



Universidade Estadual de Maringá
Centro de Ciências Exatas
Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

**CARACTERIZAÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE
ULTRASSOM INDUSTRIAL DE LIMPEZA**

Acadêmico: Evelin Biondi Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá, 27 de Março de 2023



Universidade Estadual de Maringá

Centro de Ciências Exatas

Departamento de Física

Trabalho de Conclusão de Curso

CARACTERIZAÇÃO DE UM TRANSDUTOR DE ULTRASSOM INDUSTRIAL DE LIMPEZA

Trabalho de Conclusão de Curso ao Departamento de Física da Universidade Estadual de Maringá, sob orientação do professor José Roberto Dias Pereira, como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Física.

Acadêmico: Evelin Biondi Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dias Pereira

Maringá, 27 de Março de 2023

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

INTRODUÇÃO	1
1) EFEITO PIEZOELÉTRICO	
1.1. Histórico	3
1.2. Ferroeletricidade	3
1.3. Piezoeletricidade	6
1.4. Materiais piezoelétricos	15
1.5. Cerâmica PZT	18
2) ULTRASSOM	
2.1. Definição	19
3) RESSONÂNCIA	
3.1. Definição.....	20
4) TRANSDUTORES	
4.1. Definição	22
4.2. Histórico	23
4.3. Transdutor de Ultrassom Industrial de Limpeza	24
4.4. Aplicações Gerais	25
4.5. Aplicações do Transdutor de Ultrassom Industrial de Limpeza	27
4.6. Caracterização do Transdutor	28
5) PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	29
6) MEDIDAS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS	
6.1. Metodologia	31

6.2. Tabelas e Resultados	31
CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS	43

AGRADECIMENTOS

À minha família e aos meus amigos pelo suporte durante esta jornada e compreensão nos períodos de dúvida.

Ao professor José Roberto Dias Pereira, que me orientou e acolheu durante toda a graduação e me apresentou à área de eletrônica e automação.

Aos demais professores que contribuíram para a minha formação.

E, finalmente, aos meus amados animais de estimação, que tiveram um papel indispensável de apoio emocional durante minha graduação e período de isolamento social, devido à pandemia.

RESUMO

O presente trabalho objetiva caracterizar um transdutor de ultrassom de limpeza industrial, possível por meio de medidas de frequências e das respectivas correntes. Os transdutores são dispositivos compostos por materiais piezoelétricos, conhecidos por responder a estímulos elétricos e apresentar vibrações nas frequências de ressonância, fator que origina o efeito de ultrassom. Assim, o objeto de estudo, um transdutor de limpeza, demonstra suas frequências de ressonância quando é aferido um estímulo elétrico. A caracterização é feita com uma análise gráfica dos valores de frequência do transdutor, em especial os das frequências de ressonância. A caracterização torna-se possível à medida que são encontradas as frequências de ressonância, caracterizadas por aumentos repentinos nos valores de tensão observados no osciloscópio, e se obtém uma gama de valores ao redor de cada uma delas, com todos os valores sendo captados pelo aparato experimental. Apesar dos valores obtidos estarem relacionados às tensões, com o auxílio de conceitos físicos e equações matemáticas, pode-se chegar aos valores de corrente indiretamente, e este processo é necessário, visto que são necessários ao método de caracterização. O conjunto de valores alocados em um gráfico (de formato corrente pico a pico versus frequência), formam uma série de picos que representam as frequências de ressonância, e assim tem-se a caracterização do transdutor de limpeza analisado.

ABSTRACT

The present work aims to characterize an industrial cleaning ultrasound transducer, possible by means of frequency measurements and the respective voltages. Transducers are devices composed of piezoelectric materials, known to react to electrical stimulus and to present vibrations at resonance frequencies, a factor that gives rise to the ultrasound effect. Thus, the object of study, a cleaning transducer, demonstrates its resonance frequencies when an electrical stimulus is measured. The characterization is made with a graphic analysis of the frequency values of the given object, in particular the resonance frequencies, and thus the characterization is possible as the resonance frequencies are found, characterized by sudden increases in voltage values seen in the oscilloscope, and a range of values is obtained around each of them, with all values being collected by the experimental apparatus. Although the values obtained are related to voltages, through the use of physical concepts and mathematical equations, current values can be reached indirectly, and this process is necessary, since they are necessary for the characterization method. The set of values plotted on a graph (peak-to-peak current versus frequency), formed by a series of peaks, represents the resonance frequencies, and thus the characterization of the analyzed cleaning transducer.

INTRODUÇÃO

O efeito denominado de ultrassom surgiu na natureza dentre certos animais, tais quais golfinhos e focenídeos, dotando-os da característica essencial à sobrevivência chamada ecolocalização, que possibilita que eles se localizem e cacem, devido à interpretação dos ecos gerados pelos ultrassons que eles emitem. Portanto, não foi inventado, apenas descoberto e replicado de modo a servir aos interesses da raça humana. As aplicações do ultrassom se iniciaram durante a Primeira Guerra Mundial com a criação dos sonares, e se multiplicaram ao longo dos anos, separadas entre os de baixa e as de alta intensidade. Um exemplo de uso da primeira categoria é a obtenção de informações de materiais pela transmissão de energia através do meio, e da segunda é a terapia médica, cujo objetivo é causar alterações intencionais ao meio pelo qual a onda se propaga [1]. Existem tantos exemplos de transdutores com os quais os seres humanos interagem diariamente, que torna-se difícil enumerá-los.

As ondas ultrassônicas são geradas por dispositivos denominados transdutores ultrassônicos ou, simplesmente, transdutores. De maneira sucinta, os transdutores recebem a energia elétrica e a convertem em energia mecânica. O contrário também é possível. Os materiais que compõem os transdutores são piezoelétricos e, portanto, produzem o efeito piezoelétrico [1–2].

O efeito piezoelétrico consiste na capacidade que determinados materiais possuem de gerar tensão elétrica quando submetidos a pressões mecânicas e é observado em cristais, cujo centro de simetria da estrutura cristalina é inexistente. Jacques e Pierre Curie foram os primeiros a observarem este efeito em 1880, enquanto analisavam cristais de quartzo, chamados também de sais de Rochelle. Posteriormente, foi observada a existência do efeito piezoelétrico reverso, que consiste na deformação mecânica que ocorre nos mesmos materiais, porém devido à aplicação de campos elétricos [3-4].

O efeito piezoelétrico foi primeiramente observado em materiais naturais, como o quartzo, e apesar deles serem o princípio dos transdutores ultrassônicos, o efeito é fraco neles. A invenção dos materiais ferroelétricos foi a responsável pela melhora na performance dos transdutores. [5].

Diversos modelos de transdutores foram criados e dentre eles, os de alta potência que seguem o modelo de Langevin (ou sanduíche) e são aplicados nas limpezas ultrassônicas industriais. São capazes de gerar intensidades de muitos W.cm^{-2} e utilizam intensidades de ultrassons de algumas dezenas de quilo-Hertz. Essas frequências e intensidades são semelhantes às necessárias para os projetores de sonares subaquáticos de alta potência [5].

No transdutor de Langevin, o material piezoelétrico representa apenas uma pequena porcentagem do volume total e os atenuantes convencionais não são úteis devido ao tamanho que se faria necessário e ao risco de danos por superaquecimento [5].

O efeito piezoelétrico e os materiais piezoelétricos possibilitam também os transdutores que possuem outras aplicações, tais quais: produção e detecção sonora, geração de altas voltagens, uso para controle de frequência em osciladores altamente estáveis, microscopia de varredura por sonda, mecanismos de ignição de isqueiros, televisores, rádios, celulares, sistemas de navegação, entre outros [4-6].

Apesar de o efeito piezoelétrico ter sido inicialmente observado em materiais naturais, eles não são poderosos o suficiente para as aplicações sofisticadas que objetivam-se, portanto, foram criados os materiais não-naturais, tal qual o PZT. As cerâmicas PZT (titanato zirconato de chumbo), classificadas em *hard-PZT* ou *soft-PZT*, suprem uma parcela grande da demanda de materiais piezoelétricos que compõem os transdutores, entretanto, existem outras variedades disponíveis capazes de suprir a necessidade de algumas aplicações específicas mais específicas, como por exemplo as operações que ocorrem em ambientes de elevadas temperaturas [5].

CAPÍTULO 1

EFEITO PIEZOELÉTRICO

1.1. HISTÓRICO

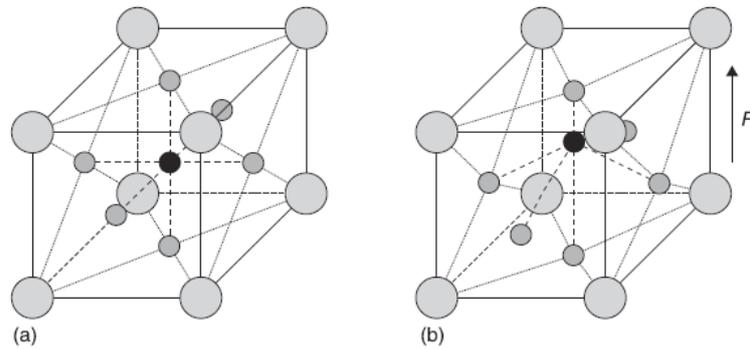
O efeito piezoelétrico foi inicialmente observado em 1880 pelos irmãos Pierre Curie e Jacques Curie, que ao combinarem conhecimentos de piroeletricidade, a capacidade que certos materiais possuem de gerarem potencial elétrico quando aquecidos, e utilizando estruturas cristalinas, tais quais, turmalina, topázio, quartzo e sal de Rochelle, puderam observar o efeito [4].

A piezoeletricidade se manteve restrita ao uso laboratorial até que a Primeira Guerra Mundial se iniciasse e a primeira aplicação prática fosse apresentada ao mundo: os aparelhos de sonar. Os sonares atraíram os holofotes para os materiais piezoelétricos, que foram amplamente explorados. Durante a Segunda Guerra Mundial, o interesse se voltou aos materiais piezoelétricos não-naturais, devido ao potencial superior por eles apresentado [4].

1.2. FERROELETRICIDADE

Os materiais piezoelétricos são uma subcategoria dos ferroelétricos, e são denominados em função das propriedades que possuem em comum com eles. A propriedade fundamental dos materiais ferroelétricos, é a polarização elétrica espontânea que possuem, mesmo sem a atuação de um campo externo. O titanato de bário, um dos exemplos mais completos sobre materiais ferroelétricos, fornece conhecimentos importantes, tanto sobre ferroeletricidade quanto piezoeletricidade [5].

Figura 1.2.1: Estrutura cristalina do titanato de bário (BaTiO_3). (a) acima da temperatura de Curie e (b) abaixo da temperatura de Curie.



Fonte: NAKAMURA, 2012, p. 29.

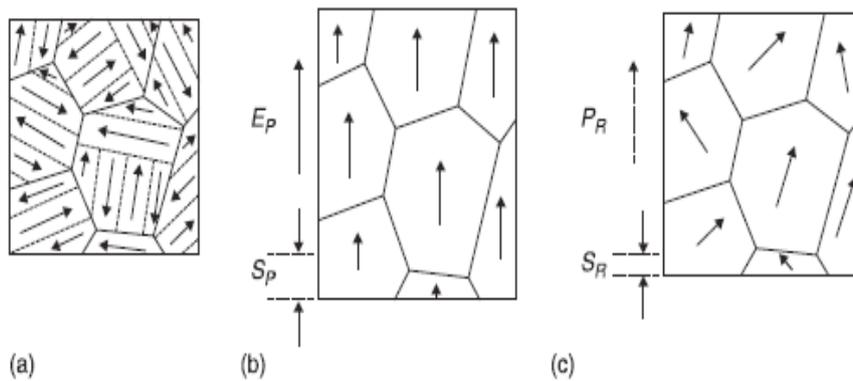
Como exposto na figura 1.2.1, o titanato de bário, ou BaTiO_3 , é um material cristalino de células cúbicas unitárias, que quando exposto a temperaturas superiores a $130\text{ }^\circ\text{C}$, os íons de Ba^{2+} ocupam os cantos da célula unitária, Ti^{4+} o centro geral e O^{2-} o centro das faces, no caso de (a). Abaixo de $130\text{ }^\circ\text{C}$, a célula assume o formato tetragonal e torna-se cerca de 1% mais comprida na direção vertical, fazendo com que as posições de Ti^{4+} e Ba^{2+} se elevem em relação a O^{2-} , no caso de (b). A variação resulta em uma polarização elétrica e a temperatura na qual a polarização ocorre, chama-se temperatura de Curie ou T_c [5].

