

**FABIO MINORU SHIKATA**

**TRANSDUTOR PIEZOELÉTRICO DE ULTRA-SOM**

Trabalho de Formatura apresentado ao  
Departamento de Engenharia Mecânica  
da Escola Politécnica da Universidade  
de São Paulo.

Área de Automação e Sistemas.

Orientador:  
Prof. Flávio Buiochi

**São Paulo**  
**1997**

# ÍNDICE

<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Fundamentos Teóricos.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1 Introdução a Transdutores e Piezoelectricidade.....</b>	<b>5</b>
<b>2.2 Princípios Físicos da Piezoelectricidade .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Chain Matrix .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3.1 Propriedades.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.2 Princípio da Superposição.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.3 Exemplo de Aplicação.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Circuitos Equivalentes.....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.1 Circuito Equivalente de Mason .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.2 Circuito Equivalente KLM .....</b>	<b>20</b>
<b>3 Considerações de Projeto do Transdutor Ultra-sônico .....</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Definições.....</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Propriedades dos Materiais .....</b>	<b>25</b>
<b>3.3 Aspectos Construtivos .....</b>	<b>28</b>
<b>4 Modelagem e Simulação .....</b>	<b>32</b>
<b>5 Construção do Protótipo .....</b>	<b>37</b>
<b>6 Testes Experimentais e Análise de Resultados.....</b>	<b>39</b>
<b>7 Comentários e Conclusões.....</b>	<b>45</b>
<b>Anexo A - Função chain(en).....</b>	<b>47</b>
<b>Anexo B - Arquivo PZT.m .....</b>	<b>47</b>
<b>Anexo C - Programa Impult.m .....</b>	<b>48</b>
<b>Anexo D - Programa TFImpult.m .....</b>	<b>49</b>
<b>Anexo E - Programa TFImpx.m .....</b>	<b>50</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>52</b>
<b>Internet Links.....</b>	<b>52</b>
<b>Fotografia do Protótipo Construído.....</b>	<b>53</b>
<b>Desenhos de Conjunto e Fabricação .....</b>	<b>54</b>

## **1. Introdução**

Acústica, conhecida também como a ciência do som, descreve as vibrações mecânicas e a sua propagação em materiais sólidos, líquidos e gasosos.

O som é considerado audível se ele atinge o ouvido tanto pelo ar como através do corpo humano. Além disso, também é necessário que a freqüência do mesmo esteja na faixa entre 20 Hz a 20.000 Hz para essa consideração.

Assim como no caso de ondas de luz, onde as freqüências mais altas, invisíveis ao olho humano, são chamadas de ultravioleta, as ondas sonoras com freqüências acima de 20.000 Hz são denominadas de ultra-som ou ultra-sônicas.

É comum a ocorrência de ondas ultra-sônicas no dia a dia e na natureza, e são, ocasionalmente, de uma intensidade tal que podemos nos considerar aliviados pelo fato de não sermos capazes de ouvi-las. Por exemplo, um rebolo utilizado para afiar ferramentas gera, além do ruído audível, intensas ondas ultra-sônicas com freqüências acima de 100.000 Hz (100 KHz) e de até 10.000.000 Hz (10 MHz).

As aplicações de ondas sonoras e ultra-sônicas podem ser divididas em dois grupos.

No primeiro grupo, podemos citar como exemplos de aplicações empregando ondas sonoras ou ultra-sônicas para realizar trabalho mecânico:

- Remoção de corpos estranhos durante a limpeza de uma superfície;
- Usinagem por projeção de material abrasivo contra superfícies;
- Quebra da tensão superficial durante o processo de mistura de fluidos.

As aplicações do segundo grupo são as que necessitam de energia apenas suficiente para transmitir um sinal claro o suficiente para processamento de informações:

- Imagens médicas
- Localização de embarcações marítimas;
- Definição de profundidade dos oceanos;
- Localização de cardumes de peixes;
- Ensaios não-destrutivos de materiais (detecção de trincas ou fissuras);
- Medição de espessura;
- Determinação de propriedades mecânicas.

O presente trabalho propôs-se a construir um transdutor ultra-sônico convencional utilizando discos de cerâmicas piezoelétricos, para utilização em ensaios não-destrutivos de materiais.

O projeto envolveu a modelagem, a fabricação e a verificação experimental do protótipo.

Na primeira parte do trabalho, que consiste no primeiro semestre, foram feitas a fundamentação teórica e as considerações de projeto do transdutor em questão.

Na segunda parte, que consiste no segundo semestre, fez-se os desenhos de conjunto e de fabricação, construiu-se o protótipo e testou-se o mesmo experimentalmente.

## **2. Fundamentos Teóricos**

### **2.1 Introdução a Transdutores e Piezoelectricidade**

O transdutor é um dispositivo que converte uma forma de energia para outra. Transdutores são usados como transmissores e receptores de vibrações mecânicas, convertendo energia elétrica para energia acústica e vice-versa. Na área de ultra-som os tipos mais comuns de transdutores são os piezoelétricos.

O fenômeno da piezoelectricidade traduz-se na geração de cargas elétricas em um meio proporcional a uma tensão mecânica aplicada ao mesmo, ou, pelo caminho inverso, uma mudança dimensional (deformação) proporcional a um campo elétrico gerado no meio. O requisito fundamental para a piezoelectricidade é que certos eixos do material possuam uma polaridade.

Como materiais piezoelétricos mais comuns pode-se citar o Titanato de Bário ( $TiO_3Ba$ ) e o Titanato de Zirconato de Chumbo (PZT).

### **2.2 Princípios Físicos da Piezoelectricidade**

O efeito piezoelétrico foi descoberto como consequência de estudos que relacionavam o fenômeno piroelétrico e a simetria do cristal. Para a ocorrência do efeito piezoelétrico é necessária a falta do centro de simetria.

Os materiais cristalinos são divididos em 32 classes. Das 21 classes com falta de centro de simetria, 20 apresentam piezoelectricidade. Dentro deste grupo há um subgrupo de 10 classes de cristal que contém um único eixo polar (um dipolo elétrico). Os cristais deste subgrupo podem gerar, além da carga piezoelétrica devido às tensões, uma carga elétrica quando aquecido uniformemente, devido a mudança na magnitude do dipolo com a temperatura. Este efeito é conhecido como a piroelectricidade. Vale lembrar que,

apesar de todos os cristais piroelétricos serem piezoelétricos, piezoelectricidade e piroelectricidade são fenômenos diferentes pelo fato de serem relacionados a diferentes condições de simetria. .

Alguns cristais piroelétricos são também ferroelétricos.

Ferroelectricidade basicamente significa que a orientação do momento elétrico em um cristal polar pode ser mudada pela aplicação de um campo elétrico suficientemente elevado. Por diversas razões a ferroelectricidade é a propriedade básica dos materiais cerâmicos utilizados para a construção de transdutores.

Cerâmicas piezoelétricas são materiais constituídos de um aglomerado de grãos cristalinos ferroelétricos que estão orientados aleatoriamente. Nesta configuração a cerâmica é isotrópica e não-piezoelétrica devido à orientação aleatória e à estrutura de domínios dos grãos (regiões limitadas por cada grão cristalino onde os dipolos elétricos possuem uma orientação em comum - figura 1.a). O material cerâmico pode tornar-se piezoelétrico através de um tratamento de pólos que consiste na aplicação de um elevado campo elétrico numa dada direção, a uma temperatura elevada, acima da temperatura de Curie (que é a temperatura em que o cristal perde as suas propriedades piezoelétricas e os seus domínios orientam-se de maneira aleatória), para mudar os eixos polares para a direção adotada, conseguindo-se assim um vetor do domínio resultante aproximadamente na direção do campo elétrico (figura 1.b). Após a remoção do campo, os dipolos não podem retornar facilmente as suas posições originais, e a cerâmica possui agora uma polarização permanente. Portanto, o material responderá linearmente a campos elétricos aplicados e a pressões mecânicas, se a magnitude das mesmas for mantida abaixo da necessária para a mudança dos eixos polares.

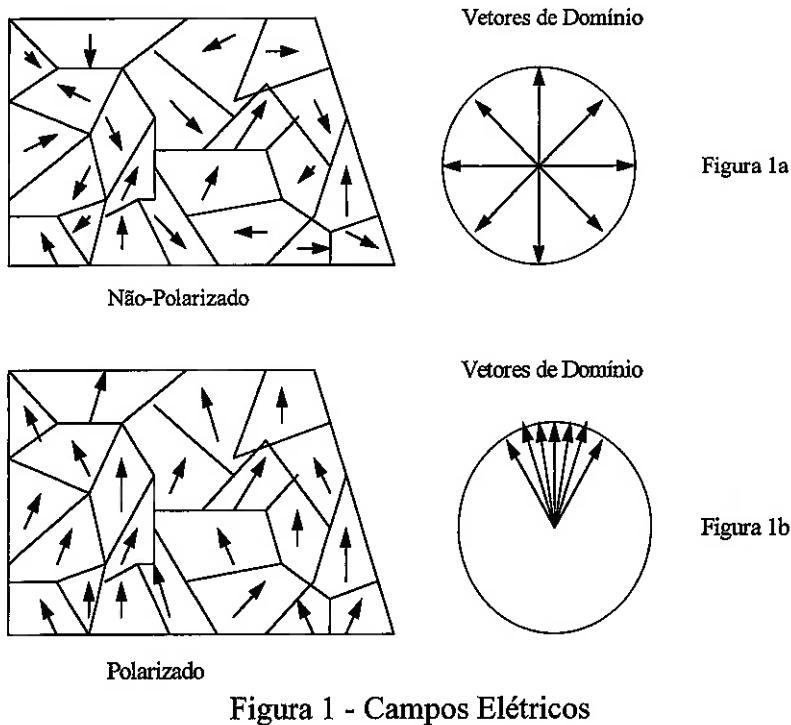


Figura 1 - Campos Elétricos

Em materiais piezoelétricos as propriedades elétricas e elásticas estão acopladas, ou seja, os parâmetros mecânicos e elétricos possuem, entre si, relações constitutivas através de equações.

A relação elétrica entre o deslocamento dielétrico  $D$  e o campo elétrico  $E$ , num meio não piezoelétrico e sem tensões mecânicas atuantes, é dada por

$$D = \epsilon \cdot E$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade ou constante dielétrica do meio.

A relação mecânica para o mesmo meio, sem campos elétricos, sob ação de uma tensão  $T$  aplicada produz uma deformação  $S$ , pode ser representada por

$$T = c \cdot S$$

que corresponde a forma unidimensional simplificada da lei de Hooke, onde  $c$  é a constante elástica do material.

Para um meio piezoelétrico, a interação entre as variáveis elétricas e mecânicas pode ser descrita por equações lineares na seguinte forma em notação tensorial:

$$D_m = e_{mi} S_i + \varepsilon_{mk}^S E_k$$

$$T_i = c_{ij}^E S_j - e_{mi} E_m$$

onde  $c_{ij}^E$  é a constante elástica do meio determinado a um campo elétrico constante,

$e_{mi}$  é a constante piezoelétrica, e  $\varepsilon_{mk}^S$  é a constante dielétrica determinado a uma deformação constante.

### 2.3 Chain Matrix

Considerando um transdutor piezoelétrico vibrando numa direção  $z$ , que é o nosso caso (unidimensional), segue o diagrama deste transdutor na figura 2 abaixo:

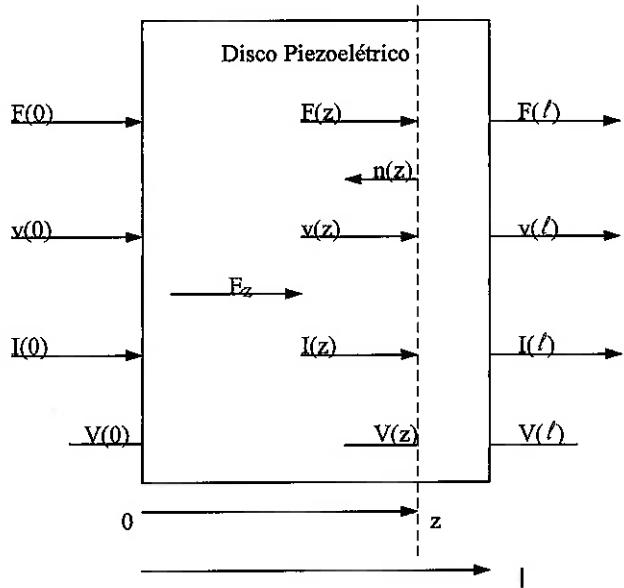


Figura 2. Variáveis de entrada e saída representadas como funções em 0 e  $l$ . Essas variáveis também são mostradas numa posição genérica  $z$ .  $E_z$  corresponde a direção da polarização.

A função  $F(z)$  representa a força agindo numa superfície plana a uma posição  $z$ , a função  $v(z)$  é a velocidade das partículas na posição  $z$ . Por analogia eletro-mecânica,  $I(z)$  é a corrente elétrica no sentido esquerda para direita e  $V(z)$  é o potencial elétrico, ambos em  $z$ . Assume-se que todas as funções são funções apenas de  $z$ .

As equações constitutivas para o material piezoelétrico do transdutor da figura 2, são dadas por

$$T_3(z) = c_{33}^E S_3(z) - e_{33} E_z(z) \quad (1)$$

$$D_z(z) = e_{33} S_3(z) + \varepsilon_{33}^S E_z(z) \quad (2)$$

$E_z(z)$  e  $D_z(z)$  são o campo elétrico e o deslocamento elétrico, respectivamente,  $c_{33}^E$  é a constante elástica a um campo elétrico constante,  $e_{33}$  é a constante piezoelétrica,  $\varepsilon_{33}^S$  é a constante dielétrica a uma deformação constante.

A equação do movimento é dada por

$$\frac{\partial}{\partial z} T(z) = -\rho \omega^2 u(z) \quad (3)$$

onde  $u(z)$  é o deslocamento das partículas ao longo do eixo  $z$ ,  $\rho$  a densidade do meio e  $\omega$  a freqüência angular da onda acústica.

Como não há cargas livres no material piezoelétrico,

$$\frac{\partial}{\partial z} D_z(z) = 0 \quad (4)$$

Portanto,  $D_z(z)$  é constante e será denotado por  $D_z$ .

A corrente e o deslocamento elétrico são relacionados por

$$D_z = \frac{I}{j\omega A} \quad (5)$$

onde  $A$  é a área transversal do transdutor.

