

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Pedro Martins Gomes**

**Caracterização de um canal acústico baseado em  
transdutores piezoelétricos para monitoramento  
de condições de poços de petróleo**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Arthur Martins Braga  
Coorientador: Sully Milena Quintero

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, meus irmãos e minha irmã por todo o suporte que me deram durante todos estes anos, se esforçando sempre para que eu pudesse ter a melhor experiência educacional possível.

Agradeço ao meu orientador e minha co-orientadora, por todas as oportunidades que me proporcionaram nestes últimos anos, abrindo as portas de seus laboratórios de pesquisa para que eu pudesse ajudar nas atividades e me desenvolver profissionalmente.

Agradeço ao quadro de professores da PUC-Rio, por todo o conhecimento técnico e de vida que me transmitiram durante estes últimos anos.

Agradeço à PUC-Rio e às agências CNPq e FAPERJ pelas diversas oportunidades que me puseram à disposição, desde o início do meu curso, para meu desenvolvimento profissional.

## **RESUMO**

### **Caracterização de um canal acústico baseado em transdutores piezoelétricos para monitoramento das condições de poços de petróleo**

As condições encontradas em poços de petróleo são bastante severas e apresentam grandes riscos para a vida humana, integridade ambiental e financeira das empresas. Tendo isto em vista, é de extrema importância a adoção de medidas de monitoramento em tempo real das condições encontradas nos poços no processo de extração de petróleo, para o auxílio em casos de tomada de decisão e para a manutenção do sistema como um todo. Este trabalho busca iniciar o desenvolvimento de um sistema de monitoramento baseado em canais acústicos gerados pela vibração de transdutores piezoelétricos para a transmissão de energia no interstício entre a coluna e o revestimento de um poço de produção de petróleo. Aqui serão descritos experimentos para a obtenção da frequência natural do sistema (onde se obtém a melhor transmissão de energia) e a influência do alinhamento do sistema nas transmissões de energia.

Palavras chaves: Petróleo. Extração de petróleo. Óleo e gás. Piezoelétricos. Monitoramento de poços. Canal acústico. Ondas acústicas

## **ABSTRACT**

### **Characterization of an acoustic channel based on piezoelectric materials for monitoring the conditions of oil wells**

The conditions found in oil wells are quite severe and present great risks to human life, environmental and financial integrity. With this in mind, it is extremely important to adopt real-time monitoring of the conditions encountered in the wells in the oil extraction process, in order to assist in decision-making and in the maintenance of the system as a whole. This work aims to begin the development of a monitoring system based on an acoustic channel generated by the vibration of piezoelectric materials for the transmission of energy in the interstice between the columns of coating and production of oil extraction. Here, it is described the experiments performed to obtain the natural frequency of the system (where it is found the best capability of energy transmission) and the influence of the alignment of the system in these energy transmissions.

Key-words: Oil. Oil extraction. Oil & Gas. Piezoelectric. Well monitoring. Acoustic channel. Acoustic waves.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
1.1 Motivação	2
1.2 Estrutura do documento	4
<b>2 OBJETIVOS</b>	5
2.1 Objetivo geral	5
<b>3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS</b>	6
3.1 Canais de comunicação acústica	6
3.2 Piezoeletricidade	7
3.3 Sistemas microeletromecânicos (MEMS)	9
3.4 Adesivos epóxi	10
3.5 Eficiência de transmissão de energia	11
<b>4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b>	12
4.1 Instrumentação	12
4.1.1 <i>Housings</i>	13
4.1.2 Metodologia de colagem	13
4.2 Bancadas experimentais	14
4.2.1 Teste de alinhamento dinâmico (teste 1)	14
4.2.2 Teste em placas planas (teste 2)	15
<b>5 RESULTADOS E ANÁLISES</b>	17
5.1 Teste de alinhamento dinâmico	17
5.1.1 Análise de $S_{21}$ em função da frequência de vibração	17
5.1.2 Análise de $S_{21}$ em função do ângulo entre os PZTs	18
5.1.3 Condições para $S_{21}$ máximo	20
5.2 Teste em placas planas	20
5.2.1 Análise de $S_{21}$ em função da frequência de vibração	20
5.2.2 Análise da interseção da área transversal entre PZTs	21
5.2.3 Condições para $S_{21}$ máximo	22
<b>6 CONCLUSÕES</b>	23
6.1 Expectativas e próximos passos	27
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	29
<b>Anexo A - Resultados do teste dinâmico (<math>S_{21}</math> x Frequência)</b>	31

<b>Anexo B - Resultados do teste dinâmico (S21 x Ângulo)</b>	<b>34</b>
<b>Anexo C - Resultados do teste de placas planas (PZT 6)</b>	<b>37</b>
<b>Anexo D - Resultados do teste de placas planas (PZT 7)</b>	<b>39</b>
<b>Anexo E - Resultados do teste de placas planas (PZT 8)</b>	<b>41</b>

## Lista de figuras

1.1 Efeitos do vazamento de petróleo no mar. [2]	1
1.2 Ilustração de sistema de extração de petróleo instrumentado com transdutores piezoelétricos.	3
3.1 Ilustração das zonas de pressão na propagação de ondas acústicas [8].	6
3.2 Exemplificação de um canal acústico e suas zonas de pressão [9].	6
3.3 Ilustração do efeito piezoelétrico [11].	8
3.4 Estrutura de células unitárias de transdutores não-piezoelétricos e piezoelétricos [12].	8
3.5 Ilustração das dimensões de MEMS [13].	10
3.6 Previsão de mercado de MEMS [14].	10
4.1 Esquemático de locais de fixação/instrumentação dos PZTs.	12
4.2 Vistas de um housing instrumentado e preparado para fixação	13
4.3 Ilustração da bancada experimental do “teste de alinhamento dinâmico”.	15
4.4 Ilustração esquemática do modelo do “teste em placas planas” e locais de instrumentação de PZTs.	16
5.1 Gráfico experimental de S <sub>21</sub> x Frequência para o passo 0.7 mm.	18
5.2 Gráfico experimental de S <sub>21</sub> x Ângulo para três posições de deslocamento.	19
5.3 Resultado experimental de S <sub>21</sub> x Frequência.	20
5.4 Gráficos experimentais de S <sub>21</sub> em função da interseção transversal entre os PZTs.	21
6.1 Bancada experimental do “teste em cilindros”.	27
6.2 <i>Housings</i> e PZTs instrumentados em seus respectivos corpos metálicos para o “teste em cilindros”.	28

## **Lista de tabelas**

6.1 Resultados experimentais.	23
6.2 Valores de máximo para os pares com o PZT 6	24
6.3 Valores de máximo para os pares com o PZT 7.	24
6.4 Valores de máximo para os pares com o PZT 8.	24
6.5 Análise de perdas.	26

## 1. INTRODUÇÃO

O setor de óleo e gás é uma das maiores áreas comerciais do mundo em valor de mercado [1]. Esta indústria emprega diversos cidadãos em todo o mundo, em diversas suas diversas áreas de trabalho. Isto é uma consequência do fato de o petróleo ser uma matéria prima de diversas outros setores da economia e possui grande importância para diversos países como o Brasil, que é um grande exportador deste produto não renovável.

Por outro lado, existem diversos riscos associados à esta gigante área do mercado, principalmente para o meio ambiente, como se bem conhece, por desastres naturais de vazamentos, por exemplo. Em um cenário mundial em que se ascende um pensamento mais ecológico, pela conscientização dos cidadãos, as decisões e metodologias de proteção das empresas devem ser levadas com grande seriedade, buscando um maior controle sobre suas atividades de produção, frente às tendências ecológicas da sociedade.

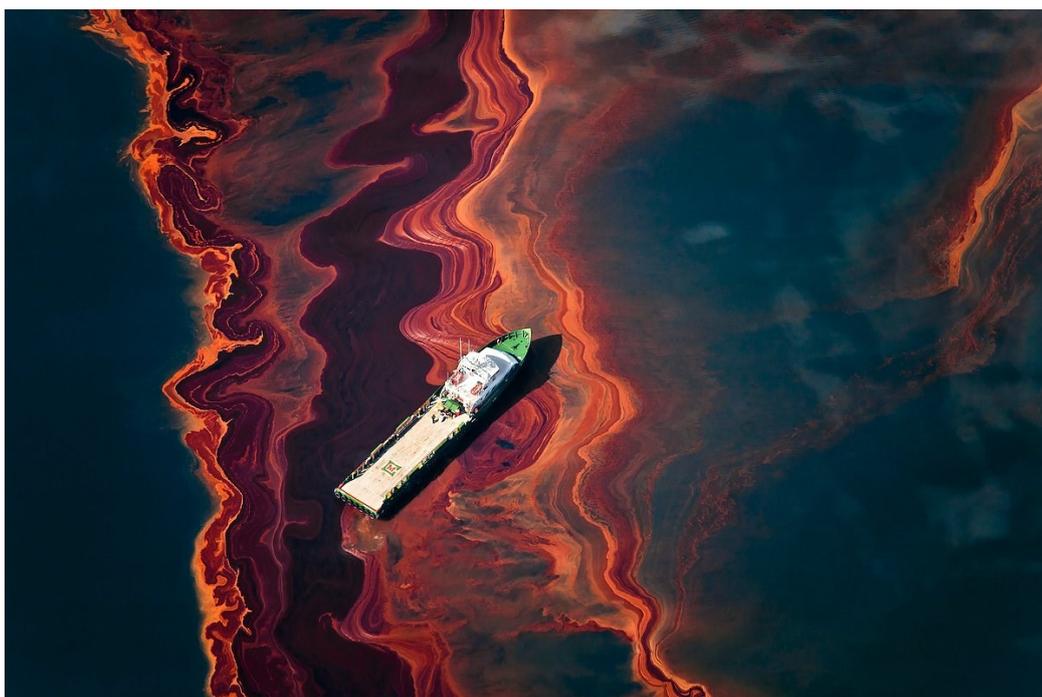


Figura 1.1: Efeitos do vazamento de petróleo no mar [2].

Neste trabalho de final de curso é apresentado um estudo experimental para a determinação da eficiência de transmissão de energia, através de um canal acústico que se propaga através de paredes metálicas e água, gerado pela vibração de transdutores piezoelétricos.

Este projeto foi desenvolvido no Laboratório de Sensores à Fibra Ótica (LSFO), do departamento de engenharia mecânica da PUC-Rio, coordenado pelo professor Arthur Braga e Sully Quintero e faz parte do escopo do projeto de pesquisa *MEMS WELLBORE MONITORING SYSTEM*, realizado pela equipe do LSFO em parceria com a Shell.

## 1.1 Motivação

Conforme discutido anteriormente, existem diversos riscos associados à extração de petróleo. Por isso, é muito importante que, durante estas atividades, os sistemas envolvidos sejam monitorados de maneira precisa para que se possam evitar acidentes ou perdas de produção.

Algumas soluções para monitoramento contínuo em longas distâncias ou grandes superfícies, já vem sendo utilizada pela indústria de óleo e gás para esta atividade, tais como:

- ***Distributed Temperature Sensing (DTS)***: Sistema de monitoramento de temperatura de maneira distribuída, utilizando fibras óticas [3] [4].
- ***Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS)***: Sistema de monitoramento de temperatura e deformação de maneira distribuída, utilizando fibras óticas [5].
- ***Distributed Acoustic Sensing (DAS)***: Sistema capaz de detectar temperatura, deformação ou sons em locais de difícil acesso, utilizando fibras óticas [6] [7].

Contudo, existem alguns desafios como a conexão de fibras em ambientes molhados que limitam estas tecnologias para determinadas aplicações.

Este projeto de fim de curso está inserido no projeto que visa desenvolver um sistema de monitoramento de caráter modular (leituras em determinados pontos), compatível com sensores MEMS que podem detectar, além de deformação e temperatura outras grandezas como pressão, vibração, inclinação, etc.

Um dos maiores desafios encontrado para este sistema é a dificuldade de transmissão de energia para a face externa do revestimento. A abordagem utilizada neste projeto, portanto, consiste em dois arranjos de transdutores piezoelétricos posicionada na coluna e o revestimento que trocam energia entre si, através de ondas acústicas. A figura abaixo ilustra o funcionamento do sistema:

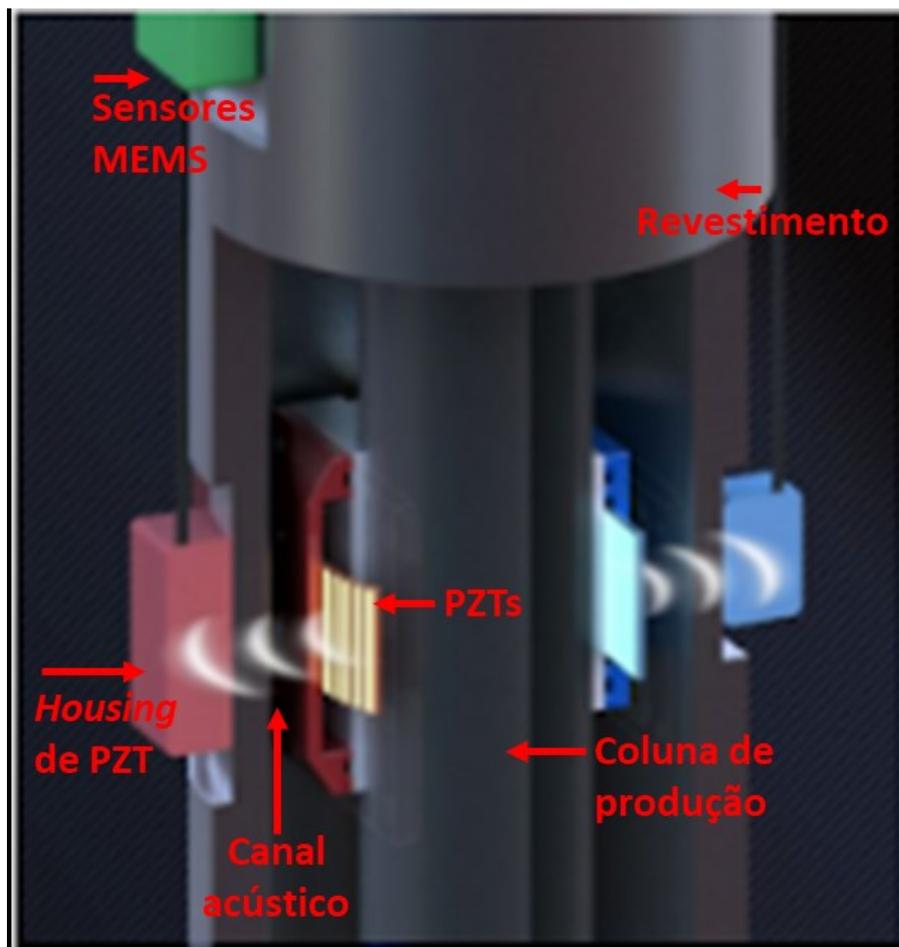


Figura 1.2: Ilustração de sistema de extração de petróleo instrumentado com transdutores piezoelétricos.

