UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

THAMYRES TÂMULLA CAVALCANTE PALITÓ

**Metodologia acústica para análise de óleo de transformador por sensores
piezoelétricos**

São Carlos
2019

THAMYRES TÂMULLA CAVALCANTE PALITÓ

Metodologia acústica para análise de óleo de transformador por sensores piezoelétricos

Versão corrigida¹

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do Título de Doutora em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica, Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência.

Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim.

Coorientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Pisani Altafim.

São Carlos
2019

¹ Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

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.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

Palit6, Thamyres T6mulla Cavalcante
Pl62m Metodologia ac6stica para an6lise de 6leo de
transformador por sensores piezoel6tricos / Thamyres
T6mulla Cavalcante Palit6; orientador Ruy Alberto
Corr6a Altafim; coorientador Ruy Alberto Pisani
Altafim. S6o Carlos, 2019.

Tese (Doutorado) - 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, 2019.

1. An6lise ac6stica. 2. 6leo mineral isolante. 3.
Transdutor ac6stico. 4. Sensor piezoel6trico. I.
T6tulo.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

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

Título da tese: "Metodologia acústica para análise de óleo de transformador por sensores piezoelétricos".

Data da defesa: 08/05/2019.

Comissão Julgadora:

Resultado:

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

Aprovado

Prof. Dr. **João Paulo Pereira do Carmo**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **Antonio Adilton Oliveira Carneiro**
(Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto/FFCLRP-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Lucas Fugikawa Santos**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Rio Claro)

Aprovado *Luc Fugikawa Santos*

Profa. Dra. **Cacilda de Jesus Ribeiro**
(Universidade Federal de Goiás/UFG)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

A meus pais, Ivanildo e Fátima

AGRADECIMENTOS

A Deus por me permitir chegar até aqui e ser a fonte da minha força e coragem em muitos momentos. E a nossa senhora pela fiel interseção.

A meu orientador Prof. Ruy Alberto Correa Altafim, e ao meu coorientador Prof. Ruy Alberto Pisani Altafim, obrigada por acreditarem em mim e por todo o conhecimento transmitido durante estes 4 anos de pesquisa.

Ao Dr. Yuri Andrey Assagra Olivato pelo companheirismo, amizade e ajuda durante o desenvolvimento desta tese.

Ao grande amigo e técnico Sr. Rui Bertho agradeço a sua ajuda e carinho em muitos momentos, desde a fabricação das peças dos meus experimentos ao ombro amigo para chorar.

Ao Prof. Adilton Carneiro pelo acolhimento, discussões e conhecimentos transmitidos no Laboratório do Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom (GIIMUS) e ao técnico Agnelo Bastos pelo suporte durante os experimentos.

Ao Prof. João do Carmo pelo incentivo e ajuda com os artigos.

A empresa Potencial Manutenção e Comércio de Equipamentos Ltda pela parceria, cedendo as amostras e fornecendo os laudos técnicos de óleos de transformadores, para desenvolvimento desta pesquisa.

A Universidade Federal da Paraíba (UFPB) por me acolher no Laboratório de Medidas e Instrumentação (LMI), onde eu realizei alguns experimentos.

Ao Grupo de Alta Tensão e Medidas (Gatm) pelos momentos de descontração e ajuda no Laboratório de Alta Tensão e Medidas (LATM).

Ao técnico José Roberto Bertho do Grupo de Polímeros "Prof. Bernhard Gross" do Instituto de Física de São Carlos (IFSC) pelas metalizações dos sensores piezoelétricos.

A técnica Virginia da Conceição Amaro Martins do Grupo de Bioquímica e Biomateriais do Instituto de Química de São Carlos (IQSC) pela análise de viscosidade das amostras de óleos de transformadores.

A todos que fazem o departamento de Engenharia Elétrica da EESC, César Domingues, Marisa Fortulan, Daniel Manjini, Murilo Moretti, Jussara Zoia (Ju), Vladimir Gomes, Roseli Ribeiro, Sr. José Oliveira e Sr. Odair da Silva, agradeço a atenção e colaboração nos serviços prestados.

A bibliotecária Elena Luzia Palloni Gonçalves por se dispor a corrigir as referências citadas nesta tese.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado, processo 141479/2015-9, e pelo apoio financeiro para realização desta pesquisa.

A todos os meus amigos que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse subir mais este degrau.

E por fim, de forma não menos importante, a minha família, meus pais Ivanildo e Fátima, minha irmã Thayse e ao meu noivo Rafael por todo amor, carinho, por compreender minha ausência em muitos momentos e pelo encorajamento em obter este título. Sem o apoio de vocês eu não teria conseguido.

Meu muito obrigada a todos!

“ No meio da confusão, encontre a simplicidade. A partir da discórdia, encontre a harmonia. No meio da dificuldade reside a oportunidade. ”

ALBERT EINSTEIN

RESUMO

PALITÓ, T. T. C. **Metodologia acústica para análise de óleo de transformador por sensores piezoelétricos.** 2019. 132 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Os transformadores são equipamentos fundamentais para o sistema elétrico e o acompanhamento regular de suas condições de operação é muito importante para que se reduzam custos associados ao seu ciclo de vida, bem como para que se possa garantir a sua confiabilidade e a sua durabilidade. As falhas elétricas ocorrem, muitas vezes, motivadas pela degradação do sistema isolante e consequentemente danificam o equipamento. O óleo é um dos componentes isolantes que se deteriora com facilidade devido ação de falhas ou variação de temperatura e umidade. O acompanhamento e a manutenção da qualidade do óleo isolante são etapas essenciais para proporcionar uma operação confiável dos equipamentos elétricos garantindo a confiabilidade do fornecimento de energia. Um dos parâmetros que pode ser monitorado no óleo é a água, pois esta reduz drasticamente a rigidez elétrica do dielétrico. Uma revisão na literatura relata alguns procedimentos de diagnósticos disponíveis para avaliar a condição do óleo de transformadores, tais como as análises físico química e a análise de gases dissolvidos (DGA). Pesquisas recentes revelam um tópico ressaltado que consiste na utilização de sensores acústicos para caracterização de líquidos, uma vez que essa análise possui a vantagem de ser não destrutiva, com possibilidade de aplicações não invasivas e em transformadores em operação. Neste contexto, esta tese propõe uma metodologia acústica para contribuir na detecção de umidade no óleo mineral isolante utilizando sensores piezoelétricos. A metodologia consiste na utilização de sensores para emitir e receber os sinais transmitidos através de amostras de óleos de transformadores. Os experimentos foram realizados na faixa de MHz, utilizando transdutores comerciais e na faixa de kHz, utilizando um transdutor piezoelétrico desenvolvido pelo Grupo de Alta Tensão e materiais da USP de São Carlos. Medidas da amplitude do sinal são correlacionadas com o teor de água contido nas amostras de óleos. Os resultados revelam que é possível diagnosticar se as amostras de óleo estão aptas ou não para uso em transformadores. Em alguns casos é possível distinguir as quatro classes das amostras de óleo mineral isolante testadas: óleo novo (virgem), óleo regenerado, óleo sujo e óleo queimado. A metodologia proposta, além de ser inédita, se mostra promissora para auxiliar no diagnóstico de amostras de óleo mineral isolante em campo.

Palavras-chave: Análise acústica. Óleo mineral isolante. Sensor piezoelétrico. Transdutor acústico.

ABSTRACT

PALITÓ, T. T. C. **Acoustic methodology for oil transformers analysis by piezoelectric sensors.** 2019. 132 p. Doctoral Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Transformers are fundamental equipment in electrical power system and constant monitoring their operating conditions is very important to reduce the costs associated with their life cycle, as well as to guarantee their reliability and durability. One of the main cause of electrical failures in power transformers is the degradation of the power transformer insulation system, which can cause permanent damages. A crucial element in their insulation system is oil used to insulate parts, but also to cool the equipment. Therefore monitor and maintain the insulating oil are essential steps to provide a reliable operation of the electrical equipment guaranteeing the reliability of the power supply. A review in the literature reports a wide variety of diagnostic procedures available to assess the condition of transformer oil, such as physical chemical analysis and dissolved gas (DGA) analysis. Recent research reveals a highlighted topic that consists of the use of acoustic sensors for characterizing liquids, since the acoustic analysis presents the characteristic of being non-destructive with possibility of non-invasive and application during transformer operation i.e. in line. In this context, this thesis proposes an acoustic methodology for the analysis of mineral insulating oil using piezoelectric sensors. The methodology consists of the use of sensors to emit and receive signals transmitted through oil transformer samples. The experiments were carried out in the MHz band, using commercial transducers and in the kHz band, using a piezoelectric transducer developed by the High Voltage and Materials Group from USP of São Carlos. Measurements of signal amplitude are correlated with the water content contained in the oil samples. The results show that it is possible to diagnose whether or not the oil samples are suitable for use in transformers. In some cases it is possible to distinguish the four classes of tested mineral oil samples. The proposed methodology is promising for the diagnosis of mineral insulation oil samples in the field.

Keywords: Acoustic analysis. Acoustic transducer. Insulating mineral oil. Piezoelectric sensor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação esquemática de uma onda estacionária.....	41
Figura 2.2 – Medição de atraso de tempo pelo método pulsado: (a) pulso eco (b) transmissão – recepção.	43
Figura 2.3 – Princípio para medição da densidade pelo método da reflexão relativa.	44
Figura 2.4 – Método das múltiplas reflexões.	46
Figura 2.5 – Sinais obtidos no método de múltiplas reflexões.....	46
Figura 2.6 – Efeito piezoelétrico: (a) direto (b) inverso.	49
Figura 2.7 – Imagens microscópicas de filmes celulares: (a) polipropileno (PP) (b) politereftalato de etilenglicol (PETP).	51
Figura 2.8 – 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.	52
Figura 2.9 – (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.	53
Figura 2.10 – Esquema do procedimento de fabricação em laboratório de piezoeletretos com estruturas padronizadas em canaletas.	55
Figura 2.11 – Micrografia ótica da seção transversal da estrutura padronizada em canaletas.	55
Figura 3.1 – Protótipo 1: projeto do involucro metálico, (a) representação esquemática e fotos da (b) frente e (c) de trás.....	58
Figura 3.2 – Projeto do transdutor piezoelétrico e compartimento de interface e baterias.	58
Figura 3.3 – (a) Piezoeletreto de FEP laminado com canal tubular aberto (vista superior); (b) Desenho esquemático de uma vista em seção transversal dos canais abertos.....	59
Figura 3.4 – Esquema do circuito eletrônico e respectivos blocos.	61
Figura 3.5 – Protótipo 2: projeto do involucro metálico, vistas em perspectivas: (a) lateral; (b) frontal.	62
Figura 3.6 – Fotos do Protótipo 2: involucro metálico, vistas em perspectivas: (a) lateral frontal; (b) e lateral traseira.	63
Figura 4.1 – Diagrama em blocos da metodologia base empregada.	65
Figura 4.2 – Sistema eletroacústico da configuração 1.	66
Figura 4.3 – Atuadores piezoelétrico.	66
Figura 4.4 – Protótipo da câmera acústica 1: (a) entrada do atuador; (b) entrada do transdutor; (c) sessão transversal.....	67
Figura 4.5 – Configuração 1: (a) Representação esquemática do sistema; (b) Foto do sistema montado.	68
Figura 4.6 – Fechamento do orifício que fica em contato com a amostra do transdutor acústico.	69
Figura 4.7 – Ilustração dos procedimentos para aquisição de medidas da configuração 1.	70
Figura 4.8 – Configuração 1: Resposta do transdutor piezoelétrico para o <i>sweep</i> no meio ar.	71

Figura 4.9 – Configuração 1: Resposta do transdutor piezoelétrico para o <i>sweep</i> no meio água.	71
Figura 4.10 – Configuração 1: Resposta do transdutor piezoelétrico para o <i>sweep</i> no meio óleo de transformador.	72
Figura 4.11 – Configuração 1: Ilustração do método de classificação: (a) sinais conceituais <i>gar</i> , <i>gágua</i> e <i>góleo</i> ; e (b) projeção bidimensional de todas as combinações possíveis dos indicadores dos sinais <i>gar</i> , <i>gágua</i> e <i>góleo</i> .	73
Figura 4.12 – Configuração 1: Gráficos das regiões de classificação dos meios para os quatro dias de experimentos.	75
Figura 4.13 – Sistema ultrassônico da configuração 2.	76
Figura 4.14 – Transdutores de imersão ultrassônico da Olympus.	76
Figura 4.15 – Protótipo da câmera acústica da configuração 2, vistas: (a) superior; (b) frontal; (c) lateral do receptor.	77
Figura 4.16 – Amostras de óleo mineral isolantes: (a) virgem, (b) sujo e (c) queimado.	78
Figura 4.17 – Gráfico da amplitude (a) para os cinco líquidos e (b) apenas para os óleos de transformador.	80
Figura 4.18 – Gráfico dos valores de amplitude dos óleos para a frequência de 5MHz.	81
Figura 4.19 – Gráfico da média e desvio padrão das amostras de óleo em 5 MHz.	82
Figura 4.20 – Gráfico do teor de água e da amplitude dos sinais de óleos de transformador em 5 MHz.	83
Figura 4.21 – Sistema ultrassônico da configuração 3.	85
Figura 4.22 – Hidrofone de alta precisão da Precision Acoustics LTD.	86
Figura 4.23 – Protótipo da câmera acústica da configuração 3, vistas: (a) superior; (b) frontal; (c) lateral do emissor; (d) lateral do receptor.	87
Figura 4.24 – Média e desvio padrão das medidas do hidrofone para as frequências: (a) 1MHz; (b) 2,25MHz; (c) 3,5 MHz; (d) 5 MHz e; (e) 10 MHz.	90
Figura 4.25 – Configuração 4: sistema utilizando um transdutor termoformado.	91
Figura 4.26 – Cerâmica piezoelétrica.	92
Figura 4.27 – Cerâmica piezoelétrica acoplada ao suporte em acrílico.	92
Figura 4.28 – Protótipo da câmera acústica da configuração 4, vistas: (a) superior; (b) frontal; (c) lateral do emissor; (d) lateral do receptor.	93
Figura 4.29 – Resposta do transdutor piezoelétrico para o <i>sweep</i> nos meios ar, água e óleos.	95
Figura 4.30 – Média e desvio padrão das amostras de (a) óleos_1; (b) óleos_1 sem o regenerado_1; (c) óleos_2; (d) óleos_2 sem o regenerado_2; (e) todos os óleos (f) todos os óleos sem o regenerado.	97
Figura 4.31 – Média e desvio padrão das amostras na faixa de frequência de 55-60 kHz para (a) óleos_1; (b) óleos_1 sem o regenerado_1; (c) óleos_2; (d) óleos_2 sem o regenerado_2; (e) todos os óleos (f) todos os óleos sem o regenerado.	99
Figura 4.32 – Medição do Δt para a amostra de óleo virgem.	101
Figura 4.33 – Viscosidade das amostras de óleos: (a) 1 e; (b) 2.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ensaio para óleo mineral isolante.	33
Tabela 2.2 – Ensaio para óleo mineral isolante.	34
Tabela 4.1 – Amplitude do primeiro eco do sinal e Δ_v utilizando os transdutores Olympus... ..	80
Tabela 4.2 – Medidas em 5 MHz: Amplitude, média e desvio padrão das medidas para os cinco líquidos.....	81
Tabela 4.3 – Tabela de médias da amplitude em 5 MHz.....	82
Tabela 4.4 – Dados da análise físico química dos óleos de transformador.	83
Tabela 4.5 – Medição do retardo entre o sinal emitido e o sinal recebido.	84
Tabela 4.6 – Velocidade de propagação ultrassônica dos líquidos.	84
Tabela 4.7 – Medidas de viscosidade dos óleos de transformador.	85
Tabela 4.8 – Campo próximo entre o sensor ultrassônico e o hidrofone.	88
Tabela 4.9 – Amplitude do primeiro eco do sinal adquirido com o hidrofone e Δ_v entre as amostras de óleo.	89
Tabela 4.10 – Amplitude do primeiro eco do sinal e Δ_v utilizando os transdutores Olympus.	94
Tabela 4.11 – Amplitude de pico a pico do <i>sweep</i> para os óleos.....	96
Tabela 4.12 – Frequência, magnitude e desvios padrão para os óleos.	98
Tabela 4.13 – Amplitude de pico a pico na faixa de frequência de 55 kHz a 60 kHz para os óleos.	99
Tabela 4.14 – Velocidade de propagação para a água e para os óleos coletados em 2016. ...	101

SUMARIO

AGRADECIMENTOS	9
RESUMO.....	13
ABSTRACT	15
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	17
LISTA DE TABELAS	19
Introdução	23
1.1 Considerações iniciais	23
1.2 Justificativa.....	23
1.3 Motivação.....	25
1.4 Objetivos.....	29
1.5 Estrutura do trabalho.....	30
Fundamentação Teórica	31
2.1 Considerações iniciais	31
2.2 Óleo mineral isolante (OMI)	31
2.3 Análises em óleo mineral isolante	32
2.3.1 Análise físico-química	33
2.3.2 Análise de gases dissolvidos.....	37
2.3.3 Análise acústica	39
2.4 Sensores piezoelétricos.....	48
2.4.1 Piezoeletricidade.....	48
2.4.2 Eletreto	50
2.4.3 Piezoeletreto	52
2.5 Considerações Finais	56
Transdutor Piezoelétrico	57
3.1 Considerações iniciais	57

3.2	Protótipo 1	57
3.2.1	Invólucro metálico	57
3.2.2	Piezoelitreto	59
3.2.3	Circuito de pré-amplificação	60
3.3	Protótipo 2	62
3.4	Considerações Finais	63
Metodologias propostas e Resultados.....		65
4.1	Considerações iniciais	65
4.2	Método – princípio de funcionamento.....	65
4.3	Configuração 1	66
4.3.1	Metodologia: configuração 1	68
4.3.2	Resultados: configuração 1	70
4.4	Configuração 2	75
4.4.1	Metodologia: configuração 2	78
4.4.2	Resultados: configuração 2.....	79
4.5	Configuração 3.....	85
4.5.1	Metodologia: configuração 3	88
4.5.2	Resultados: configuração 3.....	89
4.6	Configuração 4.....	91
4.6.1	Metodologia: configuração 4	93
4.6.2	Resultados: configuração 4.....	94
4.7	Considerações Finais	103
Considerações finais		105
Referências		109
Apêndice A – Artigos Publicados		119

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Os transformadores são equipamentos fundamentais para os sistemas elétricos de potência, sua principal função é a adequação dos níveis de tensão, servindo de elo entre os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Trata-se de equipamentos estratégicos e sua importância está diretamente relacionada à continuidade e qualidade do sistema de fornecimento de energia elétrica, uma vez que, a sua perda, por falha ou por defeito, significa a interrupção imediata no fornecimento de energia em áreas de grande amplitude. 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.

1.2 Justificativa

Nas últimas décadas, a grande expansão tecnológica e a proliferação dos equipamentos eletrônicos, altamente sensíveis a variações de tensões de curta duração, têm levado os consumidores a exigirem cada vez mais por qualidade e confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Com isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) força as empresas do setor elétrico a preocuparem-se continuamente com a melhoria dos índices de qualidade e confiabilidade do sistema de energia elétrica. Neste contexto, torna-se evidente a necessidade de identificar as principais causas de perturbações nos sistemas elétricos e mitigar seus efeitos com monitoramentos constantes.

Descontinuidades no fornecimento de energia elétrica provocam vários prejuízos financeiros para as concessionárias, tais como: possíveis multas por parte do agente regulador, indenizações por perdas e danos causados a consumidores, além de desgastar a imagem da empresa (AZEVEDO, 2009). Nesse sentido, as concessionárias de energia elétrica buscam investir em prática eficazes para aprimorar as suas técnicas de manutenção, visando à detecção prévia de defeitos nos equipamentos elétricos, antes que eles possam comprometer o bom desempenho do sistema (SOUZA, 2008).

A verificação regular das condições dos equipamentos elétricos, em particular, dos transformadores, tem como objetivo diminuir os desligamentos para realizações de manutenções ou até mesmo desligamentos de falhas elétricas, muitas vezes ocorrem motivadas pela degradação do sistema isolante (AZEVEDO, 2009). O óleo mineral isolante do transformador é um dos principais componentes que precisa ser monitorado, pois este óleo sofre deterioração por esforços elétricos e térmicos que por sua vez gera produtos de decomposição que provocam a ocorrência de falhas nos equipamentos. O óleo presente nestes equipamentos é responsável pelo resfriamento e pelo isolamento elétrico. Com o tempo, algumas de suas propriedades físicas e químicas, como cor, viscosidade e teor de água, variam devido às condições ambientais e à alta exposição a campos elétricos (MA; SAHA; EKANAYAKE, 2012).

O acompanhamento e a manutenção da qualidade do óleo isolante são etapas essenciais para proporcionar uma operação confiável desses equipamentos elétricos, garantindo a confiabilidade do fornecimento de energia. Uma revisão na literatura revela uma grande variedade de procedimentos e critérios para esta finalidade, estabelecidos por agências reguladoras do setor elétrico, concessionárias de energia e indústrias em vários países (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2017).

Um número significativo de estudos tem apresentado soluções efetivas para monitoramento de transformadores e para manutenção preditiva (ARVIND; KHUSHDEEP; DEEPAK, 2008; ZHANG; GOCKENBACH, 2008; VRSALJKO; HARAMIJA; HADZISKERLEV, 2012; SUN; HUANG; HUANG, 2012; MORAVEJ; BAGHERI, 2015), e muitos deles têm como foco a análise de óleo (EMSLEY et al., 2000; PHADUNGTHIN et al., 2010; MARQUES et al., 2017; MAHANTA; LASKAR, 2018). Entre as técnicas de diagnóstico disponíveis para avaliar a condição de isolamento dos transformadores, é possível citar a análise físico-química, a análise de gases dissolvidos, a análise ótica, a medição do grau de polimerização (DP), a medição e análise de furanos por cromatografia líquida de alta eficiência (*High Performance Liquid Chromatography* - HPLC) e a análise acústica.

Dessas técnicas, duas são amplamente utilizadas em programas preventivos, são elas: análise de gás dissolvido (DGA) no óleo e a análise físico-química. A DGA determina a concentração dos gases dissolvidos no óleo, esta técnica é útil para detectar perturbações elétricas e decomposição térmica em componentes internos de transformadores. A formação de gases no interior dos equipamentos pode ser causa de algum tipo de problema, como mau contato entre componentes internos, fugas de energia entre espiras, esforço à altas correntes de curto circuito e tempo de trabalho prolongado com cargas elevadas. Por outro lado, a análise

físico-química determina a capacidade de isolamento e o estado de envelhecimento do óleo mineral, indicando mudanças nos parâmetros físicos e químicos do óleo, que também são cruciais para a operação do transformador. Por exemplo, a porcentagem de água no óleo reduz drasticamente a rigidez elétrica do dielétrico. Os resultados desses parâmetros são comparados aos valores pré-estabelecidos em normas. Valores fora dos limites especificados indicam necessidade de tratamento termo vácuo, substituição ou regeneração do óleo mineral (LORENCINI, 2017). Atualmente a análise físico-química e a análise de gases dissolvidos são técnicas consolidadas e utilizadas em larga escala pelos setores de manutenção das concessionárias do setor elétrico como técnicas preditivas de manutenção voltada ao acompanhamento das condições do sistema isolante de transformadores de potência imersos em óleo mineral isolante.

Outro método utilizado no monitoramento transformadores é a análise acústica, esta técnica é amplamente utilizada para determinar os impactos de descargas parciais (DP) em transformadores de potência. As descargas parciais são apontadas como uma das principais causas de envelhecimento precoce do sistema de isolamento, em especial, o óleo. Por meio da análise acústica é possível monitorar a ocorrência de DPs internas ao transformador e em alguns casos é possível localizar a fonte das descargas (FERREIRA et al., 2017). Estudos recentes abordam a análise acústica como técnica preditiva no monitoramento de transformadores para detecção de umidade no óleo de transformadores. Seguindo este conceito, este trabalho apresenta o uso de sensores acústicos e ultrassônicos para verificar a presença de umidade no óleo mineral isolante. As configurações que são apresentadas no Capítulo 4 fazem parte do estudo de protocolos acústicos inéditos desenvolvidos para detecção da umidade em OMI.

1.3 Motivação

Dependendo da aplicação, uma substância líquida pode ser caracterizada direta ou indiretamente, por meio de suas propriedades físicas, químicas, ópticas, elétricas e acústicas, usando técnicas como cromatografia, propagação ultrassônica e medições de impedância (WITHERS, 1996; EGGERS; KAATZE, 1996; MARQUES et al., 2017; MAHANTA; LASKAR, 2018). Um tópico destacado nessa área é o método baseado na propagação de ondas acústicas, comumente conhecido como método de emissão acústica (AE). Pesquisas recentes revelam a utilização de sensores acústicos e ultrassônicos para caracterização de líquidos conforme relatado na literatura (MENG; JAWORSKI; WHITE, 2006; FRANCO;

ADAMOWSKI; BUIOCHI, 2012; CHAUDHURI et al., 2014; XIAO, 2015; TOKITOU; SHIDA, 2004; TYURYUMINA; BATRAK; SEKACKIY, 2017).

Meng, Jaworski e White (2006) apresentaram um estudo experimental realizado para caracterizar misturas heterogêneas (emulsões) de petróleo e água, utilizando transdutores ultrassônicos. As medições são baseadas no tempo de voo da onda de pressão ultrassônica para obter a velocidade do som. Os resultados, que mostram a variação da velocidade do som com a fração volumétrica do petróleo, para três temperaturas diferentes, são comparados com cinco modelos teóricos disponíveis na literatura. O estudo demonstra que os sensores propostos podem ser utilizados como um método simples e confiável de medição da composição de misturas heterogêneas. O artigo também fornece uma breve revisão dos modelos teóricos da propagação ultrassônica e estuda sua relevância na previsão da velocidade ultrassônica do som para o meio sob investigação.

Em Franco, Adamowski e Buiochi (2012) é realizado o estudo inverso, ou seja, a detecção de contaminantes oleosos em água, utilizando a técnica de reflexão de cisalhamento por ondas ultrassônicas. A determinação do coeficiente de reflexão complexo de ondas sonoras ultrassônicas na interface sólido-líquido é uma técnica empregada para a medição das propriedades visco elásticas dos líquidos. Uma característica interessante desta técnica é a pequena profundidade de penetração das ondas de cisalhamento na amostra líquida, o que permite medições com filmes líquidos de alguns micrômetros de espessura. Esta propriedade, juntamente com a adesão de substâncias oleosas às superfícies, pode ser usada para a detecção de contaminantes oleosos em água. Os resultados indicam que ambas as quantidades, a magnitude e a fase do coeficiente de reflexão, mostraram a mudança esperada quando foram incorporados 5 ml de óleo SAE 40 na água. Os resultados sugerem a adequação da magnitude para a aplicação, visto que a mesma apresenta um comportamento estável a variação de temperatura (0,9 °C) durante o tempo de teste (150 minutos). Em contraste, a fase não é útil para o monitoramento da contaminação, pois a mesma apresenta uma variação importante durante o tempo de teste devido à variação de temperatura. O estudo revela que a metodologia proposta tem potencial para a detecção de contaminantes oleosos em água, em que foi possível detectar com êxito uma contaminação de 0,5% em volume de óleo SAE 40 em água.

No artigo de Chaudhuri et al. (2014) são realizados ensaios de fluxo controlado utilizando misturas de óleo e água em diferentes frações de massa em um circuito de fluxo na Universidade de Tulsa. Um método acústico não invasivo desenvolvido no Laboratório Nacional de Los Alamos (LANL) é aplicado para calcular as frações de massa e volume de petróleo e água no fluxo misto de duas fases, medindo a velocidade do som através da mistura

de fluidos compostos juntamente com a temperatura instantânea. As densidades e velocidades de som em cada componente de fluido são obtidas antecipadamente para fins de calibragem a várias temperaturas, e os coeficientes apropriados são utilizados no algoritmo final. Neste trabalho, Chaudhuri e colaboradores (2014) apresentam os resultados da medição da composição utilizando a técnica acústica de LANL para diferentes proporções de mistura de petróleo bruto e água e a diferentes taxas de fluxo, e uma comparação dos resultados do método acústico com aqueles de medidores Coriolis (padrão da indústria) que mediram os índices de fluxos de massa individuais antes da mistura. Ao fim do estudo, observa-se que a diferença média entre as duas técnicas de medição era inferior a 1,4% em peso e é dependente das taxas de fluxo totais.

