron ligado, este pode ser ejetado, desacoplando-se dos orbitais moleculares e, como consequência, tem-se uma molécula sem um elétron e um elétron livre (fotoelétron). Este processo é conhecido como fotoionização. É importante ressaltar que a fotoionização também pode ocorrer como resultado da radiação emitida a partir do próprio gás quando átomos excitados retornam ao seu estado fundamental ou ainda, quando átomos ionizados combinam-se com íons negativos para formar moléculas neutras (HOWATSON, 1970; NASSER, 1971).

Com relação ao processo de emissão de elétrons é possível citar dois mecanismos relacionados, são eles: emissão por campo e emissão por impacto de moléculas metaestáveis deixadas por descargas prévias. Antes da ocorrência da primeira descarga, o número de elétrons localizados em armadilhas¹ próximas ou na superfície da cavidade é muito pequeno, e a probabilidade de emissão por campo, é muito baixa. Além disto, para que ocorra o processo de emissão por campo existe a necessidade de que um campo elétrico elevado seja aplicado no objeto sob teste (GUTFLEISCH, 1995). Uma vez iniciada a atividade de descarga, o número de elétrons disponíveis na superfície da cavidade é elevado e esta probabilidade é aumentada devido ao processo de emissão por impacto (NIEMEYER; FRUTH; GUTFLEISCH, 1991).

A ionização de elétrons por impacto sob um forte campo elétrico é o processo mais importante que leva a ruptura dos gases. Em elevados campos elétricos, as partículas carregadas podem ganhar energia suficiente para causar a ionização no impacto com moléculas neutras (KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000). No ar, sempre há uma pequena porcentagem de moléculas ionizadas. Quando imersos em uma diferença de potencial, alguns desses íons são acelerados ganhando energia cinética. Como estes íons estão periodicamente sofrendo colisões com as moléculas de ar (devido ao movimento térmico), quando a diferença de potencial é grande o suficiente, a energia cinética do íon pode ser grande o suficiente para ionizar uma molécula em uma colisão. Isto pode gerar então um efeito avalanche, ilustrado na

¹ São estados localizados que pertencem a determinadas moléculas ou grupos moleculares (BAUSER, 1972).

Figura 2.5, onde cada molécula ionizada é acelerada pela diferença de potencial ionizando outra molécula e assim por diante, aumentando o número de íons a cada colisão.

Figura 2.5 - Processo de avalanche de elétrons iniciado a partir de um eletrodo negativo. (a) Início; (b) formação de um par de elétrons – impacto de um elétron com um átomo neutro libera um elétron adicional e deixa um íon positivo para trás (c) multiplicação – os elétrons se movem criando íons positivos quando se multiplicam.

Fonte: CUENCA, 2005.

O processo de geração de elétrons iniciais é um processo estocástico e é a principal causa do caráter aleatório da atividade das descargas parciais. Sendo assim, existe um tempo estatístico de atraso (τ_a) até que a primeira descarga ocorra (NIEMEYER; FRUTH; GUTFLEISCH, 1991; DISSADO; FOTHERGILL, 1992; MORSHUIS, 1993 e 1995). Este tempo de atraso depende do campo aplicado e do número de elétrons gerados por segundo. A título de exemplificação, a taxa de geração de elétrons em uma cavidade de 1 mm^3 em condição ambiente é aproximadamente 4×10^{-3} elétrons por segundo, resultando em um tempo de atraso de aproximadamente 10 minutos (MORSHUIS, 1993). Logo, durante um teste de descargas parciais na forma convencional, isto é, aplicação de um campo muito elevado durante um tempo muito curto (em média 1 minuto), o campo mínimo de ruptura pode facilmente ser excedido sem a ocorrência de descargas parciais (BOGGS, 1990). Ademais, a aplicação de um campo elevado pode vir a comprometer a vida útil do sistema de isolamento (FUJIMOTO; RIZZETTO; BRAUN, 1992). Após a ocorrência da primeira descarga, as descargas consecutivas apresentarão tempos de atraso muito curtos, na ordem de milissegundos, sendo estes valores diversas ordens de magnitude maiores que o tempo de formação de uma avalanche (BOGGS, 1990; DISSADO; FOTHERGILL, 1992; MORSHUIS, 1993 e 1995). Portanto, a diferença entre a tensão de início e a tensão de ruptura, obtida a partir da curva de Paschen, denominada sobretensão é considerada o parâmetro mais importante no processo de descarga por estresse elétrico (DEVINS, 1984; MORSHUIS, 1993).

2.2.2 Classificação das descargas parciais

O termo descargas parciais envolve um amplo grupo de fenômenos de descarga que pode ser classificada de acordo com a sua origem (KUMAR, 1997). Pode ser do tipo superficial, externa, pode ocorrer em um vacúolo interno a um material sólido, pode ocorrer devido a contaminantes em líquidos isolantes, ou devido a bolhas, entre outras situações (GUTNIK, 2014).

A terminologia usada para classificar os tipos de descargas parciais é normalizada pela IEC 60270 (2000) e pela norma brasileira NBR 6940 (1981). De acordo com a norma IEC 60270 (2000), as descargas parciais podem ser classificadas em três grupos dependendo da sua localização: descargas internas, superficiais e corona. Nesta dissertação o termo descarga(s) parcial(is) refere-se as descargas parciais internas. A seguir serão apresentadas maiores informações a cerca das descargas internas, superficiais e corona.

Descarga parcial interna

Descargas parciais internas podem ocorrer em uma ou mais cavidades no interior de um material dielétrico isolante. A descarga em sólidos isolantes é somente possível de ser iniciada em cavidades que contenham ar, como vazios e rachaduras, ou ainda em algum defeito da estrutura molecular deste sólido. Cavidades que contenham ar podem surgir na estrutura de materiais isolantes devido a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de manufatura (BOGGS, 1990). Além de fatores relacionados ao processo de manufatura do isolante, a variedade de estresses a que o material é submetido ao longo de sua vida contribuem para o aparecimento de vacúolos gasosos (GJAERDE, 1997). Já em líquidos isolantes, a descarga parcial aparece com mais frequência em bolhas de gases. Estas bolhas são originadas a partir de fenômenos térmicos e elétricos e também devido à presença de vapor d'água, que pode ser gerado em regiões que tenham campo elétrico concentrado (LEMKE, 2008).

Dentre as principais razões para o aparecimento de descargas internas, é possível citar as menores rigidez e permissividade dielétrica dos gases quando comparadas às dos isolamentos líquidos ou sólidos e a consequente intensificação do campo elétrico no interior da cavidade com menor tensão de ruptura. As descargas parciais internas podem ocorrer em qualquer parte do dielétrico, como por exemplo, na junção de dois materiais dielétricos

diferentes, nas regiões adjacentes ao eletrodo ou ainda, onde o vazio está totalmente circundado pelo dielétrico (KREUGER, 1989). Contudo, torna-se necessário a presença de uma cavidade no dielétrico, conforme é exemplificado na Figura 2.6. Além disso, as descargas parciais são de curta duração em relação ao período da tensão senoidal aplicada, são repetitivas e têm o tempo de subida muito curto, podendo ser modeladas idealmente como uma função impulso ou delta de Dirac $\delta(t)$ (ZINGALES, 2000).

Figura 2.6 - Exemplo de isolamento com falhas que podem causar descargas parciais.

Um tipo particular de descargas parciais internas são as descargas que ocorrem em arborescências elétricas. A arborescência elétrica, ilustrada na Figura 2.7, é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no material dielétrico. Sua origem é devido à ocorrência contínua de DPs internas, podendo estar presente em cavidades ou defeitos dos componentes isolantes ou ainda, ocasionadas por algum tipo de falha na interface entre dielétrico e eletrodo (KREUGER, 1989; DISSADO; FOTHERGILL, 1992).

Figura 2.7 – Arborescência em polimetilmetacrilato.

Fonte: PILLING, 1976.

Descarga parcial superficial

Descargas parciais superficiais ocorrem em gases, líquidos ou na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo em direção à superfície do dielétrico. Para a ocorrência deste tipo de descarga é necessário que a componente de campo elétrico tangente à superfície exceda certo valor crítico. Daí o processo de descarga superficial é iniciado (GULSKI, 1995). Assim como as descargas internas, as descargas superficiais ocasionam alterações na superfície do dielétrico, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores conhecidos como “trilhamento” também podem levar à ruptura completa do material dielétrico (MASON, 1995). Uma representação gráfica de um possível local de ocorrência de descargas de superfície em um isolador elétrico é apresentada na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Exemplo de isolamento com falha que pode causar descargas superficiais.

Fonte: MACÊDO, 2014.

Normalmente, este tipo de descarga ocorre em saias de isoladores, cabos protegidos e terminações de cabos isolados e no sistema de alívio de barras de geradores (KREUGER, 1989).

Descarga parcial corona

Descargas corona ou descargas externas ocorrem em meio gasoso quando há uma intensificação do campo elétrico nas proximidades de um eletrodo e quando o gradiente de potencial excede um determinado limiar, mas as condições ainda são insuficientes para causar um arco elétrico (TANAKA; GREENWOOD, 1983).

Próximo da tensão de início desta descarga, a descarga *glow* e o *streamer* podem aparecer conforme ilustra a Figura 2.9. Esta situação é muito comum em eletrodos tipo ponta ou que possuam pequenos raios de curvatura na sua extremidade (KREUGER, 1989). Esses

tipos de descarga (*glow* e *streamer*) são possíveis, devido à existência de uma forte concentração de campo elétrico nas pontas. Sendo assim, quando o campo supera a rigidez dielétrica do gás presente ao redor desta ponta, a descarga se inicia. Já descarga tipo *leader discharge* permanente ocorre somente em longos espaçamentos de ar, excedendo a gama de metros (LEMKE, 2008). A tensão de iniciação das descargas depende do raio de curvatura da ponta do eletrodo e da tensão aplicada.

Figura 2.9 – Exemplo de configuração que pode gerar descargas tipo corona.

Descargas coronas em ar produzem ozônio, o qual pode causar o fissuramento da isolamento polimérica. Ademais, óxidos de nitrogênio combinados com vapor d'água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolamento provocando o trilhamento do material (MASON, 1995).

2.2.3 Descargas Parciais em tensões alternadas

São utilizadas duas aproximações distintas para descrição do comportamento das descargas parciais em vazios quando submetidas a uma tensão alternada: o modelo de circuito equivalente e a aproximação por campo elétrico.

Circuito equivalente

A Figura 2.10 ilustra o circuito equivalente associado às descargas parciais comumente encontrado na literatura, representado por uma associação de capacitores. O modelo das capacitâncias permite determinar de forma aproximada o valor da carga aparente

gerada por uma descarga parcial em uma cavidade (GEMANT; PHILIPPOFF, 1932; BARTNIKAS; McMAHON, 1979). A simplicidade do modelo se dá pela representação do isolamento defeituoso por um circuito elétrico equivalente (GEMANT; PHILIPPOFF, 1932).

Figura 2.10 – Circuito elétrico equivalente de um isolamento com cavidade interna.
Fonte: Adaptado de KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000.

Para entender o modelamento simplificado de uma descarga parcial, considera-se inicialmente a aplicação de uma tensão alternada $U_t(t)$ em um dielétrico, sólido ou líquido, representado pela área cinza da Figura 2.10. No interior do dielétrico, considera-se também a existência de uma cavidade preenchida com gás.

Segundo o modelo desenvolvido por Gemant e Philippoff (1932), a cavidade interna é representada por uma capacitância C_c . As regiões do isolamento nas adjacências da cavidade são representadas por duas capacitâncias C'_b e C''_b , o que resulta numa capacitância série equivalente C_b e o isolamento complementar sem falhas é representado por C'_a e C''_a que resulta em uma capacitância C_a . O circuito elétrico resultante é apresentado na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Circuito elétrico equivalente as descargas parciais.
Fonte: Adaptado de KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000.

A cavidade poderá dar origem a uma DP, com o aumento da tensão aplicada e do gradiente elétrico, o qual será afetado pelas diferenças entre as permissividades dos materiais e pela forma geométrica do interior da cavidade. A primeira DP ocorrerá no quadrante crescente do semicírculo, ocasionando a descarga da capacitância C_c da cavidade. A corrente $i_c(t)$ é um pulso de corrente com duração muito curta, com tempos da ordem de nanosegundos. Se a tensão continuar a crescer, ou decrescer no semicírculo negativo, novas linhas de campo se formarão na cavidade e o fenômeno da descarga irá se repetir. Na Figura 2.11, o gerador de descargas é representado pela chave S em paralelo com C_c . A chave S é controlada pela tensão V_c por meio da capacitância na cavidade C_c , e se fecha durante um tempo muito curto durante o qual ocorre a circulação da corrente $i_c(t)$, limitada pelo resistor R_c (KUFFEL; ZAENGEL; KUFFEL, 2000). A tensão resultante na cavidade no instante imediatamente anterior a ocorrência da descarga é dada pela Equação 3 (MACÊDO, 2014).

$$V_c(t) = U_t(t) \frac{C_b}{C_a + C_b} \quad (3)$$

Quando uma descarga parcial ocorre, uma carga é transferida para os terminais do isolamento sob teste. A carga da cavidade é dada pela Equação 4.

$$q = C_b V_c \quad (4)$$

Vale ressaltar que o modelo das capacitâncias é apenas uma aproximação, pois o mesmo não considera fatores como geometria, localização da cavidade e presença de cargas espaciais, porém fornece estimativa da carga da cavidade. Desta forma, a simples operação do circuito equivalente não corresponde, necessariamente, aos processos físicos que se desenvolvem em um sistema físico real (PEDERSEN et al., 1991; KELEN; DANIKAS, 1995; McALLISTER, 1997).

Aproximação por campo elétrico

Um modelo qualitativo, fisicamente fundamentado na aproximação por campo elétrico, é encontrado em (BOGGS, 1990; EDIN, 2001) e ilustrado na Figura 2.12, para descrição da ocorrência de descargas parciais em tensão alternada.

