



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
FES ARAGÓN**

**SIMULACIÓN DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO CON
PVDF EN FORMA DE ANILLO CIRCULAR SEGMENTADO
UTILIZANDO EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A:

JOSÉ ALEJANDRO ARRIETA CERÓN



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. PEDRO JESÚS ACEVEDO CONTLA**

CIUDAD NEZAHUALCÓYOTL, ESTADO DE MÉXICO, 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

Agradezco a la **Universidad Nacional Autónoma de México** por permitirme ser parte de esta grandiosa institución.

A la **Facultad de Estudios Superiores Aragón** por haberme formado como profesional en sus aulas.

Un agradecimiento especial a mi director de Tesis, el **Dr. Pedro Jesús Acevedo Contla** por todo el apoyo y facilidades brindadas.

A mi asesor, el **Mtro. Adalberto Joel Durán Ortega** por todo su apoyo, comentarios, observaciones, por su paciencia para guiarme en la realización de este trabajo y por su constante motivación.

A la Dra. **Mónica Vázquez Hernández** por su valioso apoyo y enseñanzas brindadas, además de ser el primer contacto que tuve con el departamento cuando comencé mi servicio social.

Al **Ing. Martín Fuentes** por sus comentarios y críticas siempre objetivas y constructivas.

Al **Lic. Juan Antonio Contreras Arvizu** por sus observaciones y comentarios.

En general al **Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas IIMAS**, y al **Departamento de Ingeniería de Sistemas Computacionales y Automatización DISCA** por darme la oportunidad de realizar mi servicio social e invitarme a colaborar mediante el presente trabajo en una de sus líneas de investigación.

A la **DGAPA proyecto PAPIIT –IN106016** por el apoyo otorgado para la realización de esta Tesis.

DEDICATORIA

A Dios por haberme permitido llegar hasta estas instancias, por estar conmigo en cada momento y por poner en mi camino a las personas indicadas que me han apoyado y acompañado a lo largo de este camino, por haberme ayudado a nunca rendirme y así lograr mis objetivos.

A mis padres, que hicieron hasta lo imposible porque yo pudiera terminar una carrera, por estar a mi lado siempre desde el comienzo de mi vida académica, por todo su apoyo y por hacerme una persona de bien. Este logro es nuestro, juntos llegamos hasta aquí. A mi madre Blanca por llevarme por el buen camino y motivarme a lograr mis objetivos, a mi padre Alejandro por todo su esfuerzo, por todos los sacrificios que hiciste, aquí esta una de muchas alegrías con las que espero recompensarte.

A mi hermano por su apoyo.

A mi familia que siempre me ha apoyado cuando más lo he necesitado, sin su apoyo tal vez no estaría en este punto. En especial a mi abuelo Leonardo por sus consejos siempre tan acertados y todas sus enseñanzas.

A mi novia, que siempre estuviste conmigo cuando más te necesite apoyándome siempre en todos los aspectos y no dejándome caer, te has convertido en una persona muy importante en mi vida, gracias por todo Areli.

A mi amigo Isaac por todos sus consejos y su ayuda incondicional, por nuestra amistad.

A mis compañeros y amigos de la carrera.

GENERALIDADES

En aplicaciones de ultrasonido donde se requiere focalizar los campos de radiación ultrasónica, se diseñan transductores de múltiples elementos de material piezoeléctrico, con el objetivo de obtener campos de radiación específicos. Para conseguir esa respuesta resultante se debe considerar el tipo de material piezoeléctrico, geometría del arreglo de los elementos y el tipo de excitación para cada elemento.

Los materiales piezoeléctricos poliméricos como el Polifluoruro de vinilideno, fluoruro de polivinilideno o difluoruro de polivinilideno (*PVDF*), presentan las características piezoeléctricas siguientes: amplio ancho de banda, respuesta electromecánica rápida, baja impedancia acústica (cercana a la del agua), estas características lo hacen idóneo para aplicaciones en medicina. Los materiales piezoeléctricos se estudian en tres modos de vibración: modo espesor, modo lateral y modo de corte. Debido a que el PVDF es un material piezoeléctrico flexible se puede diseñar y construir arreglos con diferentes formas para diversas aplicaciones.

En este trabajo de tesis se describe la simulación con el Método de Elemento Finito de un transductor ultrasónico en forma de anillo circular segmentado, utilizando un arreglo de elementos piezoeléctricos de material PVDF que permita la focalización del campo de radiación ultrasónico. Los parámetros que se consideraron para el diseño del arreglo de elementos son: el material, la separación entre elementos, las dimensiones, el número de segmentos, el tipo de excitación y la apertura del haz la cual se puede reducir aumentando la frecuencia y/o diámetro del transductor. En este trabajo se consideraron todos los parámetros piezoeléctricos del PVDF vibrando en modo espesor.

Se realizaron simulaciones de arreglos de elementos PVDF en forma de anillo segmentado de diferentes dimensiones, utilizando el software basado en el método de elemento finito “*COMSOL Multiphysics*” con la finalidad de experimentar con los campos de radiación ultrasónica, que se pueden generar con los diferentes arreglos.

Se analizaron los resultados para ver las ventajas y desventajas que puedan tener los arreglos de anillos segmentados, con respecto a otros arreglos.