O estudo proposto por Xiao (2015) revisa o uso de medidas acústicas da velocidade do som (SoS) para determinar a fração de volume de água em poços. É apresentado um método simples de cálculo algébrico baseado na física que fornece resultados precisos para um fluxo homogêneo de petróleo-água. Uma fração de volume de água é calculada a partir da medida de SoS uma vez que a densidade e a compressibilidade adiabática dos constituintes da mistura de fluxo são determinadas por medição ou modelação de laboratório. Os resultados do teste do circuito de fluxo mostraram bom desempenho desta abordagem para uma ampla gama de taxas de fluxo. O erro na fração de volume de água entre o modelo e a medida de referência do circuito de fluxo foi de 5% em diferença absoluta, excedendo a precisão requerida para as utilizações de produção e gestão de reservatórios.

No artigo dos autores George, Rufus e Alex (2016) é proposto um método para análise da qualidade do óleo de transformador condido em um tanque de alumínio hermeticamente selado utilizando um sensor ultrassônico. O método é baseado na propagação e reflexão de ondas que são recebidas pelo transdutor ultrassônico. Os autores utilizam a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para obter a magnitude do sinal e calcular o coeficiente de reflexão que por sua vez é utilizado para calcular a impedância acústica do óleo. As medidas são realizadas em amostras de óleo novo e em amostras de óleo com um ano de uso. A impedância acústica média medida experimentalmente para o óleo usado é de 4.0021 MRayls e para o óleo novo óleo é de 2.882 MRayls. Os resultados experimentais são comparados com a impedância acústica teórica, com a densidade (calculada pelo método massa por volume) e com a viscosidade (obtida a partir de um viscosímetro de Brookfield). Para verificar a reprodutibilidade do método, os experimentos foram repetidos ao menos 10 vezes. A partir dos resultados obtidos observou-se que as medidas são consistentes apresentando um desvio padrão de 0,056 para o óleo usado e 0,112 para óleo novo. George, Rufus e Alex (2016) concluíram

que o método proposto é capaz de detectar a mudança dos parâmetros do óleo do transformador a partir do seu coeficiente de reflexão e que este método pode ser desenvolvido como uma técnica nova e eficiente para monitorar a qualidade do óleo do transformador em tanques herméticos em locais remotos.

Nas últimas décadas algumas pesquisas envolvendo a análise acústica e ultrassônica na detecção de umidade em óleo de transformadores vêm sendo desenvolvidas. Normalmente, a água dificilmente é dissolvida no óleo devido à polaridade das moléculas e a característica hidrofóbica do óleo. No entanto, o óleo novo ou regenerado contém quantidades mínimas de água, que são medidas em ppm (parte por milhão) (LIU et al., 2016). Além disso, ao longo do tempo, durante a operação, o nível de umidade pode aumentar devido à degradação de materiais poliméricos e à absorção de umidade externa (ZHU, 1996). Portanto, a detecção de umidade no óleo isolante é importante e se faz necessária devido sua característica nociva ao óleo e outros componentes isolantes. Entre os danos causados pela água podemos citar: diminuição da resistência dielétrica do óleo, aceleração do envelhecimento da celulose (utilizada como revestimento isolante internamente nos transformadores) e formação de bolhas quando os equipamentos estão expostos a altas temperaturas (KOCH; KRUGER, 2009).

No artigo de Tokitou e Shida (2004), é apresentado um sistema de detecção para discriminar a água no óleo. O método de detecção adota a diferença do tempo de propagação de uma onda ultrassônica na água e no óleo, para cada temperatura característica. Quando a água e o óleo são aquecidos, esses tempos de propagação sofrem uma mudança inversa. Os autores alegam que por esse motivo, o sistema proposto não precisa fornecer nenhum banco de dados de valores absolutos anterior como referência. Adicionalmente, os autores sugerem a possibilidade de detectar a água presente no óleo de um transformador utilizando o método proposto.

Chang-ping e colaboradores (2010), desenvolveram um método de detecção de umidade no óleo de transformador baseado na diferença do tempo de trânsito ultrassônico. A metodologia proposta parte do pressuposto de que a velocidade ultrassônica do óleo e da água são semelhantes, porém tem uma diferença relativamente grande com o gelo. Assim as amostras de óleo-água são congeladas para realização das medições. Nos experimentos, são utilizadas diferentes amostras (300 ml) de misturas, preparadas pelos autores, de óleo e água. O método consiste na utilização de duas células de medição idênticas, onde são acoplados dois transdutores, um operando como emissor e outro como receptor, separados por uma distância fixa. Em uma célula é realizada a medição da amostra de um óleo padrão, sem adição de água. Na outra célula são testadas as diferentes misturas óleo-água. É emitido um pulso de sinal

senoidal, que atravessa o meio e em seguida é detectado pelo receptor. Os dois sinais são comparados e a análise é feita com base na diferença do tempo de propagação ultrassônica dos sinais. Os resultados demonstram que quanto maior for o teor de água no óleo, menor será a velocidade de propagação no meio e maior será a diferença do tempo de propagação entre um óleo padrão e uma mistura de óleo-água. No artigo os autores não revelam o modelo dos transdutores nem a frequência utilizada nos experimentos.

Em um outro artigo, Tyuryumina, Batrak e Sekackiy (2017) utilizam o método de emissão acústica (AE) como uma técnica de diagnóstico online para identificar falhas em evolução em transformadores de potência. Este método é usado para medir sinais acústicos originados por impurezas (água, celulose, gás) no óleo do transformador. A metodologia consiste em um gerador de sinais, dois transdutores piezoelétricos e um computador onde os sinais são processados via *software*. Inicialmente é feito um teste de comparação entre duas amostras de óleo, uma nova e outra envelhecida, presentes em tanques de transformadores, para verificar a sensibilidade do método proposto. Para determinar a influência da água, da celulose e do gás no óleo de transformador, os autores adicionam diferentes concentrações destes a diferentes amostras de óleo novo e em seguida, fazem a medição do sinal. Os autores analisam o espectro de frequências do sinal (1 a 10 kHz) para obter as informações sobre a condição do transformador. De acordo com os resultados obtidos, a água e a celulose influenciaram a qualidade do óleo do transformador. Porém, o método AE não foi sensível à determinação da fase gasosa no óleo do transformador na faixa de frequência selecionada.

Diante da literatura relatada, a análise acústica se mostra promissora para análise de óleo mineral isolante, por ser uma técnica robusta, imune a ruídos eletromagnéticos e em alguns casos, dependendo do sensor aplicado, uma técnica de baixo custo. Portanto, esta tese propõe uma nova técnica acústica aplicada ao diagnóstico auxiliar da qualidade do óleo mineral isolante, utilizado em transformadores, integrando como transdutor acústico um piezoeletrito termoformado, tecnologia esta 100% nacional, inédita e de baixo custo.

1.4 Objetivos

Objetivo geral:

Esta tese consiste em parte integrante da pesquisa desenvolvida pelo Grupo de Alta Tensão e Materiais (Gatm) na produção de uma nova metodologia acústica, onde aqui se busca

desenvolver ensaios laboratoriais para detecção de umidade e do comportamento desta em óleo de transformadores utilizando transdutores piezoelétricos.

Objetivos Específicos:

- Estudar metodologias acústicas para ser usadas na realização de testes acústicos, em laboratório, em materiais líquidos;
- Aperfeiçoar o transdutor acústico para fins de utilização em materiais líquidos;
- Realizar os ensaios em amostras de óleos minerais isolantes com diferentes níveis de degradação;
- Estudar o comportamento dos sinais provenientes dos ensaios laboratoriais, a fim de encontrar uma assinatura característica para cada tipo de óleo estudado.
- Verificar a potencialidade do sensor piezoelétrico para fins de detecção acústica para analisar a umidade no óleo que contribui para o diagnóstico de OMI de transformadores.

1.5 Estrutura do trabalho

Encontram-se descritos neste capítulo a introdução, justificativa e a motivação que contém uma revisão bibliográfica apresentando os resultados mais importantes e ressaltando as principais pesquisas encontradas na literatura para o desenvolvimento deste trabalho. Adicionalmente são apresentados os objetivos e o escopo geral dos capítulos desta tese.

No Capítulo dois apresenta-se de forma resumida a fundamentação teórica necessária para o entendimento desta tese. Será apresentado os principais métodos de análise de óleo em transformadores. E também será apresentado uma revisão bibliográfica acerca dos eletretos, piezeletricidade e piezoeletretos.

O Capítulo três apresenta o transdutor piezoelétrico utilizado nesta pesquisa.

No Capítulo quatro descrevem-se as metodologias, procedimentos e materiais utilizados nos experimentos realizados. Ainda no capítulo quatro são apresentados e discutidos os resultados de cada configuração e nos meios propostos.

As considerações finais e propostas para continuação deste trabalho são apresentados no Capítulo cinco.

Por fim, são apresentadas as referências consultadas durante o desenvolvimento desta tese e em seguida consta o Apêndice A em que são apresentados os artigos resultantes desta pesquisa.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

2.1 Considerações iniciais

Existe um grande potencial de aplicações de métodos para caracterização de líquidos em diversos setores produtivos e de pesquisa. Para cada aplicação, pode-se utilizar instrumentos de medição de algumas grandezas, como a densidade, viscosidade, propriedades químicas, termodinâmicas, acústicas, ópticas, elétricas, que direta e indiretamente podem ser utilizadas para caracterizar um meio líquido (HIGUTI; FURUKAWA; ADAMOWSKI, 2001). Neste capítulo são apresentadas algumas técnicas de análise de óleo mineral isolante, especificamente a análise físico-química, análise de gases dissolvidos (DGA) e análise acústica. Adicionalmente, este capítulo também faz um levantamento histórico e apresenta alguns conceitos relacionados aos eletretos, piezoeletricidade e piezoeletretos, que apesar de não terem relação direta com análise de óleos são fundamentos teóricos que são necessários para a compreensão do funcionamento dos sensores utilizados nesse trabalho.

2.2 Óleo mineral isolante (OMI)

O óleo mineral isolante (OMI) é utilizado em equipamentos empregados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. O OMI utilizado em transformadores, disjuntores, reatores e religadores, são compostos químicos derivados do petróleo. Sua composição química bem como suas características dependem da natureza do petróleo do qual foram extraídos e também do processo empregado para sua produção. Este óleo é constituído por uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos e naftênicos, também, fazendo parte, em quantidade reduzida, os compostos hidrocarbonetos aromáticos, heterocompostos e de nitrogênio. Portanto, o OMI, originado do petróleo de base parafínica, é chamado de óleo parafínico e, quando obtido do petróleo de base naftênica, denomina-se óleo naftênico (LUPI FILHO, 2012).

O desempenho confiável de um óleo mineral isolante, em um sistema de isolamento, depende de certas características básicas do óleo que podem afetar o desempenho geral do

equipamento elétrico. Para atender satisfatoriamente a seu papel múltiplo de dielétrico e agente de transferência de calor, o óleo deve possuir certas propriedades básicas, como (ABNT, 2017):

- rigidez dielétrica suficiente para suportar as tensões elétricas impostas pelo serviço;
- viscosidade adequada para que sua capacidade de circular e transferir calor não seja prejudicada;
- propriedades adequadas às condições climáticas esperadas no local de instalação;
- resistência à oxidação adequada para assegurar uma vida útil satisfatória.

O OMI em serviço está sujeito à deterioração devido às condições de uso. Esta degradação ocorre como resultado de tensões elétricas, térmicas e mecânicas, dependendo das condições de operação às quais o equipamento é submetido e de reações químicas dentro do equipamento (MARQUES et al., 2017).

O óleo em serviço é submetido a reações de oxidação devido à presença de metais e/ou compostos metálicos, que agem como catalisadores. Como consequência, podem ocorrer mudanças de cor, formação de compostos ácidos e, em um estágio avançado da oxidação, precipitação de borra, que podem prejudicar as propriedades elétricas. Além dos produtos de oxidação, outros contaminantes, como água, partículas sólidas e compostos polares solúveis em óleo, podem ser acumulados no óleo durante o serviço e alterar suas propriedades (MA; SAHA; EKANAYAKE, 2012; ABNT, 2017).

Atualmente, duas técnicas são amplamente utilizadas pelos setores de manutenção das concessionárias do setor elétrico como técnicas preditivas de manutenção voltada ao acompanhamento das condições do sistema isolante de transformadores de potência imersos em óleo mineral isolante, são elas: a análise de gás dissolvido (DGA) no óleo e a análise físico-química (AZEVEDO, 2009). A DGA é útil para detectar perturbações elétricas e decomposição térmica em componentes internos de transformadores. Já a análise físico-química indica mudanças nos parâmetros físicos e químicos do óleo, que também são cruciais para a operação do transformador.

2.3 Análises em óleo mineral isolante

Como já mencionado, a condição do óleo afeta consideravelmente o desempenho e a vida útil dos transformadores. Uma combinação de testes elétricos, físicos e químicos pode ser realizada para medir a alteração nas propriedades elétricas, a extensão da contaminação e o grau de deterioração no óleo isolante. Os resultados desses testes são utilizados para estabelecer

procedimentos de manutenção preventiva, para evitar paradas não programadas, falhas precoces e prolongar a vida útil do equipamento (WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002). Há uma infinidade de testes disponíveis para o óleo isolante (DUVAL, 2002; SAHA, 2003a; PHADUNGTHIN et al., 2010; MARQUES et al., 2017), os mais comumente usados, e sua significância, são apresentados a seguir.

2.3.1 Análise físico-química

A análise físico-química permite inferir a condição da isolação e o estado do óleo mineral isolante a partir da análise em laboratório de amostras de OMI do transformador em serviço. As principais características físico-químicas, ou ensaios, utilizados como parâmetros de classificação do óleo isolante, são: cor e aparência, rigidez dielétrica, teor de água, índice de acidez, tensão interfacial, perdas dielétricas e densidade (MARQUES et al., 2013). As normas específicas, nacional e internacional, para determinação de cada uma dessas propriedades são descritas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Ensaios para óleo mineral isolante.

Característica	Norma Brasileira	Norma Internacional
Cor e aparência	ABNT NBR 14483	ASTM D 1500
Rigidez dielétrica	ABNT NBR IEC 60156	IEC 60156
Teor de água	ABNT NBR 10710	IEC 60814
Índice de neutralização	ABNT NBR 14248	ASTM D 974
Tensão interfacial	ABNT NBR 6234	ASTM D 971
Fator de perdas dielétricas	ABNT NBR 12133	ASTM D 924
Densidade	ABNT NBR 7148	ASTM D 1298

Fonte: Autora (2019).

Além dos ensaios relacionados na Tabela 2.1, classificados como ensaios de rotina, existem os ensaios complementares e os ensaios investigativos especiais. Porém os ensaios de rotina são considerados suficientes para determinar se as condições do óleo são adequadas para operação contínua e sugerir o tipo de ação corretiva necessária, onde aplicável (ABNT, 2017).

A Tabela 2.2 apresenta os valores de referência para início de controle de óleos isolantes em quatro categorias de equipamentos novos. Estes valores de referência são aplicados a ensaios realizados em amostras antes do enchimento, retiradas após 24 horas e até 30 dias após o enchimento do equipamento, antes da energização. Nos casos em que a energização for superior a 30 dias e dentro do período de garantia do equipamento, os valores de referência devem ser acordados entre comprador e fabricante (ABNT, 2017).

Tabela 2.2 – Ensaaios para óleo mineral isolante.

Característica	Categoria do equipamento			
	$\leq 36,2 \text{ kV}$	$> 36,2 \text{ kV}$ $\leq 72,5 \text{ kV}$	$> 72,5 \text{ kV}$ $\leq 145 \text{ kV}$	$> 145 \text{ kV}$
Aparência	Claro e isento de materiais em suspensão			
Cor, máx.		1		
Índice de neutralização, mg KOH/g, máx.		0,03		
Tensão interfacial a 25 °C, nH/m, min.		40		
Teor de água, mg/kg, máx.	20	15	10	10
Rigidez dielétrica, kV, mín.	55	60	70	80
Fator de Perdas dielétricas a 25 °C, %, máx.		0,05		

Fonte: Adaptado de ABNT (2017).

Nos próximos subtópicos são comentados cada uma das características e ensaios das normas brasileira citados na Tabela 2.1.

2.3.1.1 Cor e aparência

O ensaio de cor é realizado pelo método do colorímetro ASTM que consiste na utilização de uma fonte padrão de luz. A cor de um óleo isolante é determinada pela luz transmitida e é expressa por um valor numérico (0,5 a 8,0), que é comparado com uma série de padrões de cores. A cor não é uma propriedade crítica, mas pode ser útil para avaliação comparativa ou para identificar o tipo de óleo, por exemplo, o mineral (incolor) e o vegetal (verde). A medida que o óleo vai oxidando, a sua cor vai escurecendo. Um número de cor muito alto significa que o óleo está em más condições. Além da cor, é importante observar a aparência do óleo, pois esta pode apresentar turbidez ou sedimentos, que podem indicar a presença de água livre, borra insolúvel, carbono, fibras, sujeira ou outros contaminantes (ABNT, 2015, 2017; PHADUNGTHIN et al., 2010).

2.3.1.2 Rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica ou tensão de ruptura dielétrica mede a capacidade de o óleo isolante suportar o estresse elétrico. O ensaio é realizado da seguinte forma: uma amostra de óleo, contida em uma célula de ensaio com dois eletrodos, é submetida a um campo elétrico crescente, aplicado a uma taxa constante de elevação de tensão até que ocorra a ruptura elétrica (ABNT, 2004, 2017). O óleo seco e limpo apresenta uma rigidez dielétrica intrinsecamente alta.

Água livre e partículas sólidas, em combinação com altos níveis de água dissolvida, tendem a migrar para regiões de alta solicitação elétrica e reduzir drasticamente a rigidez dielétrica. Portanto, a medida da rigidez dielétrica, serve principalmente para indicar a presença de contaminantes, como água e materiais sólidos em suspensão e também para advertir quanto a necessidade de executar um tratamento de secagem e filtração. Um valor baixo de rigidez dielétrica implica que o óleo tenha sido contaminado por uma grande quantidade de partículas. Entretanto, uma alta rigidez dielétrica não indica necessariamente a ausência de contaminantes. (ABNT, 2017; PHADUNGTHIN et al., 2010).

2.3.1.3 Teor de água

A umidade ou teor de água no óleo de transformador é altamente indesejável, pois afeta negativamente as propriedades dielétricas do óleo, aumentando a condutividade elétrica e o fator de dissipação e reduzindo sua resistência elétrica (SAHA, 2003b). Além disso, o teor de água do sistema de isolamento acelera a degradação do isolamento, diminui a eficiência do resfriamento do transformador e provoca a emissão de bolhas a altas temperaturas. No óleo de transformador, a água pode originar-se da atmosfera ou ser produzida pela deterioração de materiais isolantes (celulose e óleo) (ZHU, 1996; ZHANG; GOCKENBACH, 2008; KOCH; KRUGER, 2009). Normalmente o teor de água no óleo, dado em miligramas por quilograma (mg/kg) ou parte por milhão (ppm), é medido pelo método da titulação coulométrica de Karl Fisher, em que são utilizados reagentes (ABNT, 2006, 2017). No óleo novo ou regenerado as quantidades de água devem ser mínimas, por norma o teor de umidade aceitável para um óleo novo ou regenerado em um equipamento novo, é 20 ppm, já para o óleo de equipamentos (transformadores e reatores) em operação, o valor limite para ação corretiva é de 40 ppm, ambos os valores para a categoria de equipamentos de até 36,2 kV. Conforme aumenta a categoria do equipamento, o teor de umidade permitido no óleo diminui (ABNT, 2006).

2.3.1.4 Índice de neutralização

O óleo de transformador novo ou em uso, pode conter componentes básicos ou ácidos, presentes como aditivos ou como produtos de degradação formados durante o serviço, como por exemplo, produtos de oxidação. O índice de neutralização (acidez) do óleo é a medida dos constituintes ou contaminantes ácidos presentes no óleo. Este índice é representado por um

número de neutralização, cuja unidade é mgKOH/gm, que significa a quantidade de miligrama de hidróxido de potássio para neutralizar um grama de óleo. O índice de neutralização aumenta como resultado da oxidação. Os ácidos e outros produtos de oxidação afetam, em conjunto com a água e contaminantes sólidos, o dielétrico e outras propriedades do óleo. Os ácidos têm um impacto na degradação dos materiais celulósicos e podem também ser responsáveis pela corrosão de peças de metal de um transformador. A taxa de aumento da acidez de um óleo em serviço é um indicador da taxa de envelhecimento do óleo (ABNT, 2009, 2017).

2.3.1.5 Tensão interfacial

A tensão interfacial entre o óleo e a água é um ensaio para se detectar contaminantes polares solúveis e produtos de oxidação, ou seja, é a medida de força necessária para se romper uma interface óleo – água. Quando o óleo é novo esta interface é rígida e a força é grande. A medida que o óleo vai se deteriorando, compostos polares vão se formando e estes tendem a se concentrar na interface óleo – água e quanto maior for esta concentração menor será o valor da tensão interfacial. Uma rápida diminuição da tensão interfacial pode também ser uma indicação de problemas de compatibilidade entre o óleo e alguns materiais do transformador (vernizes, gaxetas etc.) ou de contaminação durante o enchimento com óleo. Com transformadores sobrecarregados a deterioração dos materiais é rápida e a tensão interfacial é uma ferramenta para a detecção dessa deterioração (ABNT, 2015, 2017; DATALINK, 2017).

2.3.1.6 Fator de potência do isolamento ou fator de perdas dielétricas e resistividade

A determinação de perdas dielétricas pode ser realizada através da medição do fator de potência ou do fator de dissipação. O fator de potência do isolamento é a relação entre o componente da corrente resistiva e a corrente de fuga total sob uma tensão aplicada. O fator de perdas dielétricas e resistividade são muito sensíveis à presença de contaminantes polares solúveis, produtos de envelhecimento ou colóides no óleo. Um fator de potência elevado ou valores baixos de resistividades significa deterioração e / ou contaminação do óleo. Há geralmente uma relação entre o fator de perdas dielétricas e a resistividade, com a resistividade decrescendo à medida que o fator de perdas dielétricas aumenta. Geralmente, não é necessário realizar ambos os ensaios no mesmo óleo e na maioria das vezes o fator de perdas dielétricas é o ensaio mais utilizado. A resistividade e o fator de perdas dielétricas são dependentes da

temperatura (ABNT, 1991, 2017; WANG; VANDERMAAR; SRIVASTAVA, 2002, SUWANASRI et al. 2009).

2.3.1.7 Densidade

A densidade é usada para identificação do tipo de óleo. A densidade relativa do óleo é definida como a relação entre a massa de determinado volume de óleo e a massa de igual volume de água pura na temperatura de 15 °C. Se o valor da densidade for no máximo 0,860, trata-se de óleo parafínico e se for igual a 0,900, tem-se um óleo naftênico. Não há evidências de que a densidade seja afetada pela deterioração normal do óleo (ABNT, 2013, 2017; CAMPI, 2014).

2.3.1.8 Viscosidade

A viscosidade dinâmica está relacionada à velocidade de fluxo do líquido dielétrico. O óleo de transformador deve ter baixa viscosidade, de modo que ofereça menos resistência ao fluxo convencional de óleo, não afetando, portanto, o resfriamento do transformador. O envelhecimento e a oxidação normal do óleo não afetam de maneira significativa a sua viscosidade. A viscosidade cinemática (relação entre a viscosidade dinâmica pela densidade) faz parte dos ensaios investigativos, e apesar de não ser essencial, pode ser utilizada para estabelecer identificação do tipo de óleo (ABNT, 2017; ELETRIAL4U, 2019).

2.3.2 Análise de gases dissolvidos

A análise da evolução dos gases dissolvidos em óleo (do inglês *Dissolved Gas Analysis* - DGA) é a técnica mais utilizada para monitorar o desempenho de transformadores de potência (COURDEC; BOURASSA; MUIRAS, 1996; YANG; HUANG, 1998; DUVAL, 2002) e outros equipamentos elétricos que contenham óleo. Utilizando a DGA, é possível avaliar a condição de operação do isolamento do equipamento uma vez que esta técnica é capaz de identificar vários tipos de gases, permitindo com isso diagnosticar diferentes tipos de falhas. A formação de gases pode ocorrer devido ao processo de envelhecimento natural e/ou como resultado de falha no equipamento, mesmo que ainda esteja na fase incipiente (MARQUES et al., 2013). Dessa forma a DGA pode ser empregada para detectar falhas em estágios iniciais (LAPWORTH, 2002).

A descoberta de falhas incipientes na isolação óleo/papel pelo método de DGA é fundamentado no fato de que a quebra da isolação líquida e sólida, sob condições térmicas e elétricas anormais, fornece uma variedade de substâncias voláteis e não voláteis resultantes da degradação do material isolante, que podem evoluir a falhas nos equipamentos (COURDEC; BOURASSA; MUIRAS, 1996).

Os gases recorrentes de uma falha são produzidos pela deterioração do óleo do transformador e dos materiais isolantes tais como o papel e o papelão de isolação do núcleo. A taxa da degradação da celulose e do óleo aumenta significativamente com a presença de uma falha dentro do transformador. Os gases mais comumente encontrados no óleo de transformadores estão agrupados em: Hidrogênio (H_2) e Hidrocarbonetos, como por exemplo: metano (CH_4), etano (C_2H_6), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2), óxidos de carbono como o monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2) também podem estar presentes, bem como gases ditos normais, ou seja, não oriundos de faltas (nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2)). As causas do surgimento dos gases de falha, normalmente, são classificadas em três categorias: efeito Corona ou descargas parciais, aquecimento e arco elétrico (SAHA, 2003a).

Geralmente, a DGA é realizada através de cromatografia em fase gasosa, método tradicional, a qual fornece resultados admissíveis. A análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo é feita em três etapas: a amostragem do óleo, a extração dos gases da amostra de óleo e a análise dos gases extraídos da amostra no cromatógrafo de gases, responsável pela identificação e quantificação de cada gás dissolvido no óleo (ABNT, 2006; MILASCH, 1984).

Após o estudo da taxa de evolução de cada gás, deve ser realizada uma análise mais criteriosa dos dados obtidos, primeiramente levando em conta as relações de gases encontrados, onde são estabelecidas faixas de valores prováveis para a ocorrência de determinados tipos de falha. Em seguida a análise deve levar em conta a formação do gás mais significativo para aquele tipo de falha, também chamado de gás chave (MORAIS, 2004). Há diversos métodos para realizar o diagnóstico de falhas incipientes no óleo de transformadores, a partir das relações entre os gases encontrados na detecção. Como métodos mais convencionais disponíveis na literatura e reconhecido mundialmente destacam-se os métodos que utilizam relações de concentrações de gases, como o método de Rogers (1975), o método de Doernenburg (IEEE, 1991), o método previsto na NBR 7274 (ABNT, 2012), e o método de Duval (1989), que leva em consideração apenas a concentração percentual relativa dos gases.

A seguir são relacionados os métodos de DGA e os diagnósticos de falhas para cada um deles:

- Método de Rogers utiliza as relações CH_4/H_2 , C_2H_6/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 e C_2H_2/C_2H_4 e é capaz de detectar: nenhuma falha (deterioração normal); descargas parciais de alta e baixa densidade de energia; descargas de baixa energia (arco sem potência e centelhamento contínuo); descargas de alta energia (arco com potência); sobreaquecimento do condutor isolado e falhas térmicas baixa ($T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), média ($100\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 150\text{ }^{\circ}\text{C}$), sobreaquecimento do cobre por correntes parasitas ($150\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 300\text{ }^{\circ}\text{C}$) e maus contatos por formação de carbono pirolítico de correntes no núcleo e/ou no tanque ($300\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ROGERS, 1975).
- Método de Doernenburg baseia-se nas relações CH_4/H_2 , C_2H_2/C_2H_4 , C_2H_6/C_2H_2 e C_2H_2/CH_4 e é capaz de identificar três tipos de falhas: superaquecimento local (pontos quentes), descargas parciais e outros tipos de descargas (falhas elétricas) (IEEE, 1991).
- Método da norma NBR 7274 é baseado nas relações C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 e C_2H_4/C_2H_6 e utiliza duas tabelas para realizar o diagnóstico da amostra em análise. Os diagnósticos são: sem defeito; descargas parciais de pequena e alta densidade de energia; descargas parciais de energia reduzida; descargas de alta energia; sobreaquecimentos ($150 < T < 300$) $^{\circ}\text{C}$, ($300 < T < 700$) $^{\circ}\text{C}$ e ($T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) (ABNT, 2012).
- Método de Duval apenas analisa a concentração percentual relativa dos gases metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2) e permite identificar três falhas de origem elétrica e três falhas de origem térmica. Os códigos apresentados no triângulo representam uma condição de falha, são eles: A: descargas de alta energia; B: descargas de baixa energia; C: descargas parciais; D: falha térmica, $T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; E: falha térmica, ($200 < T < 400$) $^{\circ}\text{C}$; F: falha térmica, $T > 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ (DUVAL, 1989).