O BaTiO_3 pode ser transformado em cerâmica através da secagem e sintetização de uma pasta inicialmente moldável. O material formado apresenta cristaltos ou grãos fortemente unidos, com propriedades que variam entre os grãos individuais e os conjuntos de grãos, em função dos efeitos gerados entre as interfaces dos grãos. Segundo o princípio da energia mínima, no sistema fechado, com parâmetros externos e entropia constantes, a energia interna diminuirá e se aproximará de um valor mínimo no equilíbrio. Além de considerar o resultado interno das posições relativas dos íons, o titanato de bário se divide em múltiplos domínios dentro dos grãos, cujas polarizações diferem apenas nas direções, por 90° ou 180° [5].

O redirecionamento das polarizações, demonstrado na figura 1.2.2, ocorre pela aplicação de campos elétricos externos que afetam as temperaturas, e é denominado *poling*. O resultado é imperfeito, pois a orientação dos domínios depende das orientações das células unitárias com os cristaltos, que dependem das orientações dos grãos que os compõem, mas a polarização torna-se mais forte após esse processo, e além da variação nos dipolos, vê-se também uma carga elétrica na superfície do material. Em (a) pode-se ver a polarização antes, em (b) durante e em (c) após o *poling*.

Graficamente, esse processo pode ser ilustrado em gráficos de polarização P em função do campo elétrico E [5].

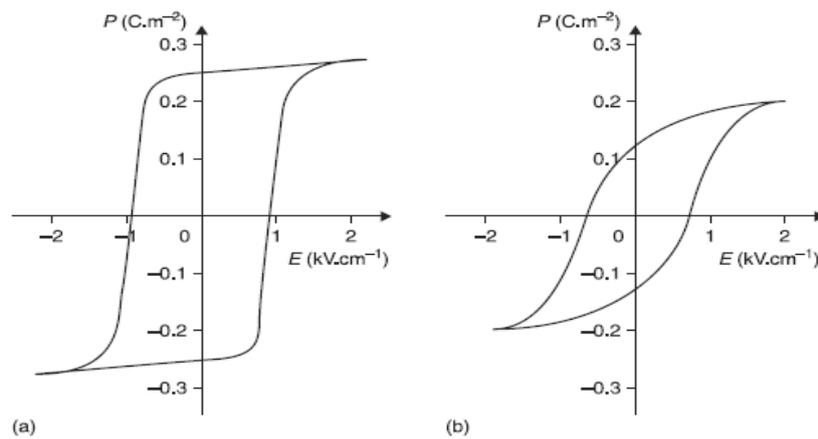
Figura 1.2.2: Polarização titanato de bário (a) no estado natural, (b) durante e (c) após o processo de *poling*.



Fonte: NAKAMURA, 2012, p. 30.

No momento em que a histerese torna-se visível, as características marcantes observadas são o campo coercitivo E_c , a saturação de polarização P_s e a polarização remanescente P_R . Respectivamente, na qual a polarização tende a zero, na qual ocorre realinhamento nos domínios e na qual a saturação da polarização tende a zero. Essas características são importantes para certas aplicações do fenômeno do ultrassom, pois há a preferência por materiais com campos coercitivos potentes a fim de evitar sinais elétricos bipolares capazes de alterar a polarização [5].

Figura 1.2.3: Curvas de polarização para (a) cristal unitário e (b) cerâmica de titanato de bário.



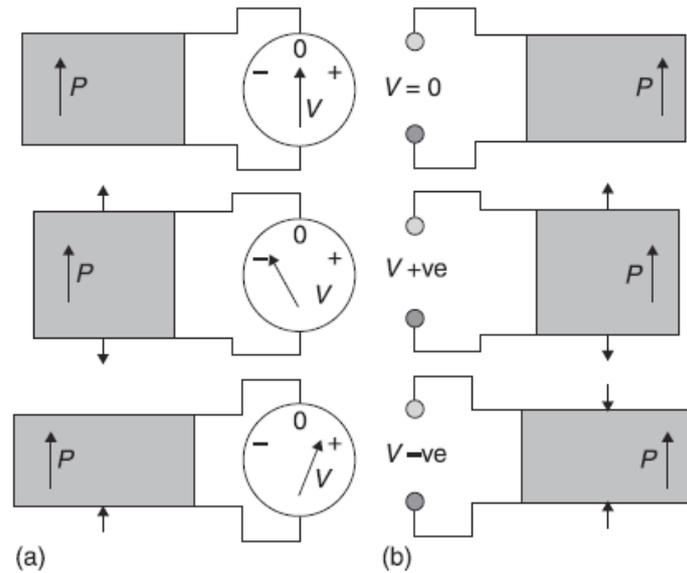
Fonte: NAKAMURA, 2012, p. 31.

As diferenças entre o cristal unitário e a cerâmica piezoelétrica, decorrem da qualidade superior de alinhamento dos dipolos no caso dos cristais, como ilustra a figura 1.2.3. O *poling* ocorre em altas temperaturas, simplificando o realinhamento dos domínios, desde antes do processo de resfriamento até a temperatura ambiente com o campo de *poling* ainda aplicado. Se o material do transdutor usado durante o processo é aquecido, então o processo de *depoling* é possível e completa-se ao superar o valor de T_c [5].

1.3. PIEZOELETRICIDADE

O efeito piezoelétrico foi primeiramente demonstrado em materiais naturais, como o quartzo, e embora esses materiais tenham sido a base dos transdutores ultrassônicos, possibilitando o desenvolvimento dos sonares marinhos, o efeito é fraco neles. A invenção dos materiais ferroelétricos na década de 1950 foi a responsável pela melhora na performance dos transdutores [5].

Figura 1.3.1: (a) Efeito piezoelétrico direto, causado por pressão mecânica. (b) Efeito piezoelétrico reverso, causado por tensão elétrica.



Fonte: NAKAMURA, 2012, p. 32.

O efeito piezoelétrico, como demonstrado na figura 1.3.1, é caracterizado pela capacidade de materiais específicos em produzir cargas elétricas quando mecanicamente pressionados, e o processo inverso também ocorre, tornando-o um efeito reversível. O efeito direto se aplica ao receptor e o reverso à fonte, tornando-o não intuitivo. O campo elétrico produzido pela tensão mecânica do material piezoelétrico se dá pela mudança das posições das cargas positivas e negativas que o compõem. No processo inverso, um campo elétrico externamente aplicado pode fazer com que esse material se dilate ou se comprima [4-5].

O titanato de bário é um material ferroelétrico, cuja performance supera a dos materiais piezoelétricos naturais, mas é superado pelo titanato zirconato de chumbo $Pb(Zr Ti)O_3$. A estrutura cristalina de ambos é a mesma e é chamada de perovskita. Os materiais do grupo costumam ter a composição ABO_3 . Considerando os efeitos e posições dos cátions nas regiões A e B, e pode-se alterar significativamente as propriedades das perovskitas adicionando dopantes. Um exemplo de aplicação é o processo de tornar as paredes de domínio mais resistentes aos movimentos, por meio de um campo elétrico ou de uma pressão, no qual a temperatura de Curie se encontra elevada, em um *hard-PZT*, ou, então, de tornar as paredes de domínio mais suscetíveis ao movimento em um *soft-PZT*, no qual a temperatura de Curie encontra-se diminuída [5].

Materiais piezoelétricos apresentam efeitos elétricos, mecânicos e térmicos, o que os torna inerentemente complexos pelo grande número de parâmetros a que são submetidos. A lista de parâmetros se estende ainda mais quando consideradas as faixas de aplicações específicas. Assim, a

referência fundamental para caracterizar os materiais piezoelétricos são as equações constitutivas, compostas pelas relações que conectam o campo das variáveis primárias aos campos das variáveis secundárias [5] e detalhadas abaixo.

Para um material dielétrico não-piezoelétrico, o deslocamento elétrico D ($C.m^{-2}$) é definido como

$$D = \epsilon E \quad (1.3.1)$$

Sendo ϵ a permissividade elétrica e E o campo elétrico. Em uma dimensão, a polarização elétrica P de um material piezoelétrico, causado por uma tensão S , varia de acordo com a tensão aplicada, assim,

$$P = eS \quad (1.3.2)$$

Sendo e a constante piezoelétrica de tensão. Unindo as equações tem-se

$$D = \epsilon^s E + P = \epsilon^s E + eS \quad (1.3.3)$$

Sendo ϵ^s a permissividade à tensão constante.

A lei de Hook relaciona a tensão T e a tensão S

$$T = cS \quad (1.3.4)$$

Sendo c a rigidez. A tensão resultante da natureza piezoelétrica do material é dada por

$$T = -eE \quad (1.3.5)$$

E unindo as equações, tem-se

$$T = c^E S - eE \quad (1.3.6)$$

Sendo c^E a rigidez a um campo elétrico constante.

As equações (1.3.3) e (1.3.6) relacionam as propriedades elétricas e mecânicas dos materiais piezoelétricos. Adicionando as equações de onda, elas tornam-se a base da análise matemática dos transdutores ultrassônicos. Outros 3 pares de equações podem ser utilizados para definir os materiais piezoelétricos:

$$S = S^E T + dE \quad e \quad D = dT + \epsilon^T E \quad (1.3.7)$$

$$E = -gT + \frac{D}{\epsilon^T} \quad e \quad S = s^D T + gD \quad (1.3.8)$$

$$E = -hS + \frac{D}{\epsilon^S} \quad e \quad T = c^D S - hD \quad (1.3.9)$$

Sendo T tensão constante e D deslocamento elétrico constante [5].

A piezoelectricidade é um fenômeno de três dimensões, com um alto grau de anisotropia e, portanto, as equações constitutivas são aplicadas às matrizes elastoelétricas para representar o efeito dessa forma [5].

Considerando as equações (1.3.3) e (1.3.6) e redefinindo T e S como tensores tem-se

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (1.3.10)$$

Nos tensores, o primeiro subscrito trata-se da face de um cubo normal às direções $x=1$, $y=2$ e $z=3$ e o segundo trata-se da direção de T ou S. Assim, T_{mn} e S_{mn} , $n=1,2,3\dots$ demonstram tensão ou deformação para forças aplicadas em n, enquanto tensão e deformação ocorrem na mesma direção.