OBJETIVO GENERAL

Simular utilizando el Método de Elemento Finito un transductor ultrasónico en forma de anillo circular segmentado, con un arreglo de elementos piezoeléctricos de material PVDF con la finalidad de lograr una focalización del campo de radiación ultrasónico específica.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PIEZOELECTRICIDAD	6
1.2 ELEMENTOS PIEZOELECTRICOS	8
1.2.1 Cuarzo.....	9
1.2.2 Cerámicas Piezo eléctricas.....	10
1.2.3 Polifloururo de vinilideno (PVDF).....	12
1.3. MODOS DE VIBRACIÓN	22
1.4 CAMPO ACÚSTICO	23
1.4.1 Propagación.....	23
1.4.2 Campo cercano (Zona de Fresnel)	24
1.4.3 Campo lejano o Zona de Fraunhofer	24
1.4.4 Zona Focal.....	25
1.4.5. Ancho del haz.....	26
1.5 FOCALIZACIÓN	30
1.5.1. Punto Focal.....	30
1.5.2. Mecánica	30
1.5.3. Electrónica	32
1.6 RESOLUCIÓN AXIAL Y LATERAL	34
1.7 TRANSDUCTORES	35
1.7.1 Transductores Ultrasónicos	36
1.7.2 Arreglos de Transductores.....	37
1.7.2.1 Arreglo lineal de transductores.....	38
1.7.2.2 Matriciales.....	39
1.7.2.3 Anulares.	39
1.7.2.4. Anillos Segmentados.	40
2. ARREGLO DE ANILLOS SEGMENTADOS CON PVDF	42
2.1 GEOMETRÍA DE UN ANILLO SEGMENTADO	42
2.2 CAMPO ACÚSTICO DE UN ARREGLO DE ANILLOS SEGNMENTADOS	46
2.3 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DEL CAMPO ACÚSTICO	48
2.4 GEOMETRIA PROPUESTA	50
3. METODOLOGÍA	52
3.1 SOFTWARE BASADO EN EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (COMSOL MULTIPHYSICS)	52
3.2 SIMULACIÓN DE UNA MEMBRANA RECTANGULAR	54
3.3 SIMULACIÓN DE UNA MEMBRANA RECTANGULAR METALIZADA	74
3.4 SIMULACIÓN DEL ANILLO SEGMENTADO	76
3.5 SIMULACIÓN DEL ANILLO SEGMENTADO METALIZADO	91
3.5.1 Geometría.....	92

3.5.2	<i>Tabla de Datos del Material</i>	103
3.5.3	<i>Definir contornos (dominios y subdominios)</i>	105
3.5.4	<i>Mallado</i>	107
3.5.5	<i>Parámetros Finales</i>	108
3.5.6	<i>Post Procesamiento</i>	110
4.	RESULTADOS	114
5.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	120
6.	REFERENCIAS	124

1. INTRODUCCIÓN

Breve historia del ultrasonido

En año de 1774 Lazzaro Spallanzani, Monje científico demuestra que los murciélagos se comunican mediante el sonido y no a través de la luz. Poco menos de un siglo después (1842) Christian Johann Doppler postularía la teoría sobre el efecto de la física ondulatoria.

Ya para el año 1880 los hermanos Pierre y Jacques Curie descubren el fenómeno de la piezoelectricidad en cristales de cuarzo. Durante la misma década Lippmann y Voigt experimentan el llamado efecto piezoeléctrico inverso aplicable a la generación de ultrasonidos.

En 1883 Galton investigó los límites de frecuencias audibles para el oído humano, además fabrica un silbato que emitía un sonido a una frecuencia de 23 KHz usado para controlar perros. Casi una década después, en el año de 1912 L. F. Richardson sugiere la utilización de ecos ultrasónicos para detectar objetos sumergidos, poco después en 1935 aparecería el SONAR (*Sound Navigation and Ranging*).

En 1917 Paul Langevin y Chilowsky produjeron el primer generador piezoeléctrico de ultrasonido cuyo cristal serviría como receptor y generaba cambios eléctricos al recibir vibraciones mecánicas.

En 1942 Karl Dussik intento detectar tumores cerebrales registrando del paso del haz sónico a través del cráneo, además trato de identificar los ventrículos midiendo la atenuación del ultrasonido. Mientras que en 1947 Douglas Howry detecto estructuras de tejido suaves al examinar los reflejos producidos por los ultrasonidos en diferentes interfaces. En colaboración con Doroty Howry, Roderick Bliss y Gerald Posakony publicaron imágenes bidimensionales de un antebrazo en vivo.

En 1951 nace el ultrasonido compuesto, con imágenes unidimensionales.

En 1959 Sotomura reportó el uso por primera vez del Doppler ultrasónico en la evaluación del flujo de las arterias periféricas, seis años después (1964) la técnica Doppler se extiende al estudio de las carótidas, con aplicación neurológica. En 1983 Aloka introdujo al mercado el primer equipo de Doppler a color que permitió visualizar en tiempo real y en color el flujo sanguíneo. En la actualidad se pueden obtener imágenes en tercera dimensión.

Definición y características del sonido

El sonido a través del tiempo ha sido una herramienta que utilizamos los seres vivos para comunicarnos, como señal de alerta o aviso. El sonido posee tres características fundamentales las cuales son su intensidad, su tono y su frecuencia. Si la frecuencia es mayor el tono será más agudo y si es menor este será grave.

El sonido es un fenómeno ondulatorio mecánico. Las variaciones de presión producidas (ondas) se propagan en un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso). Para este trabajo la propagación de estas ondas será en un medio sólido. El sonido se clasifica en diferentes rangos, en referencia al rango audible por el ser humano (20Hz a 20KHz). Por debajo de este rango, se encuentran los infrasonidos (0 a 20Hz) y por encima, desde los 20Khz se encuentran los ultrasonidos. [13]

“La velocidad de propagación del sonido es la velocidad con que se desplazan las ondas sonoras. Tiene la dirección perpendicular a la superficie vibrante bajo forma de ondas. Depende de las condiciones ambientales (presión y temperatura) y, fundamentalmente, del medio donde se propaga. “[27]

Los parámetros que definen a una onda sonora son los siguientes (fig. 1.1):

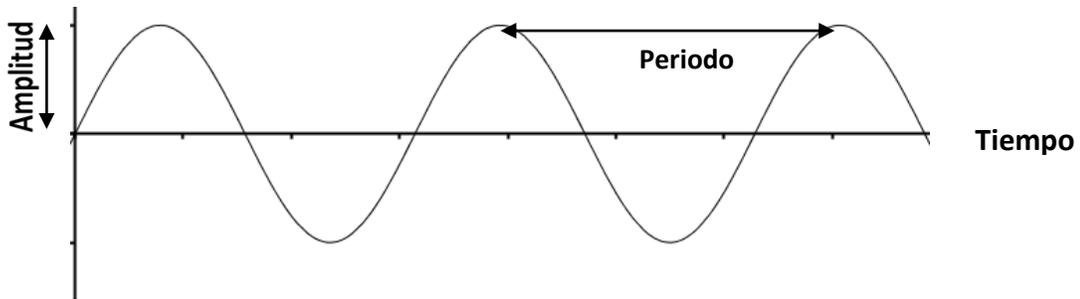


Fig. 1.1 Parámetros básicos de una onda sonora

La frecuencia es una característica muy significativa en este análisis, de esta dependen otras como la longitud de onda. Se define como el número de ciclos recorridos por la onda en un segundo. Su unidad en el sistema internacional es el Hertzio (Hz). El inverso de la frecuencia es el periodo expresado en (s). Esta a su vez relacionado inversamente con el concepto de longitud de onda. Como se puede observar en la ecuación 1.1 la frecuencia es esencial para el diseño de transductores ya que variando la frecuencia podemos determinar la longitud real de onda, así como podemos ajustar el tamaño del transductor dependiendo de cuantas longitudes de onda conste nuestro diseño. (A mayor frecuencia, menor longitud de onda).

