



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Diseño, construcción y caracterización de un  
transductor ultrasónico angulado para aplicaciones  
médicas.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO**  
(ÁREA: INGENIERÍA BIOMÉDICA)

PRESENTA:

**AMADO ZAMORA VÁZQUEZ**



DIRECTOR DE TESIS: DR. PEDRO ACEVEDO CONTLA  
CODIRECTOR: M. C. ISRAEL SÁNCHEZ DOMÍNGUEZ



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Agradecimientos

*Al creador por hacerlo todo posible.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México y a sus profesores, por la formación profesional que me han brindado, y por mi desarrollo intelectual y físico.*

*A la Facultad de Ingeniería – UNAM*

*Al Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS), así como al Departamento de Ingeniería de Sistemas Computacionales y Automatización (DISCA), por las facilidades prestadas para la realización de este trabajo de tesis.*

*Al proyecto PAPIIT-1N113610, por el apoyo otorgado para la realización del presente trabajo.*

*Al Dr. Pedro Acevedo Contla por su apoyo y confianza para el desarrollo de este trabajo.*

*Al Ing. Fernando Molina y al Sr. Víctor Díaz del Instituto de Investigaciones en Materiales, por su asesoría y apoyo en la construcción de las piezas necesarias para este trabajo.*

*Al Dr. Lorenzo Leija Salas y al M. en C. Rubén Pérez Valladares del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional, por las facilidades otorgadas para la realización de las pruebas del dispositivo que se construyó.*

*Al Ing. Eliseo Díaz Nácar y a la Dra. Mónica Vázquez Hernández, por sus ideas y sugerencias para la realización de este trabajo.*

*Al Ing. Martín Fuentes Cruz por su colaboración y apoyo en las pruebas del dispositivo.*

*Y especialmente al M. en C. Israel Sánchez Domínguez por dirigirme en esta tesis, en donde me brindó asesoría, apoyo, paciencia, tiempo y su amistad.*

*Y a todos mis amigos del DISCA-IIMAS, Facultad de Ingeniería y Preparatoria 5-UNAM, compañeros de Atletismo Universitario y todas aquellas personas que me orientaron a lo largo de mi carrera.*

*Dedico la presente tesis a mi madre por su amor, apoyo, paciencia, comprensión y por enseñarme a caminar por la vida; a mi padre por enseñarme a ser perseverante; a mis hermanos por su apoyo incondicional; y especialmente a Alondrita por ser mi inspiración, por su paciencia, amor, tolerancia, por estar conmigo en mis éxitos y en mis fracasos, y por enseñarme a ser mejor persona.*

## Corredor de las Áridas Arenas (4 de Agosto de 1982)

El Rey quiere pescado en desayuno  
y ordenó al pueblo llevarlo a su casa.  
Nadie se ofreció traer uno a la mesa.  
Desde entonces permanece en ayuno.  
Hubo alguien que estuvo de si seguro  
vástago atlante de la antigua raza  
la liebre veloz logra darle caza  
de sus pies y piernas sentía orgullo  
Tirano que sembró nunca algún fruto  
a su gente no enseñó a pescar nada  
y olvidó<sup>o</sup>1 prevenir para el futuro.  
Atleta que vino desde la playa  
tu fama en estas palabras intuyo  
hasta el desierto entregaste tu carga.  
¡Deja que a tu lado marche en honor!

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	6
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	8
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>CONCEPTOS FUNDAMENTALES</b>	
I.1. Introducción e historia	9
I.2. Elementos piezoeléctricos	11
I.2.1 Propiedades piezoeléctricas	13
I.2.2 Materiales piezoeléctricos	15
I.2.3 Modos y vibración de elementos piezoeléctricos	17
I.2.4 Aplicaciones	18
I.3. Transductores	19
I.3.1. Introducción	19
I.3.2. Transductor ultrasónico	19
I.4. Ultrasonido. Conceptos básicos	21
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN</b>	
II.1. Diseño	25
II.1.1. Cerámica piezoeléctrica	25
II.1.2. Carcasa	29
II.1.2.1 Ángulo	30
II.1.3. Material de acoplamiento acústico (Matching)	33
II.1.4. Material absorbente (Backing)	33
II.1.5. Esquema de diseño	34
II.1.6. Planos de construcción del transductor ultrasónico angulado	35
II.2. Construcción	38
II.2.1. Pegado de la cerámica en el tubo de plástico	38
II.2.2. Unión de alambres con cable coaxial	40
II.2.3. Rexolite	40

II.2.3.1 Cálculo del espesor del “matching layer”	41
II.2.4. Carcasa y soporte para el rexolite	42
II.2.5. Pegado de la capa de rexolite	43
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS</b>	
III.1. Modelo Teórico	46
III.2. Caracterización de los transductores	48
III.2.1. Impedancia del transductor con los electrodos soldados	48
III.2.2. Impedancia del transductor con los electrodos pegados con Epoxi	49
III.3. Construcción del transductor sin “matching”	50
III.4. Caracterización del transductor sin “matching”	51
III.4.1. Prueba de barrido de frecuencia utilizando generador de funciones	52
III.4.2. Impedancia del transductor sin “Matching”	54
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>CONCLUSIONES</b>	56
<b>ANEXOS</b>	
Anexo A. Especificaciones de la cerámica	59
Anexo B. Especificaciones del Epoxi Conductor	65
Anexo C. Especificaciones del Rexolite 1422	67
Anexo D. Características del Cianocrilato	68
<b>REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA</b>	69

# INTRODUCCIÓN

Dentro de las líneas de investigación del Departamento de Ingeniería de Sistemas Computacionales y Automatización (DISCA) del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IIMAS) de la UNAM, se encuentran las de Imagenología Ultrasónica y Procesamiento de Señales e Imágenes. Existen proyectos relacionados con estas líneas donde se diseñan e implementan sistemas que permiten procesar señales ultrasónicas, siendo el diseño y construcción de transductores ultrasónicos un elemento principal para la generación y adquisición de este tipo de señales.

El objetivo principal de la presente tesis fue diseñar, construir y caracterizar un transductor ultrasónico con ángulo incluido para aplicaciones médicas, así como determinar su desempeño para dichas aplicaciones.

En la investigación que se realizó se descubrió que era necesario mejorar el proceso de soldadura en el elemento activo del transductor (cerámica), debido a que mientras el punto de contacto de los electrodos y la cerámica sea menor, habrá una mayor transferencia de energía entre la cerámica y el medio de propagación y también reduce las variaciones en cuanto a la frecuencia de operación; de la misma manera era necesario mejorar la forma de construir el cuerpo del transductor y principalmente incluir un ángulo interno.

La necesidad de que el transductor sea angulado, se debe principalmente a ocupar el menor espacio posible durante su utilización y facilitar la adquisición de señales ultrasónicas, ya que al ser un transductor recto con ángulo incluido es más sencillo de manipular al momento de hacer la adquisición.

En este trabajo se probó un nuevo material para acoplamiento (Rexolite). Este nuevo material presenta como principal característica su impedancia acústica similar a la del agua, lo que lo hace ideal para ser utilizado en esta aplicación; sin embargo, es de vital importancia mejorar la técnica de pegado de este material al transductor, ya que el mal pegado provoca fracturas en la cerámica piezoeléctrica.

El presente trabajo está dividido en 4 capítulos, cuyo contenido es el siguiente:

**Capítulo I. Conceptos Fundamentales.-** Se da una breve explicación sobre los elementos piezoeléctricos y transductores, así como sus aplicaciones, y también se dan a conocer algunos conceptos básicos del ultrasonido.

**Capítulo II. Diseño y construcción.-** Es la parte central de la tesis, ya que se describe la metodología utilizada para diseñar el transductor ultrasónico angulado, y se analizan las alternativas para su construcción, además se explica paso a paso el proceso de ésta construcción.

**Capítulo III. Pruebas y Resultados.-** Se describen las pruebas que se le hicieron al transductor, una vez finalizada su construcción, para determinar su desempeño, con el fin de comprobar que se cumplió con el objetivo planteado.

#### **Capítulo IV. Conclusiones.**

Además de estos capítulos hay algunos apartados que se enumeran a continuación:

**Anexos.** En este apartado se presentan las especificaciones de los equipos utilizados para la construcción del transductor, así como las especificaciones de cada material utilizado.

#### **Referencias y Bibliografía**



## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\sigma$  = Presión (stress)
- $\epsilon$  = Deformación (strain)
- $Y$  = Módulo de Young (o de elasticidad)
- $D$  = Desplazamiento eléctrico
- $d$  = Coeficiente piezoeléctrico (o coeficiente de transmisión)
- $E$  = Campo Eléctrico
- $Q$  = Carga
- $A$  = Área
- $g$  = Coeficiente piezoeléctrico de recepción
- $k$  = Permitividad eléctrica en el medio
- $k_0$  = Permitividad eléctrica en el vacío
- $k_0'$  = Permitividad relativa (constante dieléctrica)
- $e$  = Coeficiente piezoeléctrico de esfuerzo
- $k$  = Factor de acoplamiento electromecánico
- $T$  = Periodo
- $f$  = Frecuencia
- $A_0$  = Amplitud
- $\lambda$  = Longitud de onda
- $c$  = Velocidad del sonido en el medio
- $\theta$  = Ángulo de exploración

## CAPÍTULO I

# CONCEPTOS FUNDAMENTALES

## I.1. Introducción e historia

La palabra "*piezo*" se deriva del griego que significa "presionar" o "presionar" y el efecto piezoeléctrico es la producción de electricidad mediante la presión. Un material piezoeléctrico es aquel que produce una carga eléctrica cuando una tensión mecánica es aplicada sobre él (el material es presionado o estirado). Por el contrario se produce una deformación mecánica (el material se expande o se contrae) cuando se le aplica una tensión eléctrica.

El efecto piezoeléctrico fue descubierto en 1880 por los hermanos Jacques y Pierre Curie [1]. Sus experimentos consistieron en la medición de cargas que aparecen en las superficies de los cristales especialmente preparados (entre ellos cuarzo, Topacio, sales de Rochelle, azúcar de caña y Turmalina) los cuales fueron sujetos a tensiones mecánicas.

Jacques y Pierre Curie no predijeron que los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico directo (estrés mecánico produce cargas eléctricas) mostraran también un efecto piezoeléctrico inverso (campo eléctrico produce tensión mecánica). Esta propiedad fue deducida matemáticamente utilizando principios termodinámicos fundamentales por Gabriel Lippman en 1881. Ante esto los hermanos Curie inmediatamente comprobaron experimentalmente la existencia del "efecto inverso" y continuaron hasta obtener pruebas cuantitativas de la reversibilidad completa de las deformaciones electro-elástico-mecánicas de los cristales piezoeléctricos.

Durante los años siguientes la comunidad científica europea continuó las investigaciones para las aplicaciones piezoeléctricas en la ciencia y establecieron la identificación de cristales piezoeléctricos en base a las estructuras asimétricas de los cristales y el cambio reversible de la energía eléctrica y mecánica y la utilidad de la termodinámica en cuantificar relaciones entre las variables mecánicas, térmicas y eléctricas. Muchos trabajos fueron realizados hasta que en 1910 Woldemar Voigt publicó su libro "Lehrbuch der Kristallphysik" (libro de textos en la física cristalina) que se convirtió en un estándar de referencia sobre todo lo relacionado sobre este tema hasta entonces.

La primera aplicación seria de dispositivos piezoeléctricos tuvo lugar durante la Primera Guerra Mundial. En Francia en 1917 Paul Langevin y sus compañeros de trabajo desarrollaron un detector ultrasónico de submarinos. Su transductor consistía de láminas delgadas de cuarzo pegadas entre dos placas de acero y montadas en un soporte para inmersión; el compuesto tenía una frecuencia de resonancia de 50 kHz. Este transductor emite un haz ultrasónico que se refleja en un objeto, la distancia de ese objeto se puede calcular si se conoce la velocidad del ultrasonido y el tiempo transcurrido. Desde esa época, no ha cesado el desarrollo de estos transductores [1].

El desarrollo de los transductores ultrasónicos permitió determinar fácilmente la viscosidad y elasticidad en líquidos y sólidos, dando como resultado avances enormes en la investigación de los materiales. Otra aplicación es que se podían encontrar fallas en el interior de objetos hechos de metal y de piedra, asegurando su seguridad estructural [2].

Durante la Segunda Guerra Mundial, grupos de investigación independientes en Estados Unidos, Unión Soviética y Japón descubrieron una nueva clase de materiales artificiales llamados ferroeléctricos que exhibieron constantes piezoeléctricas mucho más altas que las de los cristales naturales. Esto condujo a una investigación intensa para convertirse en Titanato de Bario ( $\text{BaTiO}_3$ ) y más adelante en Zirconato Titanato de Plomo (PZT). El principal cambio de ésta época fue que se empezaron a desarrollar materiales piezoeléctricos, y así ya no se desarrollaban tecnologías en función de los materiales disponibles, sino que se desarrollaban materiales en función de lo que se necesitaba. Pero este desarrollo en guerra hizo que los investigadores se acostumbraran a trabajar de forma “secreta”, así en la época post guerra en Estados Unidos las empresas desarrollaban por separado y el conocimiento no era compartido.

Por otro lado en Japón a diferencia de Estados Unidos, varias compañías y universidades se habían asociado en 1951 en el “Barium Titanate Application Research Committee”. Así entre 1965 y 1980 en Japón el desarrollo de nuevos conocimientos, nuevos procesos y nuevas tecnologías fue mucho mayor que en el resto del mundo, donde se podía decir que las tecnologías piezoeléctricas estaban en receso [3].

Los materiales cerámicos presentan una serie de ventajas sobre los cristales, los cuales deben ser cortados a lo largo de ciertas direcciones cristalográficas, limitando las formas geométricas posibles. Además de presentar una gran facilidad de fabricación y diversidad de formas y tamaños, los materiales cerámicos también presentan mayor sensibilidad (hasta cientos de veces mayor). Es importante notar que la excitación (volts/cm) requerida para una cerámica de Zirconato Titanato de Plomo (PZT) es cerca de dos veces menor que la requerida para el cuarzo.

La cerámica PZT, con una sensibilidad mayor y una temperatura de funcionamiento más alta, pronto sustituyó al  $\text{BaTiO}_3$  en muchos de los dispositivos existentes.

Después de 1980 el mundo vio como la industria japonesa obtuvo grandes progresos piezoeléctricos llevando al desarrollo de aplicaciones hoy comúnmente encontradas como por ejemplo los nuevos diseños de filtros piezocerámicos usados en las radios y las televisiones, transductores ultrasónicos, y desde ahí hasta hoy en día la cantidad de investigación en muchas partes del mundo ha aumentado y se sigue buscando un mejor material piezoeléctrico.

En la actualidad están dando los primeros pasos para crear materiales piezoeléctricos de forma artificial, se pretende diseñar materiales desde cero y así combinar las mejores cualidades de las cerámicas con la de los polímeros, usando ciertos efectos a nanoescala, lo que les proporciona mayor conversión de energía [4].

## **I.2. Elementos piezoeléctricos**

Para que la materia presente la propiedad de la piezoelectricidad debe cristalizar en sistemas que no tengan centro de simetría. Los gases, los líquidos y los sólidos con simetría no poseen piezoelectricidad.

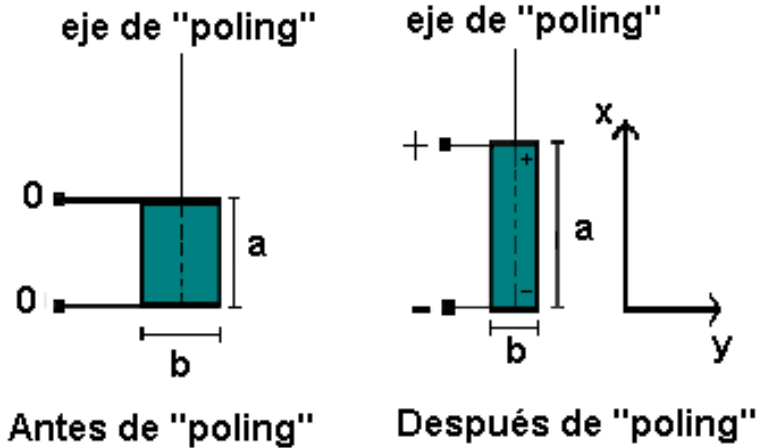
Debido a las ventajas mencionadas anteriormente, los materiales más usados son los elementos piezoeléctricos de tipo cerámico. En comparación a los cristales, las cerámicas presentan propiedades más favorables para la generación de energía acústica en la banda de ultrasonido, entre ellas, mayores factores de conversión electromecánica, además de presentar facilidad de manufactura en una variedad de formas y tamaños.

Las cerámicas piezoeléctricas están constituidas por varios cristales (granos) originados en una reacción en fase sólida de distintos óxidos, siguiendo un tratamiento a alta temperatura. Cada cristal cuenta con dominios (regiones dentro de cada cristal en que los dipolos eléctricos tienen un sentido común). Estos dominios se orientan aleatoriamente, de forma que el dipolo eléctrico resultante es cero haciendo que la cerámica no exhiba propiedades piezoeléctricas. De esta forma, en su estado primitivo la cerámica es isotrópica (las magnitudes vectoriales medibles dan resultados idénticos independientemente de la dirección escogida para la medida) y no piezoeléctrica, en virtud de la distribución aleatoria y de la estructura de sus dominios.

El tratamiento para hacer piezoeléctrica una cerámica es la aplicación de un campo eléctrico constante de muy alta intensidad en la dirección elegida. A este proceso de polarización se le llama "poling". El procedimiento es necesario porque al ser manufacturado, inicialmente el material piezoeléctrico tiene los polos de sus cristales arreglados en forma aleatoria. En estas condiciones, tienden a anularse unos con otros, y mayormente no responden a las características mencionadas previamente. Para que esto ocurra, los polos de los cristales deben estar permanentemente alineados unos con otros, en un proceso de alineamiento o polarización.

Una característica de los materiales piezoeléctricos es que poseen una temperatura de Curie, esto permite que al someter el material a una temperatura mayor, los polos de los cristales pueden cambiar de orientación estando el material dentro de su fase sólida.

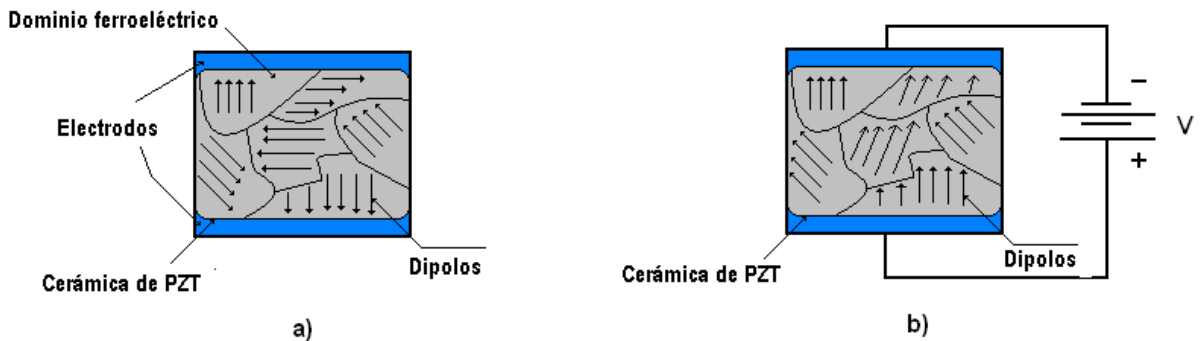
El proceso de "poling" cambia permanentemente las dimensiones de un elemento cerámico. Las dimensiones entre los electrodos del "poling" (x) aumentan, y las direcciones paralelas (y) a los electrodos disminuyen. Las dimensiones entre los electrodos del "poling" (longitud a) es llamada la línea central del "poling", como se representa en la figura 1.1.



**Figura 1.1.** Deformación permanente de una cerámica piezoeléctrica antes y después de la polarización.

Existen materiales PZT duros, cuya temperatura de Curie está por encima de 300°C. Son difíciles de polarizar, excepto a temperaturas elevadas [5]. Los materiales PZT blandos tienen bajas temperaturas de Curie, por debajo de los 200°C. Pueden ser polarizados a temperaturas ambientales con campos eléctricos fuertes. Estando el material piezoeléctrico por encima de su temperatura de Curie, se le aplica un fuerte campo eléctrico, que obliga al alineamiento de los polos [5]. Manteniendo el campo eléctrico, se enfría consiguiendo que la polarización se conserve. Se dice entonces que el material está polarizado.