O fluxo de energia é o seguinte: o arranjo piezoelétrico do tubo interno (coluna) é energizado, vibra (devido ao efeito piezoelétrico que será explicado posteriormente) e gera ondas acústicas. Estas ondas são direcionadas ao arranjo piezoelétrico do tubo externo (revestimento - *casing*), que energiza os sensores para a leitura das condições do ambiente externo. No sentido oposto, as informações detectadas pelo sensor são transmitidas novamente através de ondas acústicas do arranjo piezoelétrico externo para o interno, que transmite estas informações para a superfície por cabeamento elétrico.

## **1.2 Estrutura do documento**

Este trabalho está dividido em quatro etapas:

- Parte A: Esclarecimento dos objetivos do trabalho.
- Parte B: Exposição de conceitos básicos para a compreensão do trabalho.
- Parte C: Descrição das bancadas experimentais e metodologias utilizadas.
- Parte D: Análise de dados experimentais e conclusões.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar a eficiência de transmissão de energia em função do alinhamento dos transdutores acústicos piezoelétricos que constituem o canal acústico.

### **2.2 Objetivo específico**

Desenvolver bancadas experimentais capazes de avaliar a eficiência de transmissão de energia em função do alinhamento entre os transdutores acústicos.

### 3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

#### 3.1 Canais de comunicação acústica

Canais de comunicação acústica são caracterizados pela geração de ondas acústicas para transferência de energia e/ou informações entre um receptor e um transmissor. Ondas acústicas, por sua vez, são ondas mecânicas de pressão longitudinal. Isto é, ondas acústicas que vibram, pela oscilação de pressão, na mesma direção em que se propagam.

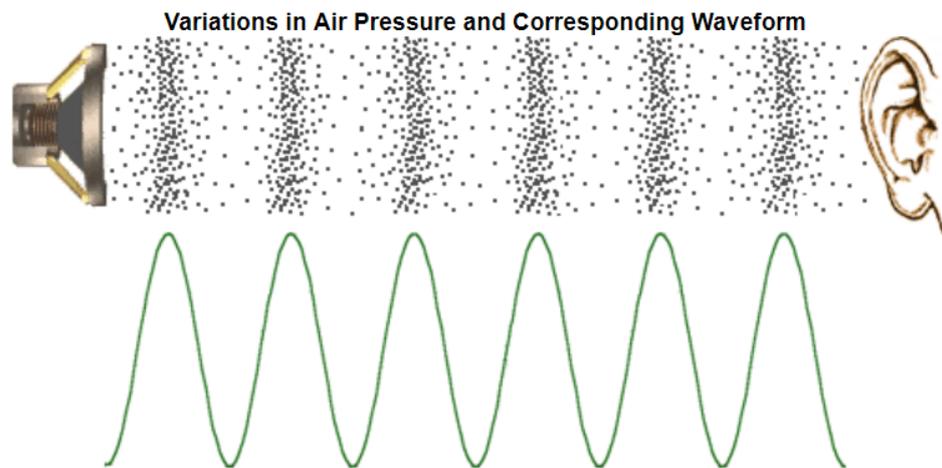


Figura 3.1: Ilustração das zonas de pressão na propagação de ondas acústicas [8].

Uma demonstração simples de canais acústicos, podem ser através de levitações acústicas:

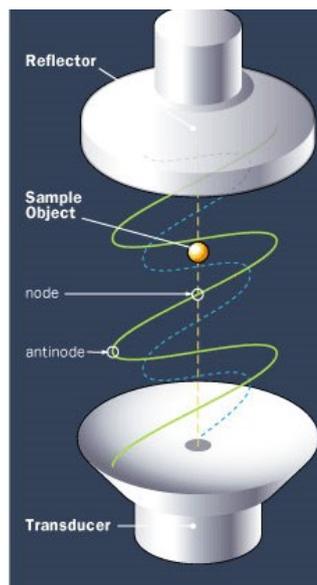


Figura 3.2: Exemplificação de um canal acústico e suas zonas de pressão [9].

Neste tipo de experimento, as ondas geradas por um transmissor são refletidas em uma superfície côncava e, pela interferência com as novas ondas produzidas, geram ondas estacionárias. Estas ondas estacionárias possuem pontos em que a pressão oscila entre máximos, conhecidos como anti-nós, e pontos de pressão mínima constante, conhecidos como nós. Pela alta pressão na vizinhança (vertical), ao inserir um corpo nos pontos de nó, a força da gravidade é equilibrada e o corpo flutua.

### 3.2 Piezoeletricidade

A piezoeletricidade é o princípio de operação dos transdutores que serão utilizados para a produção das ondas acústicas do canal de transferência de energia.

Este fenômeno, também conhecido como efeito piezoelétrico, foi descoberto em 1880 por Pierre e Jacques Curie, através de uma demonstração de que determinados cristais, quando submetidos a uma carga mecânica, geravam uma carga elétrica em suas superfícies. Posteriormente, este fenômeno foi explorado durante a primeira guerra mundial, como detectores nos submarinos militares, que eram instrumentados com mosaicos de cristais piezoelétricos, que emitiam ondas acústicas de alta frequência e mediam o tempo de retorno destas ondas, para mapeamento de profundidade, similarmente a um sonar. Já em 1958, após a descoberta do efeito piezoelétrico em semicondutores, a comercialização deste material começou a se popularizar com *strain gauges* de silício [10].

Após diversos estudos, os materiais piezoelétricos são vastamente utilizados no mercado e no dia-a-dia da sociedade. Desde acelerômetros em celulares, microfones, telas digitais e sensores de segurança automobilísticos, os materiais piezoelétricos compõem sensores de diversas aplicações.

O fenômeno piezoelétrico consiste na conversão de uma carga elétrica aplicada em um material em deformação mecânica. De maneira reversa, estes mesmos materiais convertem deformações mecânicas em cargas elétricas. Isto é, se aplicada uma tensão elétrica em um material piezoelétrico, ele converte isto em deformações mecânicas e vice-versa, conforme a figura abaixo:

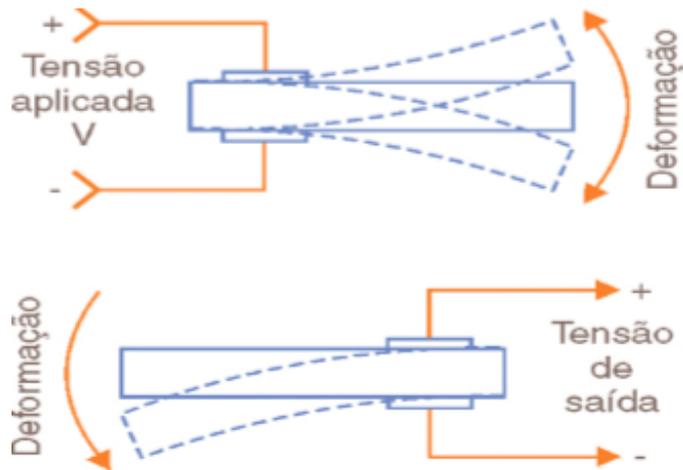


Figura 3.3: Ilustração do efeito piezoelétrico [11].

Esta característica é um resultado da distribuição de íons na estrutura cristalina de determinados metais, que ocupam posições em unidades semelhantes e repetidas, as células unitárias. Quando estas células unitárias não possuem um centro de simetria, o movimento (deformação) da estrutura cristalina e, logo, da estrutura destas células, ocasiona um desbalanceamento nas cargas elétricas, conseqüentemente, a polarização do material e o “surgimento” de cargas elétricas. Analogamente, com a aplicação de uma carga elétrica no material piezoelétrico, a estrutura iônica do material é alterada, buscando o equilíbrio elétrico, as células unitárias e, conseqüentemente, a estrutura cristalina do material se movem e ocorre uma deformação mecânica. Materiais com centros de simetria não produzem este efeito pois não ocorre desbalanceamento de cargas no interior do material, logo não há polarização para que “surjam” cargas elétricas [12].

A figura abaixo demonstra a influência da estrutura das células unitárias na capacidade de conversão de energias de um material:

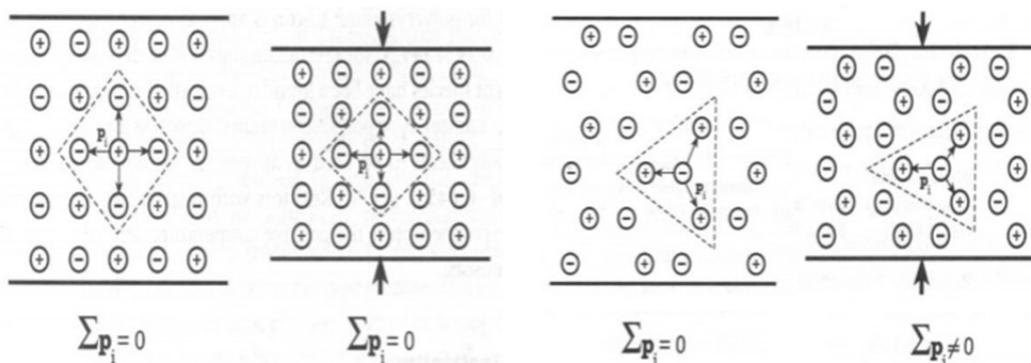


Figura 3.4: Estrutura de células unitárias de materiais não-piezoelétricos e piezoelétricos [12].

### 3.3 Sistemas microeletromecânicos (MEMS)

Na solução de monitoramento proposta, serão utilizados sensores MEMS, alimentados através da energia transmitida pelo canal acústico, para o monitoramento das condições externas do fundo de poço. A escolha desta tecnologia está associada ao espaço e baixo consumo de energia para operação

A história dos *MEMS* se inicia com a invenção do primeiro transistor por William Shockley, John Bardeen e Walter Brattain. Esta invenção abriu portas para o desenvolvimento de dispositivos cada vez menores. Posteriormente, em 1958, houve o descobrimento do efeito piezoelétrico em semicondutores e o desenvolvimento do primeiro circuito integrado pela Texas Instruments. O primeiro *MEMS* propriamente dito, foi construído em 1964 e ficou conhecido como *Resonant Gate Transistor (RGT)*. O *RGT* tinha aproximadamente um milímetro de comprimento e tinha a capacidade de responder a alguns poucos *inputs* digitais e servia como um filtro de frequências para circuitos integrados, transmitindo apenas sinais em determinado domínio para o circuito que lia sua saída. Nos anos seguintes, com as novas tecnologias que foram surgindo no mercado, os *MEMS* foram sendo temas de pesquisas, evoluíram e atualmente, estão em diversos dispositivos que a sociedade interage constantemente, sejam em automóveis, equipamentos médicos, impressoras, etc. [13]

Os *MEMS* são dispositivos integrados que combinam componentes eletrônicos e mecânicos e podem ser utilizados como transdutores (dispositivos capazes de converter um sinal ou energia em outra grandeza), sensores (dispositivos capazes de detectar e/ou medir informações de um ambiente e gerar uma resposta mensurável na saída) e atuadores (dispositivos que convertem um sinal elétrico em uma ação, como motores elétricos). Os componentes mecânicos dos *MEMS* são responsáveis por detectarem mudanças no ambiente enquanto os eletrônicos realizam o processamento e transmissão destas informações para os micro-controladores ou micro-atuadores do sistema.

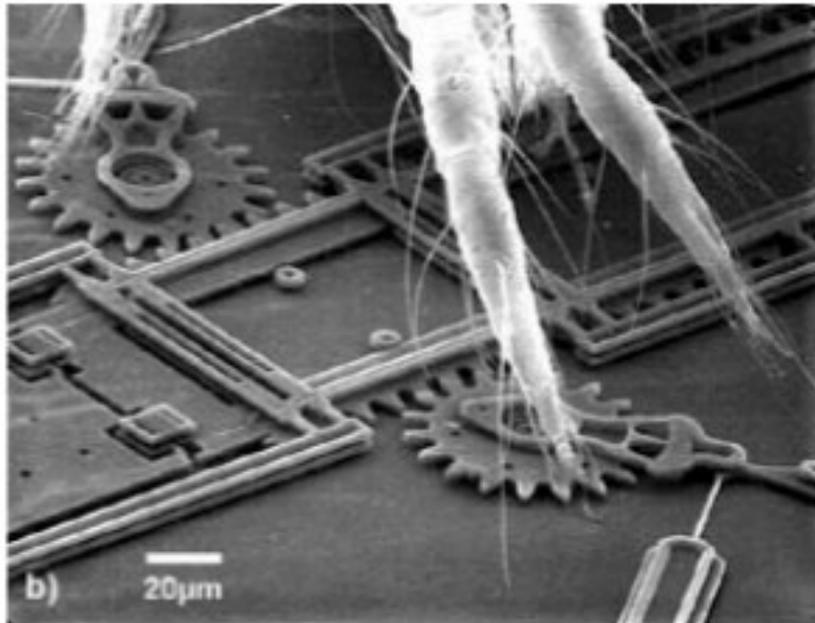


Figura 3.5: Ilustração das dimensões de MEMS [13].

O grande potencial de aplicabilidade dos MEMS, no mercado atual e futuro, é refletido na projeção de crescimento deste mercado e suas aplicabilidades, conforme o gráfico abaixo:

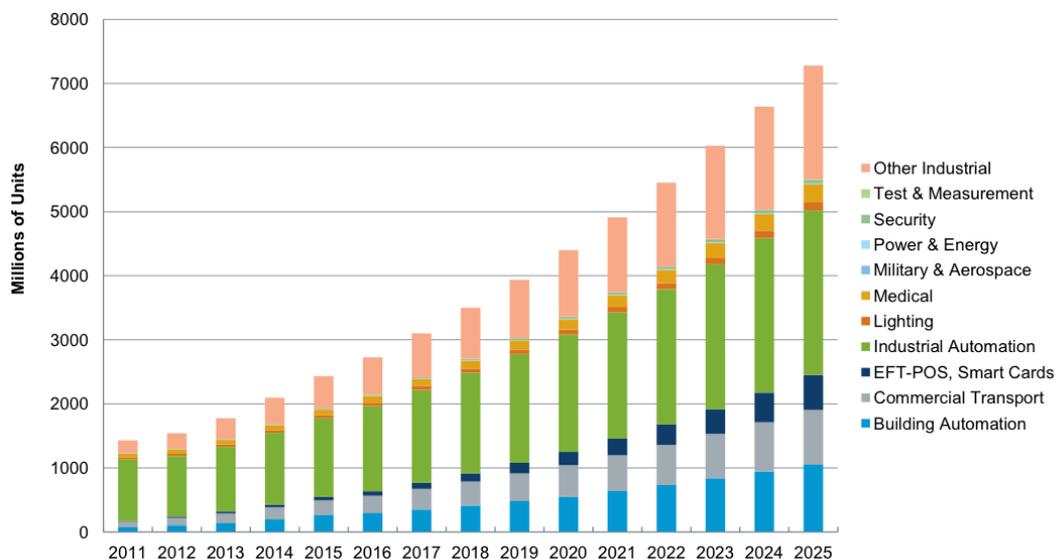


Figura 3.6: Previsão de mercado de MEMS [14].