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

v. velocidad de la onda f. frecuencia λ. Longitud de onda	(1.1)
---	-------

La longitud de onda es una distancia real expresada en (m) entre dos puntos de la onda que presentan el mismo estado de vibración. Como se observa en la figura 1.2 no importa el punto de la onda donde deseemos medir la longitud, esta será la misma y se llamará “Longitud de Onda”. Pudiendo ser de cresta-cresta, valle- valle, o bien sobre el eje de referencia.

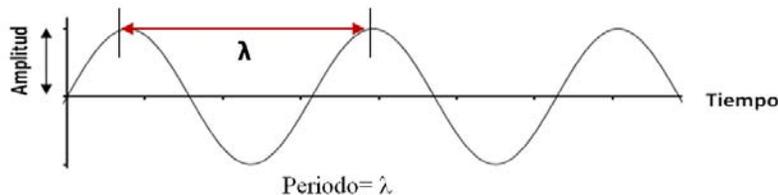


Fig. 1.2. Longitud de Onda λ

Mientras que la amplitud de estas ondas nos indican que la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódicamente en el tiempo, además de ser el punto más alejado de la onda con referencia a un punto medio.

Impedancia acústica

“La impedancia se define como el cociente entre la presión acústica (P) y la velocidad de las partículas en un medio” [16]. La impedancia es la propiedad de los materiales para facilitar u oponerse al paso de las ondas sonoras a través de sí. Se conoce habitualmente con la letra Z y es igual al producto de la densidad del medio por la velocidad de transmisión del ultrasonido en ese medio (ecuación 1.2):

$$Z = \rho V \quad \begin{array}{l} \rho. \text{ Densidad del medio} \\ V. \text{ velocidad de transmisión} \\ Z. \text{ Impedancia} \end{array} \quad (1.2)$$

“Cuando la onda viaja de un medio a otro con diferentes impedancias, es cuando se produce la reflexión, si la diferencia entre ambas es elevada se puede reflejar casi toda la onda, sin llegar a propagarse en el segundo medio.” [13]

Atenuación

“El haz de ultrasonidos va perdiendo intensidad conforme va avanzando por el medio objeto de análisis. Esta pérdida por unidad de longitud se denomina atenuación. La atenuación se produce por diferentes factores, desde la propia absorción de ultrasonidos por el medio, hasta las diversas reflexiones que puedan producirse por la homogeneidad del medio. La atenuación es directamente proporcional a la frecuencia del ultrasonido utilizado, por lo que debemos esperar una mayor pérdida de intensidad del haz en profundidad, con ultrasonidos de mayor frecuencia.”

Presión Sonora

El sonido puede cuantificarse a partir de la medida de alguna magnitud física del medio, que varíe con la perturbación sonora. La magnitud física más importante empleada en acústica es la presión sonora (p) que representa la diferencia entre la presión total instantánea en un punto determinado, en presencia de una onda acústica, y la presión

estática en el mismo punto. Sus unidades son los N/ m² o lo que es lo mismo los Pascales (Pa).

Intensidad Acústica

Las dos sensaciones fundamentales que nos da el oído son el tono y la intensidad. El tono se puede determinar fácil y objetivamente midiendo la frecuencia. La intensidad acústica o sonora es una magnitud, en parte subjetiva, y es la energía transportada por la onda que atraviesa, en la unidad de tiempo y de superficie perpendicular a la dirección de propagación de las ondas, está relacionada con la presión sonora, que es objetivamente medible. Sin embargo, dos sonidos de igual presión sonora y de distinta frecuencia no producen la misma sensación de intensidad. Se define como la energía por unidad de superficie y se mide en W/ m². [33]

Es igual a la presión sonora (fuerza por unidad de área) por la velocidad de las partículas del medio como se muestra en la ecuación 1.3:

$$I = pv \tag{1.3}$$

Para que el oído comience a percibir un sonido la presión acústica debe ser al menos de 2×10^{-4} μbar, lo que se denomina umbral auditivo. Cuando la presión acústica supera los 10^3 bar el oído puede sufrir lesiones irreversibles, esto se denomina umbral doloroso. En escala de intensidades los umbrales son los siguientes [33]:

$$\text{Umbral auditivo: } 10^{-12} \frac{W}{m^2}$$

$$\text{Umbral doloroso: } 25 \frac{W}{m^2}$$

Potencia Acústica

Otra magnitud usada es la potencia sonora, especialmente para caracterizar fuentes acústicas. Valora la energía que una fuente sonora radia al medio exterior, en la unidad de tiempo. Una parte de esta potencia fluye a través de cada elemento de superficie del medio que rodea a la fuente. Sea W la potencia acústica radiada por la fuente, en watts. Si no hay pérdidas en el medio, toda la potencia radiada atravesará cualquier superficie

que encierre a la fuente. Cuanto mayor sea su área menor será la potencia por unidad de área que atraviese cualquier elemento de superficie.

Si la fuente es omnidireccional, es decir radia uniformemente en todas direcciones, su potencia sonora total es el producto de la intensidad sonora por el área de la superficie cerrada como se muestra en la ecuación 1.4: [33]

$$W = IS \tag{1.4}$$

La potencia media producida por una persona al hablar es de unos 10^{-5} Watts pudiendo alcanzar hasta 10^{-3} W en los gritos. Así pues la potencia acústica producida por todas las personas de una ciudad de 6 millones de habitantes, hablando simultáneamente, será de unos 60 W, suficiente apenas para encender una lámpara eléctrica de tamaño medio. [33]

1.1 PIEZOELECTRICIDAD

Descubierta por los hermanos Curie la piezoelectricidad rápidamente creció como un campo de investigación, ellos observaron que en ciertos materiales como el cuarzo y el topacio se generaban cargas eléctricas superficiales al ser sometidos a un estrés mecánico. Poco después Gabriel Lippmann predijo el efecto inverso.