Cada molécula del material tiene una polarización, es más negativo en un extremo y el otro extremo está cargado positivamente, esto se llama dipolo [6]. Durante el tratamiento en un campo eléctrico (poling) los dipolos en los dominios se alinean en una dirección preferencial de campo y permanecen en esta nueva posición después de que el campo es retirado. La figura 1.2 presenta como sería la polarización de un material cerámico, así como el giro de sus ejes polares.



**Figura 1.2.** Diagrama de una cerámica piezoeléctrica mostrando dominios y dipolos. En a) la cerámica está sin polarizar y en b) la misma cerámica polarizada, nótese que los dipolos tienden a alinearse en sentido del flujo eléctrico.

### 1.2.1. Propiedades piezoeléctricas

Las propiedades piezoeléctricas se describen por un sistema de símbolos y notaciones, y algunas de estas se describen enseguida.

Una fuerza externa aplicada a un sólido (stress) provoca una deformación proporcional (strain) , relacionada por el módulo de elasticidad (o módulo de Young)  $Y$  [7].

$$\sigma = Y \epsilon \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde:

$$[\sigma]_u = \text{N} / \text{m}^2, \quad [Y]_u = \text{N} / \text{m}^2, \quad [\epsilon]_u = \text{m} / \text{m}$$

La piezoelectricidad corresponde a la generación de una carga eléctrica en respuesta a una presión aplicada. Este efecto es llamado efecto directo o efecto piezoeléctrico motor, en donde la carga es proporcional a la presión aplicada [8].

En términos de desplazamiento eléctrico  $D$  (carga en cada unidad de área) [9] y de presión  $\sigma$ , se puede escribir la siguiente relación:

$$D = \frac{Q}{A} = d \sigma \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde  $d$  es una constante de proporcionalidad expresada en carga (coulomb) en cada unidad de fuerza (newton).

Cuando se le aplica un campo eléctrico, un material piezoeléctrico muestra el desarrollo de una deformación. Esto se conoce como el efecto inverso o efecto piezoeléctrico generador [8]. La deformación puede ser de extensión o de contracción dependiendo de la polarización del campo aplicado.

La constante “ $d$ ” de un material piezoeléctrico se define como la relación de la deformación con el campo eléctrico  $E$  [8].

$$\epsilon = d E \quad \text{Ec. (3)}$$

La constante de proporcionalidad que aparece en las dos ecuaciones anteriores es la misma, siendo llamado el coeficiente piezoeléctrico  $d$ , la cual es numéricamente idéntica para ambos efectos, el efecto piezoeléctrico directo (o motor) e inverso (o generador).

$$d = \frac{D}{E} = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Ec. (4)}$$

donde  $E$  es el campo eléctrico ( $V / m$ ),  $D$  es el desplazamiento eléctrico ( $\text{coulomb} / \text{m}^2$ ),  $\sigma$  es la presión aplicada y  $\epsilon$  es la deformación.

Son deseados valores elevados del coeficiente piezoeléctrico  $d$  en materiales destinados a desarrollar movimientos de vibración, como en el caso de los transductores ultrasónicos. El coeficiente  $d$  también se llama coeficiente de transmisión.

La constante  $g$  de un material piezoeléctrico, proporciona un valor producido en el sólido como respuesta a una presión externa. Esta constante puede ser relacionada con  $d$  de la siguiente forma:

$$g = \frac{d}{k} = d / (k' k_0) \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde  $k$ ,  $k_0$  y  $k'$  son las permitividades eléctricas en el medio, en vacío y relativa respectivamente. La permitividad relativa también se llama constante dieléctrica [8].

También se desea que los valores del coeficiente  $g$  sean altos en materiales destinados a generar diferencia de potencial en respuesta a una tensión mecánica. Por eso  $g$  también es conocido como coeficiente piezoeléctrico de recepción.

Constantes piezoeléctricas adicionales como  $e$ , que relacionan la presión  $\sigma$  con el campo eléctrico  $E$  y  $h$ , relacionando la deformación  $\epsilon$  con el campo eléctrico  $E$  son empleadas solo en ocasiones específicas.

$$\sigma = -eE \quad \text{Ec. (6)}$$

$$E = -h\epsilon \quad \text{Ec. (7)}$$

Las constantes piezoeléctricas pueden ser definidas como derivadas parciales, asumiendo presión constante  $T$  (libre), campo eléctrico  $E$  constante (circuito corto), desplazamiento eléctrico constante  $D$  (circuito abierto) y deformación constante  $\epsilon$  (fijo) [10].

$$d = (\partial \epsilon / \partial \sigma)_T = (\partial D / \partial \sigma)_E \quad \text{Ec. (8)}$$

$$g = (-\partial E / \partial \sigma)_D = (\partial \epsilon / \partial D)_\sigma \quad \text{Ec. (9)}$$

$$e = (-\partial \sigma / \partial E)_\epsilon = (\partial D / \partial \epsilon)_E \quad \text{Ec. (10)}$$

$$h = (-\partial \sigma / \partial D)_\epsilon = (-\partial E / \partial \epsilon)_D \quad \text{Ec. (11)}$$

Existe también otra medida física que caracteriza a un material piezoeléctrico, la cual es llamada factor de acoplamiento electromecánico  $k$ . Este factor corresponde a una fracción de la energía total que es convertida en energía mecánica y viceversa [11] [15].

$$k^2 = (\text{Energía eléctrica convertida a mecánica}) / (\text{Energía eléctrica total aplicada}) \quad \text{Ec. (12)}$$

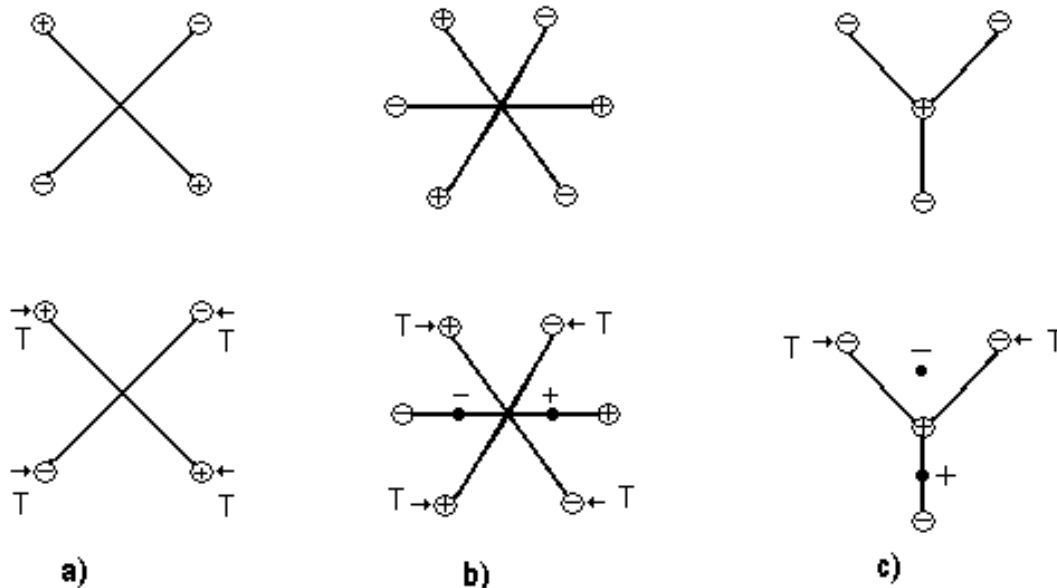
$$k^2 = (\text{Energía mecánica convertida a eléctrica}) / (\text{Energía mecánica total aplicada}) \quad \text{Ec. (13)}$$

Como la conversión de la energía mecánica a energía eléctrica es siempre incompleta  $k^2$  es siempre menor a 1, y en consecuencia  $k$  es menor de 1.

Para cerámicas y cristales, las constantes elásticas, dieléctricas y piezoeléctricas pueden diferir a lo largo de diferentes direcciones.

## I.2.2. Materiales piezoeléctricos

Todos los materiales piezoeléctricos son necesariamente anisótropos [12]. En la figura 1.3 se muestra porqué debe ser así. En el caso (a) hay simetría central, y al aplicar un esfuerzo no aparece polarización eléctrica. En el caso (b), en cambio, aparece una polarización paralela al esfuerzo, mientras que en el caso (c) aparece una polarización en dirección perpendicular al esfuerzo.



**Figura 1.3.** Efectos de un esfuerzo mecánico en diferentes moléculas según su simetría [12]. a) si hay simetría central no se produce polarización. b) Polarización paralela al esfuerzo. c) Polarización perpendicular al esfuerzo.

Desde su descubrimiento por los hermanos Curie, los materiales piezoeléctricos se han podido clasificar en:

- Materiales de cristales simples
- Materiales policristalinos
- Materiales cerámicos
- Materiales Polímeros.

Existen muchos tipos de materiales piezoeléctricos, que son apenas mencionados en este trabajo, ya que nuestro interés se limita a las cerámicas del tipo PZT (Zirconato Titanato de Plomo). Tales son:

- Sal de Rochelle ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), fue el primer cristal conocido.
- Selenite de trihidrogenio de litio
- Sulfato de amonio
- Hexhidrato de sulfato de aluminio de Guanidina



- Fluoberilato de amonio
- Cuarzo
- $\text{LiNbO}_3$  (Niobato de Litio)
- $\text{Li}_2\text{SO}_4$  (Sulfato de Litio)
- $\text{CdS}$  (Sulfato de Cadmio)
- $\text{ZnO}$  (Óxido de Zinc)
- $\text{BaTiO}_3$  (Titanato de Bario)
- $\text{PbNb}_2\text{O}_6$  (Metaniobato de Plomo)
- $\text{PbTiO}_3$  (Titanato de Plomo)
- $\text{LiTaO}_3$  (Tantalato de Litio)
- PVDF (Fluoreto de Polivinilideno)
- PZT (Zirconato Titanato de Plomo)

Como fue mencionado anteriormente las cerámicas del tipo PZT son las más comunes para la construcción de transductores. Dentro de los diferentes tipos de éstas cerámicas están [13] [14] [15]:

PZT-4 (Tipo I, Naval).- Ideal para limpieza ultrasónica, sonar y otras aplicaciones acústicas de radiación de potencia elevada.

PZT-4D.- Empleado en aplicaciones de motores que requieren niveles de potencia elevada y sensibilidad elevada.

PZT-5A (Tipo II, Naval).- Usado en hidrófonos, acelerómetros y colectores de vibración.

PZT-5J (Tipo VI, Naval).- Usado en fusibles, hidrófonos.

PZT-7A.- Usado en líneas de atraso ultrasónicas y otras aplicaciones de alta frecuencia de resonancia.

PZT-7D.- Usado en aplicaciones que requieren potencia elevada en manipulación capacitiva.

PZT-8 (Tipo III, Naval).- Usado para aplicaciones de potencia elevada, con calidad mecánica, y bajo factor de pérdidas.

PZT 23/27.- Usado en sensores de presión, acelerómetros, medidores de flujo, sistemas de prueba no destructivos y transductores de ultrasonido.

PZT 24/26.- Empleados en aplicaciones de alto voltaje, fusibles, ultrasonidos de potencia y procesamiento de materiales.

PZT 29.- Usada en receptores, acelerómetros, dispositivos de sensibilidad, instrumentos electrónicos musicales, transmisores de baja potencia.

PZT 32/34.- Usada en diagnósticos médicos, arreglos de alta frecuencia.

PZT 45.- Apropriadas para aplicaciones en ambientes que requieren estabilidad en temperatura.

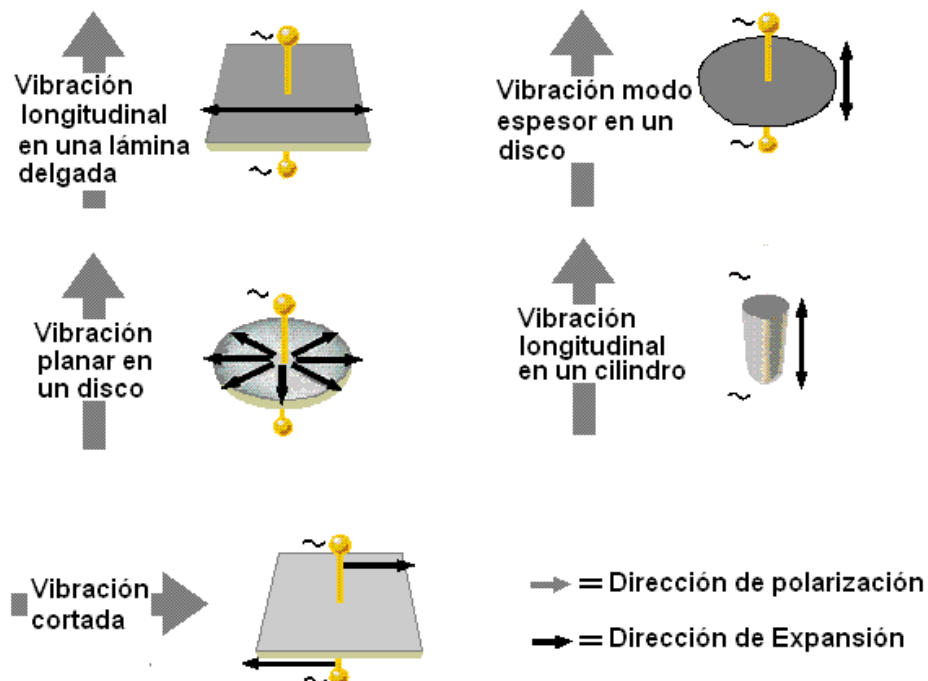
Una cerámica piezoeléctrica se puede despolarizar por un campo eléctrico fuerte con una polaridad opuesta a la tensión original del “poling”. El límite es la fuerza de campo y depende del tipo de material, la duración de la aplicación y la temperatura.

Se debe hacer notar que los campos de corriente alternos pueden tener el mismo efecto durante el medio ciclo cuando es puesto en el sentido del “poling”.

### I.2.3. Modos de vibración de elementos piezoeléctricos

Si un voltaje de AC de frecuencia variable es aplicado a una cerámica piezoeléctrica de determinada geometría, podemos ver que a una frecuencia específica, la cerámica produce una fuerte vibración, a esta frecuencia se le llama frecuencia de resonancia ( $f_r$ ) y depende de la forma de la cerámica.

Las cerámicas piezoeléctricas tienen varios modos de vibración (modos resonantes), los cuales dependen de su forma, el sentido de polarización y la dirección del campo eléctrico. Cada modo de vibración tiene su frecuencia de resonancia y sus características piezoeléctricas. La figura 1.4 muestra algunos modos de vibración [16].

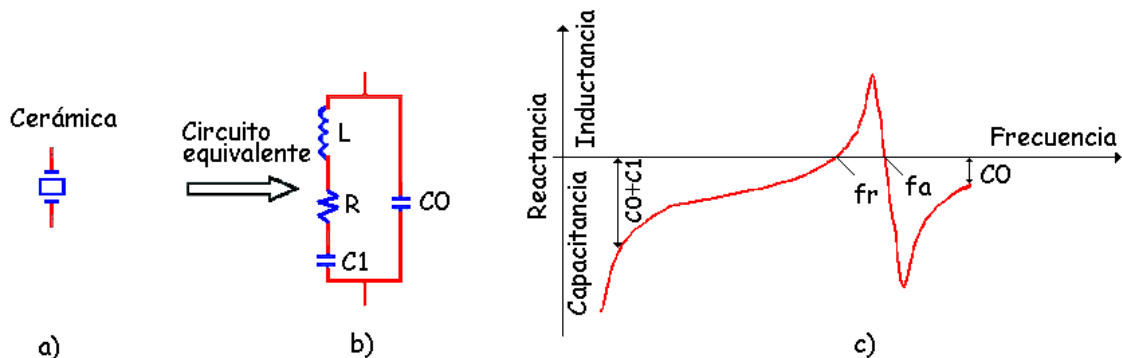


**Figura 1.4.** Modos fundamentales de vibración de cerámicas piezoeléctricas

Una cerámica piezoeléctrica presenta por lo menos dos puntos de resonancia electromecánica, conocidos como resonancia principal y antirresonancia (serie y paralela).

La primera se caracteriza por un punto de menor módulo de la impedancia del material  $|Z|$  (o sea máxima transferencia de energía), y la segunda es caracterizada por un mayor módulo de la impedancia del material (mínima transferencia de energía). En sensores de ultrasonido, el primer punto representa la mejor configuración para transmisión, y el segundo punto la mejor configuración para recepción.

La figura 1.5 presenta las regiones de resonancia y antirresonancia de un material, así como el circuito equivalente de la cerámica piezoeléctrica [17].



**Figura 1.5.** Impedancia eléctrica de una cerámica piezoeléctrica, a) Cerámica, b) Circuito eléctrico equivalente en la región próxima de resonancia, c) Impedancia eléctrica de una cerámica en función de la frecuencia  $Z(f)$  mostrando resonancia  $f_r$ , y antirresonancia  $f_a$ .

## I.2.4. Aplicaciones

El efecto piezoeléctrico en la actualidad se usa en muchas aplicaciones, abarcando diferentes áreas, tales como marinas, industriales y médicas [18].

### ➤ Aplicaciones Marinas.

La profundidad del océano se puede determinar mediante técnicas de sondeo por medio de una sonda. Un haz ultrasónico es dirigido hacia abajo del barco el cual se refleja en el fondo del mar. La profundidad se calcula si se conoce la rapidez del ultrasonido y el tiempo transcurrido.

Los hidrófonos son también muy empleados en aplicaciones marinas.

### ➤ Aplicaciones Industriales.

Una de las más conocidas es la limpieza o aseo ultrasónico.

Otra aplicación es la medición de espesores y la detección de fallas, las cuales son un medio no destructivo de probar piezas fundidas de metales y otros objetos metálicos (entre ellos las partes de los aviones por ejemplo).

Se aplican también en perforaciones petroleras, sistemas de alarma y detectores de movimiento, dispositivos de microposicionamiento, soldadura de materiales plásticos, etc.

➤ Aplicaciones Médicas.

En medicina, con el desarrollo de dispositivos electrónicos y sistemas de cómputo rápido, el efecto piezoeléctrico ha adquirido gran importancia, ya que se han desarrollado una gran variedad de equipos médicos como detectores de pulsos de fetos, medidores de flujo, imagenología, tratamientos del corazón, terapia muscular y consolidación de huesos, prótesis, odontología, etc.

### **I.3. Transductores**

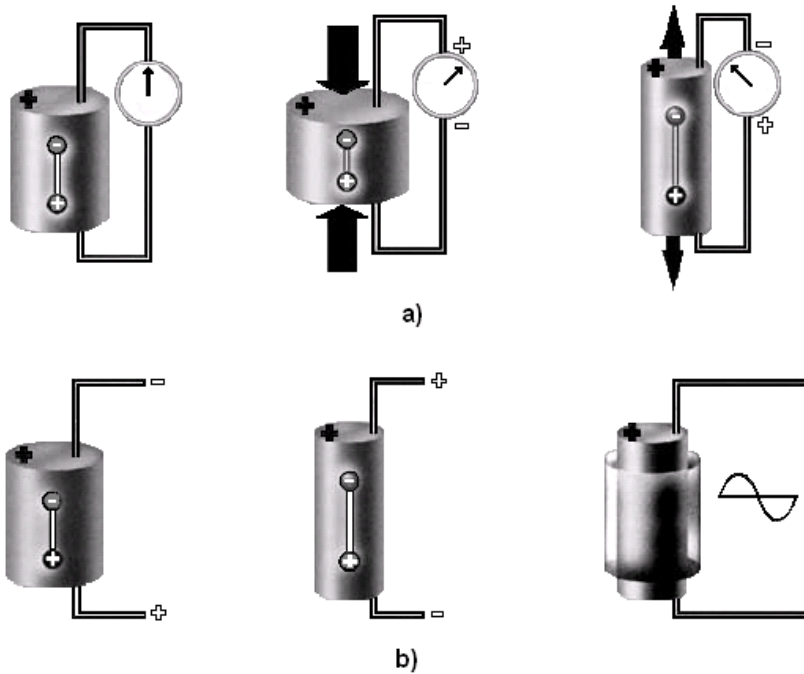
#### **I.3.1. Introducción**

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física, en una señal correspondiente pero de una forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro [12].

Dado que hay diferentes tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierta una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor y la señal de salida podría ser de cualquier forma física útil. En la práctica, no obstante, se consideran transductores aquellos que ofrecen una señal de entrada o de salida eléctrica. Ello se debe al interés de este tipo de señales en la mayoría de procesos de medida. Transductor sugiere que las señales de entrada y salida no deben ser homogéneas. En este trabajo el transductor convierte una señal eléctrica en una señal mecánica.