No caso de T_{mn} e S_{mn} , $m \neq n$, demonstram tensões de cisalhamento e deformações. Considerando um material piezoelétrico em equilíbrio estático, tem-se que

$$T_{mn} = T_{nm} \quad e \quad S_{mn} = S_{nm} \quad m, n = 1, 2, 3 \dots \quad (1.3.11)$$

O que implica dizer que cada tensor de segunda ordem possui seis componentes independentes e possibilita expressar T como

$$T = [T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6]^T \quad (1.3.12)$$

Sendo o T sobrescrito transposição e $T_1=T_{11}$, $T_2=T_{22}$, $T_3=T_{33}$, $T_4=T_{23}=T_{32}$, $T_5=T_{13}=T_{31}$ e $T_6=T_{12}=T_{21}$. O mesmo padrão ocorre para S

$$S = [S_1 S_2 S_3 S_4 S_5 S_6]^T \quad (1.3.13)$$

O campo elétrico E e a deslocamento elétrico D são vetores de três elementos

$$E = [E_1 E_2 E_3]^T \quad e \quad D = [D_1 D_2 D_3]^T \quad (1.3.14)$$

Os números subscritos representam as coordenadas x, y e z, respectivamente, e a representação transposta é utilizada por ser sucinta [5].

As equações (1.3.3) e (1.3.6) completas assumem as formas

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & c_{14}^E & c_{15}^E & c_{16}^E & -e_{11} & -e_{21} & -e_{31} \\ c_{21}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & c_{24}^E & c_{25}^E & c_{26}^E & -e_{12} & -e_{22} & -e_{32} \\ c_{31}^E & c_{32}^E & c_{33}^E & c_{34}^E & c_{35}^E & c_{36}^E & -e_{13} & -e_{23} & -e_{33} \\ c_{41}^E & c_{42}^E & c_{43}^E & c_{44}^E & c_{45}^E & c_{46}^E & -e_{14} & -e_{24} & -e_{34} \\ c_{51}^E & c_{52}^E & c_{53}^E & c_{54}^E & c_{55}^E & c_{56}^E & -e_{15} & -e_{25} & -e_{35} \\ c_{61}^E & c_{62}^E & c_{63}^E & c_{64}^E & c_{65}^E & c_{66}^E & -e_{16} & -e_{26} & -e_{36} \\ e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} & e_{15} & e_{16} & \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} & e_{25} & e_{26} & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} & e_{35} & e_{36} & \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (1.3.15)$$

$$\begin{bmatrix} T \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c^E & -e^T \\ e & \varepsilon \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S \\ E \end{bmatrix} \quad (1.3.16)$$

Sendo as matrizes quadradas chamadas matrizes elastoelétricas [5].

A equação (1.3.15) sugere que as equações constitutivas necessitam de 63 coeficientes independentes, mas esse número pode decair significativamente quando são considerados materiais específicos. Os coeficientes das matrizes elastoelétricas fornecem descrições completas sobre o comportamento dos materiais piezoelétricos, mas pode-se utilizar expressões alternativas para a atenuação, o coeficiente de acoplamento eletromecânico e outras propriedades específicas. Pode-se incluir a atenuação na matriz elastoelétrica por meio de coeficientes complexos, de modo que cada um deles trata de uma fonte de atenuação específica [5].

O design prático de transdutores ultrassônicos têm seguido um caminho diferente, agrupando a atenuação em um ou em um pequeno número de parâmetros para expressar o comportamento de um material ou para permitir o desempenho do dispositivo, que pode ser previsto por um *software* de computador [5].

A maneira mais simples de expressar a atenuação é por meio de um único coeficiente α , relacionando-a com medidas de propagações de ondas mecânicas a frequências específicas e assumindo que a atenuação se acumula com a distância e aumenta linearmente com a frequência.

Os coeficientes de acoplamento eletromecânico, dados por k , são os mais importantes dos materiais piezoelétricos e expressam o trabalho aproveitável realizado em um ciclo com aplicação de tensão mecânica sob um circuito elétrico, no qual há uma abertura no circuito para que a tensão se dissipe e haja o armazenamento de energia W_s . O coeficiente k é dado pela razão entre a energia dissipada e a energia total W_t :

$$k = \sqrt{\frac{W_s}{W_t}} \quad (1.3.17)$$

Vários coeficientes de acoplamento são nomeados como k_{mn} , sendo m o eixo ao qual a carga se conecta e n o eixo ao qual a tensão mecânica é aplicada. Os coeficientes possuem amplitudes e graus de complexidade variados para que as configurações de todos os transdutores possam ser exploradas e os mais comuns são k_{33} e k_t , respectivamente, o coeficiente de acoplamento sob tensão finita em um plano unidimensional, tal qual uma barra, e paralelo ao eixo z , sendo $T_3 \neq 0$ e o coeficiente de acoplamento de espessura, cuja deformação é nula e tem-se $S_1=S_2=0$ [5]. Matematicamente,

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{\epsilon_{33}^T S_{33}^E}} \quad k_t = h_{33} \sqrt{\frac{\epsilon_{33}^S}{C_{33}^D}} \quad (1.3.18)$$

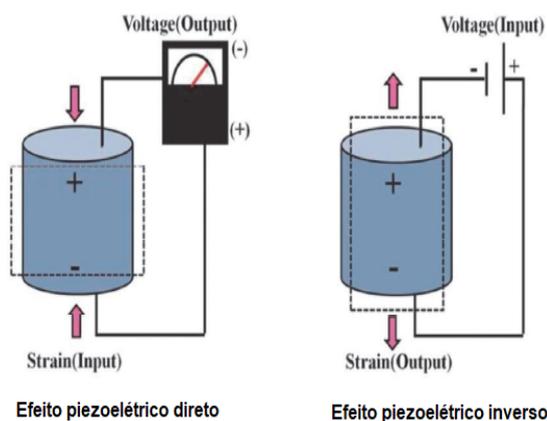
Outras três características dos materiais piezoelétricos são comumente consideradas no design de transdutores: a impedância acústica, a velocidade de propagação longitudinal ou de cisalhamento e a densidade do material [5].

Existem outras maneiras de expressar a piezoeletricidade, como por exemplo, partindo da equação de polarização

$$P_i = P_i^0 + \sum_{jk} E d_{ijk} T_{jk} \quad (1.3.19)$$

Sendo P_i o vetor polarização, P_i^0 a polarização espontânea, T_{jk} o tensor de tensão mecânica e d_{ijk} o coeficiente piezoelétrico. Os termos subscritos significam que os componentes da equação são tensores de terceira ordem [6].

Figura 1.3.2: Efeito piezoelétrico direto e reverso.



Fonte: SEKHAR, 2020, p. 6.

Matematicamente, em termos de dilatação D , tem-se que

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (1.3.20)$$

Sendo Q a carga, A a área do material, d o coeficiente de tensão piezoelétrico e T a tensão mecânica. No processo inverso, um campo elétrico E produz uma tensão S

$$S = dE \quad (1.3.21)$$

Portanto, o coeficiente d é dado por

$$d = \frac{D}{T} = \frac{S}{E} \quad (1.3.22)$$

Outro coeficiente de voltagem piezoelétrico, denominado g , é

$$g = \frac{d}{\epsilon} \quad (1.3.23)$$

Que denota o campo produzido através de uma tensão relacionado com a constante de permissividade ϵ . Há também a constante e que relaciona tensão mecânica T e campo E

$$T = -eE \quad (1.3.24)$$

E a constante h que relaciona tensão S e campo E

$$T = -hS \quad (1.3.25)$$

As definições das quatro constantes piezoelétricas são as seguintes

$$d = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E \quad (1.3.26)$$

$$g = \left(\frac{-\partial E}{\partial T} \right)_D = \left(\frac{\partial S}{\partial D} \right)_T \quad (1.3.27)$$

$$e = \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S = \left(\frac{\partial D}{\partial S} \right)_E \quad (1.3.28)$$

$$h = \left(\frac{-\partial T}{\partial D} \right)_S = \left(\frac{-\partial E}{\partial S} \right)_D \quad (1.3.29)$$

Devido às possíveis variações nas constantes dielétricas e piezoelétricas decorrentes de mudanças de eixos, tem-se as versões tensoriais delas. A constante de tensão hidrostática se d_h relaciona a d_{31} e a d_{33} :

$$d_h = 2d_{31} + d_{33} \quad (1.3.30)$$

$$d_{33} = \left(\frac{\partial D_3}{\partial T_3} \right)_E = \left(\frac{\partial S_3}{\partial E_3} \right)_T \quad (1.3.31)$$

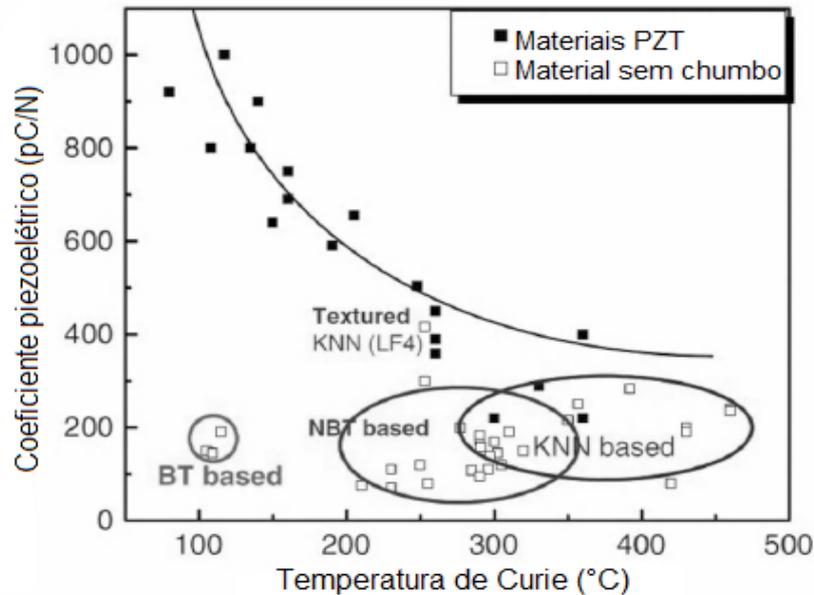
$$d_{31} = \left(\frac{\partial D_3}{\partial T_1} \right)_E = \left(\frac{\partial S_1}{\partial E_3} \right)_T \quad (1.3.32)$$

Há também como obter a força do efeito piezoelétrico obtida através do coeficiente de acoplamento eletromecânico K , que consiste em medir as frações de energia elétrica convertidas em energia mecânica, ou vice-versa, e é representado em termos de K^2

$$K^2 = \frac{\text{energia elétrica convertida em mecânica}}{\text{energia elétrica inicial}} \quad (1.3.33)$$

As propriedades piezoelétricas, elásticas e dielétricas em cerâmicas são altamente dependentes da temperatura, e o aquecimento delas além da temperatura de Curie, leva à extinção das três categorias de efeitos. E caso a temperatura se aproxime muito dessa temperatura, ocorre degradação das propriedades [6].

Figura 1.3.3: Valores de d_{33} de variados materiais piezoelétricos em temperatura ambiente.



Fonte: PARDO, 2011, p. 30.

O aspecto fundamental para a compreensão do efeito piezoelétrico, é compreender a estrutura cristalina dos materiais. No estado normal, a distribuição iônica cristalina é simétrica e o campo elétrico interno resulta em zero, porém, quando o material sofre uma tensão mecânica, as cargas positivas e negativas internas do material mudam de lugar e nos materiais piezoelétricos, essa mudança resulta em uma distribuição assimétrica, o que não ocorre em outros materiais. Nos materiais que não se encaixam na categoria de piezoelétricos, após uma perturbação e consequente mudança na localização das cargas, a distribuição mantém-se simétrica. Vê-se que o efeito está relacionado à simetria da estrutura cristalina e essa simetria, ao centro de simetria. Os materiais piezoelétricos não possuem centro de simetria e, portanto, podem sofrer distorção e produzir polarização [6].

O efeito piezoelétrico é amplamente explorado e os materiais piezoelétricos utilizados como transdutores. Existem vastas aplicações, tais quais: produção e detecção sonora, através da aplicação de uma tensão variada em uma haste de quartzo, geração de altas voltagens, uso para controle de frequência em osciladores altamente estáveis, microscopia de varredura por sonda, mecanismos de ignição de isqueiros, televisores, rádios, celulares, sistemas de navegação, entre outros [4-6].