Uno de los conceptos básicos para comprender el significado de un material dieléctrico, ferro eléctrico y piezoeléctrico es la respuesta al campo eléctrico. Cuando un sólido se coloca en un campo eléctrico aplicado externamente, el medio se adapta a esta perturbación cambiando dinámicamente las posiciones de los núcleos y los electrones.

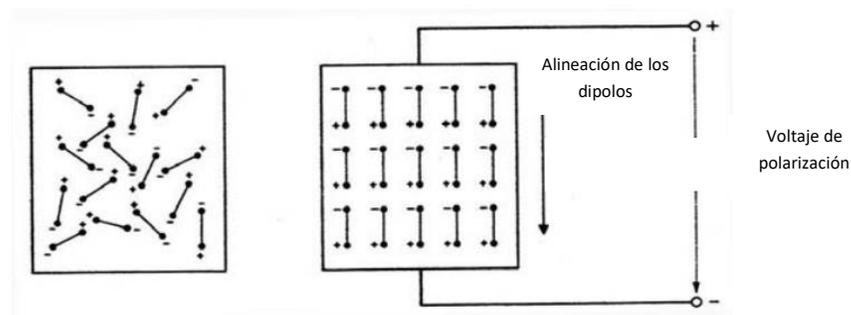


Fig. 1.3 Polarización del elemento, orientación de los dipolos. [8]

Como resultado, los dipolos se crean y se dice que el material se somete a la polarización. El proceso de formación de dipolo (fig. 1.3) (o alineación de dipolos atómicos o moleculares permanentes o inducidos ya existentes) bajo la influencia de un campo eléctrico externo que tiene una intensidad de campo eléctrico, E , se llama polarización. [5]

La piezoelectricidad es una propiedad de ciertos materiales como los cristales (cuarzos) que les permite polarizarse cuando sobre ellos se aplica una tensión. Esto quiere decir que cuando se aplica un esfuerzo sobre el cristal, este generara por un momento tensión, a esto se le conoce como efecto piezoeléctrico (fig. 1.4). Caso opuesto, si el cristal es sometido a un campo eléctrico la forma del cristal cambiará, a esto se le conoce como efecto piezoeléctrico contrario (fig. 1.5). El efecto piezoeléctrico se ha explicado con formulaciones matemáticas básicas a base de fenómenos eléctricos y elásticos.



Fig1.4 Efecto Piezoeléctrico en un cristal

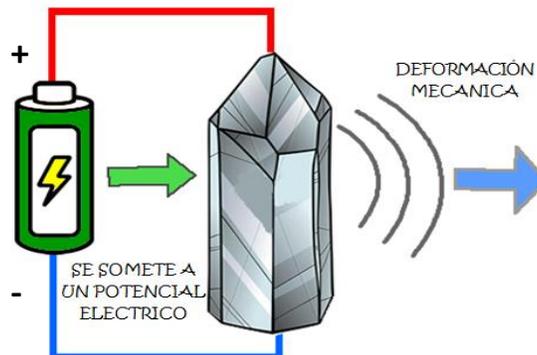


Fig1.5 Efecto Piezoeléctrico (caso contrario)

En el caso del fenómeno piezoeléctrico contrario dependiendo del sentido del potencial aplicado al elemento piezoeléctrico este responderá con una deformación mecánica, la cual puede ser expansión o contracción y depende particularmente de las propiedades piezoeléctricas y elásticas del material.

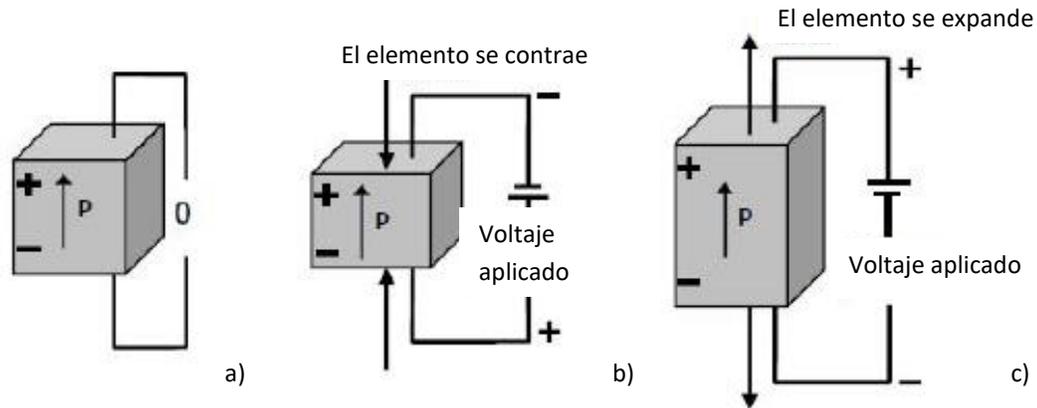


Fig. 1.6 Efecto piezoeléctrico inverso.

En la figura 1.6 se observa en el inciso a) el elemento sin carga de ningún tipo, en el inciso b) se observa el elemento sometido a un potencial eléctrico con una dirección, finalmente en el inciso c) se observa el mismo elemento sometido a un potencial eléctrico con un sentido distinto al anterior lo cual genera una expansión del material en este caso.

1.2 ELEMENTOS PIEZOELECTRICOS

Los materiales piezoeléctricos son aquellos que al sufrir una deformación mediante una fuerza aplicada generan un potencial eléctrico (efecto piezoeléctrico), lo mismo sucede a la inversa; al aplicar un potencial eléctrico en dicho material se genera una deformación. Esta característica fue observada por primera vez por los hermanos Curie en el año de 1880, el primer elemento piezoeléctrico que se utilizó fue el cuarzo ya que posee esta característica de manera natural.