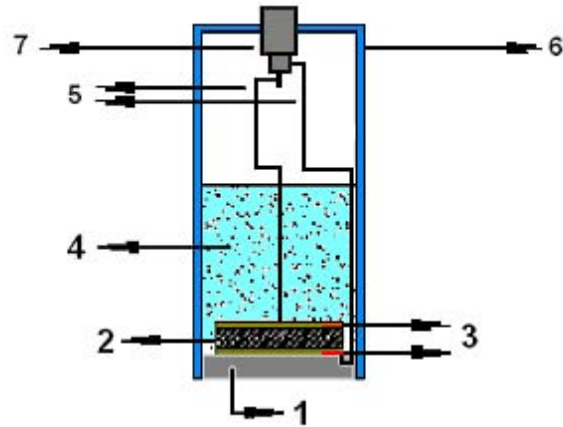
#### **I.3.2. Transductor Ultrasónico**

El elemento activo de la mayoría de los transductores ultrasónicos es una cerámica piezoeléctrica, la cual al aplicarle una señal eléctrica senoidal, vibra y genera ondas mecánicas de la misma frecuencia que la señal eléctrica aplicada. Similarmente, si se aplica una excitación por vibración mecánica, será generada una señal eléctrica, cuya frecuencia es igual a la de la excitación. La figura 1.6 representa estos dos procesos.



**Figura 1.6.** a) Efecto piezoeléctrico directo resultante de una fuerza externa. La polaridad de la carga eléctrica depende de la dirección y sentido de la fuerza aplicada. b) El efecto piezoeléctrico inverso bajo la influencia de un campo eléctrico externo. Las dimensiones del cuerpo varían con el cambio en el voltaje.

El transductor está constituido, como se muestra en la Figura 1.7, por una cerámica piezoeléctrica a la cual sobre sus caras se le han pegado electrodos, sobre los cuales se unen a conectores coaxiales. En la cara frontal de la cerámica se encuentra una capa de adaptación de impedancias o “matching layer”, cuya función es realizar la adaptación entre las impedancias acústicas de la cerámica y del medio de propagación, de manera que halla una buena transferencia de potencia acústica entre ambos. Sobre la cara trasera de la cerámica, hay un material absorbente llamado contramasa o “backing”, que sirve para amortiguar la señal en esa dirección. Cuenta también con una carcasa de protección y soporte del transductor [19].



- 1 Capa de acoplamiento (Matching layer)
- 2 Cerámica
- 3 Electrodo
- 4 Material de apoyo (Backing)
- 5 Conectores coaxiales
- 6 Carcasa
- 7 BNC

**Figura 1.7.** Esquema de un transductor ultrasónico.

Cuando la impedancia acústica del “backing” se iguala con la impedancia acústica del elemento activo, el resultado será un transductor fuertemente amortiguado, con un buen rango de resolución pero con una baja amplitud de señal. Si existe diferencia entre la impedancia acústica del elemento activo y el apoyo “backing”, mayor energía de sonido será emitida hacia el material en prueba. Este último resultado será un transductor con menor resolución debido a la mayor duración de la onda, pero con una mayor amplitud de señal o sensibilidad.

#### **I.4. Ultrasonido. Conceptos básicos.**

El ultrasonido es una onda mecánica que tiene una frecuencia por encima del rango audible para los humanos, es decir, frecuencias superiores a los 20 kHz. Para describir lo que es una onda ultrasónica es necesario entender lo que es una onda mecánica.

Las ondas mecánicas viajan a través del medio como resultado de las variaciones de presión de la fuente en el medio de propagación, en este caso, lo que interpretamos como una onda corresponde a la perturbación de un cuerpo o de un medio.

Las ondas requieren de los siguientes elementos para propagarse:

- Alguna fuente que produzca la perturbación.
- Un medio que se pueda perturbar.
- Una conexión o mecanismo físico por medio del cual se pueda interactuar.

Para caracterizar una onda en general, se requieren conceptos físicos importantes, tales como periodo, frecuencia, amplitud y longitud de onda, los cuales se describen a continuación [21].

**Periodo.** El periodo ( $\tau$ ) de una fuente emisora de ondas sonoras, es el tiempo que tarda en efectuarse una oscilación completa de cada partícula, o de manera equivalente, el tiempo en segundos que tarda en pasar una onda completa por un mismo punto.

**Frecuencia.** Es el número de oscilaciones completas que efectúa cada partícula en un segundo, es decir, la rapidez con la que se repite una perturbación. Está medida en ciclos por segundo o hertz (Hz). El periodo y la frecuencia están relacionados por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{Ec. (14)}$$

donde  $f$  es la frecuencia y  $\tau$  es el periodo.

Por ejemplo, en la figura 1.8. hay 3 oscilaciones completas en un segundo, es decir, la frecuencia es de 3 ciclos por segundo.

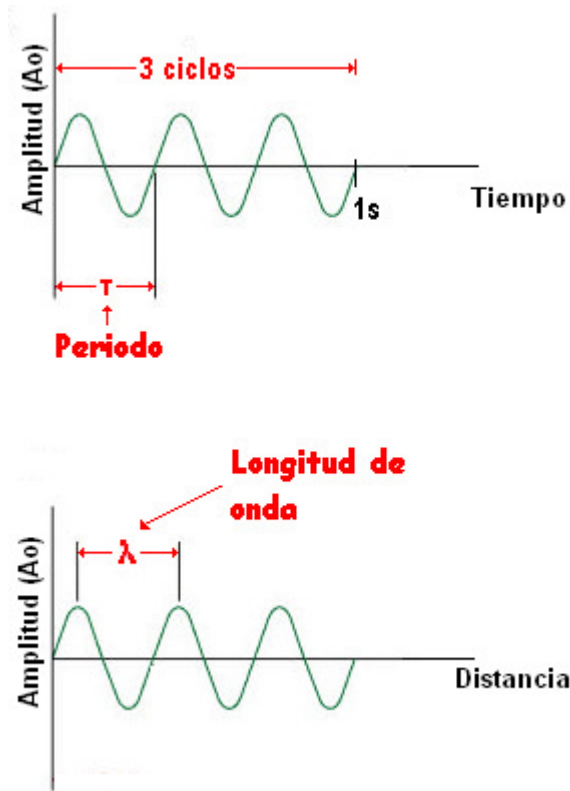
**Amplitud.** La amplitud ( $A_0$ ) representa el máximo valor que puede tener una onda o función.

**Longitud de onda.** La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia mínima entre dos puntos de una onda que vibran en fase. Las ondas viajan o se propagan con una velocidad específica, la cual depende de las propiedades del medio que se perturba.

La longitud de onda y la frecuencia están relacionadas con la velocidad del sonido ( $c$ ) en el medio por la siguiente ecuación:

$$c = \frac{\lambda}{T} = f \lambda \quad \text{Ec. (15)}$$

En la figura 1.8 está la representación gráfica de los conceptos mencionados.



**Figura 1.8.** Representación gráfica de la amplitud, periodo y la longitud de onda.

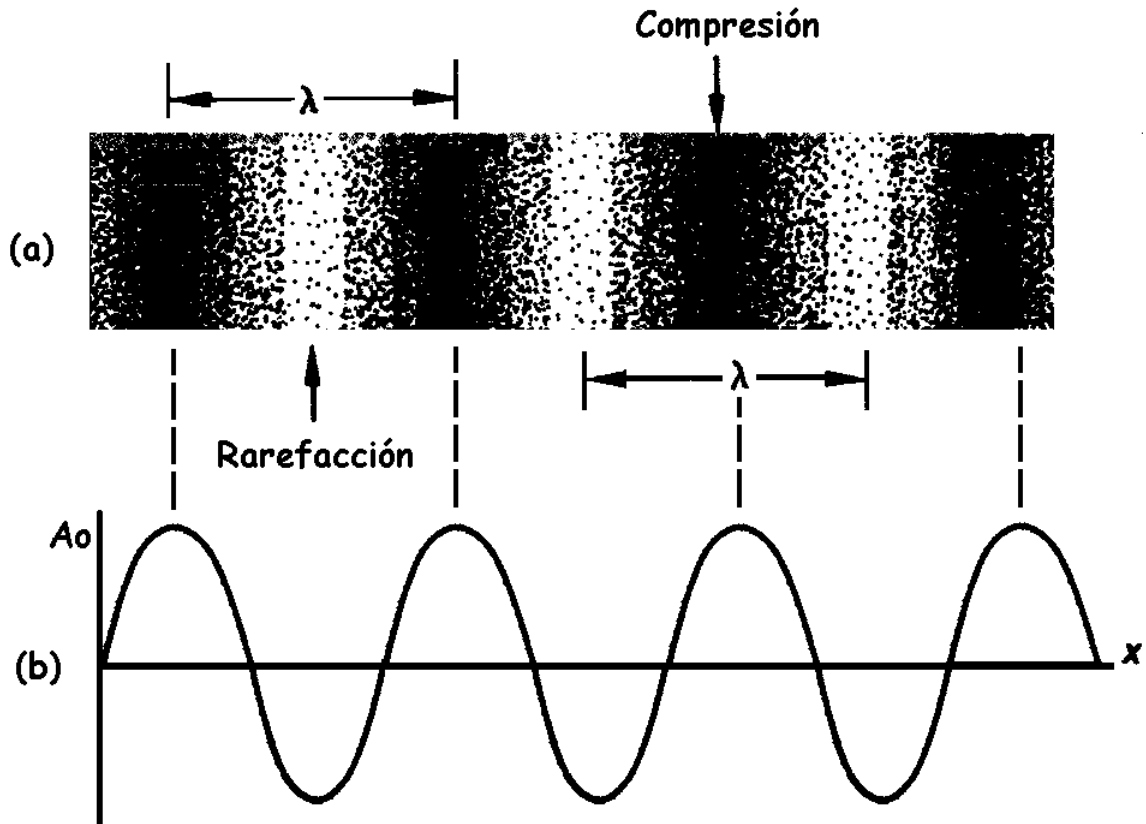
Existen dos tipos de ondas de acuerdo con su propagación, las transversales y las longitudinales.

Una onda transversal es una onda en la cual las partículas del medio se mueven en la dirección perpendicular a la dirección de la propagación de la onda, algunos ejemplos de ellas son las ondas electromagnéticas como la luz, las ondas de radio y televisión.

Las ondas longitudinales son ondas para las cuales las partículas del medio se mueven en la dirección paralela a la dirección de propagación de la onda.

Las ondas sonoras son el ejemplo más importante de las ondas longitudinales, éstas pueden viajar a través de cualquier medio (gases, sólidos, o líquidos. En el vacío es el único medio donde no puede haber esa propagación) con una velocidad que depende de las propiedades del medio. A medida que una onda sonora se mueve a través de algún medio las partículas en el medio vibran para producir cambios de densidad y presión a lo largo de la dirección del movimiento de la onda; estos desplazamientos que ocurren como resultado de las ondas sonoras implican desplazamientos longitudinales de las moléculas respecto a su posición de equilibrio. Esto da como resultado una serie de alta y baja presión llamadas condensaciones y rarefacciones, respectivamente (figura 1.9) [22].





**Figura 1.9.** a) Compresiones y rarefacciones de una onda sonora en el aire en un instante determinado. b) Variación sinusoidal de la presión como función del desplazamiento.

Si la fuente de ondas sonoras, tales como una membrana o un altavoz, vibra senoidalmente, las vibraciones de presión también son senoidales.

# CAPÍTULO II

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

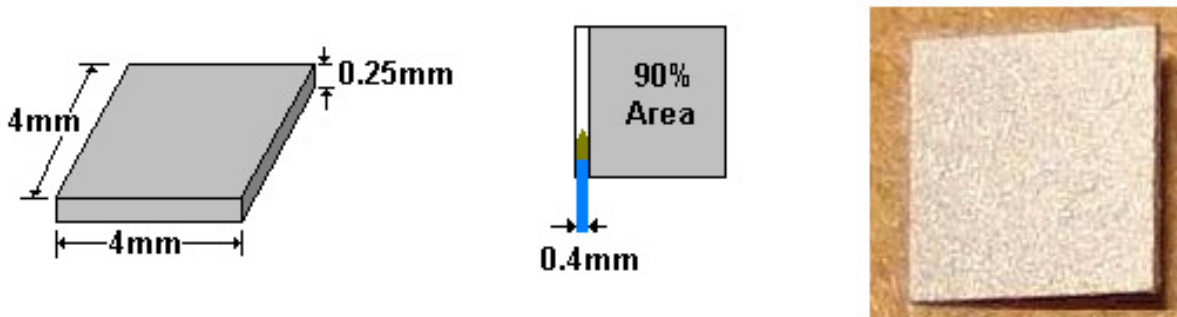
En este capítulo se describe la metodología utilizada para diseñar y construir el transductor ultrasónico angulado.

### II.1. Diseño.

En esta sección se presentan y analizan las alternativas que se tomaron en cuenta para la elección de las partes principales del transductor que se construyó y el esquema del transductor durante el proceso de construcción.

#### II.1.1. Cerámica piezoeléctrica.

Basados en el avance de la investigación en el área de Imagenología Ultrasónica y los recursos disponibles [24], la cerámica que se eligió fue la PIC255 de 8 MHz [25] (ver anexo A) de forma cuadrada de dimensiones 4mm x 4mm x 0.25mm. A esta cerámica se le soldaron 2 alambres en el mismo extremo, pero en la cara y sentido contrario, los cuales son los electrodos para excitarla, como se muestra en las figuras 2.1 y 2.2 en donde se procura que el punto de unión sea lo más fino posible, para así garantizar la mayor área de trabajo efectiva (máxima resonancia) de la cerámica, y que la variación de frecuencia que ésto ocasiona sea la mínima.

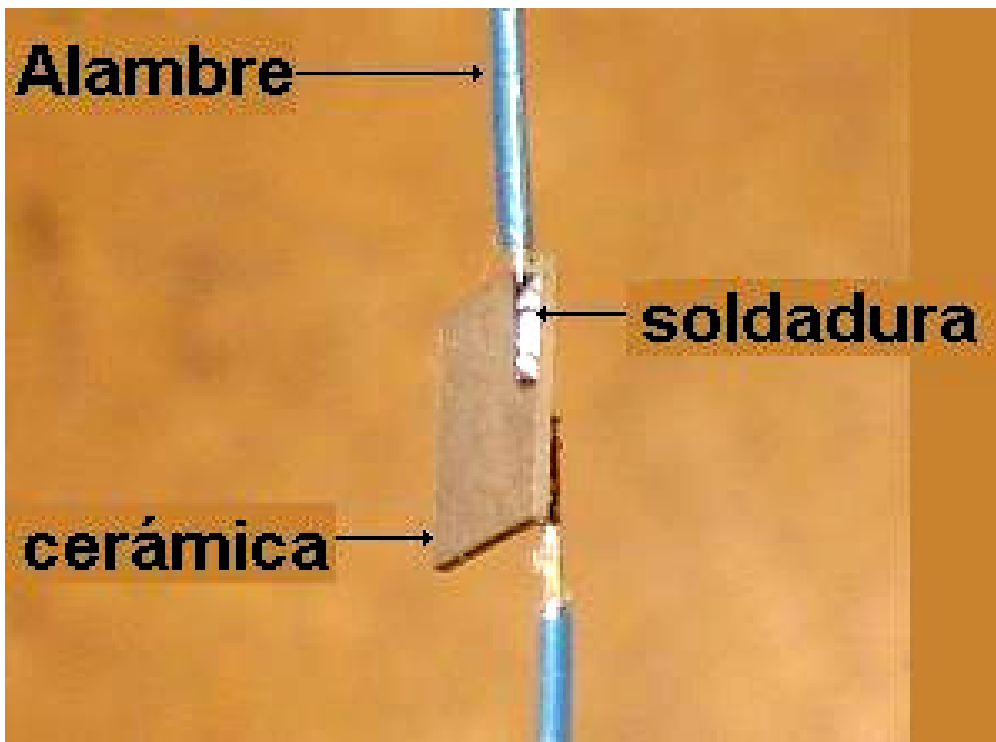


**Figura 2.1.** Dimensiones de la Cerámica Piezoeléctrica y su área efectiva.

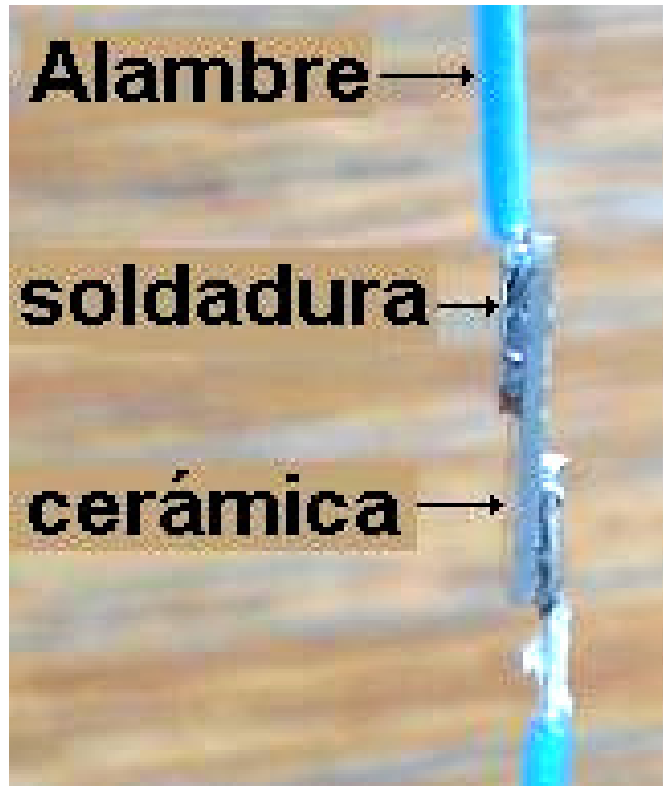
Las figuras 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4 muestran cómo y en qué lado fueron soldados dichos electrodos, respetando el 10% del área para colocar tales electrodos.



**Figura 2.2.** Cerámica Piezoeléctrica con alambres soldados en una orilla (Vista frontal)



**Figura 2.3.** Cerámica Piezoeléctrica con alambres soldados en una orilla (Vista en perspectiva)

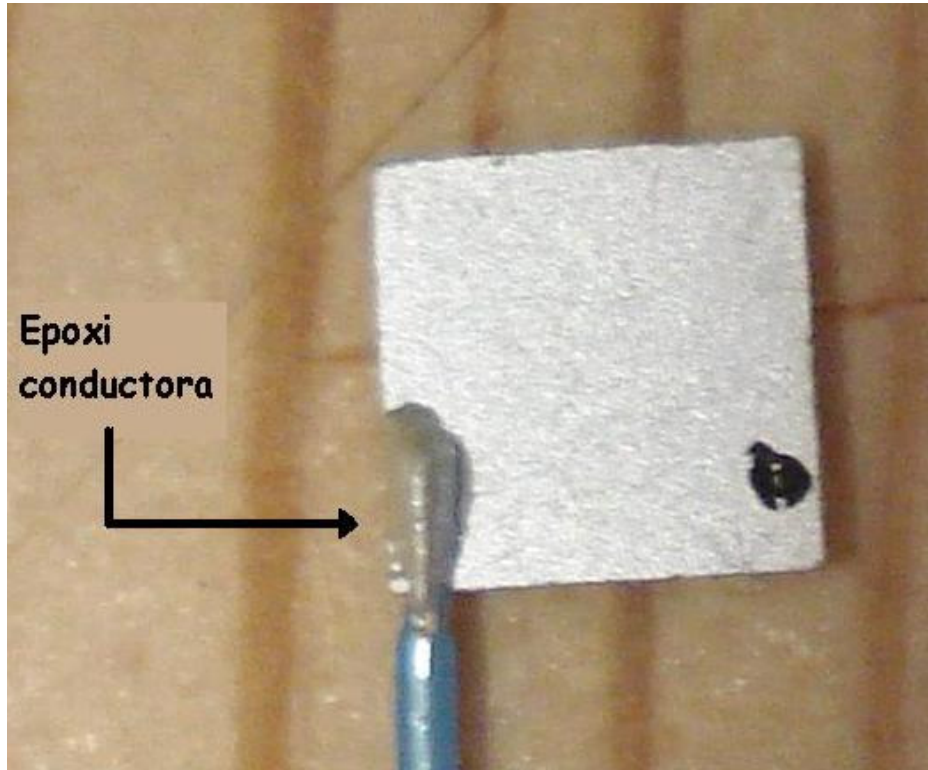


**Figura 2.4.** Cerámica Piezoeléctrica con alambres soldados en una orilla (Vista lateral)

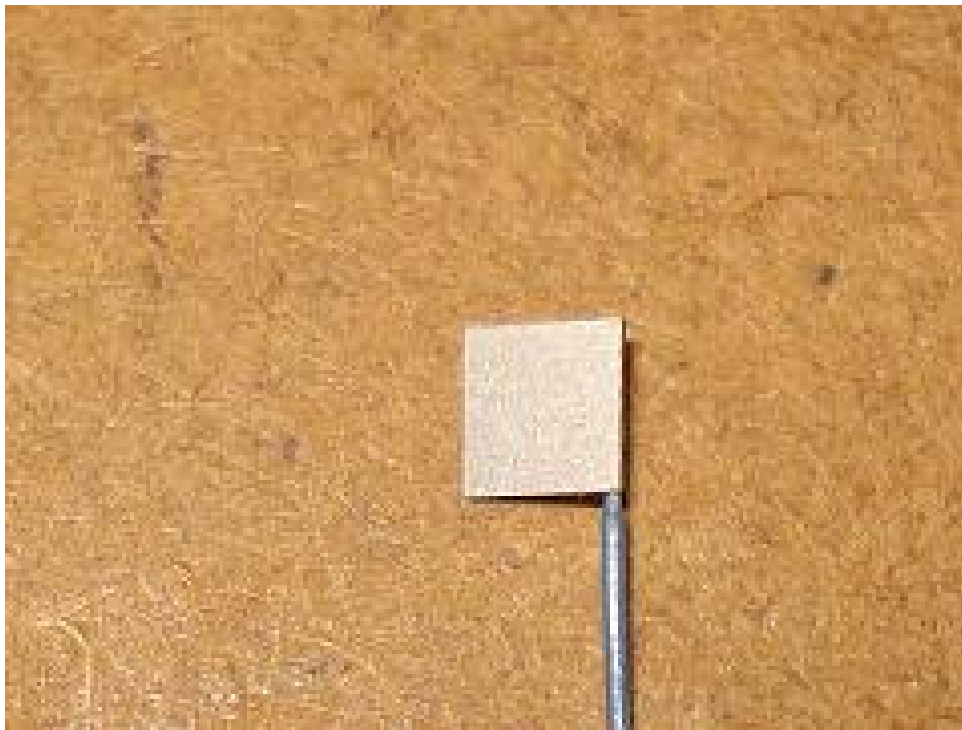
A la par de este transductor, fue construido otro transductor en donde uno de los cambios más significativos fue el de pegar los electrodos en lugar de soldarlos. El material para pegar los electrodos fue Epoxi conductora de la marca *INSULCAST* [26] (ver anexo B).