O setor industrial se utiliza dos sensores piezoelétricos em diversas áreas. Atuadores piezoelétricos são utilizados em limpezas ultrassônicas, que são caracterizadas pela imersão de objetos, que

possuem superfícies inacessíveis que necessitam de manutenção, em um determinado solvente, que é agitado por um transdutor piezoelétrico. Os transdutores de limpeza também são capazes de quebrar cálculos renais, remover placa dentária e identificar incoerências e anomalias em transmissores e receptores de ondas ultrassônicas. Outros usos industriais são sensores de pressão, sonares, solenoides de resposta rápida, ajuste óptico, entre outros. A indústria da medicina também utiliza-se desses materiais nos aparelhos de ultrassom de imagem [6].

1.4. MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

Existem diversos materiais piezoelétricos tanto naturais quanto não-naturais, que apresentam uma gama de efeitos piezoelétricos. Berlinita, quartzo, turmalina, topázio, sal de Rochelle e até ossos (devido à presença de apatita) compõem o grupo dos naturais e titanato de bário e titanato zirconato de chumbo (PZT), o grupo dos não-naturais [4].

Para caracterizar materiais piezoelétricos em função de características não-lineares, existem algumas possibilidades, como, comportamento elástico, dielétrico e efeito piezoelétrico direto e reverso. Quando o nível de excitação é baixo, o comportamento desses materiais é semelhante ao dos materiais lineares e, portanto, os coeficientes dielétricos sofrem apenas variações mínimas e o efeito mais considerável é a aparição de oscilações harmônicas de ordens altas [7].

A dificuldade em realizar experimentos com sistemas não-lineares, faz com que seja comum a utilização de técnicas de intermodulação, que é caracterizada pela aplicação de duas frequências diferentes e o sinal obtido resulta em uma frequência relacionada. Nos casos das amplitudes altas, é possível visualizar a variação do coeficiente piezoelétrico, e se o ruído for suficientemente pequeno, torna-se possível avaliar também a evolução dele ao longo do tempo. Em caso de estímulo elétrico, pode-se obter a relação de dependência entre a constante dielétrica e o coeficiente piezoelétrico, em termos de amplitude. Em ambas as situações citadas, é recomendado trabalhar aquém da primeira frequência de ressonância, para que o campo externo seja único, uniforme e conhecido. Pode-se utilizar o modelo de ondas de Rayleigh em ambos os casos anteriormente citados, que é utilizado como referência, por se adequar corretamente a depender do tipo de material em questão. Nas ondas de Rayleigh, a variação nos coeficientes piezoelétricos e e d é proporcional à amplitude do campo elétrico aplicado [7].

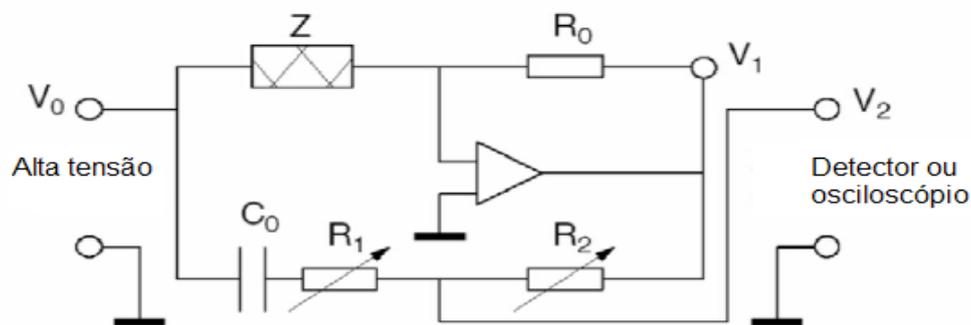
Se a amplitude do campo elétrico aplicado for suficientemente grande, pode-se inverter a polarização de uma cerâmica ferroelétrica, e observar alguns efeitos, como por exemplo, a

possibilidade de medir a carga elétrica e obter os ciclos de histerese e borboleta. As características das cerâmicas permitem também que a aplicação do fenômeno de ressonância a elas, cause tensão mecânica, sem necessidade de excitação mecânica. Quanto maior a tensão, maiores as conformidades e perdas, de forma que a frequência de ressonância diminui e a largura das bandas de amplitude crescem, o que pode ser observado ao variar a impedância elétrica. O método apresentado é simples e permite analisar comportamentos elásticos não-lineares, provendo, entretanto, duas complicações: a estimativa da tensão ser indireta e não-uniforme [8].

O comportamento dos materiais piezoelétricos pode ser observado por métodos diferentes ao considerar o efeito que se quer observar, assim, para os efeitos dielétrico e piezoelétrico inverso se utiliza estímulo elétrico. Para o efeito piezoelétrico direto se utiliza estímulo mecânico [7].

Pode-se observar o comportamento dielétrico não-linear, ao observar as cargas elétricas de eletrodos em uma amostra adequada quando um campo elétrico, de amplitude previamente estabelecida, é aplicado e a frequência observada deverá se manter abaixo da menor frequência de ressonância possível, para evitar que surja tensão mecânica proveniente da inércia. O efeito piezoelétrico reverso causado durante esse processo, faz com que a amostra passe por uma deformação mecânica e a velocidade pela qual as bordas externas se deslocam pode ser medida [7].

Figura 1.4.1: Aparato para medição de permissividade não-linear, a partir da reconstrução da corrente não-linear.

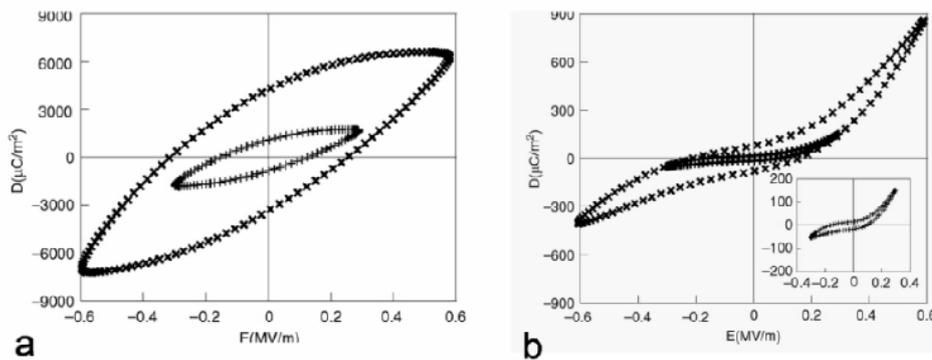


Fonte: PARDO, 2011, p. 751.

Pode-se fazer analisar a permissividade elétrica a partir da relação entre a amplitude da frequência de deslocamento elétrico D e o campo elétrico E ou da amplitude e da fase da oscilação harmônica de maior grau resultante. Inicialmente, é conveniente utilizar tanto a porção real ϵ' quanto a imaginária ϵ'' da relação de permissividade como função da amplitude do campo aplicado. Se

ambas as funções forem similares, graficamente ε'' (ε') deve ser linear e aplicando o modelo de ondas de Rayleigh, $\varepsilon'(E_0)$ e $\varepsilon''(E_0)$ devem ser lineares e $\varepsilon''(\varepsilon')$ uma reta com inclinação positiva. Há também a medida que baseia-se na medida das oscilações harmônicas segunda e terceira em função de $D(t)$ e das fases. Se o campo for denominado $E_0\text{sen}(\omega t)$, as medidas das componentes $D_2\text{sen}(2\omega t)$, $D'_2\text{cos}(2\omega t)$, $D_3\text{sen}(3\omega t)$ e $D'_3\text{cos}(3\omega t)$ indicam que há relação entre o campo D e as potências segunda e terceira do campo E [7].

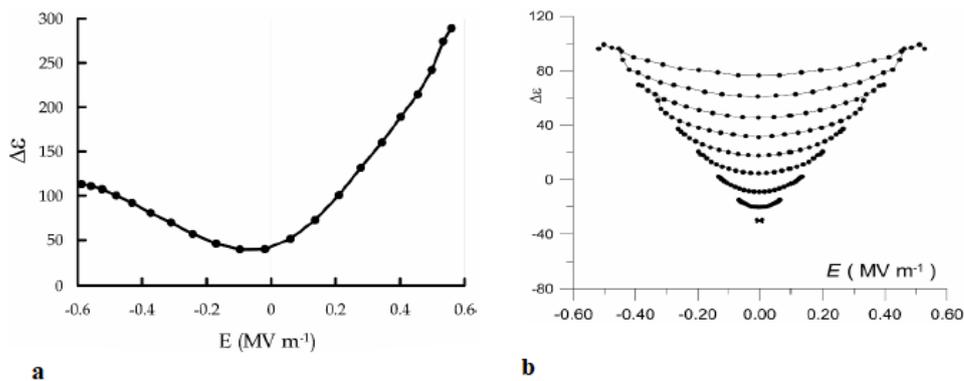
Figura 1.4.2: curva de histerese após remoção da porção linear de D para variadas amplitudes de campo. (a) Soft PZT. (b) Hard PZT.



Fonte: PARDO, 2011, p. 749.

A curva de histerese pode ser obtida através do gráfico de $D(E)$, considerando uma amplitude que supere o campo coercitivo, mas pode-se obter curvas menores ao utilizar campos menores, que possuem formato elíptico quando a amplitude é nula e pode-se alterar a curva caso subtraia-se a porção linear de D . As curvas obtidas demonstram o comportamento não-linear e mostram-se diferentes para materiais duros e macios, sendo o modelo de ondas de Rayleigh válido apenas no primeiro caso. Em função da histerese, existem dois valores de D para cada valor de E , assim, o valor médio de ambos pode ser calculado e a permissividade definida como a derivada desse valor médio em relação ao campo E , o que nos fornece a dependência da permissividade em materiais não-lineares em termos do campo, como a relação do campo e da amplitude desses materiais [7].

Figura 1.4.3: (a) Incremento não-linear ϵ_{NL} da constante dielétrica em hard-PZT. (b) Porção simétrica do incremento não-linear ϵ_{NL} em diferentes amplitudes (soft PZT).



Fonte: PARDO, 2011, p. 750.

1.5. CERÂMICA PZT

As piezocerâmicas, originadas do titanato de bário e de materiais à base de chumbo nos anos 50, são os materiais piezoelétricos mais utilizados atualmente. O modelo padrão é o PZT, que, cristalograficamente, é uma perovskita de simetria hexagonal, da classe de 6mm e a matriz dele é considerada facilmente simplificável [5].

Existem diversas formas de PZT e a classificação mais simples é como *soft-PZT* e *hard-PZT*. A primeira categoria possui coeficientes piezoelétricos menores, permissividade menor, fator de qualidade mecânica é maior, tangente de perda elétrica é menor e, em combinação com o T_c maior, torna-se mais apropriada para aplicações que necessitam de altas intensidades de saída de ultrassom. A segunda categoria possui coeficientes piezoelétricos maiores, permissividade maior e é menos receptiva, porém, o melhor desempenho piezoelétrico faz com que seja melhor e mais sensível enquanto fonte e também no modo pulsado, no qual o transdutor atua tanto como fonte quanto receptor [5].

As cerâmicas de *hard-PZT* e *soft-PZT* suprem uma parcela grande da demanda, porém, existem outras variedades disponíveis para algumas aplicações específicas, tal qual o metaniobato de chumbo ($PbNbO_3$), cuja T_c é alta, impedância acústica é baixa e fator de qualidade mecânica é baixo, fatores que o tornam adequado para operações em elevadas temperaturas e em que amplas operações de largura de banda são necessárias [5].