Figura 2.12 – Processo de ocorrência de descargas parciais em tensão AC.

Fonte: GUTNIK, 2014.

Este modelo considera uma cavidade esférica circundada por um material dielétrico, onde uma tensão alternada é aplicada entre dois eletrodos metálicos conforme ilustra a Figura 2.13.

Figura 2.13 – Representação de um isolamento com falha submetido a uma diferença de potencial.

Inicialmente não há presença de cargas superficiais e espaciais. Além disso, antes da primeira descarga, o campo local é aproximadamente uniforme em todos os pontos do vazio e varia proporcionalmente à tensão aplicada. Satisfeitas as condições de ocorrência, descritas no item 2.2.1, a primeira descarga é disparada. As cargas liberadas pela primeira descarga são dirigidas pelo campo aplicado para as paredes do vazio, local no qual são depositadas. O campo local passa a ser a soma do campo devido à tensão aplicada e do campo gerado pelas cargas superficiais e espaciais. As descargas consecutivas seguem o campo total no interior do vazio e a descarga seguinte ocorrerá quando o campo de início for novamente atingido. Este processo faz com que as descargas ocorram mesmo no instante em que a tensão aplicada seja zero, pois o campo local pode ser suficientemente elevado para alcançar o campo de início. O

processo de descarga passa então a ser comandado pelo campo local e não mais pela tensão aplicada (BOGGS, 1990; EDIN, 2001).

2.2.4 Métodos de medição das descargas parciais

Existem várias técnicas de detecção e medição de descargas parciais que diferem entre si, em função dos diversos fenômenos físicos e químicos originados a partir da ocorrência das descargas. Como exemplos, radiação eletromagnética, variações térmicas (calor), variações mecânicas, transformações químicas e ruído acústico (KEMP, 1995; JAMES; SU, 2008; AGARWAL et al., 1995). Consequentemente, vários desses fenômenos podem ser utilizados para auxiliar na detecção de DPs, dependendo da natureza da análise, das características do equipamento sob ensaio e das condições ambientes. Na Figura 2.14, é apresentada uma representação gráfica dos fenômenos físicos e os métodos de detecção associados à ocorrência das descargas parciais.

Figura 2.14 – Fenômenos associados à ocorrência de descargas parciais.

Os principais métodos de medição de descargas parciais são os métodos elétricos (IEC 60270, 2000), acústicos (ELEFOTHERION, 1995; LUNDGAARD, 1992b; SERRANO et al., 2012), óptico (BARTNIKAS; McMAHON, 1979; MUHR; SCHWARZ; JAUFER, 2005), químico (LUPI FILHO, 2012) e de radiofrequência (TRUONG et al., 2011).

Método Elétrico

A norma IEC 60270 (2000) descreve esse método e apresenta os circuitos básicos que podem ser utilizados para medir descargas parciais pelo método elétrico. A título de exemplificação, dentre as configurações apresentadas na norma IEC 60270 (2000), uma das mais utilizadas é a representada na Figura 2.15.

Figura 2.15 – Representação do arranjo experimental empregado na medição de descargas parciais.

Fonte: Adaptado de IEC 60270, 2000.

Os elementos representados no arranjo da Figura 2.15 são: fonte de alta tensão alternada $U_{\sim}$; impedância Z , cuja função é filtrar eventuais fontes de ruídos oriundas do terminal de alta tensão do transformador usado no ensaio; capacitor de acoplamento C_k isento de descargas parciais na tensão de ensaio, além de facilitar a circulação dos impulsos de corrente de alta frequência, aumentando dessa maneira a sensibilidade da medição; o objeto em teste, C_p , que apresenta descargas parciais; uma impedância de medição Z_m , na qual os impulsos de corrente provocam uma queda de tensão proporcional ao pulso de descarga parcial e que poderá ser amplificada e que são conectadas a um instrumento de medição IM , por meio de um cabo coaxial CC . O instrumento de medição pode ser, por exemplo, um osciloscópio com alta taxa de aquisição. A impedância de medição (Z_m) é constituída por um circuito ressonante do tipo RLC (resistor, indutor e capacitor) ou do tipo RC (resistor e capacitor). O circuito RLC é usado no modo de detecção em banda estreita e o circuito RC para um modo de detecção em banda larga (MACÊDO, 2014).

O método elétrico é, sem dúvida, o mais utilizado para quantificar descargas parciais em geradores, transformadores, cabos de alta tensão, capacitores, entre outros (MA; ZHOU; KEMP, 2002). Neste método as descargas são medidas normalmente em picocoulombs (pC).

Método de radiofrequência

O teste de tensão de rádio interferência (TRI) é baseado no fato de que descargas parciais geram ondas eletromagnéticas na forma de interferência estática. O receptor é calibrado em microvolts para medir o valor do sinal de entrada. Este método não é adequado para localizar fisicamente, dentro do equipamento, o local onde ocorrem descargas e sim para quantificar o valor das descargas. A medição de TRI é usada tanto em equipamentos de alta tensão como em linhas de transmissão. Nos equipamentos, os sinais de descarga são detectados através de uma resistência, enquanto que em linhas de transmissão, a interferência em radiofrequência (RF) gerada pelas descargas, é detectada usando-se uma antena (CUENCA, 2005).

Método óptico

A detecção óptica de descargas parciais pode ser explorada, basicamente, por dois métodos fundamentais, são eles: óptico direto e opto-acústico. O método óptico direto consiste na detecção visual dos sinais que são produzidos durante um impulso de DP. Já o método opto-acústico, baseia-se nos efeitos ópticos e acústicos causados por uma DP. Neste caso, as ondas acústicas, causadas pela DP, influenciam as fibras ópticas que estão localizadas no interior do equipamento. Assim, o sinal óptico que é transmitido através da fibra, é comparado com um sinal de referência de modo que se torne possível à obtenção do sinal de DP (SCHWARZ; JUDENDORFER; MUHR, 2008).

Como vantagens do método óptico pode-se citar que toda a medição é isolada galvanicamente. Portanto não há influência eletromagnética nas medições e todo o sistema de detecção óptica é quase imune a sinais indesejados. Quanto às desvantagens, menciona-se a possibilidade de perda de calibração, a área de cobertura limitada e os problemas com acessibilidade (SCHWARZ; JUDENDORFER; MUHR, 2008).

Método químico

A detecção de descargas parciais por métodos químicos baseia-se na análise cromatográfica dos subprodutos gerados durante um impulso de DP. Detecção de substâncias químicas é predominantemente utilizada em aplicações com materiais isolantes, líquido ou

gasoso, que é o caso de transformadores, máquinas, subestações isoladas a gás (*Gas Insulated Substations* - GIS) e linhas isoladas a gás (*Gas Insulated Lines* - GIL) (SCHWARZ; JUDENDORFER; MUHR, 2008). A análise química pode também ser usada para estimar a degradação do isolamento causada pela ocorrência de DPs (CUENCA, 2005).

Método Acústico

A técnica acústica é baseada no ruído audível ou ultrassônico gerado por descargas parciais, isto é, ruído no ar ou vibrações em materiais adjacentes à fonte de descarga. O método acústico consiste na utilização de sensores ou transdutores piezelétricos, que podem ser instalados dentro ou fora dos equipamentos, de preferência em ambientes com baixo nível de ruído. Sensores acústicos, corretamente projetados, são imunes a ruídos eletromagnéticos e, por esta razão, são bastante úteis para a verificação da existência de uma descarga elétrica. Medidas acústicas feitas com microfones ou outros transdutores, em conjunto com amplificadores e instrumentos de registros adequados, podem ser úteis para localizar a descarga no equipamento (HAROLD, 1979; CUENCA, 2005).

Diversos sensores, com alta sensibilidade para faixas de frequência acima da faixa audível, são usados para localizar descargas corona no ar, detectar e localizar descargas internas em transformadores de potência, e também para encontrar locais de radio-interferência causadas por descargas associadas a linhas de transmissão de alta tensão (HAROLD, 1979; CUENCA, 2005). Recentemente, métodos acústicos também têm sido utilizados para detecção de descargas e particulados em GIS que contenham SF_6 (hexafluoreto de enxofre), na localização de cavidades nos isolamentos de máquinas rotativas de grande porte, na monitoração da atividade de descargas internas de capacitores de alta tensão, e também como fator de viabilização na detecção de descargas durante os testes de sondas de baixa pressão (GUTNIK, 2014).

Apesar de o método elétrico ser o mais utilizado, a técnica acústica vem se destacando nos últimos anos. A medição por ultrassom está ganhando maior interesse, no aspecto de detecção e localização (triangulação de pulsos e reflexões acústicas) sendo eficaz para experiências de laboratório e razoável nas experiências de campo, pois ainda é alvo de ruídos e interferências, visto que, os sinais acústicos podem sofrer forte atenuação em algumas situações, por exemplo, de descargas parciais próximas dos enrolamentos.

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos de DPs, as condições de sua ocorrência, sua classificação, os circuitos equivalentes existentes e as técnicas de medição a elas relacionadas. O enfoque principal da metodologia proposta é a geração de descargas parciais em laboratório e a interpretação dos sinais dessas descargas detectadas por um transdutor ultrassônico. O próximo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a cerca dos eletretos, piezoeletricidade e piezoeletretos.

Capítulo 3

Eletretos, piezoeletricidade e piezoeletreto

3.1 Considerações iniciais

Este capítulo faz um levantamento histórico e apresenta alguns conceitos relacionados aos eletretos, piezoeletricidade e piezoeletretos. Adicionalmente são apresentados alguns processos de fabricação dos piezoeletretos termoformados utilizados nessa pesquisa.

3.2 Eletreto

Pode-se dizer que a história dos eletretos começou no ano de 1732, quando Gray descreve que materiais como ceras e resinas são capazes de exercer um poder de atração permanente após serem derretidos e resfriados em conchas de ferro (SESSLER, 1987).

Em 1839, Michael Faraday publicou estudos que designaram o termo “dielétrico” como sendo materiais nos quais atuavam forças elétricas. Faraday mostrou que, nestes materiais, as cargas elétricas não se locomovem livremente quando submetidos a um campo elétrico externo, ficando aprisionadas no material mesmo após o campo elétrico ser removido (HILCZER et al., 1986).

Mais tarde, em 1892, Oliver Heaviside atribuiu o termo eletreto aos materiais dielétricos capazes de exibirem uma polarização permanente ou “quase permanente”, traduzindo uma analogia ao campo magnético e materiais magnéticos, a fim de justificar o fato dos dielétricos polares exibirem um campo elétrico residual. O termo “quase permanente” significa que a constante de tempo característica para o decaimento das cargas elétricas é maior que o período de tempo em que os estudos são realizados com o eletreto (HILCZER et al., 1986;SESSLER, 1987).

Várias pesquisas no âmbito dos eletretos começaram a ser desenvolvidas por Mototaro Eguchi, a partir de 1919. Eguchi produziu os primeiros eletretos utilizando uma mistura de

cera de carnaúba e cera de abelha (essencialmente os mesmos materiais utilizados por Gray) através do método térmico².

Após submeter o material dielétrico a um intenso campo elétrico e alta temperatura, Eguchi observou que surgiam dois tipos de cargas elétricas: as homocargas³ e as heterocargas⁴. Entretanto, Eguchi observou que as heterocargas mostraram ser de natureza temporária e desapareciam gradualmente em um curto intervalo de tempo, (dentro de um a dois dias). Após o desaparecimento completo dessas cargas, as homocargas apareciam gradualmente até saturar em alguns dias, ou seja, ocorria uma inversão da polaridade das cargas e as superfícies do eletreto passavam a apresentar polaridades iguais aos dos eletrodos adjacentes (SESSLER, 1998).

Apesar da observação dessa inversão de polaridade, naquele momento não foi encontrada explicação para a origem dessas cargas. Somente em 1944, Bernard Gross, publicou suas hipóteses relativas à origem de polarização permanente como resultado de dois processos: a orientação de dipolos moleculares e de cargas espaciais; e a injeção de cargas elétricas a partir dos eletrodos, como sugerido por Faraday um século antes. Sendo a polarização dos dipolos e as cargas espaciais responsáveis pela origem das heterocargas e a injeção de cargas elétricas no dielétrico responsável pela origem das homocargas (HILCZER et al., 1986).

Gross e Denard realizaram estudos complementares do comportamento das cargas elétricas frente à temperatura de preparo da amostra, relatando que a temperatura de preparo influencia diretamente na quantidade de cargas presente no eletreto (GUTMANN, 1948).

Novas técnicas de polarização de eletretos foram estudadas, dentre elas, destaca-se a fotopolarização, onde uma amostra fica submetida à ação de uma luz e um campo elétrico permanente (HILCZER et al., 1986).

Pode-se dizer que a principal propriedade de um eletreto é ser um armazenador de cargas e detentor de um campo elétrico que permanece no material, por um longo período, mesmo sem a aplicação de um campo elétrico externo. Dois são os fenômenos que explicam a presença de um campo elétrico residual em um material dielétrico: a polarização dielétrica e o aprisionamento de cargas elétricas por armadilhas energéticas (LIMA, 2006; GUTNIK, 2014).

Dicken, Sharbaugh e Ham, em 1948, deram início às pesquisas dos eletretos poliméricos, produzidos a partir de materiais termoplásticos, e de novas técnicas de

² Método desenvolvido por Gray, que consiste em derreter e esfriar um dielétrico na presença de um campo elétrico (SESSLER, 1987).

³ As homocargas são cargas com polaridade igual a do eletrodo adjacente.

⁴ As heterocargas são cargas elétricas com polaridade inversa a do eletrodo adjacente.

carregamento elétrico, entre os quais se destacam os carregamentos corona e direto (GOEL, 2003).