Cabe hacer mención que el porcentaje del área de los electrodos sobre la cerámica fue similar a la empleada cuando se soldaron los electrodos (10% aproximadamente).

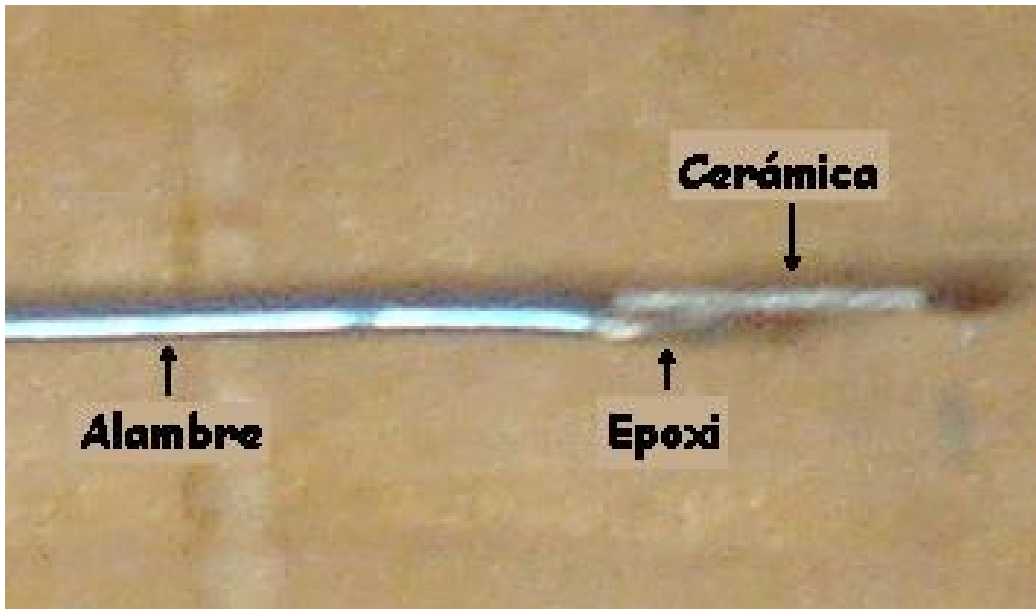
En este procedimiento cabe destacar que el uso de una herramienta fina fue necesaria, ya que el proceso de pegado es mucho más complicado y presenta inconvenientes en su aplicación, como el tiempo antes de que endurezca la mezcla de epoxi, moldear la mezcla para obtener la menor cantidad de masa en el pegado intentando minimizar con ello la variación de la frecuencia central. Los electrodos pegados se muestran en las figuras 2.5, 2.6, y 2.7.



**Figura 2.5.** Cerámica Piezoeléctrica con alambre pegado con epoxi conductora en una orilla (Vista frontal).



**Figura 2.6.** Cerámica Piezoeléctrica con alambre pegado con epoxi conductora en una esquina (Vista posterior).



*Figura 2.7. Cerámica Piezoeléctrica con alambre pegado con epoxi conductora en una esquina (Vista lateral).*

### II.1.2. Carcasa.

La carcasa del transductor consiste en dos tubos, uno de plástico como material de soporte mecánico de la cerámica y otro de aluminio como funda de protección. El tubo de aluminio es de aproximadamente 7mm (9/32 de pulgada) de diámetro exterior, y 0.36mm de pared, al cual se le pegó internamente el tubo de plástico, con el propósito de evitar que haya contacto entre los electrodos y el aluminio, lo que sería equivalente a un corto circuito, que dañaría nuestro dispositivo.



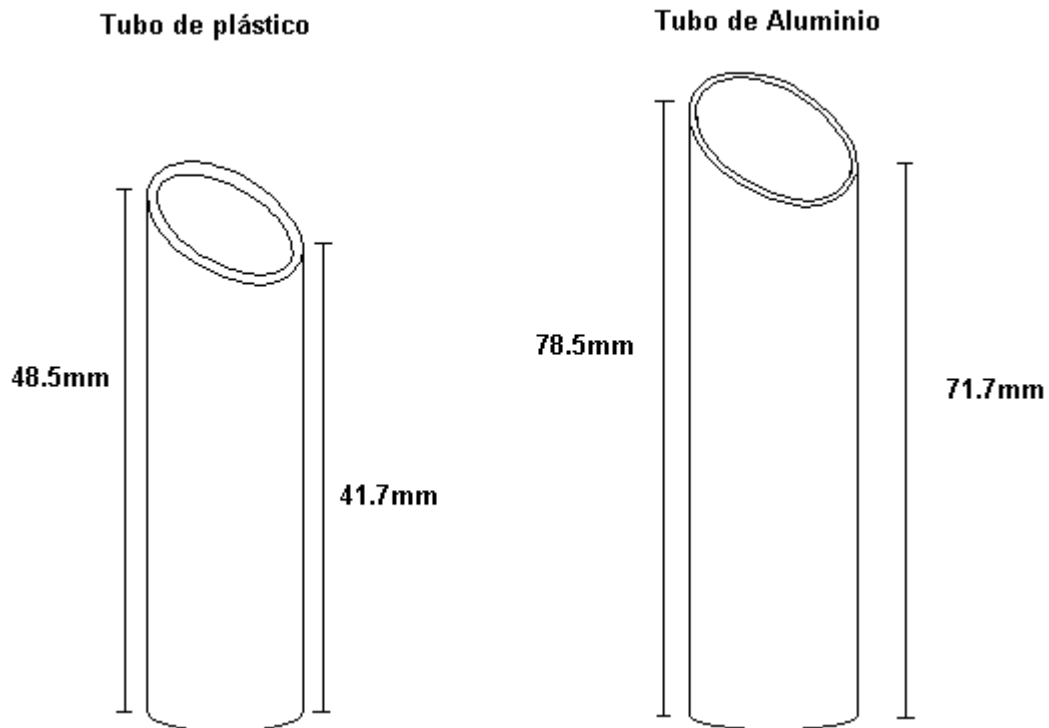
*Figura 2.8. Tubo de plástico incrustado en otro de aluminio antes del corte.*

### II.1.2.1. Ángulo

La aplicación principal de este transductor es la de facilitar la adquisición de señales; sin embargo, una de las mayores desventajas en los transductores es que algunas señales de baja intensidad están cerca de los niveles de ruido del artefacto, por lo que se necesita experiencia y habilidad para ajustar el aparato y obtener la máxima información con el mínimo ruido. Un ángulo de exploración inadecuado, una penetración insuficiente, y una escasa resolución pueden provocar la pérdida de información relevante [27].

Conforme el ángulo de exploración ( $\theta$ ) se aproxima a  $90^\circ$ , el coseno de ( $\theta$ ) se aproxima a cero, y se obtiene una mala adquisición de la señal ultrasónica, y dado que el coseno del ángulo ( $\theta$ ) cambia con rapidez en el caso de ángulos mayores que  $60^\circ$ , se determinó que el valor del ángulo no sea mayor a  $60^\circ$  porque sería impreciso; conforme el ángulo de exploración ( $\theta$ ) se acerca a  $0^\circ$ , el coseno de  $\theta$  se aproxima a 1, pero esta situación es inusual en la práctica clínica; por otra parte, basados en experiencias anteriores y dado que se requiere que haya un equilibrio en resolución y penetración, se determinó que el ángulo sea de  $60^\circ$ , ya que ese valor nos proporciona ese equilibrio [27]. Ese ángulo permite realizar la medición con una menor dificultad; ya que al estar incluido en el transductor, éste puede ser colocado en posición vertical, facilitando su uso y garantizando una adecuada adquisición de la señal.

A continuación son mostrados los esquemas de los tubos utilizados para la carcasa, la figuras 2.9 y 2.10 muestran las dimensiones de ambos tubos (plástico y aluminio).

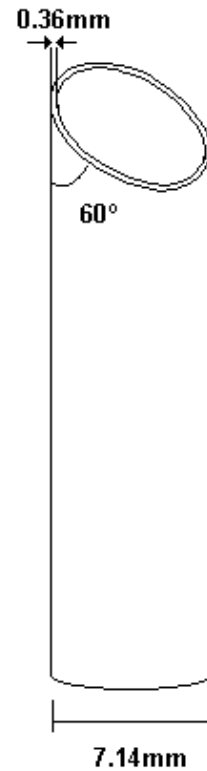


**Figura 2.9.** Dimensiones de la longitud de los tubos utilizados para la carcasa (izquierda tubo de plástico y derecha tubo de aluminio).

**Tubo de plástico**



**Tubo de aluminio**



**Figura 2.10.** Dimensiones del diámetro, paredes y ángulo de los tubos utilizados para la carcasa (izquierda tubo de plástico y derecha tubo de aluminio).

La carcasa se cortó con un ángulo de 60° usando una lijadora industrial y un transportador para garantizar que el ángulo sea del valor mencionado, ésto se ilustra en la figuras 2.11, 2.12 y 2.13.

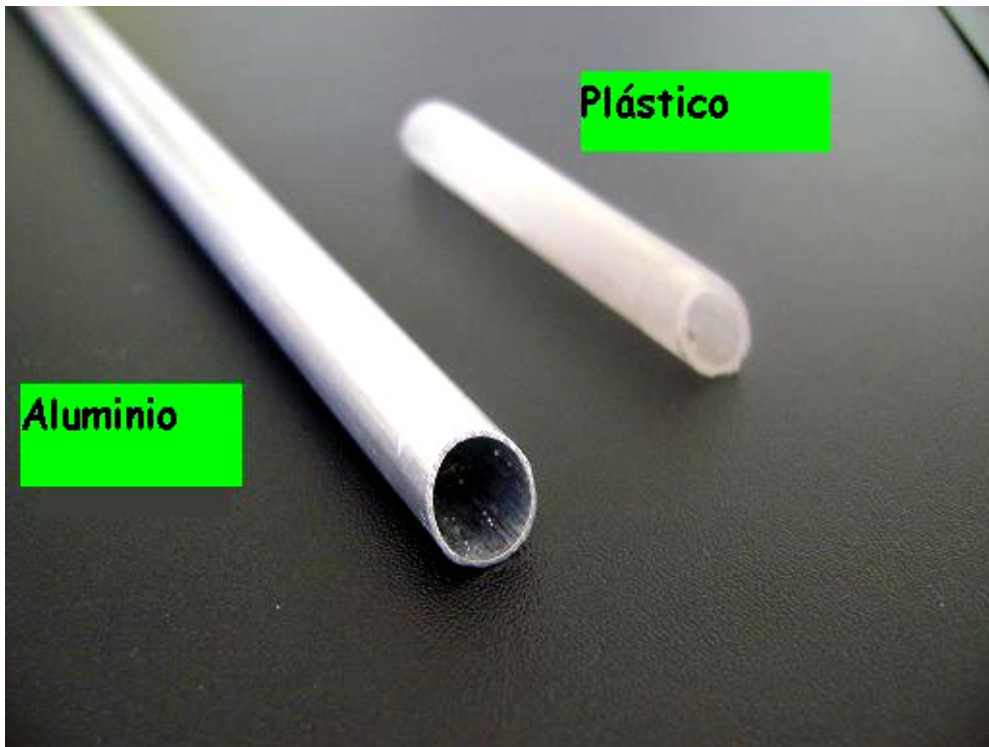


**Figura 2.11.** Máquina lijadora





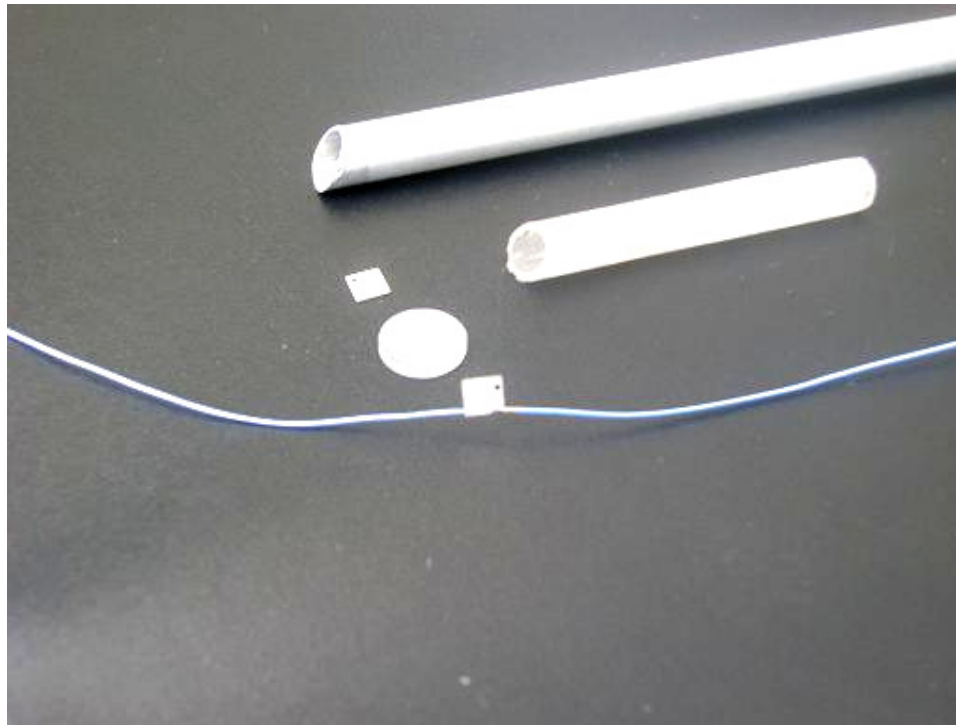
*Figura 2.12. Transportador para cotejar el ángulo.*



*Figura 2.13. Tubos después del corte*

### II.1.3. Material de acoplamiento acústico (Matching).

Como material de acoplamiento acústico (matching layer) se eligió el Rexolite 1422 [28] (ver anexo C), ya que presenta características físicas y acústicas idóneas para trabajar como elemento de acoplamiento en los transductores, debido a la similitud de su impedancia con la del agua. Esta similitud facilita la emisión máxima de la señal generada por el transductor, reduciendo las pérdidas por los cambios de medio. Adicionalmente el Rexolite ofrece otras bondades al utilizarse como material de acoplamiento, por ejemplo; proteger la cerámica y la facilidad de ser maquinado y adaptado al transductor [29].



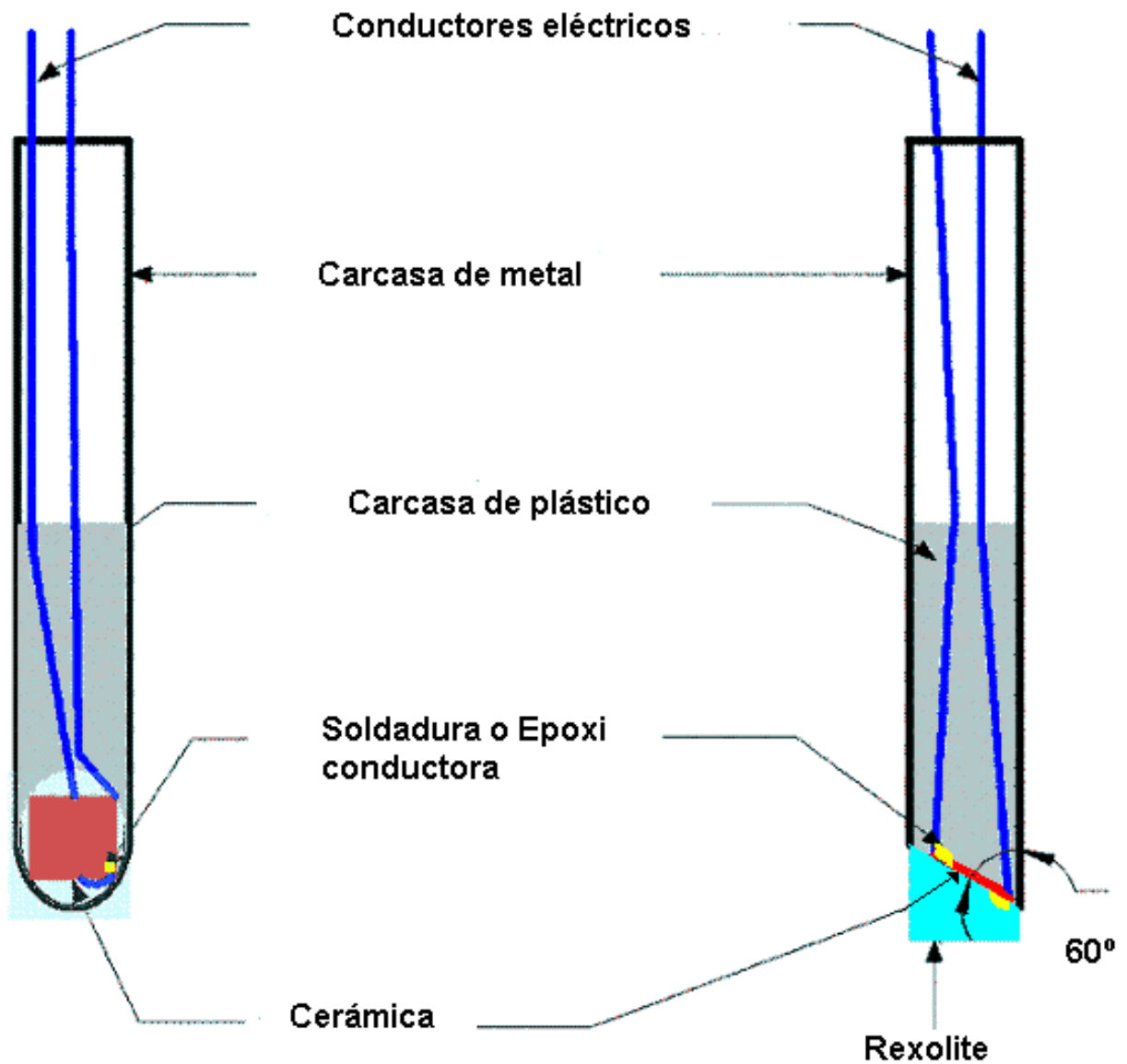
**Figura 2.14.** Elementos que forman el transductor ultrasónico (de arriba hacia abajo: tubo de aluminio para la carcasa, tubo de plástico, cerámica piezoeléctrica, rexolite, cerámica piezoeléctrica con los alambres soldados).