2.3.3 Análise acústica

Uma outra técnica que pode ser aplicada no diagnóstico da qualidade do óleo mineral isolante é a análise acústica que é um método baseado na propagação de ondas acústicas, comumente conhecido como método de emissão acústica (AE). Esta técnica sensível emprega sensores acústicos para detectar ondas acústicas (contínuas ou pulsadas) que são transferidas

para o meio. As ondas acústicas são então monitoradas de acordo com parâmetros acústicos como velocidade de propagação, atenuação e impedância acústica e estes parâmetros podem ser relacionados com algumas propriedades físicas do meio, tais como densidade, viscosidade e elasticidade (FRANCO GUZMÁN, 2010). Uma das vantagens dessa técnica é que ela pode ser usada para avaliar de forma indireta variáveis de processos industriais e de pesquisa de forma não destrutivas, com possibilidade de aplicações não invasivas e em linha (HIGUTI; FURUKAWA; ADAMOWSKI, 2001). A seguir são descritos alguns conceitos e parâmetros utilizados na análise acústica.

2.3.3.1 Ondas acústicas

Ondas acústicas são perturbações de tensão mecânica que podem se propagar em meios gasoso, líquido ou sólido (FRANCO GUZMÁN, 2010). De maneira geral, as ondas acústicas propagam-se mais facilmente nos sólidos do que nos líquidos, e estes, melhor do que os gases.

Uma onda acústica pode ser classificada como progressiva ou estacionária. Na onda progressiva todas as partículas do meio contidas na direção da onda oscilam entre os máximos e os mínimos de deslocamento da mesma. Já as ondas estacionárias são formadas pela superposição de duas ou mais ondas, que se propagam em sentidos opostos e que possuem os mesmos valores de amplitude, frequência, comprimento de onda e velocidade. Normalmente, as ondas estacionárias são confinadas entre um transdutor e um refletor, a onda emitida pelo transdutor é refletida pelo refletor, esta sofre múltiplas reflexões gerando assim uma onda estacionária entre ambos (RAMOS, 2017).

Na Figura 2.1 é apresentada a representação esquemática de uma onda estacionária, que contém cinco nós, indicados pela letra N, e quatro ventres, indicados pela letra V. O ventre (crista ou vale) corresponde ao ponto que sofre interferência construtiva. Por outro lado, o nó ou nodo da onda corresponde ao ponto que sofre interferência destrutiva. A distância entre dois nós ou dois ventres consecutivos é igual a meio comprimento de onda ($\lambda/2$), já a distância entre um ventre e um nó consecutivo é igual a um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$) (RAMOS, 2017). O comprimento de onda, λ , é definido como sendo a velocidade de propagação da onda dividida pela frequência ($\lambda = c/f$).

Figura 2.1 – Representação esquemática de uma onda estacionária.

Fonte: Ramos (2017).

As ondas acústicas podem se propagar em diversas frequências. Na escala sonora, ondas acústicas emitidas em frequências menores que 20 Hz são caracterizadas como infrassônicas, já as ondas acústicas produzidas em frequências maiores que 20 kHz são denominadas ondas ultrassônicas e a faixa de frequência entre 20 Hz e 20 kHz corresponde ao intervalo de audição humano.

2.3.3.2 Impedância acústica

A impedância acústica (Z) é a resistência oferecida por sistemas à propagação de ondas sonoras e está relacionada à densidade e à velocidade de propagação através da relação:

$$Z = \rho c, \quad (2.1)$$

em que, ρ é a densidade do líquido e c é a velocidade de propagação (ASHER, 1987; HALE, 1988).

A velocidade de propagação é calculada a partir da medição do tempo de trânsito de um pulso ultrassônico ao longo de uma distância conhecida. Enquanto que a impedância acústica pode ser calculada a partir da medição do coeficiente de reflexão do som na interface de um material com impedância acústica conhecida (material de referência) e o líquido desconhecido (PUTTMER, HAUPTMANN, HENNING, 2000). As diferentes impedâncias acústicas em uma interface entre dois meios controlam as quantidades relativas das ondas ultrassônicas refletidas e transmitidas através dessa interface (ASHER, 1987).

2.3.3.3 Velocidade de propagação e atenuação

A espectrometria acústica é uma poderosa técnica para estudar processos químicos e físicos elementares em líquidos. Ela é empregada na caracterização de materiais relacionando alguma propriedade destes com a atenuação ou velocidade de propagação em função da frequência. Para isso, podem ser utilizados métodos de onda contínua, também denominado de ressonância ou ondas pulsadas (EGGERS; KAATZE, 1996; McCLEMENTS; FAIRLEY, 1991).

O método de ressonância, consiste em um ressoador e dois transdutores. O ressoador possui uma cavidade, normalmente cilíndrica, que é preenchida pelo líquido a ser estudado. Um transdutor opera como transmissor e o outro como receptor, e são posicionados de modo a fechar o cilindro. A excitação com onda contínua ocorre e a ressonância do conjunto é medida. Destas medidas obtém-se o fator de mérito Q , que é definido como a relação entre a frequência de ressonância e a largura de banda B de -3 dB, ou também igual a 2π vezes a energia armazenada dividido pela energia dissipada por ciclo. O valor de Q é relacionado com o coeficiente de atenuação (α) e com a velocidade de propagação (c) na frequência de ressonância por meio da Equação 2.2.

$$Q = \frac{\pi}{\lambda\alpha} = \pi \frac{B}{c} \quad (2.2)$$

Em que λ é o comprimento de onda na ressonância (KAATZE; WEHRMANN; POTTEL, 1987). Este método trabalha em frequências menores que 10 MHz, e é mais utilizado em aplicações onde a atenuação na amostra é baixa (EGGERS; KAATZE, 1996).

Os métodos pulsados são aplicados na faixa de frequência entre 1 MHz e 10GHz. Atualmente este método tem sido mais aplicado devido a natureza dos ensaios não destrutivos por ultrassom, à sua simplicidade e rapidez. No método pulsado podem ser utilizados um ou dois transdutores. Quando se faz o uso de apenas um transdutor, este opera no modo pulso eco utilizando um refletor sólido (McCLEMENTS; FAIRLEY, 1991). Quando se utiliza dois transdutores, no caso da maioria dos espectrômetros, um transdutor opera como transmissor e o outro como receptor (KAATZE; WEHRMANN; POTTEL, 1987; CHALLIS et al., 1991; KAATZE et al., 1993; KUSKIBIKI, et al., 1995).

As linhas de atraso possuem duas funções: a primeira é separar os transdutores da amostra, e a segunda é separar, no domínio do tempo, os sinais acústicos de interferência eletromagnética quando se tem amostras de espessura fina. Dependendo da disposição do

transmissor e do receptor, a linha de atraso também tem a função de separar esses dois elementos (EGGERS; KAATZE, 1996).

A Figura 2.2, apresenta o método pulsado com duas opções: a primeira (a) com um transdutor operando no modo pulso eco, e a segunda (b) com dois transdutores, um operando como transmissor e o outro como receptor. Em ambos os casos é possível ter um acoplamento direto ou utilizar uma linha de atraso entre o transdutor e a amostra.

Figura 2.2 – Medição de atraso de tempo pelo método pulsado: (a) pulso eco (b) transmissão – recepção.

Fonte: Adamowski et al. [201-?].

A partir do atraso de tempo (Δt), é possível obter, nos dois casos da Figura 2.2, a velocidade de propagação no material c , ou a espessura d :

$$d = \frac{c\Delta t}{2}. \quad (2.3)$$

A atenuação (α) é obtida através da relação entre as amplitudes das múltiplas reflexões dentro do material, por meio da Equação 2.4 (ADAMOWSKI et al., [201-?]).

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x}. \quad (2.4)$$

Para garantir a consistência dos resultados, durante as medições, a temperatura da amostra deve permanecer constante. Como a velocidade e a atenuação são parâmetros altamente dependentes da temperatura, com a variação desta, podem ocorrer pequenas mudanças na velocidade e na atenuação, tornando os resultados incoerentes (ASHER, 1987; HALE, 1988; McCLEMENTS; FAIRLEY, 1991).

2.3.3.4 Coeficiente de reflexão e densidade

O método ultrassônico mais utilizado para medir a densidade em líquidos baseia-se na medição do coeficiente de reflexão na interface entre um material de referência e a amostra do líquido (PAPADAKIS, 1968). São descritas duas formas de se obter o coeficiente de reflexão: o método da reflexão relativa e o método de múltiplas reflexões.

No método da reflexão relativa há a necessidade de uma calibração com uma reflexão com o ar. Considera-se o esquema da Figura 2.3, onde se tem um transdutor operando como transmissor (Tx) e receptor (Rx), acoplado a uma linha de atraso (referência), que por sua vez está em contato com a amostra (ar ou líquido, por exemplo) que se deseja medir, e um refletor.

Figura 2.3 – Princípio para medição da densidade pelo método da reflexão relativa.

Fonte: Adaptado de McClements e Fairley (1991).

O transdutor gera um pulso de ultrassom que se desloca ao longo da linha de atraso (referência) até atingir a interface referência-amostra, onde é parcialmente refletido e parcialmente transmitido. A porção transmitida viaja através da amostra e é refletida na interface amostra-refletor. Os pulsos refletidos de ambas as interfaces voltam ao transdutor, onde são detectados. A impedância da amostra é determinada medindo a amplitude do impulso refletido a partir da interface refletor-amostra. A velocidade é determinada pela medição da diferença de tempo entre este eco e o eco refletido a partir da interface amostra-refletor, enquanto que o coeficiente de atenuação é determinado medindo a amplitude destes dois ecos (McCLEMENTS; FAIRLEY, 1991).

Para calcular o coeficiente de reflexão, as amplitudes do sinal que atinge a interface linha-amostra e a amplitude do sinal que atinge a interface amostra-refletor devem ser determinadas. Considerando inicialmente o ar como amostra, o coeficiente de reflexão na interface referência-ar (R_{ar}) é praticamente igual a -1 (Equação 2.5).

$$R_{ar} = \frac{A_{R1ar}}{A_0} \cong -1 \quad (2.5)$$

Em que A_0 é a amplitude do sinal que atinge a interface entre a referência e o ar e A_{R1ar} é a amplitude do sinal refletido nessa mesma interface (McCLEMENTS; FAIRLEY, 1991).

Substituindo o ar por um líquido, tem-se o coeficiente de reflexão na interface referência-líquido (R_{liq}), dado pela Equação (2.6).

$$R_{liq} = \frac{A_{R1liq}}{A_0} \cong -\frac{A_{1liq}}{A_{1ar}} \quad (2.6)$$

Em que, A_{R1liq} é a amplitude do sinal refletido na interface referência-líquido, A_{1liq} e A_{1ar} são as amplitudes dos sinais refletidos medidos pelo transdutor quando a amostra é o líquido e o ar, respectivamente.

Considerando a propagação de ondas planas incidindo perpendicularmente em uma interface entre dois meios com impedâncias acústicas diferentes, o coeficiente de reflexão na interface (R_{12}) é dado por:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2.7)$$

em que, Z_1 e Z_2 são as impedâncias acústicas dos meios 1 e 2, respectivamente. A densidade do líquido é obtida a partir da expressão do coeficiente de reflexão. Conhecendo a densidade (ρ_1) e a velocidade (c_1) no material de referência (meio 1), e a velocidade de propagação no líquido (c_2), no meio 2, que pode ser obtida utilizando-se os ecos A_1 e A_2 , a densidade do líquido é calculada a partir da Equação 2.8 (ADAMOWSKI et al., 1995).

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 c_1}{c_2} \frac{1 + R_{12}}{1 - R_{12}} \quad (2.8)$$

Em geral a impedância do líquido é menor que a impedância do material de referência, e R_{12} é negativo. Este método apresenta dois problemas: o primeiro é a necessidade de se realizar a medida com ar, e o segundo é a instabilidade na eletrônica que pode alterar a amplitude do sinal transmitido A_0 (assumindo constante nessa análise) entre a calibração com ar e a medida com o líquido, e perdas por difração acústica (ADAMOWSKI et al., [201-?]).

A outra maneira para calcular o coeficiente de reflexão é utilizando o método de múltiplas reflexões. Neste método, não há necessidade de calibração e assim como no método da reflexão relativa, faz uso de linha de retardo entre o transdutor e a amostra, cujas propriedades são medidas (HIGUTI; ADAMOWSKI, 2002; BJØRNDAL; FROYSA, 2008; HOCHÉ; HUSSEIN; BECKER, 2013, 2015). Na Figura 2.4 é apresentado o método de múltiplas reflexões.

Figura 2.4 – Método das múltiplas reflexões.

Fonte: Adaptado de Adamowski et al. [201-?].

A amostra do material em estudo fica entre a linha de retardo e um meio refletor que possua impedância acústica muito diferente da amostra. O transdutor emite um pulso ou trem de pulsos com amplitude A_i que se propaga pela linha de retardo (meio 1). Quando este pulso encontra-se com a interface da amostra (meio 2), uma parte deste é transmitida e outra é refletida em direção ao transdutor, com amplitude A_0 . A parte transmitida se propaga pela amostra e é refletida pelo refletor (meio 3) e volta para a interface amostra-linha de retardo, sendo que parte é transmitida e captada pelo transdutor, com amplitude A_1 , e parte é refletida e se propaga na amostra até atingir o refletor, sendo que parte deste eco chegará ao transdutor com amplitude A_2 (ADAMOWSKI et al., [201-?]). A Figura 2.5 apresenta os sinais recebidos no método de múltiplas reflexões, com excitação pulsada.

Figura 2.5 – Sinais obtidos no método de múltiplas reflexões.

Fonte: Adamowski et al. [201-?].

Para que sejam obtidas amplitudes com valores da mesma ordem de grandeza, aumentando assim a sensibilidade das medições, é desejável que o material da linha de retardo tenha um baixo coeficiente de atenuação, e que sua impedância acústica não seja muito diferente da amostra. Os valores das amplitudes pico a pico A_0 , A_1 e A_2 (Figura 2.5) devem ser acompanhados dos respectivos sinais, de acordo com a fase do eco recebido. Na configuração da Figura 2.4, a onda refletida na interface entre a linha de retardo e a amostra, que tem amplitude A_0 , está em oposição de fase à onda incidente A_i . As fases estão representadas pelos sinais (+) e (-). Assim, o produto A_0A_2 sempre terá sinal negativo (ADAMOWSKI et al., [201-?]).

O coeficiente de atenuação de uma amostra pode ser determinado medindo-se a amplitude dos ecos transmitidos e refletidos. As Equações 2.9, 2.10 e 2.11 relacionam as amplitudes dos ecos com a amplitude incidente, através dos coeficientes de reflexão, transmissão e atenuação. O material da linha de retardo tem coeficiente de atenuação α_1 , e o da amostra tem coeficiente de atenuação α_2 (McCLEMENTS; FAIRLEY, 1991).

$$A_0 = A_i R_{12} e^{-2\alpha_1 l} \quad (2.9)$$

$$A_1 = A_i T_{12} R_{23} T_{21} e^{-2\alpha_1 l} e^{-2\alpha_2 L} \quad (2.10)$$

$$A_2 = A_i R_{21} T_{12} R_{23} R_{23} T_{21} e^{-2\alpha_1 l} e^{-4\alpha_2 L} \quad (2.11)$$

Em que,

R_{mm} é o coeficiente de reflexão da onda se propagando no meio m ao atingir o meio n ;

T_{mm} é o coeficiente de transmissão da onda do meio m para o meio n ;

l é a distância percorrida na linha de retardo;

L é a distância percorrida na amostra.

Considerando $R = R_{12}$ chega-se à seguinte relação:

$$\frac{R^2}{(1 - R^2)} = -\frac{A_0 A_2}{A_1 A_i}, \quad (2.12)$$

o coeficiente de atenuação na amostra é determinado pela Equação 2.13. Para se obter α_2 é necessário calcular R e R_{23} através das impedâncias acústicas da linha de retardo, da amostra e do meio refletor (ADAMOWSKI et al., [201-?]), pela relação:

$$\alpha_2 = \frac{\ln(-R R_{23} \frac{A_1}{A_2})}{2L}. \quad (2.13)$$

2.4 Sensores piezoelétricos

Conforme já apresentado, a análise acústica faz uso de transdutores para adquirir os parâmetros necessários para caracterização de líquidos. As ondas acústicas podem ser produzidas e detectadas por materiais piezoelétricos, que são cada vez mais populares e podem ser usados como atuadores e sensores. Portanto, os métodos acústicos têm usado transdutores piezoelétricos em muitas áreas de pesquisa, por exemplo, na medicina para aplicações em imagens médicas (SHUNG; CANNATA, 2007; ULIANA et al., 2018), a engenharia elétrica usa sensores piezoelétricos para detectar e em alguns casos localizar descargas parciais (PALITÓ et al., 2014; FERREIRA et al., 2017) e a indústria de água usa acelerômetros piezoelétricos para a otimização da medição da vazão (MEDEIROS et al., 2016).

Assim exposto, há uma necessidade em se compreender o funcionamento destes transdutores. Para tal, os tópicos a seguir fazem um levantamento histórico e apresentam alguns conceitos relacionados a piezoeletricidade, aos eletretos, e aos piezoeletretos. Adicionalmente é apresentado o processo de fabricação do piezoeletreto termoformado utilizado nessa pesquisa.

2.4.1 Piezoeletricidade

Gerhard-Multhaupt (2002) 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 estruturas cristalinas, que 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 alterado 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, em que uma excitação elétrica provoca uma resposta mecânica (BALLATO, 1996; BASSO et al., 2006; KRESSMANN, 2001). A Figura 2.6 apresenta um esquemático de como ocorre o efeito piezoelétrico.

Figura 2.6 – Efeito piezoelétrico: (a) direto (b) inverso.

Fonte: Falconi (2010).

A primeira aplicação do efeito piezoelétrico, o sonar, foi desenvolvida por Paul Langevin durante a Primeira Guerra Mundial para detectar submarinos. No final da Segunda Guerra Mundial, o efeito piezoelétrico foi observado em cerâmicas piezoelétricas e ferroelétricas, estas últimas apresentando propriedades piezoelétricas superiores aos 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 piezoelétrico (FUKADA, 2000; FURUKAWA, 1989; RICHARDSON, 1989). Esses resultados incentivaram as pesquisas da piezoelectricidade em polímeros e em 1969 Kawai descreveu um trabalho constatando que filmes de PVDF polarizados também poderiam atuar como materiais piezoelétricos (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).

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 piezoelétrica (PZT) misturadas a uma base polimérica de PVDF (FEDOSOV; SEGGERN, 2008; FURUKAWA, 1989).

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).

2.4.2 Eletreto

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 (HILCZER; MALECKI, 1986).

Os primeiros eletretos foram produzidos por Mototaro Eguchi, utilizando uma mistura de cera de carnaúba e cera de abelha através do método térmico². Avanços nas pesquisas relacionadas aos eletretos proporcionaram a descoberta de 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; FALCONI et al., 2010; ASSAGRA, 2013). Esses novos materiais viabilizaram comercialmente uma das mais importantes aplicações dos eletretos, o microfone de eletreto (GERHARD-MULTHAUPT, 2002; GOEL, 2003).

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; MOTYL, 1994; WADA; HAYAKAWA, 1976). No entanto, testes experimentais realizados na época com estes polímeros polarizados não demonstraram fortes propriedades eletromecânicas, fato que enfraqueceu as pesquisas (QIU, 2010).

Posteriormente, 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).

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

Diferentemente dos eletretos formados por filmes rígidos, a estrutura porosa desses filmes poliméricos, como mostrado na Figura 2.7, 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.

Figura 2.7 – Imagens microscópicas de filmes celulares: (a) polipropileno (PP) (b) politereftalato de etilenglicol (PETP).

Fonte: Hillenbrand et al. (2003).

Os macros 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.

Exemplos bem-sucedidos de substâncias onde as cargas elétricas podem ser aprisionadas em armadilhas devido, principalmente, a sua estrutura molecular anisotrópica são os materiais amorfos, policristalinos e substâncias parcialmente cristalinas. O Teflon FEP® é um exemplo de material com essa propriedade, cujas estruturas microscópicas retêm principalmente cargas negativas 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 et al., 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 2.8.

Figura 2.8 – 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).

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).

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.

2.4.3 Piezoeletreto

O método de fabricação de piezoeletretos de polipropileno (PP) citado em Bauer, Gerhard-Multhaupt e Sessler (2004) 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 10 µm de diâmetro são formadas em torno das inclusões. 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 2.9a (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 2.9b (SESSLER; HILLENBRAND, 1999).

Figura 2.9 – (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 e Hillenbrand (1999).

A estrutura passa a exibir propriedades piezoelétricas após o carregamento elétrico. Posteriormente a metalização das superfícies externas do material, o filme eletromecânico está apto a aplicações como transdutor. Conforme demonstrado na Figura 2.9b, 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).

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 piezoeletricidade, fazendo uma analogia ao coeficiente piezoelétrico utilizados nos cristais e cerâmicas (BAUER et al., 2003; ZHANG et al., 2005).

2.4.3.1 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. Os atuais processos de fabricação dos piezoeletretos termoformados, permitem 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).

Os ferroeletretos, particularmente com canal tubular aberto, são flexíveis como PVDF e apresentam coeficiente piezelétrico na mesma ordem de grandeza que o PZT, com a vantagem no controle da frequência de ressonância pela mudança da geometria dos canais. Mudanças na largura e altura dos canais tubulares desses sensores piezoelétricos modificam sua resposta em frequência (ALTAFIM et al., 2012).

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 Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim (ALTAFIM et al., 2005). Várias pesquisas foram desenvolvidas nesse âmbito e proporcionaram diversas maneiras de se fabricar piezoeletretos termoformados, cada um apresentando suas vantagens e limitações (ALTAFIM, et al. 2003; 2005; 2006; ZHANG; HILLENBRAND; SESSLER, 2007; ALTAFIM, et al., 2008; 2009; FALCONI et al., 2010; 2011; ASSAGRA et al., 2013). Estas pesquisas proporcionaram o avanço dos elevados coeficientes piezoelétricos aliados a uma maior estabilidade térmica e 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 (MEDEIROS, 2014).

O processo de fabricação do piezoeletreto termoformado utilizado neste trabalho foi desenvolvido em 2009, por Altafim e colaboradores. Este processo descreve 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 mm^2) vazado por retângulos paralelos (de área 1,5 a 30 mm^2), 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 2.10 e a composição da estrutura polimérica com canais tubulares fundidos pode ser vista na Figura 2.11 (ALTAFIM et al., 2009).

Figura 2.10 – Esquema do procedimento de fabricação em laboratório de piezoeletretos com estruturas padronizadas em canaletas.

Fonte: Altafim et al. (2009).

Figura 2.11 – 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 aproximadamente 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).

Medidas realizadas por De Medeiros et al. (2015) em aplicações subaquáticas demonstraram que esse tipo de sensor pode detectar sinais de até 80kHz. Além disso, também foi demonstrado que este tipo de sensor apresenta uma resposta muito melhor no modo de direção, por exemplo, se a fonte acústica é colocada diretamente na frente do sensor. No entanto, ainda é possível detectar sons laterais sem sensibilidade significativa quando comparados com sua direção ortogonal.

2.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma revisão bibliográfica acerca de alguns métodos para análise de óleo mineral isolante, assim como a história e os conceitos relacionados aos eletretos, piezoeletricidade e piezoeletretos. Deu-se especial destaque à técnica de fabricação de piezoeletretos termoformados, sendo estes, utilizados nesse trabalho. O próximo capítulo apresenta o transdutor piezoelétrico utilizado.

Capítulo 3

Transdutor Piezoelétrico

3.1 Considerações iniciais

Neste trabalho, inicialmente foi utilizado o protótipo do transdutor piezoelétrico desenvolvido por Medeiros (2014), nomeado de Protótipo 1. Em uma segunda fase, foram realizadas algumas modificações no Protótipo 1 adequando-o para a análise de óleos de transformadores. Este protótipo foi aqui denominado de Protótipo 2. Eles são mais bem apresentados e detalhados neste capítulo.

3.2 Protótipo 1

O protótipo 1 do transdutor piezoelétrico, como já mencionado, foi desenvolvido por Medeiros (2014) no Grupo de Alta Tensão e Materiais (Gatm) da Escola de Engenharia de São Carlos – EESC / USP e, ali, ele tem sido um elemento essencial em inúmeras pesquisas, dentre elas: o hidrofone (DE MEDEIROS, 2015) e a detecção de descargas parciais (GUTNIK et al., 2012; PALITÓ et al., 2014; DOS REIS, 2014; FERREIRA et al., 2017). Os principais elementos que compõem este protótipo consistem em um invólucro metálico, um circuito eletrônico de pré-amplificação e um piezoeletreto. Esses elementos são mais bem descritos nos itens subsequentes.

3.2.1 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, consequentemente, 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 e as fotos, do projeto do invólucro metálico do protótipo 1 podem ser observados na Figura 3.1 e o protótipo final pode ser visto com maiores detalhes na Figura 3.2.

Figura 3.1 – Protótipo 1: projeto do invólucro metálico, (a) representação esquemática e fotos da (b) frente e (c) de trás.

Fonte: Adaptado de Medeiros (2014).

Figura 3.2 – Projeto do transdutor piezoelétrico e compartimento de interface e baterias.

Fonte: Adaptado de Medeiros (2014).

3.2.2 Piezoeletreto

Piezoeletretos são filmes poliméricos finos com cavidades de ar abertas ou fechadas que são eletricamente carregadas com polaridades opostas. Esta característica única permite que os filmes porosos se comportem como materiais piezoelétricos com a vantagem de serem altamente flexíveis e facilmente processados (QIU, 2010).

O piezoeletreto que compõe o transdutor é resultante da tecnologia dos piezoeletretos termoformados, o mesmo foi produzido com filmes de etileno-propileno fluorado (FEP) e com canais tubulares abertos. Essa tecnologia foi escolhida devido a resultados prévios que mostraram uma piezoeletricidade estável de 160 pC/N, a 80 °C (ALTAFIM et al., 2009).

Os princípios de operação do piezoeletreto e seu processo de fabricação estão bem descritos em Altafim et al. (2009) e consistiram na laminação de dois filmes FEP de 50µm a 300 °C com um molde de politetrafluoretileno (PTFE) de 100µm entre eles. O molde foi projetado para criar um piezoeletreto com canais tubulares abertos igualmente espaçados (1,5 mm de largura e 100 µm de altura). As películas foram cuidadosamente limpas com acetona antes da laminação para evitar partículas de gordura ou pó. Após a laminação, o molde de PTFE foi removido das camadas FEP fundidas, formando uma estrutura polimérica de duas camadas com 10 canais abertos. 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, 2009). A Figura 3.3 (a) apresenta uma vista superior de um piezoeletreto formado por esse processo e a (b) o desenho esquemático da seção transversal das canaletas tubulares.

Figura 3.3 – (a) Piezoeletreto de FEP laminado com canal tubular aberto (vista superior); (b) Desenho esquemático de uma vista em seção transversal dos canais abertos.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2019a).

3.2.3 Circuito de pré-amplificação

Dentro do invólucro metálico, foi montado um circuito eletrônico composto por um pré-amplificador, um filtro passa-alta e um amplificador diferencial. O estágio de pré-amplificação foi adicionado para fornecer um melhor casamento de impedância entre o sensor piezoelétrico e a entrada do circuito integrado INA129P que implementa o amplificador diferencial. Como mostrado na Figura 3.4, o pré-amplificador consiste em um arranjo em torno de um transistor BF245A, transistor de efeito de campo de junção tipo J (JFET), configurado em auto polarização. Este circuito foi projetado para fornecer as tensões de saída V_0^+ and V_0^- (Figura 3.4), que são duas versões amplificadas da tensão de entrada V_{in} . Este circuito combina um amplificador de dreno comum e um amplificador de fonte comum com fonte de geração resistiva. Portanto, as tensões V_0^+ and V_0^- são respectivamente:

$$V_0^+ = + \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} V_{in} \quad (3.1)$$

$$V_0^- = - \frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s} V_{in} \quad (3.2)$$

Em que g_m é a transcondutância do JFET para a tensão de polarização $V_{BIAS} = 0V$. As variáveis R_d e R_s representam respectivamente as resistências conectadas ao dreno e à fonte do JFET. Assim, a tensão diferencial do pré-amplificador é:

$$\Delta V_{pre} = V_0^- - V_0^+ = - \frac{g_m}{1 + g_m R_s} (R_d + R_s) V_{in} \quad (3.3)$$

desde que $R = R_s = R_d = 3,9k\Omega$, a tensão diferencial na saída do pré-amplificador resulta em:

$$\Delta V_{pre} = V_0^- - V_0^+ = - \frac{2g_m R}{1 + g_m R} V_{in} = \frac{7800 g_m}{1 + 3900 g_m} V_{in}. \quad (3.4)$$

Os cálculos apresentam um ganho ($G_{pre} = \Delta V_{pre}/V_{in}$) de 1,6.