No início dos anos 60, o conceito de eletretos passou a ser visto não apenas como um dielétrico que possuía uma polarização molecular, mas também dielétricos que possuíam cargas elétricas injetadas, ou seja, homocargas (HILCZER et al., 1986).

Enquanto os eletretos clássicos eram feitos de placas espessas de cera de carnaúba ou substâncias similares, avanços nas pesquisas sobre eletretos proporcionaram materiais poliméricos com melhores características de retenção de cargas, a exemplo dos Teflon[®] FEP (Politetrafluoretileno-co-hexapropileno) e PTFE (politetrafluoretileno), PVDF (polifluoreto de vinilideno) e filmes celulares e porosos de PP (polipropileno) (GERHARD-MULTHAUPT, 2002; ALTAFIM et al., 2006, 2010; FALCONI, 2010). Os eletretos, formados por esses novos materiais, viabilizaram comercialmente uma de suas importantes aplicações, o microfone de eletreto (GERHARD-MULTHAUPT, 2002; GOEL, 2003).

3.3 Piezoeletricidade

O termo piezoeletricidade na sua tradução literal significa eletricidade por meio de pressão, sendo o prefixo piezo derivado do grego *piezein* (pressionar). Gerhard-Multhaupt (2002b) define a piezoeletricidade como sendo um fenômeno estritamente linear, que relaciona qualquer deslocamento mecânico e tensão elétrica, ou qualquer tensão elétrica e deslocamento mecânico como causa e efeito, respectivamente.

A piezoeletricidade foi descoberta em 1880, pelos irmãos Pierre e Jaques Curie. Quando observavam determinadas estruturas cristalinas, os irmãos Curie notaram que estas apresentavam uma geometria molecular bipolar com alinhamento assimétrico. Essa característica produz uma polarização capaz de induzir cargas elétricas na superfície do material, o que mantém a estrutura em equilíbrio elétrico. Ao sofrer uma perturbação, por exemplo, uma excitação mecânica, esse equilíbrio é perturbado gerando uma reorganização das cargas produzindo um fluxo de corrente que pode ser facilmente mensurada (BOTTOM, 1968; TRAINER, 2003). Esse efeito é conhecido como piezoeletricidade direta, onde uma excitação mecânica gera uma resposta elétrica.

O efeito inverso foi previsto por Gabriel Lipmann, em 1881, onde uma excitação elétrica provoca uma resposta mecânica (BALLATO, 1996; BASSO et al., 2006;

KRESSMANN, 2001). A Figura 3.1 apresenta um esquemático de como ocorre o efeito piezelétrico.

Figura 3.1 – Efeito piezoelétrico: (a) direto (b) inverso

Fonte: FALCONI, 2010.

Até a Primeira Guerra Mundial o efeito piezelétrico era visto como um curioso fenômeno, até que Paul Langevin desenvolveu a primeira aplicação, construindo o sonar para detectar submarinos, muito utilizado durante a época da guerra. No final da Segunda Guerra Mundial, o efeito piezelétrico foi observado em cerâmicas piezoelétricas e ferroelétricas, estas últimas apresentando propriedades piezoelétricas superiores as dos materiais naturais até então catalogados. A primeira cerâmica piezoelétrica foi sintetizada em 1946, com o titanato de bário (BaTiO_3) e esta permaneceu, como principal material piezoelétrico até o começo da década de 50, quando foi possível produzir cerâmicas mais eficientes, a exemplo do PZT, nomeado de titanato zirconato de chumbo (SHIRANE; SAWAGUCHI; TAKAGI, 1951; TRAINER, 2003; MANBACHI; COBBOLD, 2011).

Outros trabalhos foram desenvolvidos paralelamente durante os anos 50 com os biopolímeros (a exemplo da celulose e fibras de colágeno) mostrando que materiais dessa natureza também apresentavam o efeito piezelétrico (FUKADA, 2000; FURUKAWA, 1989; RICHARDSON, 1989). Esses resultados incentivaram as pesquisas da piezoeletricidade em polímeros e em 1969 Kawai descreveu um trabalho constatando que filmes de PVDF polarizados também poderiam atuar como materiais piezelétricos (FUKADA, 2000). Esta descoberta desencadeou inúmeras vantagens sobre os materiais cerâmicos, uma vez que os polímeros possuem características específicas tais como flexibilidade, menor massa específica e maior facilidade de fabricação que as já tradicionais cerâmicas (CAPRON; HESS, 1986).

Seguidamente, outros polímeros com estrutura molecular bipolar também foram polarizados por meio do método térmico, porém, a grande maioria não apresentou

coeficientes piezoelétricos que possibilitassem aplicações práticas com exceção de alguns copolímeros como o Nylon 11 e a mistura de VDCN (cianeto de vinilideno) com VAC (vinilacetato) (FURUKAWA, 1989).

Dessa forma, o principal objetivo das pesquisas envolvendo piezoelectricidade, passou a ser o desenvolvimento de polímeros que apresentassem coeficientes piezoelétricos mais elevados. Assim, uma solução encontrada foi unir os altos coeficientes piezoelétricos das cerâmicas com a flexibilidade dos polímeros. Esses materiais ficaram conhecidos como compósitos e foram formados por partículas de cerâmica piezoelétricas (PZT) misturadas a uma base polimérica de PVDF (FEDOSOV; SEGGERN, 2008; FURUKAWA, 1989).

Em pesquisas com polímeros piezoelétricos publicadas nos últimos anos foi observado que os diferentes polímeros investigados, apresentavam particularidades elétricas restritas à sua composição. A exemplo dos polímeros à base de silicone e dos polímeros fluorados, como o PTFE, observou-se que estes apresentam uma maior retenção de cargas elétricas, assim como as poliamidas ímpares e aromáticas, apresentam coeficientes piezoelétricos mais elevados (GERHARD-MULTHAUPT, 2002).

O aprisionamento de cargas elétricas nos polímeros retoma os estudos dos eletretos. Embora sejam totalmente diferentes dos polímeros piezoelétricos, por não apresentarem uma estrutura cristalina bipolar, os eletretos também possuem uma polarização remanescente criada pelo aprisionamento de cargas (SESSLER, 1987).

Nesse contexto, na década de 70, Wada e Hayakawa comprovaram a hipótese de que era possível aprisionar carga em materiais apolares. Wada e Hayakawa construíram transdutores com camadas de eletretos sobrepostas (KACPRZYK et al., 1994; WADA et al., 1976). No entanto, testes experimentais realizados na época com estes polímeros polarizados não demonstraram fortes propriedades eletromecânicas, fato que enfraqueceu as pesquisas na época (QIU, 2010).

Cerca de cinco anos mais tarde, este cenário foi completamente modificado, quando foi observado que filmes porosos e celulares de polipropileno (PP) quando eletricamente carregados passaram a apresentar coeficientes piezoelétricos similares ou superiores aos das cerâmicas (GERHARD-MULTHAUPT, 2002).

Diferentemente dos eletretos formados por filmes rígidos, a estrutura porosa desses filmes poliméricos, como mostrado na Figura 3.2, apresentam cavidades que aliadas à propriedade de armazenamento de cargas de alguns polímeros, permitem a formação de grandes dipolos elétricos, quando submetidos a intensos campos elétricos. Esses macro dipolos somados à estrutura mais flexível possibilitaram maior compressão do material

mediante a aplicação de uma força externa, o que normalmente resultam grandes efeitos piezoelétricos (GERHARD-MULTHAUPT, 2002). Devido à similaridade com os eletretos e ao elevado coeficiente piezoelétrico esses materiais foram chamados de ferroeletretos ou piezoeletretos.

Figura 3.2 – Imagens microscópicas de filmes celulares: (a) polipropileno (PP) (b) politereftalato de etilenglicol (PETP).

Fonte: HILLENBRAND et al., 2003.

Os materiais amorfos policristalinos e substâncias parcialmente cristalinas são exemplos bem sucedidos de substâncias onde as cargas elétricas podem ser aprisionadas em armadilhas devido, principalmente, a sua estrutura molecular anisotrópica. O Teflon FEP[®] é um exemplo de material com essa propriedade, cujas estruturas microscópicas retêm principalmente cargas negativas com grande facilidade, em armadilhas superficiais profundas. Estas cargas elétricas, quando aprisionadas, permanecem estáveis, presas à estrutura molecular do Teflon por um longo período de tempo (GERHARD-MULTHAUPT, 1999).

Pode-se explicar o efeito piezoelétrico nos polímeros porosos através de dois fatores principais: as cavidades e ao processo de carregamento. Durante o carregamento elétrico a estrutura celular é exposta à influência de um intenso campo elétrico, que provoca a ruptura do gás dentro das cavidades em forma de descargas elétricas (ALTAFIM et al., 2008; QIU et al., 2007). Essas descargas promovem a ionização do gás dentro das cavidades e que, pela ação do campo elétrico, são deslocadas em direções opostas (positivas e negativas) (MEDEIROS, 2014).

Entretanto, alguns polímeros apresentam características de aprisionamento de cargas, e as cargas deslocadas ficam aprisionadas nas superfícies das cavidades, formando dipolos, como ilustrado na Figura 3.3. Quando eletrodos são depositados nas superfícies desses filmes, cargas elétricas de compensação surgem para cancelar a polarização do material. Ao submeter o material a uma força mecânica externa e negativa, na mesma direção da polarização, ocorre

uma redução na sua espessura, provocando uma aproximação das cargas aprisionadas nas superfícies internas das cavidades. Isso causa um desequilíbrio nas cargas de compensação externas, que tendem a se reorganizar, gerando uma resposta elétrica instantânea (BAUER et al., 2005; MEDEIROS, 2014).

Figura 3.3 – Esquema ilustrativo das cargas elétricas aprisionadas nos polímeros celulares após carregamento elétrico e a deformação das cavidades pela aplicação de uma pressão externa na estrutura.

Fonte: GERHARD-MULTHAUPT, 2002.

Atualmente, o efeito piezelétrico é o responsável pelo princípio de funcionamento de vários equipamentos eletroacústicos, desde a invenção do primeiro microfone de eletreto, advinda dos estudos realizados por Gross em 1944, até os mais modernos sistemas de transdutores acústicos de pressão.

3.4 Piezoeletretos

Recentemente, a família de polímeros piezo-, piro- e ferroelétricos recebeu um novo membro chamado “piezoeletreto”, ou seja, espumas poliméricas carregadas eletricamente. Já em 1970, as propriedades piezo e piroelétrico de polímeros não polares carregados eletricamente foram teoricamente previstas e experimentalmente estudadas (WADA et al., 1976). No entanto, o interesse desapareceu por causa do fraco efeito piezo-piroelétrico obtido na época. Essa situação alterou-se substancialmente ao longo da última década e considerável número de polímeros celulares e porosos com grande efeito piezelétrico foram identificados e desenvolvidos (GUTNIK, 2014).

A fabricação de piezoeletretos baseia-se na injeção de ar ou grãos de areia no interior de uma porção de PP em aquecimento, em um processo denominado de aeração. Posteriormente, durante o resfriamento do material, cavidades esféricas com cerca de 10µm

de diâmetro são formadas em torno das inclusões (BAUER; GERHARD-MULTHAUPT; SESSLER, 2004). Em seguida, o PP modificado passa por uma etapa de extrusão, onde são moldados filmes com 70 μm de espessura. Com isso, as cavidades esféricas iniciais, agora deformadas, passam a formar espaços vazios com formato elipsoidal de 10 a 100 μm em diâmetro e 2 a 10 μm de altura, conforme Figura 3.4a (PAAJANEN; LEKKALA; KIRJAVAINEN, 2000). As superfícies superior e inferior do filme, antes com formatos irregulares, devem então ser homogeneizadas por uma selagem de PP. Finalmente, o material é exposto à descarga corona a fim de se efetuar o carregamento elétrico, como ilustra a Figura 3.4b (SESSLER; HILLENBRAND, 1999).

A estrutura passa a exibir propriedades piezoelétricas após o carregamento elétrico. Após a metalização das superfícies externas do material, o filme eletromecânico está apto a aplicações como transdutor. Conforme demonstrado na Figura 3.4b, o alinhamento dos macrodipolos ocorre somente na mesma direção do campo elétrico aplicado durante o carregamento dos polímeros celulares. Portanto, espera-se que o efeito piezoelétrico encontrado nos piezoeletretos só ocorra quando uma excitação externa (mecânica ou elétrica) seja aplicada perpendicularmente ao polímero (BAUER et al., 2003).

Figura 3.4 – (a) Micrografia por escaneamento eletrônico da seção transversal de um filme EMFi de 70 μm de espessura. (b) distribuição das cargas no interior do filme.

Fonte: SESSLER; HILLENBRAND, 1999.

Essa forma de orientação dos dipolos, onde a direção da polarização é paralela à direção da tensão mecânica aplicada, tem sido denotada pelo coeficiente piezoelétrico d_{33} . Tal simbologia é utilizada por muitos pesquisadores como principal parâmetro de medida da piezoelectricidade, fazendo uma analogia ao coeficiente piezoelétrico utilizados nos cristais e cerâmicas (BAUER et al., 2003; ZHANG et al., 2005).

3.4.1 Piezoeletretos Termoformados

Os piezoeletretos termoformados são, assim como os piezoeletretos porosos, estruturas poliméricas com cavidades internas eletricamente carregadas, que formam macrodipolos de fácil deformação e que, portanto, são capazes de exibir elevados coeficientes piezoelétricos. Entretanto, a diferença entre o piezoeletreto termoformado e o poroso é o processo como estes são fabricados. O processo de fabricação dos piezoeletretos termoformados, permite que estes apresentem uma estrutura polimérica com cavidades controladas, ou seja, com formas geométricas bem definidas e que podem ser ajustadas conforme à aplicação desejada (MEDEIROS, 2014).