### II.1.4. Material Absorbente (Backing).

La cerámica piezoeléctrica vibra emitiendo energía en la dirección de sus caras. El transductor construido sólo utiliza la emisión en una de sus caras. Con este fin se coloca la contramasa o “backing” en la cara posterior y absorber la energía mecánica en ese sentido y detener la oscilación de la cerámica. Como material absorbente (backing) se eligió el aire, ya que de esta manera toda la energía acústica generada (excepto pérdidas) se transmite al medio, dando lugar a un transductor de alta eficiencia [30].

## II.1.5. Esquema de Diseño

En la presente sección se mostrará de manera esquemática el proceso de construcción del transductor con el ángulo a  $60^\circ$ . Son descritos cada uno de los componentes que conforman el transductor.



*Figura 2.15. Esquema constructivo del transductor ultrasónico con ángulo incluído. (izquierda: Vista frontal, derecha: Vista lateral)*

## II.1.6. Planos de construcción del transductor ultrasónico angulado.

A continuación se muestra el proceso de fijado de la cerámica a la carcasa (tubos). Las piezas se pegaron con cianocrilato (ver anexo D).

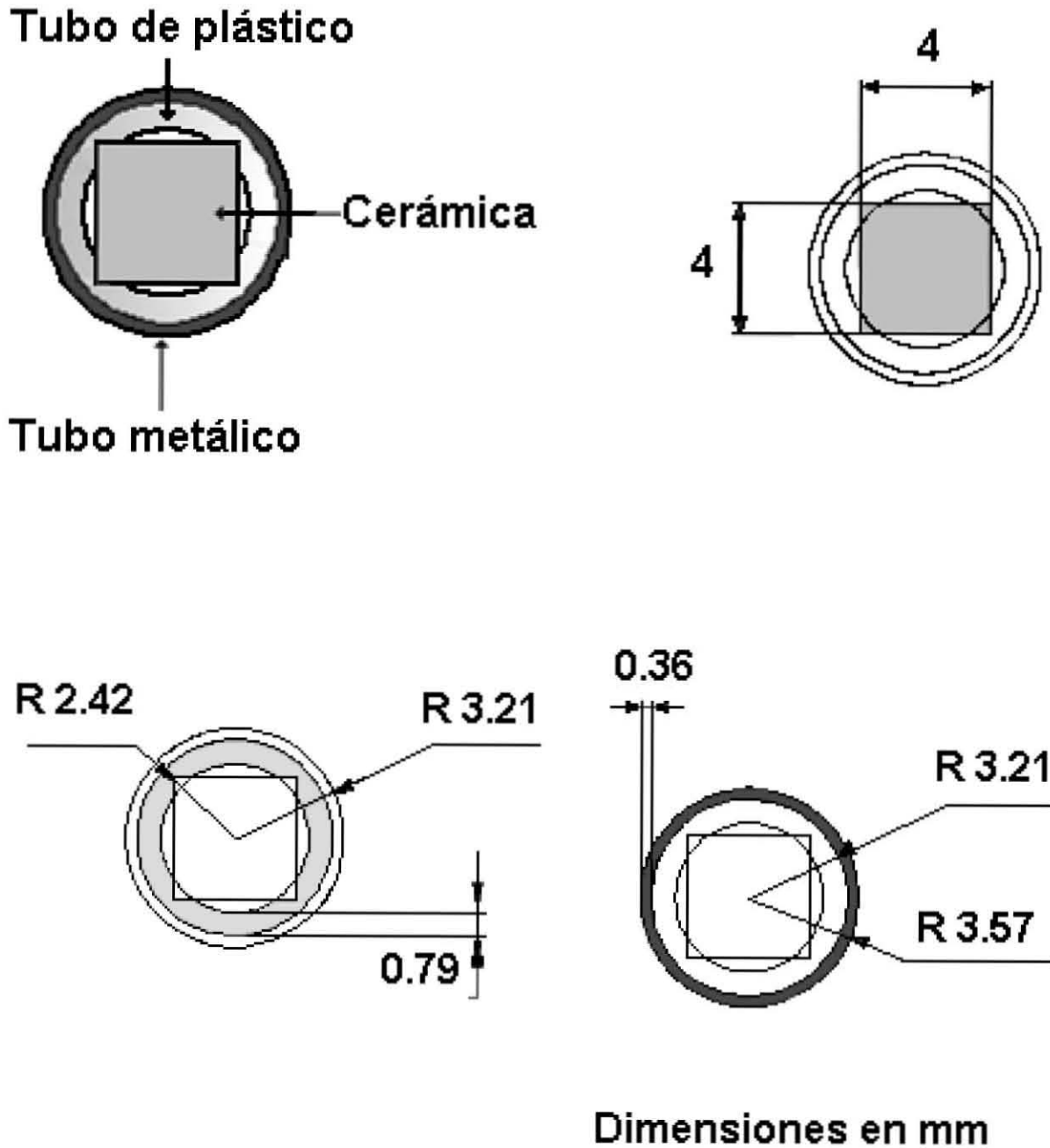
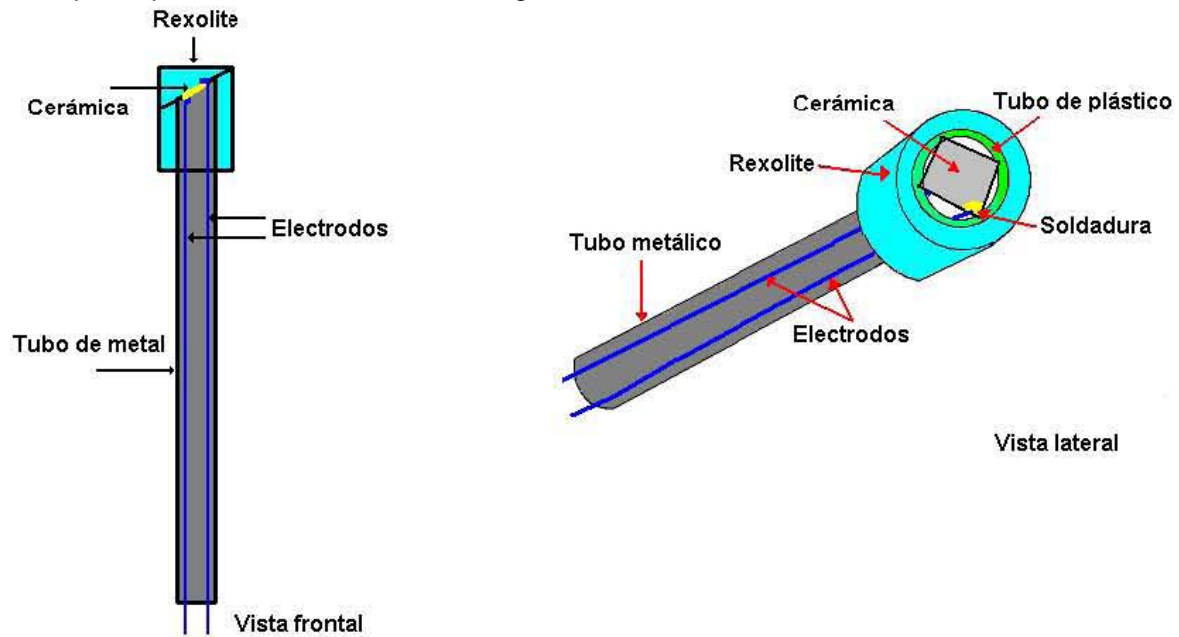
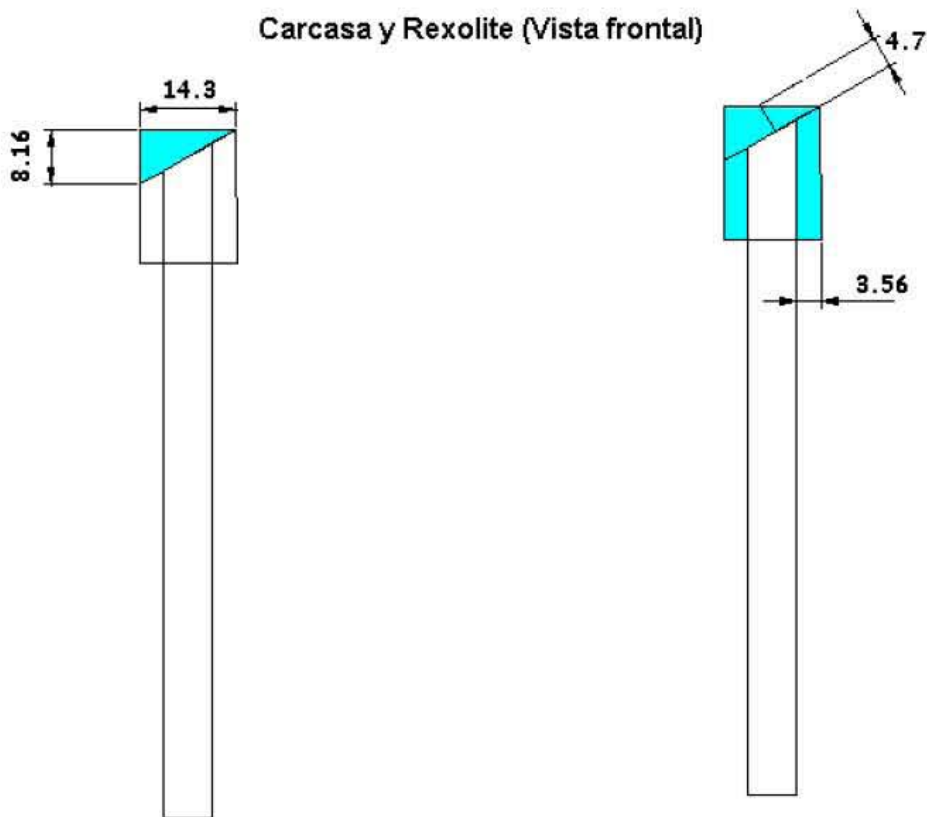


Figura 2.16. Dimensiones de la cerámica montada en la carcasa vista desde arriba.

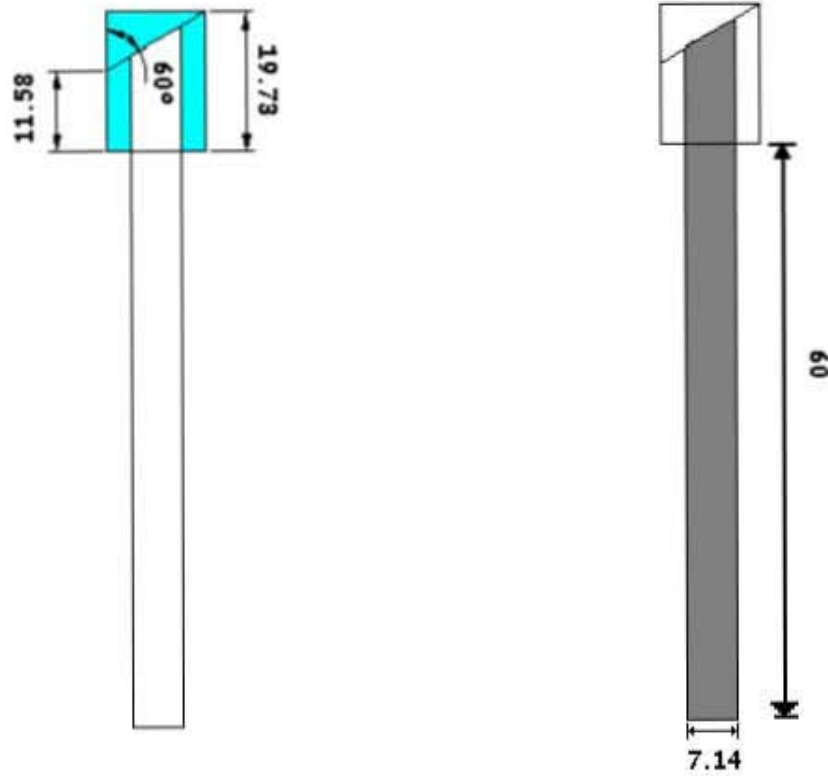
La figura 2.17 muestra los componentes del transductor, dimensiones de la carcasa y de la capa de acoplamiento, la cual fue construida en dos piezas, una como soporte y para que exista una mayor superficie de contacto para garantizar un mejor pegado de esta capa de acoplamiento, y otra que es por donde se transmite la energía.



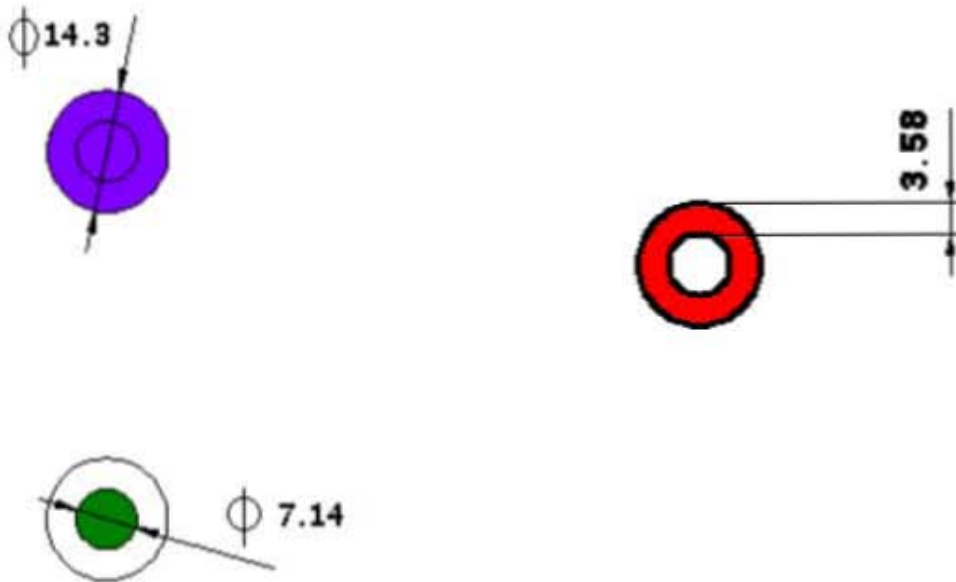
Carcasa y Rexolite (Vista frontal)



Carcasa y Rexolite (Vista frontal)



Diámetros y pared de la capa de rexolite (Vista de arriba)



Dimensiones en mm

Figura 2.17. Dimensiones de la tapa de rexolite y su soporte

## II.2. Construcción

Se construyeron simultáneamente los dos transductores (el de electrodos soldados y el de electrodos pegados), por lo que los siguientes pasos de construcción serán los mismos para ambos transductores.

Después de elegir y acondicionar los elementos de los transductores, se procedió a armar los dispositivos de la siguiente manera:

### II.2.1. Pegado de la cerámica en el tubo de plástico

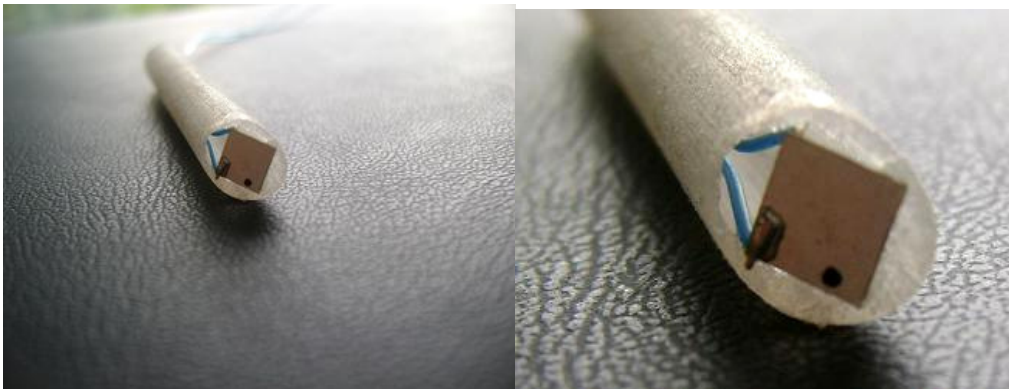
Se tomó el tubo de plástico donde se le dio forma a la base de tal manera que pudiera caber la cerámica tratando de que ésta quedara al nivel de la carcasa (figura 2.18).



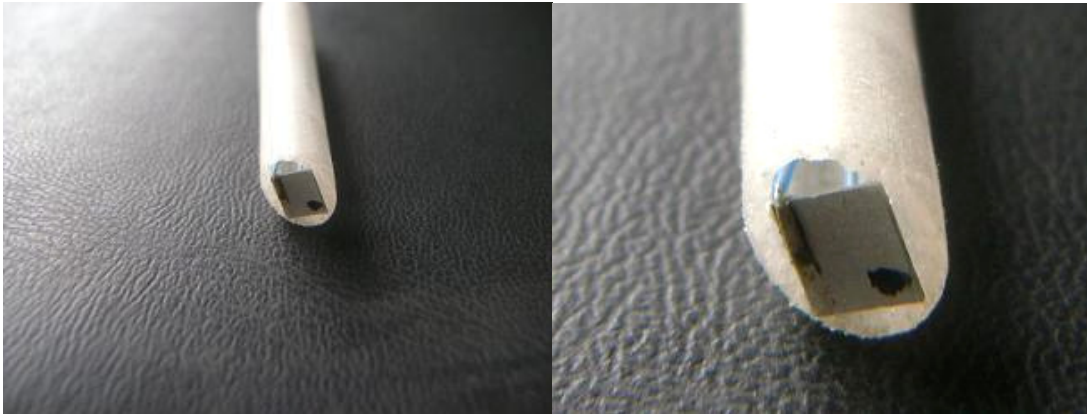
**Figura 2.18.** Tubo de plástico con la incisión para la cerámica

El corte es del tamaño del espesor de la cerámica (es decir, 0.25mm) para que sirva como soporte de la misma.

El siguiente paso fue pegar la cerámica en esa incisión, para esto se usó cianocrilato (Ver anexo D). Este proceso se realizó sin ejercer presión excesiva a la cerámica evitando así posibles fracturas y ocupando la menor superficie posible de la misma, tal y como se muestra en la figuras 2.19 y 2.20.



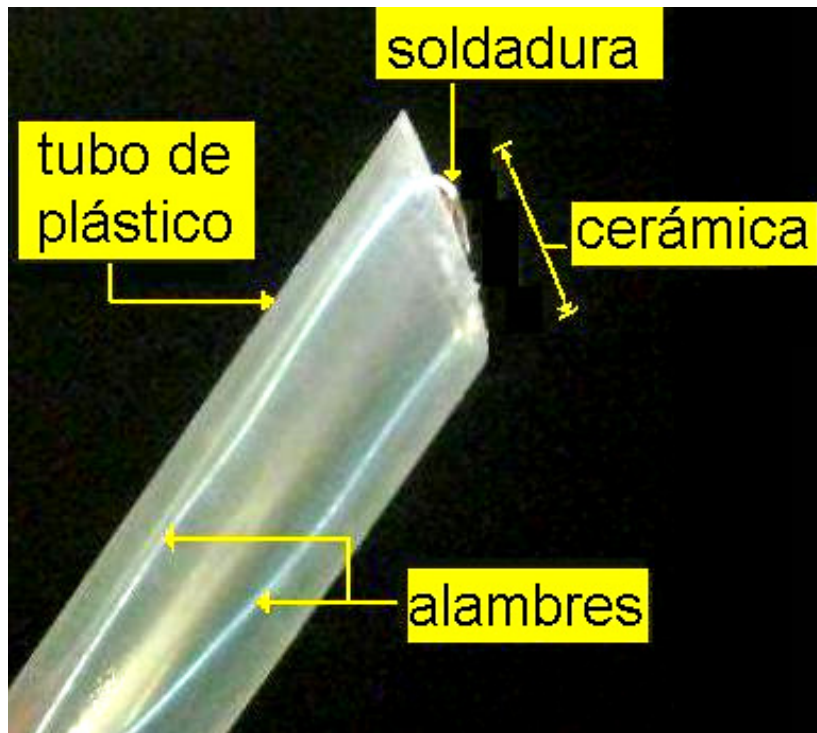
**Figura 2.19.** Cerámica con conectores eléctricos soldados pegada en el tubo de plástico



**Figura 2.20.** Cerámica con conectores pegados con Epoxi conductora pegada en el tubo de plástico

En las figuras anteriores (2.19 y 2.20) se observa que la cerámica tiene pintado un punto negro, eso quiere decir que esa es su cara positiva y debe ir en la parte de afuera del tubo de plástico porque es la cara que va a transmitir la energía al medio de propagación.

El punto de soldadura quedó afuera (figura 2.21), por lo que se tomó en cuenta ese espacio al hacer la capa de acoplamiento (Rexolite).