Da Equação (2), pode-se escrever

$$\frac{\partial}{\partial z} E_z(z) = -\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}^S} \frac{\partial}{\partial z} S_3 = -\frac{e_{33}}{\varepsilon_{33}^S} \frac{\partial^2}{\partial z^2} u(z) \quad (6)$$

derivada a equação (1) em relação a  $z$ , e usando as equações (3) e (6) obtém a seguinte relação:

$$\left( c_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^S} \right) \frac{\partial^2}{\partial z^2} u(z) + \rho \omega^2 u(z) = 0 \quad (7)$$

Da Equação (7), conclui-se que a velocidade de propagação  $c$  das ondas acústicas em materiais piezoelétricos é

$$c = \sqrt{\frac{c_{33}^E + \frac{e_{33}^2}{\varepsilon_{33}^S}}{\rho}} \quad (8)$$

A forma mais genérica da solução da equação (7) é do tipo

$$u(z) = m \sin(kz) + n \cos(kz) \quad (9)$$

onde

$$k = \frac{\omega}{c} \text{ (número de onda)}$$

e  $m$  e  $n$  são constantes complexas a serem determinadas pelas condições de contorno, como demonstrado a seguir

$$v(z) = j \omega u(z) \quad (10)$$

em  $z=0$ , a equação (10) resulta em

$$v(0) = j \omega n$$

e

$$n = \frac{v(0)}{j \omega} \quad (11)$$

Das equações (1), (2), (5) e (9), obtém-se

$$T_3(z) = \rho c \omega \left( m \cos(kz) - \frac{v(0)}{j \omega} \sin(kz) \right) - \frac{e_{33} I}{j \omega A \varepsilon_{33}^S} \quad (12)$$

Da Figura 2, conclui-se que

$$F(z) = -AT(z) \quad (13)$$

O sinal negativo na fórmula acima vem do fato da tensão  $T(z)$  ser considerada positiva quando age no sentido da normal a superfície e a força  $F(z)$  agir no sentido oposto a normal. Em  $z=0$ , pode-se escrever

$$F(0) = -AT(0) = -A\rho c\omega m + \frac{e_{33}I}{j\omega\epsilon_{33}^S} \quad (14)$$

Resolvendo para  $m$

$$m = -\frac{F(0)}{A\rho c\omega} + \frac{e_{33}I}{j\omega^2 A\rho c\epsilon_{33}^S} \quad (15)$$

Empregando as equações (12), (13) e (15), em  $z = \ell$ , tem-se

$$F(\ell) = F(0)a - jZb\nu(0) - j\beta(1-a)I(0) \quad (16)$$

onde

$$a = \cos(k\ell)$$

$$b = \sin(k\ell)$$

$$Z = A\rho c$$

$$\beta = \frac{e_{33}}{\omega\epsilon_{33}^S}$$

Combinando-se as equações (9), (10) e (15), obtém-se

$$\nu(\ell) = j\frac{F(0)}{Z}b + a\nu(0) + \frac{\beta b}{Z}I \quad (17)$$

Das Equações (2) e (5), chega-se a

$$\frac{I}{j\omega A} = e_{33} \frac{\partial}{\partial z} u(z) + \epsilon_{33}^S E_z(z)$$

Esta equação integrada de 0 a  $\ell$  leva a seguinte equação

$$\frac{I\ell}{j\omega A} = e_{33}(u(\ell) - u(0)) + \epsilon_{33}^S(V(0) - V(\ell)) \quad (18)$$

Usando as equações (9), (15) e (18), e manipulando-se os seus termos, tem-se

$$V(\ell) = -\frac{\beta b}{Z} F(0) + j\beta(1-a) + V(0) - \left( \frac{1}{j\omega C_o} + \frac{j\beta^2 b}{Z} \right) I \quad (19)$$

onde

$$C_o = \frac{\varepsilon_{33}^s A}{\ell}$$

As equações (16), (17) e (19), e a continuidade da corrente  $I$  podem ser agrupadas numa formulação denominada *chain matrix*, desenvolvida pelo Professor Rubens A. Sigelmann, que em várias ocasiões atuou como professor-visitante do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP, trabalhando no Laboratório de Ultra-som com os professores Julio Cesar Adamowski e Flávio Buiochi, entre outros.

A formulação é dada abaixo:

$$\begin{bmatrix} F(\ell) \\ v(\ell) \\ V(\ell) \\ I(\ell) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(1,1) & C(1,2) & 0 & C(1,4) \\ C(2,1) & C(2,2) & 0 & C(2,4) \\ C(3,1) & C(3,2) & 1 & C(3,4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} F(0) \\ v(0) \\ V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (20)$$

onde

$$C(1,1) = C(2,2) = a = \cos(k\ell); \quad C(1,2) = -jZb; \quad b = \sin(k\ell);$$

$$C(1,4) = -j\beta(1-a); \quad \beta = \frac{\varepsilon_{33}^s}{\omega \varepsilon_{33}^s}; \quad C(2,1) = -jb/Z$$

$$C(2,4) = \beta b/Z; \quad C(3,1) = -\beta b/Z; \quad C(3,2) = j\beta(1-a)$$

$$C(3,4) = -\left( \frac{1}{j\omega C_o} + \frac{j\beta^2 b}{Z} \right)$$

Uma notação simplificada para a equação (20) é mostrada a seguir:

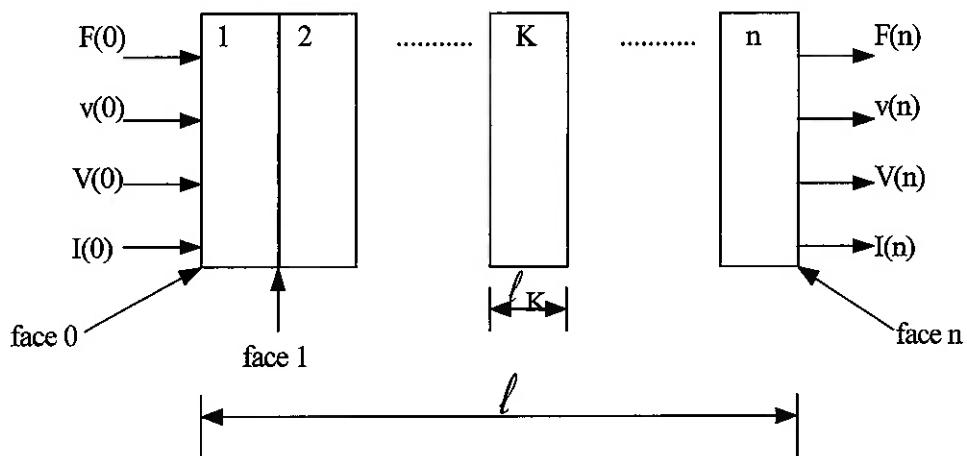
$$\begin{bmatrix} F(\ell) \\ v(\ell) \\ V(\ell) \\ I(\ell) \end{bmatrix} = [C(\ell)] \cdot \begin{bmatrix} F(0) \\ v(0) \\ V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde  $[C(\ell)]$  é a matriz *chain matrix* para o elemento de espessura  $\ell$

Uma função do MATLAB™ chamada *chain(e)* foi desenvolvida pelo Professor Rubens A. Sigelmann para calcular os componentes da matriz *chain matrix*  $[C(z)]$ . Este programa foi utilizado na modelagem do transdutor e encontra-se no anexo A. Os elementos da matriz linha e são:  $e(1,1)$ =área ( $m^2$ );  $e(1,2)$ =densidade ( $kg/m^3$ );  $e(1,3)$ =velocidade longitudinal ( $m/s$ );  $e(1,4)$ =espessura ( $m$ );  $e(1,5)$ = constante dielétrica relativa;  $e(1,6)$ = constante piezoelétrica ( $coulomb/m^2$ ); e  $e(1,7)$ =freqüência (Hz).

### 2.3.1 Propriedades

#### a) Cadeia de Camadas do Mesmo Material



$[C(\ell_K)]$ : matriz de cadeia para o elemento de espessura  $\ell_K$ .

A espessura total é dada por

$$\sum_{k=1}^n \ell_k = \ell$$

Assim para discos feitos do mesmo material

$$C(\ell) = \prod_{k=1}^n C(\ell_k) \quad (22)$$

### b) Matriz de Cadeia Inversa

Se as variáveis em  $z=0$ , forem expressas em termos de variáveis em  $z=\ell$ , a equação (20) torna-se

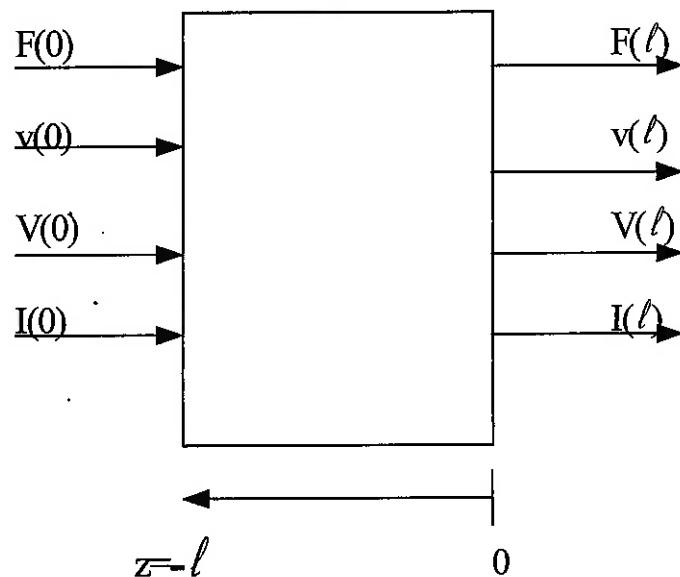
$$\begin{bmatrix} F(0) \\ v(0) \\ V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = [C(\ell)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} F(\ell) \\ v(\ell) \\ V(\ell) \\ I(\ell) \end{bmatrix} \quad (23)$$

onde  $[C(\ell)]^{-1}$  é a matriz de cadeia inversa

a seguinte notação será adotada

$$[c(\ell)] = [C(\ell)]^{-1}$$

Invertendo-se o eixo de coordenado  $z$ ,



tem-se

$$[c(\ell)] = [C(-\ell)] \quad (24)$$

A equação (24) mostra que para calcular a matriz de cadeia inversa  $[c(\ell)]$ , basta utilizar como parâmetro de entrada o valor negativo da espessura ( $-\ell$ ) na matriz de cadeia  $[C(-\ell)]$ .

### c) Polarização

Para todas as equações acima, foi assumido que a polarização do disco piezoelétrico está orientado no sentido positivo da direção do eixo z. Se a polarização for invertida de sentido, como acontece quando rotaciona-se o disco de modo que a sua face frontal tornar-se a sua face traseira, a constante  $e_{33}$  é substituída por  $-e_{33}$ , em todas as equações.

#### 2.3.2 Princípio da Superposição - Efeito da Corrente na Formulação Chain Matrix

A figura 3 mostra o esquema dos terminais da fonte de corrente  $I(k)$  conectados na face  $k$  e na face 0 para uma cadeia de  $n$  materiais diferentes.

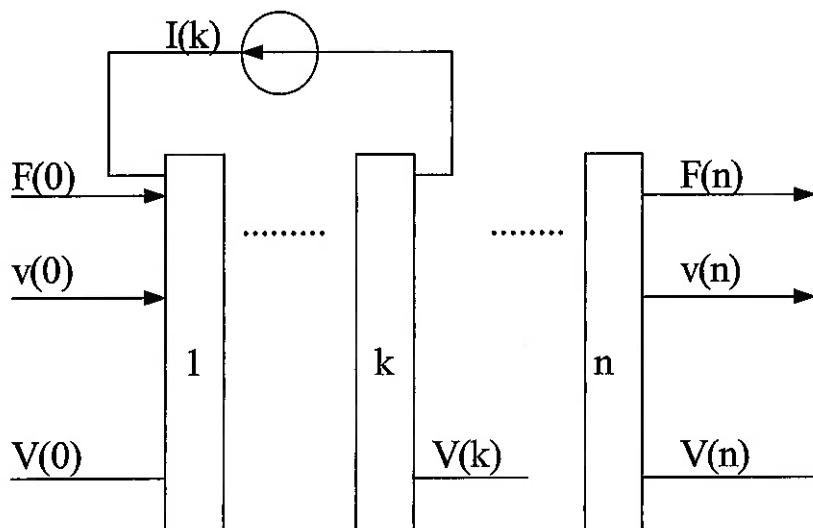


Figura 3 - Fonte de corrente  $I(k)$  inserida na cadeia entre as faces 0 e k.

Para calcular  $F(0)$ ,  $v(0)$  e  $V(0)$  como função de  $I(k)$ ,  $F(n)$ ,  $v(n)$  e  $V(n)$  usa-se o princípio da superposição. Portanto,

$$\begin{bmatrix} F(0) \\ v(0) \\ V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = [c_{1n}] \times \begin{bmatrix} F(n) \\ v(n) \\ V(n) \\ 0 \end{bmatrix} + I(k) \times \begin{bmatrix} c_{1k}(1,4) \\ c_{1k}(2,4) \\ c_{1k}(3,4) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

onde a seguinte notação foi adotada

$$[c_{1n}] = \prod_{i=1}^n [c_i] \quad (26)$$

e  $c_{1k}(1,4)$ ,  $c_{1k}(2,4)$  e  $c_{1k}(3,4)$  são os elementos da coluna 4 da matriz  $[c_{1k}]$  como definida na equação (26).

Generalizando-se para o caso da figura 4, com a fonte de corrente  $I_{km}$  colocada entre as faces  $k$  e  $m$ ,

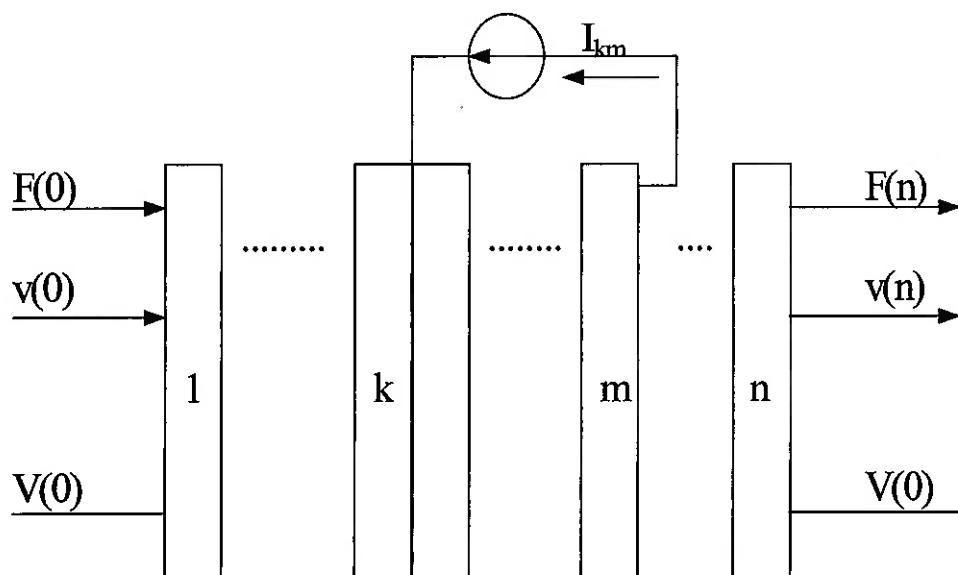


Figura 4 - Fonte de corrente  $I_{km}$  colocada entre as faces  $k$  e  $m$ .

Dividindo-se a fonte de corrente em duas, tem-se a seguinte configuração equivalente, como mostrado na figura 5

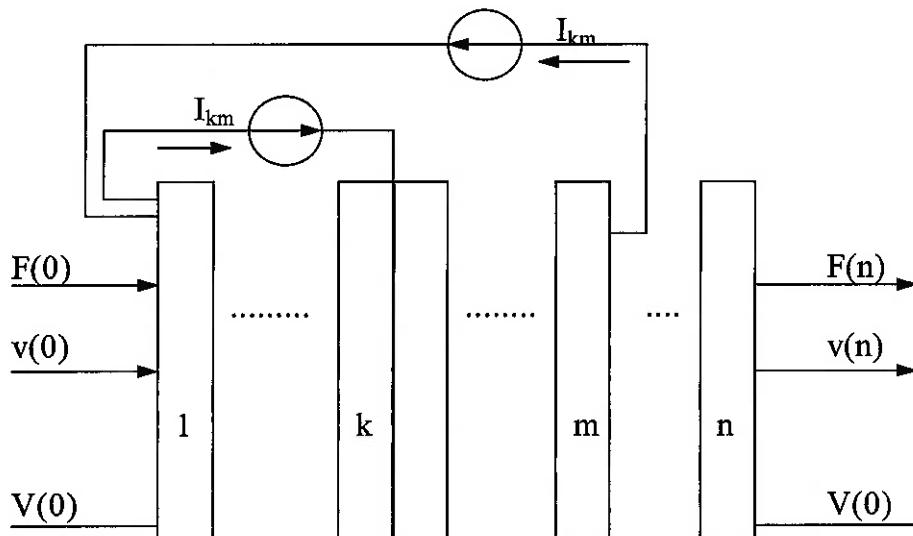


Figure 5 - Fontes de corrente  $I_{km}$  colocadas entre as faces 0 e k e entre as faces 0 e m.

Para cada uma das fontes de corrente pode-se utilizar a equação (25) para obter

$$\begin{bmatrix} F(0) \\ v(0) \\ V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} = [c_{ln}] \times \begin{bmatrix} F(n) \\ v(n) \\ V(n) \\ 0 \end{bmatrix} + I_{kn} \times \begin{bmatrix} c_{lm}(1,4) - c_{lk}(1,4) \\ c_{lm}(2,4) - c_{lk}(2,4) \\ c_{lm}(3,4) - c_{lk}(3,4) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

### 2.3.3 Exemplo de Aplicação

#### Cálculo da Impedância Elétrica

Considerando-se que as duas faces de um transdutor de uma única camada (Figura 2) possuem impedâncias acústicas  $Z_0$  and  $Z_\ell$ , deseja-se calcular a impedância elétrica equivalente desse transdutor.