O filtro passa-alta foi adicionado após o pré-amplificador para eliminar os componentes CC de V_0^+ and V_0^- e simultaneamente filtrar espectralmente as componentes de baixa frequência, pois sua presença pode saturar o amplificador diferencial localizado após o pré-amplificador. O filtro passa-alta é de primeira ordem com função de transferência de acordo com:

$$H\left(j \frac{f}{f_0}\right) = \frac{j \left(\frac{f}{f_0}\right)}{1 + j \left(\frac{f}{f_0}\right)} \quad (3.5)$$

onde $f_0 = 1/2\pi R_2 C$ é a frequência de corte mais baixa.

O amplificador de instrumentação modelo INA129P serve para dois propósitos: primeiro, converte a tensão ΔV_{pre}^* (versão filtrada de ΔV_{pre}) da forma diferencial para uma tensão V_{out} com forma de terminação única; e segundo, para fornecer um ganho adicional G_{IA} . Este circuito integrado (CI) apresenta características de baixo ruído ($10\text{nV}/(\text{Hz})^{1/2}$) e uma resposta de frequência plana (amplificação constante) até 500kHz devido ao ganho usado (10 vezes o sinal de entrada). O ganho G_{IA} do INA129P pode ser programado usando um resistor externo R_G (k Ω) entre os terminais G_{S1} and G_{S2} e é:

$$G_{IA} = 1 + \frac{49,4}{R_G} \quad (3.6)$$

O circuito eletrônico está esquematicamente representado na Figura 3.4, onde são considerados dois estágios eletrônicos de amplificação separados por um filtro passa-alta, proporcionando um ganho final de aproximadamente 24dB, no qual o pré-amplificador é responsável por um ganho de 1,6 vezes (4,08dB) e o amplificador de instrumentação por um ganho de 9,82 vezes (19,84 dB). Para reduzir o ruído externo, duas baterias de 9 V foram usadas na alimentação do circuito.

Figura 3.4 – Esquema do circuito eletrônico e respectivos blocos.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2019a).

Na Figura 3.4, os componentes são: diodo 1N4148 (*D*), JFET BF245A (*J*), INA129P (*IA*), $R_1 = 1M\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$, $R_3 = 10k\Omega$, $R_s = R_d = 3,9k\Omega$, $R_G = 5,6k\Omega$ e $C = 100nF$. Os pinos G_{S1} e G_{S2} de *IA* são para fins de configuração de ganho.

3.3 Protótipo 2

O Protótipo 2 consiste em um aperfeiçoamento do Protótipo 1 para fins de aplicações em líquidos. Este protótipo também é formado por um invólucro metálico, um circuito eletrônico de pré-amplificação e um piezoeletreto. Este protótipo foi desenvolvido durante esta pesquisa afim de eliminar os vazamentos que eram originados entre o anel de selagem da estrutura e os eletrodos anelares do Protótipo 1. Assim, um novo projeto do involucro metálico foi estudado e este é apresentado da Figura 3.5.

Figura 3.5 – Protótipo 2: projeto do involucro metálico, vistas em perspectivas: (a) lateral; (b) frontal.

Fonte: Autora (2019).

Conforme pode ser observado na Figura 3.5, neste novo protótipo os elementos que compõem o invólucro metálico são encaixados pela parte de trás do transdutor. Esta nova configuração permite que toda a parte frontal do transdutor possa ficar em contato direto com as amostras dos líquidos. Também, houve a necessidade de substituir o material do eletrodo

anelar de contato com o sensor por um anel de borracha, para garantir que não entrasse líquido na hora dos experimentos. Para proporcionar o contato elétrico com a amostra, este anel de borracha foi metalizado com uma camada em ouro. A Figura 3.6, apresenta fotos do protótipo 2 finalizado.

Figura 3.6 – Fotos do Protótipo 2: involucro metálico, vistas em perspectivas: (a) lateral frontal; (b) e lateral traseira.

Fonte: Autora (2019).

Com base na baixa amplitude dos sinais observadas nos experimentos iniciais desta tese, foi realizada uma troca do resistor $R_G = 5,6 \text{ k}\Omega$ do circuito da Figura 3.4, por um resistor de $1 \text{ k}\Omega$ com a finalidade de aumentar o ganho do amplificador diferencial. Com esta modificação, o amplificador diferencial passou a apresentar um ganho de 50,4 vezes (34,05 dB) e uma resposta em frequência plana até 100 kHz. O circuito completo de amplificação do Protótipo 2 do transdutor piezoelétrico apresenta um ganho final de 38,13 dB. Não houve alteração no processo de fabricação do piezoeletreto utilizado neste protótipo.

3.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou e descreveu em detalhes os dois protótipos do transdutor piezoelétrico que é o elemento fundamental deste trabalho. Vale ressaltar que o Protótipo 2 foi desenvolvido durante este trabalho para fins de aplicações em líquidos. O próximo capítulo apresenta algumas metodologias propostas e os resultados para a análise acústica de óleo mineral isolante.

Capítulo 4

Metodologias propostas e Resultados

4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é apresentado o princípio de funcionamento do método e são descritos os procedimentos experimentais testados em busca de um método eficaz para analisar acusticamente diferentes meios (ar, água e óleo), tendo como elemento transdutor um sensor baseado na tecnologia dos piezoeletretos termoformados.

4.2 Método – princípio de funcionamento

Na Figura 4.2, encontra-se o diagrama de blocos que descreve o método desenvolvido. Ali, o gerador de funções é programado para gerar um sinal senoidal (contínuo, pulsado ou *sweep*), que excita o sensor emissor, fazendo com que este transmita o sinal no interior da câmara acústica que contempla diferentes meios (ar, água ou óleo). O sensor receptor recebe o sinal, e o transmite ao osciloscópio digital. Por fim, os resultados obtidos são armazenados e posteriormente analisados.

Figura 4.1 – Diagrama em blocos da metodologia base empregada.

Fonte: Autora (2019).

Durante esta pesquisa, foram testadas várias configurações diferentes para o método descrito, das quais apenas quatro são aqui apresentados, por terem apresentados os melhores resultados. Adicionalmente também são apresentados e comentados os principais resultados obtidos em cada uma das configurações testadas.

4.3 Configuração 1

A configuração 1 consiste em um sistema eletroacústico desenvolvido para caracterizar diferentes meios (ar, água e óleo). Este sistema encontra-se ilustrado na Figura 4.2, e possui os mesmos elementos da Figura 4.1, ou seja um atuador piezoelétrico (b), uma câmara acústica (c) e um transdutor piezoelétrico (d), além de um gerador de função (a) e um osciloscópio (e). Nesta configuração, o gerador de funções é programado para produzir um sinal senoidal (i) de 10 volts de pico a pico (V_{pp}), que aciona o atuador piezoelétrico fazendo com que este transmita um sinal acústico (ii) através do meio (ar, água ou óleo). O transdutor de piezoeletreto, inserido do outro lado da câmara, converte o sinal acústico em um sinal elétrico (iii), que é amplificado (iv) e medido pelo osciloscópio digital.

Figura 4.2 – Sistema eletroacústico da configuração 1.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2019a).

Atuador Piezoelétrico

O atuador piezoelétrico, ilustrado na Figura 4.3, é composto por discos cerâmicos piezoelétricos aderidos a uma placa metálica de latão ou liga de níquel e revestidos com uma camada de metal. Ao acionar o atuador piezoelétrico com um sinal elétrico fornecido pelo gerador externo, ele pode produzir ondas sonoras com distorção muito baixa, mesmo em altas frequências (faixa de kHz) (MURATA, 2019).

Figura 4.3 – Atuadores piezoelétrico.

Fonte: Murata (2019).

Esses atuadores piezoelétricos são empregadas principalmente em dispositivos eletrônicos - por exemplo, calculadoras, relógios, câmeras digitais e vários alarmes - para gerar sons. No entanto, devido ao seu custo reduzido, essas cerâmicas piezoelétricas têm sido usadas com sucesso como sensores ou atuadores em diversos estudos científicos com uma ampla gama de aplicações (LI; CHEN, 2003; MINAZARA et al., 2006; GOMES, 2011; TINOCO; MARULANDA, 2015). Para este estudo foi utilizado um atuador piezoelétrico de 35mm de diâmetro para gerar ondas acústicas.

Câmara acústica

A câmara acústica, foi projetada no *software* Inventor (com 60 mm de largura, 60 mm de altura e 70 mm de profundidade) e foi confeccionada em acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) utilizando uma impressora 3D. Após a impressão a peça foi usinada para corrigir as rugosidades existentes e para adequação de medidas. O projeto da câmara acústica é ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Protótipo da câmara acústica 1: (a) entrada do atuador; (b) entrada do transdutor; (c) sessão transversal.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2019a).

A Figura 4.4a apresenta uma das extremidades do protótipo, ela é responsável por acomodar uma cerâmica que é excitada pelo gerador de funções. A outra extremidade do protótipo, Figura 4.4b, é responsável pela acomodação do transdutor piezoelétrico, para isso foi utilizado um anel *o-ring* para fazer com que o transdutor entrasse o mais justo possível na peça e para evitar vazamentos. A Figura 4.4c mostra uma vista em sessão transversal do modelo com uma cavidade interna (tubo com diâmetro de 20mm e comprimento de 50mm) e duas entradas de seringas, através das quais foram injetados 20ml de um líquido específico (água ou óleo).

Transdutor Piezoelétrico

Nesta Configuração foi utilizado o protótipo 1 do transdutor piezoelétrico apresentado no Capítulo 3, tópico 3.2. O piezoeletrico utilizado também é descrito no Capítulo 3, subtópico 3.2.2.

4.3.1 Metodologia: configuração 1

Os experimentos descritos a seguir foram realizados na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), especificamente no Laboratório de Alta Tensão e Medidas (LATM). O sistema eletroacústico foi montado de acordo com a representação da Figura 4.5 e os experimentos foram realizados em três diferentes meios: primeiramente o ar, em seguida a água deionizada e por último o óleo de transformador novo (virgem).

Figura 4.5 – Configuração 1: (a) Representação esquemática do sistema; (b) Foto do sistema montado.

Fonte: (a) Adaptado de Palitó et al. (2019a); (b) Autora (2016).

Para investigar a resposta do sistema em cada meio, o atuador piezoelétrico foi estimulado, diretamente, com uma varredura em frequência, produzida em um gerador de funções modelo Tektronik AFG 3022C com 10 Vpp, cobrindo o intervalo de 0 a 50 kHz, linearmente, durante 1 segundo. A onda acústica se propaga pela câmara acústica, é captada pelo transdutor piezoelétrico e registrada em um osciloscópio (Agilent DSO-X 2002A), ajustado com uma janela de tempo de 1 segundo (100 ms/div) e um atraso de 500 ms para que a escala de tempo seja exibida em valores de 0 a 1 segundo. A aquisição dos sinais é feita com 2.000 pontos.

Devido alguns problemas de vazamentos durante a realização de testes prévios nos meios água e óleo, optou-se por fechar o orifício que fica em contato com o sensor piezoelétrico. Para isso, foi utilizada uma fita adesiva transparente, conforme ilustra a Figura 4.6. Assim, foi possível realizar os experimentos sem que houvesse vazamentos e sem danificar o circuito eletrônico do transdutor.

Figura 4.6 – Fechamento do orifício que fica em contato com a amostra do transdutor acústico.

Fonte: Autora (2016).

Após os ajustes, as medições foram realizadas inicialmente no meio ar, foi feita a aquisição de 5 medidas consecutivas. Em seguida, para garantir a reprodutibilidade, o experimento é desmontado, a fita adesiva é retirada e a região de contato com a fita adesiva é limpa com álcool para retirada da cola residual. Posteriormente uma nova fita adesiva é colocada (ver Figura 4.6) e o experimento é montado novamente. Esse processo se repete por cinco vezes, o que resulta em 25 medidas para esse meio.

Nos meios líquidos (água e óleo) o experimento procede-se da mesma forma que no ar. O experimento é montado um uma amostra de 20 ml do líquido estudado é posta no reservatório e aquisição de 5 medidas é realizada. Em seguida o experimento é desmontado, o líquido é retirado e uma limpeza da peça é feita com álcool. Depois disso o experimento é montado

novamente e esse processo se repete por cinco vezes, o que resulta em 25 medidas para cada meio. Os procedimentos de montagem e desmontagem foram adotados não apenas para testar diferentes amostras do mesmo líquido, mas também para verificar a robustez do sistema.

Os experimentos foram realizados em quatro dias distintos. Em cada dia o experimento foi repetido 5 vezes em cada um dos meios. Ao todo foram realizadas 300 medidas de *sweep* sendo 100 medidas para cada meio e divididas como exhibe a ilustração da Figura 4.7.

Figura 4.7 – Ilustração dos procedimentos para aquisição de medidas da configuração 1.

Fonte: Autora (2016).

4.3.2 Resultados: configuração 1

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam amostras dos sinais acústicos detectados pelo transdutor de piezoelétrico, para ar, água e óleo, respectivamente. Eles são obtidos no domínio do tempo para a mesma janela de tempo e para reduzir a informação redundante, apenas a terceira medição de cada experimento é plotada para cada meio, visto que os resultados para as demais medidas apresentaram o mesmo comportamento, o que torna o ensaio reproduzível.

A partir dos gráficos ilustrados nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 pode-se observar que os sinais obtidos no ar mostram duas regiões, que estão presentes em todas as medições e são colocadas nos instantes de tempo de $t_{pk,ar1} = 0,08s$ e $t_{pk,ar2} = 0,37s$, enquanto que para o meio água, há um pico em $t_{pk,\acute{a}gua1} = 0,03s$ e uma concentração em $t_{pk,\acute{a}gua2} = 0,55s$. Para o óleo, pode-

se observar uma terceira região que está presente em todas as medidas, e estas regiões distintas estão localizadas nos instantes próximos a $t_{pk,\acute{o}leo1} = 0,03s$, $t_{pk,\acute{o}leo2} = 0,29s$ e $t_{pk,\acute{o}leo3} = 0,53s$.

Figura 4.8 – Configuração 1: Resposta do transdutor piezoelétrico para o *sweep* no meio ar.

Fonte: Autora (2016).

Figura 4.9 – Configuração 1: Resposta do transdutor piezoelétrico para o *sweep* no meio água.

Fonte: Autora (2016).

Figura 4.10 – Configuração 1: Resposta do transdutor piezoelétrico para o *sweep* no meio óleo de transformador.

Fonte: Autora (2016).

Com base nos gráficos apresentados, observa-se que cada meio apresenta um comportamento (assinatura) específico, o que facilita sua distinção visual. Também é possível observar que, para o mesmo dia de experimentos, os sinais permanecem estáveis. No entanto, quando diferentes dias de experimentos são analisados, uma pequena variação no comportamento do sinal é observada, mas as áreas destacadas permanecem praticamente no mesmo instante de tempo. Estas pequenas variações no sinal podem ser originadas devido ao fato de que as condições ambientais nos laboratórios não são totalmente controladas e porque a medição acústica é suscetível a ruídos ambientais.

No entanto, os locais selecionados ($\{t_{pk,ar1}, t_{pk,ar2}\}$, $\{t_{pk,\acute{a}gua1}, t_{pk,\acute{a}gua2}\}$, $\{t_{pk,\acute{o}leo1}, t_{pk,\acute{o}leo2}, t_{pk,\acute{o}leo3}\}$) foram observados em todas as medidas e foram selecionados para definir indicadores para a extração de características, onde se pode determinar o meio sob identificação. O algoritmo de classificação, descrevendo como esses indicadores foram empregados, é explicado a seguir.

Depois de observar um comportamento regular em diferentes meios e singularidades em cada um deles, um algoritmo de classificação foi desenvolvido para classificar um sinal desconhecido entre ar, água e óleo. Para desenvolver este algoritmo foram consideradas as regiões de picos mais relevantes de cada meio e a amplitude média. Para atingir esse objetivo o sinal acústico foi dividido em 10 intervalos de tempo igualmente espaçados e os intervalos mais relevantes foram selecionados para o método de classificação (GALLOWAY, 1975). Para

os meios ar e água, foram analisados dois intervalos de tempo: $t_{pk,ar1} = [0,0; 0,1]$ s e $t_{pk,ar2} = [0,3; 0,4]$ s e $t_{pk,água1} = [0,0; 0,1]$ s e $t_{pk,água2} = [0,5; 0,6]$ s, respectivamente. Para o óleo, foram considerados três intervalos: $t_{pk,óleo1} = [0,0; 0,1]$ s, $t_{pk,óleo2} = [0,2; 0,3]$ s e $t_{pk,óleo3} = [0,5; 0,6]$ s.

O conceito por trás do método de classificação é mais evidente na Figura 4.11. Os gráficos g_{ar} , $g_{água}$ e $g_{óleo}$ na Figura 4.11a representam simbolicamente os sinais adquiridos no ar, na água e no óleo e seus respectivos intervalos analisados. O gráfico ilustrado na Figura 4.11b é a projeção bidimensional de todas as combinações possíveis dos indicadores de g_{ar} , $g_{água}$ e $g_{óleo}$ ($\{t_{pk,ar1}, t_{pk,ar2}\}$, $\{t_{pk,água1}, t_{pk,água2}\}$, $\{t_{pk,óleo1}, t_{pk,óleo2}, t_{pk,óleo3}\}$). Por exemplo, todas as combinações possíveis de indicadores para o sinal g_{ar} são compostas pelo conjunto de quatro pontos $(t_{pk,ar1}, t_{pk,ar1})$, $(t_{pk,ar1}, t_{pk,ar2})$, $(t_{pk,ar2}, t_{pk,ar1})$ e $(t_{pk,ar2}, t_{pk,ar2})$. Para o algoritmo de classificação, os pontos que interceptam o eixo diagonal de 45° podem ser ignorados, por exemplo, os pontos $(t_{pk,arj}, t_{pk,ark})$, onde $j = k$. Portanto, é considerado apenas os pontos $(t_{pk,arj}, t_{pk,ark})$ ou $(t_{pk,ark}, t_{pk,arj})$ para $j \neq k$, porque um é a transposição do outro. O mesmo se aplica a todas as quatro combinações de pontos $(t_{pk,água1}, t_{pk,água2})$ para a água e para todas as nove combinações de pontos $(t_{pk,óleo1}, t_{pk,óleo2}, t_{pk,óleo3})$ para o óleo.

Figura 4.11 – Configuração 1: Ilustração do método de classificação: (a) sinais conceituais g_{ar} , $g_{água}$ e $g_{óleo}$; e (b) projeção bidimensional de todas as combinações possíveis dos indicadores dos sinais g_{ar} , $g_{água}$ e $g_{óleo}$.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2019a).

Os pontos para um dado meio (ar, água, óleo) em conjunto com os intervalos de tempo definirão uma ou mais regiões de classificação de um meio. Além disso, poucos pontos podem ser descartados após a definição das classes devido à sua redundância e sobreposição com regiões de classificação de outros meios. Esta declaração é ilustrada na Figura 4.11b, onde dois desses pontos estão localizados em $(t_{pk,óleo1}, t_{pk,óleo2})$ e $(t_{pk,óleo2}, t_{pk,óleo3})$. Os pontos restantes são plotados na Figura 4.11b com formas preenchidas com preto, o que leva a quatro regiões de classificação representadas pelas formas preenchidas na Figura 4.11b. O algoritmo de classificação pode assim ser aplicado como segue: um sinal $f(t)$ é obtido, os seus picos e regiões mais interessantes são extraídas, os pontos com as combinações mais adequadas são plotados no gráfico da Figura 4.11b. A decisão sobre qual é o meio é tomada pela maioria dos pontos que se enquadram dentro de uma determinada região de classificação (por exemplo, ar, água, óleo₁ ou óleo₂). Se o evento cair fora dessas regiões, a distância euclidiana será considerada. Os pontos com as combinações mais adequadas são aqueles com picos próximos aos pontos $(\{t_{pk,ar1}, t_{pk,ar2}\}, \{t_{pk,água1}, t_{pk,água2}\}, \{t_{pk,óleo1}, t_{pk,óleo2}, t_{pk,óleo3}\})$.

A Figura 4.12 mostra os resultados das regiões de classificação obtidas durante quatro dias de experimentos com 25 sinais para cada meio. Vale ressaltar o fato de que duas regiões de classificação podem ser fundidas para compor uma, abrangendo a linha diagonal passando pela origem, como no caso do óleo. Observe que, por meio dessa classificação, as medidas podem ser mais bem diferenciadas.

Figura 4.12 – Configuração 1: Gráficos das regiões de classificação dos meios para os quatro dias de experimentos.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2019a).

Como foi observado esta configuração apresentou um sistema de medição eletroacústico de baixo custo para caracterização de três meios. Os experimentos visaram compreender o comportamento do sistema no domínio do tempo para cada meio: ar, água e óleo. A partir dos resultados é possível perceber que o sistema de medição é robusto e que os sinais obtidos nos experimentos podem ser empregados em um algoritmo de classificação para identificar o meio em análise. Foi demonstrado aqui que o transdutor piezoelétrico é adequado para detectar sinais transmitidos através de meios distintos e é sensível o suficiente para detectar variáveis que levaram a um método de classificação. Os próximos passos é testar diferentes amostras de óleo de transformador para verificar possíveis alterações no sinal acústico.

4.4 Configuração 2

Neste tópico são descritos os experimentos e medidas realizadas no Laboratório do Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom (GIIMUS) do Departamento de Física (DF) da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRP) na Universidade de São Paulo (USP). Estes experimentos tiveram como objetivo verificar a potencialidade de transdutores ultrassônicos comerciais na distinção de diferentes amostras de óleo de transformadores.

A configuração 2 consiste em um sistema ultrassônico desenvolvido para caracterizar líquidos. Este sistema é ilustrado na Figura 4.13, e é composto por um gerador de funções (a) dois sensores ultrassônicos (b), atuando um como emissor e outro como receptor, uma câmara acústica (c), e um osciloscópio (d).

Figura 4.13 – Sistema ultrassônico da configuração 2.

Fonte: Autora (2019).

Sensores ultrassônicos

Nos experimentos foram utilizados transdutores de imersão ultrassônico (Figura 4.14) comercializados pela Olympus® para emitir e receber o sinal acústico através dos líquidos em análise.

Figura 4.14 – Transdutores de imersão ultrassônico da Olympus.

Fonte: Olympus (2019).

Um transdutor de imersão é um transdutor de onda longitudinal de elemento único com uma camada de $1/4$ de comprimento de onda (proporciona o aumento da produção da energia sonora) acusticamente acoplada à água. Estes tipos de transdutores são projetados especificamente para transmitir ultrassom em aplicações em que as partes do teste estão parcialmente ou totalmente imersas em água, o que permite uma técnica de acoplamento rápido e uniforme para a rápida varredura das peças. Outra vantagem desses transdutores é a proteção

RF (radiofrequência) proprietária para melhores características de sinal-ruído em aplicações críticas (OLYMPUS, 2019).

Câmara Acústica

Para desenvolvimento deste experimento, uma câmara acústica foi projetada para acomodar os transdutores ultrassônicos e o líquido em análise. O projeto da câmara acústica com os transdutores devidamente acomodados é ilustrado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – Protótipo da câmara acústica da configuração 2, vistas: (a) superior; (b) frontal; (c) lateral do receptor.

Fonte: Autora (2019).

A câmara acústica foi confeccionada em acrílico cristal de 10mm, com dimensões internas 110x145x100mm de altura, comprimento e largura, respectivamente. Também foram confeccionadas peças cilíndricas em acrílico, para encaixar nas laterais da câmara acústica, para acomodar os transdutores ultrassônicos devidamente alinhados e espaçados por uma distância de 100 mm, distância está fora da região do campo próximo de todas as frequências de ressonância dos transdutores utilizados.

4.4.1 Metodologia: configuração 2

Para excitar o transdutor que opera como emissor, foi utilizado um gerador de funções (Agilent 33522A 1 Ch, 250MSa/s, 30MHz) ajustado no modo *Burst*, com uma onda senoidal com 5 volts de pico a pico, 10 ciclos e período de 50ms. O transdutor que opera como receptor foi conectado ao osciloscópio (Agilent Keysight MSO7104B 4 Ch, 4 GSa/s, 1 GHz) onde obteve-se a visualização do sinal.

Nos experimentos foram utilizadas amostras de 600 ml de água e de diferentes amostras de óleos de transformadores. As amostras de água utilizadas foram amostras de água Milli-Q (ultrapura) e as quatro amostras de óleo de transformadores, com diferentes níveis de degradação, nomeadas de virgem, regenerado, sujo e queimado, foram fornecidas pela empresa Potencial Manutenção e Comércio de Equipamentos Ltda, localizada em Rio Claro – SP. Esta empresa é referência no setor elétrico, especializada em instalação, manutenção e ensaios de equipamentos elétricos de alta e média tensão como transformadores, disjuntores, seccionadoras, redes aéreas, entre outros e atua no mercado desde 1999 (POTENCIAL, 2019). Além das amostras dos óleos, a empresa também forneceu o laudo da análise físico-química de cada amostra para posterior comparação com os resultados das medições acústicas. A Figura 4.16 apresenta três das quatro amostras de óleo: virgem, sujo e queimado. A amostra de óleo regenerado não foi apresentada pois a mesma apresenta a mesma cor da amostra do óleo sujo.

Figura 4.16 – Amostras de óleo mineral isolantes: (a) virgem, (b) sujo e (c) queimado.

Fonte: Autora (2016).

Inicialmente, para encontrar a frequência que melhor caracterizasse os líquidos em análise, transdutores ultrassônicos com frequências de operação distintas: 2,25; 3,50; 5,00 e 10,00 MHz, foram testados nas amostras de água e óleo de transformador. Os experimentos foram conduzidos da seguinte forma: após a montagem dos transdutores na câmara acústica, 600ml do líquido em análise, que corresponde a uma amostra, é colocado na cuba. Antes de emitir o *burst*, observa-se a presença de bolhas de ar no líquido e caso tenha, estas são

eliminadas, para evitar que o sinal seja atenuado. Após a verificação e eliminação das bolhas, o *burst* senoidal é emitido pelo gerador e por sua vez, pelo transdutor emissor e transmitido no líquido. O sinal transmitido é recebido pelo transdutor receptor e visualizado no osciloscópio. Este sinal é salvo no formato “.csv” e armazenado no banco de dados.

As medições foram realizadas na seguinte sequência: inicialmente, foi testada a água, em seguida o óleo virgem, depois o óleo regenerado, seguido do óleo sujo e por fim, o óleo queimado. Antes de iniciar as medições, os líquidos foram cuidadosamente verificados para evitar bolhas de ar entre os transdutores de ultrassom. Após realizadas as medições, 5 medidas em cada líquido, a cuba era limpa com papel toalha para realização das medidas com o próximo líquido da sequência. Finalizadas as medições de todos os líquidos naquela determinada frequência, os sensores da câmera acústica eram substituídos para iniciar as medições na próxima frequência. Durante as medições a temperatura dos líquidos foi monitorada e foi observado que a temperatura permaneceu 24 °C para os óleos e 24 °C (± 1) para a água.

Uma vez encontrada a frequência mais sensível, as medidas de cada líquido foram novamente realizadas para verificar a reprodutibilidade do método. Neste procedimento, quatro amostras de cada meio foram testadas e em cada uma delas foram realizadas cinco medições, resultando em um total de 20 medidas para cada líquido. As medições consistiram em registrar a amplitude do sinal e o tempo entre o disparo ($t = 0$) e a detecção do sinal pelo transdutor receptor, para o cálculo da velocidade de propagação ultrassônica em cada meio. Adicionalmente, também foram feitas medidas da viscosidade dos óleos de transformadores.

4.4.2 Resultados: configuração 2

4.4.2.1 Medidas de Amplitude

Foram feitas medições da amplitude do *burst* senoidal para cada um dos líquidos testados e para cada frequência. A Tabela 4.1 apresenta os valores da amplitude do primeiro eco dos sinais adquiridos com o transdutor receptor e a variação de amplitude (Δ_v) entre os óleos de transformador.

O gráfico referente aos valores da Tabela 4.1 é apresentado na Figura 4.17. A Figura 4.17a apresenta o resultado das medições para os cinco líquidos testados, já o gráfico da Figura 4.17b apresenta a comparação apenas entre os óleos de transformador.

Tabela 4.1 – Amplitude do primeiro eco do sinal e Δv utilizando os transdutores Olympus.

Transdutores Olympus - Distância Fixa - 10cm				
Líquido	Vpp (mV)			
	2,25 MHz	3,5 MHz	5 MHz	10 MHz
Água	66,78	182,20	237,10	52,48
Óleo Virgem	54,78	116,66	91,15	2,58
Óleo Regenerado	55,50	116,91	96,99	2,93
Óleo Sujo	55,80	119,43	100,54	3,23
Óleo Queimado	56,16	121,66	103,20	3,34
Δv óleo	1,38	5,00	12,05	0,76

Fonte: Autora (2017).

Figura 4.17 – Gráfico da amplitude (a) para os cinco líquidos e (b) apenas para os óleos de transformador.

Fonte: Autora (2017).