### 3.4 Adesivos epóxi

Para realizar a colagem dos transdutores piezoelétricos nos devidos corpos que serão instrumentados, são utilizados adesivos epóxi de alta performance para aplicações acústicas.

Estes adesivos são colas de alta resistência que podem ser divididos em duas categorias: os formados por dois componentes (epóxi 2C) e os formados por apenas um componente (epóxi 1C) [15].

O epóxi 2C é composto por uma resina e um endurecedor que devem ser misturados com bastante cautela para o processo de cura, já que um desequilíbrio na proporção entre os dois componentes pode alterar consideravelmente a performance do adesivo. Algumas propriedades deste tipo de adesivo são:

- Resistência a tensões de até 30Mpa.
- Baixa deformação antes da fratura (10%).
- Boa adesão em superfícies metálicas.

No caso do epóxi 1C, também é composto por uma resina e um endurecedor, porém, para o processo de cura é necessário que se insira calor no sistema, para que se ative o endurecedor. Algumas propriedades deste tipo de adesivo são:

- Resistência máxima a tensões de até 35 a 40 Mpa.
- Baixa deformação antes da fratura (10%).
- Absorve óleo.

Neste projeto, são utilizados adesivos do tipo 1C.

### **3.5 Eficiência de transmissão de energia**

A eficiência de transmissão de energia, que se busca determinar para as diversas condições do meio de propagação das ondas acústicas, consiste na razão entre a energia enviada por um transdutor piezoelétrico e a energia recebida pelo outro transdutor piezoelétrico:

$$S_{21} = \frac{R_2}{E_1} \quad (1)$$

Onde  $E_1$  é a energia transmitida pelo PZT<sub>1</sub>, instrumentado no tubo interno (coluna) e  $R_2$  é a energia detectada pelo PZT<sub>2</sub>, instrumentado no tubo externo (revestimento).

## 4 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir, serão descritas as bancadas experimentais desenvolvidas, as metodologias de execução dos testes e alguns procedimentos básicos de preparação da bancada experimental e montagem.

### 4.1 Instrumentação

A instrumentação dos transdutores segue o esquema geral abaixo:

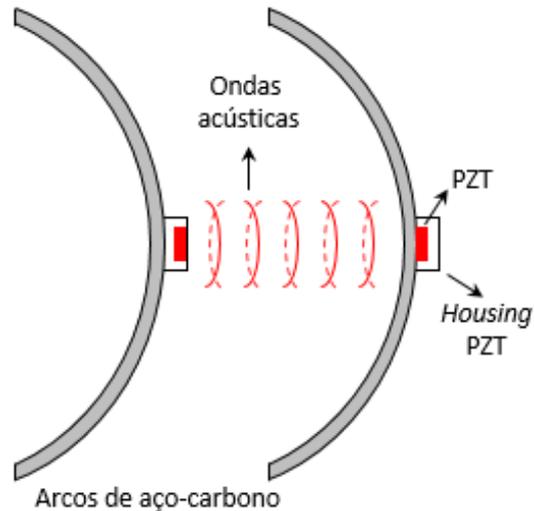


Figura 4.1: Esquemático de locais de fixação/instrumentação dos PZTs.

O transdutor piezoelétrico do corpo metálico que simula a coluna de produção (interno) é instrumentado na face interna do *housing*, enquanto o transdutor do revestimento (externo) é instrumentado diretamente na superfície do corpo. Os experimentos seguem esta configuração independentemente da geometria dos corpos metálicos da coluna e revestimento.

#### 4.1.1 Housings

Os  *housings*  são componentes de alojamento dos PZTs, desenvolvidos para auxiliar na instrumentação dos PZTs nos sistemas, de acordo com o esquemático da figura 4.1, do item anterior.

A figura abaixo demonstra um PZT instrumentado em um housing, referente ao módulo da coluna de produção:



Figura 4.2: Vistas de um  *housing*  instrumentado e preparado para fixação.

Além disso, estes componentes também servem de proteção aos transdutores piezoelétricos, separando-os das condições severas do meio externo.

#### 4.1.2 Metodologia de colagem

Para cada adesivo epóxi utilizado nos experimentos, é realizado o seguinte procedimento:

- Mistura das duas partes componentes do adesivo.
- Centrifugação do adesivo para retirada de possíveis bolhas de ar.
- Inserção do adesivo em ambiente de baixa pressão para remoção de resquícios de bolhas de ar.
- Despejo do adesivo no interstício entre o corpo de testes e o transdutor.
- Montagem levada à estufa para cura nas temperaturas pré-determinadas (dados do fornecedor).

## **4.2 Bancadas experimentais**

Neste tópico serão descritas as bancadas experimentais desenvolvidas para a caracterização da eficiência de transmissão do canal acústico.

Foram desenvolvidas duas bancadas experimentais para a execução dos testes. A primeira bancada experimental visa estudar a eficiência de transmissão de energia em função de um desalinhamento angular entre os transdutores piezoelétricos, enquanto a segunda bancada visa estudar a mesma eficiência, em função de um desalinhamento paralelo (linear).

Os PZTs utilizados nos experimentos realizados possuem como especificação de fábrica, a frequência natural de vibração igual a 1MHz. Desta forma, faremos as análises de  $S_{21}$  para frequências de vibração dos PZTs em um domínio no entorno deste valor, com auxílio de *Virtual Network Analyzer* (VNA), da marca KEYSIGHT, modelo E5061B, que aplica estas frequências aos PZTs em operação e retorna o valor de  $S_{21}$  em escala logarítmica.

### **4.2.1 Teste de alinhamento dinâmico (teste 1)**

Neste teste, são utilizados dois arcos metálicos instrumentados com os PZTs, que simulam os tubos concêntricos componentes de um sistema de extração de petróleo, com água no interstício entre eles, por onde as ondas se propagarão.

O arco metálico referente ao revestimento (externo) se mantém estático, enquanto o arco referente à coluna de produção (interno) é acoplado a equipamentos eletrônicos de alta precisão, que realizam varreduras de posição, para análise do alinhamento entre os PZTs. A figura abaixo ilustra a bancada experimental desenvolvida:

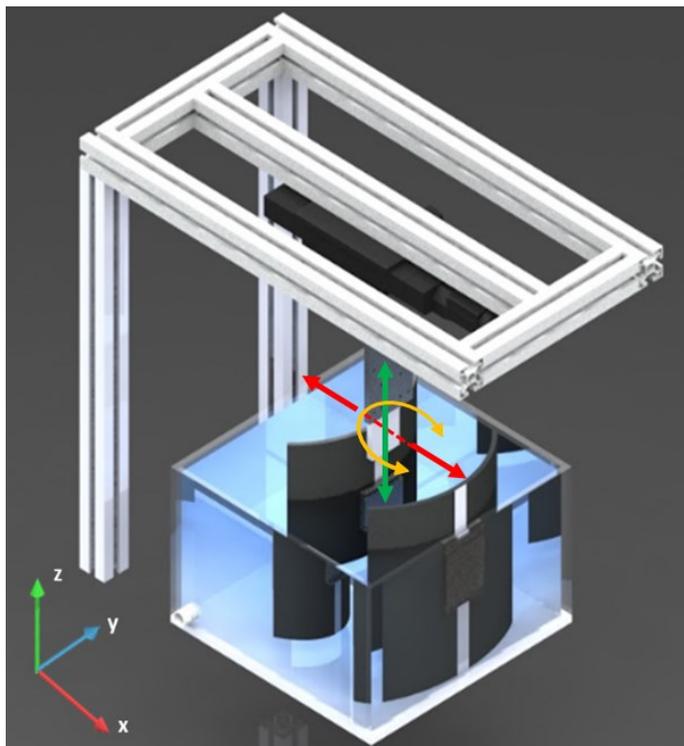


Figura 4.3: Ilustração da bancada experimental do “teste de alinhamento dinâmico”.

Para a variação da posição no eixo  $x$ , foi adaptado ao projeto a base de deslocamento linear unidirecional eletrônica, modelo UTS150PP da marca Newport Corporation. Para o eixo  $z$ , foi empregado um goniômetro eletrônico, modelo 495ACC, também da marca Newport Corporation para o deslocamento angular e um parafuso micrométrico para o deslocamento linear. Para o eixo  $y$ , o alinhamento foi feito manualmente, através do deslocamento do revestimento até que, no VNA, o valor lido de  $S_{21}$  fosse o menor encontrado e, a partir disto, o ajuste fino pudesse ser feito nos outros eixos.

Vale ressaltar, que a faixa cinza nos corpos metálicos (que cruzam os housings) da montagem, representam um fresamento realizado para que os PZTs fossem colados de maneira mais eficaz (evitando com que ele tangenciasse a circunferência dos arcos metálicos) em uma superfície plana.

#### 4.2.2 Teste em placas planas (teste 2)

Nesta segunda etapa de testes, o objetivo é determinar como o alinhamento linear (alinhamento ao longo de dois eixos lineares) entre as faces dos transdutores piezoelétricos influencia na capacidade de transmissão de energia pelo canal acústico.

Para isto, foram utilizadas duas placas de dimensões 150 x 150 x 6 mm de aço, instrumentadas com PZTs, onde uma das placas foi instrumentada com cinco transdutores piezoelétricos e a outra com três transdutores. Cada transdutor utilizado foi enumerado para facilitar a organização dos dados de saída.

A figura abaixo ilustra a configuração de montagem deste teste:

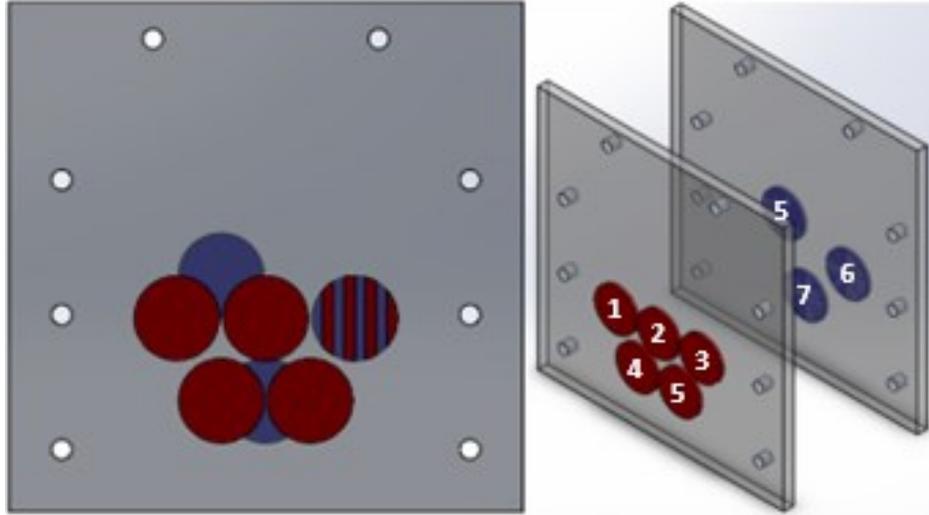


Figura 4.4: Ilustração esquemática do modelo do "teste em placas planas" e locais de instrumentação de PZTs.

Similarmente ao experimento anterior, as chapas instrumentadas foram acopladas a uma base de deslocamento linear unidirecional eletrônica de alta precisão, para que fosse possível realizar varreduras de posicionamento entre as chapas. Mais uma vez, estas placas foram submersas para que o canal acústico se propague água (além das superfícies metálicas).

Neste teste, os dados obtidos foram em função da interseção de área entre os transdutores piezoelétricos. Para cada passo deste experimento, os PZTs realizaram varreduras de maneira com que fosse possível medir o valor de  $S_{21}$  de cada par com 0% (PZTs completamente desalinhados), 25%, 50% e 100% (PZTs face à face) de interseção entre as áreas de vibração.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste tópico serão apresentados os resultados experimentais obtidos ao longo deste estudo.

### 5.1 Teste de alinhamento dinâmico

Neste experimento foi estudado o valor de  $S_{21}$  de acordo com os seguintes parâmetros:

- Frequências: no domínio de [0.85, 1.15] MHz, com passo de 187.5 Hz.
- Angulações relativas entre os transdutores: no domínio de aproximadamente  $[-10^\circ, 10^\circ]$ , com passo de aproximadamente  $1.74^\circ$ .
- Deslocamento entre os transdutores: no domínio [0, 2.1] milímetros, com passo de 0.1 mm.

Desta forma, foi possível avaliar a capacidade de transmissão de energia em condições de desalinhamento e afastamento entre os transdutores piezoelétricos.

A ordenação de movimentos dos testes foi: primeiramente, o arco metálico interno (coluna), se afasta do arco externo (revestimento) e, após este deslocamento, inicia-se uma varredura angular entre o posicionamento dos transdutores, onde, para cada ângulo, realiza-se uma varredura de  $S_{21}$  no domínio de frequências.

#### 5.1.1 Análise de $S_{21}$ em função da frequência de vibração

A primeira etapa de análise dos dados consiste no estudo da curva típica de  $S_{21}$  em função da frequência de vibração dos transdutores piezoelétricos. Conforme explicado anteriormente, foi desenvolvido um gráfico deste tipo para cada passo de deslocamento e ângulo de desalinhamento entre os transdutores piezoelétricos.