Posteriormente en la década de los 40 se comenzó a desarrollar las primeras cerámicas piezoeléctricas a base de titanato de bario, estos elementos poseían características piezoeléctricas más marcadas, a partir de esto se han desarrollado nuevos materiales, tanto cerámicos como polímeros buscando obtener mejores propiedades de ellos. Para

conseguir mejor calidad y precisión en los materiales, estos se someten a una polarización. Lo que consta de la aplicación de un campo eléctrico a una temperatura elevada. [28]

A partir de esto tenemos dos tipos de elementos piezoeléctricos, los que se obtienen directamente de la naturaleza como el cuarzo y tenemos los elementos que al ser sometidos a una polarización adquieren propiedades piezoeléctricas tal es el caso de las cerámicas y los polímeros.

1.2.1 Cuarzo

“La estructura del cuarzo permite obtener, mediante cortes, láminas con propiedades piezoeléctricas como se aprecia en la figura 1.7. Estas láminas (cristales), con sus correspondientes electrodos, tienen las características de un circuito resonante. Un cristal de cuarzo tiene varias resonancias, pues las oscilaciones pueden ser longitudinales, transversales, de corte o de flexión, dando al cristal, y al soporte del mismo, formas adecuadas, pueden acentuarse un modo de resonancia y atenuarse las llamadas resonancias secundarias.” [12]

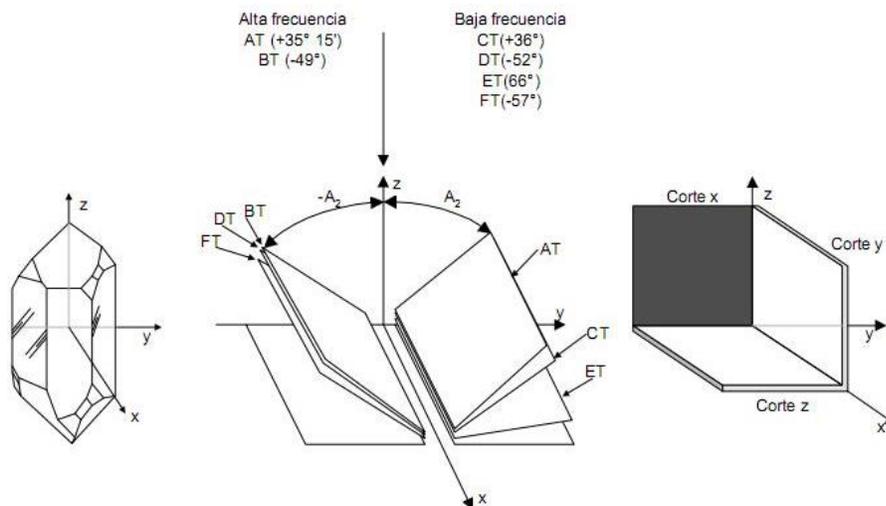


Fig. 1.7 Diferentes tipos de corte del cuarzo, cada uno con su frecuencia optima característica.[12]

“Los primeros cristales utilizados, se obtienen de cortes perpendiculares a los ejes X e Y, cortes X e Y respectivamente. El corte Y, tiene un coeficiente de temperatura elevado y discontinuo; el corte X un coeficiente de temperatura también alto, pero mucho más

continuo, lo que permite obtener una buena estabilidad. Sin embargo, este corte es menos activo que el Y.” [12]

1.2.2 Cerámicas Piezo eléctricas

Las cerámicas piezoeléctricas se han convertido en un material de gran importancia y en el elemento principal en la mayoría de dispositivos y transductores ultrasónicos, su principal función es la de convertir la energía eléctrica en energía mecánica ya que gracias a sus propiedades físicas es el elemento piezoeléctrico con los mayores factores de conversión electromecánica. Desde que se comenzó a trabajar con ellas se han producido grandes avances tecnológicos en diversos sectores industriales como la imagen médica y limpieza ultrasónica. [29]

Titanato de Bario

Los materiales piezoeléctricos de titanato de bario, se fabrican por procesos cerámicos, y polarizan enfriándolos desde temperaturas superiores a las de Curie, en un campo eléctrico intenso. Se usan como transductores ya que poseen gran resistencia mecánica, resistencia a la humedad y con la posibilidad de usarse dentro de un rango de temperaturas mayor (70°C).

Zirconato Titanato de Plomo (PZT)

Desarrollado en 1952 en el Instituto de Tecnología de Tokio en Japón. Es una cerámica formada por una solución de titanato de plomo y zirconato de plomo, es altamente utilizada por su coeficiente piezoeléctrico, mayor sensibilidad con respecto a la cerámica de Titanato de Bario y por su temperatura de funcionamiento.

Características:

- Amplia gama de frecuencias de transmisión y recepción (sub-audible, audible, ultrasonidos).
- De alto rendimiento.
- Alta frecuencia, tiempo de respuesta rápido.
- Alta sensibilidad.

- Capacidad para utilizarse con altos y bajos voltajes de operación.
- Buen acoplamiento mecánico y acústico.
- Amplia variedad de formas y tamaños que se pueden personalizar para satisfacer las necesidades y aplicaciones específicas [11].

Algunas aplicaciones:

- Exploración submarina (sonar, balizas, imágenes, medidores de corriente).
- Aeroespacial (giroscopios, acelerómetros, sensores de nivel).
- Productos médicos (Doppler del flujo sanguíneo).
- Los productos de consumo (limpiadores ultrasónicos de joyería, productos de limpieza de lentes de contacto, pantallas táctiles, altavoces).
- Industrial y Comercial (flujo y sensores de nivel, de limpieza por ultrasonidos, soldadura por ultrasonidos, máquina de vibración de monitoreo, detección de burbujas).
- Exploración de petróleo (sensores de flujo y nivel) [11].



Fig. 1.8 Ejemplos de Transductores Ultrasónicos con PZT. [18]

En la fig. 1.8 se observan distintos transductores ultrasónicos de material PZT en los que varía su forma dependiendo su aplicación.

1.2.3 Polifluoruro de vinilideno (PVDF)

En las últimas décadas se han utilizado frecuentemente como elementos piezoeléctricos las cerámicas de titanato de zirconio y plomo principalmente en aplicaciones acústicas, ya sea por su alto módulo de elasticidad, su elevada constante dieléctrica y sus bajas pérdidas elásticas. A pesar de todas estas ventajas las cerámicas presentan un número significativo de limitaciones como su baja deformación, su fragilidad y su alta densidad [28].