Da figura 2 nota-se que

$$F(0) = -Z_0 v(0) \quad (28)$$

e

$$F(\ell) = Z_\ell v(\ell) \quad (29)$$

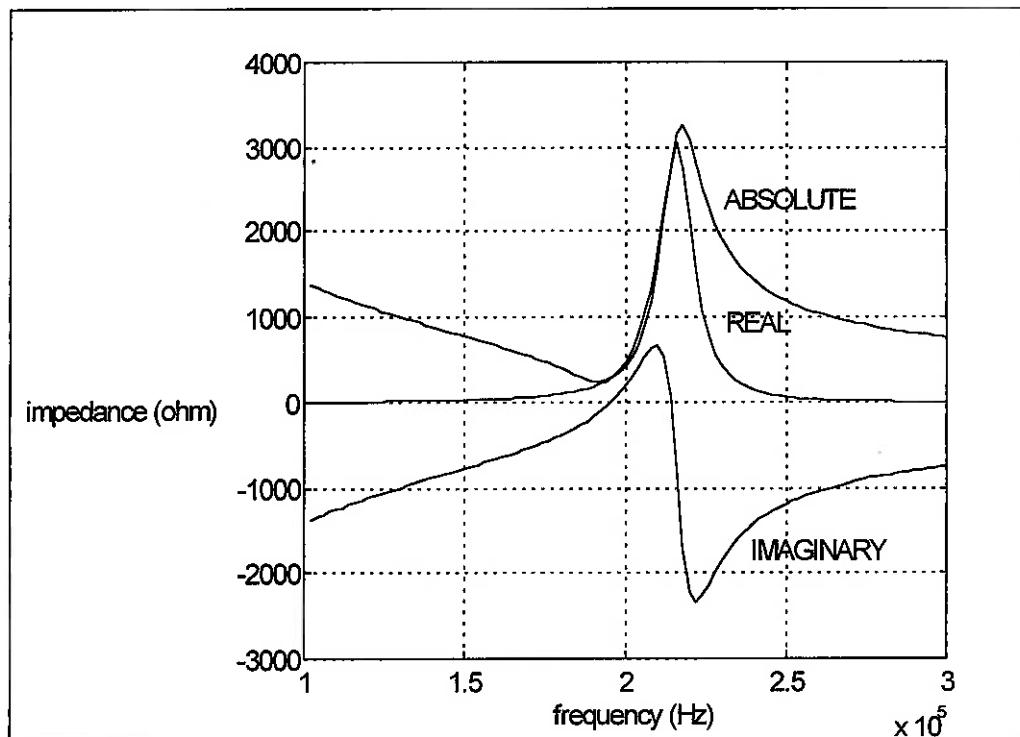
Substituindo-se esses valores na equação (20), obtém-se

$$\begin{bmatrix} C(1,4) \\ C(2,4) \\ C(3,4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_\ell & (C(1,2) - C(1,1)Z_0) & 0 \\ -1 & (C(2,2) - C(2,1)Z_0) & 0 \\ 0 & (C(3,2) - C(3,1)Z_0) & -1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} v(\ell) \\ v(0) \\ V \end{bmatrix} \quad (30)$$

Na equação (30), assume-se que  $I=1$ , portanto, resolvendo-se esta equação para  $V$ , tem-se o valor da impedância elétrica.

A impedância elétrica do transdutor cujo material piezoelétrico possui características dadas no arquivo *pzt.m* (Anexo B) é calculado pelo programa *impult.m* do Matlab<sup>TM</sup> (Anexo C).

Usando o programa *impult*, obtém-se o gráfico da figura 6 com os valores real,



imaginário e absoluto da impedância elétrica.

Figura 6 - Valores real, imaginário e absoluto da impedância elétrica

## 2.4 Circuitos Equivalentes

Além da formulação *chain matrix*, pode-se representar o transdutor através de circuitos elétricos equivalentes. Duas das principais representações, Mason e KLM, são apresentadas a seguir. É importante lembrar que no presente trabalho decidiu-se utilizar a formulação *chain matrix* para modelar o transdutor, por apresentar a facilidade em se trabalhar diretamente com suas propriedades acústicas e elétricas sem a necessidade de achar circuitos equivalentes.

### 2.4.1 Circuito Equivalente de Mason

Nos materiais piezoelétricos as propriedades mecânicas e elétricas são acopladas. Conseqüentemente, pode-se esperar que o circuito equivalente de uma placa piezoelétrica seja uma complicada mistura de elementos mecânicos e elétricos. Todavia, Mason desenvolveu um circuito equivalente em que as propriedades mecânicas e elétricas são acopladas através de somente um transformador ideal com relação 1: $\phi$ , em que

$$\phi = g C_0 c^D$$

onde  $c^D = c^E (1 + e^2 / \epsilon^S c^E)$ ,  $g$  é uma constante piezoelétrica e  $C_0$  é a capacidade. O termo  $e^2 / \epsilon^S c^E$  é conhecido como a constante de acoplamento eletro-mecânico  $k_T^2$ .

O circuito equivalente de Mason para uma placa piezoelétrica vibrando em seu modo de espessura é apresentado na figura 7. O circuito equivalente de Mason consiste de duas portas mecânicas, correspondendo as superfícies frontal e traseira da placa, e uma porta elétrica.

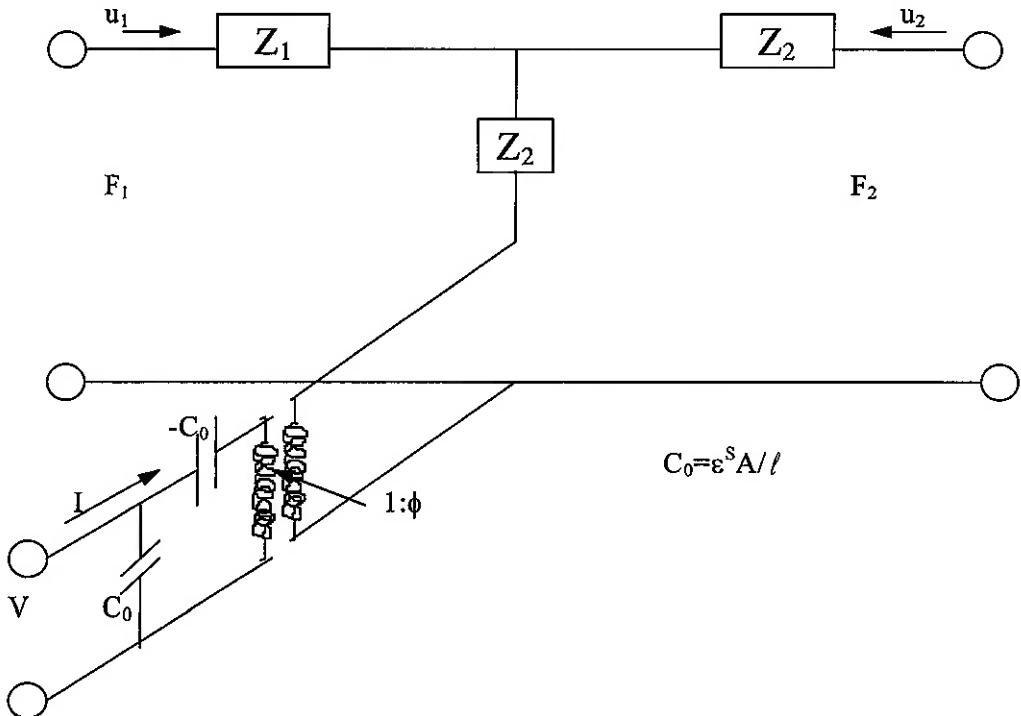


Figura 7 - Circuito equivalente de Mason

#### 2.4.2 Circuito Equivalente KLM

Apesar de o circuito equivalente de Mason ter-se mostrado útil em muitas aplicações, um circuito equivalente alternativo mostrou-se mais adequado para determinar o melhor (o ótimo) acoplamento eletro-mecânico. O circuito Krimholtz-Leedom-Matthaeci ou KLM, modela o transdutor piezoelétrico como uma linha de transmissão mecânica sem perdas, de comprimento  $\ell$  acoplado na posição  $(\ell/2)$  da rede elétrica, como mostrado na figura 8. Novamente os sistemas elétrico e mecânico são acoplados por um transformador ideal de relação  $1:\phi$ , onde  $\phi$  é a função de freqüência assim, tem-se:

$$\phi = [k_T (\pi / \omega_0 C_0 Z_0)^{1/2} \operatorname{sinc}(\omega / 2\omega_0)]^{-1}$$

onde  $\text{sinc}(x)$  é igual a  $\sin(\pi x)/\pi x$ . Na equação acima  $\omega_0$  é a freqüência de ressonância mecânica da linha de transmissão de comprimento  $\ell$  e constante de acoplamento eletro-mecânico  $k_T^2$ .

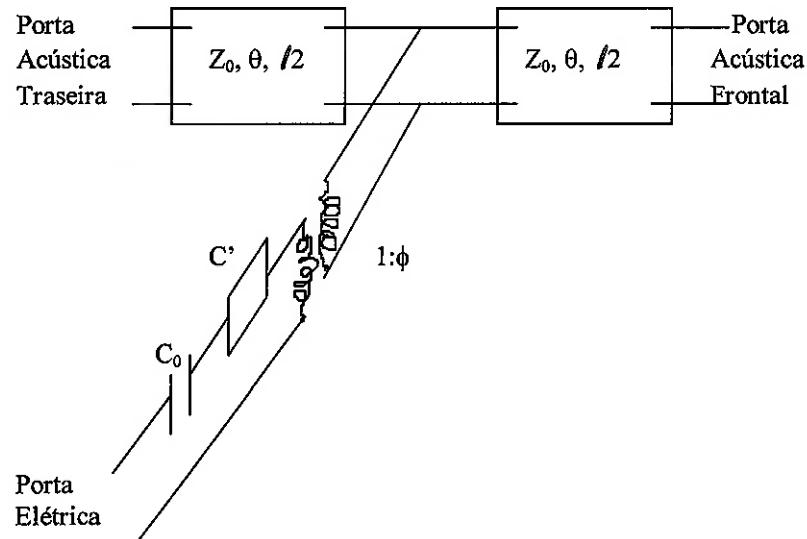


Figura 8 - Circuito equivalente KLM

A rede elétrica consiste de dois capacitores em série com o transformador. Um capacitor representa a capacitância do transdutor a uma tensão constante e o outro capacitor é uma função da freqüência e dos coeficientes eletro-mecânicos acoplados, escrito como:

$$C = -C_0 / [k_T^2 \text{sinc}(\omega / \omega_0)]$$

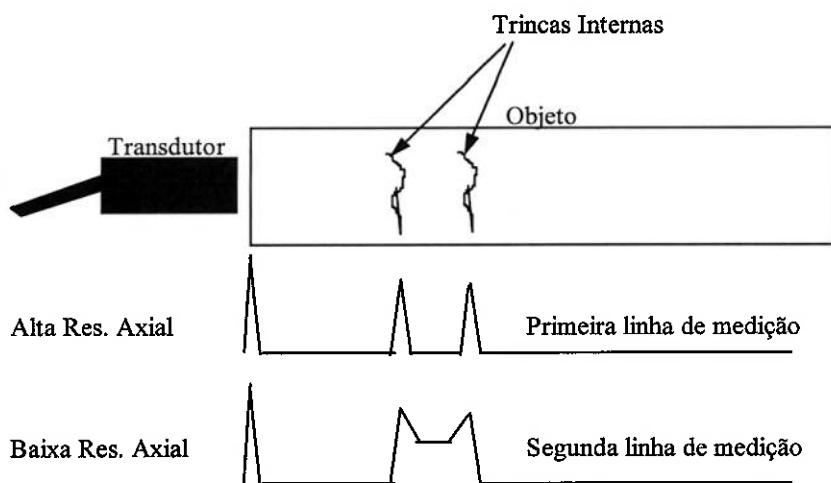
### **3 Considerações de Projeto do Transdutor Ultra-sônico**

#### **3.1 Definições**

As seguintes definições são necessárias para uma melhor compreensão das características de um transdutor:

##### **Resolução axial**

A resolução axial é um dos principais parâmetros que influencia na qualidade da imagem em ensaios não-destrutivos e diagnósticos médicos. Ela pode ser definida como a capacidade de distinguir estruturas refletoras próximas entre si que se encontram em planos diferentes e paralelos à face do transdutor. A figura abaixo ilustra o princípio da resolução axial:



Este é o caso típico de um feixe de ultra-som medindo um objeto que possui duas superfícies refletoras próximas e paralelas a face do transdutor. No exemplo, as trincas encontram-se próximas entre si. A primeira linha de medição representa um sistema capaz de definir as superfícies refletoras como duas estruturas separadas. Já a segunda linha representa um sistema cuja a resolução axial não é suficiente para definir as superfícies como duas estruturas separadas e os picos tendem a se juntar, levando a conclusões errôneas a cerca da existência das trincas.

Muitos fatores influem na resolução axial de um sistema ultra-sônico de medição. Isto inclui a natureza dos circuitos de transmissão e recepção, o processamento do sinal e as características do transdutor. Os parâmetros do transdutor que influem na resolução axial são a atenuação e a freqüência (ou comprimento de onda).

É importante, para a obtenção de uma alta resolução axial, que o grau de atenuação seja alta, pois enquanto a cerâmica está vibrando ela não é capaz de receber os ecos ultra-sônicos das estruturas refletoras. Porém, há um compromisso entre aumentar a atenuação para melhorar a resolução axial e permitir a cerâmica de vibrar o bastante para produzir ecos de intensidade suficiente que possam ser detectados e processados pelo transdutor.

A freqüência do transdutor influencia na sua resolução axial. Mantendo-se todos os outros parâmetros constantes e aumentando-se a freqüência do transdutor, resulta numa melhor resolução axial. Além disso, ocorre uma menor divergência do feixe acústico resultando numa melhor resolução lateral. Porém, uma melhora na resolução axial e redução da divergência do feixe, implica em uma menor capacidade de penetração do feixe, visto que, a atenuação acústica aumenta com a freqüência.

### **Resolução lateral**

A resolução lateral é outro importante fator que afeta a qualidade da medição. É responsável, em sua maior parte, pelo nível de detalhe que é possível em uma imagem. Ela pode ser definida como a habilidade para distinguir superfícies refletoras próximas entre si que estão localizadas em planos diferentes e perpendiculares à face do transdutor. Como exemplo pode-se ilustrar um caso análogo ao da resolução axial, só

que neste caso, tem-se duas trincas em planos diferentes e no sentido longitudinal do objeto de medição.

A largura do feixe de ultra-som é o fator mais determinante da capacidade de resolução lateral. Se o feixe for largo, o sistema de medição não é capaz de detectar o espaço existente entre as duas trincas, deteriorando-se a qualidade da imagem. Se o feixe for estreito, o sistema detecta a primeira falha, passa pelo espaço entre as trincas e finalmente, encontra a segunda falha.

Os parâmetros que afetam a largura do feixe são: geometria da cerâmica, freqüência e focalização.

A geometria da cerâmica afeta facilmente a largura do feixe e, portanto, a resolução lateral. Elementos circulares produzem feixes cilíndricos. Resultando-se em uma resolução lateral uniforme ao longo das seções do feixe. Elementos retangulares podem produzir feixes elípticos e, portanto, resoluções laterais diferentes dependendo do plano.

Como visto anteriormente, o aumento da freqüência melhora a capacidade de resolução lateral pela diminuição da divergência do feixe, porém um aumento da freqüência implica em uma diminuição da capacidade de penetração.

Focalizar um transdutor significa regular a largura do feixe e também a região ou a zona de sensitividade (parâmetro a ser discutido no próximo item) máxima, permitindo que o transdutor seja otimizado para uma determinada aplicação.