Como o maior valor de  $S_{21}$  foi encontrado no passo de 0.7 mm, utilizou-se este gráfico na figura 5.1 para ilustrar o comportamento desta curva típica:

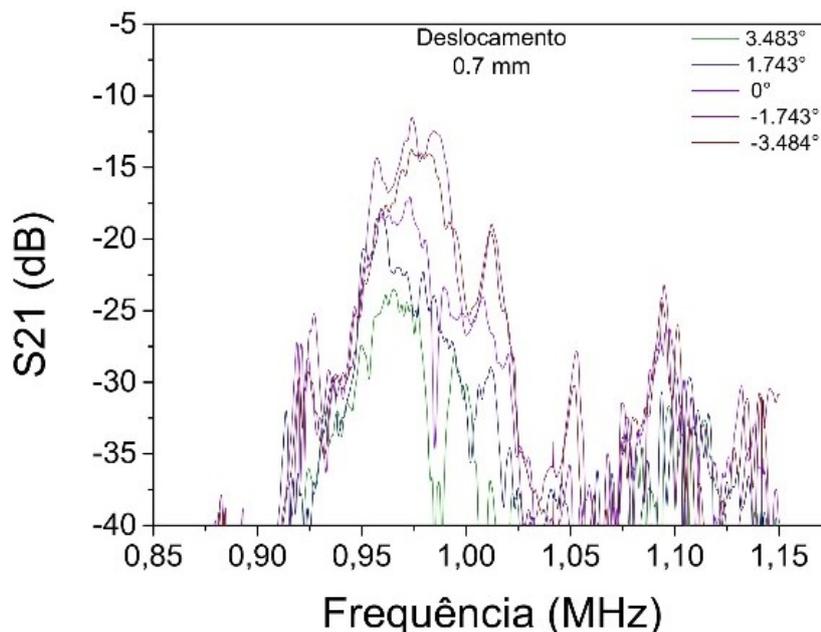


Figura 5.1: Gráfico experimental de  $S_{21}$  x Frequência para o passo 0.7 mm.

Conforme, observa-se na ilustração acima e no anexo A, houve um desvio na frequência natural de vibração do sistema para todos os experimentos realizados. Neste caso, todavia, isto já era esperado, já que, independentemente de irregularidades na montagem, este experimento envolve diversos outros meios de propagação das ondas acústicas, que certamente não foram testados pelo fornecedor para obter a frequência natural de fábrica do PZT. Neste experimento, as ondas devem se propagar por corpos metálicos e água até chegarem ao PZT<sub>2</sub>, o que altera a frequência natural do sistema.

### 5.1.2 Análise de $S_{21}$ em função do ângulo entre os PZTs

Após a obtenção dos gráficos de  $S_{21}$  em função da frequência, foram obtidos os valores de  $S_{21}$  máximos de cada gráfico para os ângulos de desalinhamento estudados. Este procedimento foi repetido para cada variação do desalinhamento dos transdutores piezoelétricos.

O gráfico abaixo ilustra a eficiência de transmissão de energia em função do ângulo de desalinhamento entre os transdutores piezoelétricos para três passos de deslocamento.

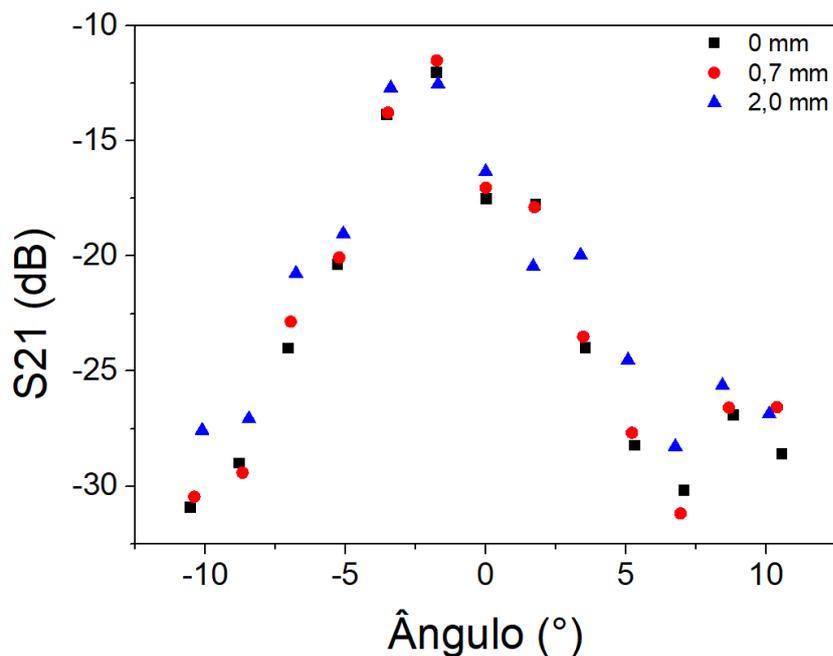


Figura 5.2: Gráfico experimental de  $S_{21}$  x Ângulo para três posições de deslocamento.

Como pode-se observar nos dados acima e nos gráficos disponíveis no anexo A, os valores de  $S_{21}$  máximos foram encontrados com certo desvio do ângulo  $0^\circ$ , (no caso da figura acima, aproximadamente em  $-1.743^\circ$ ). Acredita-se que este desvio possa ser consequência de dois fatores:

- **Colagem:** A colagem, por ser realizada manualmente, pode fazer com que a espessura do adesivo epóxi utilizado não seja homogênea ou ocasionar o surgimento de pequenas bolhas de ar que afetam a eficiência de transmissão de energia.
- **Tolerância dos tubos metálicos:** Pode ter havido um desvio entre os locais de fixação dos transdutores piezoelétricos, provavelmente causado pelo fato de que a usinagem dos corpos metálicos apresenta uma tolerância, que pode ter gerado um desalinhamento linear e/ou angular entre os transdutores piezoelétricos.

Por fim, é interessante ressaltar que os valores de máximo apresentam um comportamento muito similar independentemente do afastamento dos transdutores piezoelétricos. No caso da figura 5.2, o valor de  $S_{21}$  máximo entre a posição de 0 mm (-12.00 dB) de deslocamento e 2.0 mm (-12.53 dB), apresentam uma perda relativa de 0.53 dB, que corresponde a 11.5% de perda de energia.

### 5.1.3 Condições para $S_{21}$ máximo

O maior valor global de  $S_{21}$  encontrado nesta etapa do estudo foi de -11.4984 dB, com o deslocamento de 0.7 mm, ângulo relativo entre os PZTs de  $-1.743^\circ$  e frequência de 0.974125 MHz, conforme visto nas figuras 5.1 e 5.2.

### 5.2 Teste em placas planas

Mais uma vez, foi estudada a capacidade de transmissão de energia  $S_{21}$  através do canal acústico em função do desalinhamento entre os PZTs em operação e a frequência de vibração do PZT<sub>1</sub>, no domínio [0.9, 1.4] MHz.

O diferencial deste teste é que, agora será estudado o  $S_{21}$ , em função da área de interseção (percentualmente) das faces dos PZTs em operação, enquanto anteriormente não possuíamos este valor em foco e sim outras variáveis.

#### 5.2.1 Análise de $S_{21}$ em função da frequência de vibração

Mais uma vez foi analisada a curva típica de  $S_{21}$  em função da frequência de vibração dos transdutores piezoelétricos, conforme ilustrado na figura 5.3.

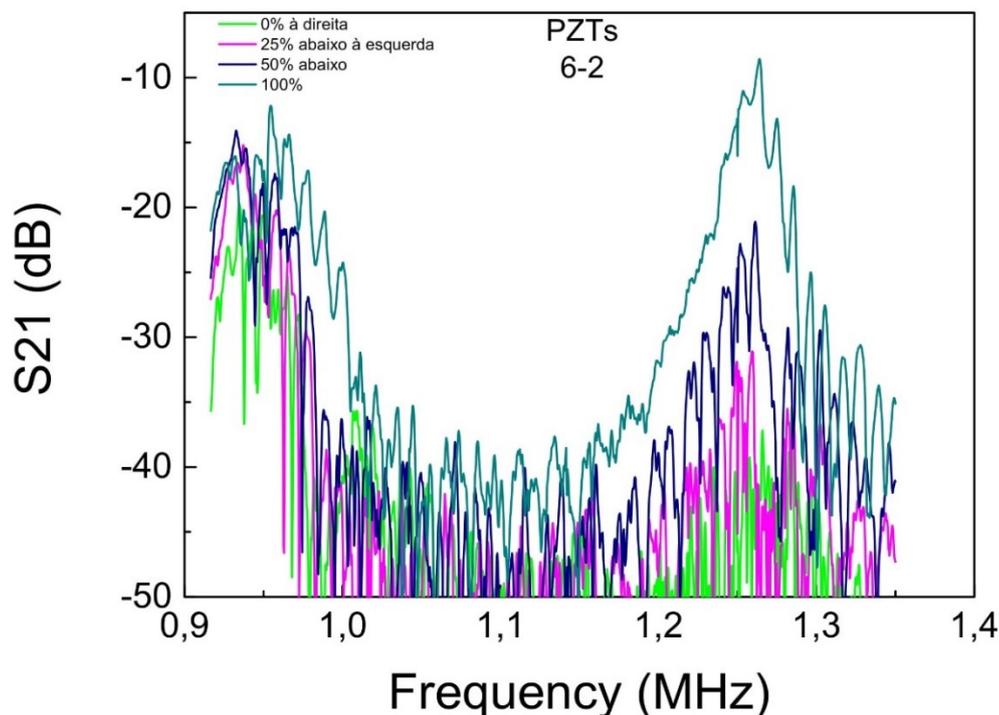


Figura 5.3: Resultado experimental de  $S_{21}$  x Frequência.

Neste experimento, podemos ver que, mais uma vez, ocorreu um desvio da frequência natural de vibração dos PZTs. Por outro lado, neste caso, a frequência

natural se mostrou maior do que a declarada pelo fornecedor, diferentemente do que aconteceu no experimento anterior.

### 5.2.2 Análise da interseção da área transversal entre PZTs

Similarmente ao procedimento realizado anteriormente, foi obtido dos gráficos de  $S_{21}$  em função da frequência, os valores de máximo para cada varredura de interseção de área realizada entre os pares de transdutores piezoelétricos.

A figura abaixo, resultante da operação de dados descrita, demonstra a relação entre a área de interseção (transversal) entre o PZT transmissor e o PZT receptor de energia e o fator  $S_{21}$ :

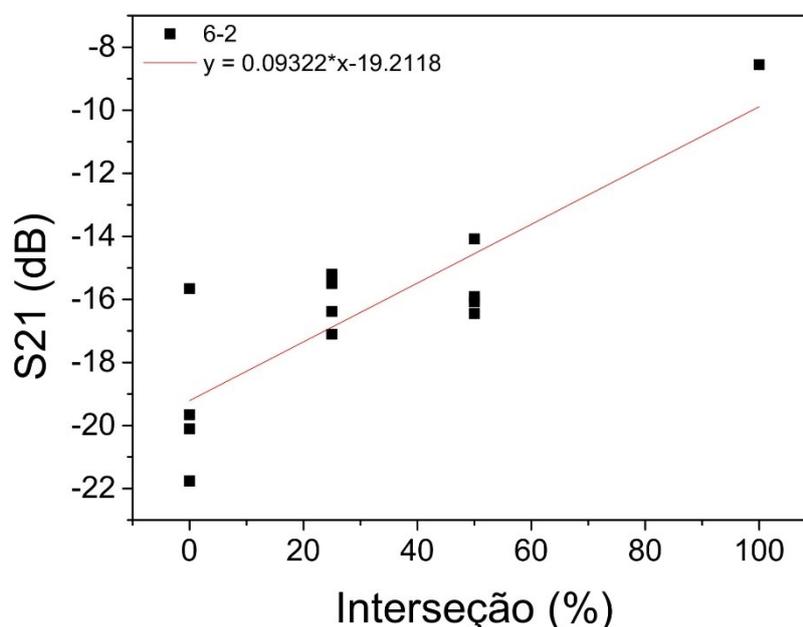


Figura 5.4: Gráficos experimentais de  $S_{21}$  em função da interseção transversal entre os PZTs.

Em relação à área de interseção, como já era esperado, analisando a figura 5.4 acima e os anexos C, D e E, pode-se concluir que, pela aproximação linear do gráfico  $S_{21}$  x Interseção, quanto maior a área de interseção entre os PZTs, maior a capacidade de transmissão de energia.

Por outro lado, observa-se que existem pontos com  $S_{21}$  maiores que pontos com maior área de interseção, entre os transdutores. Estes pontos extraordinários podem ser causados por:

- **Montagem manual:** Levando em conta que a capacidade de transmissão de energia é proporcional à área de interseção entre os PZTs e sabendo que o experimento foi montado manualmente, julga-se que estes pontos extraordinários apresentam este comportamento devido aos possíveis

desajustes no posicionamento em relação à posição teórica (onde realmente deveriam estar) entre os PZTs, seja por algum desvio linear ou angular não identificado nas chapas metálicas. Além disso, a colagem dos PZTs não é padronizada pois o operador não consegue fixar os PZTs exatamente da mesma maneira sempre, independentemente das cautelas tomadas na colagem e cura dos adesivos.

- **Tolerância das chapas metálicas:** Além disso, conforme observamos no teste anterior, a angulação relativa entre os PZTs afeta consideravelmente a capacidade de transmissão de energia e, como as chapas, mesmo após usinagem, apresentam incertezas devido às tolerâncias aceitas, as faces nas quais os PZTs estão fixados podem ter uma angulação relativa, que conseqüentemente, afeta o posicionamento dos PZTs. Outra conseqüência de erros na superfície metálica é que cada PZT pode ter um valor real de área de contato com a face da chapa diferente dos outros e, isso pode afetar a propagação de ondas acústicas.

### **5.2.3 Condições para $S_{21}$ máximo**

O maior valor global de  $S_{21}$  encontrado nesta etapa do estudo foi de -8.56045 dB, com frequência de 1.26394 MHz e 100% de interseção entre as áreas de transmissão e recepção dos PZTs.

## 6 CONCLUSÕES

Neste tópico serão realizadas discussões quanto aos resultados obtidos, de maneira a complementar o que já foi exposto no tópico dos resultados.

Os valores associados ao maior  $S_{21}$  em cada experimento são:

Teste	Dinâmico	Entre placas
<b><math>S_{21}</math> máximo (dB)</b>	-11,49836	-8.56045
<b>Angulação (°)</b>	-1.743	0.00 <sup>1</sup>
<b>Deslocamento (mm)</b>	0.7	-
<b>Freq. Natural (MHz)</b>	0,974125	1.26394

Tabela 6.1: Resultados experimentais.

- **Primeiras conclusões**

A primeira conclusão destes experimentos é de que, como facilmente pode-se notar nos anexos deste documento e na tabela acima, a frequência associada ao  $S_{21}$  máximo dos experimentos apresentou uma grande discrepância. Esta diferença se dá pela banda de frequências avaliada nos experimentos.

