

## EXPERIMENTO I

### Caracterização da cerâmica PZT

O efeito piezelétrico foi descoberto por Jacques e Pierre Curie em 1880. Eles verificaram que quando certos cristais eram submetidos à tensão mecânica, eles se tornavam eletricamente polarizado e o grau de polarização era proporcional à tensão aplicada. Os irmãos Curie também descobriram que estes mesmos materiais se deformavam quando eles eram expostos a um campo elétrico. Este fenômeno ficou conhecido como o piezelétrico inverso.

O efeito de piezelétrico é exibido por vários cristais naturais, por exemplo, quartzo, turmalina, tartarato de potássio de sódio, entre outros. Estes cristais foram por muitos anos usados como transdutores eletromecânicos.

Para uma cerâmica exibir o efeito piezelétrico, sua estrutura deverá ser assimétrica. Quando uma força (de tração ou compressão) é aplicada no mesmo a separação entre as cargas positivas e negativas se alteram em cada sítio elementar que conduz a uma polarização líquida à superfície cristalina. O efeito é praticamente linear, i.e. a polarização varia diretamente com a força aplicada.

Além dos cristais naturais mencionados acima, um grupo importante de materiais com efeito piezelétrico são as cerâmicas policristalina com propriedade ferroelétrica desenvolvida em laboratório como, por exemplo, o PZT (Titanato Zirconato de Chumbo). Esta cerâmica tem uma estrutura tetragonal. Antes de serem polarizados, os cristais piezelétricos têm simetria cúbica central (fig. 1-a) (estrutura isotrópica). Após a polarização, apresentam simetria tetragonal (estrutura anisotrópica) abaixo da temperatura de Curie (fig. 1-b). Acima desta temperatura eles perdem as propriedades de piezelétrico. A figura 2 mostra o perfil de polarização da cerâmica piezelétrico

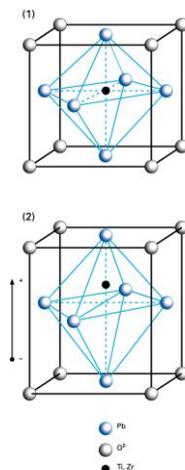
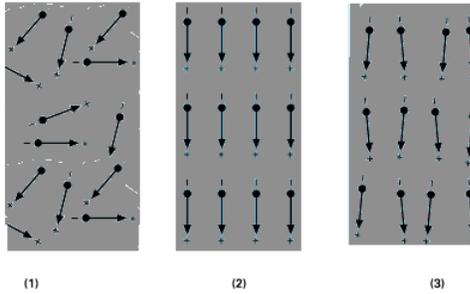


Figura 1: Representação da geometria cristalina de um crista PZT (a) antes e (b) após a polarização

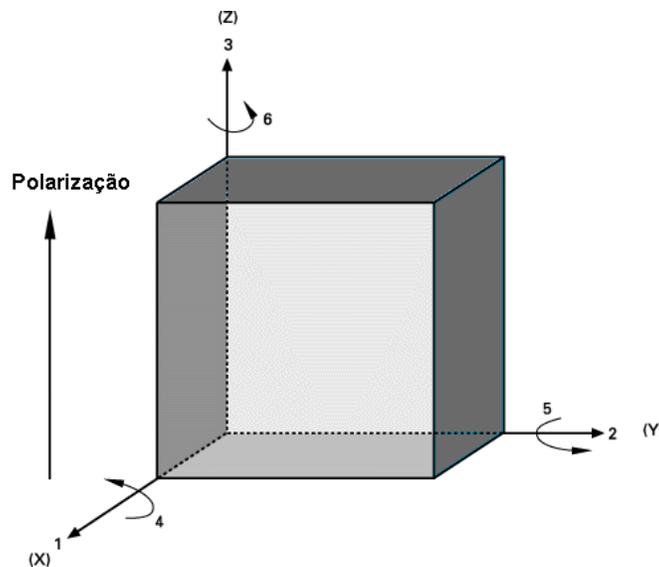


**Figura 2:** Representação dos momentos de dipolos em domínios de Weiss, indicando o processo de polarização de uma cerâmica Piezoeétrica. (1) antes da polarização; (2) durante a polarização; (3) após a polarização

### Propriedades do Piezoelétrico

A preparação da cerâmica começa com a mistura e moagem da matéria prima até ficar numa granulação específica. Depois o material é moldado, prensado e aquecido a uma temperatura de 750 °C. Um próximo passo é sintetizar, cortar e polir as cerâmicas. Por último, é feito o processo de polarização em um banho de óleo aquecido e com um campo elétrico da ordem de KV/mm. Todo este processo é feito com pressão e temperatura bem controladas para evitar dispersão nas propriedades eletromecânicas das cerâmicas.