A partir da análise do gráfico da Figura 4.17b e do valor do Δv óleo apresentado na Tabela 4.1, observa-se que a frequência de 5 MHz é a que apresentou uma maior discrepância entre as amplitudes dos óleos de transformador. Assim, é possível concluir que, entre as frequências estudadas, a que mais se adequa para análise da qualidade de óleos de transformadores testados é a frequência de 5 MHz. A Figura 4.18a apresenta os sinais dos líquidos testados e a Figura 4.18b ilustra o gráfico da medição da amplitude dos sinais dos óleos para a frequência de 5MHz.

Para verificar a reprodutibilidade do método os experimentos foram repetidos para a frequência de 5,0 MHz, pois esta, foi a frequência que apresentou uma maior sensibilidade na distinção entre as amostras de óleo de transformador utilizadas no experimento apresentado anteriormente.

Figura 4.18 – Gráfico dos valores de amplitude dos óleos para a frequência de 5MHz.

Fonte: Autora (2017).

Foram testadas quatro amostras de cada líquido e para cada amostra foram feitas cinco medidas de diferentes *burst* senoidais, totalizando em 20 medidas para cada líquido. A Tabela 4.2, apresenta os valores da amplitude dos sinais, a média e o desvio padrão das medidas.

Tabela 4.2 – Medidas em 5 MHz: Amplitude, média e desvio padrão das medidas para os cinco líquidos.

Transdutores Olympus - Vpp (mV) - 5 MHz					
	Água	Óleo Virgem	Óleo Reciclado	Óleo Sujo	Óleo Queimado
Amostra 1	329,6	118,2	123,0	127,0	130,3
	329,6	116,6	122,2	126,2	129,4
	331,7	117,4	123,0	125,4	129,4
	329,6	117,4	122,2	126,2	128,6
	327,6	117,4	121,4	124,6	127,8
Amostra 2	329,6	118,2	123,8	127,8	129,4
	331,7	119,0	123,8	127,8	129,4
	333,7	119,8	124,6	127,8	129,4
	331,7	119,8	123,8	127,8	129,4
	329,6	119,0	123,8	127,8	128,6
Amostra 3	331,7	119,8	124,6	127,8	129,4
	331,7	119,0	124,6	127,0	130,3
	329,6	119,0	124,6	127,0	127,8
	331,7	119,0	124,6	127,0	127,8
	331,7	119,8	124,6	127,8	129,4
Amostra 4	329,6	119,0	125,4	126,2	129,4
	329,6	120,6	124,6	126,2	129,4
	327,6	119,8	124,6	126,2	129,4
	329,6	119,0	123,8	127,0	129,4
	327,6	119,8	123,8	127,8	127,8
Média	330,3	118,9	123,9	127,0	129,1
Desvio Padrão	1,5	1,1	1,1	0,9	0,7

Fonte: Autora (2018).

A Tabela 4.3 apresenta os valores da média das cinco medidas da amplitude de cada amostra, a média das médias das amostras e o desvio padrão da média das amostras. O gráfico referente aos valores da Tabela 4.3, apenas para os óleos, é apresentado na Figura 4.19.

Tabela 4.3 – Tabela de médias da amplitude em 5 MHz.

Amostra	Transdutores Olympus – Média do V_{pp} (mV) - 5 MHz				
	Água	Óleo Virgem	Óleo Regenerado	Óleo Sujo	Óleo Queimado
Amostra 1	329,6	117,4	122,4	125,9	129,1
Amostra 2	331,3	119,2	124,0	127,8	129,3
Amostra 3	331,3	119,3	124,6	127,4	129,0
Amostra 4	328,8	119,6	124,5	126,7	129,1
Média total	330,3	118,9	122,7	126,3	129,0
Desvio padrão	1,21	1,01	1,03	0,84	0,13

Fonte: Autora (2018).

Figura 4.19 – Gráfico da média e desvio padrão das amostras de óleo em 5 MHz.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2018).

A partir dos dados da Tabela 4.3 e do gráfico ilustrado na Figura 4.19, observa-se um comportamento crescente entre as medidas e que os óleos virgem e regenerado e sujo apresentaram um desvio padrão maior enquanto que o óleo queimado apresentou um baixo desvio padrão.

A Tabela 4.4 apresenta os dados da análise físico química dos óleos de transformadores utilizados nos experimentos e fornecidos pela empresa Potencial. Observa-se que o teor de água das amostras de óleo é menor no óleo virgem e maior no óleo queimado.

A Figura 4.20 apresenta o gráfico das curvas do teor de água (Tabela 4.4) e da amplitude média do sinal (Tabela 4.3) para as quatro amostras de óleo de transformador medidas na frequência de 5 MHz.

Tabela 4.4 – Dados da análise físico química dos óleos de transformador.

Ensaio	Unidade	Óleo Virgem	Óleo Regenerado	Óleo Sujo	Óleo Queimado
Cor	-	<0,5	0,5	1	3
Densidade a 20/4 °C	-	0,878	0,880	0,872	0,866
Tensão Interfacial 25 °C	nN/m	44,8	41,0	37,0	20,0
Teor de água	ppm	11,0	14,6	38,1	40,4
Índice de Neutralização	mgKOH/g	0,013	0,028	0,042	0,406
Rigidez Dielétrica	kV	63,1	60,5	16,7	17,3
Fator de Potência 25 °C	%	0,02	0,02	0,02	0,02

Fonte: Autora (2017).

Figura 4.20 – Gráfico do teor de água e da amplitude dos sinais de óleos de transformador em 5 MHz.

Fonte: Adaptado de Palitó et al. (2018).

A partir dos resultados da análise físico químicas das amostras dos óleos apresentados na Tabela 4.3 e dos gráficos ilustrados na Figura 4.19 e na Figura 4.20, observa-se que quanto maior o teor de água contido no óleo, maior será a amplitude do sinal, assim, espera-se que seja possível inferir quanto a qualidade do óleo no equipamento, ou seja, se o mesmo está apto ou não para operação em relação a esta grandeza em análise.

4.4.2.2 Medidas da velocidade de propagação ultrassônica

Além das medições da amplitude do sinal, também foram realizadas medições do tempo do início do trigger ($t=0$) até o início do sinal recebido para calcular a velocidade de propagação ultrassônica em cada líquido. A apresentada os valores de tempo medidos para cada frequência e em cada um dos líquidos testados.

Tabela 4.5 – Medição do retardo entre o sinal emitido e o sinal recebido.

Líquido	Tempo (μs)			
	2,25 MHz	3,5 MHz	5 MHz	10 MHz
Água	67,37	67,15	67,31	67,34
Óleo Virgem	71,12	71,08	70,98	71,06
Óleo Regenerado	71,29	71,22	71,16	71,25
Óleo Sujo	71,29	71,18	71,18	71,25
Óleo Queimado	71,57	71,42	71,45	71,50

Fonte: Autora (2018).

A velocidade de propagação ultrassônica para cada líquido, nas frequências estudadas, é apresentada na Tabela 4.6. Estes valores foram calculados de forma direta, por meio da Equação 1, onde t_0 corresponde aos valores apresentados na Tabela 4.6 e o d_0 é igual a 10 cm que corresponde a distância entre os transdutores.

$$c = \frac{d_0}{t_0} \text{ [m/s]} \quad (4.1)$$

Tabela 4.6 – Velocidade de propagação ultrassônica dos líquidos.

Líquido	Velocidade de Propagação (m/s)				
	2,25 MHz	3,5 MHz	5 MHz	10 MHz	Média (m/s)
Água	1484,34	1489,20	1485,66	1485,00	1486,05
Óleo Virgem	1406,07	1406,87	1408,85	1407,26	1407,26
Óleo Regenerado	1402,72	1404,10	1405,28	1403,51	1403,90
Óleo Sujo	1402,72	1404,89	1404,89	1403,51	1404,00
Óleo Queimado	1397,23	1400,17	1399,58	1398,60	1398,90

Fonte: Autora (2017).

Os valores encontrados na literatura para velocidade de propagação ultrassônica para a água é 1480 m/s e para o óleo de transformador é 1425 m/s ambos a 20 °C (CHANG-PING et al., 2010). A partir dos valores apresentados na Tabela 4.6, observa-se que a velocidade de propagação ultrassônica dos líquidos testados não dependem da frequência e que os valores calculados estão próximos aos valores relatados na literatura e que a velocidade de propagação ultrassônica é maior para a água e que esta velocidade varia muito pouco entre os óleos. Porém, apesar da variação entre os óleos ser pequena, observa-se que a medida que o óleo apresenta maior teor de água, menor é a velocidade de propagação ultrassônica, analogamente aos resultados relatados no trabalho de Howells e Norton (1984).

4.4.2.3 Medidas de Viscosidade

No GIIMUS, também foram realizadas medidas de viscosidade utilizando o reômetro rotacional RheolabQC (viscosímetro por cisalhamento) que mede a viscosidade dinâmica de amostras. Na Tabela 4.7 constam as seguintes medidas para cada um dos óleos testados: temperatura (T [°C]), viscosidade ($Ni - \eta$ [mPas – milipascal segundos]), taxa de cisalhamento (*shear rate* – $\dot{\gamma}$ [1/s]), tensão de cisalhamento (*shear stress* – τ [Pa]).

Tabela 4.7 – Medidas de viscosidade dos óleos de transformador.

Líquido	Viscosidade (mPas)	Temperatura (°C)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Taxa de cisalhamento (1/s)
Óleo virgem	18,3	24,9	28,32	1548,48
Óleo regenerado	16,9	24,9	26,18	1548,48
Óleo sujo	17,0	25,0	26,28	1548,48
Óleo queimado	16,6	24,9	25,66	1548,48

Fonte: Autora (2017).

A partir da Tabela 4.7 observa-se que o óleo virgem apresenta uma viscosidade maior enquanto que a viscosidade do óleo queimado é a menor, como esperado, devido as impurezas e a maior concentração de água no óleo queimado.

4.5 Configuração 3

Neste tópico são descritos os experimentos e medidas realizadas no GIMUS/USP. A configuração 3 também consiste em um sistema ultrassônico desenvolvido para caracterizar líquidos. Este sistema é ilustrado na Figura 4.21, e é composto por um gerador de funções (a), um amplificador (b), um transdutor ultrassônico (c), uma câmara acústica (d), um hidrofone (e), e um osciloscópio (f).

Figura 4.21 – Sistema ultrassônico da configuração 3.

Fonte: Autora (2019).

Assim como nos experimentos da configuração 2, nestes experimentos foram utilizados transdutores de imersão ultrassônicos de 1 a 10MHz comercializados pela Olympus® para emitir o sinal acústico através dos líquidos em análise. Por sua vez, diferentemente da configuração 2, aqui foi utilizado um hidrofone para detectar o sinal transmitido no meio. Assim nesta nova configuração, tem-se um transdutor Olympus operando como emissor e um hidrofone operando como receptor. Também foram utilizados nos experimentos um gerador de funções (Agilent 33522A 1 Ch, 250MSa/s, 30MHz), um amplificador de potência (*Broadband Power Amplifier System 100A2 da Electronics & Innovation*), cujo ganho corresponde a 50 dB, e um osciloscópio (Agilent Keysight MSO7104B 4 Ch, 4 GSa/s, 1 GHz).

Este sistema foi desenvolvido com a finalidade de refinar o método utilizado na configuração 2, ou seja, verificar se com um sensor mais sensível (hidrofone), posicionado a uma distância ótima, a caracterização dos óleos pudesse ser melhorada. Na configuração 2, as medidas foram realizadas a uma distância fixa (100 mm) em todas as frequências. Nesta nova configuração, as medidas são realizadas a uma distância variável, ajustando os sensores para a distância ótima de captação do sinal para cada frequência.

Hidrofone

Como mencionado anteriormente, o sensor receptor utilizado foi um hidrofone de alta precisão fabricado pela Precision Acoustics LTD. Este hidrofone é composto por três elementos, a Figura 4.22 ilustra cada um deles.

Figura 4.22 – Hidrofone de alta precisão da Precision Acoustics LTD.

Fonte: Precision Acoustics (2019).

A Figura 4.22a ilustra o hidrofone da agulha de 1,0 mm, esta sonda possui excelente sensibilidade e é ideal para a medição de campos de baixa frequência. No entanto, essas sondas podem ser usadas para medições de frequência mais alta (particularmente de sinais muito

fracos). Na Figura 4.22b, é apresentado o pré-amplificador, que é uma parte essencial do sinal do hidrofone, pois protege o sinal e fornece uma fonte de 50 Ohms. Ele se conecta diretamente a sonda. Por fim, é apresentado o acoplador DC, Figura 4.22c, que fornece a energia CC ao pré-amplificador submersível e, ao mesmo tempo, atua como um acoplador de sinal acústico entre o pré-amplificador e o sistema de medição do usuário (por meio de um Amplificador Hidrophone Booster, se usado) (PRECISION ACOUSTICS, 2019).

Câmara acústica

Para realização deste experimento, foi desenvolvida outra câmara acústica em acrílico, cujo protótipo, com os sensores instalados, está ilustrado na Figura 4.23. A câmara foi projetada para acomodar os transdutores Olympus e o hidrofone devidamente alinhados. Este protótipo tem como dimensões internas 100 x 170 x 90 mm de altura, comprimento e largura, respectivamente.

Figura 4.23 – Protótipo da câmara acústica da configuração 3, vistas: (a) superior; (b) frontal; (c) lateral do emissor; (d) lateral do receptor.

Fonte: Autora (2019).

Para aumentar a variação da distância entre o transdutor e o hidrofone, um cilindro de alumínio tendo 16mm de diâmetro e 200 mm de comprimento foi fabricado de modo que o hidrofone pudesse ser acoplado em seu interior e assim, ter margem para ajustar a distância entre os transdutores conforme necessário.

4.5.1 Metodologia: configuração 3

No sistema da Figura 4.21, o gerador de funções foi programado para produzir um sinal senoidal no modo *burst* com 10 ciclos e a amplitude, na ordem de milivolts, foi ajustada para que o sinal de saída após o amplificador de potência fosse de 30 volts de pico a pico (V_{pp}). Este sinal aciona o transdutor ultrassônico fazendo com que emita o sinal e este seja transmitido através do meio (água ou óleo). Em seguida, o hidrofone detecta o sinal que é medido pelo osciloscópio digital.

Antes de iniciar as medições, foi necessário calcular a distância ótima (campo próximo) de detecção do sensor para cada uma das frequências estudadas. Este cálculo teve como base o diâmetro da cerâmica (d), a velocidade de propagação do líquido (c) e a frequência de operação do sensor (f), conforme Equação 4.2. Os valores do campo próximo (N) para cada frequência, obtidos a partir da Equação 4.2 são apresentados na Tabela 4.8. Para a água foi considerada a velocidade de propagação igual a 1480 m/s e para todas as amostras de óleo foi adotada a velocidade de propagação a 1407 m/s. Na Tabela 4.8 também são apresentados o diâmetro da cerâmica dos transdutores, estes diâmetros são fornecidos pelo fabricante Olympus.

$$N = \frac{d^2 \cdot f}{c} [m] \quad (4.2)$$

Tabela 4.8 – Campo próximo entre o sensor ultrassônico e o hidrofone.

Frequência (MHz)	Diâmetro da cerâmica (mm)	Campo próximo (mm)	
		Água	Óleos
1,00	1,27	27,2	28,6
2,25	6,4	14,6	16,4
3,50	6,4	24,2	25,5
5,00	9,5	76,2	80,2
10,00	6,4	69,2	72,8

Fonte: Autora (2018).

Uma vez definido o campo próximo para cada frequência, foram iniciados os experimentos na frequência de 1MHz, conduzidos da seguinte forma: após a montagem e ajuste

da distância entre o transdutor e do hidrofone na câmara acústica, 800ml do líquido em análise, que corresponde a uma amostra, é colocado no interior da câmara. Antes de emitir o *burst*, observa-se a presença de bolhas de ar e caso tenha, as mesmas são eliminadas. Após a verificação e eliminação das bolhas, o *burst* senoidal é emitido pelo gerador, amplificado pelo amplificador de potência, transmitido pelo transdutor ultrassônico através do líquido, até ser detectado hidrofone e visualizado no osciloscópio. Este processo foi repetido para 5 amostras de cada líquido e para cada amostra foram feitas 5 medidas de diferentes *burst*, totalizando em 25 medidas para cada líquido. As medições foram realizadas obedecendo a sequência dos líquidos: 1- água, 2- óleo virgem, 3- óleo regenerado, 4- óleo sujo e 5- óleo queimado. Após realizadas as medições em cada líquido, uma limpeza na cuba era realizada. Terminadas as medições para 1 MHz, são realizadas as medições em 2,25 MHz e assim, em seguida para 3,5 MHz, depois para 5,0 MHz e por fim em 10 MHz.

4.5.2 Resultados: configuração 3

Foram feitas medições da amplitude do *burst* senoidal para cada um dos líquidos testados e para cada frequência. A Tabela 4.9 apresenta os valores da amplitude média do primeiro eco das 25 medidas (em cada líquido e para cada frequência) adquiridas com o hidrofone e a variação de amplitude (Δ_v) entre as amostras de óleo de transformador.

Tabela 4.9 – Amplitude do primeiro eco do sinal adquirido com o hidrofone e Δ_v entre as amostras de óleo.

Líquido	Hidrofone - Distância Variável				
	Vpp (mV)				
	1 MHz	2,25 MHz	3,5 MHz	5 MHz	10 MHz
Água	41,32	120,95	222,18	296,83	257,74
Óleo Virgem	2,45	8,00	12,99	7,75	1,90
Óleo Regenerado	2,72	8,59	13,15	8,85	2,08
Óleo Sujo	2,78	8,62	13,30	9,29	2,24
Óleo Queimado	2,86	8,70	13,44	9,30	2,33
Δ_v óleo	0,41	0,70	0,45	1,55	0,43

Fonte: Autora (2018).

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.9 observa-se que, novamente, a frequência que apresenta a maior variação entre as amostras de óleo virgem e de óleo queimado é a frequência de 5 MHz. A Figura 4.24 apresenta os gráficos da média com o respectivo desvio padrão das medidas obtidos nos experimentos.

Figura 4.24 – Média e desvio padrão das medidas do hidrofone para as frequências: (a) 1 MHz; (b) 2,25 MHz; (c) 3,5 MHz; (d) 5 MHz e; (e) 10 MHz.

Fonte: Autora (2018).

Com base nos gráficos apresentados na Figura 4.24, as frequências que melhor caracterizam os 4 tipos de óleo, são as frequências de 3,5 MHz, 5 MHz e 10 MHz, apesar da frequência de 10 MHz ter apresentado um desvio padrão maior quando comparado com os

desvios padrão das amostras em 3,5 e 5 MHz. Observa-se ainda que, assim como na configuração 2, a frequência 5 MHz é a que melhor distingue o óleo bom (virgem e regenerado) do óleo ruim (sujo e queimado). Já nas frequências de 1 MHz e 2,25 MHz, observa-se que algumas amostras de óleo regenerado podem ser confundidas com uma amostra de óleo sujo, dificultando assim, o diagnóstico do óleo em apto ou não apto para operação. Portanto torna-se ainda mais evidente que esta metodologia é válida para caracterização acústica, com base apenas na amplitude do sinal, no diagnóstico de amostra de óleo de transformadores e que a frequência que melhor se adequa ao estudo é a de 5 MHz.

4.6 Configuração 4

Como foi visto nas configurações 2 e 3, é possível caracterizar amostras de óleo de transformador pelo método ultrassônico utilizando transdutores comerciais. Logo, é proposta esta nova configuração, utilizando um transdutor piezoelétrico termoformado, desenvolvido pelo grupo de Alta Tensão e Medidas (GATM) da USP de São Carlos, para validar este transdutor piezoelétrico na caracterização de amostras de óleo de transformador. Nesta configuração foi utilizado o protótipo 2 do transdutor piezoelétrico descrito no capítulo 3, sessão 3.3.

Esta nova configuração é apresentada na Figura 4.25 e consiste na utilização de um gerador de funções (a), uma cerâmica piezoelétrica (b), uma câmara acústica (c), um transdutor piezoelétrico (d) e um osciloscópio.

Figura 4.25 – Configuração 4: sistema utilizando um transdutor termoformado.

Fonte: Autora (2019).

Cerâmica Piezoelétrica

O atuador piezoelétrico, ilustrado na Figura 4.26, é uma cerâmica ultrassônica, utilizada em lavadoras ultrassônicas, de 50 mm de diâmetro, 2,6 mm de espessura, frequência de

ressonância de 40 kHz e potência de 50 Watts. Esta cerâmica piezoelétrica é responsável por emitir o sinal acústico que irá se propagar no líquido.

Figura 4.26 – Cerâmica piezoelétrica.

Fonte: BANGOOD, 2019.

Esta cerâmica piezoelétrica foi escolhida devido ao fato de que sua frequência de ressonância na água é a mesma do transdutor piezoelétrico desenvolvido pelo GATM e conforme estudo está demonstrado em De Medeiros et al. (2015). Para prover o contato elétrico desta cerâmica e acoplá-la na câmara acústica, uma peça em acrílico foi desenvolvida, a mesma é ilustrada na Figura 4.27.

Figura 4.27 – Cerâmica piezoelétrica acoplada ao suporte em acrílico.

Fonte: Autora, 2019.

A conexão elétrica foi feita por meio de um conector BNC tipo fêmea e a cerâmica piezoelétrica foi fixa no suporte em acrílico utilizando um silicone de vedação para alta temperatura.

Câmara acústica

Uma nova câmara acústica foi desenvolvida para acomodar a cerâmica e o transdutor piezoelétrico. O protótipo da câmara acústica da configuração foi confeccionado em acrílico cristal de 10 mm, e tem como medidas internas 80 x 100 x 120 mm de largura, altura e

comprimento, respectivamente. Este protótipo é ilustrado na Figura 4.28 já com a cerâmica piezoelétrica e o transdutor piezoelétricos acoplados.

Figura 4.28 – Protótipo da câmera acústica da configuração 4, vistas: (a) superior; (b) frontal; (c) lateral do emissor; (d) lateral do receptor.

Fonte: Autora, 2019.

4.6.1 Metodologia: configuração 4

Para excitar a cerâmica piezoelétrica que opera como emissor, foi utilizado um gerador de funções (Agilent 33210A, 10 MHz) ajustado no modo Sweep, com uma onda senoidal de 10 volts de pico a pico, abrangendo uma faixa de frequência de 10 kHz a 100 kHz, de forma linear, durante um intervalo de tempo de 1 segundo. O gerador de funções excita a cerâmica, fazendo com que ela transmita o sinal, através do meio, para o transdutor piezoelétrico. Posteriormente, o transdutor piezoelétrico recebe o sinal e exerce sua função de converter o sinal sonoro em sinal elétrico e amplificá-lo. Por fim, o sinal é capturado pelo osciloscópio (Agilent Keysight DSOX2002A, 70 MHz, 2 GSa/s) onde obtem-se a visualização do sinal e os dados são salvos com 100.000 pontos.

Além das amostras de óleo utilizadas nos experimentos das configurações 2 e 3, que aqui são nomeadas de *virgem_1*, *regenerado_1*, *sujo_1* e *queimado_1*, novas amostras de óleo de transformadores foram coletadas na empresa Potencial. As novas amostras são nomeadas

virgem_2, regenerado_2, sujo_2 e queimado_2. Os resultados da análise físico química das amostras desses óleos são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Amplitude do primeiro eco do sinal e Δ_v utilizando os transdutores Olympus.

Ensaio	Unidade	Virgem_2	Regenerado_2	Sujo_2	Queimado_2
Cor	-	<0,5	1,5	1,5	5
Densidade a 20/4 °C	-	0,876	0,878	0,878	0,870
Tensão Interfacial 25 °C	MN/m	40,3	40,0	25,4	26,0
Teor de água	ppm	8,2	11,0	46,9	31,0
Índice de Neutralização	mgKOH/g	0,002	0,021	0,025	0,45
Rigidez Dielétrica	kV	70,2	63,2	16,9	28,0
Fator de Potência 25 °C	%	0,02	0,02	0,02	0,03

Fonte: Autora (2018).

O sistema da configuração 4 foi testado em três meios: ar, água e óleo. Os experimentos foram repetidos três vezes para o ar e a água e nove vezes para cada amostra de óleos de transformadores. Foram realizadas cinco medidas para do diferentes *sweeps* em cada um dos meios. Foram feitas a aquisição de 15 *sweeps* para o ar, 15 para a água e 45 medidas para cada amostra de óleo de transformador (virgem_1, regenerado_1, sujo_1, queimado_1, virgem_2, regenerado_2, sujo_2 e queimado_2). Inicialmente foram feitas as medidas no ar e na água, em seguida com as amostras de óleos 1, e por fim foram ensaiadas as amostras de óleos 2. Nos líquidos foram utilizados um volume de 800 ml.

Além do ensaio de *sweep*, também foram feitas medições da velocidade de propagação, utilizando o tempo medido entre o sinal emitido e o sinal recebido, nas amostras de óleos 1 e foram feitas medidas de viscosidade em todas as amostras de óleos (1 e 2) utilizando um reômetro.

4.6.2 Resultados: configuração 4

4.6.2.1 Análise do Sweep

Os experimentos citados neste tópico foram realizados no Laboratório de Medidas e Instrumentação (LMI) na Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em João Pessoa. Foram feitas medições do *sweep* para cada um dos meios testados. A Figura 4.29 apresenta o gráfico do *sweep* para o ar (a), água (b) e óleos: virgem_1 (c), virgem_2 (d), regenerado_1 (e), regenerado_2 (f) sujo_1 (g), sujo_2 (h) e queimado_1 (i) e queimado_2 (j).

Figura 4.29 – Resposta do transdutor piezoelétrico para o *sweep* nos meios ar, água e óleos.

Fonte: Autora (2019).

A Tabela 4.11 apresenta o valor da média da amplitude de pico a pico das cinco medidas para cada uma das amostras (A1 até A9), a média total e o desvio padrão (DP) das nove amostras dos sinais adquiridos com o transdutor piezoelétrico para os óleos. A média das três amostras para o ar e para água foram 0,70 V e 3,01 V, respectivamente.

Tabela 4.11 – Amplitude de pico a pico do *sweep* para os óleos.

Óleo	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	Média	DP
Óleo 1											
Virgem_1	3,83	3,74	3,55	4,11	4,02	3,96	3,93	3,86	3,98	3,88	0,17
Regenerado_1	3,96	3,76	3,61	4,31	4,26	4,29	4,21	4,13	4,19	4,05	0,24
Sujo_1	3,99	3,77	3,64	4,38	4,30	4,21	4,45	4,42	4,38	4,17	0,30
Queimado_1	4,14	3,86	3,71	4,42	4,43	4,27	4,64	4,73	4,63	4,32	0,36
Óleo 2											
Virgem_2	3,68	3,66	3,67	3,85	4,01	3,90	3,73	3,85	4,02	3,82	0,13
Regenerado_2	3,93	3,86	3,87	4,14	4,06	4,13	4,02	3,95	3,91	3,99	0,10
Sujo_2	3,97	4,01	4,07	4,37	4,31	4,25	4,06	4,11	4,09	4,14	0,13
Queimado_2	4,09	4,06	4,07	4,19	4,18	4,17	4,31	4,09	4,11	4,14	0,08

Fonte: Autora (2019).

A partir dos valores apresentados na Tabela 4.11 é possível observar que há um aumento gradativo da amplitude do sinal do óleo virgem para o óleo queimado, com exceção da amostra 6 (A6) do óleo regenerado_1 que apresentou o maior valor de amplitude. Já para as amostras de óleo 2, a maior amplitude é observada hora nas amostras de óleo sujo, hora as amostras de óleo queimado, ou até mesmo amplitudes iguais. Além disso, é fácil perceber que para uma mesma amostra, é possível diferenciar um óleo apto para operação (virgem e regenerado) de um óleo não apto (sujo e queimado).

Para fazer uma análise comparativa, os valores das amplitudes da média total e do desvio padrão da Tabela 4.11 foram normalizados e os gráficos da Figura 4.30 foram plotados. Nas letras (a) e (b) são apresentados os gráficos para as amostras de óleos 1, nas letras (c) e (d) são ilustrados os gráficos para as amostras de óleos 2 e nas letras (e) e (f) são mostrados os gráficos em que todas as amostras de óleos 1 e 2 foram misturadas.

Analisando os gráficos apresentados na Figura 4.30 (a) observa-se que para as amostras de óleo 1, é difícil a classificação de um óleo apto de um óleo não apto para operação. Esta classificação se torna mais fácil quando as amostras de óleo regenerado 1 são retiradas da análise. Já nas amostras de óleos 2, esta classificação fica mais clara, uma vez que é possível fazer esta classificação (apto e não apto) tanto no gráfico que o óleo regenerado 2 está presente (Figura 4.30c) quanto para o gráfico em que não consta o óleo regenerado 2 (Figura 4.30d).