Fig. 1.9 Láminas de PVDF

Estas limitaciones llevaron a la búsqueda de nuevos materiales piezoeléctricos que aportaran mejores características que las cerámicas, fue en 1969 cuando se observa por vez primera características piezoeléctricas en el polímero PVDF (Polifluoruro de Vinilideno) mostrado en la fig. 1.9. Antes de eso la atención de los investigadores respecto a la piezoelectricidad y la ferro electricidad se centraba en los cristales naturales y en cerámicas sintéticas como el titanato de bario o el titanato de plomo zirconato (PZT).

Desde entonces se ha vuelto cada vez más importante como material transductor gracias a que presenta una alta flexibilidad y resistencia mecánica, cuenta con una respuesta piezoeléctrica muy grande, alta sensibilidad a cargas mecánicas y una baja impedancia acústica; casi tan baja como la del agua (aproximadamente 2.6 veces más grande que la densidad del agua, mientras que la densidad de las cerámicas es 11 veces más grande), y podemos obtener las formas de este material que deseemos ya que es mecánicamente moldeable.

El coeficiente piezoeléctrico del PVDF es mucho más grande que el de cualquier otro polímero, así como la constante dieléctrica la cual hace mucho más interesante este material para su integración en diversos dispositivos ya que la relación señal/ruido es mucho más grande en materiales con una alta constante dieléctrica. Además de ser un material piezoeléctrico es piro eléctrico, ya que produce una carga eléctrica en respuesta a un cambio de temperatura.



Fig. 1.10 Transductor de material PVDF [17]

Se tienen ciertas limitaciones para ciertas aplicaciones, es un transmisor electromecánico relativamente débil en comparación a las cerámicas; particularmente en resonancia y en aplicaciones a bajas frecuencias.

En el año de 1981 Furukawa y Johnson determinaron la temperatura de Curie para el PVDF en 103°C , lo que determina que por encima de esa temperatura las características piezoeléctricas del PVDF desaparecen. [28]

Además de su alta respuesta piezoeléctrica presenta una alta resistencia química, es muy fácil de procesar y es muy flexible. Con lo cual se convierte en una opción bastante versátil para aplicaciones en sensores y actuadores. En la fig. 1.10 se muestra un transductor ultrasónico construido de material PVDF. Existen otros polímeros con propiedades similares pero ninguno con resultados tan buenos como el PVDF.

Características

Propiedades Elásticas

Módulo de Young

El módulo es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Se define como el cociente entre la tensión (fuerza por unidad de área) y la deformación (variación de longitud por unidad de longitud) como se muestra a continuación en la ecuación 1.5. [28]

$$E = \frac{\textit{tensión}}{\textit{deformación}} \quad (1.5)$$

Se mide en $\frac{kg}{m s^2}$ o en Pascales.

Para el PVDF el valor del Módulo de Young es de 9×10^9 Pa.

Densidad

Es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa expresada en $\frac{kg}{m^3}$, esto se puede observar en la ecuación 1.6 para calcular dicho parámetro.

$$\textit{densidad} (\rho) = \frac{\textit{masa}}{\textit{volumen}} \quad (1.6)$$

La densidad del PVDF tiene un valor de $1780 \frac{kg}{m^3}$

En la tabla 1.1 se muestra un comparativo entre densidades, velocidades de propagación e impedancias acústicas de elementos comunes y materiales piezoeléctricos.

COMPARACIÓN DE MATERIALES			
Material	Densidad (ρ) $\frac{Kg}{m^3}$	Velocidad acústica en el material (V) $\frac{m}{s}$	Impedancia Acústica (Z) $\frac{Kg}{m^2 - sec}$
Aire	1.2	340	480
Agua	1×10^3	1.48×10^3	1.48×10^6
Polifluoruro de vinilideno (PVDF)	1.780×10^3	2.22×10^3	3.9×10^6
Polimetilmetacrilato (Acrílico)	1.190×10^3	2.685×10^3	3.19×10^6
Cerámica piezoeléctrica PZT	7.5×10^3	4×10^3	30×10^6

Tabla 1.1 Comparación de propiedades entre algunos elementos y materiales piezoeléctricos.

Propiedades Piezoeléctricas

Los efectos piezoeléctricos son descritos a través de las matrices piezoeléctricas \mathbf{d} y \mathbf{e} , las matrices elásticas \mathbf{c} y \mathbf{sE} . Además de la matriz de permitividad de tensión ϵ_{rs} y deformación ϵ_{rT} .

Matriz de Elasticidad

Con el eje de referencia X paralelo a la dirección de estiramiento de película, y el eje Z perpendicular a la superficie de la película como se muestra en la figura 1.8, estos coeficientes son:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix} \text{ (Pa)}$$

Matriz de Elasticidad (C). [4]

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 3.7e9 & 1.47e9 & 1.23e9 & 0 & 0 & 0 \\ 1.47e9 & 3.2e9 & 1e9 & 0 & 0 & 0 \\ 1.23e9 & 1e9 & 1.51e9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.55e9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.59e9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.7e9 \end{pmatrix} \quad (\text{Pa})$$

Valores de la Matriz de Elasticidad para el PVDF (C). [4]

Matriz de Compliancia (Resistencia a la vibración)

Es la relación entre la deformación relativa S y la tensión mecánica T . La energía mecánica y eléctrica son totalmente dependientes, las condiciones de contorno eléctricas como la densidad de flujo eléctrico y la intensidad del campo se deben considerar. El comportamiento de este módulo depende de los coeficientes de la matriz de compliancia como los siguientes: [25]

Relación de la deformación mecánica en la dirección 3 a la tensión mecánica en la dirección 3 en el campo eléctrico constante. sE_{33} [25].

Relación de la deformación de corte con la tensión de corte eficaz a un desplazamiento dieléctrico constante. sE_{55} [25].

El valor de elasticidad más usada o módulo de Young corresponde a una primera aproximación del valor recíproco de los correspondientes coeficientes de elasticidad.