Nos gráficos de  $S_{21}$  x frequência resultantes do teste de placas planas (figura 5.4 e anexos C, D e E), o valor de  $S_{21}$  atinge um primeiro pico aproximadamente na mesma faixa de frequência encontrada no valor máximo do teste dinâmico, posteriormente cai e volta a subir, atingindo um segundo pico onde estão os valores de máximo de cada gráfico.

Logo, o que concluímos neste ponto é que os testes de placas planas apresentam um resultado mais otimista e real, dado que os primeiros experimentos (dinâmicos) não englobaram, em seu domínio de frequência as frequências de máximos do segundo pico encontrado. Como este primeiro experimento tinha um caráter de “reconhecimento de terreno”, isto não apresenta grandes impactos para o futuro deste projeto.

---

<sup>1</sup> Sabendo que o maior valor encontrado é referente à 100% de interseção e isso significa angulação relativa de 0°.

- **Frequências ideais de vibração dos PZTs**

Como no tópico anterior foi comentado que o experimento de placas planas apresentou um resultado mais condizente com a realidade, por ter sido um estudo mais abrangente (maior banda de frequências), foi desenvolvida a tabela abaixo, que expõe os maiores valores de  $S_{21}$  encontrados para cada par de PZTs e suas respectivas frequências de vibração:

PZTs	6-1	6-2	6-3	6-4	6-5
<b>S<sub>21</sub> (dB)</b>	-10.2521	-8.56045	-9.33308	-9.92413	-10.4534
<b>Freq. (MHz)</b>	1.25916	1.263940	1.26197	1.25803	1.25972

Tabela 6.2: Valores de máximo para os pares com o PZT 6.

PZTs	7-1	7-2	7-3	7-4	7-5
<b>S<sub>21</sub> (dB)</b>	-10.3167	-9.69267	-9.77701	-9.80901	-10.1211
<b>Freq. (MHz)</b>	1.25466	1.25634	1.25888	1.2555	1.25944

Tabela 6.3: Valores de máximo para os pares com o PZT 7.

PZTs	8-1	8-2	8-3	8-4	8-5
<b>S<sub>21</sub> (dB)</b>	-10.5771	-9.45146	-10.2022	-10.9206	-11.2811
<b>Freq. (MHz)</b>	1.26056	1.26084	1.25916	1.25606	1.26647

Tabela 6.4: Valores de máximo para os pares com o PZT 8.

As frequências associadas aos máximos de transmissão de energia variam entre 1,25466 MHz e 1,26647 MHz ( $\Delta$ freq = 0,01181 MHz), com desvio padrão  $\sigma = 0,003176$  MHz e média  $\mu = 1,25916$  MHz. Estes resultados, para esta variável de estudo, representam um ótimo direcionamento para os próximos passos do projeto. O baixo desvio padrão e variação destes valores aponta que os resultados encontrados já devem estar próximos ao valor ideal de vibração dos PZTs.

- **Área de interseção entre os PZTs**

Novamente considerando o experimento de placas planas, todos os valores de  $S_{21}$  máximos encontrados foram na situação de 100% de interseção entre as áreas de transmissão e recepção entre os PZTs.

Nos anexos C, D e E, é bastante visível o quanto as curvas de 100% de interseção se destacam das outras curvas ao se aproximarem da faixa de frequências ideal de vibração dos PZTs (valores discutidos no tópico anterior).

Portanto, este experimento, para esta variável, serviu para comprovar o que já era esperado de que quanto mais interseção entre as faces dos PZTs melhor é a capacidade de transmissão de energia.

- **Angulação relativa entre os PZTs**

Neste caso, o estudo que englobou diretamente esta variável foi o teste dinâmico. Pode-se levar em consideração o fato de que a análise de interseção de áreas dos PZTs apresenta uma motivação semelhante, dado que a inclinação relativa entre os PZTs afeta diretamente o percentual de interseção entre as áreas.

Além disso, durante a realização do teste dinâmico, foi observado que a angulação influencia bastante na capacidade de transmissão de energia pelo canal acústico (no momento de alinhar os PZTs), isto é, ângulos pequenos entre os PZTs causam perdas de energia muito grandes.

Sabendo que, no tópico anterior, foi considerado que os ângulos entre os PZTs foram iguais a  $0^\circ$ , levando em consideração o que foi discutido entre a relação da angulação e interseção entre as áreas e o que foi discutido ao apresentar os resultados deste experimento (relacionados à esta variável), conclui-se que o valor da angulação encontrado na tabela 6.1 não condiz com a realidade. Através das análises e discussões, acredita-se que este valor reflita que, durante os experimentos, houve um desvio angular parasita entre os PZTs que se deu por volta do valor de  $-2^\circ$  encontrado. Assim, o  $S_{21}$  encontrado nestes valores com desvios, na realidade condiz com o alinhamento mais próximo de  $0^\circ$  entre os PZTs, ajustado pelas questões de desalinhamento da montagem.

- **Desvios e perdas**

Neste tópico serão analisadas as perdas da eficiência de transmissão de energia em função da variação dos parâmetros (ângulo, área de interseção e desalinhamento) estudados.

Para analisar esta característica do sistema, os valores de  $S_{21}$  máximos foram comparados com o valor de sua vizinhança. Com isso, pode-se estimar a perda de potência de transmissão em função de uma variação conhecida dos parâmetros estudados (dado que os equipamentos realizam varreduras em passos conhecidos). Obtendo o valor de perda em cada gráfico dos anexos A, B, C, D e E, foi obtido um

valor de média para a perda notada. Desta forma, foi desenvolvida a tabela 6.5 a seguir:

	<b>Ângulo</b> ( $\Delta\alpha \approx 1.74^\circ$ )	<b>Interseção</b> ( $\Delta A = 50\%$ )	<b>Frequência</b> ( $\Delta f = 187.5 \text{ Hz}$ )
<b>Média (dB)</b>	-1.0451	-6.87706	-0.01208
<b>Perda</b>	21.39%	79.47%	0.28%

Tabela 6.5: Análises de perdas.

Vale ressaltar que estes valores de perda não possuem caráter linear e estão avaliados em função das condições ótimas identificadas durante os experimentos, isto é, são avaliados diretamente nas proximidades dos valores de  $S_{21}$  máximos encontrados. Estas análises consideram que um operador realizaria a configuração do sistema nas condições ótimas encontradas. Assim, é possível refletir quais parâmetros mais merecem atenção num sistema baseado em canais acústicos.

Primeiramente é possível concluir que a frequência de vibração dos PZTs possui uma boa tolerância de desvios do valor ótimo. Considerando um desvio de 187.5 Hz, a perda média encontrada foi de 0.28%.

Por outro lado, é importante ressaltar o quão preciso deve ser realizado o alinhamento de um sistema, para que seja realizada a transferência de energia de maneira eficiente. Um desvio de aproximadamente  $1.74^\circ$  de inclinação entre os PZTs apresentou perdas de até 21.39% na capacidade de transmissão de energia entre os transdutores piezoelétricos. Paralelamente, um desvio de 50% de área de interseção entre os PZTs apontou perdas de até 79.47% da energia transmitida, o que se mostra completamente inviável em um ambiente de operação.

Estas informações apontam perdas que parecem ser muito grandes, entretanto, como os MEMS consomem valores de energia para operação muito menor do que a disponibilidade de energia que a superfície consegue transmitir aos arranjos de transdutores piezoelétricos, não são grandes limitantes nesse ponto do projeto. Por outro lado, não se deseja desperdiçar energia, dado que a energia transmitida pela superfície para o sistema de extração é utilizada para outras atividades, como controle de válvulas, por exemplo. Por isso, a equipe de projeto do laboratório está desenvolvendo uma metodologia de instrumentação da coluna e do revestimento que faça com que os arranjos piezoelétricos nunca tenham menos de 50% de interseção

de área entre si, conseqüentemente, nunca tenham perdas maiores do que aproximadamente 80%, nestas primeiras etapas do projeto.

### 6.1 Expectativas e próximos passos

Para as próximas etapas deste projeto, deverão ser realizados novos experimentos visando determinar as melhores condições de transmissão de energia. Nestas futuras etapas serão utilizados os conceitos e conhecimentos adquiridos nos experimentos aqui descritos, levando em conta os novos valores de frequência de vibração, área de interseção e angulação entre os PZTs que merecem maior atenção para alcançar os valores de  $S_{21}$  mais próximos do ideal.

Para isto, o próximo experimento a ser realizado consiste em dois tubos concêntricos instrumentados e com água no interstício entre eles. Neste teste, os tubos possuem locais específicos, que foram usinados para instrumentação (dimensionamento em função dos *housings*), de maneira a assegurar um alinhamento mais eficaz entre os PZTs, conforme as figuras abaixo:



Figura 6.1: Bancada experimental do “teste em cilindros”

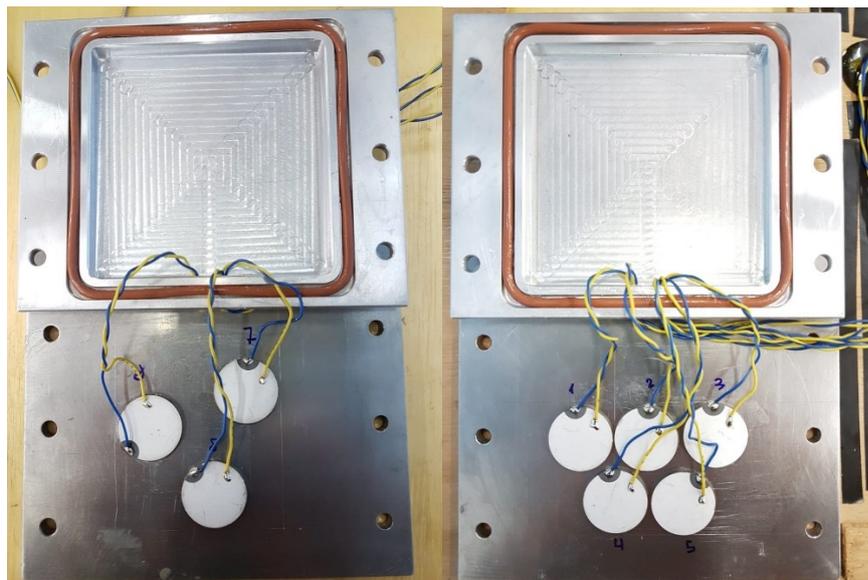


Figura 6.2: *Housings* e PZTs instrumentados em seus respectivos corpos metálicos para o “teste em cilindros”.

Similarmente aos testes anteriores, será definido um domínio de frequências de vibração dos PZTs, que neste momento levará em conta as conclusões tiradas neste relatório.

A motivação deste teste é que, por apresentar uma estrutura mais robusta (paredes de aço mais espessas), o que permite compreender melhor a influência dos corpos metálicos na transmissão de energia e possui mais segurança no alinhamento entre os PZTs, dado que todos os componentes desta montagem foram projetados e usinados de maneira a possuírem dimensões mais seguras para o posicionamento correto entre os PZTs.

Por fim, existe a visão da execução de outros experimentos, considerando a influência de novos parâmetros de estudo como: temperatura, vibração no meio, pressão e diferentes fluidos no interstício entre os corpos metálicos. Assim, estes novos testes serão planejados e executados para que, desta forma, seja possível simular de maneira mais fidedigna as condições severas encontradas em poços de petróleo. Finalmente, será possível determinar, com mais segurança as configurações de projeto mais ideais implementação, levando em consideração as diversas variáveis que possam afetar o comportamento das ondas acústicas e, logo, da transmissão de energia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dutta, Sumit. Introduction to Oil and Gas Industry. Disponível em: <<https://www.oilandgasiq.com/strategy-management-and-information/articles/oil-gas-industry-an-introduction>>. Acesso em 03 de setembro de 2018.
- [2] Jacobs, Harrison. These Photos Of The 2010 BP Oil Spill Are Weirdly Mesmerising. Disponível em: <<https://www.businessinsider.com.au/daniel-beltras-photos-of-the-2010-bp-oil-spill-2014-3#on-april-22-two-days-after-the-explosion-of-the-deepwater-horizon-rig-an-oil-leak-was-discovered-when-an-oil-slick-began-to-spread-at-the-former-rig-site-1>>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.
- [3] NKT Photonics. Distributed Temperature Sensing. Disponível em: <<https://www.nktphotonics.com/lios/en/technology/distributed-temperature-sensing/>>. Acesso em 06 de dezembro de 2018.
- [4] OFS Optics. Oil and Gas Distributed Temperature Sensing DTS. Disponível em: <<https://www.ofsoptics.com/oil-gas-dts/>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2018.
- [5] Kluth, Richard. Watley, Dan. Farhadiroushan, Mahmoud. Park, Dong. Lee, Sung. Kim, Jung. Kim, Yoo. Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by using optic fibre. Disponível em: <[https://www.sensornet.co.uk/wp-content/uploads/2016/05/Sensornet\\_Case\\_Studies\\_on\\_Distributed\\_Temperature\\_and\\_d\\_Strain\\_Sensing\\_DTSS.pdf](https://www.sensornet.co.uk/wp-content/uploads/2016/05/Sensornet_Case_Studies_on_Distributed_Temperature_and_d_Strain_Sensing_DTSS.pdf)>. Acesso em 06 de dezembro de 2018.
- [6] Optromix. Distributed Acoustic Sensing (DAS): Theory and Applications. Disponível em: <<https://optromix.com/wp/blog/distributed-acoustic-sensing-das-theory-and-applications/>>. Acesso em 06 de dezembro de 2018.
- [7] Boman, Karen. DAS Technology Expands Fiber Optic Applications for Oil, Gas Industry. Disponível em: <[https://www.rigzone.com/news/oil\\_gas/a/138405/das\\_technology\\_expands\\_fiber\\_optic\\_applications\\_for\\_oil\\_gas\\_industry/?pageNum=1](https://www.rigzone.com/news/oil_gas/a/138405/das_technology_expands_fiber_optic_applications_for_oil_gas_industry/?pageNum=1)>. Acesso em 10 de dezembro de 2018.
- [8] Media College. How Sound Waves Work. Disponível em: <<https://www.mediacollege.com/audio/01/sound-waves.html>>. Acesso em 09 de dezembro de 2018.
- [9] Wilson, Tracy. How Acoustic Levitation Works. Disponível em: <<https://science.howstuffworks.com/acoustic-levitation.htm>>. Acesso em 31 de agosto de 2018.
- [10] Turner, Irene. Piezoelectric Materials and Applications. Disponível em: <<http://classroom.materials.ac.uk/casePiez.php>>. Acesso em 31 de agosto de 2018.
- [11] Fontes Alternativas PTH. Efeito piezoelétrico. Disponível em: <<http://fontesalternativaspth.blogspot.com/2012/06/efeito-piezoelétrico.html>>. Acesso em: 09 de dezembro de 2018.