Por causa da natureza anisotrópica da cerâmica piezoelétrica, os efeitos são dependentes da direção da avaliação da mesma. As direções são identificadas 1, 2, e 3, (correspondendo a X, Y, Z), e 4, 5 e 6 correspondendo às rotações (ver figura abaixo)



**Figura 5:** Sistema ortogonal representando as propriedades de uma cerâmica polarizada. A polarização esta indicada na direção 3 (direção Z).

Os principais coeficientes que caracterizam os materiais piezelétricos são:

$d_{ij}$ : coeficiente de transmissão ou deformação [m/V]: deformação (m/m) por campo elétrico aplicado (V/m).

$g_{ij}$ : coeficientes de recepção ou coeficientes de produção de campo [Vm/N]: campo elétrico desenvolvido (V/m) por tensão mecânica aplicada (N/m<sup>2</sup>) ou deformação (m/m) por densidade de carga elétrica aplicada (C/m<sup>2</sup>).

$k_{ij}$ : coeficiente de acoplamento eletromagnético [adimensional]. Este coeficiente descreve a conversão entre energia mecânica em energia elétrica ou vice-versa. Sendo,

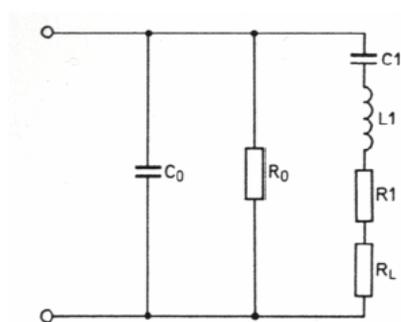
$$K_{ij} = d_{ij}g_{ij} \quad 3$$

Outros parâmetros importantes são: o módulo de Young (Y), que descreve as propriedades elásticas do material, e o coeficiente dielétrico relativo ou permissividade ( $\epsilon$ ) que descreve a capacitância do material.

Os índices (ij) representam a direção de excitação (i) e a direção de deformação do material (j). Por exemplo, se a cerâmica for excitado na direção 3 e a deformação ocorrer na mesma direção tem-se  $i=3$  e  $j=3$ . Mas se a deformação aplicada for na direção 1, tem-se  $i=3$  e  $j=1$ .

### Comportamento Dinâmico da Cerâmica PZT

Quando a cerâmica PZT é energizada através de um campo elétrico alternado, a cerâmica irá vibra com a mesma freqüência. A amplitude de oscilação varia com a freqüência. Quando oscilando próximo da freqüência de ressonância, seu comportamento pode ser descrito pelo circuito equivalente da figura 3.



- $C_0$  - é a capacitância do transdutor abaixo da freqüência de ressonância menos a capacitância  $C_1$ .
- $R_1$  - é a resistência causada por perdas mecânicas
- $R_L$  - é a resistência da carga de trabalho devida a energia de radiação: no vácuo  $R_L = 0$
- $C_1$  - é a capacidade do circuito mecânico e
- $L_1$  - é a indutância do circuito mecânico

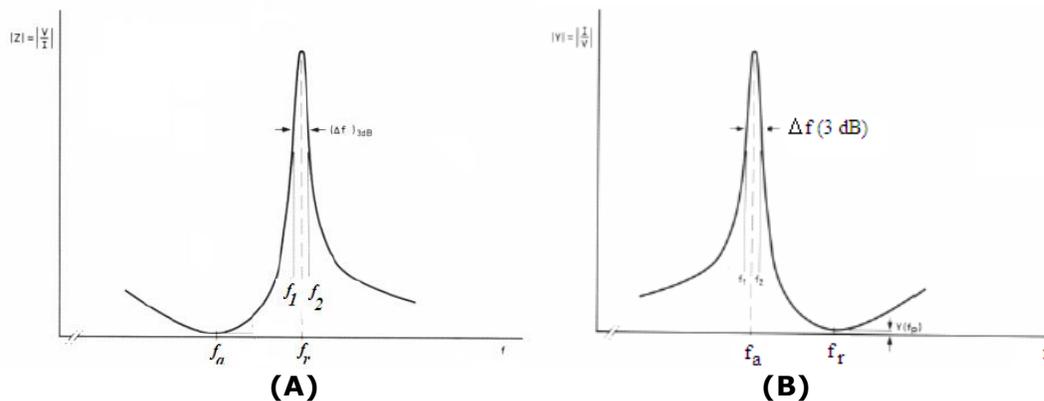
**Figura 3:** Circuito equivalente da cerâmica PZT oscilando próxima a freqüência de ressonância.