A focalização do transdutor pode ser interna ou externa. A focalização interna é obtida aplicando-se um raio de curvatura apropriado obtendo-se uma superfície côncava. Já a focalização externa é obtida aplicando-se uma camada de casamento num elemento ativo plano e juntando-se a ela uma lente acústica côncava. A focalização proporciona

uma melhora no nível de detalhes de uma imagem ultra-sônica, devido a obtenção de um feixe mais estreito.

### **Sensitividade**

A sensitividade do transdutor pode ser definida como “a característica de ser facilmente afetada ou alterada por diversos agentes”.

A eficiência de conversão de energia de um transdutor descreve o quanto bem o transdutor converte os estímulos elétricos em energia acústica e o eco recebido em impulsos elétricos. Portanto, a sensitividade pode ser relacionada a eficiência de conversão. Entre os parâmetros de projeto que afetam a sensitividade pode-se citar: material, atenuação, focalização, casamento mecânico e elétrico.

### **3.2 Propriedades dos Materiais**

A escolha do material piezoelétrico depende da aplicação para a qual o transdutor será destinado. As características como eficiência para emissores e sensibilidade para receptores são fundamentais e devem ser maximizadas.

As propriedades elétricas e dimensões de um transdutor dependem das constantes dielétrica, piezoelétrica e elástica do material. Portanto para baixas e médias freqüências (entre 20 e poucas centenas de KHz), altos valores de constante dielétrica e baixos valores de constante elástica são adequados para obter valores práticos da impedância elétrica e da dimensão linear que determina a ressonância do elemento piezoelétrico. Entretanto, para freqüências maiores, esses valores não são convenientes. De fato, para um transdutor no seu modo de espessura a freqüências muito altas (na faixa de dezenas a centenas de MHz), materiais piezoelétricos com alto valor de

constante elástica asseguram que o transdutor não será muito fino. Ao mesmo tempo, uma baixa permissividade contra balança o aumento de freqüência e não permite que a impedância elétrica torne-se muito baixa. Isto ocorre porque a constante elástica é diretamente proporcional ao quadrado da freqüência e ao quadrado da espessura, e a impedância elétrica é inversamente proporcional a freqüência e a permissividade.

Os fatores responsáveis pelas perdas e que determinam a eficiência e a largura de banda são os chamados fatores de qualidade mecânica e dielétrica,  $Q_M$  e  $Q_E$ . Em transdutores, o fator de qualidade mecânica é um parâmetro importante. Por exemplo, em transdutores pulso-eco, o uso de pulsos estreitos requerem um  $Q_M$  o mais baixo possível para obter uma largura de banda larga e uma resposta impulsiva compacta. Um valor baixo de  $Q_M$  não é relacionado apenas a perdas, mas principalmente a uma boa transferência de energia acústica para o meio. Isto implica em casar as impedâncias acústicas do transdutor e do meio. Assim a impedância acústica do material piezoelétrico torna-se outro fator fundamental.

É importante, também, que as características constantes do material permaneçam estáveis em relação ao tempo, temperatura, tensões mecânicas e campos elétricos. Além disso, os limites de utilização do material (fadiga, limite de temperatura, etc.) devem estabelecer a capacidade de potência do transdutor. Mantendo em mente o desempenho desejado para uma aplicação específica, a questão é como desenvolver um material com propriedades adequadas.

Existe uma grande variedade de materiais piezoelétricos com uma enorme gama de constantes elástica, elétrica e piezoelétrica. Atualmente as cerâmicas mais utilizadas são os titanatos de zirconato de chumbo, ou PZT's, que estão disponíveis em várias versões comerciais e são fabricadas no mundo todo. Há, também, outros compostos

comerciais baseados em titanato de bário, metaniobato de chumbo e niobato de sódio. Recentemente, uma atenção especial foi dada ao desenvolvimento de novas cerâmicas baseadas em  $PbTiO_3$ , que demonstrou propriedades interessantes para aplicações como: ensaios não destrutivos, diagnósticos médicos e hidrofones. E, finalmente, compósitos piezoelétricos de cerâmica e materiais poliméricos constituem, no momento, o objeto de extensas pesquisas e desenvolvimento.

O PZT é o mais utilizado material piezoelétrico devido ao seu forte efeito piezoelétrico e o alto ponto de Curie, junto com a sua larga gama de propriedades que pode oferecer simplesmente fazendo-se pequenas modificações em sua composição.

A tabela 1, abaixo, lista as características e as aplicações principais das cerâmicas piezoelétricas mais populares.

Tabela 1 - Características e aplicações principais das cerâmicas piezoelétricas.

Material	Características	Aplicações
PZT-4	Alto acoplamento, alta permissividade, boas propriedades a potências altas	Sonares e aplicações de potência
PZT-5A	Alto acoplamento, muito alta permissividade, baixa constante elástica	Transdutores para ensaios não destrutivos e diagnósticos, hidrofones
PZT-6B	Muito alto fator de qualidade mecânica, boa estabilidade	Filtros de ondas elétricas
PZT-7A	Baixa permissividade	Linhas de atraso ultra-sônicas
PZT-8	Muito boas propriedades a sinais de alta potência	Transdutores ultra-sônicos de potência
$Pb(NBO_3)_2$	Baixa permissividade e muito baixo fator de qualidade mecânica	Ensaio não destrutivos e diagnósticos
$NaK(NBO_3)_2$	Alta constante elástica (altas velocidades de onda)	Linhas de atraso ultra-sônicas
Titanato de Bário	Baixo ponto de Curie	Transdutores ultra-sônicos em geral

### **3.3 Aspectos Construtivos**

O principal elemento de um transdutor é a cerâmica piezoelettrica. A maioria dos transdutores podem ser classificados em dois grandes grupos: Transdutores de banda estreita e de banda larga. Os transdutores de banda estreita são normalmente usados nas aplicações de alta intensidade, onde as freqüências baixas (20 a 100 KHz) são predominantes. Já os transdutores de banda larga operam em freqüências maiores, na faixa de 0.5 a 50 MHz, utilizando-se de pulsos de ultra-som estreitos e são usados em aplicações de detecção, medição e controle desde ensaios não-destrutivos a mapeamento de imagens médicas, por exemplo. Os transdutores de banda estreita não serão discutidos no presente trabalho, pois o objetivo é a construção de um transdutor para ensaios não-destrutivos.

Os transdutores de banda larga são necessários para as aplicações que envolvem pulsos estreitos, onde uma alta resolução é desejada, e para a medição de velocidade e atenuação sobre uma faixa contínua de freqüências. Estes transdutores são usados para transmitir e/ou receber um sinal ultra-sônico, que é usado para detectar um obstáculo, medir uma quantidade física ou monitorar a condição de algum sistema. A técnica utilizada para realizar a medição é observar as mudanças na velocidade e intensidade das ondas de ultra-som e calcular a magnitude das variáveis que causaram as mudanças.

O uso de cerâmicas piezoelettricas em transdutores que operam com pulsos é atribuída ao alto fator de acoplamento eletro-mecânico, a impedância elétrica, que pode ser facilmente casada a circuitos eletrônicos, e a boa estabilidade em relação ao tempo e a temperatura desses materiais. As cerâmicas mais utilizadas nos transdutores do tipo pulso e pulso-eco são os titanatos de zirconatos de chumbo (PZT) dos tipos 5A e 4.

A estrutura básica de um transdutor construído para obter respostas impulsivas ótimas consiste, essencialmente, de um disco de cerâmica piezoelétrica, vibrando no seu modo de espessura, colado a um bloco de retaguarda em uma de suas faces e a uma camada de casamento na outra.

A figura 9 abaixo ilustra o esquema de construção de um transdutor de banda larga.

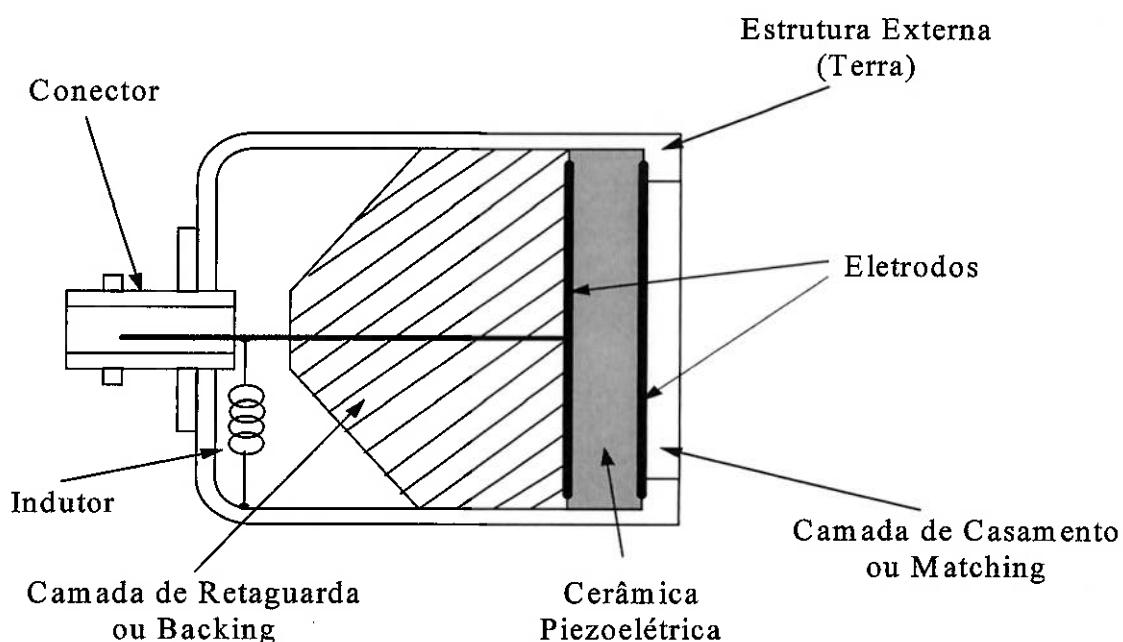


Figura 9 - Transdutor típico de banda larga.

O bloco de retaguarda é feito de um material de alta atenuação e impedância acústica semelhante ao do elemento piezoelétrico. O efeito da retaguarda é o amortecimento da vibração da cerâmica, aumentando a transferência de energia acústica para a carga e aumentando-se, assim, a largura de banda.

A camada de casamento é usada para proteger a cerâmica de danos durante a sua operação e é projetado de maneira que atue como um transformador para realizar o casamento de impedâncias acústicas entre a cerâmica e o meio. De fato, sabe-se que a transmissão de uma onda acústica de um meio para o outro através de um meio

intermediário depende das impedâncias acústicas de cada um dos meios envolvidos, bem como a espessura do meio intermediário. Portanto, quando a impedância acústica do meio intermediário for a média geométrica das impedâncias acústicas dos dois meios adjacentes, ocorre a transmissão máxima de energia, se a espessura do meio intermediário é igual a um quarto do comprimento de onda da onda acústica.

Os materiais para a retaguarda e a camada de casamento são geralmente misturas de epoxi e pó de metais pesados que são selecionados com base nas suas impedâncias acústicas e coeficientes de atenuação. Transdutores são identificados pela sua freqüência central de sua largura de banda, que corresponde a aproximadamente a ressonância da cerâmica piezoelétrica.

Na cerâmica estão depositados, em cada uma de suas faces, os eletrodos, que consistem de um filme metálico como ouro, prata, cromo ou níquel. Deve-se tomar cuidado no momento da soldagem dos fios terminais ao eletrodo. A soldagem deve ser rápida, pois o calor faz com que o transdutor perca as suas propriedades piezoelétricas.

A capacidade dos transdutores de banda larga de gerar pulsos estreitos e receber com boa fidelidade e sensibilidade, tem uma influencia decisiva na obtenção de alta resolução axial, que é uma característica muito importante nas aplicações de detecção de falhas e obtenção de imagens, como em ensaios não-destrutivos e diagnósticos médicos.

Nestes campos utiliza-se das seguintes técnicas: transmissão direta e pulso-eco. Na técnica de transmissão direta, o transdutor transmissor é colocado em um dos lados do objeto a ser testado e o transdutor receptor no outro. Admitindo-se um bom acoplamento acústico entre os transdutores e o objeto e um bom alinhamento dos transdutores, a intensidade do ultra-som recebido é monitorada. Qualquer defeito ou obstáculo no caminho do feixe de ultra-som causa uma queda na intensidade ou a

completa perda do sinal a ser recebido, o que revela a presença de uma anomalia. Esse método não permite determinar a localização do defeito ou da anomalia que causou a perda do sinal. Na técnica de pulso-eco, um pulso estreito de ondas ultra-sônicas é enviado para o objeto e os sinais de ecos dos defeitos e descontinuidades ou fronteiras retornam ao transdutor. Nesta última técnica, deve-se lembrar que na frente do transdutor existe a chamada zona morta, que ocorre devido ao fato da tensão de entrada do pulso transmitido saturar o transdutor no seu modo de recepção, de maneira tal que ele não responde a sinais de eco ao mesmo tempo ou a curtos intervalos de tempo.

A função do indutor é de filtrar o sinal gerado pela cerâmica agindo como um filtro passa-alta.

Para o transdutor a ser construído foram feitas as seguintes especificações técnicas:

- Transdutor de Banda Larga
- Material da Cerâmica: PZT-5A (fabricante: EDO Corp.)
- Freqüência Central: 1.08 MHz
- Aplicação: Ensaios Não Destrutivos

#### 4 Modelagem e Simulação

Segue na figura abaixo o modelo do transdutor na representação *chain matrix*:

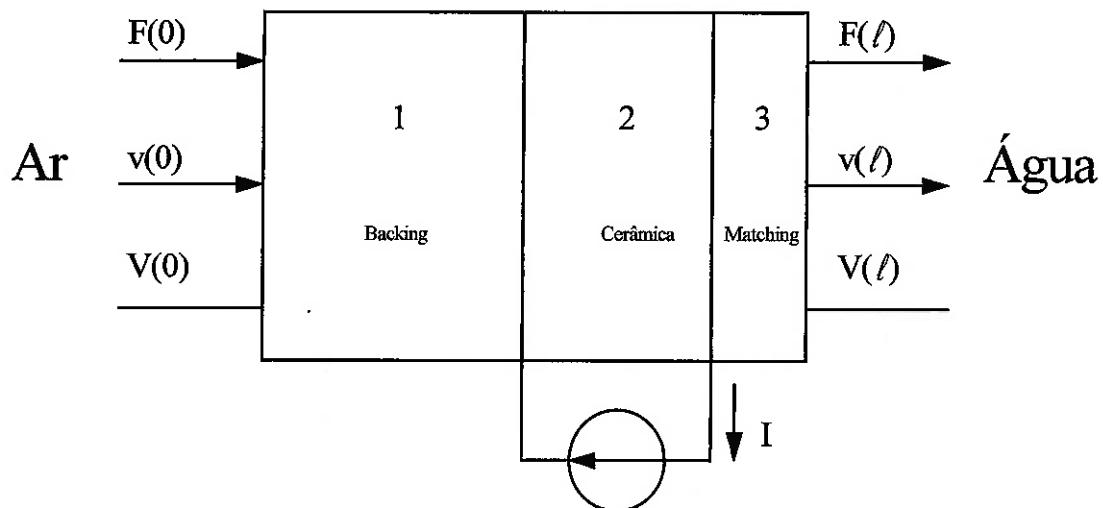


Figura 10 - Modelo *Chain Matrix* do Transdutor.