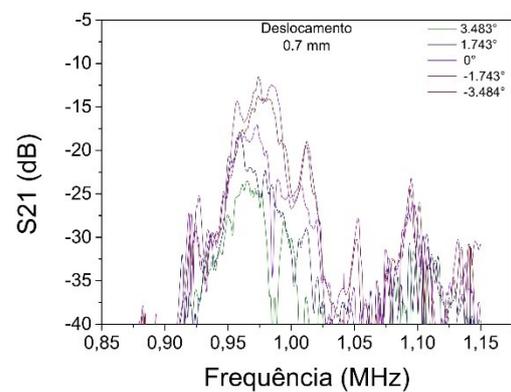
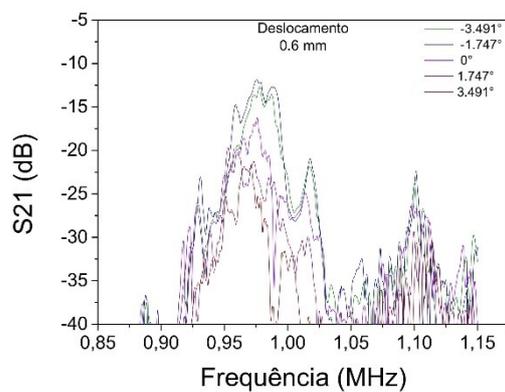
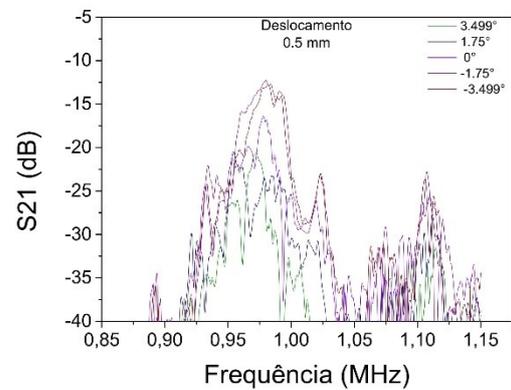
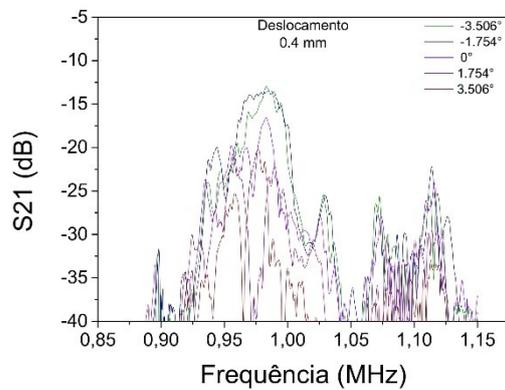
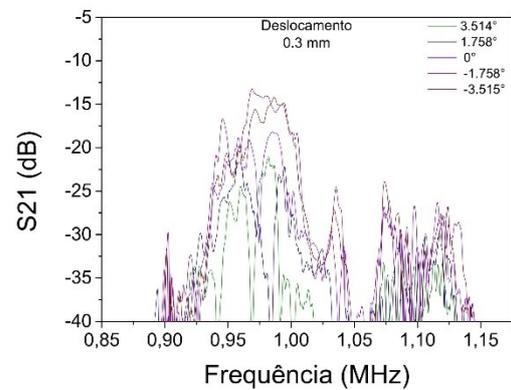
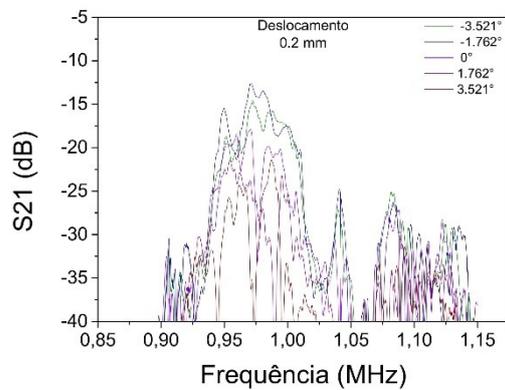
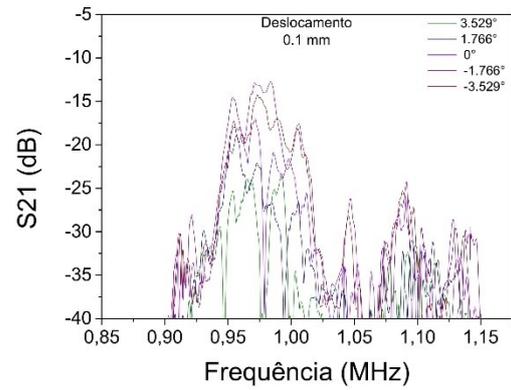
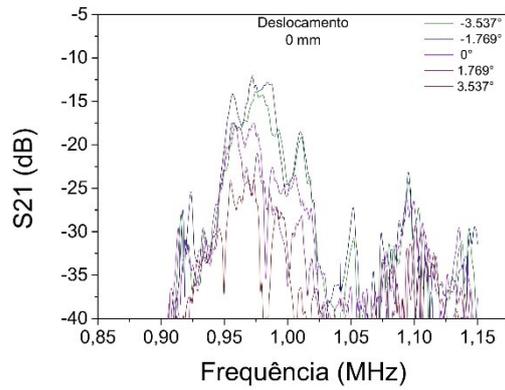
[12] University of Pittsburg. Piezoelectricity. Disponível em: <<http://www.pitt.edu/~qiw4/Academic/MEMS1082/Lecture%208-1.pdf>>. Acesso em 31 de agosto de 2018.

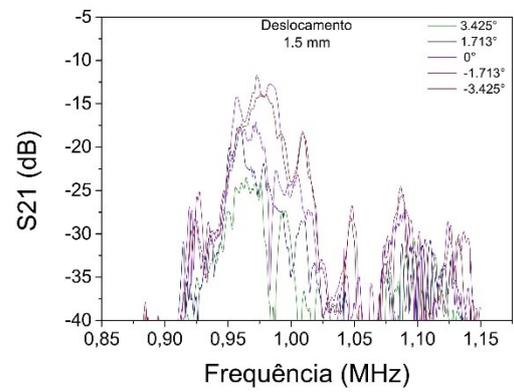
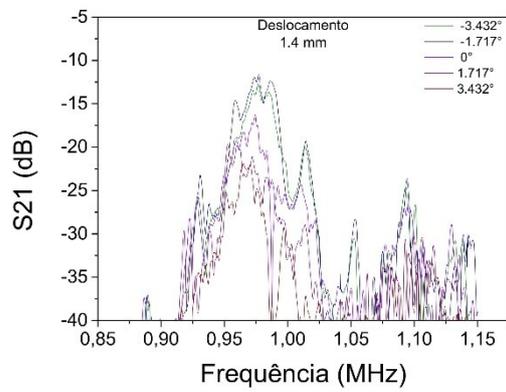
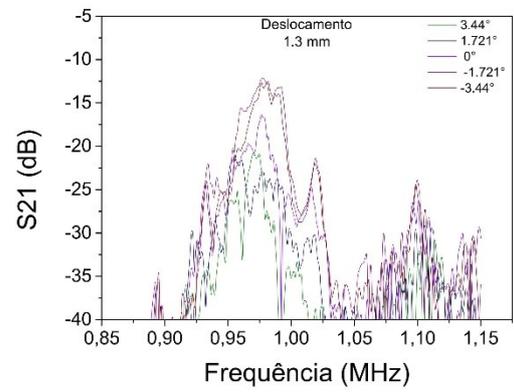
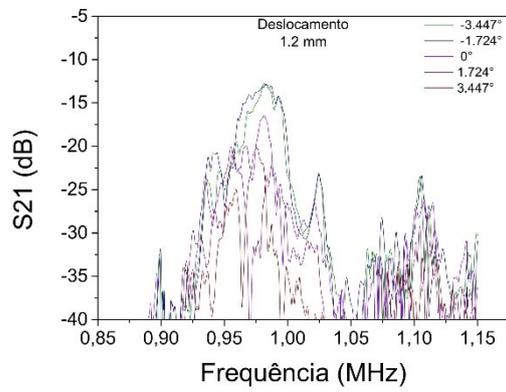
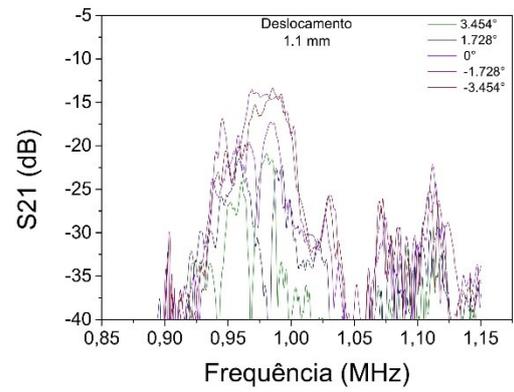
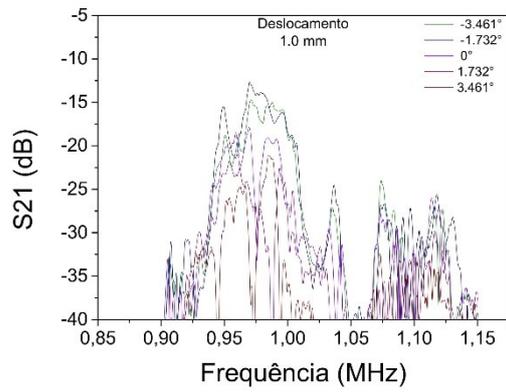
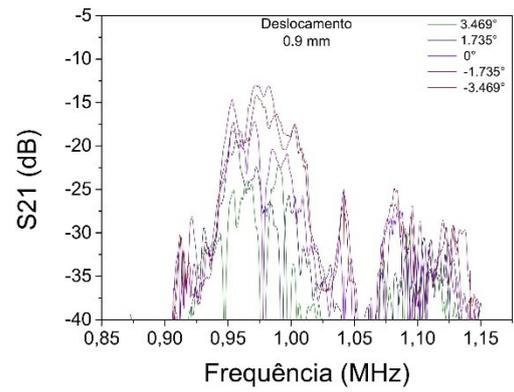
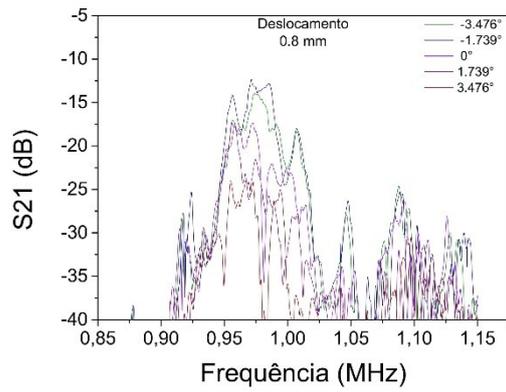
[13] PRIME Faraday Partnership. Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems). Disponível em: <[http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology\\_review/an-introduction-to-mems.pdf](http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipm-ktn/pdf/Technology_review/an-introduction-to-mems.pdf)>. Acesso em 01 de setembro de 2018

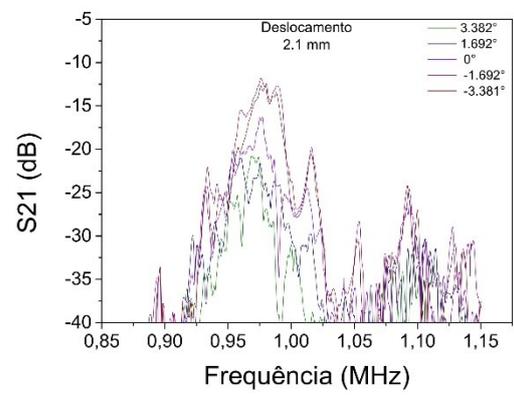
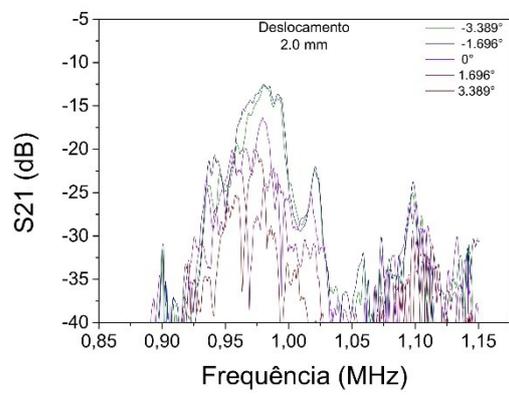
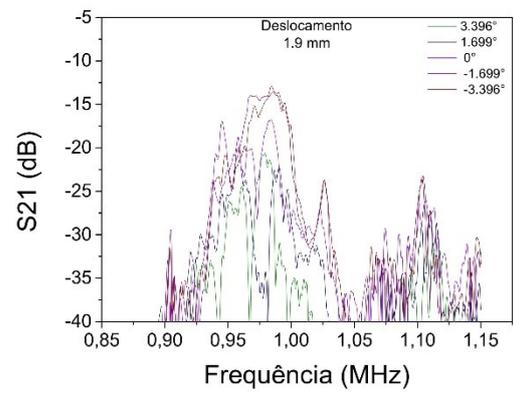
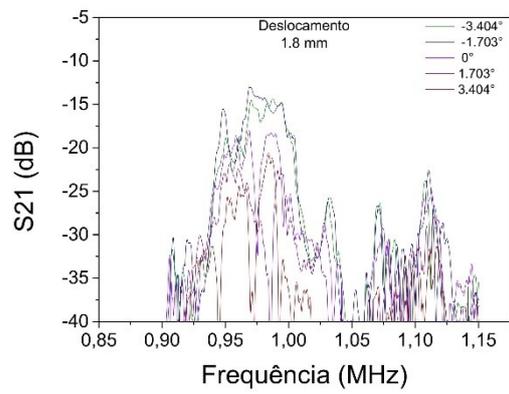
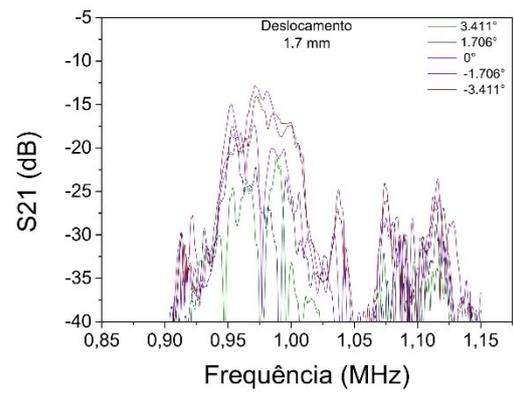
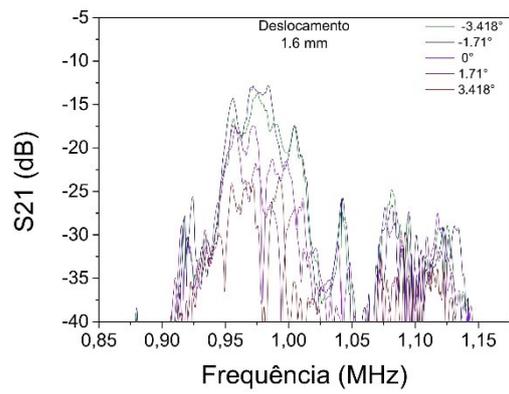
[14] Johnson, R. MEMS Spurred by Industrial IoT. Disponível em: <<http://nextgenlog.blogspot.com/2014/12/eetimes-mems-spurred-by-industrial-iot.html>>. Acesso em: 29 de novembro de 2018.