**Figura 2.21.** Cerámica con conectores eléctricos pegada en el tubo de plástico visto de perfil.



## II.2.2. Unión de alambres con cable coaxial

Se realizó la unión de los alambres que se soldaron a la cerámica (electrodos) con el cable coaxial, para esto se utilizó una pequeña porción de tableta para circuitos impresos como intermediario, ya que esto hace que los alambres delgados no tengan que soportar tanto peso que tiene el cable coaxial en comparación con ellos, es decir, esta tableta funciona como soporte mecánico entre los alambres y el cable coaxial (figura 2.22). Este soporte mecánico fue diseñado para caber dentro del tubo de metal del transductor.

Para asegurar que no haya algún corto circuito se puso una capa de barniz de uñas como aislante eléctrico entre el cable y los alambres.

En todo momento se verificó que hubiese continuidad entre los alambres y el cable coaxial, así como también se verificó que hubiese continuidad entre los alambres y las caras de la cerámica.



*Figura 2.22. Unión de los alambres con el cable coaxial*

## II.2.3. Rexolite

Se mandó construir la capa de acoplamiento con Rexolite 1422 (ver anexo C), en el taller de manufactura del Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM – UNAM), a la cual se le hizo una ranura para que se acoplara a la cerámica, ya que la soldadura quedaba expuesta como se mostró en la figura 2.21. Ésta capa de Rexolite es del doble de diámetro de la carcasa de metal (9/16 de pulgada) para asegurar que el campo de radiación de la onda ultrasónica atravesase en todo momento por el rexolite y garantizar la máxima transferencia de energía (ver figura 2.23), ya que si se usa un diámetro menor, entonces parte de la energía entraría en contacto con aire.



**Figura 2.23.** Capa de Rexolite (izquierda: campo de radiación, derecha: vista de la ranura para la soldadura).

### II.2.3.1. Cálculo del espesor del “matching layer”

Para la realización de esta pieza se tomó en cuenta el grueso de la capa que se desea construir, ya que este grueso influye en la amplitud de la señal que se desea transmitir, para un transductor recto el grueso del “matching layer” se calcula con la expresión  $\lambda/4$  [31], sin embargo, para un transductor angulado se utiliza la siguiente expresión [31]:

$$d_m = (2n-1) \lambda_0 / 4(\eta_m - \text{sen}^2 \theta_i)^{0.5} \quad \text{Ec. (16)}$$

donde:

$d_m$  = Grueso del “matching layer” (rexolite)

$\lambda_0$  = Longitud de onda de la señal ultrasónica en el rexolite ( $1500 / 8000000$ ) = 0.001875m

$\eta_m$  = Índice de refracción del rexolite (= 1.6 )

$\theta_i$  = Angulo del transductor con respecto a la vertical ( $30^\circ$ )

$2n-1$  = Factor de máximo en la onda (n es un entero positivo)

Realizando los cálculos se tiene que:

$$d_m = (2n-1) 0.001875 / 4(1.6 - \text{sen}^2 30) ^{0.5} = (2n-1)0.000403\text{m}$$

$$= (2n-1)0.403\text{mm}$$

para n=1	$d_m = 0.403\text{mm}$
para n=2	$d_m = 1.21\text{mm}$
para n=3	$d_m = 2.017\text{mm}$
para n=4	$d_m = 2.82\text{mm}$
para n=5	$d_m = 3.62\text{mm}$
<b>para n=6</b>	<b><math>d_m = 4.43\text{mm}</math></b>
para n=7	$d_m = 5.23\text{mm}$
para n=8	$d_m = 6.045\text{mm}$

De estos cálculos realizados se eligió la de 4.43mm de grueso porque es la que cumple con la dimensión de diámetro del doble de la carcasa metálica, y es el mínimo material para la máxima transferencia de energía. Con esas dimensiones se dibujaron los planos (ver figuras 2.18 y 2.19).

Para conseguir que existiera la máxima estabilidad y superficie de contacto a la hora de pegar la capa de acoplamiento (Rexolite) del transductor, fue necesario construir otro aditamento como soporte, el cual fue colocado fuera de la carcasa (ver figura 2.24).



**Figura 2.24.** Capa de rexolite con su soporte

#### II.2.4. Carcasa y soporte para el rexolite

Se metió el tubo de plástico con todo y cables en el tubo de metal, teniendo mucho cuidado de no presionar la cerámica, para evitar su posible fractura. Enseguida se pegó a la carcasa el soporte de rexolite como se muestra en la figura 2.25. Éste pegado se realizó con cianocrilato [32].



**Figura 2.25.** Carcasa completa con la cerámica (izquierda), y carcasa completa con la cerámica y el soporte (derecha).

### II.2.5. Pegado de la capa de rexolite.

El siguiente paso fue pegar la capa de rexolite, que serviría como capa de acoplamiento (Matching layer), el cual fue la parte crítica de este trabajo de tesis, ya que si no se hace un buen pegado, no habrá transferencia de energía entre la cerámica y el medio, además de existir atenuación y corrimiento de la frecuencia de oscilación. Lo más importante en este pegado es que toda la superficie de la cerámica debe estar en contacto con la capa de rexolite, por lo cual es importante que no queden burbujas de aire al hacer el pegado, ya que se producen pérdidas en la amplitud de la señal. Se debe maniobrar rápidamente, ya que el tiempo de secado del cianocrilato es muy corto, prácticamente desde el primer contacto, el rexolite queda pegado, lo que provoca que se tenga cuidado y precisión al pegar.

Antes de efectuar el pegado se verificó que la tapa coincidiera exactamente con la cara del transductor y que el punto de soldadura encajara en la ranura y de no ser así, entonces habría que modificar la ranura de tal modo que pueda encajar adecuadamente.

El proceso de pegado del rexolite se hizo de forma manual aplicando una capa muy delgada de cianocrilato a la cara de la tapa de rexolite donde se encuentra la ranura, posteriormente se colocó la tapa con la ranura hacia arriba y el transductor con la cerámica apuntando hacia abajo para evitar escurrimientos del pegamento, y se fueron juntando lentamente para verificar que la ranura coincidiera con el punto de soldadura y cuando estaban lo suficientemente cerca se unieron en un solo movimiento. El pegado debe quedar a la primera, porque de lo contrario el intentar mover cualquiera de las partes puede ocasionar una ruptura en la cerámica.



**Figura 2.26.** Capa de Rexolite pegada vista de perfil

Una vez concluida esta etapa, el transductor queda listo para la parte final (colocar los conectores y terminales), en las figuras 2.26 y 2.27 se muestra el transductor en su fase casi final.



**Figura 2.27.** Capa de Rexolite pegada vista de arriba

Finalmente, para completar el transductor, se puso termofit en la terminal de la carcasa y al cable coaxial se le soldó un conector tipo plug y de esta manera el transductor está terminado.



**Figura 2.28.** Termofit (izquierda) y conector (derecha)



*Figura 2.29. Transductor completo*

# CAPÍTULO III

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### III.1. Modelo Teórico

Un circuito resonante es un circuito formado por una bobina L y un capacitor C, en donde estos elementos reactivos transfieren energía entre si. En un circuito RLC hay una frecuencia para la cual se produce un fenómeno de resonancia eléctrica en donde la impedancia es mínima y puramente resistiva, es decir, se igualan y anulan las reactancias capacitiva e inductiva y el circuito está en fase [33].

En un circuito resonante, la impedancia total (Z) está dada por:

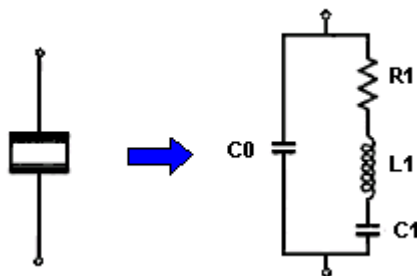
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde:

R= Resistencia       $X_L$ = Reactancia Inductiva       $X_C$ = Reactancia Capacitiva

y siendo,  $X_L = X_C$  en la frecuencia de resonancia, entonces  $Z = \sqrt{R^2}$ , y así  $Z = R$

De acuerdo al modelo eléctrico de un transductor presentado en el capítulo 1, se diseñó un circuito RLC cuya frecuencia de resonancia es de 8MHz.



**Figura 3.1.** Circuito eléctrico equivalente del transductor

Se propone un valor de capacitor comercial  $C_1$ , en este caso se usó uno de 100 [pF] y una resistencia de 47 [ $\Omega$ ] sugerido de la literatura [33], de estos valores se calcula la inductancia mediante la ecuación (18). El valor de  $C_0$  debe ser mucho mayor que el de  $C_1$  para que el valor de antirresonancia esté cercano al de resonancia [17].

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

Ec. (18)

Para 8MHz se despeja  $L_1$ :

$$L_1 = \frac{1}{C_1 (2\pi f_0)^2} = 4 \mu\text{H}$$

Para encontrar el valor de frecuencia de resonancia se usa el generador de funciones y se varía la frecuencia hasta encontrar la amplitud mínima en el osciloscopio. Ese valor de frecuencia es el de resonancia del circuito que de acuerdo al modelo teórico es de 8 MHz como se observa en la figura 3.3.

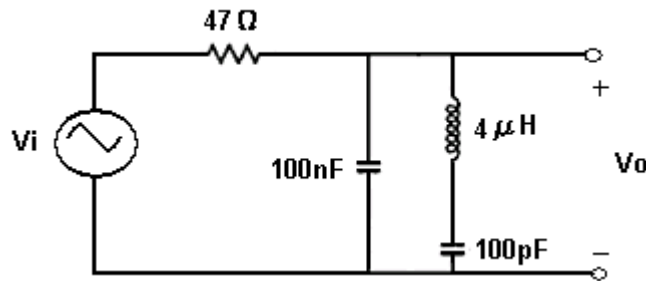


Figura 3.2. Prueba del circuito eléctrico equivalente a 8MHz

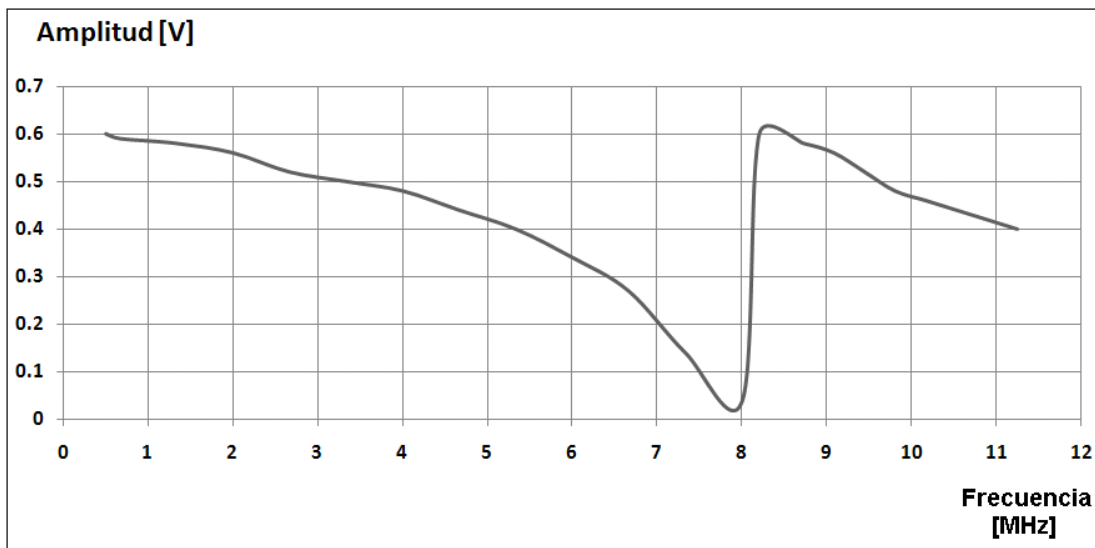


Figura 3.3. Frecuencia de resonancia del circuito del modelo teórico



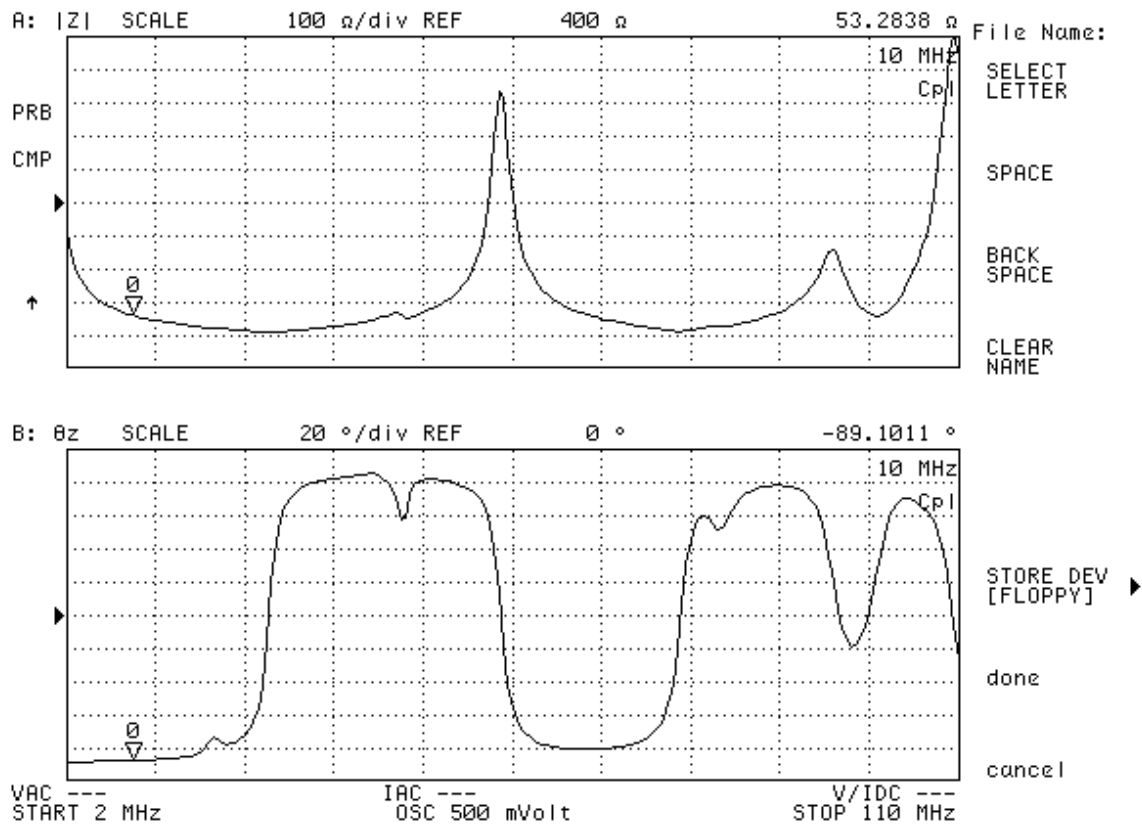
## III.2. Caracterización de los transductores

La caracterización del transductor se realizó a través de un analizador de impedancias de la marca *Agilent 4294* para determinar la frecuencia de operación y la señal se observó en un osciloscopio de la marca *Tektronik TDS420*. Esta prueba se hizo en el departamento de Ingeniería Eléctrica, sección Bioelectrónica del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional.

La frecuencia de barrido fue de 2 a 110 MHz, y los resultados son los siguientes:

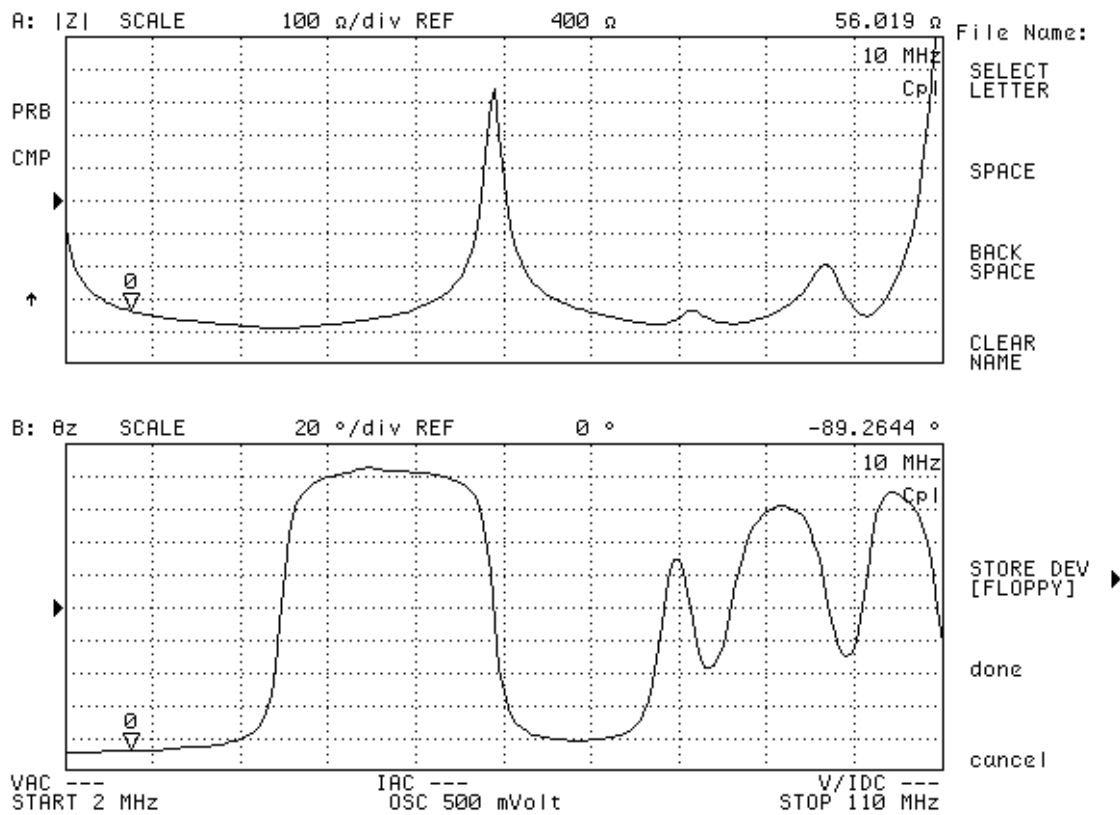
### III.2.1. Impedancia del transductor con electrodos soldados.

Los parámetros a medir son la impedancia del transductor (magnitud y fase) a diferentes frecuencias.



**Figura 3.4.** Gráficas de la impedancia vs frecuencia del transductor soldado magnitud (arriba) y fase (abajo)

### III.2.2. Impedancia del transductor con electrodos pegados con Epoxi.



**Figura 3.5.** Gráficas de la impedancia vs frecuencia del transductor pegado con Epoxy, magnitud (arriba) y fase (abajo)

Se considera que al colocar los electrodos en la cerámica piezoeléctrica, una parte de ella sufre cambios físicos (pérdida de área efectiva), lo que lleva a que haya un corrimiento en la frecuencia.

Las gráficas de impedancia de ambos transductores indican que la menor impedancia se presenta en un valor de frecuencia de 10 MHz aproximadamente, el cual es un valor incongruente, ya que no es posible que una cerámica con una frecuencia natural de 8 MHz oscile y proporcione una respuesta a 10 MHz porque durante el proceso de construcción, como fue el pegado de electrodos a la cerámica, el espesor de la capa de acoplamiento (rexolite) y su pegado con cianocrilato, se esperaría una disminución en la frecuencia.

Para solucionar verificar los resultados obtenidos se optó por despegar el “matching” (Rexolite) del transductor y se observó que la cerámica presentó una fractura (ver figura 3.6).



**Figura 3.6.** Cerámica fracturada después de despegar el “matching” (Rexolite) del transductor.

La técnica empleada para colocar el “matching” en el transductor no fue la correcta, debido a que provocó la fractura de las cerámicas piezoeléctricas de ambos transductores, por lo que se decidió probar la respuesta del transductor paso a paso.