Esta matriz de elasticidad viene dada por:

$$sE = \begin{pmatrix} sE_{11} & sE_{12} & sE_{13} & 0 & 0 & 0 \\ sE_{21} & sE_{22} & sE_{23} & 0 & 0 & 0 \\ sE_{31} & sE_{32} & sE_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & sE_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & sE_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & sE_{66} \end{pmatrix} (Pa^{-1})$$

Matriz de Compliancia (Resistencia a la vibración) (sE). [5]

$$sE = \begin{pmatrix} 3.65e^{-10} & -1.10e^{-10} & -2.09e^{-10} & 0 & 0 & 0 \\ -1.10e^{-10} & 4.24e^{-10} & -1.92e^{-10} & 0 & 0 & 0 \\ -2.09e^{-10} & -1.92e^{-10} & 4.72e^{-10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (Pa^{-1})$$

Valores de la Matriz de Compliancia para el PVDF (sE). [5]

Matriz de Acoplamiento de Deformación (Strain)

El módulo de acoplamiento de deformación es la relación de la carga eléctrica inducida a la tensión mecánica o a una tensión mecánica alcanzable con un campo eléctrico aplicado. El comportamiento de este módulo está determinado por los coeficientes de la siguiente matriz:

El coeficiente d_{33} determina la deformación producida por unidad de campo eléctrico aplicado en V/m o densidad de carga en C/ m² por unidad de presión en N/ m², cada uno en la dirección de polarización. A diferencia de muchos materiales el PVDF posee este

valor (d_{33}) negativo, lo cual hace que ante un campo eléctrico el PVDF se contraiga y se expanda mientras que la cerámica piezoeléctrica PZT solo se expande.

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{C}{N}$$

Matriz de Acoplamiento de Deformación (d). [5]

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -27e^{-12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -23e^{-12} & 0 & 0 \\ 21e^{-12} & 1.5e^{-12} & -33e^{-12} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{C}{N}$$

Valores de la Matriz de Acoplamiento de Deformación (d). [5]

Matriz de Acoplamiento de Tensión (Stress)

Establece una proporcionalidad entre la generación de cargas y las tensiones mecánicas aplicadas.

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{C}{m^2}$$

Matriz de Acoplamiento de Tensión (e). [4]

$$e = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0159 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0127 & 0 & 0 \\ 0.0449 & 0.0129 & -0.0061 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \frac{C}{m^2}$$

Valores de la Matriz de Acoplamiento de Tensión (e). [4]

Permitividad ϵ

El coeficiente de permitividad relativa es la relación entre la permitividad absoluta del material piezoeléctrico y la permitividad en el vacío ($\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$) F/m, donde la permitividad absoluta es una medida de polarización en el campo eléctrico, [25]

Matriz de Permitividad de Tensión (Stress)

Campo eléctrico y el desplazamiento dieléctrico en dirección del eje 1, en la deformación constante. $\epsilon_r S_{11}$.

$$\epsilon_{rs} = \begin{pmatrix} \epsilon_r S_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_r S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_r S_{33} \end{pmatrix}$$

Matriz de Permitividad de Tensión (ϵ_{rs}). [5]

$$\epsilon_{rs} = \begin{pmatrix} 6.9 & 0 & 0 \\ 0 & 8.6 & 0 \\ 0 & 0 & 7.6 \end{pmatrix}$$

Valores de la Matriz de Permitividad de Tensión (ϵ_{rs}). [5]

La dependencia del coeficiente dieléctrico de la orientación del campo eléctrico y el desplazamiento eléctrico esta simbolizado por los siguientes índices de la Matriz de permitividad de deformación [25].

Valor en la dirección de polarización cuando se aplica un campo eléctrico en esta dirección a una tensión mecánica constante. $\epsilon_r T_{33}$.

Matriz de Permitividad de Deformación (*Strain*)

$$\epsilon_{rT} = \begin{pmatrix} \epsilon_r T_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_r T_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_r T_{33} \end{pmatrix}$$

Matriz de Permitividad de Deformación ($\epsilon_r T$). [4]

$$\epsilon_{rT} = \begin{pmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 12 & 0 \\ 0 & 0 & 12 \end{pmatrix}$$

Valores de la Matriz de Permitividad de Deformación ($\epsilon_r T$). [4]

En la tabla 1.2 se recopilan todas estas propiedades que caracterizan al PVDF.

TABLA DE DATOS DEL PVDF			
Propiedades Elásticas			
Propiedad	Nomenclatura	Valor	Unidades
Módulo de Young [1]	E	2X10 ⁹	Pa
Coefficiente de Expansión Térmica [2]	alpha	12X10 ⁻⁶	$\frac{1}{K}$
Coefficiente de Poisson [3]	nu	0.34	
Densidad [1]	rho	1780	$\frac{Kg}{m^3}$
Propiedades Eléctricas			
Permitividad Relativa [1]	Épsilonr (ε)	12	
Propiedades de Fluido			
Velocidad del Sonido [1]	cs	2200	$\frac{m}{s}$
Propiedades Piezoeléctricas			
Matriz de Elasticidad [4]	C ₁₁	3.7x10 ⁹	Pa
	C ₂₂	3.2x10 ⁹	
	C ₃₃	1.51x10 ⁹	
	C ₄₄	0.55x10 ⁹	
	C ₅₅	0.59x10 ⁹	
	C ₆₆	0.7x10 ⁹	
	C ₁₂	1.47x10 ⁹	
	C ₁₃	1.23x10 ⁹	
	C ₂₁	1.47x10 ⁹	
	C ₂₃	1 x10 ⁹	
Matriz de Acoplamiento de Deformación (Strain) [5]	d ₃₁	21 x10 ⁻¹²	$\frac{C}{N}$
	d ₃₂	1.5x10 ⁻¹²	
	d ₃₃	-33x10 ⁻¹²	
	d ₁₅	-27x10 ⁻¹²	
	d ₂₄	-23x10 ⁻¹²	
Matriz de Acoplamiento de Tensión (Stress) [4]	e ₃₁	-0.0061	$\frac{C}{m^2}$
	e ₃₂	0.0129	
	e ₃₃	0.0449	
	e ₁₅	-0.0159	
	e ₂₄	-0.0127	
Matriz de Permitividad de Tensión (Stress) [5]	EpsilonrS E _{rs11}	6.9	
	E _{rs22}	8.6	
	E _{rs33}	7.6	
Matriz de Permitividad de Deformación (Strain) [4]	EpsilonrT E _{rT11}	12	
	E _{rT22}	12	
	E _{rT33}	12	
Matriz de compliancia (Resistencia a la Vibración) [5]	sE ₁₁	3.65 x10 ⁻¹⁰	Pa ⁻¹
	sE ₂₂	4.24 x10 ⁻¹⁰	
	sE ₃₃	4.72 x10 ⁻¹⁰	
	sE ₁₂	-1.10 x10 ⁻¹⁰	
	sE ₂₃	-1.92 x10 ⁻¹⁰	
Impedancia Acústica [1]	Z	3.9 x10 ⁶	$\frac{Kg}{m^2 - sec}$