Ainda analisando os gráficos das amostras de óleo 2, observa-se que os óleos sujo e queimado apresentaram amplitudes médias equivalentes, isto já era esperado pois estas amostras apresentam, de acordo com a Tabela 4.10, teor de água próximos, sendo que o óleo sujo_2 apresenta um teor de água maior que o óleo queimado_2.

Figura 4.30 – Média e desvio padrão das amostras de (a) óleos_1; (b) óleos_1 sem o regenerado_1; (c) óleos_2; (d) óleos_2 sem o regenerado_2; (e) todos os óleos (f) todos os óleos sem o regenerado.

Fonte: Autora (2019).

Ao plotar os gráficos da média e do desvio padrão de todos os óleos, observa-se na Figura 4.30e, que o óleo regenerado se confunde com o óleo virgem e sujo. Logo, este óleo foi retirado da análise Figura 4.30f e assim, é possível fazer a distinção do óleo virgem, dos óleos sujo e queimado.

Uma análise em frequência dos sinais de *sweep* foi feita por meio da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) para verificar a frequência de ressonância dos sinais. O valor médio da frequência e da magnitude da FFT e seus respectivos desvios padrão para cada óleo é apresentado na Tabela 4.12. Fica evidente que não é possível realizar a distinção entre os óleos com base na frequência de ressonância nem levando em consideração a magnitude da FFT.

Tabela 4.12 – Frequência, magnitude e desvios padrão para os óleos.

Óleo	Frequência (kHz)	DP (kV)	Magnitude	DP
Óleo 1				
Virgem_1	46,06	0,98	0,0090	0,0006
Regenerado_1	45,24	1,01	0,0090	0,0006
Sujo_1	45,75	1,11	0,0095	0,0009
Queimado_1	46,02	0,93	0,0098	0,0009
Óleo 2				
Virgem_2	46,40	0,58	0,0079	0,0029
Regenerado_2	46,31	0,63	0,0084	0,0030
Sujo_2	45,95	0,39	0,0086	0,0031
Queimado_2	46,62	0,39	0,0087	0,0031

Fonte: Autora (2019).

Com base nos resultados apresentados é possível concluir que o sistema da configura 4 é capaz de diferenciar um óleo virgem de um óleo não apto para operação (sujo e queimado) levando em consideração apenas o valor da amplitude do *sweep* senoidal na faixa de frequência de 10 kHz a 100 kHz. Além disso, é importante ressaltar o baixo custo dos sensores envolvidos nessa configuração, o custo de fabricação do transdutor piezoelétrico não ultrapassa R\$500,00 e a cerâmica piezoelétrica é facilmente encontrada no mercado a um custo de R\$20,00.

4.6.2.2 Análise por faixa de frequência de 5 kHz

O sinal do *sweep*, de 10 kHz a 100 kHz, foi dividido em 18 intervalos de 5 kHz para verificar qual faixa de frequência apresenta a melhor separabilidade entre os óleos de

transformadores. Apesar da frequência de ressonância ser em torno de $45\text{kHz} \pm 1\text{kHz}$, uma faixa de frequência que se mostra promissora para análise é a de 55 kHz a 60 kHz.

As medidas das nove amostras realizadas no LMI (A1 a A9), foram unidas com outras medidas de *sweeps* (A10 a A13) realizadas no LATM (Laboratório de Alta Tensão e Medidas) em São Carlos na USP. Os valores da amplitude para a faixa de frequência de 55 kHz a 60 kHz são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Amplitude de pico a pico na faixa de frequência de 55 kHz a 60 kHz para os óleos.

Óleo	LMI									LATM			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13
Óleo 1													
Virgem_1	0,519	0,587	0,579	1,294	1,294	1,285	1,422	1,343	1,347	1,182	1,158	1,246	1,401
Regenerado_1	0,699	0,760	0,748	1,396	1,360	1,346	1,481	1,420	1,498	1,418	1,312	1,520	1,496
Sujo_1	0,937	0,946	0,864	1,396	1,396	1,481	1,511	1,571	1,567	1,775	1,339	1,560	1,509
Queimado_1	0,994	1,025	1,023	1,399	1,376	1,357	1,534	1,534	1,476	1,698	1,405	1,595	1,595
Óleo 2													
Virgem_2	1,202	1,286	1,270	1,198	1,376	1,399	1,432	1,211	1,448	1,443	1,418	1,418	
Regenerado_2	1,399	1,387	1,423	1,513	1,559	1,505	1,568	1,539	1,564	1,495	1,492	1,465	
Sujo_2	1,405	1,405	1,426	1,576	1,612	1,598	1,615	1,593	1,589	1,528	1,560	1,507	
Queimado_2	1,411	1,447	1,442	1,598	1,567	1,550	1,602	1,606	1,628	1,545	1,545	1,542	

Fonte: Autora (2019).

Para fazer uma análise comparativa, os valores das amplitudes da média total e do desvio padrão da Tabela 4.13 foram normalizados e os gráficos da Figura 4.31 foram plotados.

Figura 4.31 – Média e desvio padrão das amostras na faixa de frequência de 55-60 kHz para (a) óleos_1; (b) óleos_1 sem o regenerado_1; (c) óleos_2; (d) óleos_2 sem o regenerado_2; (e) todos os óleos (f) todos os óleos sem o regenerado.

(c)

(d)

(e)

(f)

Fonte: Autora (2019).

A análise na faixa de frequência de 55 kHz a 60 kHz comprova mais uma vez que o método é válido para diferenciar o óleo virgem, do óleo sujo e do óleo queimado utilizando um sistema piezoelétrico de baixo custo. Este sistema se mostra promissor e novos experimentos podem ser realizados abrangendo uma faixa de frequência de 40 kHz a 60 kHz para verificar se podem ser extraídas melhores características dos sinais, tais como média, energia, potência, entre outros.

4.6.2.3 Medida da velocidade de propagação ultrassônica

Além das medições do *sweep*, também foram realizadas medições da velocidade de propagação ultrassônica. Para isso, o gerador de sinais foi ajustado para emitir um *Burst* senoidal com 10 ciclos e amplitude $10 V_{pp}$ na frequência de 45,9 kHz. Foi realizada a medição da variação (Δ_t) do tempo do início do sinal gerado pelo osciloscópio (sinal na cor verde) até o

tempo de início do sinal recebido pelo transdutor ultrassônico (sinal na cor amarelo), conforme medição realizada para o óleo virgem e apresentada na Figura 4.32.

A velocidade de propagação ultrassônica e a temperatura em que foram realizadas as medições em amostras de água deionizada e nas amostras de óleos virgem_1, regenerado_1, sujo_1 e queimado_1, na frequência de 45 kHz, são apresentadas na Tabela 4.14. Estes valores foram calculados de forma direta, por meio da Equação 1, onde $t_0 = \Delta t$ corresponde aos valores apresentados na Tabela 4.14 e o d_0 é igual a 12,4 cm que corresponde a distância entre os transdutores.

Figura 4.32 – Medição do Δt para a amostra de óleo virgem.

Fonte: Autora (2018).

Tabela 4.14 – Velocidade de propagação para a água e para os óleos coletados em 2016.

Líquido	Temperatura (°C)	Δt (μs)	Velocidade de Propagação (m/s)
Água deionizada	20,5	83,7789	1480,09
Óleo virgem_1	20,7	87,3487	1419,60
Óleo regenerado_1	20,8	87,5188	1416,84
Óleo sujo_1	20,7	87,6588	1414,58
Óleo queimado_1	20,9	87,9589	1409,75

Fonte: Autora (2018).

Assim como nos experimentos da configuração 2, estes valores estão próximos dos valores relatados na literatura: 1480 m/s para a água e 1425 m/s para o óleo de transformador, ambos a 20 °C (CHANG-PING et al., 2010). Além disso, também foi confirmado com os sensores da configuração 4 que a velocidade de propagação ultrassônica é maior para a água e que esta velocidade entre os óleos de transformador, diminui à medida que a amostra de óleo

apresenta maior teor de água. Assim, quanto maior o teor de água, menor é a velocidade de propagação ultrassônica, conforme demonstrado na literatura (HOWELLS; NORTON, 1984). Como a velocidade de propagação ultrassônica não depende da frequência, só foram realizadas as medições para esta frequência de 45,9 kHz.

4.6.2.4 Medidas de Viscosidade

Ensaio de fluxo foram feitos em um reômetro de deformação controlada AR-1000N (TA Instruments, New Castle, USA), com geometria cone placa de aço inoxidável de 60 mm de diâmetro, ângulo de 0° e 30° e um gap de 15 μm . Um sistema Peltier foi utilizado para controle da temperatura. Para esses ensaios medidas de viscosidade foram obtidas a uma taxa de cisalhamento constante de 1500 s^{-1} e temperatura de 20 °C, durante um período de 300 segundos. A Figura 4.33a apresenta o gráfico na viscosidade em função do tempo para as amostras de óleo 1, coletadas em 2016 e a Figura 4.33b para as amostras de óleo 2, coletadas em 2018.

Figura 4.33 – Viscosidade das amostras de óleos: (a) 1 e; (b) 2.

Fonte: Autora (2018).

As viscosidades médias para os óleos 1 são: 17,56; 16,21; 16,63 e 15,74 mPa.s para as amostras de óleo virgem, regenerado, sujo e queimado, respectivamente. Enquanto que as viscosidades médias para os óleos 2 são: 17,75; 16,11; 16,22 e 17,12 mPa.s para as amostras de óleo virgem, regenerado, sujo e queimado, respectivamente. A partir dos gráficos apresentados na Figura 4.33 e das médias das viscosidades, observa-se que a viscosidade não é

um bom parâmetro para ser relacionado com o teor de água em amostras de óleos de transformadores, uma vez que esse parâmetro varia muito pouco entre as amostras de óleo e que a viscosidade não apresenta um comportamento linear conforme o aumento do teor de água nas amostras.

Também foi feita a medição da viscosidade de uma amostra de óleo vegetal virgem, a média da viscosidade dessa amostra foi de 60,36 *mPa.s*. Assim como relatado na norma (ABNT, 2017) e a partir dos resultados obtidos, conclui-se que a viscosidade faz parte dos ensaios físico químicos investigativos, porém, é não essencial, mas pode ser utilizada para estabelecer identificação do tipo de óleo, uma vez que um óleo mineral virgem apresenta uma viscosidade de 17,6 *mPa.s* enquanto que o óleo vegetal virgem apresenta uma viscosidade de aproximadamente 60,4 *mPa.s*

4.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas e detalhadas quatro configurações testadas para análise acústica de óleo mineral isolante. Cada uma delas apresentam suas vantagens e limitações. Foi visto que na primeira configuração testada o método eletroacústico com o auxílio de um classificador foi capaz de diferenciar três meios: ar, água e óleo. Nas configurações 2 e 3 foi possível classificar os quatro tipos de óleo utilizando transdutores ultrassônicos e um hidrofone, respectivamente. Tanto na configuração 2 quanto na 3, a frequência que apresenta os melhores resultados para a distinção dos óleos é a frequência de 5 MHz. Na configuração 4, foi apresentado um sistema piezoelétrico de baixo custo, onde é possível diferenciar amostras de óleo virgem de amostras de óleo sujo e queimado. Também foram apresentadas medidas de viscosidade e da velocidade de propagação das amostras de óleo de transformador utilizadas. O próximo capítulo apresenta as conclusões desta tese.

Capítulo 5

Considerações finais

Esta tese apresenta o estudo de uma técnica acústica aplicada a verificação de características em amostras de óleo de transformadores, integrando como sensores, transdutores ultrassônicos, hidrofone, e um transdutor piezoelétrico termoformado. No capítulo um foi introduzido o tema, a motivação e os objetivos desta tese.

No capítulo dois foi feita uma revisão na literatura para apresentar algumas técnicas de análise em óleo mineral isolante, especificamente a análise físico-química, análise de gases dissolvidos (DGA) e análise acústica em líquidos. Adicionalmente, também foi realizado um levantamento histórico relacionados aos eletretos, piezoelectricidade e piezoeletretos, que são base para desenvolvimento do transdutor piezoelétrico utilizado nos experimentos das configurações 1 e 4 e apresentado no capítulo três.

No capítulo quatro foi apresentada o método e os resultados de quatro de suas configurações. Foi visto que na configuração 1, o transdutor piezoelétrico, com o auxílio de um classificador, é capaz de classificar três meios: ar, água e óleo de transformador e que para cada um desses meios o transdutor piezoelétrico apresenta uma assinatura específica em que é possível classifica-los de forma visual. Com os resultados desta configuração foi publicado o artigo intitulado “*Low-cost electro-acoustic system based on ferroelectret transducer for characterizing liquids*” na revista Measurements da Elsevier em janeiro de 2019 (PALITÓ et al., 2019a).

Na configuração 2, foi demonstrado que medidas ultrassônicas poderiam ser usadas para monitorar o teor de água no óleo do transformador. Para investigar adequadamente o teor de água presente em quatro tipos de óleos (virgem_1, regenerado_1, sujo_1 e queimado_1), foram realizados experimentos utilizando sensores ultrassônicos da Olympus, separados por uma distância fixa (10 cm) em quatro frequências: 2,25; 3,5; 5,0 e 10 MHz e para investigar qual dessas frequências é mais adequada à caracterização das amostras de óleos de transformadores. Estas medidas foram comparadas com as medidas do teor de água da análise física e química fornecidas pela empresa Potencial. A partir disso, constatou-se que os transdutores de ultrassom operando em 5 MHz são mais sensíveis a variações no óleo. Após a realização de novas medições com transdutores de 5 MHz, foi possível identificar que óleos com maior teor

de água apresentam sinais com maiores amplitudes. No entanto, o aumento da amplitude do sinal não é linear com o teor de água. A velocidade de propagação ultrassônica também foi determinada para amostras de água e óleo e, conforme observado, a velocidade do som decai com o aumento da umidade. Com estes resultados, um outro artigo foi aceito pela comunidade acadêmica e intitulado “*Investigation of Water Content in Power Transformer Oils through Ultrasonic Measurements*”. Este artigo foi apresentado na *Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena* (CEIDP) promovida pelo IEEE em outubro de 2018 (PALITÓ et al., 2018).

A configuração 3 pode ser vista como um aperfeiçoamento da configuração 2, onde foi utilizado um hidrofone de alta precisão como sensor receptor. Nesta configuração a distância entre os sensores (emissor e receptor) foi ajustada conforme cálculo do campo próximo, para que o sinal pudesse ser capturado na máxima amplitude de cada frequência. As frequências analisadas foram: 1,0; 2,25; 3,5; 5,0 e 10,0 MHz, nas amostras de óleo virgem_1, regenerado_1, sujo_1 e queimado_1. Conforme resultados apresentados é possível concluir que a melhor frequência para a aplicação da caracterização de óleos de transformador, é a frequência de 5 MHz, apesar das outras também terem demonstrado o aumento da amplitude dos sinais com o aumento do teor de água presente nas amostras de óleo.

As configurações 2 e 3 utilizando sensores comerciais se mostram válidas para o estudo, porém tratam-se de uma aplicação de alto custo visto que os transdutores de imersão Olympus custam em torno de U\$ 400,00 cada, e o hidrofone possui um custo de aproximadamente U\$ 3.000,00. É importante ressaltar ainda que a configuração 3, além de ser mais trabalhosa experimentalmente, devido ao ajuste dos transdutores para cada frequência, a mesma ainda requer o uso de um amplificador de potência, o que encarece ainda mais o sistema. Assim, a configuração 2 se mostra mais promissora para a aplicação no auxílio a análise de óleo de transformador devido ao menor custo e o fácil manuseio dos experimentos.

Por fim, é proposta a configuração 4 que faz uso de uma cerâmica piezoelétrica e do transdutor piezoelétrico desenvolvido pelo Grupo de Alta Tensão e Materiais (Gatm). A metodologia adotada nesta configuração analisa a amplitude de *sweeps* senoidais que abrangem a faixa de frequência de 10 kHz a 100 kHz. Os experimentos foram feitos no ar, na água e em 8 tipos de óleos de transformadores, divididos em: virgem_1, virgem_2, regenerado_1, regenerado_2, sujo_1, sujo_2, queimado_1 e queimado_2. Os resultados da análise dos sinais de *sweep* demonstram que é possível diferenciar as amostras de óleo virgem (1 e 2), das amostras de óleo sujo (1 e 2) e queimado (1 e 2). A distinção entre o óleo regenerado e os demais óleos, só foi possível na análise das amostras de óleos 2. Também foi realizada uma

análise em frequência utilizando a FFT, onde foi constatado que não é possível fazer a distinção dos óleos utilizando a frequência de ressonância do sinal do *sweep*, nem a magnitude da FFT como parâmetros. Ainda nesta configuração, foram analisadas faixas de frequências de 5 kHz. Novas medidas realizadas no LATM foram incorporadas ao estudo, sendo um total de 13 amostras para os óleos 1 e 12 amostras para os óleos 2. A faixa de frequência em que foram obtidos bons resultados em todas as amostras testadas foi a de 55 kHz a 60 kHz, em que foi confirmado o comportamento dos resultados da análise do *sweep*. Esta configuração apresenta um desvio padrão maior, quando comparada com as configurações 2 e 3, porém em termos de custos (R\$), esta apresenta o maior baixo custo. Além disso, um protótipo para realização de testes preliminares em campo, pode ser desenvolvido utilizando esta configuração.

A caracterização dos óleos de transformadores por meio da análise acústica se mostra promissora e a mesma pode ser aplicada em campo onde é possível fazer uma análise inicial do óleo de transformador, antes que a mesma seja levada ao laboratório. Em comparação com outros métodos, a análise acústica apresenta algumas vantagens como por exemplo, a sua simplicidade, o custo, é um método rápido pois pode ser aplicado em campo e não há necessidade de utilizar reagentes sofisticados como na análise físico química. Adicionalmente, este método pode ser desenvolvido para diagnósticos online.

O diagnóstico do estado do óleo de transformador, independentemente do método a ser utilizado é uma importante ferramenta utilizada pelas concessionárias do setor elétrico que visam o fornecimento de uma energia elétrica de qualidade e confiável, uma vez que o óleo mineral isolante é um dos principais responsáveis pelo bom funcionamento destes equipamentos e o monitoramento do óleo visa reduzir custos de manutenção, minimizar falhas, e reduzir o prejuízo por parte das concessionárias ocasionados por paradas não programadas. Este estudo traz contribuições relevantes para a comunidade acadêmica, uma vez que a análise acústica, vem crescendo e vem sendo estudada na última década para aplicação na análise de óleos de transformadores, conforme trabalhos apresentados na introdução desta tese.

Um novo sensor foi desenvolvido pelo Grupo de Alta Tensão e Materiais, com base na tecnologia 3D, e testes preliminares foram feitos utilizando o método apresentado na configuração 4 desta tese. Os resultados foram publicados no artigo “*Hydrophone based on 3D printed polypropylene (PP) piezoelectret*” da revista *Electronics Letters*, em fevereiro de 2019, em anexo. Portanto, conclui-se que este sensor se mostra promissor e sugere-se a aplicação deste na classificação de óleos de transformadores (PALITÓ et al., 2019b).

Referências

- ADAMOWSKI, J.C. et al. Ultrasonic measurement of density of liquids. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.97, p.354-361, Jan. 1995.
- _____. Caracterização de líquidos por ultra-som. In: ADAMOWSKI, J.C. **Sensores: teoria e aplicações**. Ribeirão Preto: ATCP Engenharia Física, [201-?]. Cap.4. Disponível em: <http://www.atcp.com.br/imagens/produtos/ceramicas/artigos/Sensores_Teoria_e_Aplicacoes.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- 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: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2003, Albuquerque. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. p.225-228.
- _____. Piezoelectricity in multi-air voids electrets. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2005, Nashville. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005. p.669-672.
- _____. Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of fluoropolymer-electret films. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.13, n.5, p.979-985, 2006.
- ALTAFIM, R.A.P. et al. Discharge patterns in three-layer ferroelectret systems with perforated polymer films. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS, 13., 2008, Tokyo. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008. p.92.
- _____. Template-based fluoroethylenepropylene piezoelectrets with tubular channels for transducer applications. **Journal of Applied Physics**, v.106, n.1, p.014106 – 014106-5, 2009.
- ARVIND, D.; KHUSHDEEP, S.; DEEPAK, K. Condition monitoring of power transformer: a review. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: Latin America, T and D-LA, 2008, Bogota. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2008.
- ASHER, R.C. Ultrasonics in chemical analysis. **Ultrasonics**, v. 25, p. 17-19, 1987. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X87900047>>. Acesso em: 13 dez. 2016.
- ASSAGRA, Y.A.O. et al. Different piezoelectric structures applied to acoustic detection of impulse and corona partial discharges. In: ANNUAL REPORT CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2013, Shenzhen. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2013. p.1242-1245.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7070**: Guia para amostragem de gases e óleos em transformadores e análise dos gases livres e dissolvidos. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. **NBR 7274**: Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço. Rio de Janeiro, 2012.
- _____. **NBR 12133**: Líquidos isolantes elétricos – determinação do fator de perdas dielétricas e da permissividade relativa (constante dielétrica) – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60156**: Líquidos isolantes — determinação da rigidez dielétrica à frequência industrial — método de ensaio. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 10710**: Líquido isolante elétrico — determinação do teor de água. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 14248**: Produtos de petróleo — determinação do número de acidez e basicidade — método do indicador. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7148**: Petróleo e derivados de petróleo — determinação da massa específica, densidade relativa e °API — método do densímetro. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 6234**: Óleo mineral isolante — determinação da tensão interfacial de óleo água pelo método do anel — método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 14483**: Produtos de petróleo - determinação da cor - método do colorímetro ASTM. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 10576**: Óleo mineral isolante de equipamentos elétricos - diretrizes para supervisão e manutenção. Rio de Janeiro, 2017.

AZEVEDO, C.H.B. **Metodologia para a eficácia da detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção em transformadores de potência imersos em óleo isolante**. 2009. 92f. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.

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

BANGGOOD. **Placa ultra-sônica do transdutor piezoelétrico ultra-sônico da limpeza de 40khz 35W**. Disponível em: <https://www.banggood.com/pt/40khz-35W-Ultrasonic-Piezoelectric-Cleaning-Transducer-Ultrasonic-Plate-p-1046712.html?cur_warehouse=CN>. Acesso em: 20 fev. 2019.

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

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

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

_____. Ferroelectrets: polymer-foam space-charge electrets with ferroelectric-like behavior. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS, 12., 2005, Salvador. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, 2005. p.24-27.

BJØRNDAL, E.; FROYSA, K.E. Acoustic methods for obtaining the pressure reflection coefficient from a buffer rod based measurement cell. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.55, n.8, p.1781-1793, Aug. 2008. Doi:10.1109/TUFFC.2008.862.

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, 1968. v.1.

CAMPI, R.L. **Modelagem fuzzy da concentração dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante de transformadores baseada em resultados de ensaios físico-químicos**. 2014. 143p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Doi:10.11606/D.18.2014.tde-07032014-143351.

CAPRON, B.A.; HESS, D.W. Microscopic models of piezoelectric polymers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v.33, n.1, p.33-40, 1986.

CHALLIS, R.E. et al. A Wide bandwidth spectrometer for rapid ultrasonic absorption measurements in liquids. **Journal of the Acoustical Society of American**, v.90, n.2, p.730-740, Aug. 1991. Doi: <http://doi.org/10.1121/1.401943>.

CHAUDHURI, A. et al. Mass fraction measurements in controlled oil-water flows using noninvasive ultrasonic sensors. **Journal of Fluids Engineering**, v.136, n.3, p.031304-031304-8, 2014.

COURDEC, D.; BOURASSA, P.; MUIRAS, J.M. Gas-in-oil criteria for the monitoring of self-contained oil-filled power cables. In: IEEE ANNUAL REPORT – CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 1996, San Francisco. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1996. v.1, p.283-286.

DATALINK ENGENHARIA ELÉTRICA. **A Importância da análise de óleo para transformador**. Disponível em: <<http://datalink.srv.br/artigos-tecnicos/a-importancia-da-analise-de-oleo-para-transformador/>>. Acesso em: 6 mar. 2017.

DE MEDEIROS, L. J. et al. Piezoelectret-based hydrophone: an alternative device for vibro-acoustography. **Measurement Science and Technology**, v. 26, n. 9, p. 095102, 2015.

DUVAL, M. Dissolved gas analysis: it can save your transformer. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v.5, n.6, p.22-27, 1989.

_____. A Review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v.18, n.3, p.8-17, 2002.

EGGERS, F.; KAATZE, U. Broad-band ultrasonic measurement techniques for liquids. **Measurement Science and Technology**, v.7, n.1, p.1-9, Jan. 1996.

ELETRIAL4U. **Transformer insulating oil and types of transformer oil**. 2019. Disponível em: <<https://www.electrical4u.com/transformer-insulating-oil-and-types-of-transformer-oil/>>. Acesso em: 7 fev. 2019.

EMSLEY, A.M. et al. Degradation of cellulosic insulation in power transformers. Part 3: effects of oxygen and water on ageing in oil. **IEE Proceedings Science, Measurement and Technology**, v.147, p.115-119, 2000.

FALCONI, D.R. **Sensor piezelétrico baseado na tecnologia dos eletretos termo-formados: aprimoramentos dos processos de produção**. 2010. 99p. Dissertação (Mestrado) - 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: 10 jun. 2016.

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

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

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.

FERREIRA, D.A.P. et al. Detection of acoustic emissions from partial discharges in distribution transformers with piezoelectret transducers. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENON, 2017, Forth Worth. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2017. p.381-384.

FRANCO, E.E.; ADAMOWSKI, J.C.; BUIOCHI, F. Ultrasonic sensor for the presence of oily contaminants in water. **Dyna**, v.79, n.176, p.4-9, 2012.

FRANCO GUZMÁN, E.E. **Medição de propriedades viscoelásticas de líquidos por ultrassom**. 2010. 95p. Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Doi:10.11606/T.3.2010.tde-20082010-165311.

FUKADA, E. History and recent progress in piezoelectric polymers. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v.47, n.6, p.1277-1290, 2000.

FURUKAWA, T. Piezoelectricity and pyroelectricity in polymers. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v.24, n.3, p.375-394, 1989.

GALLOWAY, M.M. Texture analysis using grey level run lengths. **NASA STI/Recon Technical Report N**, v. 75, p. 172-179, 1974.

GEORGE, T.; RUFUS, E.; ALEX, Z.C. Quality analysis of transformer oil in hermitically sealed tank using ultrasonic lamb wave sensor. **Indian Journal of Science and Technology**, v.9, n.20, May 2016. Doi: 10.17485/ijst/2016/v9i20/80223.

GERHARD-MULTHAUPT, R. Less can be more. Holes in polymers lead to a new paradigm of piezoelectric materials for electret transducers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.9, n.5, p.850-859, 2002.

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

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

GOMES, L. T. Effect of damping and relaxed clamping on a new vibration theory of piezoelectric diaphragms. **Sensors and Actuators A: physical**, v. 169, n. 1, p. 12-17, 2011.

GOODFELLOW. **Fluorinated ethylene propylene copolymer - film (FP341050)**. Disponível em:<<http://www.goodfellowusa.com/>>. Acesso em: 12 July 2014.

GUTNIK, Y. et al. Piezoelectret sensors detect geometry-related modifications of the acoustical signatures from partial discharges in an electrical equipment chamber. In: IEEE CONFERENCE ON

ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2012, Montreal. **Proceedings...** Montreal: Omnipress, 2012. v.1, p.108-113.

HALE, J.M. Ultrasonic density measurement for process control. **Ultrasonics**, v. 26, p. 356-357, 1988. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0041624X88900364>>. Acesso em: 13 dez. 2016.

HIGUTI, R.T.; ADAMOWSKI, J.C. Ultrasonic densitometer using a multiple reflection technique. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v. 49, n.9, p.1260-1268, Sept. 2002. Doi: 10.1109/TUFFC.2002.1041543.

HIGUTI, R.T.; FURUKAWA, C.M.; ADAMOWSKI, J.C. Characterization of lubricating oil using ultrasound. **Journal of the Brazilian Society Mechanical Sciences**, v.23, n.4, p.453-461, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-73862001000400006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 fev. 2017.

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, 2003, Albuquerque. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. p.40-43.

HOCHE, S.; HUSSEIN, M.A.; BECKER, T. Density, ultrasound velocity, acoustic impedance, reflection and absorption coefficient determination of liquids via multiple reflection method. **Ultrasonics**, v.57, p.65-71, Mar. 2015. Doi: <http://doi.org/10.1016/j.ultras.2014.10.017>.

_____. Ultrasound based density determination via buffer-rod-1 techniques: a review. **Journal of Sensors and Sensor Systems**, v. 2, p. 103-125, 2013. Doi:10.5194/jsss-2-103-2013.

HOWELLS, E.; NORTON, E.T. Parameters affecting the velocity of sound in transformer oil. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, n.5, p.1111-1115, 1984.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **C57.104-1991**: IEEE guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers. New York, 1991.