CAPÍTULO 2

ULTRASSOM

2.1. DEFINIÇÃO

O efeito do ultrassom é observado na natureza dentre certos animais, tais quais golfinhos e focenídeos, dotando-os da característica essencial à sobrevivência chamada ecolocalização, que possibilita que eles se localizem e cacem, devido à interpretação dos ecos gerados pelos ultrassons que eles emitem. As aplicações do ultrassom dentre os humanos se iniciaram durante a Primeira Guerra Mundial com a criação dos sonares, e se multiplicaram e aperfeiçoaram ao longo dos anos [1].

O som é gerado pela propagação de uma vibração em meios elásticos, tais quais sólidos, líquidos ou gasosos, e visto que as ondas sonoras não são ionizantes, não causam danos aos seres humanos e, assim, têm sido utilizadas para fins diagnósticos e terapêuticos. Os ultrassons são ondas sonoras, cujas frequências se encontram acima do limite audível para os seres humanos, em torno de 20 kHz, e variam até vários GHz. As ondas ultrassônicas são geradas por transdutores, cujas construções são baseadas em materiais piezoelétricos [8].

Os ultrassons se configuram como ondas mecânicas e possuem as características típicas dessa categoria, tais quais a necessidade de meio de propagação, os processos de reflexão e refração quando há variação na densidade dos meios pelos quais a onda se propaga. Ao passar de um meio para outro ocorre absorção, reflexão e espalhamento, que resulta na atenuação na intensidade da onda, dentre outros fenômenos [8].

CAPÍTULO 3

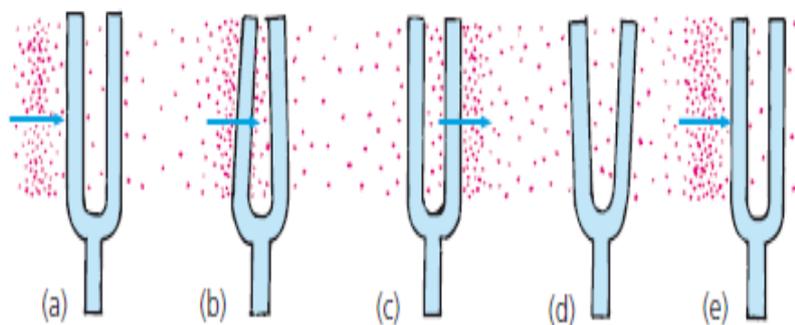
RESSONÂNCIA

3.1. DEFINIÇÃO

Quando uma certa vibração forçada e a frequência natural do sistema se igualam, o denominado fenômeno de ressonância ocorre, e há um aumento repentino e crescente na amplitude. Para que um sistema ressoe, é necessário apenas uma força que o traga para a “posição inicial” e energia suficiente para que se mantenha em movimento vibratório. Em um sistema isento de atrito, a amplitude das oscilações tenderia ao infinito, mas como sistemas reais possuem dissipações, episódios assim não ocorrem [13-14].

Uma demonstração comum sobre a ressonância é realizada com um par de diapasões do tipo forquilha, postos a uma certa distância. Quando um deles é submetido a uma vibração, o outro adquire o mesmo movimento, e o fenômeno ocorre, pois, as séries de ondas sonoras o atingem na frequência natural dele. Além dele imitar o movimento do diapasão inicialmente posto a vibrar, a amplitude dos movimentos de ambos aumenta sucessivamente, em função da movimentação se manter na frequência natural deles [13]. Quando o fenômeno age em cada diapasão, ele compartilha-se como a figura 3.1.1.

Figura 3.1.1: Estágios da ressonância em um único diapasão. (a) Primeira compressão atinge o diapasão e causa um pequeno movimento. (b) Braço atingido se move e (c) Retorna à posição inicial. (d) Ocorre movimento no sentido contrário ao anterior. (e) Próximo movimento e repetição do ciclo, sendo o movimento seguinte mais intenso.



Fonte: HEWITT, 2015, p. 383.

Um exemplo conhecido sobre o fenômeno de ressonância é de 1940, quando a ponte recém-construída Tacoma Narrows, no estado de Washington, EUA, foi destruída quando o vento

desencadeou a ressonância. O vento era moderado, porém, produziu uma força irregular variável que se igualava à frequência natural da ponte, e fez com que a amplitude da vibração aumentasse constantemente até que a ponte colapsasse [13].

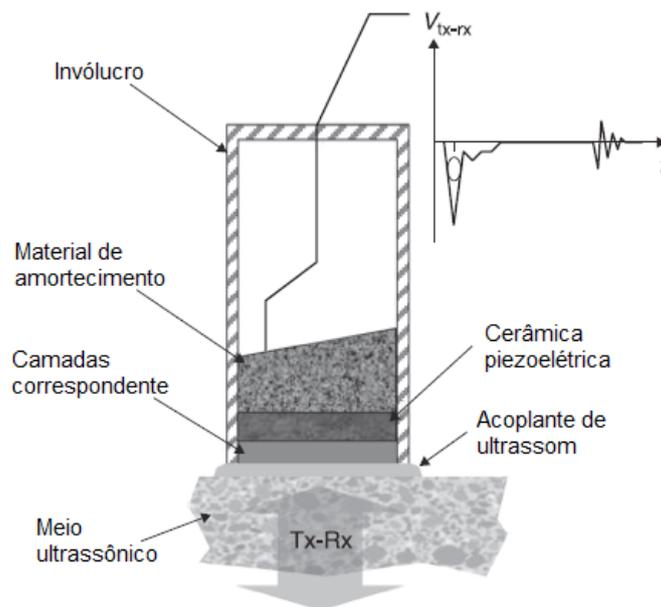
CAPÍTULO 4

TRANSDUTORES

4.1. DEFINIÇÃO

O transdutor é um dispositivo composto por materiais piezoelétricos, os elementos caracterizados por responder aos estímulos elétricos e, conseqüentemente, vibrar na frequência de ressonância, gerando o efeito de ultrassom. É possível armazenar, processar e visualizar a energia elétrica, em forma de pulso ultrassônico, que o transdutor converte a partir da energia mecânica. Os transdutores podem ser transmissores ou receptores, respectivamente, convertendo impulsos elétricos em campo acústico ou pressão de ultrassom em impulso elétrico, e têm como composto básico um disco cerâmico piezoelétrico conectado a eletrodos paralelamente depositados [9].

Figura 4.1.1: Transdutor de ultrassom de elemento único.



Fonte: NAKAMURA, 2012, p. 46.

Pode-se simplificar um transdutor em três partes: elétrica, mecânica e de acoplamento, região na qual há presença de campo elétrico ou magnético. A energia elétrica entra pela primeira parte por um determinado espaço temporal, é composta por tensões e correntes da forma $v_1, i_1; v_2, i_2; \dots; v_n, i_n$; e, portanto, considerando uma porção de tempo infinitesimal tem-se

$$dE_{elétrica} = \sum_{i=1}^n v_i i_i dt \quad (4.1.1)$$

E as equações que a compõem respeitam as leis de Kirchhoff, ou seja, $\sum i=0$ nos nós e $\sum v=0$ nas malhas [2].

Um processo semelhante ocorre na segunda parte, na qual surge uma energia relacionada ao conjugado mecânico e velocidade angular. Se houver movimentos de translação em vez de rotação, observa-se força mecânica e velocidade de translação. No caso rotacional, tem-se

$$dE_{mecânica} = \sum_{i=1}^n C_i \Omega_i dt \quad (4.1.2)$$

Sendo Ω_i velocidade angular. E no translacional,

$$dE_{mecânica} = \sum_{i=1}^n F_i u_i dt \quad (4.1.3)$$

Sendo u_i velocidade de translação.

A região denominada de acoplamento possui comportamento determinado por equações de campos, elétrico ou magnético, e, portanto, pode-se observar fluxo de indução magnética, forças eletromotrizes, correntes elétricas, forças mecânicas, entre outros [2].

O uso em larga escala das ultrassonografias, principalmente na área de imagem, fez com que os transdutores se desdobrassem além dos limites iniciais, originando transdutores microconvexos, ou de multifrequências, e sensores ópticos de ultrassom. Transdutores formados por vários elementos piezoelétricos podem formar matrizes multidimensionais, o que permite focagem e direcionamento do feixe, de modo a formar imagens 2D e 3D em tempo real [8].

4.2. HISTÓRICO

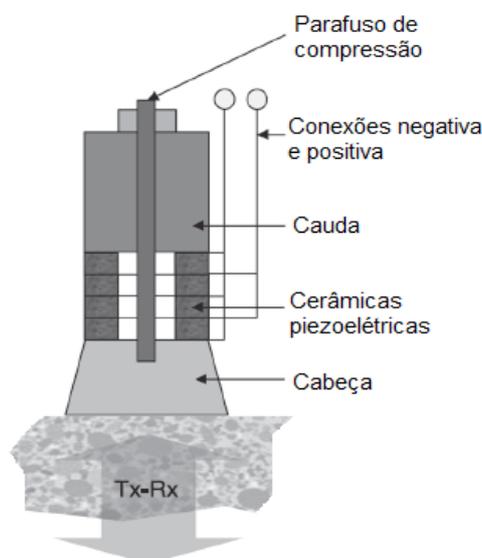
O primeiro modelo, unidimensional, de transdutor foi apresentado por Mason em 1948, e se comportava como um circuito elétrico passivo que replicava o comportamento de um transdutor em função das frequências de ressonância fundamentais. Esse comportamento, posteriormente, pôde ser obtido através das equações de propagação de ondas. Representantes mais complexos foram demonstrados por Krimholtz e por Matthaei, respectivamente, em 1970 e 1971, e descreviam com maior clareza o comportamento dos transdutores e permitiram compreender as relações entre a

estrutura do circuito elétrico e esse comportamento. Entre 1984 e 1986, Hayward e Jackson descobriram que os transdutores também poderiam ser explicados através de sistemas lineares, nos domínios de Laplace e Fourier, o que forneceu conhecimentos importantes, como a ação piezoelétrica secundária [10].

4.3. TRANSDUTOR DE ULTRASSOM INDUSTRIAL DE LIMPEZA

Para aplicações de baixa frequência ou alta potência, são necessários componentes piezoelétricos de dimensões de difícil manejo e que poderiam danificar os materiais de suporte e correspondência em função das intensidades geradas, e também o material piezoelétrico empregado. Para que isso não ocorra, o material piezoelétrico opera em uma estrutura com diversas camadas de funcionamento simultâneo para manter a impedância elétrica em um nível que garanta as operações de baixa frequência, e que submete o material à compressão, para que o menor valor da força de tensão não seja alterada e para evitar atenuantes [5].

Figura 4.3.1: Modelo de transdutor de Langevin, cuja cabeça e cauda dos transdutores são conectados às cerâmicas piezoelétricas por um parafuso resistente à tração no qual é aplicado torque para comprimi-lo, de modo que as cerâmicas sejam mantidas estáveis, e são utilizados nas limpezas ultrassônicas industriais.



Fonte: NAKAMURA, 2012, p. 55.

Os transdutores de alta potência seguem o modelo de Langevin (ou sanduíche) e são aplicados nas limpezas ultrassônicas industriais, além de cortes, soldagens, perfurações, e sonoquímica. Geram intensidades de muitos W.cm^{-2} e utilizam intensidades de ultrassons de, no máximo, algumas dezenas de quilo-Hertz. Essas frequências e intensidades são semelhantes às necessárias para projetores de sonares subaquáticos de alta potência [5].