Para realizar a simulação no Matlab<sup>TM</sup> usando o programa tfimp.m (anexo D), criado a partir do impult.m, é necessário reduzir o modelo para o caso de um disco de cerâmica entre dois meios distintos, com impedâncias acústicas  $Z_1$  e  $Z_2$ . Como mostrado na figura 11, abaixo:

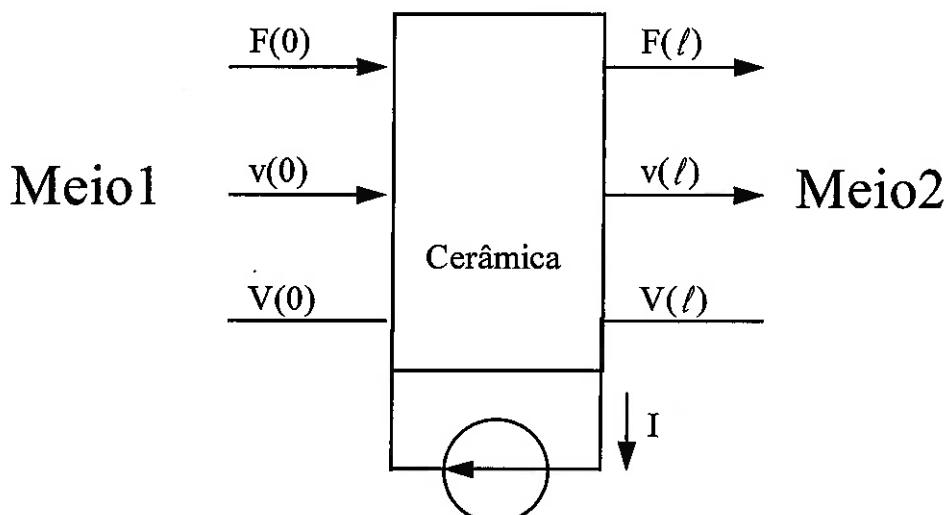


Figura 11 - Modelo Reduzido

As características do material de backing são as seguintes:

- Material: Alumina pura
- Densidade:  $3860 \text{ kg/m}^3$
- Velocidade de propagação: 10520 m/s
- Espessura: 0.025 m (25 mm)

As características do material de matching são as seguintes:

- Material: Araldite - 502/956, 50phe 325mesh W
- Densidade:  $2860 \text{ kg/m}^3$
- Velocidade de propagação: 2160 m/s
- Espessura: 0.00054 m (0.54 mm)

Definiu-se, ainda, os seguintes parâmetros:

- Diâmetro das camadas: 0.0254 m (25.4 mm)
- Impedância acústica do ar: 0 (zero)
- Impedância acústica da água: 1.5 MRayl

Utilizando-se da formulação chain matrix calculou-se a impedância acústica para o meio 1 ( $Z_1$ ) e para o meio2 ( $Z_2$ ), considerando  $V(z)=V(0)$  e  $I(z)=I(0)$ , pois não há diferenças de potencial e não há correntes circulando nos dois meios. Obteve-se, desta maneira:

$$Z_1 = j \cdot Z_{back} \cdot A \cdot \tan(k_1 \cdot l_1)$$

e

$$Z_2 = \frac{Z_{agua} \cdot \cos(k_2 \cdot l_2) - j \cdot A \cdot Z_{match} \cdot \sin(k_2 \cdot l_2)}{j \cdot \frac{Z_{agua}}{A \cdot Z_{match}} \cdot \sin(k_2 \cdot l_2) - \cos(k_2 \cdot l_2)}$$

Uma vez calculadas as impedâncias elétricas, adicionou-se um indutor ao circuito elétrico do transdutor para analisar o comportamento do mesmo em termos de eficiência, através do cálculo das potências transferidas ao matching (potência útil) e ao backing (perdas).

Utilizou-se o circuito elétrico equivalente da figura 12 para realizar o equacionamento das potências.

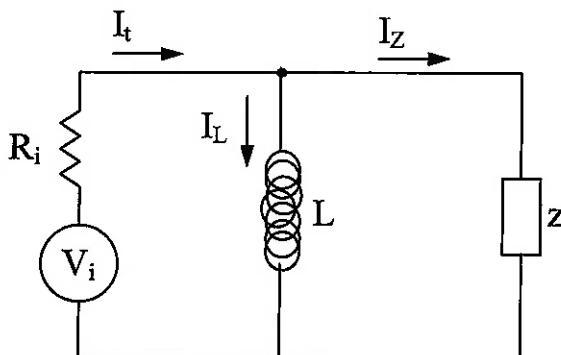


Figura 12 - Circuito Elétrico Equivalente

$V_i$  e  $R_i$  representam a tensão e a resistência interna do gerador.

$Z$  é a impedância elétrica da cerâmica, calculada pelo programa tfimpult.m.

$L$  é o indutor adicionado ao circuito.

$I_t$ ,  $I_Z$  e  $I_L$  são, respectivamente, as correntes total, no indutor e na cerâmica.

Utilizou-se para efeitos de simulação  $V_i=10$  Volts e  $R_i=50$  Ohms.

A Impedância Total  $Z_t$  considerando o circuito paralelo formado por  $Z$  e  $L$  pode ser expressa por:

$$Z_t = \frac{Z \cdot j \cdot \omega \cdot L}{Z + j \cdot \omega \cdot L}$$

A corrente total  $I_t$  é dada por:

$$I_t = x + Z \cdot \frac{x}{Z_L}$$

onde  $Z_L$  é a impedância do indutor e  $x$  é um fator de correção de dimensão Volt/Ohm utilizado para ajustar os parâmetros ao  $V_i$  considerado fixo e  $v2$  corresponde a velocidade na camada do matching.

O fator  $x$  pode ser expresso da seguinte maneira:

$$x = \frac{Z_L \cdot V_i}{Z_L \cdot Z + Z_L \cdot R_i + R_i \cdot Z}$$

Assim a Potência de Entrada é dada por

$$PotEnt = \text{Re} \left[ Z_t \cdot I_t \cdot \text{conj}(I_t) \right]$$

A Potência de Saída Pot2 é dada pela expressão

$$Pot2 = \text{Re}(Z2) \cdot \text{Abs}(x \cdot v2)^2$$

A partir das equações acima calcula-se a eficiência do transdutor, que é dada pela expressão abaixo:

$$Efic(\%) = \frac{Pot2}{PotEnt} \cdot 100$$

Rodando-se os programas tfimp.m (vide anexo D) e, em seguida, tfimpix.m (vide anexo E) no Matlab<sup>TM</sup> obteve-se os seguintes gráficos:

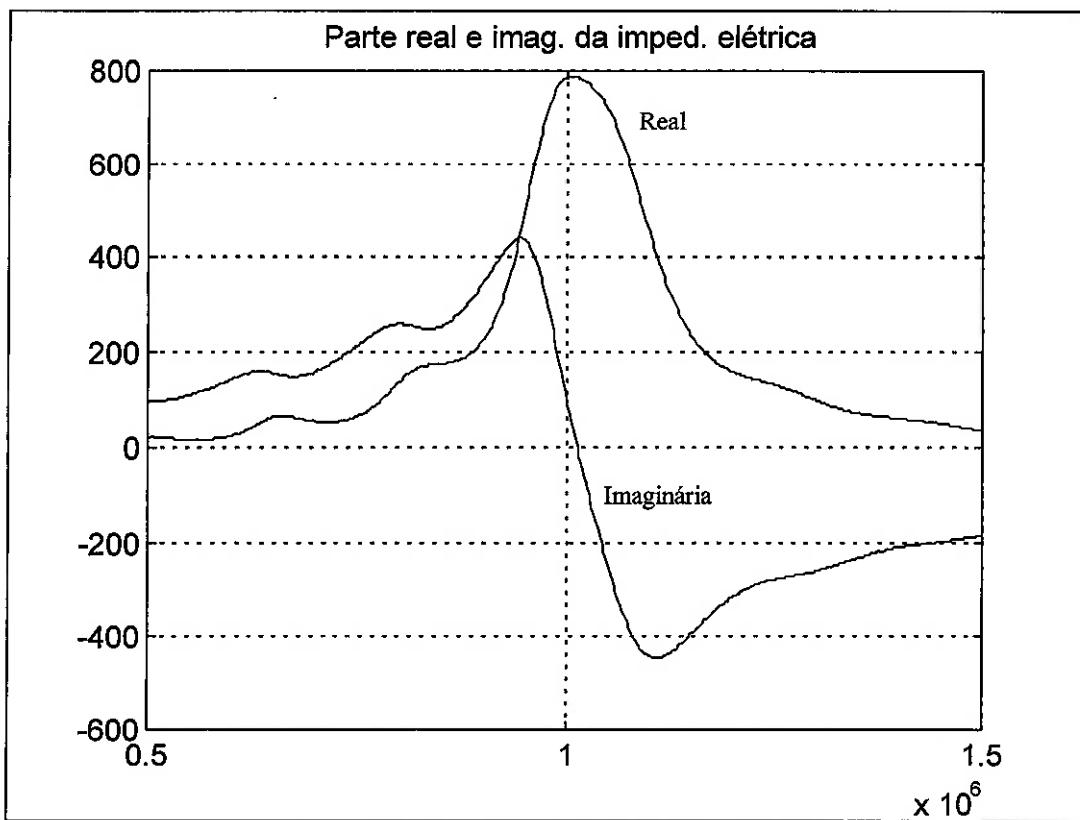


Figura 13 - Impedâncias Real e Imaginária

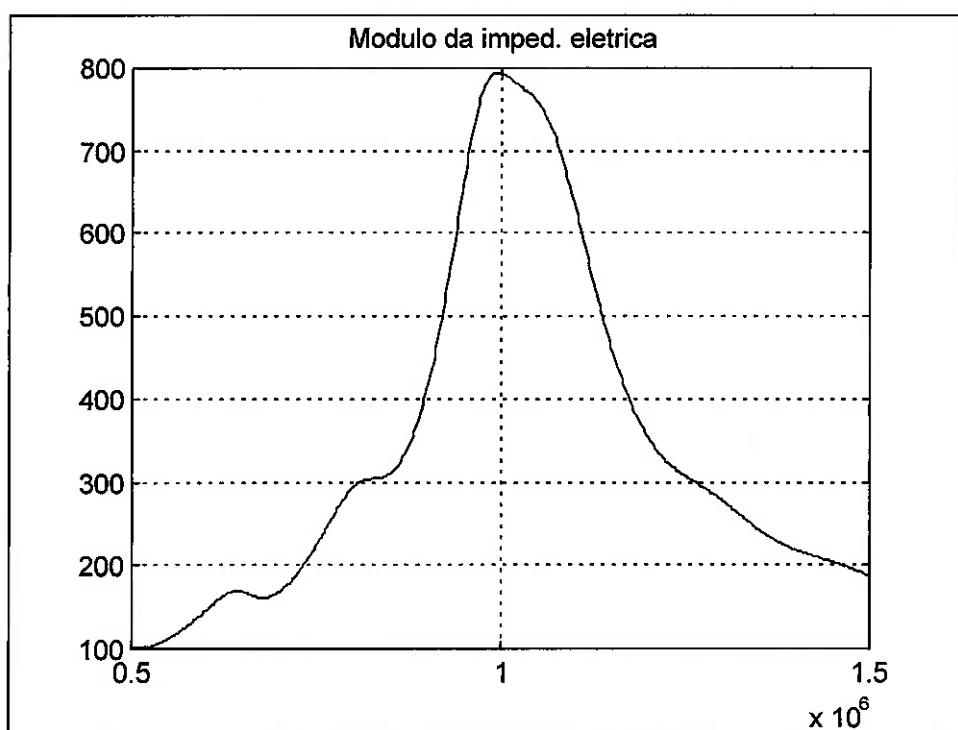


Figura 14 - Impedância Absoluta

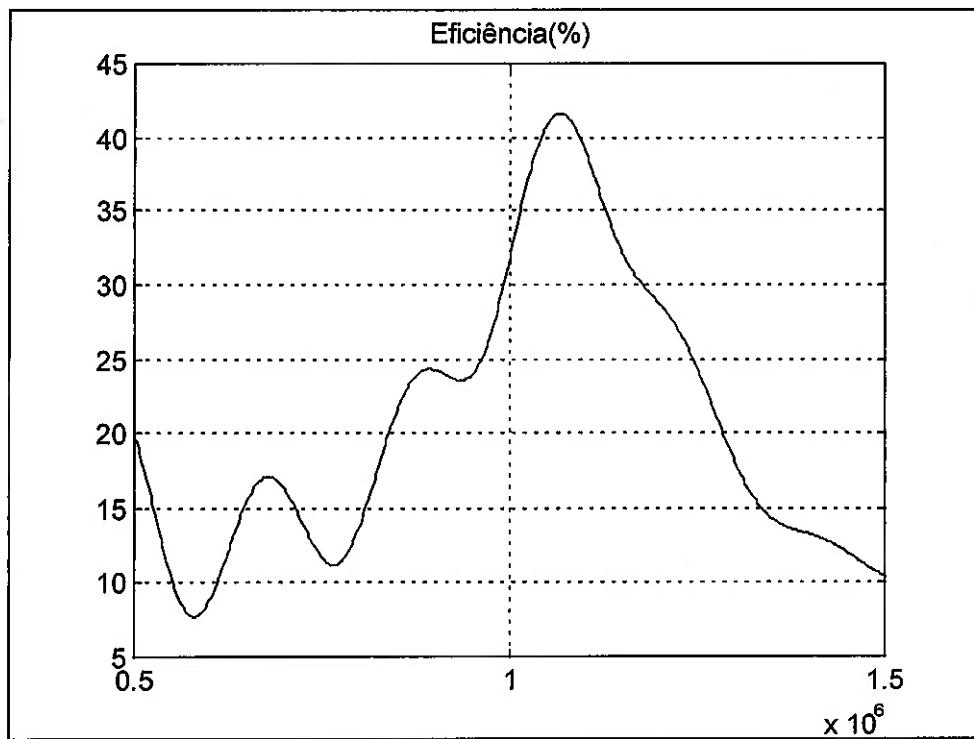


Figura 15 - Eficiência (%)

Obteve-se, assim, os valores das impedâncias elétricas real, imaginária e absoluta, em Ohms, bem como a eficiência do transdutor em função da freqüência.

## **5 Construção do Protótipo**

A construção do protótipo foi realizada segundo os passos descritos abaixo:

1. Realizou-se a usinagem das peças 1, 2 e 3. (Vide desenhos de conjunto e de fabricação, em anexo)
2. Soldou-se um fio no eletrodo adotado para ser a parte posterior da cerâmica piezoelétrica. Utilizou-se uma solda de prata de baixa temperatura para que não ocorresse o fenômeno da despolarização da cerâmica por exposição a altas temperaturas.
3. Preparou-se o material de matching, misturando-se as pastas dos dois tubos de Araldite para formar o epóxi.
4. Colocou-se na face da peça um a tela de cobre e encapsulou-se o conjunto com a peça 2.
5. Posicionou-se o conjunto verticalmente, com a face da tela voltada para baixo, em uma superfície plana e lisa.
6. Despejou-se o material de matching (epóxi) na tela.
7. Colocou-se a cerâmica dentro do conjunto.
8. Apoiou-se um tubo plástico furado (para o fio poder passar) sobre a cerâmica e sobre o mesmo, apoiou-se um peso de metal para pressionar a cerâmica contra a tela de metal.
9. Esperou-se um dia para o material de matching (Epóxi) curar.
10. Retirou-se o conjunto da superfície e testou-se o mesmo para verificar se a cerâmica ainda estava funcionando perfeitamente.
11. Uma vez verificado, preparou-se o material de backing, misturando-se o pó de alumina à substância formada pela mistura da resina e endurecedor.

12. Despejou-se o material de backing sobre a parte posterior da cerâmica e ao mesmo tempo prensou-se o mesmo durante todo este passo.

13. Esperou-se mais um dia para que o material secasse e testou-se novamente o transdutor para verificar se a cerâmica ainda funcionava.

14. Soldou-se os terminais do Indutor em paralelo e testou-se novamente o conjunto.

15. Instalou-se o conector do tipo BNC de painel na peça 3.

16. Soldou-se o fio no conector BNC.

17. Fechou-se o conjunto colando a peça 3 a peça 2 como pode ser visto no desenho de conjunto.

18. Realizou-se os testes para obtenção dos resultados experimentais.

Assim, conclui-se a construção do transdutor.