KAATZE, U.; WEHRMANN, B.; POTTEL, R. Acoustical absorption spectroscopy of liquids between 0.15 and 3000 MHz: high-resolution ultrasonic resonator method. **Journal of Physics E: scientific instruments**, v.20, n.8, p.1025-1030, Aug. 1987.

KAATZE, U. et al. Ultrasonic spectroscopy of liquids. Extending the frequency range of the variable sample length pulse technique. **Measurement Science and Technology**, v.4, n.11, p.1257-1265, Nov. 1993.

KOCH, M.; KRUGER, M. Measuring and analyzing the dielectric response of power transformers. **High Voltage Engineering**, v.35, n.8, p.1933-1939, 2009.

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

KUSKIBIKI, J. et al. VHF/UHF range bioultrasonic spectroscopy system and method. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.42, n.6, p.1028-1039, Nov. 1995. Doi: 10.1109/58.476547.

LAPWORTH, J. A Novel approach (Scoring System) for integrating dissolved gas analysis results into a life management system. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE REPORT, 2002, Boston. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2002. p.137-144.

LI, S.; CHEN, S. Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps. **Sensors and Actuators A: physical**, v. 104, n. 2, p. 151-161, 2003.

LORENCINI BRASIL. **Análise de óleo**. Disponível em: <<http://www.lorencinibrasil.com.br/analise-de-oleo.html>>. Acesso em: 3 jan. 2017.

LUPI FILHO, G. **Comparação entre os critérios de diagnósticos por análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador de potência**. 2012. 148p. Dissertação (Mestrado em Sistemas Elétricos de Potência) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MA, H.; SAHA, T. K.; EKANAYAKE, C. Statistical learning techniques and their applications for condition assessment of power transformer. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 19, n. 2, p. 481-489, 2012.

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.

MARQUES, A.P. et al. Técnicas preditivas de manutenção em transformadores de potência um estudo de caso. In: WORLD CONGRESS ON SYSTEMS ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY, 2013, Porto. **Proceedings...** Porto: COPEC – Science and Education Research Council, 2013. v.1.

_____. Method for the evaluation and classification of power transformer insulating oil based on physicochemical analyses. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v.33, n.1, p.39-49, Jan./Feb. 2017.

McCLEMENTS, D.J.; FAIRLEY, P. Ultrasonic pulse-echo reflectometer. **Ultrasonics**, v.29, p.58-62, 1991.

MEDEIROS, K.A.R. et al. Optimization of flow rate measurement using piezoelectric accelerometers: application in water industry. **Measurement**, v. 91, p. 576-581, 2016.

MEDEIROS, L.J. **Hidrofone ultrassônico com piezoeletreto como elemento transdutor**. 2014. 135p. Dissertação (Mestrado) - 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: 9 set. 2014.

MEDEIROS, L.J. et al. Piezoelectret-based hydrophone: an alternative device for vibro-acoustography. **Measurement Science and Technology**, v.26, p.095102, 2015.

MENG, G.; JAWORSKI, A.J.; WHITE, N.M. Composition measurements of crude oil and process water emulsions using thick-film ultrasonic transducers. **Chemical Engineering and Processing: process intensification**, v.45, n.5, p.383-391, 2006.

MILASCH, M. **Manutenção de transformadores em líquido isolante**. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

MINAZARA, E. et al. Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting. **Ultrasonics**, v. 44, p. e699-e703, 2006.

MORAIS, D.R. **Ferramenta inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no óleo isolante**. 2004. 101p. Dissertação (Mestrado) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MORAVEJ, Z.; BAGHERI, S. Condition monitoring techniques of power transformers: a review. **Journal of operation and Automation in power Engineering**, v.3, n.1, p.71-82, 2015.

MURATA. **Piezoelectric diaphragms**. Disponível em: <<https://www.murata.com/products/sound/diaphragm>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

OLYMPUS. **Transdutores para ensaios por imersão**. Disponível em: <[https://www.olympus-ims.com/pt/ultrasonic-transducers/immersion/#!cms\[tab\]=%2Fpanametrics-ndt-ultrasonic%2Fimmersion%2Foverview](https://www.olympus-ims.com/pt/ultrasonic-transducers/immersion/#!cms[tab]=%2Fpanametrics-ndt-ultrasonic%2Fimmersion%2Foverview)>. Acesso em: 18 fev. 2019.

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.

PALITÓ, T.T.C. et al. Acoustic detection of single and multiple air-gap partial discharges with piezoelectrets transducers. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2014, Des Moines. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2014. p.216-219.

_____. Investigation of water content in power transformer oils through ultrasonic measurements. In: IEEE CONFERENCE ON ELECTRICAL INSULATION AND DIELECTRIC PHENOMENA, 2018, Cancún. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2018. p.279-282.

_____. Low-cost electro-acoustic system based on ferroelectret transducer for characterizing liquids. **Measurement**, v.131, p.42-49, 2019a.

_____. Hydrophone based on 3D printed polypropylene (PP) piezoelectret. **Electronics Letters**, v.55, n.4, p.203-204, 2019b.

PAPADAKIS, E.P. Buffer-rod system for ultrasonic attenuation measurements. **Journal of the Acoustical Society of American**, v.44, p.1437-1441, 1968. Doi: <http://dx.doi.org/10.1121/1.1911279>.

PHADUNGTHIN, R. et al. Analysis of insulating oil to evaluate the condition of power transformer. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER, TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY, 2010, Chiang Mai*. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010. p.108-111.

PRECISION ACOUSTICS. **Needle hydrophones**. Disponível em: <<https://www.acoustics.co.uk/product-category/pressure-measurement/needle-hydrophones/>>. Acesso em: 18 fev. 2019.

PUTTMER, A.; HAUPTMANN, P.; HENNING, B. Ultrasonic density sensor for liquids. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control**, v.47, n.1, p.85-92, Jan. 2000. Doi:10.1109/58.818751.

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

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.104112-104127, 2007.

RAMOS, T.S. **Força de radiação acústica produzida por ondas estacionárias de ultrassom**. 2017. 125p. Tese (Doutorado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Doi:10.11606/T.3.2017.tde-06122017-085952.

REIS, C.F. et al. Comparative analysis between impulsive detection methods applied on partial discharge acoustic signals. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2014, Montevideo. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2014. p.418-421. Doi: 10.1109/I2MTC.2014.6860779.

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

ROGERS, R.R. Experiences in the interpretation of incipient faults in power transformers by dissolved gas-in-oil chromatography analysis (a progress report), minutes of forty. In: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE OF DOUBLE CLIENTS, 1975, Watertown. **Proceeding...** Watertown: Double Engineering, 1975. seção 10-201.

SAHA, T.K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.10, n.5, p.903-917, 2003a.

_____. Review of time-domain polarization measurements for assessing insulation condition in aged transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.18, n.4, p.1293-1301, 2003b.

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

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

SHIRANE, G.; SAWAGUCHI, E.; TAKAGI, Y. Dielectric properties of lead zirconate. **Physical Review**, v.84, n.3, p.476-481, Nov. 1951.

SHUNG, K.K.; CANNATA, J.M.; ZHOU, Q.F. Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: a review. **Journal of Electroceramics**, v.19, n.1, p.141-147, 2007.

SOUZA, D.C.P. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos: um estudo de caso**. 2008. 102f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

SUWANASRI, T. et al. **Diagnostic techniques to evaluate internal condition of power transformer**. Pattaya: ECTI-CON, 2009.

TINOCO, H.A.; MARULANDA, D.J. Damage identification in active plates with indices based on Gaussian confidence ellipses obtained of the electromechanical admittance. **Journal of Nondestructive Evaluation**, v.34, n.3, p.28, 2015.

TOKITOU, K.I.; SHIDA, K. The Discrimination between water and oil using ultrasonic sensor. **IEEE Transactions on Sensors and Micromachines**, v. 124, n.11, p. 415-420, 2004.

TRAINER, M. Kelvin and piezoelectricity. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.10, p.842-861, 2003.

TYURYUMINA, A.; BATRAK, A.; SEKACKIY, V. Determination of transformer oil quality by the acoustic method. **MATEC Web of Conferences**, v.113, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711301008>.

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

WANG, M.; VANDERMAAR, A.J.; SRIVASTAVA, K.D. Review of condition assessment of power transformers in service. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v.18, n.6, p.12-25, Nov./Dec. 2002. Doi: 10.1109/MEI.2002.1161455.

WITHERS, P.M. Ultrasonic, acoustic and optical techniques for the non-invasive detection of fouling in food processing equipment. **Trends in Food Science & Technology**, v.7, n.9, p.293-298, 1996.

XIAO, J. Determining water volume fraction for oil-water production with speed of sound measurement. **Saudi Aramco Journal of Technology**, Summer, Aug. 2015.

YANG, H.T.; HUANG, Y.C. Intelligent decision support for diagnosis on incipient transformer faults using self-organizing polynomial networks. **IEEE Transactions on Power Systems**, v.13, n.3, p.946-952, Aug. 1998.

ZHANG, P. et al. Influence of charging parameters on piezoelectricity for cellular polypropylene film electrets. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRETS, 12, 2005. **Proceeding...** Piscataway: IEEE Service Center, 2005. p.39-42.

ZHANG, X.; GOCKENBACH, E. Asset-management of transformers based on condition monitoring and standard diagnosis. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v.24, n.4, p.26-40, 2008.

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.

ZHU, J. Analysis of moisture in transformer oil. **Electric Power**, v.3, p.61-62, 1996.

Apêndice A – Artigos Publicados

2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena – Cancun – Mexico

Investigation of water content in power transformer oils through ultrasonic measurements

T.T.C. Palit¹, Y.A.O. Assagra^{1,3}, R.A.C. Altafim¹, J.P.P. Carmo¹, A.A.O. Carneiro² and R.A.P. Altafim^{1,3}

¹Department of Electrical and Computer Engineering, University of São Paulo, São Carlos-Brazil

²Department of Physics, University of São Paulo, Ribeirão Preto-Brazil

³Department of Computer Systems, Federal University of Paraíba, João Pessoa-Brazil

Abstract- Transformers are one of the most important equipment found in electrical power systems. Thus, their status must be constantly monitored to avoid critical failures. The analysis of the dissolved gas (DGA) in the oil is one of the most important technique to detect short-circuits and partial discharges. However, this technique has a serious drawback to get the percentage of water absorbed by the oil, requiring other kind of predictive technique. In this context, this paper presents a technique to detect the water content in oils, which uses ultrasound measurement. The measurement results showed that after the frequency scan, the best results for determining the percentage of water in insulating oils were obtained at frequencies around 5MHz. These preliminary results revealed very promising.

I. INTRODUCTION

An oil-immersed power transformer is an equipment of major importance in power systems and, it requires periodical maintenance and constant monitoring to keep it in operating conditions. The oil in this equipment is responsible for cooling and to provide electrical insulation. Over time, some physical and chemical properties of the oil, such as color, viscosity and water content, varies due to environmental conditions and high electrical field exposure [1]. Therefore, a significant number of studies have presented effective solutions for monitoring transformers and to perform predictive maintenance [2, 3], and many of them have as focus the oil analysis. There are two studies widely employed in preventive programs, e.g., the dissolved gas analysis (DGA) in the oil and the physical-chemical analysis [4]. The DGA is useful for detecting electrical disturbances and thermal decomposition in internal components of transformers. The oil is composed of hydrocarbon molecules and during an electrical breakdown or an occurrence of partial discharges it decomposes forming gases. Hydrogen (H₂) and acetylene (C₂H₂) are some of these gases and their percentage can be correlated with a transformer internal defect [5]. On the other hand, the physical-chemical analysis indicates changes in physical and chemical oil parameters that are also crucial to the transformer operation. For example, the percentage of water in the oil drastically reduces the dielectric breakdown strength of the altered oil.

According to the review made by Arvind D. *et al.* [2], the transformer monitoring techniques can be divided into six categories: Thermal Analysis, Vibration Analysis, DGA,

Winding Movement and Deformation, Partial Discharge Analysis and On Load Tap Charger. Notice that the DGA is again presented as one of the monitoring methods. However, according to this classification, oil testing is not mentioned as a monitoring practice, since oil samples are normally tested in laboratory facilities. Despite this consideration, the online oil monitoring has been a study subject for a long time. In the 1990's, capacitive sensors were employed to investigate the moisture content in power transformers [6], as it has also been done recently [7-9]. Besides, the usage of capacitive sensors seems to be largely affected by the high electro-magnetic fields [10].

Oil analysis gained more interest in techniques seeking for chemical marks of degraded cellulose that may be present in the oil of aged transformers [4, 11]. Nevertheless, the determination of the water content is still an issue since critical levels implies in the oil replacement or reclaim. This is a negative point, as the cost of these operations is directly influenced by the oil condition. Oils with higher levels of water are much more costly to be recycled than those that should be only degasified.

There are a few traditional methods with relation to the moisture analysis, such as Karl Fischer coulometric titration (KFT), Recovery Voltage Measurement, Polarization and Depolarization method, Frequency Domain Spectroscopy, and more recently, fiber optic sensors [10]. All of these methods have their advantages and disadvantages. Although KFT method is recommended for detecting water percentage below 1%, the samples can be directly affected by the external moisture or cellulose present in the oil and may bind water with chemical bonds of different strengths. This results in unsure thermal energies [12].

Another approach to study moisture in oil is the ultrasound, which characterize lubricating oil considering density, acoustic attenuation and propagation velocity [13]. The acoustic method is also employed in transformer oil [14], though, in order to measure the water content, the mixture water-oil must be frozen, providing a much more complex online monitoring. A more practical approach using ultrasonic measurements was done in 2017 by Tyurymina A. *et al.* [15], in which the water content in contaminated oil was monitored using ultrasonic frequencies in the kHz range. Following this concept, this paper presents the use of ultrasonic probes operating in MHz for transmitting and detecting acoustic signals in a transformer oil medium. Different mineral oils

were physically and chemically analyzed by traditional oil testing. Some of these mineral oils included: new oil, reclaimed or processed oil and aged oil. Ultrasonic measurements were performed using different transmitted beam frequencies, in order to determine the most consistent dependency between the ultrasound frequency and distinct oils. The measurement done under a selected frequency showed a relation between the amplitude of the signal in the ultrasonic probe and the water content.

II. EXPERIMENTAL DETAILS

In order to determine the water content present in a transformer oil sample, a setup as schematically represented in Fig. 1 was set. The setup consists of two ultrasonic transducers from Olympus® arranged in a transducer-sensor configuration. Both devices were immersed into the media distanced from each other by 100 mm. An acrylic chamber with height, length and width of 110 mm × 145 mm × 100 mm, respectively, was designed to support the transducers and contain the liquid. To drive the transducer, a function generator from Agilent model 33522A was used in the Burst mode with a sine wave of 5 Vpp. The other transducer, set as a sensor, was connected to an oscilloscope from Keysight model DSOX3024A.

Fig. 1 – Schematic representation of the measuring setup.

Initially, to find an optimal measuring frequency, transducers with distinct operating frequencies (2.25 MHz, 3.5 MHz, 5.0 MHz and 10.0 MHz) were tested in water and oil samples (600 ml). The liquids were carefully checked to avoid air bubbles between the ultrasound transducers before the measurements. The measurements were performed in the following sequence: at first, water was used to fill the acrylic chamber, then the water was replaced by new transformer oil, after by processed oil or by contaminated oil and finally rejected oil. After each measurement, the chamber was properly cleaned to avoid contamination.

Once the most sensitive frequency was found, measurements for each media were again performed to ensure the results. In this procedure, four samples of each media were tested and on each of them five measurements were taken, resulting in a total of 20 measurements for a specific liquid. The measurements consisted in recording the signal amplitude and the time between triggering ($t=0$) and sensing. Based on these recorded values, it was also possible to determine the propagating ultrasonic speed in each medium using Equation 1, where t_0 is the time interval and d_0 is the distance between the transducers (100 mm).

$$c = \frac{d_0}{t_0} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Except when it was new or processed, the oils used during the experiments were collected directly from the transformers or were provided by companies as rejected oil. Thus, there was not much information about their specifications. In order to obtain full data, the oils were tested regarding their physical and chemical properties.

III. RESULTS AND DISCUSSION

A private Brazilian company performed the physical-chemical analysis, and followed the international standards as indicated in Table 1.

TABLE I
TECHNICAL DATA FROM THE TRANSFORM OILS

Test	Standard	New oil	Processed oil	Contaminated oil	Out of service oil
Color	ASTM D 1500	<0.50	0.500	1.000	3.000
Density - 20/4 °C	ASTM D 1298	0.878	0.880	0.872	0.866
Interfacial Tension [mNm]	ASTM D 971	44.80	41.00	37.00	20.00
Water Content [ppm]	IEC 60814	11.00	14.60	38.10	40.40
Neutral Index [mgKOH/g]	ASTM D 974	0.013	0.028	0.042	0.406
Electrical Breakdown Strength [kV]	IEC 60156	63.10	60.50	16.70	17.30
Power Factor [%]	ASTM D 924	0.020	0.020	0.020	0.020

The results clearly indicate that the water content is higher and the electrical breakdown strength is drastically reduced on more contaminated oils.

After performing physical and chemical analysis in the oils, they were tested in the acrylic chamber using the ultrasonic transducers. Table 2 shows the average results for transducers optimized to operate in distinct frequencies and employed in several media. From the data, one can observe that the major discrepancies between the media and the recorded signals were obtained at 5 MHz, providing a reference frequency to perform the measurements.

TABLE II
RECORDED ULTRASONIC SIGNAL FROM WATER AND TRANSFORMER OIL

Liquid	Vpp (mV)			
	2.25 MHz	3.5 MHz	5 MHz	10 MHz
Water	66.78	182.20	237.10	52.48
New oil	54.78	116.66	91.15	2.58
Processed oil	55.50	116.91	96.99	2.93
Contaminated oil	55.80	119.43	100.54	3.23
Out of service oil	56.16	121.66	103.20	3.34

In Fig. 2, samples of the ultrasonic signals recorded at 5 MHz are presented. One can observe that in water the signal amplitude is much higher than in oil. Thus, it is expected that in oils with water content the signal amplitude should also be enhanced.

Fig. 2. Examples of ultrasonic signals recorded at 5 MHz in water and transformer oils.

With the experiment set at 5 MHz, new measurements were conducted on four samples of each media, and from each media, five signals were recorded, providing a total of 20 measurements of each media (water and oil). The average data of the oils measurements are presented in Fig. 3.

Fig. 3 – Ultrasonic measurements from different media conducted at 5 MHz.

These data were compared (in the plot in Fig. 4) with the results provided by the physical and chemical analysis. As one may observe, both measurements present an ascendant curve with the increase in the water content. In samples with low water, the ultrasonic signal is also low. However, as

previously mentioned, as the amount of water increases, the signal amplitude is also enhanced.

Fig. 4 – 5 MHz ultrasonic signal amplitudes confronted with water content from different media.

The speed of the ultrasonic signal was also determined and compared in the analyzed media. The respective values for Water, New oil, Processed oil, Contaminated oil and Out of service oil are: 1485.7 m/s, 1408.8 m/s, 1405.3 m/s, 1404.9 m/s and 1399.6 m/s. These values are in the same order of magnitude as those found in the literature (1480 m/s for water and 1425 m/s for transformer oil) [14]. And the decay in the sound speed with the moisture increase also follows the results reported in the work of Howells E. and Norton E. T. [16].

IV. CONCLUSIONS

In the present paper, it was demonstrated that ultrasonic measurements could be used to monitor the water content in transformer oil. To proper investigate the water content present in the oils, physical and chemical analyses were performed. Further, it was investigated the most suitable ultrasound frequency that should be employed in the measurements. From this, it was noticed that ultrasound transducers operating in 5 MHz are more sensitive to variations in the oil. After performing new measurements with 5 MHz transducers, it was possible to identify that oils with higher water content presents signals with higher amplitudes. However, the increase of the signal amplitude is not linear with the water content. The ultrasonic propagation speed was also determined for water and oil samples, and as observed, the sound speed decays with the increase of the moisture.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thanks the Brazilian agency National Council of Scientific Research (CNPq) for the financial support, the Potential Brazilian Company for the

physical-chemical analysis, and Agnelo Barros and Rui Bertho for the technical support.

REFERENCES

- [1] M. Hui, T.K. Saha and C. Ekanayake, "Statistical learning techniques and their applications for condition assessment of power transformer," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 2, pp. 481-489, 2012.
- [2] D. Arvind, S. Kishordeep and K. Deepak, "Condition monitoring of power transformer: A review", 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL, 2008, pp. 1-6.
- [3] Z. Moravej and S. Bagheri, "Condition Monitoring Techniques of Power Transformers: A Review", *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* vol. 3, n. 1, pp. 71-82, 2015.
- [4] D. Vrnaljko, V. Haramija and A. Hadzi-Skerlev, "Determination of phenol, m-cresol and o-cresol in transformer oil by HPLC method," *Electric Power Systems Research*, vol. 93, pp. 24-31, 2012.
- [5] H. C. Sun, Y. C. Huang, and C. M. Huang, "A review of dissolved gas analysis in power transformers," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1220-1225, 2012.
- [6] T. V. Oommen, "On-line moisture sensing in transformers," [1991] *Proceedings of the 20th Electrical Electronics Insulation Conference*, Boston, MA, 1991, pp. 236-240.
- [7] Q. Fu, Z. Li and Y. Lin, "Research of On-line Monitoring of Moisture Content in Transformer Oil", in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Chengdu, 2010, pp. 1-4.
- [8] T. Islam, M. F. A. Khan, S. A. Khan, "Moisture measurement of transformer oil using thin film capacitive sensor", in *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf. (PIICON)*, pp. 1-5, Dec. 2014.
- [9] M. S. Mithun, B. Thankachan, "A novel cost effective capacitive sensor for estimating dissolved moisture in transformer oil", in *Proc. 10th Int. Conf. Sens. Technol. (ICST)*, pp. 1-6, Nov. 2016.
- [10] D. K. Mahanta and S. Laskar, "Water Quantity-Based Quality Measurement of Transformer Oil Using Polymer Optical Fiber as Sensor," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 4, pp. 1506-1512, 2018.
- [11] L. Chaim, D. Platts, T. Prevost and X. Shuzhen, "Furan analysis for liquid power transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 28, no. 2, pp. 8-21, 2012.
- [12] M. Koch, S. Tenbohlen and T. Stiel, "Advanced Online Moisture Measurements in Power Transformers" in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (ICCMD)*, Changwon, Korea, April 2-5, 2006.
- [13] R. T. Higuti, C. M. Furukawa and J. C. Adamowski, "Characterization of Lubricating Oil Using Ultrasound", *J. Braz. Soc. Mech. Sci.*, vol.23, n.4, pp.453-461, 2001.
- [14] Z. Chang-ping, H. Yong-liang, S. Ming-lei and L. Long-lui, "The research of moisture detection in transformer oil based on ultrasonic method", in the *2nd International Conference on Information Science and Engineering*, Hangzhou, China, 2010, pp. 1621-1624.
- [15] A. Tyurmina, A. Batrak and V. Sokackiy, "Determination of transformer oil quality by the acoustic method", in *12th International Scientific technical Conference on Electromechanics and Robotics*, vol. 113, 01008, 2017.
- [16] E. Howells and E. T. Norton, "Parameters affecting the velocity of sound in transformer oil", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, n. 5, pp. 1111-1115, 1984.

Low-cost electro-acoustic system based on ferroelectret transducer for characterizing liquids

T.T.C. Palit^{a,*}, Y.A.O. Assagra^b, R.A.P. Altafim^b, J.P. Carmo^a, R.A.C. Altafim^a

^a Electrical and Computer Engineering Department, São Carlos Engineering School, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590 São Carlos, SP, Brazil
^b Computer Systems Department, Informatics Center, Federal University of Paraíba, João Pessoa, PB, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 August 2017

Received in revised form 8 August 2018

Accepted 14 August 2018

Available online 18 August 2018

Keywords:

Acoustic transducers

Piezoelectret

Liquids characterization

ABSTRACT

Several industrial applications require liquid characterization during manufacturing to ensure quality in their products. Examples of such products are those related to food and oil industries in which one of the concerns regards the different concentration of liquids in a mixture. In this context, it is presented a system based on ferroelectret transducers and low-cost technology to perform liquid analysis through acoustic measurements. The developed system is composed of three parts: a piezoelectric actuator, a medium chamber and a ferroelectret transducer (acoustic sensor). The system was assembled with a ferroelectret (with open tubular channels) housed on a cylindrical aluminum case (48 mm × 63 mm) in which a 24 dB preamplifier was mounted. The specifically designed chamber was manufactured in ABS plastic using a 3D printer and the piezoelectric actuator consisted in commercial piezoelectric ceramic which is connect to signal generator configured to generate a sinusoidal sweep between 0 Hz up to 50 kHz during 1 s. In order to characterize the device setup and validate the suitability of the measuring system, three distinct mediums were analyzed (air, water and oil). Through the experimental tests it was identified, on time domain, distinct signatures for each medium, which were later used in a blind classification with a developed algorithm.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Liquid characterization has a great application potential in several productive and research sectors [1–6]. For instance, liquid analysis has a major influence in the food industry, especially in milk production and its derivatives, in which it is important to ensure high quality and fresh-like products with lower processes, time and costs [1]. Another example of its relevance is observed in the oil and gas extraction and petrochemical industries [2] in which precise and reproducible measurements of oil contamination are critical. These stringent requirements are monitored in order to identify environmental hazard, e.g. discharge of water contaminated with oil into the environment [2].

Depending on the application, a liquid substance can be characterized directly or indirectly, by means of its physical, chemical, optical, electrical and acoustic properties, using techniques, such as, chromatography, ultrasonic propagation and impedance measurements [5,6]. A highlighted topic in this area is the method based on the acoustic wave propagation, commonly known as

the acoustic emission (AE) method. This sensitive technique employs acoustic sensors to detect acoustic waves (continuous or pulsed [7,8]) that are transferred to the medium. The propagating waves are then monitored according to their characteristics, such as a attenuation and speed of propagation as a function of frequency. One of the advantages of this powerful technique is that it can be used as a non-destructive method with the possibility to be non-invasive and used in line applications [1,2,6].

The AE acoustic waves can be produced and detected by piezoelectric materials, which are increasingly popular and can be used as both actuators and sensors. Therefore, acoustic methods have been using piezoelectric sensors in many research areas, for example, in medicine for medical imaging applications [9], electrical engineering uses piezoelectric sensors for detecting and in some cases localizing partial discharges [10,11] and the water industry uses piezoelectric accelerometers for the optimization of flow rate measurement [12]. However, a reliable method requires expensive materials and technology, in this context, it is presented a low-cost electro-acoustic measuring system for characterizing liquids based on ferroelectrets, a different type of piezoelectric device and very suitable for acoustic measurements [13].

* Corresponding author.

E-mail address: thamysstamulla@usp.br (T.T.C. Palit).

2. Design

2.1. Electro-acoustic system architecture

The electro-acoustic system developed for characterizing liquids is illustrated in Fig. 1 with a piezoelectric transducer (b), a medium chamber (c) and a ferroelectric transducer (d) in addition a function generator (a) and an oscilloscope (e) are also presented. In this system the function generator is programmed to produce a sinusoidal function (i), 10-volt peak-to-peak (V_{pp}), which drives the piezoelectric actuator causing it to transmit an acoustic signal (ii) through the medium (air, water or oil). The ferroelectric transducer, placed on the other side of the chamber, converts the acoustic signal into an electric signal (iii), which is amplified (iv) and measured by digital oscilloscope.

2.2. Piezoelectric actuator

The piezoelectric actuator is a component composed by piezoelectric ceramic disks adhered to a metal plate of brass or nickel-alloy and coated with a metal layer. By driving the piezoelectric actuator with an electrical signal supplied by the external generator, it can produce sound waves with very low distortion even in high frequencies (kHz range) [14].

These buzzers are employed mainly in electronic devices – for example calculators, clocks, digital cameras and various alarms – to generate sounds. However, due to their reduced cost, these piezoelectric ceramics have been successfully used as sensors or actuators in several scientific studies with a wide range of applications [15–18]. For this study a piezoelectric actuator with a diameter of 35 mm was used to generate acoustic waves.

2.3. The ferroelectric transducer

Ferroelectrets are thin polymeric films with open or closed air cavities that are electrically charged with opposite polarities. This unique characteristic allows the porous films to behave like ferroelectric materials with the advantage of being highly flexible and easily processed [19]. The ferroelectric-like effect observed on most ferroelectrets is comparable to those obtained on piezoelec-

tric ceramics, such as, lead zirconate titanate (PZT) and has stimulated applications.

Different types of ferroelectrets have been developed [19], here the transducer was assembled using ferroelectrets produced with fluorinated-ethylene-propylene (FEP) films and with open tubular channels. This ferroelectret was chosen due to its temperature stability (over 80 °C) and piezoelectricity around 160 pC/N [20].