[15] Adhesive and Glue. Epoxy adhesives and glue - definition and properties of epoxy. Disponível em: <<https://www.adhesiveandglue.com/epoxy-adhesive.html>>. Acesso em 03 de setembro de 2018.

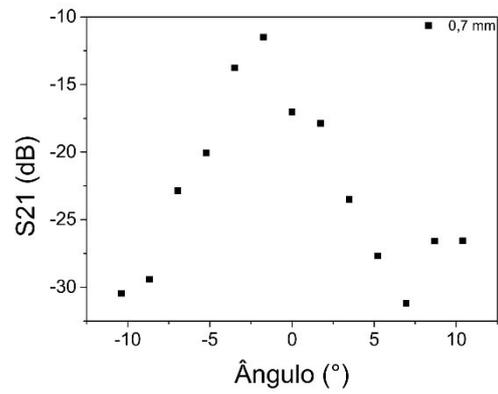
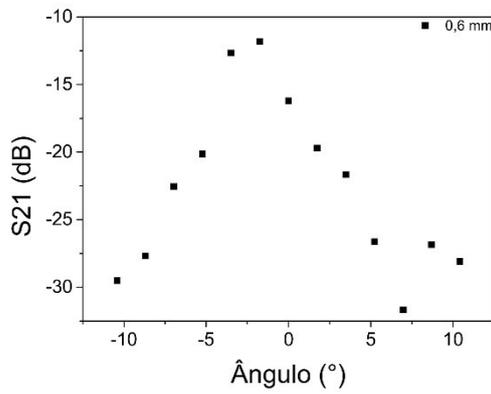
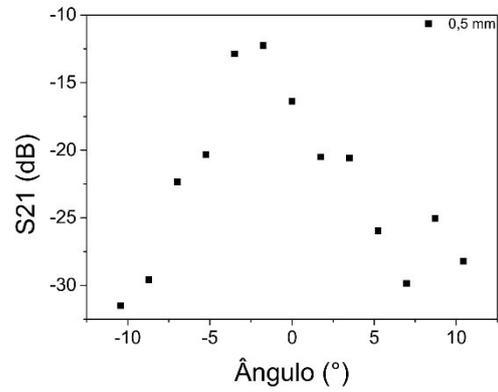
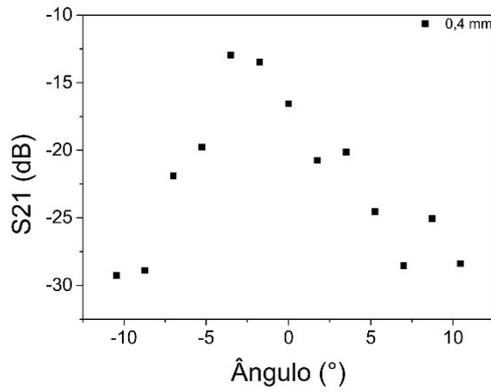
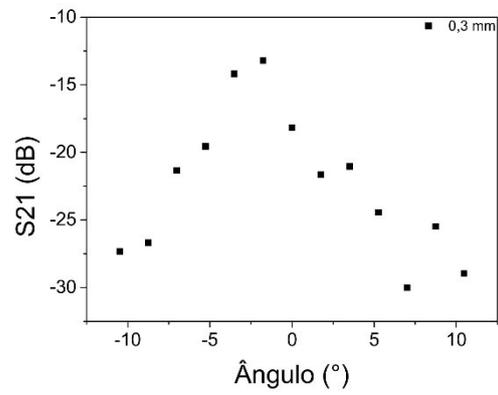
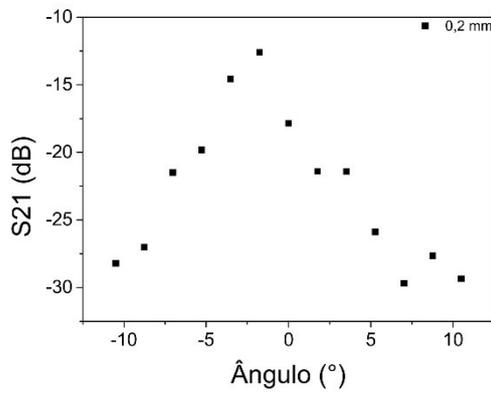
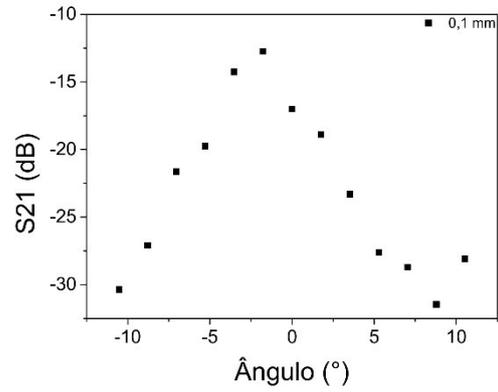
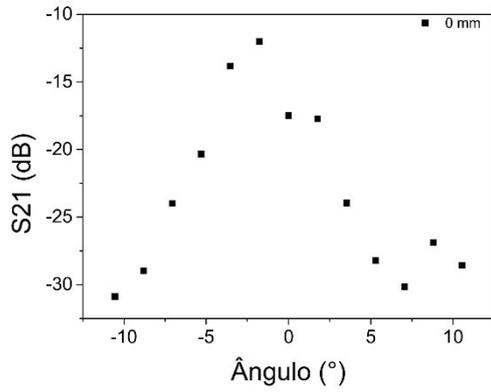
## Anexo A - Resultados do teste dinâmico (S21 x Frequência)

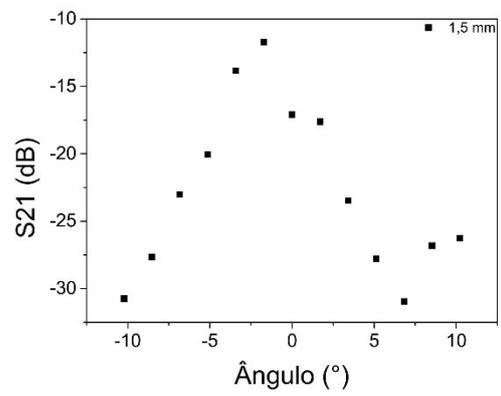
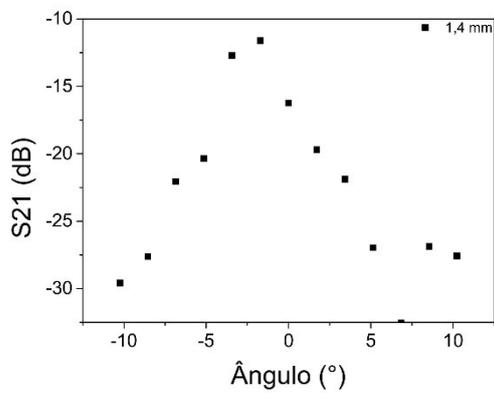
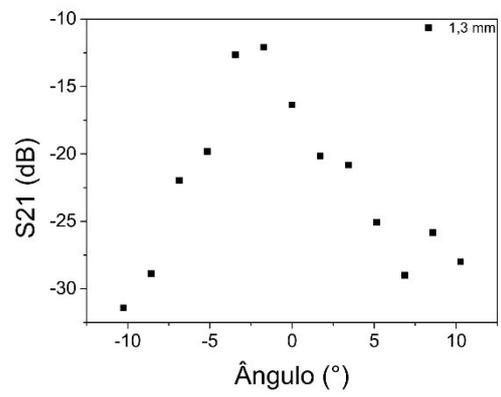
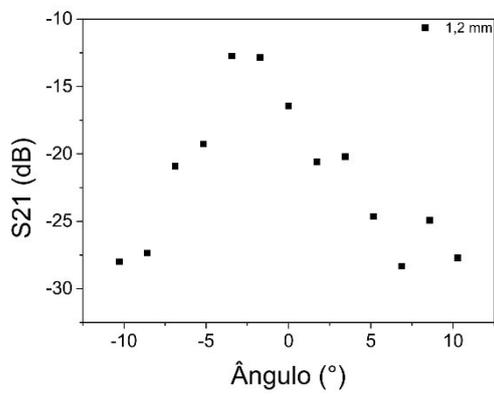
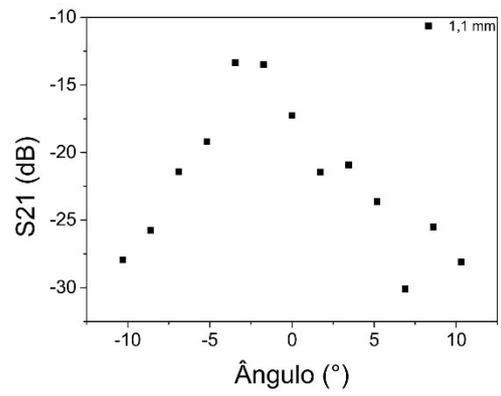
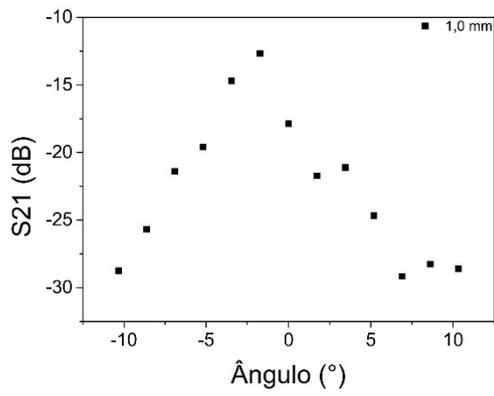
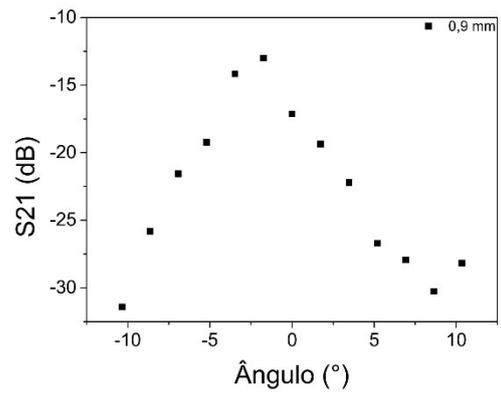
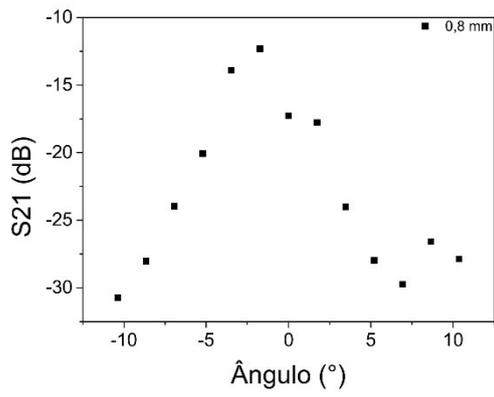


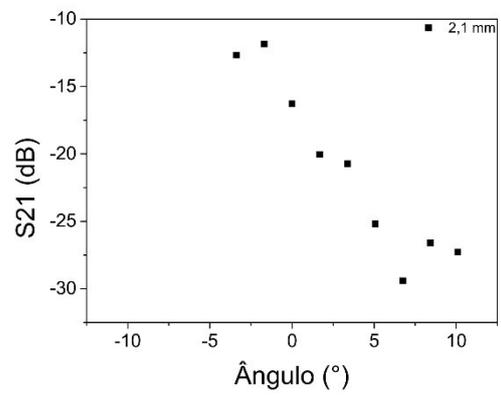
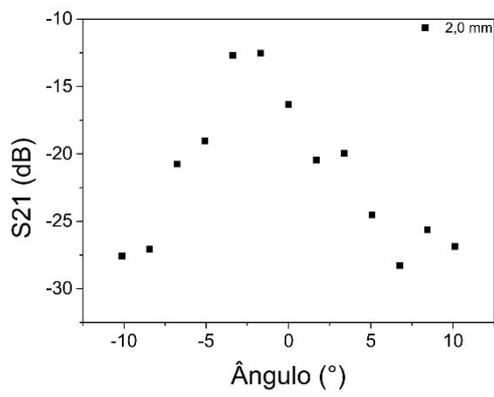
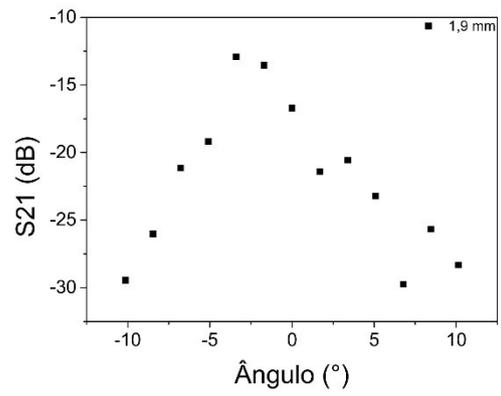
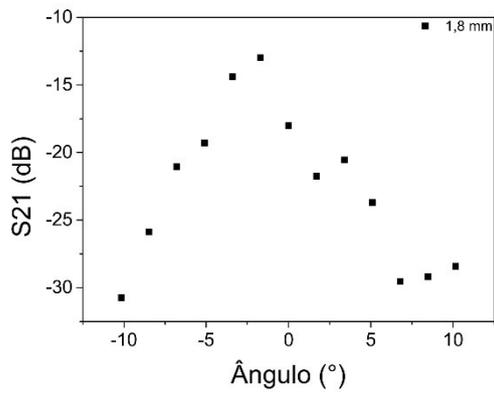
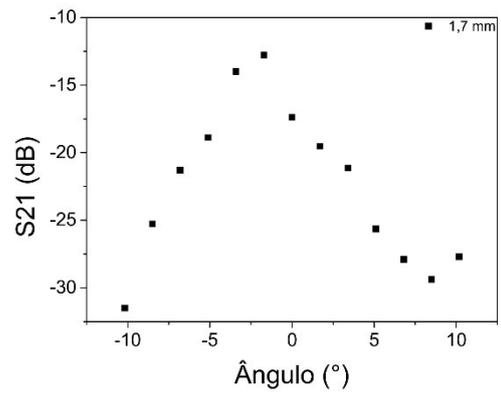
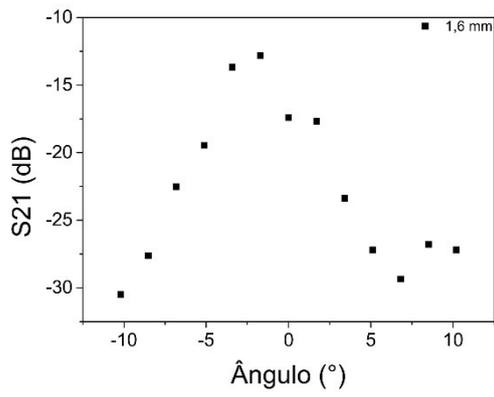