Em um transdutor de Langevin, os materiais piezoelétricos representam apenas uma pequena porcentagem do volume total. Nas baixas frequências em que utilizam-se esses transdutores, os atenuantes convencionais não são úteis devido ao tamanho que se faria necessário e ao elevado risco de danos por superaquecimento. A capacidade de produzir potências altíssimas é prioritária em relação à capacidade de produzir imagens cujas larguras de banda são extensas. Assim, observa-se uma estrutura na qual a frequência de operação é definida tanto pela ressonância dos componentes piezoelétricos quanto pelos efeitos das massas passivas da cabeça e da cauda do transdutor [5].

A cabeça e a cauda dos transdutores são conectados às cerâmicas piezoelétricas por um parafuso, altamente resistente à tração, cuja área de seção transversal é compatível a uma grande velocidade de superfície e deslocamento. Aplica-se torque ao parafuso para comprimi-lo, de modo que as cerâmicas sejam mantidas estáveis, evitando que ocorram oscilações entre tensão e compressão, como ocorre em outros modelos de transdutores, fator que permite que as cerâmicas operem em intensidades de saída muito mais altas que nos outros casos. Tipicamente, são utilizadas cerâmicas hard-PZT, ideais em aplicações com altas-tensões e reduzem o calor gerado internamente, tornando-as capazes de suportar as elevadas temperaturas que esses transdutores costumam atingir [5].

Frequentemente, estes transdutores são compostos por conjuntos de anéis idênticos, compostos por materiais piezoelétricos, com polaridades e conexões elétricas alternadas que operam juntos, sem se anularem. São constituídos, principalmente, de alumínio ou titânio, nos casos de aplicações que envolvem água, como sonares subaquáticos e limpezas ultrassônicas [5].

4.4. APLICAÇÕES GERAIS

Industrialmente, existem diversas funções para os transdutores, como as limpezas ultrassônicas, nas quais os transdutores de limpeza agitam uma espécie de solvente, contendo objetos que precisam de manutenção, para que ocorra o processo de limpeza. Esses transdutores também são capazes de detectar incoerências e anomalias em transmissores e receptores de ondas ultrassônicas [6].

Na medicina, os transdutores são responsáveis pelas ultrassonografias de imagem e os de matrizes multidimensionais, pois são capazes de formar imagens 2D e 3D em tempo real, e são responsáveis, por exemplo, pela tomografia fotoacústica de mama [10].

Os transdutores de alta intensidade são utilizados para corte, soldagem, perfuração e sonoquímica, produzindo quantidades exorbitantes de Watts (W) e ultrassons de frequências de dezenas de quilohertz (kHz). Os altos valores se demonstram necessários para projetos mais ambiciosos, tais quais os projetores sonares subaquáticos de alta potência [5].

Os transdutores eletromagnéticos de baixa intensidade são eficientes no tratamento da pseudoartrose, caracterizada pela impossibilidade de união óssea após fratura e que necessita de intervenção. A terapia é simples, barata, pode ser realizada pelo próprio paciente em ambiente domiciliar e apresenta resultados equivalentes aos de intervenções cirúrgicas, que custam dezenas de milhares de reais. As únicas regiões em que esses transdutores não podem ser utilizados para tratar distúrbios ósseos, como a pseudoartrose, são coluna vertebral e crânio. A terapia funciona desde que haja dispositivo de imobilização e a contra-indicação se aplica apenas a pacientes com fraturas instáveis, que apresentem perda óssea excessiva, deformidade axial, defeitos pronunciados no tecido mole, presença de marcapasso ou idade infantil. O procedimento tem sido utilizado nos Estados Unidos, Japão, vários países europeus e também Brasil [11].

Outras variedades de transdutores também são possíveis, como o de fluxo de calor, utilizado para extinguir erros em aparelhos responsáveis por realizar medidas de fluxo de calor convectivo, causados por distúrbios ambientais. Essa categoria de transdutor mede o fluxo total de calor, composto por radiação e convecção, na superfície do material em questão. Os transdutores de temperatura realizam processos estáveis de longa duração em atmosfera artificial composta por vapor de água e hidrogênio gasoso, podendo atingir temperaturas de 2000°F (em torno de 1093,3°C) por horas e até 2500°F (em torno de 1371,1°C) por alguns minutos, além de funcionarem como sensores de temperatura e serem utilizados para realizar medidas térmicas de gases em altas temperaturas. Um sistema infrassônico de medidas de líquidos para tanques de armazenamento, pode ser montado a partir de um transdutor de pressão, do tipo diafragma, e é denominado *Resonant Infrasonic Gaging System (RIGS)*.

Versões miniatura de transdutores de pressão podem ser utilizados como cateteres cardíacos. Desenvolveu-se uma variedade de transdutores de pressão capazes de resistir a temperaturas de 7000°F (em torno de 3871,1°C) e pressões superiores a 2000 psi, tornando possível técnicas de processamento em metais variados antes impossíveis. O transdutor fotocelular possibilita a

realização de medidas de velocidade, aceleração e trajetória de partículas durante testes explosivos. Dentre outras dezenas de aplicações e variedades de transdutores [12].

4.5. APLICAÇÕES DO TRANSDUTOR DE ULTRASSOM INDUSTRIAL DE LIMPEZA

As limpezas ultrassônicas ocorrem nas cubas de limpeza, cujo funcionamento é baseado na agitação de uma variedade de solvente colocado na cuba e imersos neste solvente, os objetos que precisam de manutenção para que ocorra efetivamente o processo de limpeza. Os transdutores ultrassônicos de limpeza, cujo modelo respeita a formatação de Langevin, são capazes de detectar incoerências e anomalias em transmissores e receptores de ondas ultrassônicas, além da capacidade de limpeza [6].

Figura 4.5.1: Exemplares de cubas de limpeza ultrassônica industrial, instrumentos compostos por transdutores de limpeza do modelo de Langevin.



Fonte: Compilação da autora.

4.6. CARACTERIZAÇÃO DO TRANSDUTOR

A caracterização de um transdutor é realizada por meio das frequências de ressonância das vibrações, com o auxílio de um gerador de ondas, responsável por excitar o transdutor de interesse em variadas frequências de vibração, e de um circuito de detecção de amplitude e fase. Paralelamente, é obtida a tensão para cada variação da frequência. Os valores das tensões possibilitam encontrar indiretamente os valores das correntes associadas a cada ponto observado e isto possibilita a elaboração de um gráfico, em termos de corrente pico a pico e frequência, que é a chamada caracterização do transdutor.

As correntes elétricas encontradas dependem diretamente dos valores das tensões e do valor do resistor associado ao sistema analisado e, em adição, são utilizados conceitos físicos e matemáticos para que possam ser obtidos valores coerentes.

O método apresentado funciona para todos os transdutores que possam ser analisados, apesar de não ser a única forma de oferecer a caracterização a eles.

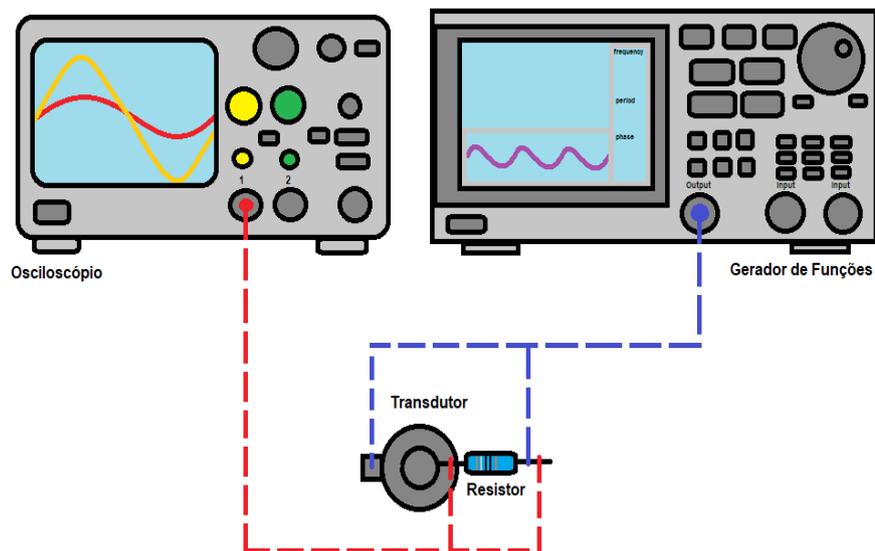
CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A montagem experimental consistiu no emprego de osciloscópio, gerador de funções, cabos de modelo “jacaré”, resistor, cuja resistência nominal deu-se por 1Ω , e um transdutor de ultrassom industrial de limpeza, denotado como o objeto de estudo.

Foram conectados o osciloscópio e o gerador de funções à dupla composta pelo transdutor de limpeza industrial e o resistor (1Ω), por meio dos cabos “jacaré”. O osciloscópio foi conectado ao sistema prévia e posteriormente ao resistor e o gerador de funções, previamente ao resistor e posteriormente ao transdutor, em uma pequena aba metálica. Esquematicamente, pode-se representar o sistema descrito como

Figura 5. 1: Esquema de representação da montagem experimental, contendo o gerador de funções, o osciloscópio, o resistor, o material de teste e linhas tracejadas para representar os cabos de ligação.



Fonte: Elaborada pela autora.

Além do esquema de representação da montagem experimental ilustrado, tem-se também fotografias que demonstram como a montagem experimental ocorreu na prática. Focou-se no experimento de maneira generalizada, abrangendo todos os componentes (Figura 5.1) e na dupla

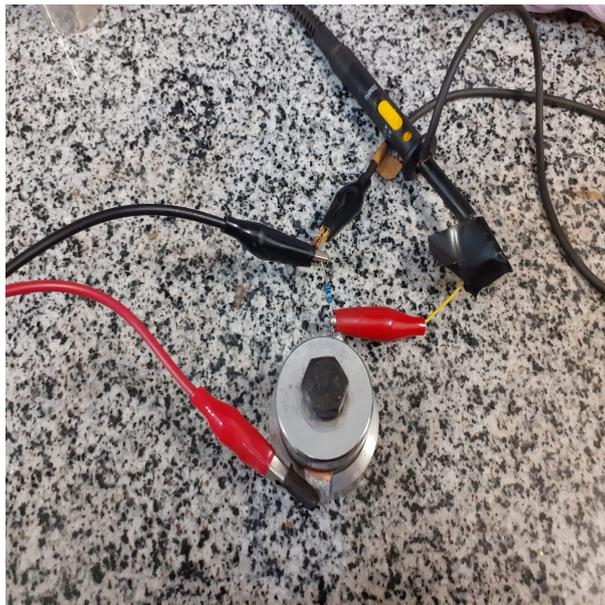
composta por transdutor e resistor (1Ω), visto que o objetivo era o estudo, e eventual caracterização, do transdutor.

Figura 5.2: Montagem experimental de obtenção de dados, contendo um gerador de funções, um osciloscópio, um resistor, o material de teste e cabos para as ligações.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5.3: Imagem aproximada do resistor e do material de teste com as devidas ligações dos cabos.



Fonte: Elaborada pela autora.

CAPÍTULO 6

MEDIDAS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

6.1. METODOLOGIA

As medidas experimentais foram obtidas por meio do aparato experimental e aferição manual dos valores. A princípio, aferiu-se medidas gerais, baseadas em valores de frequências previamente estabelecidas entre 10kHz e 100kHz, variadas em 10kHz entre cada medida.

Em seguida, e baseado na observação do comportamento de amplitude das ondas no osciloscópio e da variação das frequências, pôde-se obter os valores das frequências de ressonância do transdutor analisado, pois elas são representadas como picos de amplitude visíveis. Visto que as frequências de ressonância tornaram-se conhecidas, pôde-se analisar os entornos delas para confecção de gráficos. As medidas foram feitas de modo a contemplar dez valores abaixo e dez acima de cada frequência de ressonância observada, variadas em 0,1 kHz cada. O valor de 0,1kHz foi escolhido por ser o menor valor de variação passível de observação ocular. Posteriormente, todos os valores foram analisados, tabelados e tornaram-se gráficos.