## **6 Testes Experimentais e Análise de Resultados**

Os equipamentos utilizados para a realização dos testes experimentais foram os seguintes:

- Analisador de Impedâncias/Ganho-Fase Hewlett-Packard Modelo 4194A
- Analisador Ultra-sônico Panametrics Modelo 5052UA
- Osciloscópio Digital Hewlett-Packard Modelo 54112D
- Microcomputador PC Pentium 100 MHz equipado com placa de aquisição de dados

Utilizando-se o Analisador de Impedâncias obteve-se os seguintes gráficos de impedâncias real e imaginária (Ohms) em função da freqüência (Hz) para diversos casos:

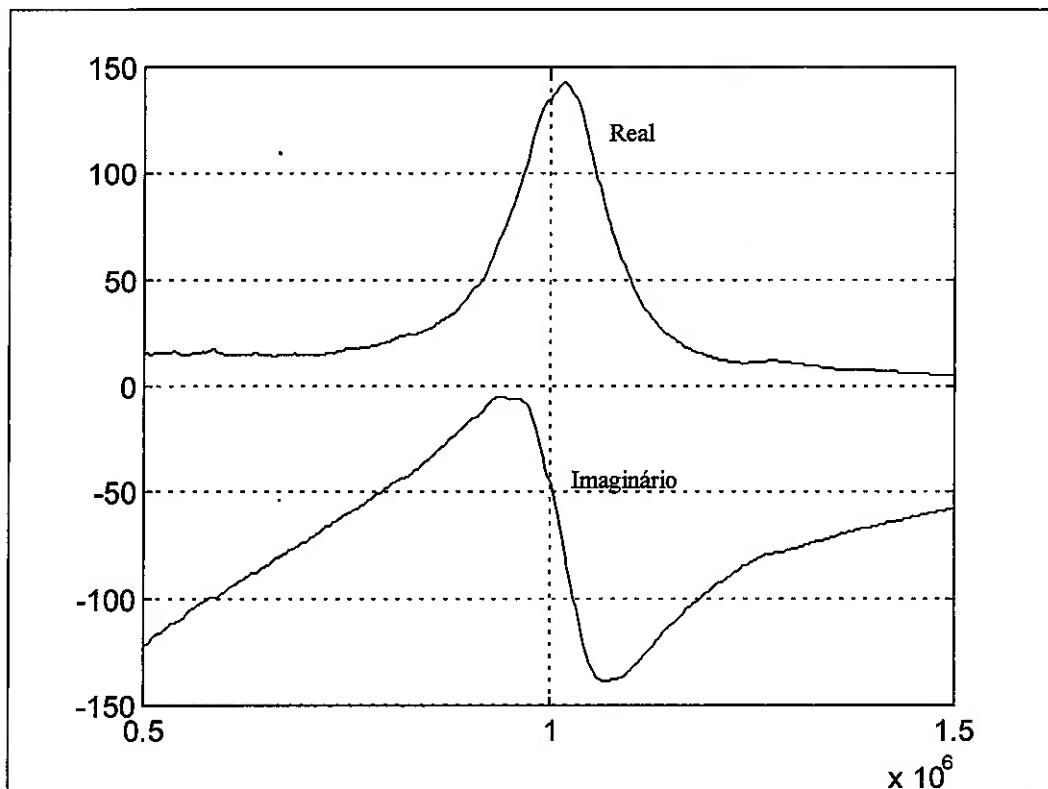


Figura 16 - Meio: ar e sem o circuito do indutor

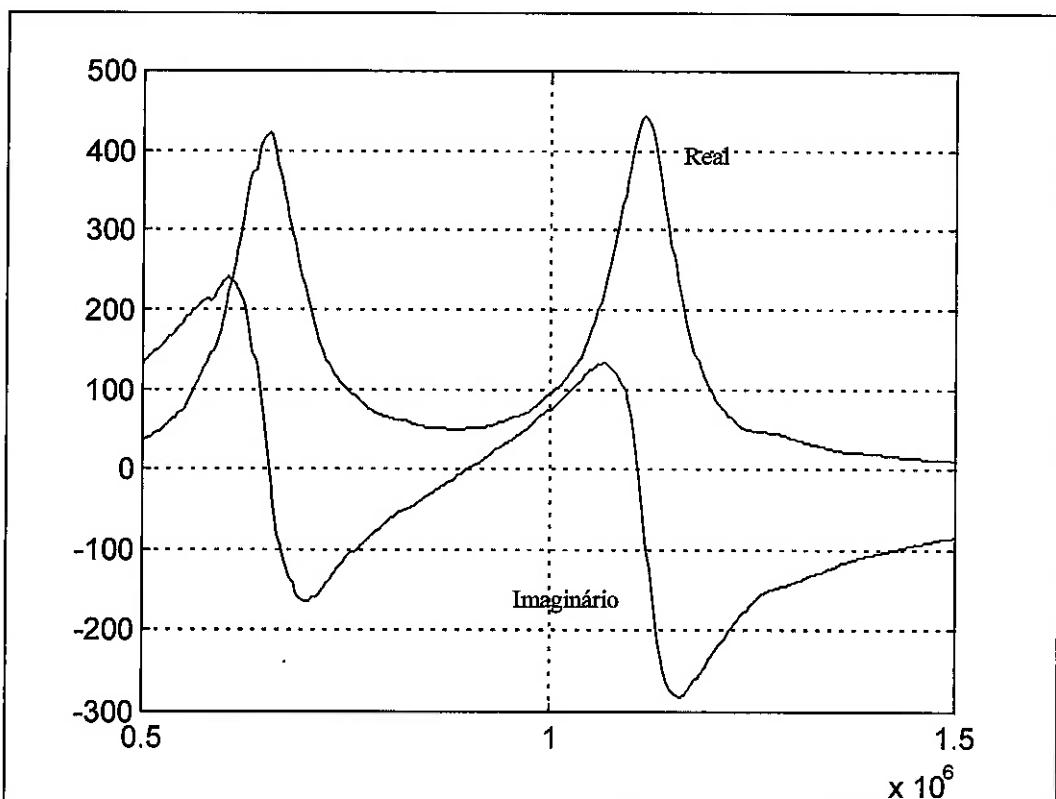


Figura 17 - Meio: ar e com o circuito do indutor

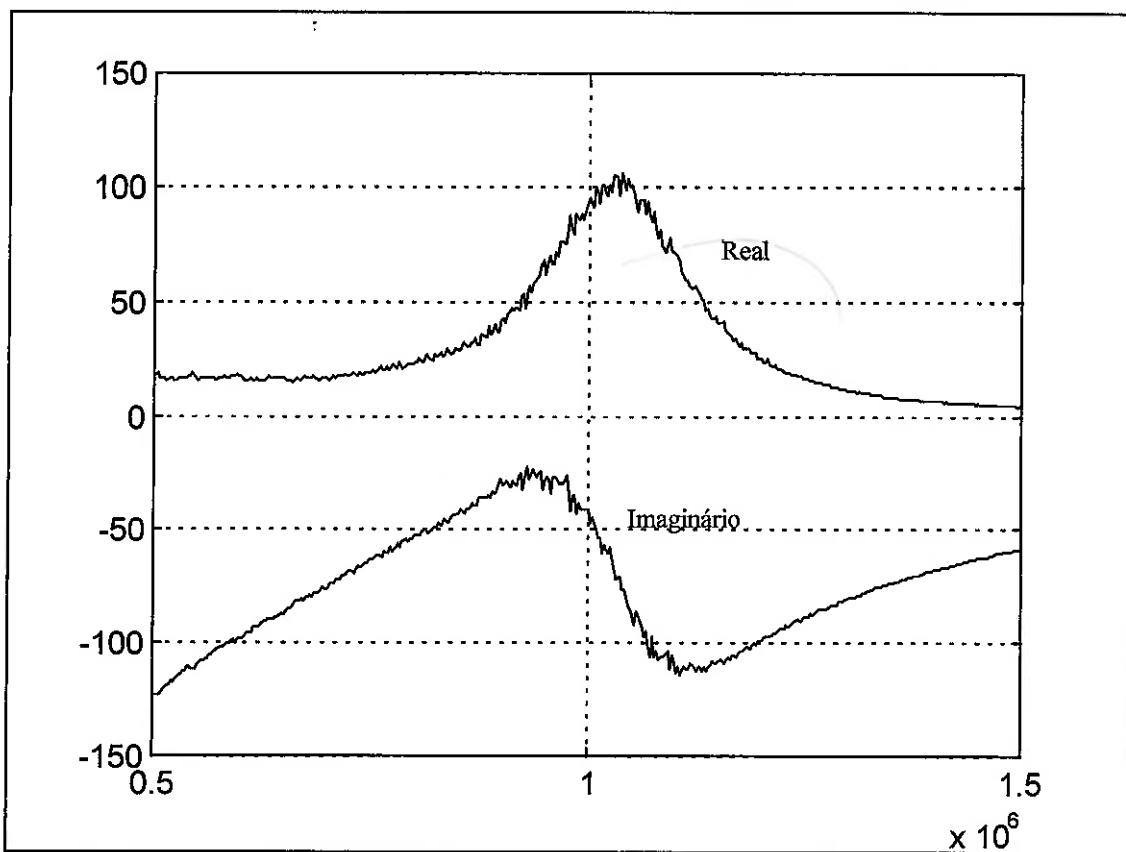


Figura 18 - Meio: água e sem o circuito do indutor

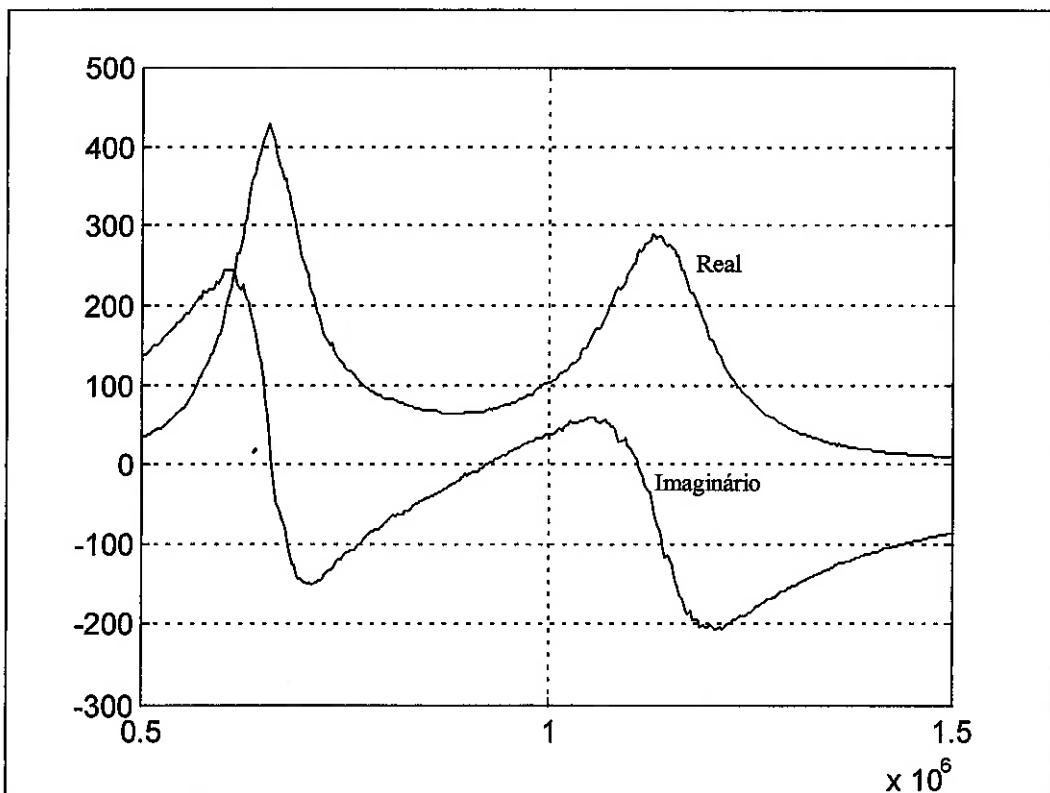


Figura 19 - Meio: água e com o circuito do indutor

Observa-se o efeito obtido pelo uso do indutor, que é o de eliminar a parte complexa (capacitiva) da impedância nas freqüências de ressonância e anti-ressonância.

As freqüências de ressonância e anti-ressonância (figura 19) são respectivamente 0.92MHz e 1.11MHz.

Verificou-se que os gráficos obtidos experimentalmente diferem muito dos gráficos obtidos na primeira simulação.

Isto ocorre devido ao fato das propriedades dos materiais utilizados na construção do transdutor serem diferentes das propriedades dos materiais da simulação.

Além desse fato ocorreram problemas durante a montagem do transdutor que alteraram as dimensões da camada de matching, que é uma das características geométricas que mais influem no comportamento do transdutor.

O indutor utilizado no circuito foi de 19  $\mu$ H.

Devido a esses fatores acima citados decidiu-se adotar, para uma nova simulação, as seguintes propriedades mecânicas e geométricas para o material de backing:

- Material: composto de Alumina Alcoa APC-2011, Resina Ciba XR-1553 e Endurecedor Ciba HY-951 com 60% em massa de Alumina
- Densidade:  $2310 \text{ kg/m}^3$
- Velocidade de propagação: 4000 m/s

E para o material de matching:

- Material: Araldite Ciba Ultra Forte (Resina Epóxi e Endurecedor Poliaminoamida)
- Densidade:  $2100 \text{ kg/m}^3$
- Velocidade de propagação: 2240 m/s
- Espessura: 0.00035 m (0.35 mm)

E, assim, obteve-se o seguinte gráfico rodando-se uma nova simulação usando o programa TFImpult no MatLab® (vide anexo) para o mesmo caso da Figura 19

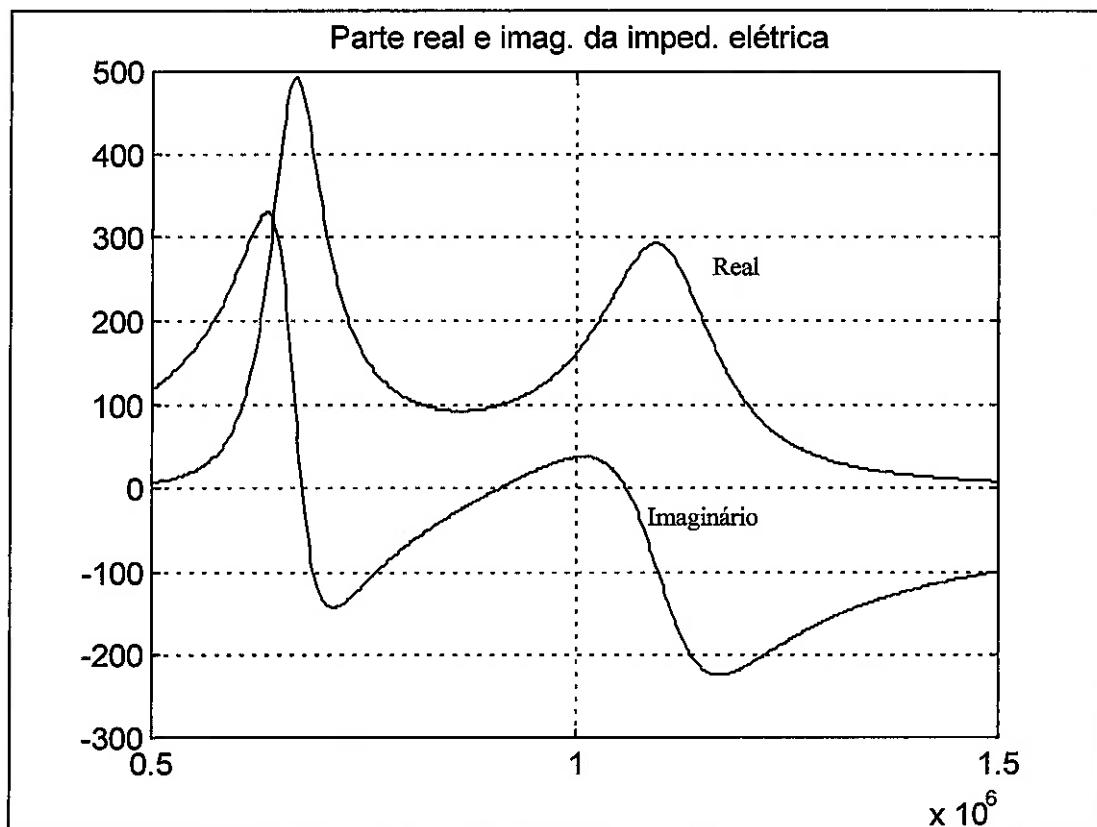


Figura 20 - Meio: Água com circuito do Indutor

Comparando-se os dois gráficos (Figura19 e Figura20) nota-se uma boa aproximação entre os mesmos, demonstrando que o modelo teórico utilizado para simular o comportamento da impedância é válido.