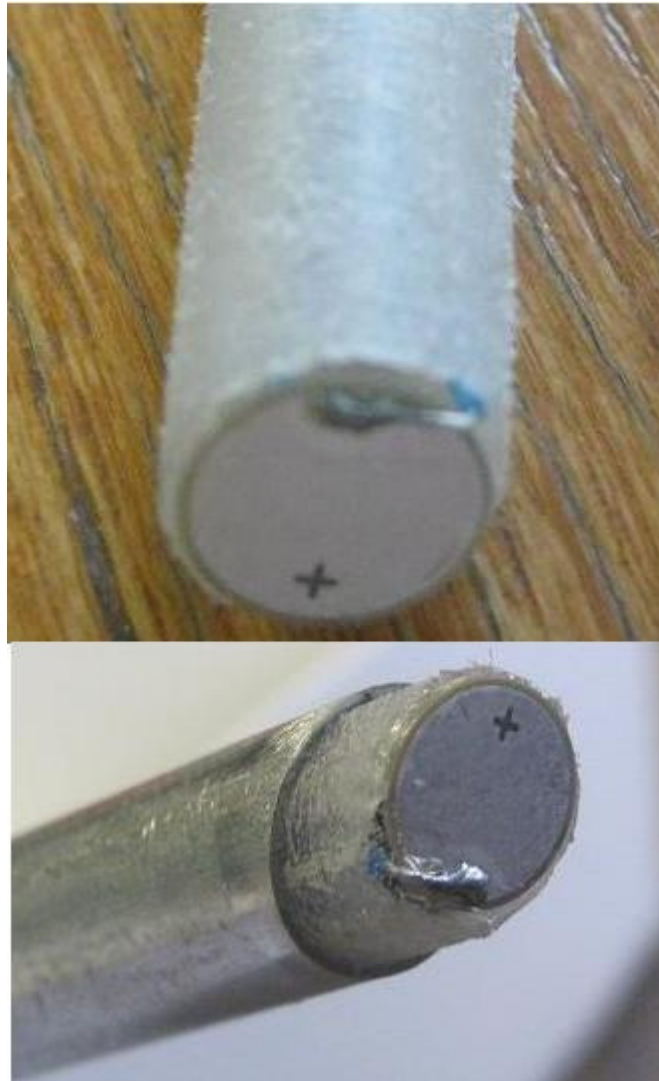
Para este fin se realizó la construcción de otro transductor, evitando colocar el “matching” para comparar resultados.

### **III.3. Construcción del transductor sin “Matching”.**

El nuevo transductor se hizo con una cerámica PIC255 de 8 MHz [25] (ver anexo A) de forma redonda de dimensiones 6.5mm de diámetro x 0.75mm de espesor. El proceso de construcción fue el mismo que se empleó para los transductores anteriores y se empleó el método de electrodos soldados.



**Figura 3.7.** Cerámica redonda PIC 255



**Figura 3.8.** Cerámica con su carcasa

#### **III.4. Caracterización del transductor sin “Matching”**

La caracterización del transductor sin “matching” se llevó a cabo mediante dos pruebas: Una haciendo un barrido de frecuencia utilizando el generador de funciones y la otra a través del analizador de impedancias mencionado anteriormente.

Los resultados son los siguientes:

### III.4.1. Prueba de barrido de frecuencia utilizando generador de funciones.

Esta prueba consiste en obtener la frecuencia de resonancia de manera experimental, para ello sustituimos el circuito equivalente por el transductor real, es decir, se utiliza el generador de funciones y se varía la frecuencia hasta alcanzar el valor mínimo de la amplitud de  $V_o$ , y por ende, la menor impedancia del transductor, en la cual está la frecuencia de resonancia.

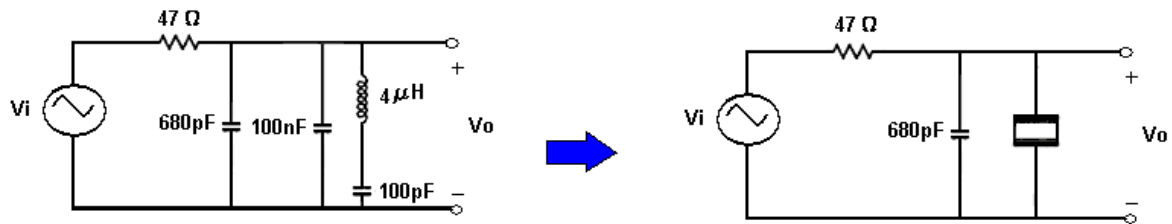


Figura 3.9. Sustitución del modelo teórico por el transductor real.

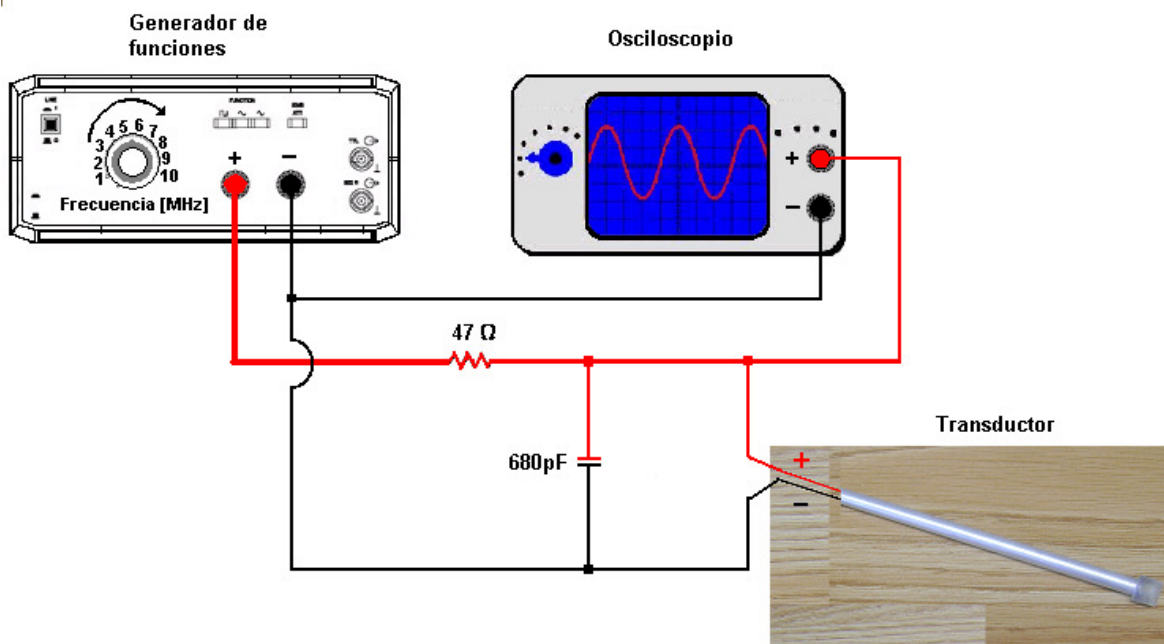


Figura 3.10. Esquema de conexiones para encontrar la frecuencia de resonancia del transductor de manera experimental.

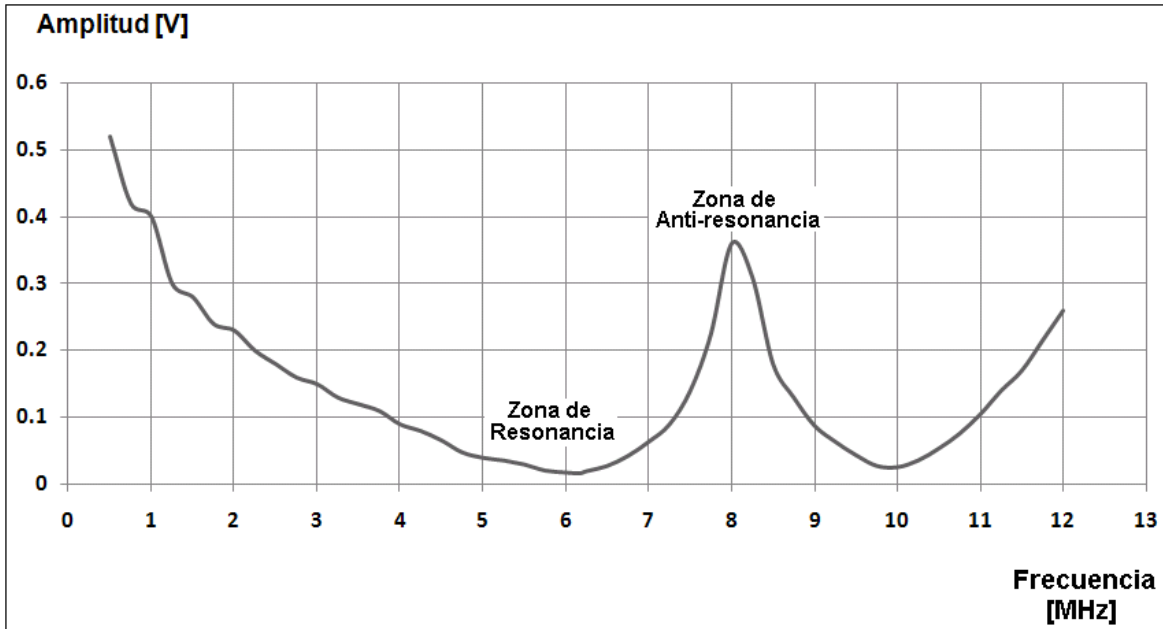


Figura 3.11. Frecuencia de resonancia del transductor sin "Matching" en un barrido de 1 a 12 MHz

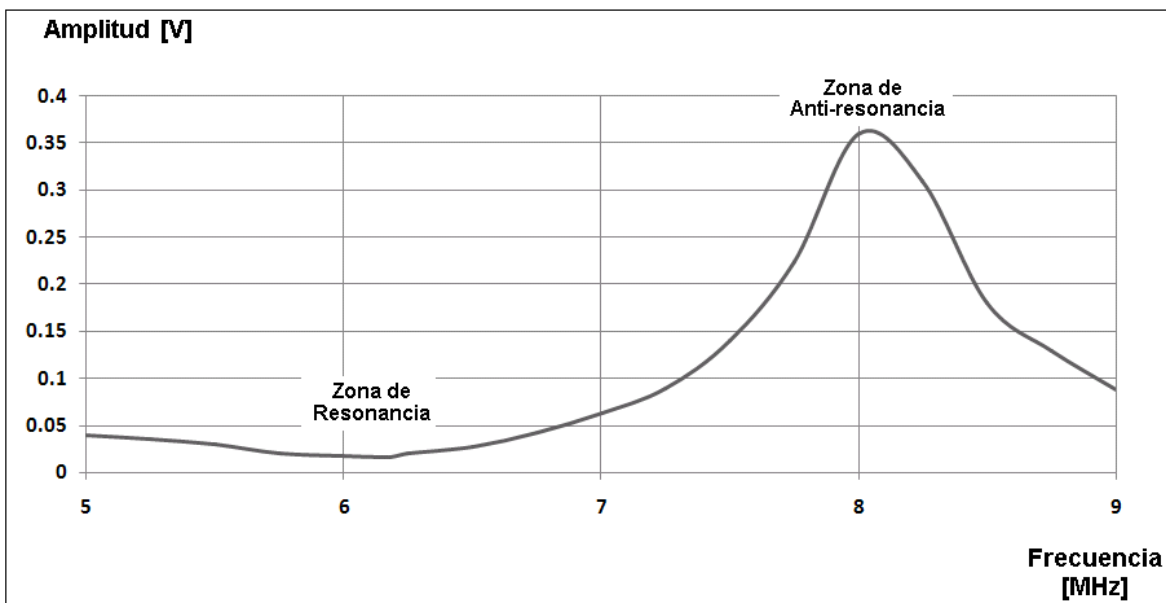
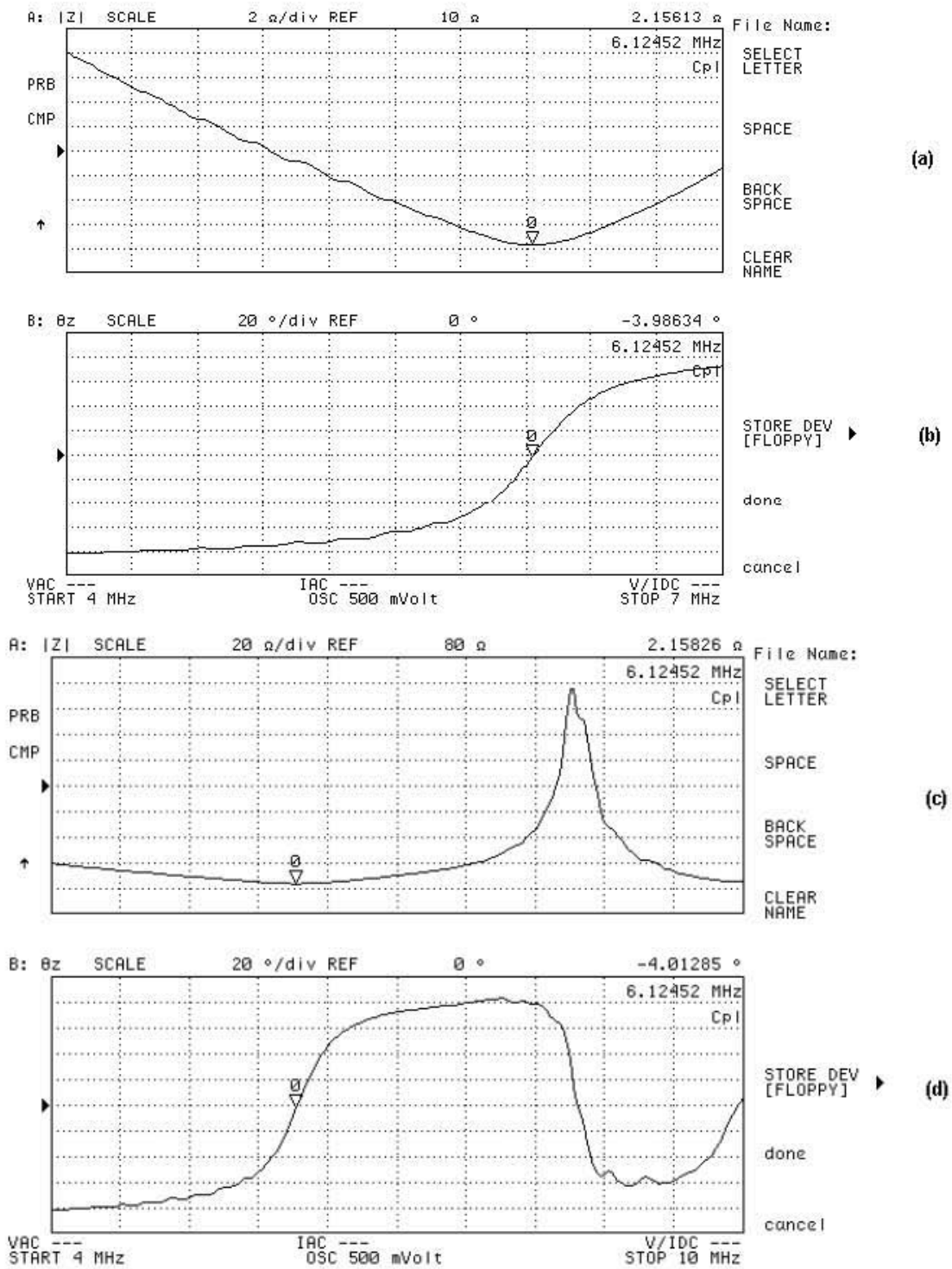


Figura 3.12. Frecuencia de resonancia del transductor sin "Matching" en un barrido de 5 a 9 MHz

### III.4.2. Impedancia del transductor sin "Matching".



**Figura 3.9.** Gráficas de la impedancia vs frecuencia del transductor sin "matching".  
 a) y b) corresponden a magnitud y fase a un barrido de 4 a 7 MHz y c) y d) corresponden a magnitud y fase a un barrido de 4 a 10 MHz respectivamente.

Como se observa, el transductor tiene una frecuencia de resonancia por encima de los 6 MHz, sin la capa de "matching", lo cual es una respuesta congruente ya que hubo un corrimiento de frecuencia como se mencionó anteriormente.

Para la conclusión del transductor se seguirá utilizando Rexolite como material de "Matching", debido a sus propiedades acústicas observadas en el Anexo C, sin embargo, la técnica de pegado de este material debe ser replanteada para lograr un mejor acoplamiento, y evitar la fractura de la cerámica piezoeléctrica.



# CAPÍTULO IV

## CONCLUSIONES

Se diseñaron y construyeron 3 transductores, dos de ellos con cerámicas cuadradas y uno más con cerámica circular. En la construcción de estos transductores se utilizaron dos técnicas diferentes de construcción, pegado y soldado.

Uno de los objetivos de este trabajo fue construir uno o varios transductores con un ángulo no mayor a 60 grados, esto con el objeto de proporcionar al cirujano u operador un transductor plano de fácil maniobrabilidad.

Otro de los objetivos importantes fue el utilizar un nuevo material para acoplamiento acústico, Rexolite, el cual tiene una impedancia acústica muy similar a la del agua y por ende a la del cuerpo humano.

Los tres transductores fueron probados utilizando la electrónica asociada para la aplicación ó aplicaciones médicas, de igual manera los transductores fueron probados utilizando el simulador (phantom) que se emplea en el laboratorio para la medición Doppler de flujo sanguíneo. Cabe señalar que durante la realización de estas pruebas se detectaron problemas con los dos primeros transductores, lo cual se confirmó al momento de su caracterización.

En base a los resultados obtenidos, sobre todo analizando las gráficas de impedancia vs frecuencia podemos concluir que todos los transductores cumplieron con los objetivos de diseño y que a pesar de que los dos primeros transductores construidos en los cuales se utilizó el Rexolite como acoplamiento acústico presentaron problemas al momento de su caracterización, se comprobó que esta problemática se debió a la excesiva presión aplicada al momento de colocar la capa de Rexolite y no en si al diseño de éstos.

Es muy importante mencionar que se construyó un tercer transductor con el objeto de justificar el mal funcionamiento de los dos anteriores al momento de su caracterización.

A partir de las gráficas de impedancia vs frecuencia del tercer transductor (sin capa de Rexolite) se puede apreciar que la respuesta obtenida es muy buena, ya que el valor de la frecuencia de resonancia obtenida fue de 6.12 MHz siendo este congruente con el valor esperado. Este valor de frecuencia se obtuvo de dos maneras distintas, primeramente haciendo un barrido de frecuencia utilizando un generador de funciones y posteriormente un analizador de impedancias.

Otro aspecto importante es la incorporación del acoplamiento acústico (Rexolite) al transductor, la frecuencia final de operación tendrá un mayor corrimiento al presentado en los resultados de este trabajo, lo cual tendrá que ser corroborado cuando sea corregida la actual técnica de pegado del acoplamiento acústico, garantizando que no existe fractura alguna en la cerámica piezoeléctrica.

Finalmente y en forma general podemos concluir que el objetivo de diseño, construcción y caracterización de los transductores presentados en este trabajo se cumplió, independientemente de las fallas encontradas y debidas principalmente a la deficiencia en la técnica de pegado del acoplamiento acústico (Rexolite) y la cerámica del transductor.

# ANEXOS

## Anexo A. Especificaciones de la cerámica.

La cerámica utilizada fue la **PIC 255**, cuyas especificaciones son las siguientes:

### Piezoceramic Components

#### Dimensions

##### Geometric manufacturing limits

The **maximum dimensions** of bulk ceramic components are determined by the equipment and instruments available.

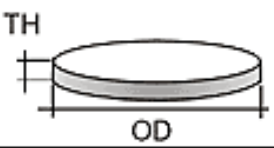
**Max. diameter** OD 80 mm  
**Max. length / height** L 70 mm  
**Max. thickness** (polarization) H 20 mm

The **minimum dimensions** are determined by the physical and processing limits, e. g. the minimum thickness is determined by the mechanical strength of the ceramic during machining.

**Min. diameter** OD 1.50 mm  
**Min. thickness** TH 0.15mm

The geometric manufacturing limits are shown in the following tables for different combinations of dimensions:

#### CERÁMICA REDONDA

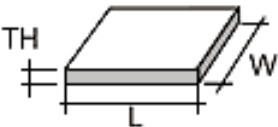
	Plate / Rod	
	TH (mm)	OD (mm)
max. thickness	30	10 to 80
	20	5 to 80
	10	2 to 5
min. thickness	0.15	2 to 20
	0.3	2 to 60
	0.5	2 to 80

Preferred dimensions: disks by size

Thickness TH / mm	OD / mm									
	3	5	10	16	20	25	35	40	45	50
0.20										
0.25										
0.30										
0.40										
0.50										
0.75										
1.00										
2.00										
3.00										
4.00										
5.00										
10.00										
20.00										

Electrode system options: fired silver (thick film) or thin film (CuNi, Au, etc.)

### CERÁMICA CUADRADA

	Plate / Block		
	TH (mm)	L (mm)	W (mm)
max. thickness	40	1 to 80	1 to 20
	40	1 to 60	1 to 60
min. thickness	0.15	1 to 20	1 to 20
	0.3	1 to 80	1 to 30
	0.5	1 to 60	1 to 60

Preferred dimensions: Plates

Thickness	L x W / mm <sup>2</sup>									
	4x4	5x5	10x10	15x15	20x20	25x20	25x25	50x30	50x50	70x25
mm										
0.20										
0.25										
0.30										
0.40										
0.50										
0.75										
1.00										
2.00										
3.00										
4.00										
5.00										
10.00										
20.00										

Electrode system options: fired silver or thin film layer (CuNi or Au)

## Application Notes

### Thick-film electrodes

Screen printing is a standard procedure for applying metallic electrodes to piezo ceramic. Various silver pastes are used in this process. After the screen printing, these pastes are baked at temperatures above 500 °C and adhesion of the electrodes is obtained by the burning on of the glass frit contained. The typical electrode thickness is around 10 µm. With thin ceramic plates, the effect of the glass frit must be taken into account. The nature of these thick-film electrodes generally leads to a reduction of the piezoelectric parameters.