Em 2003, foram desenvolvidos os primeiros piezoeletretos termoformados pelo Grupo de Alta Tensão e Materiais (GATM), da Universidade de São Paulo (USP), coordenado pelo professor Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim (ALTAFIM et al., 2005). Estes piezoeletretos são constituídos por camadas circulares de Teflon[®] e folhas laminadas em alumínio, unidas pela aspersão de verniz pulverizado. As amostras são então montadas e carregadas por um impulso negativo em alta tensão, apresentando ótimos resultados, com coeficientes piezoelétricos de até 270 pC/N (ALTAFIM, et al. 2003). Porém esta técnica resultou em amostras com baixa resistência mecânica devido à característica antiaderente do Teflon[®].

Em 2005 e 2006 a técnica anterior foi aperfeiçoada por Altafim e colaboradores (ALTAFIM et al., 2005; ALTAFIM et al., 2006), onde os filmes poliméricos passaram a ser previamente moldados por uma grade aquecida e unidos por fusão, resultando em uma estrutura polimérica formada por dois filmes circulares de Teflon[®] FEP, medindo 25 cm de diâmetro e 50 ou 75 μ m de espessura e contendo várias micro células obtidas com bolhas de ar distribuídas na interface entre os filmes. E por fim, a estrutura polimérica é carregada eletricamente. Detalhes do processo podem ser observados na Figura 3.5 (ALTAFIM et al., 2006).

Figura 3.5 – Sistema de preparo de amostras com bolhas de ar distribuídas de forma homogênea.

Fonte: ALTAFIM et al. 2006.

Este processo tem início com um pré-aquecimento dos eletrodos, seguido da disposição do primeiro filme polimérico sobre a grade também aquecida. Posteriormente, a estrutura parcialmente moldada é submetida a um vácuo, responsável pelo estiramento do filme nos locais marcados pela máscara⁵ metálica, que configura a geometria das bolhas de ar, estas com aproximadamente 1 mm de diâmetro. A etapa final consiste na moldagem, a segunda película é colocada sobre a primeira, de modo que ambas são pressionadas entre as duas placas aquecidas, até ocorrer a fundição dos filmes (ALTAFIM et al., 2005). As amostras produzidas por esse sistema passam a receber o nome de piezoeletretos termoformados, devido ao processo de produção ser aquecido. O efeito piezoeétrico registrado por essas amostras, depois de submetidas ao carregamento elétrico, registraram coeficientes na ordem de 500 pC/N (ALTAFIM et al., 2006). Porém, este novo método possui desvantagens quanto ao processo de termo-modelagem dos filmes, acarretando defeitos estruturais das bolhas primárias⁶, prejudicando assim, o controle nos tamanhos das cavidades (ALTAFIM, 2010).

Em 2006, Zhang, Hillenbrand e Sessler apresentaram um novo piezoeletreto, cujo sistema de produção é similar ao desenvolvido por Altafim e colaboradores (ALTAFIM et al., 2006). Na proposta de Zhang, Hillenbrand e Sessler o piezoeletreto é composto por um filme

⁵ Formada por uma grade reticulada ou por uma chapa perfurada, onde todas as bolhas são formadas de maneira homogênea.

⁶ Bolhas definidas exclusivamente pelos espaços “vazados” da grade.

de Teflon® FEP entreposto por dois filmes de Teflon® PTFE. Em seguida uma grade metálica aquecida a 280 °C é pressionada por uma hora, com força de aproximadamente 20 N sobre esta pilha de fluopolímeros para que seja possível ocorrer a fusão entre os filmes e formar as cavidades de ar nas regiões vazadas da grade. Após o período de uma hora, a grade é resfriada e retirada lentamente. Após o carregamento elétrico das amostras, constatou-se um coeficiente piezoelétrico superior aos 1000 pC/N. E ao submeter este eletreto a um ambiente com 90°C de temperatura, por quatro dias, foi verificada uma relativa estabilidade térmica já que o coeficiente ficou em torno de 400 pC/N (ZHANG; HILLENBRAND; SESSLER, 2006).

Em 2007 Zhang, Hillenbrand e Sessler, aplicaram a mesma técnica na produção de eletretos, realizada em 2006, para um maior número de fluopolímeros empilhados, chegando a um máximo de sete camadas. Estas estruturas apresentaram uma estabilidade térmica ainda maior, até 90°C, onde o coeficiente piezoelétrico ficou em torno de 1000 pC/N, apresentando um decaimento de 15% após cerca de cinco dias. Apesar dos elevados coeficientes e da boa estabilidade térmica alcançados as cavidades intermediárias dessas estruturas apresentaram deformações. Dessa forma, embora o método permita a construção de piezoeletretos com mais filmes empilhados, ele não possui nenhum controle sobre a distribuição e formato das cavidades intermediárias (ZHANG; HILLENBRAND; SESSLER, 2007).

O avanço dos elevados coeficientes piezoelétricos aliados a uma maior estabilidade térmica foi de grande importância para as pesquisas, bem como a evolução de novos métodos de termoformação para a produção de piezoeletretos, visto que, estruturas bem mais organizadas e cavidades mais bem distribuídas foram configuradas. Entretanto, ainda eram vistos obstáculos, a exemplo de alguns inconvenientes pertinentes à configuração das cavidades gasosas, indispensáveis para a potencialização do efeito piezoelétrico nestes mecanismos (MEDEIROS, 2014).

Em 2009, Altafim et al. desenvolveram um piezoeletreto com cavidades padronizadas, por meio da laminação à quente de dois filmes externos, utilizando como molde, uma camada intermediária de outro material e com temperatura de fusão maior que a dos demais filmes. O molde, plotado a laser por um sistema computadorizado, consiste em um filme de Teflon PTFE (com 100 µm de espessura e área de 30x40 mm²) vazado por retângulos paralelos (de área 1,5 x 30 mm²), estes espaçados 1,5 mm uns dos outros. Antes do processo de laminação, o molde é inserido entre dois filmes de Teflon FEP, cada um com espessura igual a 50 µm. O sanduíche formado por estes fluopolímeros é submetido a uma máquina de laminação, pré-aquecida a 300°C (ALTAFIM et al., 2009). Tal temperatura foi escolhida por ser maior que a

temperatura de fusão do filme FEP (260°C) e menor que a temperatura de fusão do filme PTFE (327°C), conforme o fabricante dos filmes (GOODFELLOW, 2014). Após a laminação, o sanduíche de polímeros é resfriado à temperatura ambiente e as duas camadas de FEP mostraram-se fundidas nas regiões de abertura do molde de PTFE. Em seguida, o filme de PTFE pôde facilmente ser removido do empilhamento, devido às suas características antiaderentes, através de um pequeno corte em uma de suas extremidades. O resultado concedeu uma estrutura polimérica de filmes Teflon FEP, contendo canais tubulares bem definidos. O procedimento de moldagem é ilustrado na Figura 3.6 e a composição da estrutura polimérica com canais tubulares fundidos pode ser vista na Figura 3.7 (ALTAFIM et al., 2009).

Figura 3.6 – Esquema do procedimento de fabricação em laboratório de piezoeletretos com estruturas padronizadas em canaletas.

Fonte: Altafim et al, 2009.

Figura 3.7 – Micrografia ótica da seção transversal da estrutura padronizada em canaletas.

Fonte: ALTAFIM et al, 2009.

Por fim, as amostras são em ambas as superfícies, metalizadas pela vaporização de alumínio, formando eletrodos com 16 mm de diâmetro e 40 nm de espessura. Após a metalização, as amostras são submetidas ao carregamento elétrico por contato direto, com tensão de 3 kV durante 10 segundos, em temperatura ambiente, exibindo coeficientes piezoelétricos de até 160 pC/N. As amostras carregadas da mesma forma anterior, mas em temperaturas elevadas (cerca de 140°C), mostraram-se termicamente estáveis em pelo menos 130°C, com uma redução de aproximadamente 15% do coeficiente. Portanto, as vantagens do

piezoeletreto descrito são garantidas pela simplicidade de fabricação, a bem controlada geometria que pode ser ajustada para diferentes tamanhos dos canais e padrões, de acordo com as exigências dos dispositivos e aplicações (ALTAFIM et al., 2009).

Em 2010, Falconi et al. propuseram outro método de produção de piezoeletretos baseado em duas camadas de filmes FEP. O procedimento utilizou uma prensa hidráulica para moldar pequenas bolhas na superfície de um filme, com o auxílio de um gabarito metálico. Após a moldagem, foi realizado um processo de laminação semelhante ao desenvolvido em (ALTAFIM et al., 2009). Ao final da laminação, através do processo obtiveram-se amostras com cavidades gasosas de dimensões e distribuição fáceis de serem controladas. Após a moldagem dos filmes, as amostras metalizadas foram carregadas eletricamente e desempenharam coeficientes piezoelétricos na ordem de 215 pC/N. O método de moldagem proposto por Falconi, propiciou um adequado controle do diâmetro, altura e distribuição das bolhas sobre a superfície das amostras. No entanto, nada ainda foi publicado sobre a estabilidade térmica dos dispositivos (FALCONI et al., 2010).

Em 2011, Falconi e colaboradores, desenvolveram outro método, no qual a colagem dos filmes com os domos pré-moldados é realizada com o emprego de um filme adesivo. Apesar das características antiaderentes do FEP, os filmes apresentaram ótima aderência, permitindo a produção de piezoeletretos com controle total dos parâmetros das bolhas (FALCONI et al., 2011).

3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica a cerca dos eletretos, piezoeletricidade e piezoeletretos. Deu-se especial destaque às técnicas de fabricação de piezoeletretos termoformados, sendo estes, utilizados nesse trabalho. O próximo capítulo apresenta a nova metodologia proposta para a geração de descargas parciais em laboratório e a detecção acústica dessas descargas com o transdutor piezoelétrico.

Capítulo 4

Nova metodologia proposta

Neste capítulo são apresentados e descritos a metodologia e os procedimentos experimentais para estudo da detecção acústica das DPs, por sensores baseados na tecnologia dos piezoeletritos principal foco deste trabalho.

4.1 Metodologia

Na Figura 4.1 encontra-se descrito um diagrama em blocos que sintetiza a metodologia empregada. Ela consiste em quatro etapas: geração das DPs, aquisição do sinal acústico, amplificação e avaliação dos sinais.

Figura 4.1 – Diagrama em blocos da nova metodologia proposta.

4.1.1 Geração de DPs em laboratório

Para simular o comportamento das DPs, sem influências ou atenuação dos fenômenos médios de reflexão e refração, uma única e múltipla configuração de descargas parciais foi criada com múltiplos eletrodos de tungstênio ponta - ponta e montada como representado na Figura 4.2. Nesta configuração empregou-se como fonte de alimentação de alta tensão alternada um transformador, Haefely Trench, ligado a um divisor de tensão capacitivo, composto por um capacitor de alta tensão de 100 pF e tensão nominal de 100kV e um capacitor de baixa tensão blindado de 68 nF. Um resistor de 1M Ω – 100 kV também foi acoplado ao circuito do sistema de alta tensão para limitar a corrente aplicada ao circuito de *gaps*.

Figura 4.2 – Circuito elétrico de DPs com *gaps* (G1, G2 e G3).

A grande contribuição do método proposto consiste em produzir descargas parciais internas a isolantes por circuitos elétricos similares aqueles apresentados por Kuffel, Zaengel e Kuffel (2000) e mais bem descrito na Figura 2.11, onde as capacitâncias do *gaps* são representadas pela capacitância C_c , a capacitância de 1nF é representada pela capacitância C_b e a capacitância de 1,5 nF é representada pela capacitância C_a .

Neste trabalho, os eletrodos cilíndricos com pontas cônicas simulam as descargas parciais que ocorrem no interior dos isolantes e atuam como centelhadores. As distâncias entre os eletrodos formam *gaps* de três tamanhos, são eles: G1 (0,1mm), G2 (0,3mm) e G3 (0,6mm). O circuito de *gaps* ilustrado na Figura 4.2, foi montado em uma caixa de acrílico, de acordo com a representação esquemática da Figura 4.3. Como capacitores C_c foram empregados os de cerâmica para alta tensão de 1nF/30 kV.

Figura 4.3 – Caixa em acrílico com *gaps*: (a) vista lateral e; (b) vista superior.

Durante os experimentos foram produzidas DP's, conforme ilustra a Figura 4.4, aplicando uma tensão AC de 60 Hz, a partir da fonte de alimentação, com valores acima da respectiva tensão de ruptura de cada *gap*. Testes preliminares foram executados para determinar a tensão de ruptura do menor *gap*, e depois seguiu-se o ensaio elevando-se a tensão até que todos os gaps atingissem a ruptura. Os experimentos foram realizados no LATM da EESC e no Instituto de Energia e Ambiente (IEE) da USP de São Paulo.

A Figura 4.4 apresenta a forma de onda equivalente às descargas parciais geradas no LATM. É possível observar que as descargas parciais ocorrem no primeiro e terceiro semiciclo da senoide, conforme apresentado na literatura.

Figura 4.4 – Ocorrência de descargas parciais utilizando a metodologia proposta.

A Figura 4.5 ilustra a formação do arco elétrico no *gaps* G1, G2 e G3 simultaneamente, gerando assim um som que é capturado pelo transdutor acústico e convertido em sinal elétrico. Esse sinal elétrico é medido pelo osciloscópio e armazenado em um banco de dados para posterior análise.

Figura 4.5 – Ocorrência de descargas parciais nos *gaps* G1, G2 e G3 simultaneamente.

4.1.2 Aquisição do sinal acústico

Para detectar os sinais acústicos, foi utilizado um transdutor a base de piezoeletreto. Devido às interferências eletromagnéticas, esse transdutor foi colocado dentro de uma caixa metálica em conjunto com um osciloscópio. A caixa metálica foi conectada a caixa de acrílico através de um tubo de PVC de 50 mm de diâmetro e 900 mm de comprimento, a fim de direcionar o som produzido pelas descargas. A Figura 4.6 ilustra como o sistema de geração e detecção de DPs foi montado.