Após o teste das impedâncias utilizou-se o analisador ultra-sônico, o osciloscópio digital e o microcomputador para realizar a aquisição de dados e obteve-se o seguinte gráfico da forma de onda no osciloscópio:

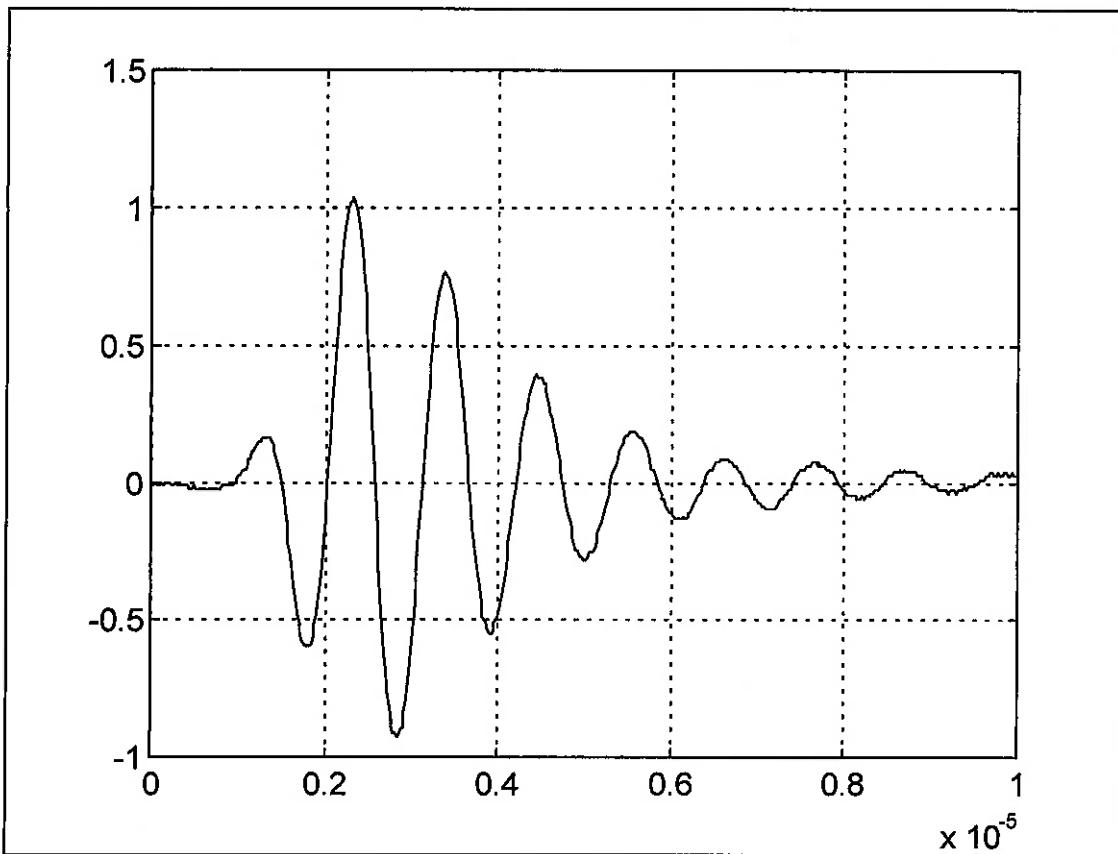


Figura 21 - Forma de Onda

Nota-se que, a forma da onda do pulso apresenta muitas oscilações, ou seja, o transdutor não amortece rapidamente e as ondas refletem-se no interior da cerâmica, apesar de indesejável, este efeito já era esperado pois com os materiais utilizados para a construção do protótipo e os problemas de geometria do matching, não se tem um casamento perfeito tanto na camada de backing, quanto na de matching.

Utilizando-se dos dados da forma da onda fez-se a transformada rápida de Fourier obtendo-se o seguinte gráfico:

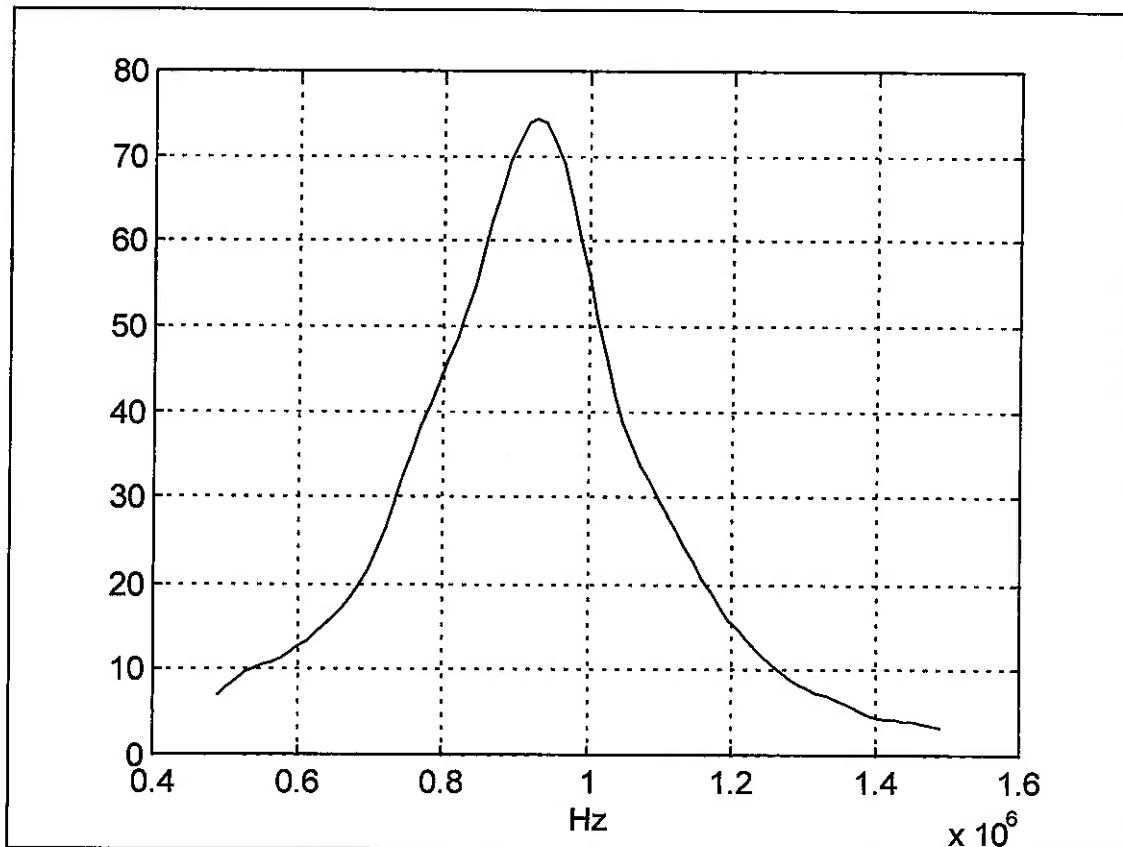


Figura 22 - FFT do sinal da figura 21

Do gráfico obtém-se a freqüência central de ressonância 927 KHz.

A largura de banda é de aproximadamente 30%.

## **7 Comentários e Conclusões**

Na primeira etapa deste trabalho foi realizada uma apresentação dos princípios e fundamentos teóricos necessários a compreensão do fenômeno piezoelétrico e dos transdutores.

Mostrou-se algumas técnicas de modelagem do transdutor adotando-se a formulação *chain matrix*, a qual se mostrou uma ferramenta muito útil para a obtenção de gráficos de impedância e para a análise do comportamento de um transdutor piezoelétrico.

O modelo *chain matrix* permite uma análise rápida se comparada com outros modelos como o Método dos Elementos Finitos e, além disso, ele trabalha com tanto parâmetros acústicos, como elétricos num mesmo equacionamento, o que é uma vantagem sobre os modelos que trabalham apenas com parâmetros elétricos, como o de Mason ou o KLM.

Fez-se, então, a modelagem e a simulação do transdutor, observando-se o comportamento da impedância elétrica a diferentes freqüências.

Após a modelagem e a simulação, foram feitas as várias considerações de projeto necessárias para a construção do transdutor.

Na segunda etapa foram realizadas a construção e os testes do protótipo do transdutor piezoelétrico.

Ocorreram problemas durante a fase de construção do protótipo alterando-se as características geométricas, elétricas e mecânicas simuladas. Por este motivo os resultados experimentais obtidos foram diferentes aos esperados.

Resolveu-se, então, ajustar os parâmetros geométricos, elétricos e mecânicos do protótipo construído e novamente realizar mais uma simulação, desta vez com esses novos valores e obteve-se resultados muito próximos aos experimentais.

Assim, validou-se o modelo *chain matrix*, adotado para simulação, que mostrou-se uma poderosa ferramenta na análise do comportamento e características físicas de transdutores piezoelétricos.

Os maiores benefícios decorrentes deste trabalho foram uma extensa revisão do modelo *chain matrix* e a descrição de como construir passo a passo um transdutor, que é um assunto pouco explorado e documentado.

Conclui-se que o trabalho foi um sucesso, apesar dos problemas construtivos encontrados.

Todos os objetivos propostos inicialmente foram plenamente atingidos.

## Anexo A - Função chain(en)

```

function [c]=chain(en)
%Rubens A. Sigelmann, June 12, 1995
%This program can be copied and/or modified provided that
%the source is acknowledged.
%chain calculates the elements of the chain forward matrix.
%Inverse chain matrix is obtained changing the length sign.
%The data is entered as shown below
%[en] is the matrix of entering data
%en(1,1)=area;
%en(1,2)=density;
%en(1,3)=propagation velocity;
%en(1,4)=length;
%en(1,5)=the relative dielectric constant;
%en(1,6)=piezoelectric constant e33;
%en(1,7)= frequency

c=zeros(4); %initialize the chain matrix, filling w/ zeros
eps=en(1,5)*8.854e-12; %converts to absolute dielectric constant
Z=en(1,1)*en(1,2)*en(1,3); %obtains the acoustic impedance
w=2*pi*en(1,7); %calculates the angular frequency
kl=w*en(1,4)/en(1,3);
a=cos(kl);
b=sin(kl);
if en(1,6)==0
    bt=0;
else
    bt=en(1,6)/(w*eps);
end
C=(eps*en(1,1)/en(1,4));

%Elements of the chain matrix:
c(1,1)=a;
c(1,2)=-j*Z*b;
c(1,4)=-j*bt*(1-a);
c(2,2)=a;
c(3,1)=-b*bt/Z;
c(3,2)=j*bt*(1-a);
if en(1,5)==0 %gives the right results for conductors
    c(3,4)=0;
else
    c(3,4)=-(1/(j*w*C)+(j*b*bt^2)/Z);
end
c(3,3)=1;
c(4,4)=1;
c(2,1)=-j*b/Z;
c(2,4)=bt*b/Z;

```

## Anexo B - Arquivo PZT.m

```

%matrix for piezoelectric material
e2(1,1)=pi*(0.010)^2; %area
e2(1,2)=7750; %density
e2(1,3)=4325; %longitudinal velocity
e2(1,4)=0.001441666667; %thickness
e2(1,5)=830; %relative dielectric constant
e2(1,6)=15.8; %piezoelectric constant
%e2(1,7); %frequency

```

## **Anexo C - Programa Impult.m**

```
%impult calculates the electrical impedance of a one-layer transducer.
%It makes use of the chain(e) function that obtains the chain matrix,
%when the e matrix, properties of the material is given
%Rubens A. Sigelmann, 1995

close all
clear all
clc

%matrix for piezoelectric material
e2(1,1)=pi*(0.010)^2; %area
e2(1,2)=7750; %density
e2(1,3)=4325; %longitudinal velocity
e2(1,4)=0.001441666667; %thickness
e2(1,5)=830; %relative dielectric constant
e2(1,6)=15.8; %piezoelectric constant e33
%e2(1,7)=; %frequency excitation

Z1=1.5e6;
Z2=0;
z1=e2(1,1)*Z1; %acoustical impedance of medium 1
z2=e2(1,1)*Z2; %acoustical impedance of medium 2

f0=e2(1,3)/(2*e2(1,4));
disp('the frequency of resonance is') ;f0
disp(' ')
f1=input('the starting frequency is      ');
f2=input('the ending frequency is      ');

m=500; %number of points between f1 and f2

s=(f2-f1)/m; %number of steps
for n=1:m; %number of points for the electric impedance
f(n)=f1+s*n;
e2(1,7)=f(n);
c=chain(e2);
A=[-z2 (c(1,2)-c(1,1)*z1) 0;-1 (c(2,2)-c(2,1)*z1) 0;0 (c(3,2)-c(3,1)*z1) 1];
b=[c(1,4); c(2,4); c(3,4)]; %excitation matrix
g=A\b;
z(n)=g(3,1);
end
figure(1)
plot(f,real(z),f,imag(z)),grid
title('Parte real e imag. da imped. eletrica')
figure(2)
plot(f,abs(z)),grid
title('Modulo da imped. eletrica')
```

## Anexo D - Programa TFImpult.m

```

%TFImpult calcula a impedância eletrica de um transdutor de uma-camada.
%Faz uso da função chain(e) que obtém a matriz de cadeia chain matrix, dada
%a matriz e de propriedades de material

close all
clear
clc

%matriz das propriedades do material piezoelétrico
e2(1,1)=pi*(0.010)^2; %área
e2(1,2)=7750; %densidade
e2(1,3)=4350; %velocidade longitudinal
e2(1,4)=0.002; %espessura
e2(1,5)=830; %constante dielétrica relativa
e2(1,6)=15.8; %constante piezoelétrica
%e2(1,7)= %freqüência

f0=e2(1,3)/(2*e2(1,4));
disp('A freqüência central é') ;f0
disp(' ')
f1=input('Digite a freqüência inicial      ');
f2=input('Digite a freqüência final      ');

%backing properties
%attenuation coefficient nepers/m at 5 Mhz
alpha1=250;
%thickness (m)
l1=0.025;
%propagation velocity (m/s)
vir=10520;
%density (Kg/m^3)
dens1=3860;

%matching layer properties
Zag=1.5e6; %impedância acústica característica da água
vm=2160; %velocidade de propagação no material de matching
dens2=2860; %densidade do material de matching
Zm=dens2*vm; %imp. acústica carac. do material de matching
l2=vm/(f0^4); %espessura do material de matching

m=500; %número de pontos entre f1 e f2

s=(f2-f1)/m; %número de passos

for n=1:m; %número de pontos para a impedância elétrica
    f(n)=f1+s*n;
    e2(1,7)=f(n); %freqüência

    %backing impedance
    %wave number
    k1(n)=(2*pi*e2(1,7)/vir)-j*alpha1*e2(1,7)/5e6;
    %velocidade complexa de propagação no material de backing
    vb=(2*pi*e2(1,7))/k1(n);
    %impedância acústica característica do material de backing
    Zb=dens1*vb;
    %cálculo da impedância acústica do meio 1
    k11=k1(n)*l1;
    z1(n)=j*e2(1,1)*Zb*tan(k11);