6.2. TABELAS E RESULTADOS

Valores obtidos experimentalmente das medidas de frequências, tensões máximas, períodos e tensões pico a pico e organizados em formato de tabelas. Todas as variedades de valores dispostos nas tabelas foram obtidas pelo osciloscópio.

As medidas experimentais gerais, cujos valores de frequências foram previamente estabelecidos entre 10kHz e 100kHz, e então, variadas na quantia de 10kHz entre cada medida aferida, são apresentados na tabela 6.2.1.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
10	15,2	100,0	38,4
20	31,2	50,0	67,2
30	48,0	33,0	106,0
40	82,0	25,0	172,0
50	21,4	20,0	48,6
60	30,8	18,0	71,4
70	58,0	14,4	126,0
80	108,0	12,6	224,0
90	106,0	11,2	218,0
100	8,0	10,0	22,0

Tabela 6.2.1: Medidas gerais de frequência (f), tensão máxima (V_{máx}), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}).

Baseado na observação do comportamento de amplitude das ondas no osciloscópio e da variação das frequências, pôde-se obter os valores das frequências de ressonância do transdutor, presentes na tabela 6.2.2.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
47,57	1160,0	20,8	2340,0
52,76	820,0	19,2	1660,0
62,37	376,0	16,0	760,0
82,33	880,0	12,2	1800,0
96,83	940,0	10,4	1920,0

Tabela 6.2.2: Medidas das frequências de ressonância do material (f) e demais medidas que as acompanham; tensão máxima (V_{máx}), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}).

A partir das frequências de ressonâncias observadas, pôde-se analisar os entornos delas para análise. As medidas foram estabelecidas em dez valores abaixo e dez acima de cada frequência de ressonância observada, variadas em 0,1 kHz cada.

As frequências de ressonância observadas foram analisadas em ordem crescente e, portanto, o primeiro valor foi o de 47,57 kHz e os valores obtidos foram expostos na tabela 6.2.3.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
46,57	264,0	21,4	536,0
46,67	280,0	21,6	576,0
46,77	312,0	21,6	624,0
46,87	336,0	21,2	688,0
46,97	376,0	21,2	760,0
47,07	424,0	21,4	864,0
47,17	496,0	21,2	1020,0
47,27	620,0	21,0	1260,0
47,37	780,0	21,2	1600,0
47,47	1040,0	21,2	2140,0
47,57	1160,0	20,8	2340,0
47,67	900,0	20,8	1840,0
47,77	620,0	21,2	1260,0
47,87	340,0	20,8	720,0
47,97	500,0	20,8	1020,0
48,07	360,0	21,0	740,0
48,17	280,0	20,8	580,0
48,27	220,0	20,6	480,0
48,37	180,0	20,8	380,0
48,47	160,0	20,4	340,0
48,57	124,0	20,4	244,0

Tabela 6.2.3: Medidas em torno do primeiro valor de frequência de ressonância obtida ($f= 47,57\text{kHz}$), variadas dez casas acima e dez abaixo dela, em quantias de $0,1\text{kHz}$ e demais medidas que as acompanham; tensão máxima ($V_{\text{máx}}$), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}).

A frequência analisada em seguida, e portanto a segunda frequência de ressonância observada, foi a de $52,76\text{ kHz}$ e os valores obtidos em torno dela foram expostos na tabela 6.2.4.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
51,76	140,0	19,2	284,0
51,86	164,0	19,2	332,0
51,96	188,0	19,2	356,0
52,06	192,0	19,6	392,0
52,16	220,0	19,2	440,0
52,26	248,0	19,2	500,0
52,36	296,0	19,2	696,0
52,46	424,0	18,4	880,0
52,56	560,0	19,2	1160,0
52,66	740,0	19,2	1540,0
52,76	820,0	19,2	1660,0
52,86	620,0	18,8	1240,0
52,96	460,0	19,0	980,0
53,06	360,0	18,4	720,0
53,16	320,0	18,4	680,0
53,26	280,0	19,2	620,0
53,36	240,0	18,4	520,0
53,46	220,0	18,4	500,0
53,56	200,0	18,8	440,0
53,66	180,0	19,2	400,0
53,76	180,0	18,8	380,0

Tabela 6.2.4: Medidas em torno do segundo valor de frequência de ressonância obtida ($f= 52,76\text{kHz}$), variadas dez casas acima e dez abaixo dela, em quantias de $0,1\text{kHz}$ e demais medidas que as acompanham; tensão máxima ($V_{\text{máx}}$), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}).

A terceira frequência analisada foi a de $62,37\text{ kHz}$, conhecida também como a terceira frequência de ressonância, e os valores obtidos em torno dela foram expostos na tabela 6.2.5.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
61,37	58,0	16,3	124,0
61,47	62,0	16,4	132,0
61,57	68,0	16,2	144,0
61,67	74,0	16,2	152,0
61,77	78,0	16,0	166,0
61,87	86,0	16,2	182,0
61,97	96,0	16,0	204,0
62,07	112,0	16,0	244,0
62,17	148,0	16,2	300,0
62,27	220,0	16,0	452,0
62,37	376,0	16,0	760,0
62,47	216,0	16,0	436,0
62,57	108,0	16,0	228,0
62,67	64,0	16,2	128,0
62,77	36,0	16,0	76,0
62,87	20,0	15,8	48,0
62,97	18,0	15,8	52,0
63,07	16,0	15,8	28,0
63,17	16,0	15,8	40,0
63,27	24,0	15,8	56,0
63,37	32,0	15,8	72,0

Tabela 6.2.5: Medidas em torno do terceiro valor de frequência de ressonância obtida ($f= 62,37\text{kHz}$), variadas dez casas acima e dez abaixo dela, em quantias de 0,1kHz e demais medidas que as acompanham; tensão máxima ($V_{máx}$), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}).

A penúltima frequência, ou a quarta frequência de ressonância, analisada foi a de 82,33 kHz e os valores obtidos em torno dela foram expostos na tabela 6.2.6.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
81,33	160,0	12,3	328,0
81,43	168,0	12,2	336,0
81,53	176,0	12,4	360,0
81,63	184,0	12,2	384,0
81,73	200,0	12,2	416,0
81,83	224,0	12,0	464,0
81,93	256,0	12,2	528,0
82,03	312,0	12,2	640,0
82,13	392,0	12,2	808,0
82,23	520,0	12,2	1070,0
82,33	880,0	12,2	1800,0
82,43	480,0	12,0	976,0
82,53	248,0	12,2	512,0
82,63	152,0	12,0	312,0
82,73	88,0	11,9	192,0
82,83	56,0	11,8	128,0
82,93	48,0	-	88,0
83,03	32,0	-	64,0
83,13	24,0	-	40,0
83,23	32,0	-	64,0
83,33	40,0	-	72,0

Tabela 6.2.6: Medidas em torno do quarto valor de frequência de ressonância obtida ($f= 82,33\text{kHz}$), variadas dez casas acima e dez abaixo dela, em quantias de 0,1kHz e demais medidas que as acompanham; tensão máxima ($V_{\text{máx}}$), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}). Os valores de período (T) em falta, encontram-se em branco, pois, os valores não puderam ser mensurados no osciloscópio.

A frequência final, quinta frequência de ressonância, analisada foi a de 96,83 kHz e os valores obtidos em torno dela foram expostos na tabela 6.2.7. A quantidade de frequências de ressonância aferidas não foi previamente escolhida, deste modo, analisou-se cuidadosamente todas as frequências oferecidas naturalmente pelo material durante a análise.

f (kHz)	V_{máx} (mV)	T (μs)	V_{pp} (mV)
95,83	304,0	10,5	624,0
95,93	328,0	10,6	656,0
96,03	344,0	10,4	712,0
96,13	376,0	10,4	776,0
96,23	416,0	10,4	848,0
96,33	464,0	10,4	960,0
96,43	536,0	10,4	1100,0
96,53	640,0	10,3	1300,0
96,63	760,0	10,4	1580,0
96,73	920,0	10,4	1880,0
96,83	940,0	10,4	1920,0
96,93	900,0	10,4	1840,0
97,03	720,0	10,3	1460,0
97,13	560,0	10,4	1140,0
97,23	440,0	10,2	920,0
97,33	340,0	10,2	720,0
97,43	280,0	10,4	600,0
97,53	220,0	10,4	500,0
97,63	180,0	10,3	420,0
97,73	160,0	10,2	360,0
97,83	140,0	10,2	300,0

Tabela 6.2.7: Medidas em torno do quinto valor de frequência de ressonância obtida ($f= 96,83\text{kHz}$), variadas dez casas acima e dez abaixo dela, em quantias de $0,1\text{kHz}$ e demais medidas que as acompanham; tensão máxima ($V_{\text{máx}}$), período (T) e tensão pico a pico (V_{pp}).

Os valores experimentais e a análise de valores aferidos, demonstrados nas tabelas de 6.2.1 à 6.2.7, dá-se pela representação e elaboração gráfica, permite visualizar o comportamento ressonante do transdutor de limpeza industrial analisado e caracterizá-lo.

A ressonância é denotada pelo ponto em que ocorre uma coincidência no sistema entre a frequência natural e a força motriz do sistema, resultando em uma resposta máxima, ou seja, apesar de haver uma série de valores que despertam o movimento ressonante nos transdutores, há uma única frequência natural em cada um deles, denotada como a resposta de máxima amplitude possível àquele sistema.

Pela Lei de Ohm, tem-se que $V=RI$, ou então, em relação a valores de pico a pico,

$$V_{pp} = R I_{pp} \quad (6.2.1)$$

Visto que o resistor utilizado é de 1Ω , pode-se subtrair o termo R da equação sem qualquer perda, e assim,

$$V_{pp} = I_{pp} \quad (6.2.2)$$

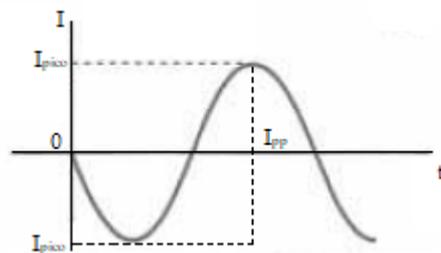
Deste modo, apesar de não ser possível obter diretamente as correntes por meio do aparato experimental, visto que o osciloscópio não é capaz de realizar essas medidas, pode-se encontrá-las indiretamente com a utilização dos valores experimentalmente obtidos e de equações matemáticas.

Tem-se que a corrente eficaz (I_{RMS}), ou seja, a porção da corrente alternada que produzirá a mesma dissipação que uma corrente contínua é, matematicamente,

$$I_{RMS} = \frac{I_{pp}}{2\sqrt{2}} \quad (6.2.3)$$

O interesse em encontrar as correntes existe porque a caracterização do transdutor dá-se por meio do gráfico de formato corrente pico a pico versus frequência, portanto, não seria possível caracterizar um transdutor sem os valores, mesmo que indiretos, das correntes elétricas do sistema. Portanto, os gráficos assumem os mesmos valores numéricos das tensões (V_{pp} (mV)) presentes nas tabelas, porém, a nomenclatura passa a ser corrente (I_{pp} (mA)). Na figura 5.1 é possível ver como são obtidos os valores de pico e os valores de pico a pico, válidos tanto para as tensões quanto para as correntes [15].

Figura 6.2.1: Gráfico que demonstra como são obtidos os valores de I_p (corrente de pico) e I_{pp} (corrente de pico a pico).



Fonte: Elaborada pela autora.

O método de caracterização escolhido funciona para qualquer tipo de transdutor ultrassônico, porém, não é a única opção de análise disponível.