Figura 4.6 – Montagem do sistema de geração e detecção de DPs.

Os osciloscópios utilizados na aquisição do sinal acústico foram o osciloscópio portátil Agilent U1604B 40Mhz e posteriormente o osciloscópio Tektronix TPS 2014B 100MHz e 1GS/s. A escolha destes osciloscópios foi principalmente pelo fato deles poderem

funcionar isoladamente da rede de energia elétrica. Assim, foi possível registrar os sinais acústicos com ausência quase total de interferência elétrica.

4.1.3 Amplificação do sinal

Quando a descarga ocorre entre os *gaps* é produzido um sinal acústico que é capturado pelo transdutor. Interno a esse transdutor, existe um circuito de pré-amplificação que proporciona um ganho de 24 dB do sinal original. Após a etapa de pré-amplificação, o sinal é enviado para o osciloscópio, através de um cabo coaxial, onde é possível observar a forma de onda produzida pelo som das descargas geradas em laboratório.

A Figura 4.7a apresenta o sinal elétrico quando ainda não há a ocorrência das DPs e a Figura 4.7b apresenta a forma de onda do sinal elétrico, após a amplificação, equivalente às descargas parciais geradas em laboratório quando aplicada uma tensão de 3 kV no *gap* G1.

Figura 4.7 – Sinal elétrico quando: (a) não há DPs e; (b) há ocorrência de DPs.

4.1.4 Avaliação dos sinais de DPs

Para a avaliação dos sinais foi obtida a média RMS para cada medida realizada. As médias RMS foram calculadas, utilizando a fórmula da Equação 5.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N i_k^2}{N}} \quad (5)$$

Onde,

N é o número de amostras;

i_k é o valor de i do índice k .

A partir da média RMS foi possível fazer a correlação da intensidade do sinal sonoro com a tensão aplicada e com o tamanho do *gap*.

4.2 Materiais utilizados

Esta sessão tem por finalidade apresentar o sistema de alta tensão utilizado na geração de descargas parciais em laboratório e, além disso, descrever os materiais e os procedimentos realizados para confecção e/ou adaptação desses materiais para o experimento descrito no item 4.1.

4.2.1 Sistema de Alta Tensão

No LATM, a geração das tensões elétricas alternadas foi obtida por um transformador Haefely Trench, 100 kV/220V controlado por sistema normalizado. A medição dos sinais foi feita através de um divisor de tensão capacitivo com relação 1/681. A Figura 4.8 ilustra o circuito do sistema de alta tensão.

Figura 4.8 – Circuito do sistema de alta tensão.

A medição foi realizada por meio de divisor de tensão capacitivo, utilizando valores de capacitâncias iguais a 100 pF (C_1) e 68 nF (C_2), sendo a leitura realizada nos terminais de C_2 .

No IEE a fonte de alta tensão utilizada foi um HIPOTRONICS HD125 AC/DC HIPOT TESTER que gera tensões AC de até 10kV e tensões DC de até 25kV. A Figura 4.9 ilustra o Hipot do IEE-USP, utilizado nos ensaios.

Figura 4.9 – Hipotronics HD125 AC/DC Hipot Tester do IEE-USP.

4.2.2 Eletrodos

Para definir os eletrodos que seriam utilizados no experimento, foram feitos vários testes, com diferentes materiais. Os primeiros testes foram feitos com agulhas de crochê de 0,6mm, em aço, também utilizadas em experiências realizadas por Assagra et al. (2013) e Gutnik (2014). Porém, foi observado que as agulhas de crochê apresentavam em uma de suas extremidades “pontas semicirculares”, não sendo essa a configuração desejada para esta pesquisa. Então, nos testes seguintes optou-se por utilizar agulhas com pontas cônicas em aço niquelado, medindo 62 mm de comprimento e 12 mm de diâmetro. Contudo, no decorrer dos testes, foi observado que as pontas dessas agulhas foram ficando muito desgastadas devido às descargas. Assim, nesta pesquisa usou-se como material o tungstênio, também utilizado em experimentos realizados por Martinson e Delsing (2010), que se mostrou bastante robusto quando aplicadas tensões de até 12,5 kV. Nos tarugos de tungstênio cilíndricos medindo 50 mm de comprimento, 2,4mm de diâmetro foram confeccionadas pontas cônicas com conicidades variando de 8,57 a 82,86 μm e uma angulação de 30°. A Figura 4.10 ilustra um dos eletrodos de tungstênio utilizado neste trabalho.

Figura 4.10 – Eletrodo cilíndrico de tungstênio puro com ponta cônica.

4.2.3 Transdutor de Piezoeletreto

O protótipo do transdutor a base de piezoeletreto utilizado nesta pesquisa foi desenvolvido por Medeiros (2014) e consiste basicamente em um invólucro metálico, um circuito eletrônico de pré-amplificação do sinal gerado pelo elemento sensor e um piezoeletreto, descritos a seguir.

Invólucro metálico

O invólucro metálico é responsável pela blindagem elétrica do dispositivo e pelo acondicionamento do amplificador e sensor piezoelétrico, dos eletrodos metálicos e da placa do circuito pré-amplificador. O conector do tipo *Mike* de quatro vias foi utilizado como um canal para alimentação do circuito eletrônico e para a saída do sinal elétrico, proporcional ao campo acústico. O material de retaguarda, fabricado em *nylon*, compreende a camada subjacente ao elemento piezoelétrico e é responsável pelo amortecimento da vibração do filme eletromecânico, o que impede reflexões na parte de trás do elemento ativo e, conseqüentemente, evita gerar interferência no sinal de recepção do transdutor. Complementa o transdutor acústico outro compartimento metálico, responsável por alojar a alimentação do pré-amplificador e fazer a interface da conexão *Mike* e BNC (*Bayonet Neil Concelman*) (MEDEIROS, 2014). O desenho, desse protótipo pode ser observado na Figura 4.11 e o protótipo final pode ser visto com maiores detalhes na Figura 4.12.

Figura 4.11 – Projeto do transdutor a base de piezoeletreto.

Fonte: Adaptado de Medeiros, 2014.

Figura 4.12 – Projeto do transdutor piezoelétrico e compartimento de interface e baterias.

Fonte: Adaptado de Medeiros, 2014.

Piezoeletreto

O piezoeletreto que compõe o transdutor é resultante da tecnologia dos piezoeletretos termoformados. Essa tecnologia foi escolhida devido a resultados prévios que mostraram uma

piezoeletricidade estável de 160 pC/N, a 80 °C (ALTAFIM, 2009). Para este trabalho, o piezoeletreto foi fabricado com filmes de 50 µm de FEP laminados a 300 °C com um molde de PTFE de 100 µm entre eles, conforme descrito em Altafim (2010). Uma vez concluída a etapa de laminação, o molde foi removido dentre as camadas de FEP fundidos, deixando uma estrutura polimérica tubular fina. A estrutura polimérica foi transformada em piezoeletreto depois que eletrodos circulares de alumínio foram depositados em ambos os lados da estrutura e uma tensão DC de 3 kV foi aplicada de forma direta sobre os eletrodos por 10 segundos (ALTAFIM, 2010). Na Figura 4.13 apresenta uma vista superior de um piezoeletreto formado por esse processo.

Figura 4.13 – Piezoeletreto de FEP laminado.
Fonte: ALTAFIM, 2010.

Circuito de pré-amplificação

O circuito de pré-amplificação utilizado no transdutor ultrassônico tem como base a operação de um amplificador de instrumentação modelo INA129P. Esse circuito integrado (CI) foi escolhido, principalmente, por apresentar características de baixo ruído e uma resposta em frequência “plana” (amplificação constante) até 500kHz. Adicionalmente ao CI INA129P foi implementado um primeiro estágio de controle do sinal para propiciar um melhor casamento de impedância entre a amostra piezoelétrica e a entrada do circuito integrado. Esse estágio consistiu de um arranjo em torno de um transistor de efeito de campo N-FET BF245A, configurado em auto-polarização. O FET (*Field Effect Transistor*) permitiu ainda uma amplificação de aproximadamente 1,6 vezes o sinal de entrada, proveniente do sensor eletromecânico. O circuito completo, considerando os dois estágios eletrônicos de amplificação, exibiu um ganho final de 24dB (MEDEIROS, 2014). A Figura 4.14 apresenta o

esquema representativo do circuito e a Figura 4.15 exibe esse esquema montado em uma placa de circuito impresso.

Figura 4.14 – Esquema do circuito eletrônico.

Fonte: Adaptado de Medeiros, 2014.

Figura 4.15 – Circuito eletrônico montado.

Fonte: Medeiros, 2014.

4.2.4 Caixa de Acrílico

A fim de acomodar o circuito equivalente às descargas parciais, uma caixa em acrílico foi produzida. O projeto dessa caixa foi desenvolvido em um programa de vetorização e a confecção desta foi realizada no LATM da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) a partir de uma chapa de acrílico cristal de 6 mm, sendo esta chapa cortada por um sistema computadorizado a laser. A caixa mede 70 x 70 x 50 mm (comprimento x largura x altura) e

possui seis orifícios circulares com diâmetro de 10 mm nas laterais e um orifício de 50mm de diâmetro na tampa. Esses orifícios de 10 mm foram feitos para encaixar adaptadores de *nylon* que acoplam e direcionam os eletrodos cilíndricos com pontas cônicas e o orifício de 50 mm foi feito para encaixar uma das extremidades do tubo de PVC (policloreto de vinila). Para um melhor entendimento, a Figura 4.16 apresenta o protótipo final dessa caixa em acrílico.

Figura 4.16 – Protótipo da caixa em acrílico

Este material foi escolhido, principalmente, devido à possibilidade de observar o instante em que ocorre a descarga entre os eletrodos e pela disponibilidade do material no LATM.

4.2.5 Caixa metálica

Houve a necessidade de blindar o sistema devido às interferências eletromagnéticas. Para isso, foi utilizada uma caixa em alumínio medindo 325 x 325 x 135 mm (comprimento x largura x altura), com tampa revestida com tela dupla de alumínio. Em uma das laterais da caixa metálica, foi feito um orifício de 50 mm de diâmetro para encaixar o suporte do transdutor ultrassônico. No entanto, a entrada desse orifício também teria que ser blindada. Para tal foram utilizados dois anéis em acrílico de 6 mm e entre eles uma tela dupla de alumínio, formando um “sanduiche”. Esse “sanduiche” foi acoplado do lado de fora da caixa metálica servindo também, como suporte para encaixar uma das extremidades do tubo de PVC. A Figura 4.17 apresenta essa caixa metálica e alguns de seus detalhes.

Figura 4.17 – Caixa metálica: (a) vista lateral; (b) tampa revestida com tela de alumínio; (c) vista superior e (d) caixa completa.

4.3 Considerações Finais

Métodos convencionais de geração de descargas parciais utilizam diferentes configurações de eletrodos, conforme apresentados na Figura 4.18. As descargas parciais superficiais podem ser geradas a partir da utilização da configuração de eletrodos esfera - plano, tendo como plano o dielétrico. Já as do tipo corona são obtidas com o emprego da configuração de eletrodos ponta - plano, e as descargas internas, por um arranjo de eletrodos plano - plano com dielétrico. Nesses ensaios, geralmente o dielétrico é um plástico translúcido para que seja observado a olho nu as falhas decorrentes desse fenômeno, como ilustrado na Figura 4.19 (MACÊDO, 2014).

Figura 4.18 – Métodos convencionais de geração de descargas parciais.

Fonte: Macêdo, 2014.

Figura 4.19 – Fotografia do corpo de prova construído com Polyjet/Fulcure 720.

Fonte: Adaptado de Macêdo, 2014.

A nova metodologia proposta envolve a geração de descargas parciais em laboratório com especial atenção para eletrodos não uniformes ponta - ponta e o som gerado. Aqui também foi proposta a caracterização de um piezoeletrito para detecção acústica das descargas parciais geradas em laboratório e posteriormente a detecção dessas descargas em equipamentos ligados as linhas de distribuição – classe 15 kV. A grande contribuição desse novo método reside na possibilidade de produzir descargas parciais bem controladas por circuitos laboratoriais similares aos circuitos equivalentes das descargas parciais comumente encontrados na literatura. E também a de ser um instrumento para estudo das detecções acústicas das DPs em equipamentos das linhas de distribuição, onde a localização de uma descarga é menos importante do que a sua intensidade. No próximo capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos com os experimentos.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados e comentados os principais resultados obtidos nos experimentos já detalhados no Capítulo 4. Visto que os testes tiveram como propósito principal a geração de descargas parciais em laboratório e a caracterização de um piezoeletrico na detecção dessas descargas. Os resultados foram divididos em duas classes: a de único *gap* e a de múltiplos *gaps*. A seguir são apresentadas as considerações iniciais, os resultados obtidos nas duas classes e as discussões.

5.1 Considerações Iniciais

Uma série de testes qualitativos foi realizada no LATM a fim de verificar quais tensões seriam aplicadas e qual osciloscópio seria utilizado na aquisição dos sinais sonoros.

Testes preliminares foram executados para determinar a tensão de ruptura de cada *gap*, para isso, a amplitude da tensão AC aplicada nos eletrodos ponta - ponta foi sendo elevada até à ocorrência da ruptura no *gap* correspondente. Foi observado que a tensão de ruptura na classe de *gap* único são 0,9 kV, 1,9 kV e 2,2 kV, para G1, G2 e G3 respectivamente. Já para classe de múltiplos *gaps*, as tensões de ruptura encontradas foi de 1,5 kV para os *gaps* G1 + G2, 2,1kV para os *gaps* G1 + G3, 2,2 kV para os *gaps* G2 + G3 e por fim 2,5 kV para os *gaps* G1 + G2 + G3.