PVDF (polyvinylidene fluoride) and PZT are both options for handcrafting and tests, each with advantages and drawbacks. For instance, PVDF is more flexible than PZT, however the last presents much higher piezoelectric coefficients. Ferroelectrets, particularly with open-tubular channel, are flexible as PVDF and presents piezoelectric coefficient in the same order of magnitude as PZT, with the advantage of resonance frequency control by changing its channels geometry [21].

The ferroelectret operation principles and its manufacturing process are well described in [20] and it consisted on laminating two 50 μm FEP films at 300 °C with a 100 μm polytetrafluoroethylene (PTFE) template film between them. The template was designed to create a ferroelectret with equally spaced open tubular channels (1.5 mm width and 100 μm height). Changes in the width and height of the tubular channels of these piezoelectric sensors modify their response [21]. The films were carefully cleaned with acetone before the lamination to avoid grease or dust particles. After lamination, the template was removed from the fused FEP layers, forming a two-layer FEP structure with 10 open channels. Aluminum electrodes were evaporated on the outer layers of the structure and the electrical polling was performed applying a direct DC voltage of 3 kV for 10 s for polarization. The measurements performed by Medeiros et al. [22] on underwater applications demonstrated that this type of sensor can detect signals up to 80 kHz. Moreover, it was also demonstrated that this type of sensor presents a much better response in the direction mode [22], e.g., if the acoustic source is placed direct in front of the sensor. However, it is still possible to detect lateral sounds without significant sensitivity when compared with its orthogonal direction. The ferroelectret used on the transducer is shown in Fig. 2.

A cylindrical aluminum case (Fig. 3) was constructed to provide electrostatic shielding and electronic protection for the acoustic transducer in order to complete the transducer. In addition, this

Fig. 1. System architecture, which is composed by (a) a generator, (b) a piezoelectric actuator, (c) an acoustic chamber, (d) an acoustic transducer and (e) an oscilloscope.

Fig. 2. a) FEP ferroelectret with open tubular channel, employed as piezoelectric sensor (top view). b) Schematic drawing of a cross-section view of the open channels.

Fig. 3. (a) Exploded schematic representation of the ferroelectric transducer and respective photos from (b) front and (c) back.

aluminum case is also responsible for conditioning the metal electrodes, backing material and electronic circuit. The backing material made from nylon comprises the layer underlying the piezoelectric element and it is responsible for damping the vibration of the electromechanical sensor, which prevents reflections on the back of the active element and, consequently, avoids interfering with the receiving signal from the transducer. A four-way Mike type connector was used as a channel for powering the electronic circuit, which was performed externally by two 9 V batteries, and for the output of the electrical signal.

Inside the aluminum housing, an electronic circuit composed by a preamplifier, a high-pass filter and a differential amplifier was placed. The preamplifier stage was implemented to provide better impedance match between the piezoelectric sensor and the input of the integrated circuit INA129P that implements the differential amplifier. As showed in Fig. 4, the preamplifier consists of an arrangement around an N-type Junction Field Effect Transistor (JFET) field effect transistor BF245A, configured in self-polarization. This circuit was designed to provide the output volt-

ages V_o^+ and V_o^- (Fig. 4), which are two amplified versions of the input voltage V_{in} . This circuit combines a common-drain amplifier and common source amplifier with resistive source of generation. Therefore, the voltages V_o^+ and V_o^- are respectively:

$$V_o^+ = + \frac{g_m R_s}{1 + g_m R_s} V_{in} \quad (1)$$

$$V_o^- = - \frac{g_m R_d}{1 + g_m R_s} V_{in} \quad (2)$$

In which g_m is the transconductance of the JFET for the bias voltage $V_{bias} = 0V$. The variables R_d and R_s represent respectively the resistances connected into the drain and source of the JFET. Thus, the differential voltage of the preamplifier is:

$$\Delta V_{pre} = V_o^- - V_o^+ = - \frac{g_m}{1 + g_m R_s} (R_d + R_s) \quad (3)$$

since $R = R_d = R_s = 3.9k\Omega$, the differential voltage at the output of the preamplifier results in:

Fig. 4. Schematic of the electronic circuit and respective blocks. In this circuit, the components are D (diode 1N4148), J (JFET BF245A), IA (INA129P), $R_1 = 1M\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$, $R_3 = 10k\Omega$, $R_4 = R_5 = 3.9k\Omega$, $R_6 = 5.6k\Omega$ and $C = 100nF$. Pins G_{in} and G_{out} of IA are for gain setting purposes.

$$\Delta V_{px} = V_o^- - V_o^+ = -\frac{2g_m R}{1 + g_m R} V_n = \frac{7800g_m}{1 + 3900g_m} V_n \quad (4)$$

The measurements revealed a gain ($G_{px} = \Delta V_{px}/V_n$) of 1.6.

The high-pass filter was added after the preamplifier to eliminate the DC components of V_o^- and V_o^+ and simultaneously to filter spectral components with low frequency, since their presence can saturate the differential amplifier that is located after the preamplifier. The high-pass filter is first-order with transfer function according to:

$$H\left(j\frac{f}{f_0}\right) = \frac{j\left(\frac{f}{f_0}\right)}{1 + j\left(\frac{f}{f_0}\right)}, \quad (5)$$

where $f_0 = 1/2\pi R_2 C$ is the lower cutoff frequency.

The instrumentation amplifier model INA129P serves two purposes: first, it converts the voltage ΔV_{px} (the filtered version from ΔV_{px}) from the differential form into a voltage V_{out} with single-ended form; and second, it provides an additional gain G_A . This integrated circuit (IC) features low noise characteristics ($10 \text{ nV}/(\text{Hz})^{1/2}$) and a plane frequency response (constant amplification) up to 500 kHz due to the gain used (10 times the input signal). The gain G_A of INA129P can be programmed using an external resistor R_C [k Ω] between the terminals G_1 and G_2 and is:

$$G_A = \frac{1 + 49.4}{R_C} \quad (6)$$

Therefore, $R_C = 5.6 \text{ k}\Omega$ implies that $G_A = 8.82$.

The electronic circuit is schematically represented in Fig. 4, where it is considered two electronic stages of amplification separated by a high-pass filter providing a final gain of approximately 24 dB, in which the preamplifier is responsible for a gain of 1.6 times (4.08 dB) and the instrumentation amplifier for a gain of 8.82 times (19.84 dB). To reduce external noise, two 9 V batteries were used on the circuit supply.

2.4. Acoustic chamber

The acoustic chamber, also described as medium chamber, with 60 mm in width, 60 mm in height and 70 mm in depth was fabricated in acrylonitrile butadiene styrene (ABS) using a 3D printer. Fig. 5a and b illustrate a CAD model with a view of both sides where the piezoelectric actuator and the ferroelectret transducer are placed. Fig. 5c shows a cross-section view of the model with an internal cavity (tube with diameter of 20 mm and length of 50 mm) and two syringes inputs, through them 20 ml of a specific liquid (water or oil) was injected.

Fig. 5. A CAD model of the acoustic chamber: (a) view of the entrance of the piezoelectric diaphragm; (b) view of the ferroelectret transducer; (c) internal view.

Fig. 6. Schematic representation of the electro-acoustic measurement setup.

3. Experimental results

3.1. Measurement setup and methods

The electro-acoustic system was assembled according to the representation in Fig. 6 and the experiments were performed in three different mediums: air, water and oil, in this order. To investigate the system response on each medium, the piezoelectric ceramic was stimulated, directly, with a frequency sweep, produced in a function generator model Tektronik AFG 3022C with 10 V_{pp} , covering ranges up to 50 kHz, linearly, during a 1 s interval. The resulting acoustic wave was captured by the ferroelectret transducer and recorded in an oscilloscope (Agilent DSO-X 2002A), adjusted with a time window of 1 s (100 ms/div) and a delay of 500 ms so that the time scale is displayed in values from 0 to 1 s.

After adjustments, measurements were conducted initially in the air medium for five consecutive times. Later, to ensure reproducibility, the experiment setup was disassembled and reassembled five times and on each reassembling five new measurements were performed, providing a total amount of 25 measurements for the medium.

This procedure was also employed on water and oil measurements, however, for these procedures, the acoustic chamber was filled with 20 ml of the liquid under analysis and after conducting five consecutive measurements the liquid in the chamber was removed and the setup was disassembled to be cleaned with paper towel and alcohol. In total this procedure was performed five times, providing 25 measurements.

The assembling and disassembling procedures were adopted not only for testing different samples of the same liquid, but also to verify the system robustness. The procedure was completed after performing measurements on the three mediums and repeating them again three times, in different days, resulting in 100 measurements for each medium.

Fig. 7. Response of the electro-acoustic measurement system to the medium: (a) air, (b) water and (c) oil.

Fig. 7 (continued)

3.2. Experimental results and discussions

Fig. 7a,b and c show samples of the acoustic signals detected by the ferroelectric transducer for air, water and oil, respectively. They are presented in the time domain for the same time window and to reduce redundant information only the third measurement of each experiment is plotted for each medium.

From the presented plots one can observe that the signals obtained in air show two regions, which are present in all measurements and they are placed at the time instants of $t_{pk,air1} = 0.08$ s and $t_{pk,air2} = 0.37$ s, while for the water medium, there is a peak at $t_{pk,water1} = 0.03$ s and a concentration at $t_{pk,water2} = 0.55$ s. For the oil, one can observe a third region that is present in all measurement, and these distinct densities are located at the time instants close to $t_{pk,oil1} = 0.03$ s, $t_{pk,oil2} = 0.29$ s and $t_{pk,oil3} = 0.53$ s.

Based on the graphs presented, it is observed that each medium presents a specific behavior/signature, which makes it easier to distinguish them visually. It is also possible to observe that for the same day of experiments, the signals remain stable. However, when different days of experiments are analyzed, a small variation in signal behavior is observed, but the areas highlighted remain practically at the same time instant. These small variations on the signal may be due to the fact that environmental conditions in laboratories are not fully controlled and because the acoustic measurement is susceptible to environmental noises.

Nevertheless, the selected locations ($\{t_{pk,air1}, t_{pk,air2}\}$, $\{t_{pk,water1}, t_{pk,water2}\}$, $\{t_{pk,oil1}, t_{pk,oil2}, t_{pk,oil3}\}$) were observed in all measurements and they were selected to define indicators for a feature extraction, where one could determine the medium under identification. The classification algorithm describing how these indicators were employed is further explained.

After observing a regular behavior in different mediums and singularities on each of them, a classification algorithm was developed

to classify an unknown signal between air, water and oil. To develop this algorithm the most relevant regions and peaks of the mediums were considered and their amplitude averages were determined, to achieve this goal the acoustic signal was split into 10 equally spaced intervals of time and the most relevant were selected for the classification method [23]. For the air and water environments, two time intervals were analyzed: $I_{air,1} = [0, 0.1]$ s and $I_{air,2} = [0.3, 0.4]$ s and $I_{water,1} = [0, 0.1]$ s and $I_{water,2} = [0.5, 0.6]$ s, respectively. For the oil, three intervals were considered: $I_{oil,1} = [0, 0.1]$ s, $I_{oil,2} = [0.2, 0.3]$ s and $I_{oil,3} = [0.5, 0.6]$ s.

The concept behind the classification method is more evident through Fig. 8. The plots g_{air} , g_{water} and g_{oil} in Fig. 8a symbolic represent the signals acquired within the air, water and oil and their respective analyzed intervals. The graph illustrated in Fig. 8b is the bi-dimensional projection of all possible combinations of the g_{air} , g_{water} and g_{oil} indicators ($t_{pk,air1}, t_{pk,air2}$), ($t_{pk,water1}, t_{pk,water2}$), ($t_{pk,oil1}, t_{pk,oil2}, t_{pk,oil3}$). For instance, all possible combinations of indicators for the signal g_{air} are composed by the set of four points ($t_{pk,air1}, t_{pk,air1}$), ($t_{pk,air1}, t_{pk,air2}$), ($t_{pk,air2}, t_{pk,air1}$) and ($t_{pk,air2}, t_{pk,air2}$). For the classification algorithm the points intercepting the 45° diagonal axis can be ignored, e.g., the points ($t_{pk,air1}, t_{pk,air1}$), where $j = k$. Therefore, it is considered only the point ($t_{pk,air1}, t_{pk,air2}$) or ($t_{pk,air2}, t_{pk,air1}$) for $j \neq k$, because one is the transpose of the other. The same applies to all the four combinations of points ($t_{pk,water1}, t_{pk,water2}$) for the water and to all the nine combinations of points ($t_{pk,oil1}, t_{pk,oil2}, t_{pk,oil3}$) for the oil.

The points for a given medium air/water/oil in conjunction with the time intervals will define one or more classification regions of a medium. Additionally, few points can be discarded after the definition of classes due to their redundancy and overlapping with classification regions of other mediums. This statement is illustrated in Fig. 8b, where, two of these points are located in ($t_{pk,oil1}, t_{pk,air2}$) and

Fig. 8. Illustration of the classification method: (a) conceptual signals g_{air} , g_{water} and g_{oil} acquired within the air, water and oil, respectively; and (b) bidimensional projection of the all possible combinations of the indicators $(t_{pk,air1}, t_{pk,air2})$, $(t_{pk,water1}, t_{pk,water2})$, $(t_{pk,oil1}, t_{pk,oil2})$ of the signals g_{air} , g_{water} and g_{oil} .

$(t_{pk,air2}, t_{pk,air1})$. The remaining dots are plotted in Fig. 8b with shapes filled with black, which leads to four classification regions represented by the filled shapes in Fig. 8b. The classification algorithm can thus be applied as follows: a signal $f(t)$ is acquired, its peaks and more interesting regions are extracted, points with the most suitable combinations are placed above the chart of Fig. 8b. The decision of the medium is taken by the majority of points that fall

within a given classification region (e.g., air, water, oil₁ or oil₂). If the event falls out of these regions, the Euclidean distance is considered instead. The points with the most suitable combinations are those ones with peaks nearby the points $(t_{pk,air2}, t_{pk,air1})$, $(t_{pk,water2}, t_{pk,water1})$, $(t_{pk,oil2}, t_{pk,oil1})$ and $(t_{pk,air1}, t_{pk,air2})$.

Fig. 9 shows the results of the classification regions obtained during four days of experiments with 25 signals for each medium

Fig. 9. Charts showing the classification regions of the mediums taken during four days of experiments.

and few of them showed in Fig. 8. It is worth of mention the fact that two classification regions can be merged to compose one by embracing the diagonal line passing by the origin, as in the oil case. Notice, that through this classification the measurements could be better distinguished.

4. Conclusions

This paper presented a low-cost electro-acoustic measuring system for characterization of three mediums. The experiments aimed to understand the behavior of the electro-acoustic system in the time domain for each medium (air, water and oil). From the results it is possible to notice that the measurement system is robust and that the signals obtained in the experiments can be employed in a classification algorithm to identify the medium under analysis. Further tests with mixtures of the three mediums are under analysis to verify possible changes in the acoustic signal. Nevertheless, it was demonstrated here that the ferroelectric transducer is suitable for detecting signals transferred through distinct mediums and it is sensitive enough to detect small variables that led to a classification method.

Acknowledgements

The author, T.T.C. Palit, would like to express her gratitude for the PhD scholarship (process 141479/2015-9) granted by the Brazilian agency National Council of Scientific Research (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq). Doctor Y. A. O. Assagra was sponsored by a postdoctoral scholarship granted by the PNPd CAPES's project (process 1792003). J. P. Carmo was sponsored by a PQ scholarship from CNPq with the reference 305250/2015-9. All the authors would like to thank FAPAI for the financial investment and Rui Bertho for the technical support.

References

- [1] V. Mohammadi et al., Ultrasonic techniques for the milk production industry, *Measurement* 58 (2014) 93–102.
- [2] G. Meng, A.J. Jaworski, N.M. White, Composition measurements of crude oil and process water emulsions using thick-film ultrasonic transducers, *Chem. Eng. Process.* 45 (5) (2006) 383–391.
- [3] J. Kral Jr. et al., Degradation and chemical change of long-life oils following intensive use in automobile engines, *Measurement* 50 (2014) 34–42.
- [4] L. Fang et al., Flow noise characterization of gas-liquid two-phase flow based on acoustic emission, *Measurement* 46 (10) (2013) 3887–3897.
- [5] A.P. Marques et al., Method for the evaluation and classification of power transformer insulating oil based on physicochemical analyses, *IEEE Electr. Insul. Mag.* 33 (1) (2017) 39–40.
- [6] P.M. Withers, Ultrasonic, acoustic and optical techniques for the non-invasive detection of fouling in food processing equipment, *Trends Food Sci. Technol.* 7 (9) (1996) 293–298.
- [7] F. Eggers, U. Kautze, Broad-band ultrasonic measurement techniques for liquids, *Meas. Sci. Technol.* 7 (1) (1996) 1–9.
- [8] D.J. McClements, P. Fairley, Ultrasonic pulse echo reflectometer, *Ultrasonics* 29 (1) (1991) 58–62.
- [9] K.K. Shung, J.M. Cannata, Q.F. Zhou, Piezoelectric materials for high frequency medical imaging applications: a review, *J. Electroceram.* 19 (1) (2007) 141–147.
- [10] B. Danouj, S.A. Tahan, E. David, Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection, *Measurement* 46 (2012) 660–666.
- [11] S.M. Maikalous, S. Tenbohlen, K. Feser, Detection and location of partial discharges in power transformers using acoustic and electromagnetic signals, *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.* 15 (6) (2008) 1576–1583.
- [12] K.A.R. Medeiros et al., Optimization of flow rate measurement using piezoelectric accelerometers: application in water industry, *Measurement* 91 (2016) 576–581.
- [13] S. Bauer, R. Gerhardt-Mulhaupt, G.M. Sessler, Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers, *Phys. Today* 57 (2004) 37–43.
- [14] Piezoelectric sound components. Available from: <www.mnusa.com/products/sound/diaphragm>.
- [15] S. Li, S. Chen, Analytical analysis of a circular PZT actuator for valveless micropumps, *Sens. Actuators A: Phys.* 104 (2) (2003) 151–161.
- [16] E. Minazara et al., Piezoelectric diaphragm for vibration energy harvesting, *Ultrasonics* 44 (2006) e699–e703.
- [17] L.T. Gomes, Effect of damping and relaxed clamping on a new vibration theory of piezoelectric diaphragms, *Sens. Actuators A: Phys.* 160 (1) (2011) 12–17.
- [18] H.A. Tinoco, D.J. Manlinda, Damage identification in active plates with indices based on Gaussian confidence ellipses obtained of the electromechanical admittance, *J. Nondestruct. Eval.* 34 (2015) 1–16.
- [19] X. Qiu, Patterned piezo-, pyro-, and ferroelectricity of poled polymer electrets, *J. Appl. Phys.* 108 (2010) 011101.
- [20] R.A.P. Altamir et al., Template-based fluoroethylenepropylene piezoelectrets with tubular channels for transducer applications, *J. Appl. Phys.* 106 (1) (2009) 014106.
- [21] R.A.P. Altamir et al., Fluoropolymer piezoelectrets with tubular channels: resonance behavior controlled by channel geometry, *J. Appl. Phys. A: Mater. Sci. Proc. (Print)* 107 (2012) 965–970.
- [22] L.J. de Medeiros et al., Piezoelectret-based hydrophone: an alternative device for vibro-acoustography, *Meas. Sci. Technol.* 26 (2015) 095102.
- [23] M.M. Galloway, Texture analysis using gray level run lengths, *Comput. Graphs Image Process.* 4 (1975) 172–179.

Hydrophone based on 3D printed polypropylene (PP) piezoelectret

T.T.C. Palit¹, Y.A.O. Assagra, R.A.P. Altafim^{2*}, J.P. Carmo and R.A.C. Altafim

Every year, different areas of knowledge are becoming more interested in 3D-printing technology. Recently, this technology was also proved to be feasible for creating sensitive materials such as piezoelectrets. This Letter extends the concept of a 3D printed piezoelectret to produce a pressure sensitive film that can be employed as an ultrasonic transducer for underwater applications, such as hydrophones. In order to achieve this, a two-layer polypropylene film was printed using a filament-based 3D printer. Afterwards, adhesive electrodes were attached on both sides of the film and electrical charging was applied. Later, the 3D printed film was mounted in a metal housing specially designed to keep the film in direct contact with the water and to isolate the electronic amplification. The validation was performed using a piezoelectric ceramic made of lead zirconate titanate (PZT), immersed in a water tank, to produce ultrasonic sweeps to be sensed by the 3D printed transducer. These tests revealed sensor sensitivities up to 600 mV and promote a precise detection of the acoustic resonance frequency of the PZT at 43.7 kHz.

Introduction: 3D printing, also known as additive manufacturing process, gained wide prominence in prototyping markets and customised products due to its simplicity in reproducing a computer-aided design model [1, 2]. Nowadays, the usage of 3D printing is extended to electronics [2], medical and dental prostheses [3, 4]. Quite recently, it has been demonstrated that this technology could also be used to produce smart-materials, i.e. materials with additional functionality, such as electro-mechanical response, as it happens with the piezoelectrets [5]. These have proved to be a good alternative for piezo- and ferroelectric films, such as polyvinylidene fluoride mainly because of their polling simplicity, reduced cost and high electro-mechanical activity [6]. Piezoelectrets are also known as ferroelectrets and are materials that consist of films made from electret polymers with internal cavities that are electrically charged [6–8]. The voids, necessary for creating macroscopic electrical dipoles, can be made from foaming processes or thermal moulding methods [6, 9–12]. Normally, this last method is employed when there is a desire for producing piezoelectrets with regular cavities and at the same time, with further advantages such as homogeneous electrical charging and resonance frequency control [12, 13]. Regarding controlled voids, the first 3D printed piezoelectrets were made with very complex structure designs, requiring an additional assembling process after the 3D printing [5]. This Letter presents an improvement, simply by replacing the complex structures with a simple 3D printing process that leaves air gaps between the extruded filaments. Another improvement in the presented 3D printed piezoelectrets concerns the material itself since previously the employed polymer was the acrylonitrile butadiene styrene and this was replaced by polypropylene (PP), which is a much more conventional polymer employed in ferroelectrets. Therefore, it is described as the usage of the 3D printing method for producing piezoelectrets using PP and a functional application of this material as an acoustic sensor for a hydrophone device.

Fig. 1 3D printing pattern with (1) first and (2) second layers

Experimental details: 3D printed polypropylene piezoelectrets were produced by printing two layers of extruded filaments being one on top of other in the opposite direction, forming a chess pattern as shown in Fig. 1. After printing, adhesive copper cut in circular shapes was glued on both sides of the film and an electrical charging was applied directly to the electrodes during 10 s using a DC voltage with amplitude of

2.5 kV. The chess pattern adopted in the printing process was responsible for producing air cavities between the layers, which are necessary to form the electrical dipoles of piezoelectrets. Once the piezoelectret was formed, it was mounted inside an aluminium case, containing an electronic amplifier with a gain of 100×, a backing material to improve impedance matching and a sealing ring with an opening of 25 mm of diameter. Fig. 2a shows an exploded view of the final device, which was tested in a water environment to operate as a hydrophone. The experimental test was performed according to the schematic setup presented in Fig. 2b. The setup was mounted with a function generator (Tektronix ARG3022C) to stimulate a lead zirconate titanate (PZT) piezoelectric ceramic with an acoustic resonance of 40 kHz. The PZT ceramic was placed on one side of an 8 mm-thick acrylic box (with a length, width, and height of 216, 116, and 108 mm, respectively) filled with distilled water. The piezoelectret hydrophone was placed in the opposite direction directly in contact with the water and connected to an oscilloscope (Keysight DSOX 2002A).

Fig. 2 Hydrophone based on 3D printed polypropylene piezoelectric and measuring setup

a Details of hydrophone and 3D printed PP piezoelectret
b Schematic of setup with an acoustic emitter (PZT ceramic) and signal detector (piezoelectret hydrophone)

Fig. 3 Signal recorded with piezoelectret hydrophone during sweep of 1 s. Results in

a Time
b Frequency domains

After assembling the setup, the function generator was settled in the sweep mode to provide sinusoidal waves of 10 V_{pp} with frequencies from 1 kHz up to 50 kHz during 1 s . Five measurements were performed in this mode to verify the reproducibility. From this, it was found that the piezoceramic presents a resonance at 43.7 kHz . This frequency was used as a reference to determine the maximum sensitivity of the hydrophone in a direct measurement, stimulating the PZT with a 10 V_{pp} sinusoidal wave.

Results and discussion: Figs. 3a and b present the average results from five measurements in the sweep mode, in the time domain and in the frequency domain, respectively. Fig. 4 presents the signal detected by the hydrophone, using the 43.7 kHz stimulation, where it is possible to observe the maximum sensitivity of the hydrophone.

Fig. 4 Signal detected by piezoelectric hydrophone when stimulated with PZT at resonance frequency (43.7 kHz)

Conclusion: This Letter presented a functional application using 3D printed piezoelectrets. In general, it consists of a hydrophone, which is composed by its electronics and a polypropylene piezoelectret that was fully printed in a 3D printer. The measurements revealed a final device with a sensitivity of 600 mV and able to precisely detect the acoustic resonance of a PZT ceramic, which according to the manufacture was around 40 kHz . The main conclusion of this Letter is the viability of producing functional piezoelectrets through 3D printing technology using a very simple structure's design.

Acknowledgments: The first four authors would like to thank the Brazilian government entities CAPES and CNPq for the financial support, which allowed them to perform this research. Special thanks to Rui Bertho for the technical support.

© The Institution of Engineering and Technology 2019

Submitted: 01 October 2018 E-first: 18 January 2019

doi: 10.1049/el.2018.7287

One or more of the Figures in this Letter are available in colour online.

T.T.C. Palitô, Y.A.O. Assagra, R.A.P. Altafim, I.P. Carmo and R.A.C. Altafim (Electrical and Computer Engineering Department, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos-SP, Brazil)

✉ E-mail: altafim@gmail.com

Y.A.O. Assagra and R.A.P. Altafim: Also with Computer Systems Department, Informatics Center, Federal University of Paraíba, João Pessoa-PB, Brazil

References

- 1 Berman, B.: '3-D printing: The new industrial revolution', *Bus. Horiz.*, 2012, 55, pp. 155–162
- 2 Macdonald, E., Salas, R., Espalin, D., et al.: '3D printing for the rapid prototyping of structural electronics', *Access*, 2014, 2, pp. 234–242, doi: 10.1109/ACCESS.2014.2311810
- 3 Li, Z., Yang, J., Wang, Q., et al.: 'Processing and 3D printing of gradient heterogeneous bio-model based on computer tomography images', *Access*, 2016, 4, pp. 8814–8822, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2635661
- 4 Hockaday, L.A., Kang, K.H., Colangelo, N.W., et al.: 'Rapid 3D printing of anatomically accurate and mechanically heterogeneous aortic valve hydrogel scaffolds', *Biofabrication*, 2012, 4, (3), p. 035005
- 5 Assagra, Y.A.O., Altafim, R.A.P., Altafim, R.A.C., et al.: 'Piezoelectrets with well-defined cavities produced from 3D-printed ABS structures', *Electron. Lett.*, 2015, 51, (24), pp. 2028–2030
- 6 Paajanen, M., Leikkala, J., and Kirjavainen, K.: 'Electromechanical film (EMFi) – a new multipurpose electret material', *Sens. Actuators*, 2000, 84, pp. 95–102
- 7 Bauer, S., Gerhard-Mulhaupt, R., and Sessler, G.M.: 'Piezoelectrets: soft electroactive foams for transducers', *Phys. Today*, 2004, 57, (2), pp. 37–43
- 8 Gerhard-Mulhaupt, R.: 'Less can be more – holes in polymer lead to a new paradigm of piezoelectric materials for electret transducers', *Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2002, 9, (5), pp. 850–859
- 9 Wegener, M., Wiges, W., Gerhard-Mulhaupt, R., et al.: 'Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: optimizing electro-mechanical transducer properties', *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84, pp. 392–394
- 10 Altafim, R.A.C., Basso, H.C., Altafim, R.A.P., et al.: 'Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of fluoropolymer-electret films', *Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 2006, 13, (5), pp. 979–985
- 11 Zhang, X., Hillenbrand, J., and Sessler, G.M.: 'Thermally stable fluorocarbon ferroelectrets with high piezoelectric coefficient', *Appl. Phys. A*, 2006, 84, (1–2), pp. 139–142
- 12 Altafim, R.A.P., Qiu, X., Wiges, W., et al.: 'Template-based fluorocarbon/polypropylene piezoelectrets with tubular channels for transducer applications', *J. Appl. Phys.*, 2009, 106, p. 014106-15
- 13 Altafim, R.A.P., Altafim, R.A.C., Qiu, X., et al.: 'Fluoropolymer piezoelectrets with tubular channels: resonance behavior controlled by channel geometry', *Appl. Phys. A*, 2012, 107, (4), pp. 965–970, doi: 10.1007/s00339-012-6848-z