No gráfico 6.2.1, é possível visualizar todas as medidas aferidas ao transdutor de limpeza industrial e como as frequências de ressonância que surgem destoam entre si, com picos discretos e picos longos. Sistemas naturais possuem diversas destas frequências e o tanto número quanto a quantidade delas variam de acordo com o material analisado.

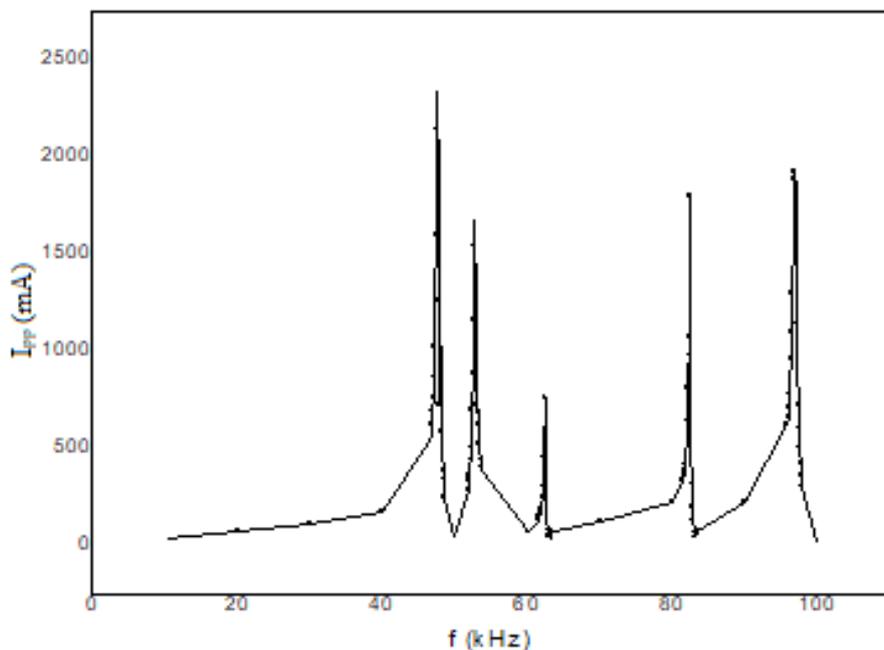


Gráfico 6.2.1: Gráfico completo, referente aos dados de frequência e corrente pico a pico presentes nas tabelas 6.2.1 à 6.2.7.

No gráfico 6.2.2, vê-se as medidas em torno da primeira frequência de ressonância observada e analisada.

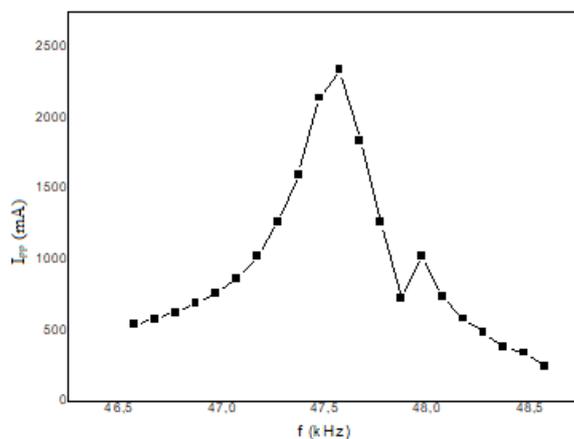


Gráfico 6.2.2: Gráfico em torno da primeira frequência de ressonância, referente aos dados de frequência e corrente pico a pico presentes na tabela 6.2.3.

Sucessivamente, o gráfico 6.2.3, mostra as medidas em torno da segunda frequência de ressonância observada e analisada.

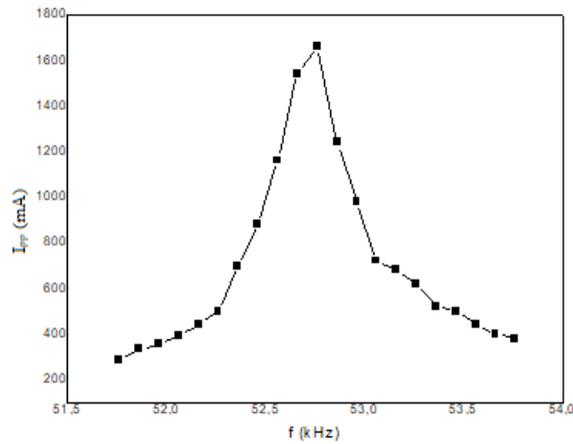


Gráfico 6.2.3: Gráfico em torno da segunda frequência de ressonância, referente aos dados de frequência e corrente pico a pico presentes na tabela 6.2.4.

A terceira frequência de ressonância e os valores de interesse em torno dela encontram-se no gráfico 6.2.4.

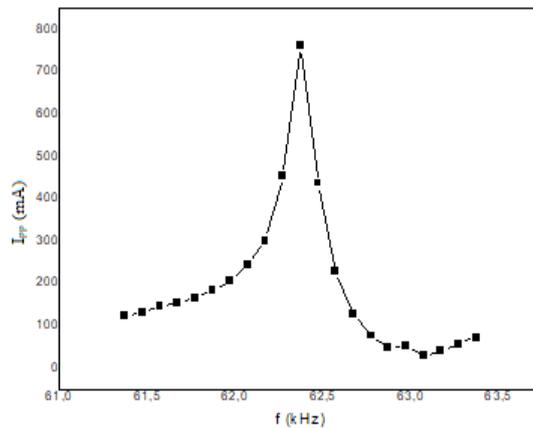


Gráfico 6.2.4: Gráfico em torno da terceira frequência de ressonância, referente aos dados de frequência e tensão pico a pico presentes na tabela 6.2.5.

O gráfico 6.2.5, mostra as medidas em torno da quarta frequência de ressonância observada e analisada.

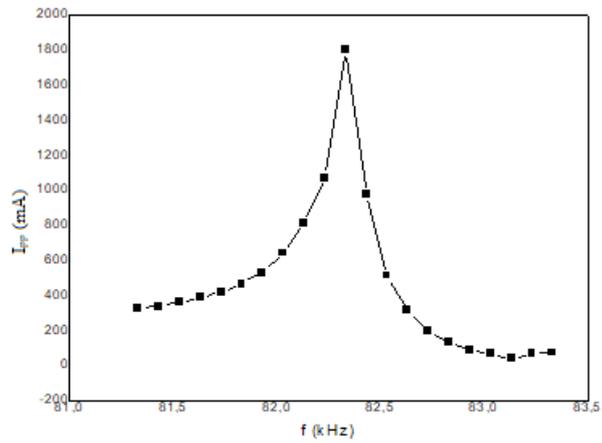


Gráfico 6.2.5: Gráfico em torno da quarta frequência de ressonância, referente aos dados de frequência e corrente pico a pico presentes na tabela 6.2.6.

Por fim, o gráfico 6.2.6, mostra as medidas em torno da última frequência de ressonância apresentada pelo transdutor.

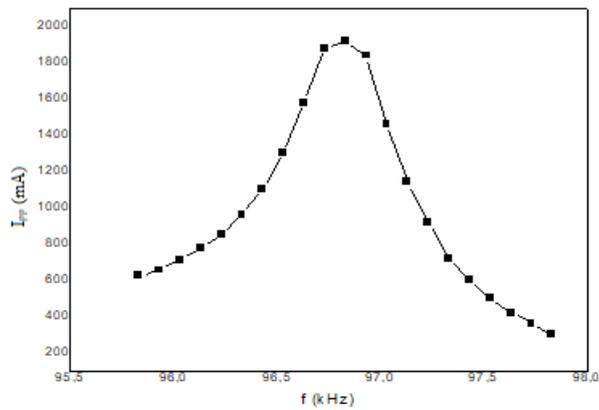


Gráfico 6.2.6: Gráfico em torno da quinta frequência de ressonância, referente aos dados de frequência e corrente pico a pico presentes na tabela 6.2.7.

CONCLUSÃO

Este trabalho objetivou a caracterização de um transdutor de ultrassom de limpeza industrial, alcançada pela obtenção das frequências de ressonância do material, que postas em um gráfico de corrente pico a pico versus frequência fornecem o objetivo, visto que a caracterização de um transdutor pode ser obtida de forma gráfica. Foi possível atingir os objetivos ao partir de uma revisão histórica do percurso da Física até, finalmente, atingir o desenvolvimento dos transdutores, visto que, muitos conceitos adjacentes são necessários para a compreensão dos transdutores, pois eles agrupam uma extensa série de características. Por esta razão, foram ilustrados histórico do efeito piezoelétrico, ferroeletricidade, piezoelasticidade, materiais piezoelétricos, estruturas cristalinas, cerâmicas, fenômeno de ultrassom, ressonância e, por fim, os transdutores, que, desde sua criação tem sido versáteis e tornaram-se necessários à vida humana moderna, tanto no campo industrial quanto farmacêutico. Um campo tão vasto quanto o dos transdutores, sempre mantém aberta uma gama de possibilidades de evolução e trabalhos futuros na área, assim pode-se dar continuidade a este trabalho e aprofundá-lo em novos tópicos.

REFERÊNCIAS

- [1] J. D. Pécora, D. M. Z. Guerisoli, Ultra-som, Faculdade de Odontologia de Ribeirão Preto USP, 1997. Disponível em: <<http://www.forp.usp.br/restauradora/us01.htm>>, último acesso em 6 de Setembro de 2021.
- [2] A. G. Falcone, Eletromecânica, vol. 1, Blucher, 1 ed., 1979.
- [3] F. J. Gaiotto, “Design de Transformadores Cerâmicos Piezoelétricos e Aplicações”, 2012.
- [4] “The Piezoelectric Effect”. Disponível em: <<https://www.nanomotion.com/nanomotion-technology/piezoelectric-effect/>>, último acesso em 4 de Fevereiro de 2022.
- [5] K. Nakamura, Ultrasonic transducers, Materials and Design for Sensors, Actuators and Medical Applications, Woodhead Publishing, 1 ed., 2012.
- [6] B. C. Sekhar, B. Dhanalakshmi, B. Srinivasa Rao, S. Ramesh, K. V. Prasad, P. S. V. Subba Rao e B. Parvatheeswara Rao, “Piezoelectricity and its Applications,” 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.96154>.
- [7] L. Pardo, J. Ricote, Multifunctional Polycrystalline Ferroelectric Materials, Processing and Properties, Springer, 1 ed., 2011.
- [8] C. I. Biscegli , “Conceitos da Física do Ultra-som”, 2003.
- [9] A. L. M. Mann I, “Caracterização de Transdutores de Ultra-som de Elemento Piezoelétrico Único”, 2009.
- [10] S. M. Leinders, W. J. Westerveld, J. Pozo, P. L. M. J. van Neer, B. Snyder, P. O’Brien, H. P. Urbach, N. de Jong e M. .D. Verweij, “A Sensitive Optical Micro-machined Ultrasound Sensor (OMUS) Based on a Silicon Photonic Ring Resonator on an Acoustical Membrane,” 2015. DOI: 10.1038/srep14328.
- [11] G. L. M. da Silva, “Construção e Caracterização de Transdutor Focalizado para Aplicação em Terapia Ultrassônica de Baixa Intensidade”, 2011.
- [12] National Aeronautics and Space Administration (NASA), Transducer Applications, 1972.
- [13] P. G. Hewitt, Física Conceitual, Bookman, 12 ed., 2015.
- [14] H. D. Young, R. A. Freedman, Física II, Termodinâmica e Ondas, Pearson, 14 ed., 2015.
- [15] P. A. Tipler, G. Mosca, Física Para Cientistas e Engenheiros Volume 2, Eletricidade e Magnetismo, Ótica, LTC, 5 ed, 2006.