Após o conhecimento das tensões de limiar foram determinados, os picos de tensões AC que seriam aplicadas a cada configuração de eletrodos. As tensões escolhidas foram de aproximadamente [2,5; 3,0; 4,0; 5,0; e 6,0] kV, sendo 2,5 kV a tensão mínima de ruptura para os *gaps* G1+G2+G3, e as demais tensões obedecendo um intervalo de 1 kV entre elas.

O sinal acústico de cinco DPs diferentes para o *gap* G1 e para cada uma das tensões anteriormente descritos foram registrados pelo osciloscópio portátil Agilent, modelo U1604B, 40Mhz com uma escala de tempo ajustada para 20 ms e uma taxa de aquisição 250 pontos. Posteriormente, com a finalidade de verificar a potencialidade dos osciloscópios para aplicação deste trabalho, o mesmo ensaio foi realizado com o osciloscópio Tektronix TPS

2014B 100MHz com uma escala de tempo ajustada para 25 ms e uma taxa de aquisição 2500 pontos.

Os resultados obtidos com os osciloscópios Agilent e Tektronix podem ser verificados na Tabela 5.1 onde é possível observar que ambos os osciloscópios podem ser utilizados para esta aplicação, pois mesmo apresentando uma taxa de aquisição mais baixa (250 pontos) o osciloscópio Agilent exibiu uma resposta bastante próxima do osciloscópio Tektronix (2500 pontos).

Tabela 5.1 – Médias RMS para o *gap* G1 com os osciloscópios Agilent e Tektronix.

<i>Tensão</i> (kV)	<i>RMS (ms)</i>	
	<i>Agilent</i>	<i>Tektronix</i>
2,0	3,30	3,83
3,0	4,93	6,15
4,0	6,71	7,24
5,0	8,74	8,15
6,0	9,64	9,48

Apesar de o osciloscópio Agilent apresentar uma resposta satisfatória, o osciloscópio Tektronix foi escolhido para ser utilizado nos ensaios posteriores devido ao fácil manuseio e por apresentar uma taxa de aquisição maior e assim, futuramente, proporcionar uma análise mais aprofundada no domínio da frequência. Vale ressaltar que o osciloscópio Agilent U1604B supre as necessidades da aplicação desse trabalho e que a utilização do mesmo diminui o custo final do protótipo caso venha ser comercializado futuramente.

Após a definição das tensões e do osciloscópio que seriam utilizados nos experimentos, foram definidos duas classes de configuração dos *gaps* para estudo: a de único *gap* e a de múltiplos *gaps*. Os resultados das médias RMS e desvios padrões obtidos para as duas classes são apresentados nos tópicos 5.2 e 5.3. A análise dos sinais acústicos consistiu em verificar as aplicações potenciais do piezoeletreto na detecção de um sinal acústico das DPs e se as influências provocadas pela variação da distância no *gap* ou da amplitude da tensão podem ser detectadas pelo transdutor. Esta análise é feita com base no cálculo da média RMS dos sinais sonoros obtidos com os experimentos.

Os experimentos descritos nos próximos tópicos foram realizados no IEE da USP-SP sob as seguintes condições: temperatura 23,5°C, umidade de 60% e pressão atmosférica 91,99 kPa.

5.2 Único *gap*

Nesta classe, os *gaps* G1, G2 e G3 foram analisados individualmente. A Figura ilustra o circuito utilizado no ensaio para um único *gap*. O ensaio foi realizado obedecendo à ordem G1, G2 e G3, respectivamente.

Figura 5.1 – Circuito utilizado na classe de único *gap*.

A fonte de alta tensão utilizada foi o Hipotronics HD125 AC/DC Hipot Tester. Os valores de tensão AC aplicados foram de [2,5; 3,0; 4,0; 5,0; e 6,0] kV. Para cada configuração de *gap* (G1, G2 e G3) e para as tensões acima mencionadas, foram registradas cinco medidas.

5.2.1 *Gap* G1

Nesta configuração (G1) os eletrodos ponta - ponta são separados por uma distância de 0,1 mm. O circuito utilizado é representado pela Figura 5.1 A curva média das medidas do *gap* G1 quando aplicada uma tensão de 3 kV é apresentada na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Curva média do *gap* G1 para a tensão de 3kV.

A Tabela 5.2 apresenta os valores das médias RMS e desvios padrões calculados para as medidas obtidas com *gap* G1. A coluna “Média Final” da Tabela 5.2 apresenta a média aritmética das cinco médias RMS correspondente à respectiva tensão aplicada. É possível perceber que quanto maior o valor da tensão aplicada, maior será o valor da média do sinal acústico correspondente.

Tabela 5.2 – Médias para o *gap* G1.

<i>G1</i>							
<i>Tensão (kV)</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Medida 4</i>	<i>Medida 5</i>	<i>Média Final (mV)</i>	<i>Desvio Padrão (mV)</i>
2,5	3,78	3,92	3,65	3,52	3,28	3,63	0,22
3,0	3,41	4,69	4,59	4,11	4,55	4,27	0,47
4,0	5,95	5,78	5,86	6,03	6,51	6,03	0,25
5,0	6,98	6,96	7,49	7,48	7,90	7,36	0,35
6,0	8,80	9,18	9,67	9,61	10,19	9,49	0,47

Isso também pode ser verificado no gráfico ilustrado na Figura 5.3 em que a resposta do sensor, representado pela intensidade do sinal acústico, aumenta quase linearmente com a tensão. Tal comportamento também está de acordo com a literatura (LUNDGARD, 1992).

Figura 5.3 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o *gap* 1.

Portanto, medindo-se a intensidade do sinal e conhecendo a tensão aplicada, é possível determinar o tamanho do *gap* ou definir a tensão aplicada se o tamanho do *gap* é conhecido.

5.2.2 *Gap* G2

Nesta configuração (G2) os eletrodos ponta - ponta são separados por uma distância de 0,3 mm. O circuito utilizado no experimento é representado pela Figura 5.1. A Figura 5.4 apresenta a curva média das medidas de G2, quando aplicada uma tensão de 4,0 kV. A Tabela 5.3 apresenta os valores das médias e desvios padrões calculados para o *gap* G2.

Figura 5.4 – Curva média do *gap* G2 para a tensão de 4,0 kV.

Tabela 5.3 – Médias para o *gap* G2.

G2							
<i>Tensão (kV)</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Medida 4</i>	<i>Medida 5</i>	<i>Média Final (mV)</i>	<i>Desvio Padrão (mV)</i>
2,5	11,83	13,01	9,61	10,65	12,46	11,51	1,23
3,0	16,31	16,23	16,48	16,48	16,27	16,36	0,11
4,0	22,46	22,85	22,53	24,16	23,50	23,10	0,65
5,0	27,95	30,07	31,11	30,47	31,03	30,12	1,15
6,0	34,14	35,43	35,78	36,95	37,53	35,97	1,19

O gráfico da média RMS em função da tensão aplicada no *gap* G2 está ilustrado na Figura 5.5. Assim como no caso do *gap* 1, pode ser verificado que a resposta do sensor, representado pela intensidade do sinal acústico, aumenta quase linearmente com a tensão aplicada.

Figura 5.5 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o *gap* 2.

5.2.3 *Gap* G3

Nesta configuração (G3) os eletrodos ponta - ponta são separados por uma distância de 0,6 mm. O circuito utilizado no ensaio é representado pela Figura 5.1. A curva média das medidas desse *gap* quando aplicada uma tensão de 5 kV é apresentada na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Curva média do *gap* G3 para a tensão de 5,0 kV.

A Tabela 5.4 apresenta os valores do desvio padrão e das médias calculadas para o *gap* G3. Neste caso observa-se uma discrepância entre as médias das medidas 1 e 3 quando aplicada uma tensão de 2,5 kV. Isso é devido ao fato que nesta tensão o arco elétrico entre os eletrodos ficou intermitente, assim, em alguns instantes de tempo não ocorreu DPs conforme ilustra a Figura 5.7.

Tabela 5.4 – Médias para o *gap* G3.

G3							
Tensão (kV)	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Média Final (mV)	Desvio Padrão (mV)
2,5	7,82	11,20	12,54	9,05	9,67	10,06	1,65
3,0	18,70	18,40	18,20	18,95	18,37	18,53	0,27
4,0	26,08	26,72	26,03	27,14	26,01	26,40	0,46
5,0	36,04	35,42	36,61	36,79	37,92	36,55	0,83
6,0	44,17	45,12	45,24	44,96	48,27	45,55	1,41

Figura 5.7 – Curva da medida 1 do *gap* G3 para a tensão de 2,5 kV.

O gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o *gap* G3 é apresentado na Figura 5.8. Assim como no caso dos *gaps* 1 e 2, pode ser verificado que a intensidade do sinal acústico, aumenta quase linearmente com a tensão.

Figura 5.8 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para o *gap* 3.

5.2.4 Comparação entre os *gaps* G1, G2 e G3.

O gráfico da Figura 5.9 apresenta as médias RMS em função da tensão aplicada para o *gap* G1, G2 e G3. Com base nos resultados apresentados na classe de único *gap* é possível concluir que o transdutor acústico apresenta uma resposta mensurável na detecção de DPs.

Figura 5.9 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os *gaps* G1, G2 e G3.

5.3 Múltiplos *gaps*

Esta classe representa a formação de configurações utilizando dois e três *gaps*. As configurações propostas foram: G1 + G2, G1 + G3, G2 + G3 e por fim G1 + G2 + G3. Estas combinações representam dois e três vazios (cavidades) em um material dielétrico. Assim, quando submetidos à alta tensão e em conjunto com o circuito proposto, os *gaps* proporcionam a ocorrência de descargas parciais em dois ou três vazios simultaneamente.

Assim como na classe de único *gap*, a fonte de alta tensão utilizada foi o Hipotronics HD125 AC/DC Hipot Tester. Os valores de tensão AC aplicados nas configurações G1 + G2, G1 + G3 e G2 + G3, separados por uma distância de 0,1 mm (G1), 0,3 mm (G2) e 0,6 mm (G3) foram [2,5; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0] kV. Para a configuração G1 + G2 + G3 foram testadas apenas quatro tensões, são elas [3,0; 4,0; 5,0 e 6,0] kV, a tensão de 2,5 kV não foi considerada neste caso pois a mesma não produzia descargas nos três *gaps* simultaneamente em todo o intervalo de tempo estudado, os pulsos de descargas ficavam intermitentes.

Para todas as configurações desta classe e para as tensões acima mencionadas, foram registradas cinco medidas. Os próximos tópicos detalham os resultados obtidos para esta classe.

5.3.1 *Gaps* G1+G2

Nesta configuração os eletrodos dos *gaps* G1 e G2 foram conectados conforme ilustra o circuito da Figura 5.10. A curva média das medidas de G1 + G2, quando aplicada uma tensão de 3,0 kV é ilustrada na Figura 5.11.

Figura 5.10 – Representação do circuito da configuração de *gaps* G1 + G2.

Figura 5.11 – Curva média da configuração G1 + G2 para a tensão de 3,0 kV.

A Tabela 5.5 apresenta os valores das médias RMS e desvios padrões calculados para as medidas obtidas com a configuração de *gap* G1 + G2. Assim como na classe de único *gap* é possível observar que quanto maior o valor da tensão aplicada, maior será o valor da média do sinal acústico correspondente.

Tabela 5.5 – Médias para o *gap* G1 + G2.

<i>G1 + G2</i>							
<i>Tensão (kV)</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Medida 4</i>	<i>Medida 5</i>	<i>Média Final (mV)</i>	<i>Desvio Padrão (mV)</i>
2,5	15,02	14,39	14,86	15,11	15,51	14,98	0,363
3,0	18,92	19,71	19,06	19,58	19,66	19,39	0,328
4,0	25,21	26,46	26,34	26,87	26,85	26,35	0,603
5,0	31,23	32,29	32,34	34,66	33,30	32,76	1,151
6,0	40,01	39,61	41,99	42,25	40,14	40,80	1,094

No gráfico ilustrado na Figura 5.12 observa-se a resposta do sensor, representado pela intensidade do sinal acústico, em função da tensão aplicada no circuito da Figura 5.10.

Figura 5.12 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G1 + G2.

A Figura 5.13 apresenta os valores da média RMS em função da tensão aplicada nos *gaps* G1 e G2 isolados e G1 e G2 simultaneamente. Como pode ser visto a partir do gráfico ilustrado na Figura 5.13, as descargas nos *gaps* G1 + G2 nas mesmas tensões de amplitude dos *gaps* isolados produzem um sinal acústico mais forte. Este comportamento está de acordo com a literatura (MARTINSON; DELSING, 2010).

Figura 5.13 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os *gaps* G1, G2 e G1 + G2.

5.3.2 Gaps G1+G3

Nesta configuração (G1 + G3) os eletrodos foram conectados conforme ilustra o circuito da Figura 5.14. A curva média obtida a partir das cinco medidas de G1 + G3, quando aplicada uma tensão de 4,0 kV é ilustrada na Figura 5.15.

Figura 5.14 – Representação do circuito da configuração de *gaps* G1 + G3.

Figura 5.15 – Curva média da configuração G1 + G3 para a tensão de 4,0 kV.

A Tabela 5.6 apresenta os valores das médias e dos desvios padrões calculados para a configuração de *gaps* G1 + G2. Neste caso para a tensão de 2,5 kV, a descarga entre os eletrodos do *gap* G3 ficou intermitente.

Tabela 5.6 – Médias para a configuração de *gaps* G1 + G3.

<i>G1+ G3</i>							
<i>Tensão (kV)</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Medida 4</i>	<i>Medida 5</i>	<i>Média Final (mV)</i>	<i>Desvio Padrão (mV)</i>
2,5	11,89	13,43	14,22	11,45	14,27	13,05	1,17
3,0	22,33	21,99	23,53	22,24	22,47	22,51	0,53
4,0	29,74	31,25	30,81	33,55	32,20	31,51	1,29
5,0	36,86	39,93	39,78	40,73	38,13	39,08	1,40
6,0	47,37	49,16	48,69	46,90	53,50	49,12	2,34

A Figura 5.16 apresenta a resposta do sensor em função da tensão aplicada. Observa-se o aumento da intensidade sonora com o aumento da tensão aplicada.