```

```

%matching impedance
k2=(2*pi*e2(1,7)/vm);
k12=k2*l2;
%z3(n)=-(Zag*cos(k12)-j*e2(1,1)*Zm*sin(k12))/...
%((-j*Zag*sin(k12)/e2(1,1)*Zm)+cos(k12));
R=(Zag-Zm)/(Zag+Zm);
au=exp(-4*pi*j*f(n)*l2/vm);
z2(n)=e2(1,1)*Zm*(1+R*au)/(1-R*au);

c=chain(e2);

A=[-z2(n) (c(1,2)-c(1,1)*z1(n)) 0; -1 (c(2,2)-c(2,1)*z1(n)) 0;...
0 (c(3,2)-c(3,1)*z1(n)) 1];
b=[-c(1,4); c(2,4); c(3,4)]; %matriz de excitação
g=A\b;

%Indutor
Indut=22e-6;

%Cálculo da Impedância
z(n)=g(3,1);
%Sem Indutor
%zt(n)=z(n);
%Indutor em paralelo

zt(n)=(g(3,1)*j*2*pi*e2(1,7)*Indut)/(g(3,1)+j*2*pi*e2(1,7)*Indut);

v1(n)=g(2,1);
v2(n)=g(1,1);
pwr1(n)=real(z1(n))*abs(v1(n))^2;
pwr2(n)=real(z2(n))*abs(v2(n))^2;

end

figure(1)
plot(f,real(zt),'r-',f,imag(zt),'g-'),grid
title('Parte real e imag. da imped. elétrica')
figure(2)
plot(f,abs(zt)),grid
title('Modulo da imped. eletrica')

```

### Anexo E - Programa TFImpx.m

```

%TFImpx calcula as potencias total, util, perdida e a eficiencia
%Primeiro é necessário rodar TFimpult

Vi=10;
Ri=50;
for n=1:m; %number of points for the electric impedance
    f(n)=f1+s*n;
    zL(n)=j*2*pi*f(n)*Indut;
    x(n)=(zL(n)*Vi)/(zL(n)*z(n)+zL(n)*Ri+Ri*z(n));
    It(n)=x(n)+z(n)*x(n)/zL(n);
    PotEnt(n)=real(zt(n)*It(n)*conj(It(n)));
    Pot1(n)=real(z1(n))*abs(x(n)*v1(n))^2;
    Pot2(n)=real(z2(n))*abs(x(n)*v2(n))^2;
    Efic(n)=Pot2(n)/PotEnt(n);
    y(n)=PotEnt(n)-(Pot1(n)+Pot2(n));
end

figure
.
```

```
plot(f,PotEnt),grid
title('Potência Total de Entrada')
figure
plot(f,Pot1+Pot2),grid
title('Pot Total = Pot1+Pot2')
figure
plot(f,Pot1),grid
title('Pot Perd = Pot1')
figure
plot(f,Pot2),grid
title('Pot Util = Pot2')
figure
plot(f,100*Efic),grid
title('Eficiência(%)')
```

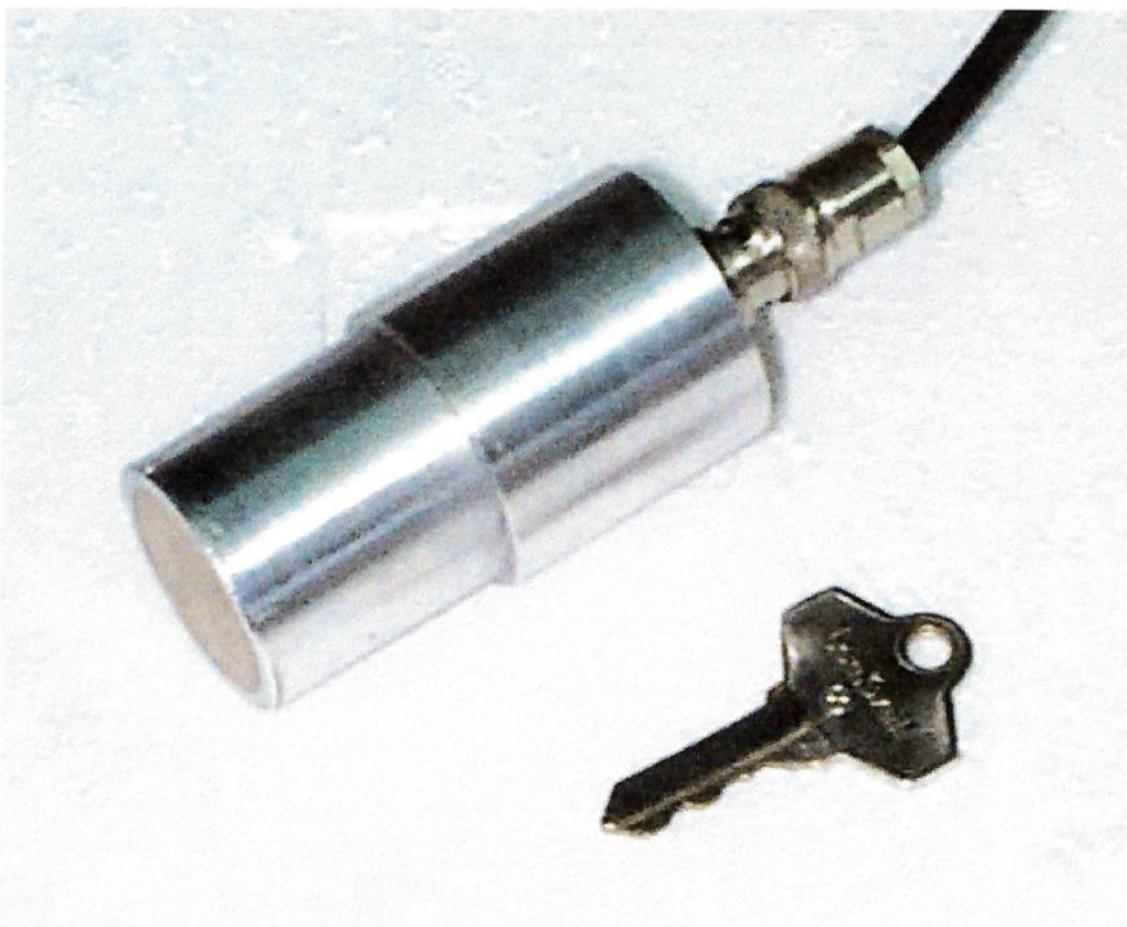
**Referências Bibliográficas**

- BUIOCHI, F., Chain Matrix, Notas de Aula, EPUSP, São Paulo, 1996
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A., Piezoelectric Ceramics and Ultrasonic Transducers, Review Article, IOP Publishing Ltd., 1989
- KB-AEROTECH, Aero-Tech Reports Ultrasonic Transducer Performance Parameters, Vols. I a VII, Kraukramer-Branson Inc., Pennsylvania, 1979
- KINSLER, L. E., FREY, A. R., Fundamentals of Acoustics, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 1962
- KINO, Design of Broad Band Transducers, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, Vol SU-25, n.3, May (1978a) pp 115-125
- KRAUTKRÄMER, J. and KRAUTKRÄMER, H., Ultrasonic Testing of Materials, 4th Edition, Springer-Verlag, New York, 1990
- KRASZEWSKI, R. J., SIGELMANN and R. A., HERBERTZ, J., Electrical Multiport Functions and Efficiency in Layered Media of Piezoelectric and / or Nonpiezoelectric Materials, J. Acoustic. Soc. Am., vol. 90, pp. 2769-2774, Nov. 1991
- MEDINA, L. A. H., Projeto e Construção de um Transdutor Ultra-sônico Multicamadas para o Regime Pulsátil, Tese de Mestrado, COPPE / UFRJ, Engenharia Biomédica, Rio de Janeiro, 1989
- SIGELMANN, R. A., Piezoelectric Transducers - Chain Matrix Formulation, São Paulo, 1995

**Internet Links**

- Transdutores - <http://www.panametrics.com/ndt/transducers/index.shtml>
- Ensaios Não-Destrutivos - <http://www.ndt.net/>
- Tabelas de Propriedades - <http://www.ultrasonic.com/Tables/index.htm>

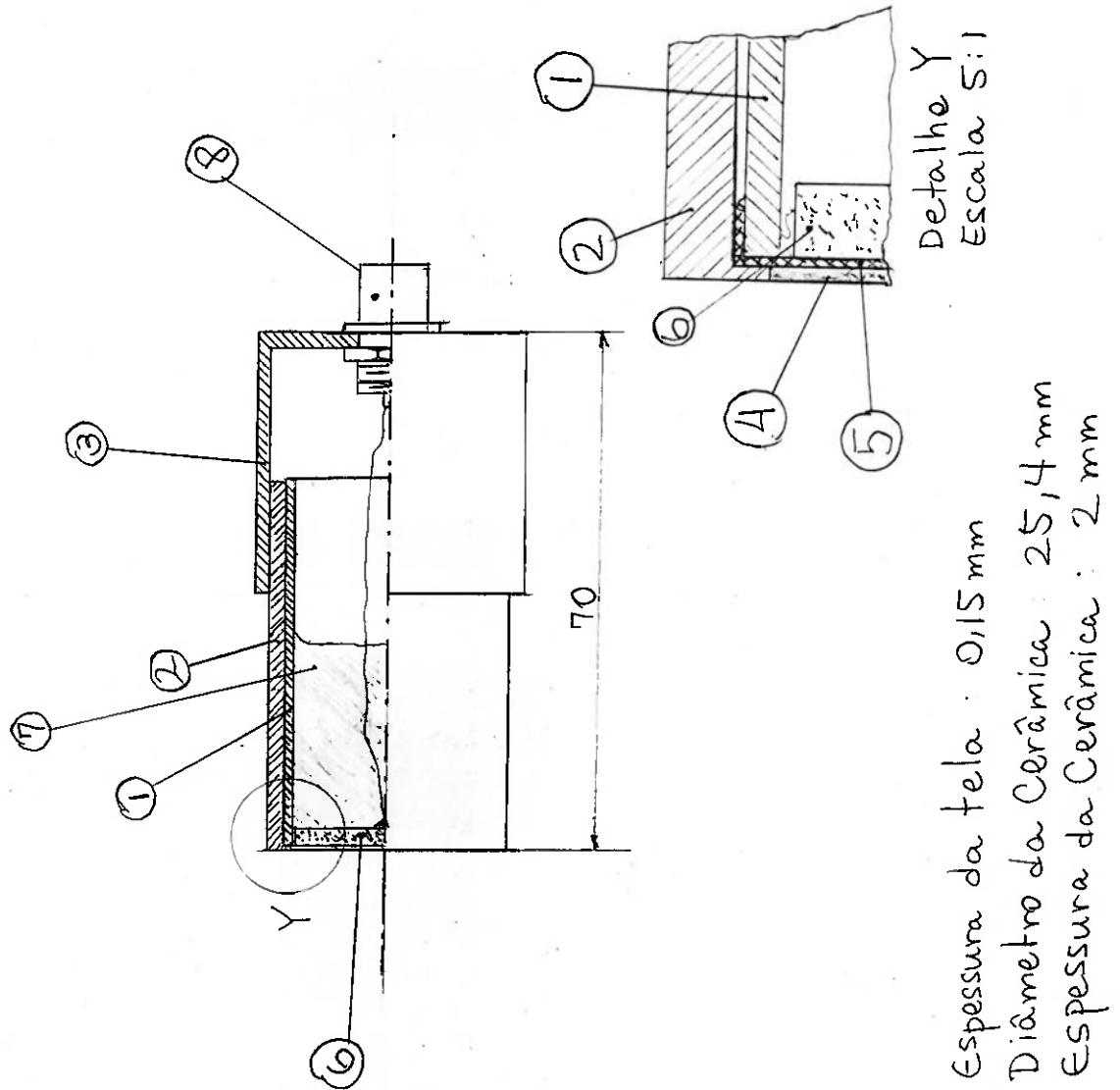
**Fotografia do Protótipo Construído**

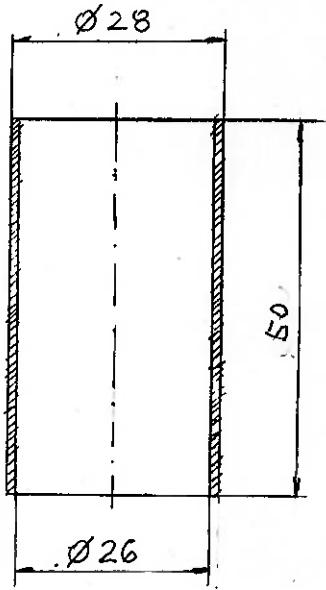


Fotografia do transdutor - Foi colocada uma chave para efeitos de comparação.

## **Desenhos de Conjunto e Fabricação**

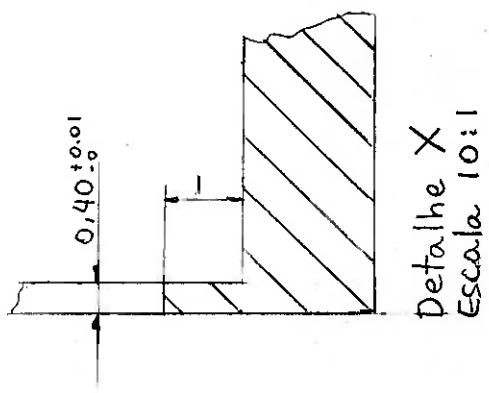
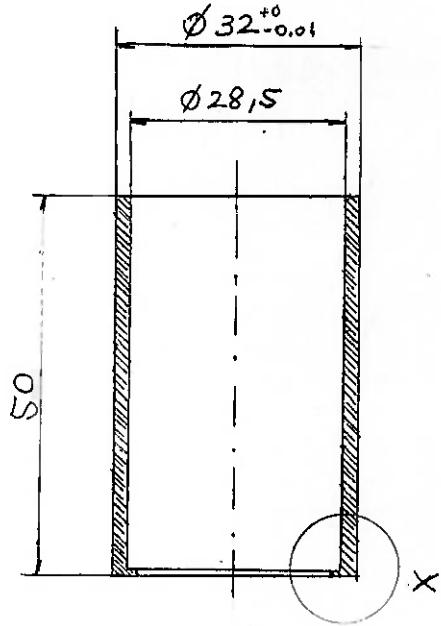
8	Conector BNC - Standard	1	Painel
7	Camada de Backing	1	Alumina + Resina
6	Cerâmica Piezoeletrica	1	PT5A
5	Tela de Metal	1	Cobre
4	Camada de Matching	1	Epoxi
3	Capa de Proteção	1	Alumínio
2	Corpo	1	Alumínio
1	Armadura	1	Cobre
Pos.		Discriminação	
No. USP:		Nome:	
2956990		Fabio Minoru Shikata	
Disciplina:		Orientador:	
PMC-581 Projeto Mecânico II		Flávio Burochi	
Escala:		Data:	
1 : 1		19 / 11 / 97	





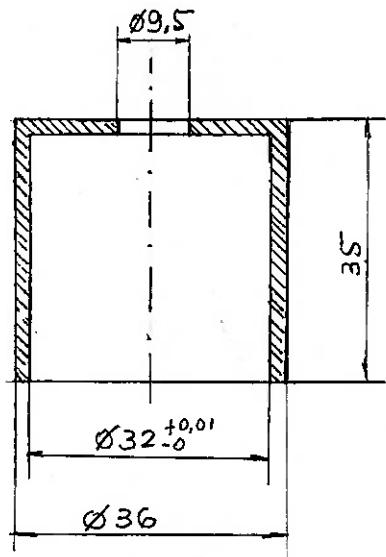
Tol. Geral:  $\pm 0,1$   
 Material: Cobre  
 Quantidade: 1 Peça

No. USP	Nome:	orientador
2956990	Fabio Minoru Shikata	Flávio Buiachi
Disciplina:	Projeto Mecânico II	EPUSP
PMC-581		
Escala:	Titulo:	Data:
1 : 1	Peça I - Armadura	20/11/97



Tol. Geral :  $\pm 0,1$   
 Material : Alumínio  
 Quantidade : 1 Peça

No. USP	Nome:	orientador
2956930	Fábio Minoru Shikata	Flávio Buióchi
Disciplina:	PMC - 581	Projeto Mecânico II
Escala	Título:	EPUSP
1 : 1	Peça 2 - Corpo	Data 20/11/97



Tol. Geral:  $\pm 0,1$   
 Material: Alumínio  
 Quantidade: 1 peça

No. USP	Nome:	orientador: Flávio Buiocchi
2956990	Fábio Minoru Shikata	
Disciplina:	PMC-S81 Projeto Mecânico I	EPUSP
Escala	Título:	Data:
1 : 1	Peça 3 - Capa de Prot	21/11/97