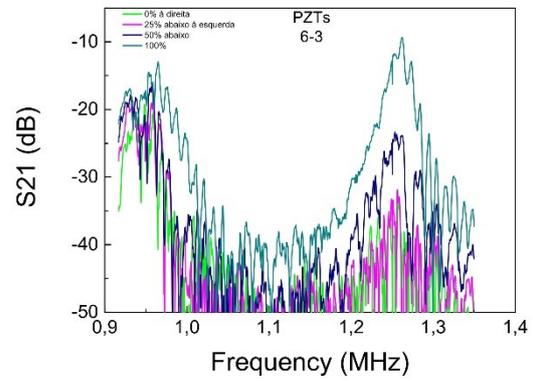
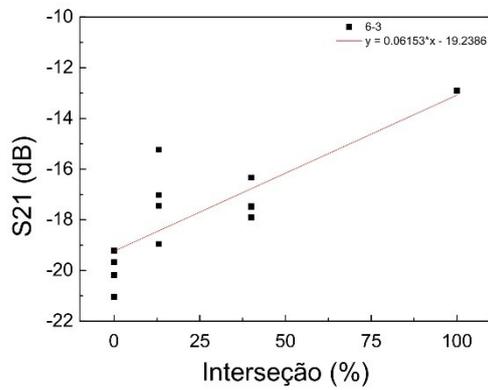
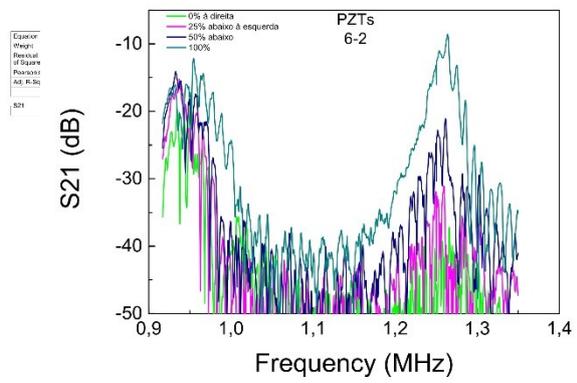
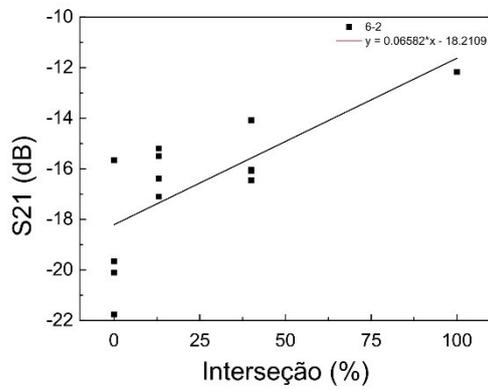
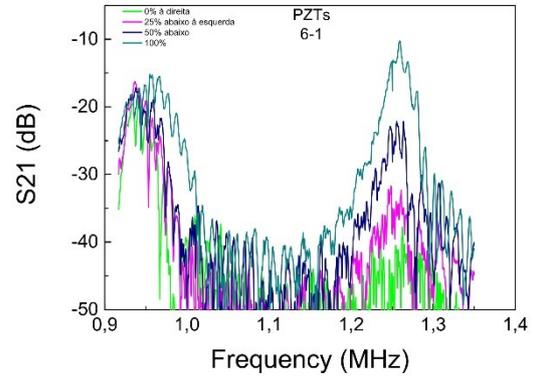
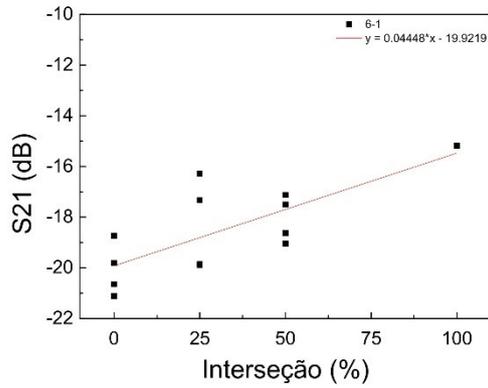
## Anexo B - Resultados do teste dinâmico (S21 x Ângulo)

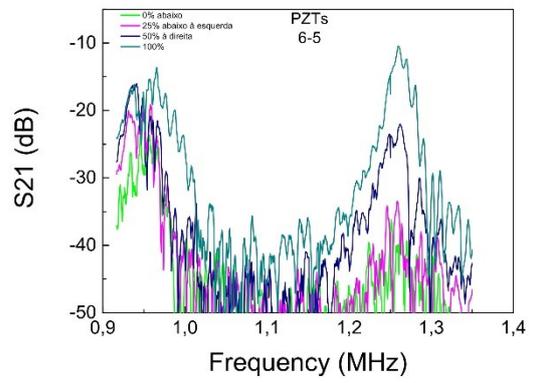
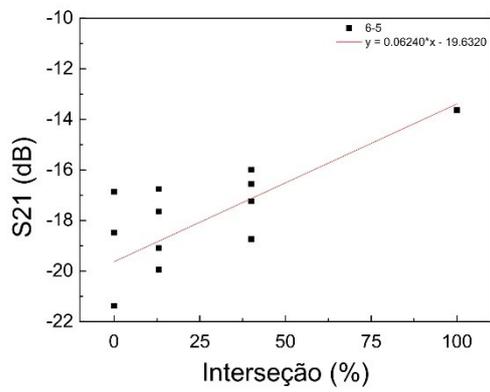
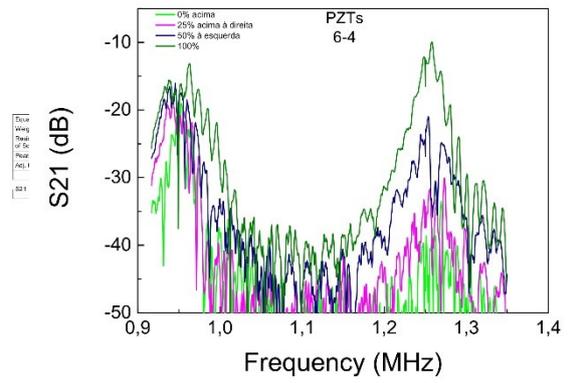
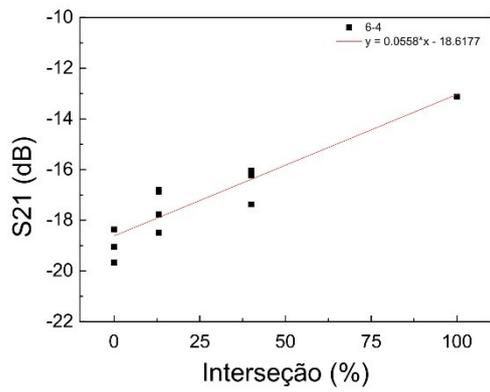




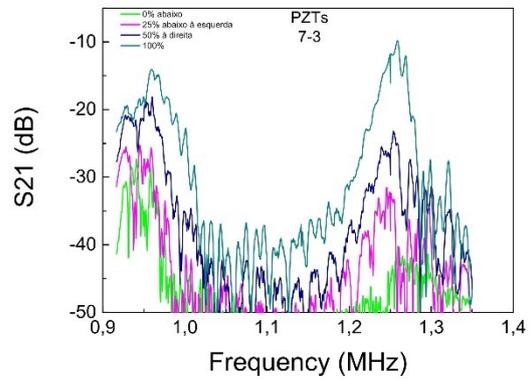
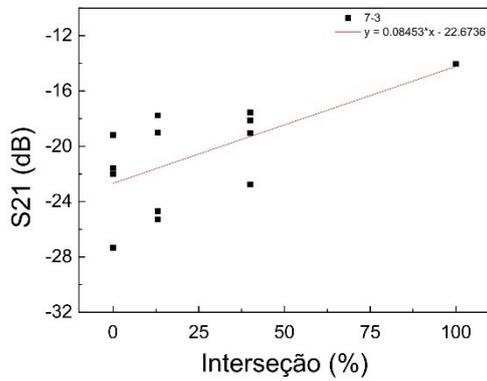
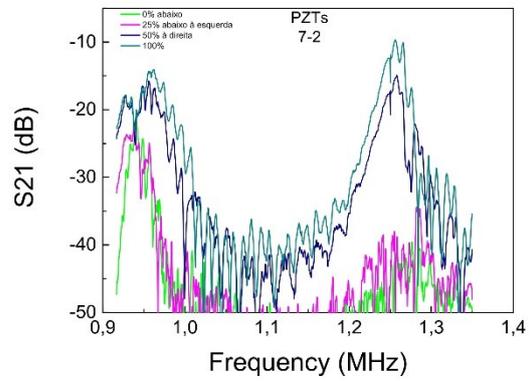
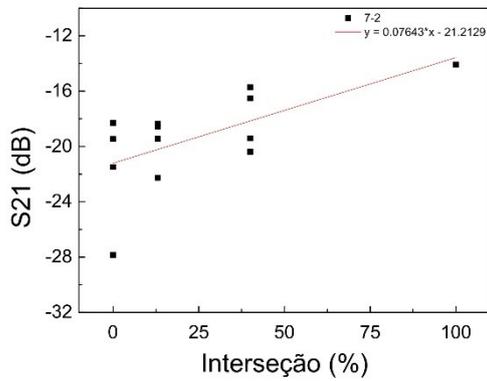
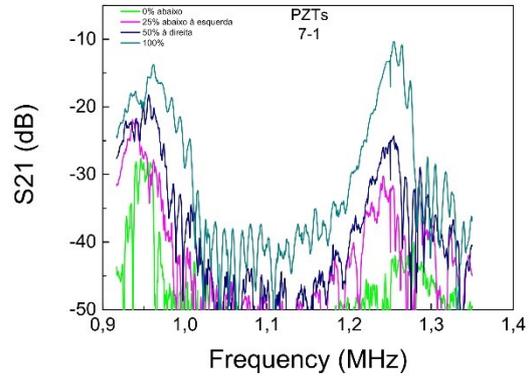
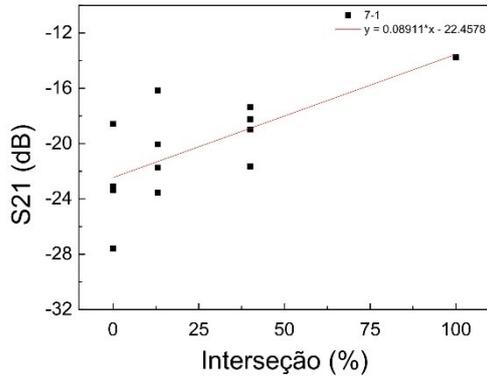


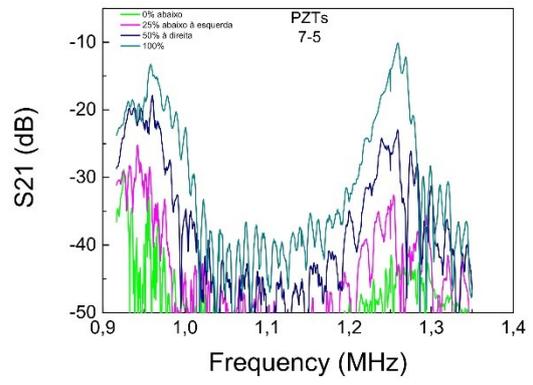
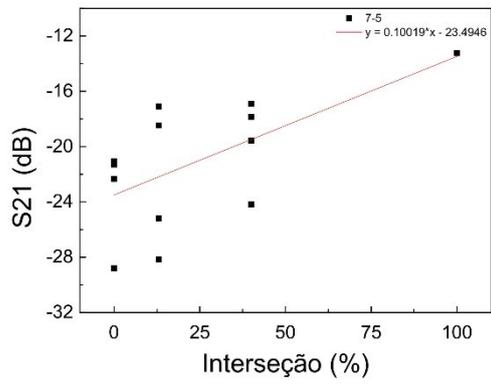
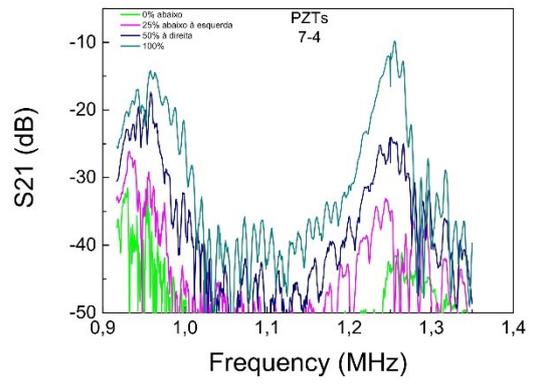
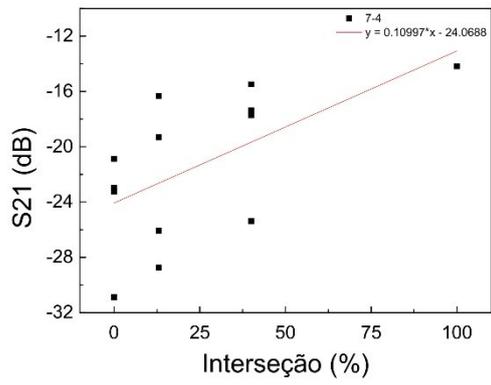
## Anexo C - Resultados do teste de placas planas (PZT 6)





## Anexo D - Resultados do teste de placas planas (PZT 7)





## Anexo E - Resultados do teste de placas planas (PZT 8)