Figura 5.16 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G1 + G3.

A Figura 5.17 apresenta os valores da média RMS em função da tensão aplicada nos *gaps* G1 e G3 isolados e G1 e G3 simultaneamente. Como pode ser visto a partir do gráfico para intervalos maiores de *gaps* a intensidade do sinal acústico é mais intensa.

Figura 5.17 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os *gaps* G1, G3 e G1+ G3.

5.3.3 *Gaps* G2+G3

Nesta configuração os *gaps* foram conectados conforme ilustra o circuito da Figura 5.18. A curva média obtida nessa configuração quando aplicada uma tensão de 5 kV é ilustrada na Figura 5.19.

Figura 5.18 – Representação do circuito da configuração de *gaps* G2 + G3.

Figura 5.19 – Curva média da configuração G2 + G3 para a tensão de 5,0 kV.

A Tabela 5.7 apresenta as médias RMS e desvios padrões calculados para cada tensão aplicada e para as cinco medidas obtidas. A Tabela também apresenta a média aritmética das médias RMS das cinco medidas. Neste caso, para tensão de 2,5 kV a descarga entre os eletrodos do *gap* G3 ficou intermitente. Na Figura 5.19 é claramente visível a linearidade e que a média RMS aumenta com o aumento da tensão.

Tabela 5.7 – Médias para a configuração de *gaps* G2 + G3.

<i>G2 + G3</i>							
<i>Tensão (kV)</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Medida 4</i>	<i>Medida 5</i>	<i>Média Final (mV)</i>	<i>Desvio Padrão (mV)</i>
2,5	21,60	23,12	26,33	22,67	21,22	22,99	1,81
3,0	32,34	32,36	28,64	30,48	29,23	30,61	1,54
4,0	42,93	45,85	44,37	44,11	46,56	44,76	1,29
5,0	55,05	55,96	58,00	57,76	59,56	57,27	1,59
6,0	66,70	68,22	72,65	73,79	72,90	70,85	2,84

Figura 5.20 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G2 + G3.

O gráfico da Figura 5.21 apresenta as médias RMS para os *gaps* G2 e G3 e G2 + G3. Neste caso é possível perceber que o valor da média RMS para tensão de 2,5 kV correspondente ao *gap* G3 foi menor que o valor da média RMS para mesma tensão do *gap* G2. Isto é justificado pelo fato da intermitência já explicada anteriormente.

Figura 5.21 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os *gaps* G2, G3 e G2+ G3.

5.3.4 Gaps G1+G2+G3

A Figura 5.22 ilustra como os eletrodos dos *gaps* G1, G2 e G3 foram conectados nesta configuração.

Figura 5.22 – Representação do circuito da configuração de *gaps* G1+ G2.

A Figura 5.23 apresenta a curva média das medidas realizadas para a configuração G1 + G2 + G3, quando aplicada uma tensão de 6,0 kV. E os resultados das médias e desvios padrões calculados estão apresentados na Tabela 5.8.

Figura 5.23 – Curva média da configuração G1+ G2 + G3 para a tensão de 6,0 kV.

Tabela 5.8 – Médias para o *gap* G1 + G2 + G3.

<i>G1 + G2 + G3</i>							
<i>Tensão (kV)</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Medida 4</i>	<i>Medida 5</i>	<i>Média Final (mV)</i>	<i>Desvio Padrão (mV)</i>
3,0	25,06	22,29	28,27	27,24	23,20	25,21	2,28
4,0	38,67	36,16	39,33	38,86	37,76	38,16	1,12
5,0	46,11	52,05	50,42	50,78	50,35	49,94	2,01
6,0	65,33	60,97	62,99	65,40	65,33	64,00	1,77

O gráfico da média RMS em função da tensão aplicada nesta configuração está ilustrado na Figura 5.24. Neste caso, também é possível observar claramente que a intensidade do sinal acústico, aumenta quase linearmente com o aumento da tensão aplicada.

Figura 5.24 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para a configuração G1 + G2 + G3.

A Figura 5.25 apresenta os valores da média RMS em função da tensão aplicada nos *gaps* G1, G2 e G3 isolados e G1 + G2 + G3 simultaneamente. Neste caso também pode ser observado que a intensidade sonora é mais elevada em intervalos de *gaps* maiores.

Figura 5.25 – Gráfico da média RMS em função da tensão aplicada para os *gaps* G1, G2, G3 e G1 + G2 + G3.

5.4 Comparação entre os *gaps*

A Figura 5.26 apresenta um gráfico com os valores obtidos com a média RMS dos sinais acústicos entre as classes.

Figura 5.26 – Gráfico das médias RMS para todas as configurações.

Como pode ser verificado a partir destes resultados, as descargas em *gaps* maiores nas mesmas tensões de amplitude produz um sinal acústico mais intenso. Estes resultados estão de acordo com os apresentados por Martinson e Delsing (2010), onde também é demonstrado que, para intervalos maiores entre dois eletrodos ponta - ponta, maior é a energia acústica emitida pela ruptura da descarga.

Para tensões abaixo de 3 kV, a classificação entre o tamanho do *gap* e tensão aplicada não é clara, especialmente se as descargas são causadas nos *gaps* G2, G3 e G1 + G2. A classificação entre o tamanho do *gap* também não é clara se comparados os *gaps* G3 e G1 + G2 quando aplicada uma tensão de 4 kV.

Observa-se na Figura 5.26 que as médias RMS obtidas para a configuração de *gaps* G1 + G2 + G3 possui valores maiores que as médias obtidas para a configuração de *gaps* G2 + G3, o que não era esperado. Alguns fatores detalhados nas discussões podem ter levado a distorção desses resultados.

5.5 Discussões

Antes de iniciar os testes, as pontas dos eletrodos foram medidas no Laboratório de Metrologia do Curso de Mecânica da EESC para certificar se a conicidade e angulação das pontas estavam iguais ou próximas.

Após os ensaios foi verificado que as pontas dos eletrodos utilizados estavam desgastadas. Assim, novas medidas de conicidade e angulação foram feitas para verificar o nível de desgastes das mesmas. A Figura 5.27 ilustra o antes e o depois das pontas dos eletrodos utilizados neste trabalho. A Tabela 5.9 apresenta os valores de conicidade e angulação das pontas dos eletrodos de tungstênio antes e após os ensaios.

Figura 5.27 – Antes e depois das pontas dos eletrodos de tungstênio.

Tabela 5.9 – Conicidade e angulação das pontas dos eletrodos.

GAP	Eletrodo	Angulação	Conicidade (μm)	
			Antes	Depois
G1	1	29°48''	14,29	166,67
	2	29°54''	82,86	169,45
G2	3	29°40''	17,14	144,45
	4	29°37''	22,86	172,22
G3	5	30°17''	8,57	177,78
	6	29°44''	22,86	119,45

Diante do exposto na Figura 5.27 e na Tabela 5.9, é possível concluir que o desgaste das pontas pode ter contribuído na distorção dos resultados dos últimos ensaios, como por exemplo, no ensaio da configuração G1 + G2 + G3, que foi o último ensaio a ser executado. Em trabalhos futuros, é esperado que seja encontrado outro material ainda mais robusto e que não sofra deformação com as descargas.

Outro fator importante que deve ser levado em consideração é o desnivelamento da superfície da chapa de acrílico. Este fez com que as pontas não ficassem perfeitamente alinhadas. Conforme pode ser visualizado na Figura 5.28 as pontas do lado direito ficaram décimos de milímetros abaixo das pontas do lado esquerdo.

Figura 5.28 – Detalhe do alinhamento das pontas dos eletrodos.

Estes dois fatores podem ter contribuído para discrepância de algum resultado e eles devem ser aperfeiçoados em trabalhos futuros.

Capítulo 6

Considerações finais

No estudo apresentado nessa dissertação foi investigado o uso de piezoeletretos como transdutores acústicos para detectar descargas parciais em diferentes configurações de eletrodos ponta - ponta em um meio gasoso (ar). Para isso, uma configuração controlada na qual as capacitâncias envolvidas poderiam ser bem definidas foi implementada.

As experiências foram realizadas utilizando *gaps* de 0,1, 0,3 e 0,6 mm e tensões AC variando de 2,5 kV a 6 kV. O som produzido pelas diferentes DPs foi inicialmente avaliado quanto à sua amplitude e a partir desta pode ser observado que a intensidade do som das DPs, capturado com o transdutor piezoeletrico, está relacionada com o tamanho do *gap* e da amplitude da tensão, como relatado na literatura.

Embora, não observando muita diferença quando o som do *gap* G2 e G3 foi comparado com o som produzido pelas descargas simultâneas G1 + G2 de tensões abaixo de 3 kV e 4 kV, o transdutor acústico apresentou uma resposta mensurável na detecção de DPs em único e múltiplos *gaps*.

Também foi mostrado que o transdutor testado é capaz de detectar pequenas variações na amplitude da tensão e nas distâncias de *gaps* e que a sua resposta é quase linear com o aumento da tensão conforme relatado na literatura.

Os objetivos propostos foram alcançados tanto na construção de um protótipo para gerar descargas parciais em laboratório quanto na validação do transdutor de piezoeletreto como uma alternativa econômica potencial para a detecção de DPs em linhas de distribuição, onde a localização de uma descarga é menos importante do que a sua intensidade.

Adicionalmente aos experimentos descritos nessa dissertação, foram realizados alguns ensaios preliminares para medição simultânea da intensidade sonora em mV e do valor da carga aparente das DPs em pC (sistema tradicional), mas os resultados obtidos ainda não são conclusivos e necessitam ser feitos novos ensaios que serão propostos para trabalhos futuros.

6.1 Artigo publicado

O artigo intitulado “*Acoustic detection of single and multiple air-gap partial discharges with piezoelectrets transducers*” foi publicado na *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (CEIDP), realizada em Des Moines, Iowa no período de 19 a 22 de Outubro de 2014.

Referências Bibliográficas⁷

AGARWAL, V. et al. The mysteries of multifactor ageing. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, 1995. v. 11, n. 3, p. 37–43.

ALTAFIM, R. A. C. et al. Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of flouropolymer-electret films. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AN ELECTRICAL INSULATION, 2006. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center v. 13, n. 5, p. 979 – 985.

ALTAFIM, R. A. C. et al. Piezoelectricity in multi-air voids electrets. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2005, Nashville. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, 2005. p. 669 – 672.

ALTAFIM, R. A. C. et al. Piezoelectricity of multi-layers space-charge electrets from Teflon FEP film with homogeneous voids distributed on its surface. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2003, Albuquerque. **Proceedings...** Piscataway: IEEE Service Center, 2003. p. 225 – 228.

ALTAFIM, R. A. P. et al. Discharge patterns in three-layer ferroelectret systems with perforated polymer films. In: 13th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS, 2008. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. C202.

ALTAFIM, R. A. P. et al. Template-based fluoroethylenepropylene piezoelectrets with tubular channels for transducer applications, **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 1, p. 014106 – 014106-5, 2009.

ALTAFIM, Ruy Alberto Pisani. **Novos piezoeletretos**: desenvolvimento e caracterização. 2010. Tese (Doutorado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-10082010-135056/>>. Acesso em: 2014-07-09.

ASSAGRA, Y. A. O. et al. Different piezoelectric structures applied to acoustic detection of impulse and corona partial discharges. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), 2013, Shenzhen. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p.1242-1245.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. **NBR 6940**: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão: medição de descargas parciais. Rio de Janeiro, 1981.

BALLATO, A. Piezoelectricity: history and new thrusts. In: IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, 1996, San Antonio. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center. 1996. p. 575-583.

⁷ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

BARTNIKAS, R. Partial discharges: their mechanism, detection and measurement. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 2002. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 9, n. 5, p. 763 – 808.

BARTNIKAS, R.; McMAHON, E. J. **Engineering dielectrics**: corona measurement and interpretation. In: _____. Philadelphia: ASTM, 1979. v. 1, chap. 1 – 2.

BASSO, H. C. et al. Piezoelectricity of a single bubble formed by two oppositely charged Teflon® - FEP films. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2006, Kansas City, MO. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 146 – 149.

BAUER, S. et al. Modern electrets. In: IEEE SYMPOSIUM ON ULTRASONICS (IUS), 2003. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v.1, p. 370-376.

BAUER, S. et al. Ferroelectrets: polymer-foam space-charge electrets with ferroelectric-like behavior. In: 12th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS (ISE), 2005. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 24-27

BAUER, S.; GERHARD-MULTHAUPT, R.; SESSLER, G. M. Ferroelectrets: soft electroactive foams for transducers. **Physics Today**, v. 57, n. 2, p. 37–43, 2004.

BOGGS, S. A. Partial discharge – part III: cavity-induced pd in solid dielectrics. In: IEEE ELECTRICAL INSULATION MAGAZINE, 1990. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 6, n. 6, p. 11 – 16.

BOTTOM, V. E. **The Theory and design of quartz crystal units**: an introduction to the basic principles of piezoelectricity and their application to the design of quartz. Texas: Mcmurry Press, 1968. v. 1.

CAPRON B. A.; HESS, D. W. Microscopic models of piezoelectric polymers. In: IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL, 1986. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 33, n.1, p. 33 – 40.

CARVALHO, A. Medições de descargas parciais no campo - aspectos práticos em transformadores de potência. In: XIII ERIAC DÉCIMO TERCEIRO ENCONTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2009.

CAVALLINI, A.; MONTANARI, G.; TOZZI, M. Pd apparent charge estimation and calibration: a critical review. IN: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 2010. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 17, n. 1, p. 198 –205.