Electrode adhesion is around 5 Mpa.

### Thin-film electrodes

Thin-film electrodes are applied by the the latest sputtering techniques. The typical thickness of the metallization is in the range of 1 µm.

Shear elements, which are metallized in the polarized state, are always manufactured with thin-film electrodes.

PI Ceramic has high-productivity sputtering equipment which facilitates the application of electrodes made of metal alloys, preferably CuNi composites and noble metals such as gold. The achievable bond-strength values of the electrodes are similar to those of the thick-film electrodes.

### Soldering instructions for users




Soldering is the usual way of making electrical contact with piezoceramic components. All of our standard metallizations are compatible with the use of lead-free solders. We recommend, for example, the use of a solder with the composition Sn 95.5% Ag 3.8% Cu 0.7%. All soldered contacts must be point contacts, and the specified soldering temperatures must be respected. The soldering time must be as brief as possible. Quick, punctual soldering at temperatures above the Curie temperature does not result in significant depolarization losses or degradation of the piezoelectric parameters.

### Polarity labeling

The positive electrode is the one that is labelled (marked). This is done with a dot or a cross on the surface of the electrode or by a (reddish) coloring of the electrode itself.

## Standard tolerances

Parameter	Symbol	Tolerance
Length / Width	L / W	< 15 mm: ± 0.15 mm < 20 mm: ± 0.20 mm < 40 mm: ± 0.25 mm < 80 mm: ± 0.30 mm
Diameter, outside	OD	< 15 mm: ± 0.15 mm < 20 mm: ± 0.20 mm
Diameter, inside	ID	< 40 mm: ± 0.25 mm < 80 mm: ± 0.30 mm
Thickness	TH	< 10 mm: ± 0.05 mm < 20 mm: ± 0.10 mm < 40 mm: ± 0.15 mm < 80 mm: ± 0.20 mm
Dimensions, (as fired): ± 0.3 mm or ± 3%		

Deviation from flatness		< 0.02 mm, small bending of thin disks or plates is not taken into account!
Deviation from the parallelism		< 0.02 mm
Deviation from the concentricity		< 0.2 mm
Frequency tolerances		± 5% to 2 MHz ± 10% above 2 MHz
Capacitance tolerances		± 20%

## Typical Parameters of Piezoelectric Ceramics

Material type			PIC 151	PIC 255	PIC 155	PIC 153	PIC 152	PIC 181	PIC 141	PIC 241	PIC 300	PIC 110
<b>Parameter</b>												
<b>Physical and Dielectric Properties</b>												
Density	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )		7,80	7,80	7,80	7,60	7,70	7,80	7,80	7,80	7,80	5,50
Curie Temperature	T <sub>c</sub> (°C)		250	350	345	185	340	330	295	270	370	150
Permittivity	in the polarization direction	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	2400	1750	1450	4200	1350	1200	1250	1650	1050	950
	perpendicular to the polarity	$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1980	1650	1400			1500	1500	1550	950	
Dielectric loss factor	$\tan \delta$ (10 <sup>-3</sup> )		20	20	20	30	15	3	5	5	3	15
<b>Electromechanical Properties</b>												
Coupling factors	k <sub>p</sub>		0,62	0,62	0,62	0,62	0,48	0,56	0,55	0,50	0,48	0,30
	k <sub>t</sub>		0,53	0,47	0,48			0,46	0,48	0,46	0,43	0,42
	k <sub>31</sub>		0,38	0,35	0,35			0,32	0,31	0,32	0,25	0,18
	k <sub>33</sub>		0,69	0,69	0,69		0,58	0,66	0,66	0,64	0,46	
	k <sub>15</sub>			0,66				0,63	0,67	0,63	0,32	
Piezoelectric charge constants	d <sub>31</sub>		-210	-180	-165			-120	-140	-130	-80	-50
	d <sub>33</sub>	(10 <sup>-12</sup> C/N)	500	400	360	600	300	265	310	290	155	120
	d <sub>15</sub>			550				475	475	265	155	
Piezoelectric voltage constants	g <sub>31</sub>	(10 <sup>-3</sup> Vm/N)	-11,5	-11,3	-12,9			-11,2	-13,1	-9,8	-9,5	
	g <sub>33</sub>		22	25	27	16	25	25	29	21	16	-11,9
<b>Acousto-mechanical properties</b>												
Frequency constants	N <sub>p</sub>	(Hzm)	1950	2000	1960	1960	2250	2270	2250	2190	2350	3150
	N <sub>1</sub>		1500	1420	1500			1640	1610	1590	1700	2300
	N <sub>3</sub>		1750		1780			2010	1925	1550	1700	2500
	N <sub>t</sub>		1950	2000	1990	1960	1920	2110	2060	2140	2100	
Elastic constants (compliance)	S <sub>11</sub> E	(10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N)	15,0	16,1	15,6			11,8	12,4	12,6	11,1	
	S <sub>33</sub> E		19,0	20,7	19,7			14,2	13,0	14,3	11,8	
Elastic constants (stiffness)	C <sub>33</sub> <sup>D</sup>	(10 <sup>10</sup> N/m <sup>2</sup> )	10,0		11,1			16,6	15,8	13,8	16,4	
Mechanical quality factor	Q <sub>m</sub>		100	80	80	50	100	2000	1500	1200	1400	250
<b>Temperature stability</b>												
Temperature coefficient of $\epsilon_{33}^T$	TK $\epsilon_{33}^T$ (x10 <sup>-3</sup> /K)		6	4	6	5	2	3	5		2	



(in the range -20°C up to +125°C)											
<b>Aging stability</b> (relative change of the parameter per decade in %)											
Relative dielectric constant	$C_\epsilon$	(%)		-1,0	-2,0				-4,0		-5,0
Coupling factor	$C_K$			-1,0	-2,0				-2,0		-8,0

**Tabla A1.** Especificaciones de la cerámica piezoeléctrica PIC 255 [25]

## Anexo B. Especificaciones del Epoxi Conductor

Especificación	Método de prueba	Resultados
<b>Propiedades Mecánicas</b>		
Resistencia a la tracción	ASTM-D-638-02A	911 psi
	ASTM-D-638-02A	0,3%
Resistencia a la compresión	ASTM-D-695-02A	1100 PSI
Resistencia a la flexión	ASTM-D-790-03	2500 psi
Resistencia al corte	ASTM-D-732-02	234 psi

Viga en voladizo (IZOD) Impacto	ASTM-D-256-02 E1	0,39 m pies lb / in
---------------------------------	------------------	---------------------

### Propiedades eléctricas

Volumen de resistividad a 25 ° C	MIL-STD-883E Aviso de 3, método 5011.4, los apartados 3.5.8, 3.8.11.1 (cubiertos bajo A2LA Accreditation)	0,38 ohm · cm
----------------------------------	---	---------------

### Resistencia Eléctrica (En ohmios)

Tamaño de la muestra	3mm x 3mm x 1mm
Base material	tapa de plástico

#### Resultados:

El material no polimerizado	No hay lectura
El calor curado (A 65 ° C durante 15 minutos)	0,8 ohmios
Curado al aire (A temperatura ambiente. Por 5 horas)	

### Resistencia Eléctrica (En ohmios)

Tamaño de la muestra	30mm x 25mm x 1mm
Base material	De fibra de vidrio epoxi

#### Resultados:

El material no polimerizado	No hay lectura
El calor curado (A 65 ° C durante 15 minutos)	2,5 ohmios
Curado al aire	4 0 a 6 0 ohmios

(A temperatura ambiente. Por 5 horas)

### Propiedades térmicas

La expansión térmica                      ASTM-E-831-03                      79.3 mm/10<sup>6</sup> mm

Conductividad Térmica                      ASTM-C-518                      0.578 W / m · K

Temperatura de transición vítrea                      ASTM-D-3418                      46 ° C

### Cura Lista

Cura de aire a 24 ° C (75 ° F)                      5 horas

Calor Cure:

65 ° C / 149 ° F                      15 minutos

90 ° C / 194 ° F                      12 minutos

125 ° C / 257 ° F                      7 minutos

150 ° C / 302 ° F                      5 minutos

Tiempo de trabajo a 22 ° C                      10 minutos

Temperatura de funcionamiento mínima.                      -30 ° C (-22 ° F)

Máxima temperatura de funcionamiento.                      150 ° C (302 ° F)

### Especificaciones generales

Proporción de mezcla

Densidad                      ASTM-D-256-02 E1                      2,34 g / cm<sup>3</sup>

Color (material de curación)                      Del gris de plata

### Los tamaños disponibles

Número de catálogo	Los tamaños disponibles	Descripción
8.331-14G	14 g (0.35 oz)	Dos jeringas 7g, 3 ml cada uno
8.331-454g	454 g (1 libra)	

**Tabla B1.** Especificaciones del Epoxi conductor [26]

## Anexo C. Especificaciones del Rexolite 1422

<b>TYPICAL PROPERTIES of REXOLITE®</b>			
<b>ASTM or UL test</b>	<b>Property</b>	<b>Rexolite® 1422 unfilled</b>	<b>Rexolite® 2300 glass-filled</b>
<b>PHYSICAL</b>			
D792	Density (lb/in <sup>3</sup> ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.038 1.05	0.042 1.11
D570	Water Absorption, 24 hrs (%)	0.0008	0.10
<b>MECHANICAL</b>			
D638	Tensile Strength (psi)	9,000	9,500
D638	Flexural Strength (psi)	11,500	10,500
D256	IZOD Notched Impact (ft-lb/in)	0.3	0.75
<b>THERMAL</b>			
D696	Coefficient of Linear Thermal Expansion (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	3.8	3.2
D648	Recommended Operating Temperature Range (°F) (°C)	-76 to +212 -60 to +100	-103 to +212 -75 to +100
C177	Thermal Conductivity (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	1.01 3.5	1.45 5.0
<b>ELECTRICAL</b>			
D149	Dielectric Strength (V/mil) short time, 1/8" thick	500	500
D150	Dielectric Constant (1 MHz to 500 GHz)	2.53	2.62
D150	Dissipation Factor at 1 MHz at 10 MHz at 10 GHz	0.00012 0.00025 0.00066	0.0004 0.0005 0.0014
D257	Surface Resistivity (ohm-cm)at 50% RH	>10 <sup>14</sup>	5 x 10 <sup>12</sup>
D257	Volume Resistivity (ohm-cm)at 50% RH	>10 <sup>16</sup>	5 x 10 <sup>13</sup>
<b>OPTICAL AND ACOUSTIC</b>			
-	Acoustic Impedance	2.5	-
-	Velocity of Sound (in/sec)	93,000	-
-	Optical Transmittance, Visible Light	87%	-
-	Refractive Index @ 589 nM @ 486 nM @ 656 nM	1.59 1.604 1.585	- - -
-	Velocity of Sound (in/sec)	93,000	-

**Tabla C1. Especificaciones del Rexolite 1422 [28]**

## Anexo D. Características del Cianocrilato

El nombre **cianoacrilato** [32] se utiliza para designar un conjunto de sustancias usadas como adhesivos de fraguado rápido, por lo que se las conoce también como supercementos. Se emplean para reparaciones domésticas y en la industria. Los dos tipos de cianoacrilatos usados actualmente se distinguen por poseer un éster de metilo o de etilo en el monómero.

### Características

El cianoacrilato es un adhesivo monocomponente. Fragua en pocos segundos mediante agua, que puede provenir de la humedad ambiente. Sin embargo, un exceso de agua (debido a una alta humedad, ambiental o en la superficies de las piezas) puede estropear la unión.

### General

Sinónimos: 2-cianoacrilato de etilo, la CEPA, -2-propenoico éster etílico del ácido 2-ciano, los nombres comerciales incluidos numerosos 910EM, ee-as, alfa aromática d, max negro, CN4, Cemedine 3000rs CN2, pegamento Krazy, Permabond 105, pegamento, Permabond 200, agarre pro 4000, Superbond 420, CT 200, CT 201, 201 cyanolite

Uso: El componente principal de los pegamentos de cianoacrilato, cuya composición suele ser 91 cianoacrilato de etilo%, 9% polimetilmetacrilato, <0,5% de hidroquinona y un rastro de ácido sulfónico orgánico. Ambos pegamentos Krazy y pegamento Super se cree que son prácticamente el 100% la CEPA.

Fórmula molecular:  $C_6H_7NO_2$

CAS: 7085-85-0

### Datos físicos

Aspecto: líquido incoloro con un olor característico:

Punto de fusión: -22 C

Punto de ebullición: 54 a 56 C a 3 mm de Hg

Densidad del vapor:

Presión de vapor:

Densidad ( $g\ cm^{-3}$ ): 1.06

Punto de inflamación: 181 F

Límites de explosión:

Temperatura de autoignición:

Solubilidad en agua:

### Estabilidad

Inestable - polimeriza rápidamente, especialmente en presencia de humedad.

Combustibles. Incompatible con agentes oxidantes fuertes, la humedad.

### Toxicología

Nocivo si se ingiere. Puede ser nocivo si es inhalado o en contacto con la piel. Los riesgos físicos de polimerización que lleva a daño en la piel, probablemente mayores que sus riesgos de salud que pudieran surgir por la ingestión de este material.

# REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.piezo.com/tech4history.html>
- [2] <http://www.worldlingo.com/ma/enwiki/es/Piezoelectricity/3>
- [3] [https://www.ucursos.cl/ingenieria/2009/1/EI2001/11/material\\_docente/previsualizar?id\\_material=228954](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2009/1/EI2001/11/material_docente/previsualizar?id_material=228954)
- [4] <http://www.laflecha.net/canales/ciencia/noticias/dan-los-primeros-pasos-para-crear-materiales-piezoelectricos-de-forma-artificial>
- [5] [http://www.peru-v.com/ingenieria/estructuras\\_inteligentes/materiales\\_piezoelectricos.htm](http://www.peru-v.com/ingenieria/estructuras_inteligentes/materiales_piezoelectricos.htm)
- [6] <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2009/05/06/el-efecto-piezoelectrico/>
- [7] <http://personal.telefonica.terra.es/web/jcvilchesp/cuerda/cu130.htm>
- [8] Askeland, Donald ; "Ciencia e ingeniería de los materiales" Ed. Thomson, 4ª Edición, pag. 833
- [9] Portis, A.M. "Campos Electromagnéticos", Reverté, España 1985
- [10] Llinares, J. & Page, A. "Electromagnetismo y semiconductores", Universidad Politécnica de Valencia, 1997, págs.(235-238).
- [11] Kittel, Charles. "Introducción a la física del estado sólido"; Ed. Reverté, 3ª Edición, España, 1997, pag.465.
- [12] Payas Areny, Ramón "Sensores y Acondicionadores de la señal", MARCOMBO, 4ª Edición, Barcelona, 2003.
- [13] Uchino, Kenji & Giniewicz, Jayne, R; "Micromechatronics"; Marcel Dekker, USA, 2003
- [14] Hussey, Robert John & Hussey, Bob & Wilson, Jo; "Advanced Technical Ceramics Directory and Databook"; Ed. Chapman & Hall; 1ª Edición; Gran Bretaña 1998; pags 435, 436
- [15] Gallego Juárez, Juan; "Transductores Ultrasónicos de Potencia"; Instituto de Acústica CSIC;
- [16] [http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.keramverband.de/pic/ebild25.gif&imgrefurl=http://www.keramverband.de/brevier\\_engl/3/4/2/3\\_4\\_2\\_8.htm&usq=\\_\\_MBvXUU\\_CR8E6fpGeBqnpWlHmG2w=&h=314&w=500&sz=14&hl=es&start=5&um=1&tbnid=YB4FAqZzQ-aBiM:&tbnh=82&tbnw=130&prev=/images%3Fq%3Dshapes%2Bceramics%2Bvibration%252Bmodes%26hl%3Des%26um%3D1](http://images.google.com.mx/imgres?imgurl=http://www.keramverband.de/pic/ebild25.gif&imgrefurl=http://www.keramverband.de/brevier_engl/3/4/2/3_4_2_8.htm&usq=__MBvXUU_CR8E6fpGeBqnpWlHmG2w=&h=314&w=500&sz=14&hl=es&start=5&um=1&tbnid=YB4FAqZzQ-aBiM:&tbnh=82&tbnw=130&prev=/images%3Fq%3Dshapes%2Bceramics%2Bvibration%252Bmodes%26hl%3Des%26um%3D1)
- [17] Aranú Vives, Antonio & Ferrero, J. María; "Sistemas electrónicos de comunicaciones II"; Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia; España; 2000; Pág. 63

- [18] Ceres, R. & Rocon, E. & Ochoa, P.; "Aplicación de sensores piezoeléctricos cerámicos a la caracterización biomecánica"; Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, Vol. 43, No 3, 2004, Págs. 668-673.
- [19] Faguaga, Martín & Machado, Gabriel & Moreno-Gobbi, Ariel; "Diseño, fabricación y caracterización de transductores piezoeléctricos de ultrasonido para su aplicación en END"; Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de la República Oriental del Uruguay CP, Montevideo, Uruguay
- [20] Castillo, M. & Acevedo, P. & Moreno, E.; "Análisis de pérdidas en transductores ultrasónicos"; Centro de ultrasónica, ICIMAF, CITMA, La habana, Cuba.
- [21] Lorente Gassó, José; "Transductores de ultrasonidos"
- [22] [http://images.google.com/imgres?imgurl=http://www.monografias.com/trabajos5/elso/Image1238.gif&imgrefurl=http://www.monografias.com/trabajos5/elso/elso.shtml&usq=\\_\\_tlltRrtWjd1NoWAlpgQp4mOIIQI=&h=709&w=954&sz=20&hl=es&start=11&tbnid=Tys5Dz4Jn8nW5M:&tbnh=110&tbnw=148&prev=/images%3Fq%3Dsonido%26gbv%3D2%26hl%3Des%26sa%3DG](http://images.google.com/imgres?imgurl=http://www.monografias.com/trabajos5/elso/Image1238.gif&imgrefurl=http://www.monografias.com/trabajos5/elso/elso.shtml&usq=__tlltRrtWjd1NoWAlpgQp4mOIIQI=&h=709&w=954&sz=20&hl=es&start=11&tbnid=Tys5Dz4Jn8nW5M:&tbnh=110&tbnw=148&prev=/images%3Fq%3Dsonido%26gbv%3D2%26hl%3Des%26sa%3DG)
- [23] Mompín Poblet, José; "Introducción a la bioingeniería"; serie: mundo electrónico; Marcombo; España; 1988
- [24] Sánchez, I. & Faustmann, H. & Acevedo, P. & Fuentes, M.; "Design and construction of ultrasonic Doppler transducers for blood flow measurement using Finite Element Analysis"; DISCA-IIMAS, UNAM, México.
- [25] [http://www.piceramic.com/piezo\\_materials\\_2.php](http://www.piceramic.com/piezo_materials_2.php)
- [26] <http://www.mgchemicals.com/products/8331.html>
- [27] Rumack, Carol M; "Ecografía Diagnóstica"; Editorial Grafos; 3ª Edición; España; 2006; Págs. 21 - 26.
- [28] <http://www.professionalplastics.com/es/REXOLITE1422-2200.html>
- [29] Sánchez, I., & Acevedo, P. & Contreras, J.; "Simulación y caracterización de un transductor ultrasónico utilizando Rexolite como acoplamiento acústico"; DISCA-IIMAS, UNAM, México, 2009.
- [30] Salazar, Jordi; "Contribución a la mejora de resolución de los sistemas de obtención de imágenes por ultrasonidos"; Universidad Politécnica de Catalunya; 1997; Página 140..
- [31] Goldsmith, Paul; "Quasioptical Systems: Gaussian beam quasioptical propagation and applications"; IEEE Press Marketing; 1997; Pág. 92.
- [32] [http://translate.google.com.mx/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://msds.chem.ox.ac.uk/ET/ethyl\\_cyanoacrylate.html](http://translate.google.com.mx/translate?hl=es&langpair=en%7Ces&u=http://msds.chem.ox.ac.uk/ET/ethyl_cyanoacrylate.html)
- [33] [http://e-ciencia.com/recursos/enciclopedia/Circuito\\_resonante](http://e-ciencia.com/recursos/enciclopedia/Circuito_resonante)