A figura 4 mostra a variação da impedância  $|Z|$  com a freqüência. A equação 1 mostra o ponto ( $f_a$ ) corresponde a freqüência na qual a impedância é mínima ou seja, a admitância se torna máxima e  $R_1$  é desprezível. Este é denominado o ponto de anti-ressonância e corresponde à ressonância do circuito em série ( $L_1C_1$ ) da figura 3. A equação 2 mostra a freqüência no circuito equivalente na qual a impedância se torna máxima e  $R_1$  se

torna novamente desprezível. Este é denominado ponto de ressonância da cerâmica e corresponde ao ponto de ressonância do circuito paralelo ( $L_1, C_1, C_0$ ) da figura 3.

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} \quad 1$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0 + C_1}{L_1 C_0 C_1}} \quad 2$$



**Figura 4:** Impedância (A) e Admitância (B) em função de frequência. Na ressonância do circuito em série ( $L_1, C_1$ ) a frequência coincide com o ponto de mínima impedância ou máxima admitância e é denominado ponto de anti-ressonância da cerâmica. Na ressonância do circuito em paralelo ( $L_1, C_1, C_0$ ), a frequência coincide com o ponto de máxima impedância ou mínima admitância é denominado ponto de ressonância da cerâmica. Abaixo de  $f_a$  e acima de  $f_r$  o transdutor tem comportamento capacitivo, entre  $f_a$  e  $f_r$  tem comportamento indutivo. **OBS:** Admitância é o inverso da impedância ( $Y=1/Z$ ).

#### Fator de acoplamento efetivo ( $K_{ef}$ ).

O fator de acoplamento efetivo ( $k_{ef}$ ) de uma cerâmica piezoelétrica indica o fator de acoplamento eletromecânico da mesma e são determinados através das frequências de ressonância e de anti-ressonância conforme mostra a equação 3.

$$K_{ef} = \sqrt{\frac{f_r^2 - f_a^2}{f_r^2}} \quad 4$$

### Coefficiente Mecânico ou fator de qualidade do PZT (Q).

O fator de qualidade mecânico da cerâmica PZT é determinado experimentalmente pela razão entre o ponto de ressonância e a largura da banda em 3db.

$$Q_r = \frac{f_r}{\Delta f(3db)} = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad 5$$

Sendo  $f_1$  e  $f_2$  as frequências correspondente aos pontos de meia altura do pico de ressonância (ver fig. 4A).

Existe uma frequência em que o transdutor apresenta uma máxima sensibilidade a qual é determinada a partir das frequências de ressonância e anti-ressonância, ou seja,

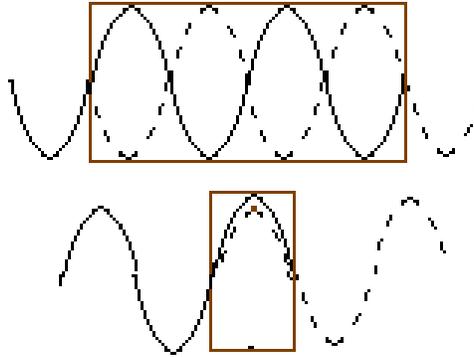
$$f_m = f_a + \frac{f_r - f_a}{1 + 1/B^2} \quad 6$$
$$B = \omega_r C_o Z_o$$

Sendo  $\omega_r$  a frequência de ressonância, C a capacitância da cerâmica e  $Z_o$  a impedância de entrada da cerâmica na ressonância.

### Característica do transdutor do Ultrassom diagnóstico

Quando uma cerâmica PZT livre no ar é energizada com um pulso elétrico, ondas ultrassônicas são geradas no interior do mesmo e são refletidas nas superfícies da cerâmica, formando pontos de interferência construtiva e destrutiva dentro do mesmo. Os cristais têm sua própria frequência natural de vibração e para garantir apenas uma interferência construtiva a sua espessura deve ser igual a meio comprimento de onda ( $\lambda/2$ ). **A figura 6** mostra o perfil da onda no interior da cerâmica. O comprimento de onda no meio material é dado por

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad 7$$



**Figura 6:** a) Padrão da vibração no interior da cerâmica com dimensão igual a múltiplos de 1 comprimento de onda. B) padrão da vibração no interior da cerâmica para vibração igual a múltiplos de meio comprimento de onda.