CUENCA, W. M. H. **Caracterização dos sinais de descargas parciais em equipamentos de alta tensão a partir de modelos experimentais**. 2005. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DEVINS, J. C. The 1984 J. B. Whitehead Memorial Lecture the Physics of Partial Discharges in Solid Dielectrics. In: IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATION, 1984. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. EI-19, n. 5, p. 475 – 495.

DISSADO, L. A.; FOTHERGILL, J. C. **Electrical degradation and breakdown in polymers**. London: Peter Peregrinus, 1992.

DRUYVESTYEN, M. J.; PENNING, F. M. The Mechanism of Electrical Discharges in Gases of Low Pressure. **Reviews of Modern Physics**, American Physical Society, v. 12, n. 2, p. 87–174, 1940. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.12.87>>.

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

ELEFTHERION, P. M. Partial discharge XXI: acoustic emission-based PD source location in transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, 1995. v. 11, n. 6, p. 22 – 26.

FALCONI, D. R. et al. Piezoelectric sensor based on electret thermoforming technology In: 10th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLID DIELECTRICS (ICSD), 2010, Potsdam. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p.1,3, 4-9.

FALCONI, D. R. et al. Multi-layers fluoroethylenepropylene (FEP) films bounded with adhesive tape to create piezoelectrets with controlled cavities. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), 2011, Cancun. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 137,140, 16-19.

FALCONI, Daniel Rodrigo. **Sensor piezelétrico baseado na tecnologia dos eletretos termo-formados**: aprimoramentos dos processos de produção. 2010. Dissertação (Mestrado em Processamento de Sinais de Instrumentação) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18152/tde-20042010-095926/>>. Acesso em: 2014-07-10.

FEDOSOV, S. N.; SEGGERN, H. V. Pyroelectricity in PVDF: influence of polarization and charge. **Journal of Applied Physics**, v. 103, n. 1, p. 014105, 2008.

FRUTH. B.; NIEMEYER, L. The importance os statistical of partial discharge characteristics data. In: IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATION, 1992, Baden. Switzerland, 1992. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 27, n. 1, p. 60-69.

FUJIMOTO, N.; RIZZETTO, S.; BRAUN, J. M. Partial discharge – XV: Improved PD testing of solid dielectrics using X-ray induced discharge initiation. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 8, n. 6, p. 33 – 41, 1992.

FUKADA, E. History and recent progress in piezoelectric polymers. In: IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS AND FREQUENCY CONTROL, 2000. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 47, n. 6, p. 1277 – 1290.

FURUKAWA, T. Piezoelectricity and pyroelectricity in polymers. In: IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATION, 1989. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 24, n. 3, p. 375 – 394.

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

GERHARD-MULTHAUPT, R. et al. Preliminary study of multi-layer space-charge electrets with piezoelectric properties from porous and non-porous Teflon films. In: 10th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS, 1999, Delphi. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 273 – 276.

GERHARD-MULTHAUPT, R. Less can be more. Holes in polymers lead to a new paradigm of piezoelectric materials for electret transducers. IN: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 2002. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 9, n. 5, p. 850–859.

GJAERDE, A. C. Multifactor aging models – origin and similarities. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 13, n. 1, p. 6 – 13, 1997.

GOEL, M. Electrets sensors, filters and MEMS devices: new challenges in materials research. **Current Science**, v. 85, p. 443 – 453, 2003.

GOODFELLOW. **Fluorinated Ethylene Propylene Copolymer** - Film (FP341050). Disponível em: < <http://www.goodfellowusa.com/>>. Acesso em: 2014-07-12.

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

GUTFLEISCH, F.; NIEMEYER, L. Measurement and simulation of PD in epoxy voids. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2, n. 5, p. 729 – 743.

GUTMANN, F. The Electret. **Review of Modern Physics**, v. 20, p. 457 – 472, 1948.

GUTNIK, Yvan. **Estudo dos piezoletretos na detecção de descargas parciais em transformadores** [online]. São Carlos : Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2014. Dissertação de Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência. [acesso 2014-06-09]. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-11062014-162615/>>.

HAROLD, R.T. **Acoustical techniques for detecting and locating electrical discharges**. West Conshohocken: ASTM Publication, 1979. V.1: Engineering Dielectrics, Chap. 10.

HAUSCHILD, W. **Zum Öldurchschlag in inhomogenen Feld bei Schaltspannungen**. 1970. Thesis (Ph.D.) – Technical University Dresden, Dresden, 1970.

HILCZER, B.; MALECKI, J. **Electrets**. Warszawa: PWN-Polish Scientific, 1986.

HILLENBRAND, J. et al. Pressure-treated cellular polypropylene with large piezoelectric coefficients. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA (CEIDP), 2003, **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 40-43.

HOWATSON, A. M. **Descargas electricas en gases**. Bilbao: Urmo, 1970.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60270: Partial discharge measurement. New York: IEEE, 1968.

JAMES, R.; SU, Q.. **Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment**. Institution of Engineering and Technology, 2008. (IET power and energy series). ISBN 9780863417375. Disponível em:
<<http://books.google.com.br/books?id=XxwPnO8md1IC>>. Acesso em: 2014-07-15.

KELEN, A.; DANIKAS, M. G. Evidence and presumption in PD diagnostic. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2, n. 5, p. 780 – 795.

KEMP, I. Partial discharge plant-monitoring technology: present and future developments. In: IEE PROCEEDINGS SCIENCE MEASUREMENT AND TECHNOLOGY, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 142, n. 1, p. 4–10.

KIIZA R. C. et al. Change in partial discharge activity as related to degradation level in oilimpregnated paper insulation: effect of high voltage impulses. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 2014. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 21, p. 1243-1250.

KRESSMANN, R. Linear and nonlinear piezoelectric response of charged cellular polypropylene. **Journal of Applied Physics**, v. 90, n. 7, p. 3489 – 3496, 2001.

KREUGER, F. H. **Partial discharge detection in high-voltage equipment**. London: Butterworths, p. 193, 1989.

KUFFEL E.; ZAENGEL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering Fundamentals**. 2nd Edition. London: Newness, 2000, ch 5.

KUMAR S. S., **Development of a phase Resolved Pulse Height Analyser and its Application to Partial Discharge Measurements**, Thesis (MSc), February 1997.

LEMKE, E. **Durchschlagmechanismus und schlagweitedurchschlagspannungs-kennlinien von inhomogenen luftfunkenstrecken bei schaltspannungen**. 1967. Thesis (Ph.D.) – Technical University Dresden, Dresden, 1967.

LEMKE, E. **WG D1.33: guide for partial discharge measurements in compliance to IEC 60270**. Paris: CIGRE, 2008.

LIMA, Leandro. **Termo eletretos de teflon FEP como transdutores piezelétricos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-26022007-104240/>>. Acesso em: 2014-09-09.

LUNDGAARD, L. E. Partial discharge – Part XIII: acoustic partial discharge detection – fundamental considerations. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 8, n. 4, p. 25 – 31, 1992a.

_____. Partial Discharge - Part XIV: Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application. **IEEE Electrical Insulating Magazine**, v. 8, n. 5, p. 34-43, 1992b

LUNDGAARD, L.E.; HANSEN, W., Acoustic method for quality control and in-service periodic monitoring of medium voltage cable terminations. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1998. **Proceeding ...** Piscataway: IEEE Service Center, v.1, p.130-133.

LUPI FILHO, G. **Comparação entre os critérios de diagnósticos por análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador de potência**. 2012. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.

MA, X.; ZHOU, C.; KEMP, I. Automated wavelet selection and thresholding for pd detection. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 18, n. 2, p. 37–45, 2002.

MACÊDO, Euler Cássio Tavares. **Metodologia para a classificação de descargas parciais utilizando redes neurais artificiais**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

MANBACHI, A.; COBBOLD, R. S. C. Development and application of piezoelectric materials for ultrasound generation and detection. **Ultrasound**, v. 19, n. 4, p. 187–196, 2011.

MARKALOUS S.; TENBOHLEN, S.; FESER, K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 2008. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 15, n.6, p. 1576-1583.

MARTINSON E.; DELSING, J. Electric spark discharge as an ultrasonic generator in flow measurement situations. **Flow Measurement and Instrumentation**, vol. 21, n. 3, p. 394-401, 2010.

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

McALLISTER, I.W. Partial discharge in spheroidal voids – void orientation. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRIC AND ELECTRICAL INSULATION, 1997. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 4, n. 4, p. 456 – 461.

MEDEIROS, Leandro José de. **Hidrofone ultrassônico com piezoeletreto como elemento transdutor**. 2014. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18154/tde-19082014-090146/>>. Acesso em: 2014-09-09.

MONTANARI, G.; CAVALLINI, A. Partial discharge diagnostics: from apparatus monitoring to smart grid assessment. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 29, n. 3, p. 8–17, 2013.

MOTA, Hilton de Oliveira. **Processamento de sinais de descargas parciais em tempo real com base em wavelets e seleção de coeficientes adaptativa espacialmente**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MORSHUIS, P. H. F. **Partial discharge mechanisms. mechanisms leading to breakdown, analyzed by fast electrical and optical measurements**, 1993. Thesis (Ph.D. in Electrical Engineering) - Delft University of Technology, Netherlands, 1993.

_____. Assessment of dielectric degradation by ultrawide-band PD detection. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2, n. 5, p. 744 – 760.

MUHR, H. M.; SCHWARZ, R.; JAUFER, S. **Electrical measurement as diagnostic tool for HV-insulations**. 2005. Disponível em: <https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getvolltext?pCurrPk=13027>. Acesso em: 2014-08-02.

NASSER, E. **Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics**. London: John Wiley, 1971.

NIEMEYER, L. A generalized approach to partial discharge modeling. In: IEEE TRANSACTION ON DIELECTRICS AND INSULATION, 1995. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 2 n. 4. p. 510-528.

NIEMEYER, L.; FRUTH, B.; GUTFLEISCH, F. Simulation of partial discharge in insulation systems. In: 7th SYMPOSIUM HIGH VOLTAGE ENGINEERING, 1991, Dresden-Netherlands. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 1991. paper 71.05, p. 25-28.

PAAJANEN, M.; LEKKALA, J.; KIRJAVAINEN, K. ElectroMechanical Film (EMFi) — a new multipurpose electret material. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 84, n. 1–2, p. 95–102, 2000.

PEDERSEN, A.; CRICHTON, G. C.; McALLISTER, I. W. The Theory and measurement of partial discharge transients. In: IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRICAL INSULATION, 1991. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 26, n. 3, p. 487 – 497.

PILLING, J. **Ein beitrage zur interpretation der lebensdauer kennlinien von feststoffisolierungen**. Thesis (Habilitation) – Technical University Dresden, Dresden, 1976.

QIU, X. et al. Barrier discharges in cellular polypropylene ferroelectrets: How do they influence the electromechanical properties? **Journal of Applied Physics**, v. 101, n. 10, p. 104112–1041127, 2007.

QIU, X. Patterned piezo- pyro- and ferroelectricity of poled polymer electrets. **Journal of Applied Physics**, v. 108, n. 1, p. 011101 – 011119, 2010.

RICHARDSON, P. D. Piezoelectric polymers. **IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine**, v. 8, n. 2, p. 14 – 16, 1989.

SCHWARZ, R.; JUDENDORFER, T.; MUHR, M. Review of partial discharge monitoring techniques used in high voltage equipment. In: IEEE ANNUAL REPORT CONFERENCE ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2008. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 400 – 403.

SERRANO, J. R. et al. Electro-acoustic detection, identification and location of partial discharge sources in oil-paper insulation systems. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 2012. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 19, n. 5, p. 1569–1578.

SESSLER, G. M. **Electrets**. Berlin: Springer-Verlag, 1987.

_____. **Electrets**. Morgan Hill: Laplacian, v.1, 1998.

SESSLER, G. M.; HILLENBRAND, J. Electromechanical response of cellular electret films. **Applied Physics Letters**, v. 75, n. 21, p. 3405–3407, 22 nov. 1999.

SHIRANE, G.; SAWAGUCHI, E.; TAKAGI, Y. Dielectric Properties of Lead Zirconate. **Physical Review**, v. 84, n. 3, p. 476–481, 1 nov. 1951.

SILVA, Guilherme Cunha da. **Descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças**. 205. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

STONE G. C., Partial Discharge Diagnostics and Electrical Equipment Insulation Condition Assessment. In: IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 2005. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 12, pp. 891-903.

TANAKA, T.; GREENWOOD, A. **Advanced power cable technology**. [S.l.]: CRC press, Inc., 1983.

TESTA L. **Physical model of damage inception and growth in polymeric insulating materials subjected to partial discharges under dc and ac voltage.** Thesis (Ph.D.), University of Bologna, Bologna, Italy, 2009.

TRAINER, M. Kelvin and piezoelectricity. In: **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2003. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 10, p. 842 – 861, 2003.

TRUONG, L. H. et al, The feasibility of using uhf sensors to measure partial discharges in liquid nitrogen. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRIC LIQUIDS (ICDL), 2011. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p. 1–4.

WADA, Y.; HAYAKAWA, R. Piezoelectricity and pyroelectricity of polymer. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 15, p. 2041 – 2047, 1976.

ZANG, X.; HILLENBRAND, J.; SESSLER, G. M. Thermally stable fluorocarbon ferroelectrets with high piezoelectric coefficient. **Applied Physics A: Materials Science & Processing**, v. 84, p. 139 – 142, 2006.

ZHANG, P. et al. Influence of charging parameters on piezoelectricity for cellular polypropylene film electrets 12th International Symposium on Electrets (ISE), 2005. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, p 39-42.

ZHANG, X.; HILLENBRAND, J.; SESSLER, G. M. Ferroelectrets with improved thermal stability made from fused fluorocarbon layers. **Journal of Applied Physics**, v. 101, n. 5, p. 54114–54118, 2007.

ZINGALES, G. The requirements of a PD measuring system analyzed in the time domain. IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION, 2000 **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, v. 7, n. 1, p. 2–5.