### Equipamentos

- **Micrometro;**
- **Capacímetro;**
- **Paquímetro;**
- **Garra de teste das cerâmicas;**
- **Gerador de função;**
- **Osciloscópio;**
- **Balança**

### Medidas Experimentais

- 1- Determine a espessura  $d$  da cerâmica usando um paquímetro ou micrômetro. Faça a medida em pelo menos 2 pontos diferentes e obtenha a média. A partir dessa espessura, estime a frequência de ressonância da cerâmica.
- 2 – Determine a densidade da cerâmica através da medida da massa e do diâmetro do mesmo.
- 3 - Medir a capacitância das cerâmicas piezoelétrica com um capacímetro. Aplicar uma força mecânica (com os próprios dedos) sobre a cerâmica e observar se houve modificação no valor da capacitância. (Todos os membros da equipe deverão realizar pelo menos uma medida e tirar a média como o valor verdadeiro).
- 4 - Usando o circuito da figura abaixo, levantar as curvas da voltagem sobre a cerâmica (circuito *a*) e sobre o resistor (circuito *b*) versus frequência das cerâmicas através do osciloscópio. A partir destas duas curvas determine:
  - a) a frequência e amplitude de ressonância da cerâmica
  - b) a frequência e amplitude de anti-ressonância da cerâmica,
  - c) a largura a meia altura do pico de ressonância (ponto de 6 dB)

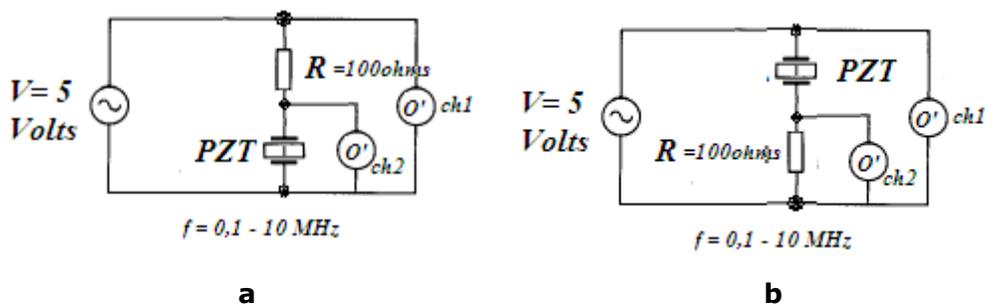
### Caracterização da cerâmica.

1 – A partir das medidas acima, da frequência de ressonância e anti-ressonância e da capacitância  $C_0$  da cerâmica determine:

- a) a indutância  $L_1$  e a capacitância  $C_1$  do circuito mecânico a partir das equações 1 e 2.
  - b) a velocidade  $c$  de propagação na cerâmica. Lembrando que a espessura de uma cerâmica de aplicação ultrassônica é de meio comprimento de onda.
  - c) o coeficiente de acoplamento eletromecânico efetivo  $K_{ef}$
  - d) o fator de qualidade  $Q_r$
  - e) a impedância da cerâmica.
  - f) a frequência  $f_m$  de máxima transferência de energia da cerâmica.
- 2- Descrever as diferenças observadas entre as medidas realizadas sobre a cerâmica e sobre o resistor.
- 3- Discutir os resultados com base na avaliação dessa cerâmica para aplicação em um transdutor ultrassônico de onda contínua e de onda pulsada.

OBS: Apresentar os resultados em forma de relatório (Introdução, Metodologia, resultados, discussão e conclusão).

Circuito elétrico para a caracterização dos cristais PZT.



**Procedimento de medida:** usando o gerador de sinal, aplicar uma excitação para uma faixa de frequência em torno da frequência de ressonância da cerâmica estimada a partir de sua espessura. Por exemplo se a frequência da cerâmica for de 2 Mhz, usar uma faixa entre 1 e 3 Mhz para levantar a curva. No circuito (a), a medida é feita sobre o PZT e no circuito (b), a medida é feita sobre o resistor.

Atenção: As conexões dos terras dos aparelhos (gerador e osciloscópio) deverão ser ligados num ponto em comum.

Tabela para tomada de dados do experimento 1.

OBS: realizar uma medida para uma cerâmica e pegar as cinco outras medidas dos colegas de outro grupo.

Parâmetros da cerâmica fora do circuito

N. da cerâmica	Espessura (d)	Diâmetro (D)	Capacitância (C <sub>o</sub> )
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Obs: Aplicar uma carga na cerâmica e verificar se houve mudança na capacitância.

Parâmetros medidos sobre a cerâmica (circuito A)

N. da Cerâmica	freq. Res. (Mhz)	Amplitude	Largura em 6dB
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Obs: Aplicar uma carga na cerâmica e verificar se houve mudança na condição de ressonância.

Parâmetros medidos sobre o resistor (circuito B)

N. da Cerâmica	Freq. Anti-Res. (MHz)	Amplitude	Largura em 6dB
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Ponto de 6dB:

$$6 \text{ dB} = 20 \log (V/V_0) \Rightarrow V = 0.5012 V_0$$