Tabla 1.2 Propiedades del PVDF Referencias [1-5] presentadas en bibliografía

1.3. MODOS DE VIBRACIÓN

Son consideradas como vibraciones los movimientos oscilatorios de un elemento alrededor de una posición de referencia. Los modos de oscilación o vibración, dependen directamente de la geometría del elemento piezoeléctrico, sus propiedades elásticas así como la orientación del campo eléctrico y la polarización.

Para polarizar un elemento piezoeléctrico es necesario hacerlo hacia una dirección para eso nos basamos en los ejes del plano cartesiano

La asignación de los ejes

Las direcciones están designadas por los ejes 1, 2, y 3 (correspondiente a los ejes X, Y y Z del sistema de coordenadas cartesianas). Los ejes de rotación, conocidos como U, V, W en el sistema de coordenadas, se designan con 4, 5, y 6 (fig. 1.11).

La dirección de estiramiento se denomina 1. El eje 2 es ortogonal a la dirección de estiramiento en el plano de la película. El eje de polarización (perpendicular a la superficie de la película) se denomina 3. Los planos de corte están indicados por los subíndices 4, 5 y 6, son perpendiculares a las direcciones 1, 2 y 3, respectivamente.

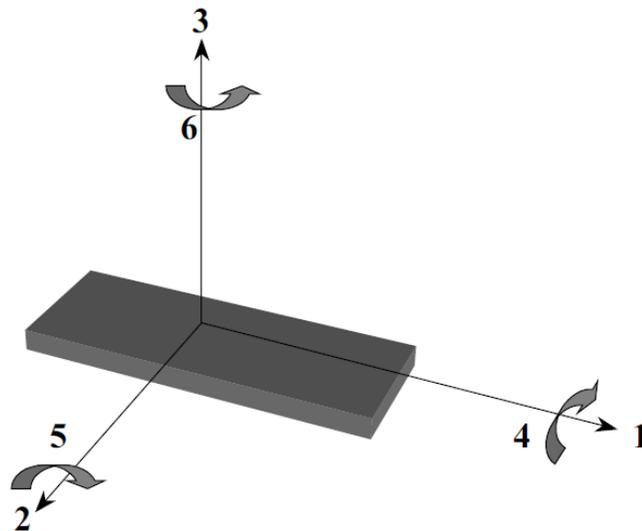


Fig. 1.11 Sistema ortogonal para describir la dirección de polarización de un elemento piezoeléctrico. [20]

En base a su geometría y el sentido de polarización, los materiales piezoeléctricos tienen varios modos de vibrar como se muestra en la Tabla 1.3

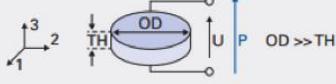
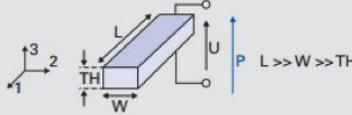
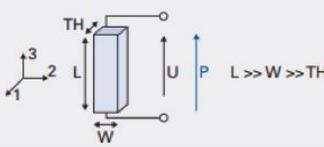
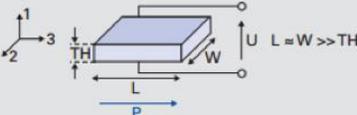
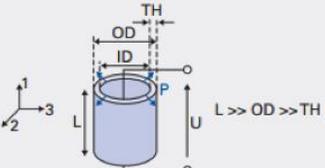
Forma	Oscilaciones	
	Tipo	Deformación mecánica
Disco Delgado 	Radial	
	Espesor	
Placa 	Transversal	
Barra 	Longitudinal	
Placa 	Espesor de Corte	
Tubo 	Transversal	
	Espesor	

Tabla 1.3 Modos de vibración de los materiales piezoeléctricos.

1.4 CAMPO ACÚSTICO

1.4.1 Propagación

Una onda ultrasónica como todas las ondas de tipo mecánico necesita para propagarse de un medio físico, cuyas partículas permiten la transmisión de la dicha onda. En efecto la propagación es dada a los choques sucesivos de las partículas de este medio unas contra otras.

Cada onda se caracteriza por su frente de onda, su polarización, la energía, lo cual se relaciona con la capacidad de la onda a propagarse en el material, en un medio homogéneo las ondas se propagan en línea recta

El campo acústico generado por un transductor se divide en dos zonas:

1.4.2 Campo cercano (Zona de Fresnel)

Es la región próxima al transductor, donde la presión acústica pasa a través de una serie de máximos y mínimos, y termina en el último máximo en el eje a una distancia N desde la superficie del transductor (ecuación 1.7). Esta distancia, conocida como distancia de Fresnel, representa el foco natural del transductor. Para un transductor circular [24]:

$$N = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \quad (1.7)$$

Donde a es el radio del disco o superficie que hará contacto con la zona de estudio. Cuando el radio del transductor resulta ser más grande que la longitud de onda se puede despreciar el término $\frac{\lambda}{4}$. [24]

Cabe mencionar que a mayor frecuencia tendremos una mayor longitud en el campo cercano del transductor.

1.4.3 Campo lejano o Zona de Fraunhofer

Zona donde la distribución de presiones acústicas decae proporcionalmente con el aumento de la distancia desde el transductor. Este campo se mide en base al ángulo de divergencia.

Es la zona más alejada del transductor. Como se muestra en la fig. 1.12, la intensidad del sonido más alto se produce al final del campo cercano y al comienzo del campo lejano. A partir de ese momento, la intensidad del haz se reduce por las características de atenuación del material en el que está viajando, y por extensión del haz.

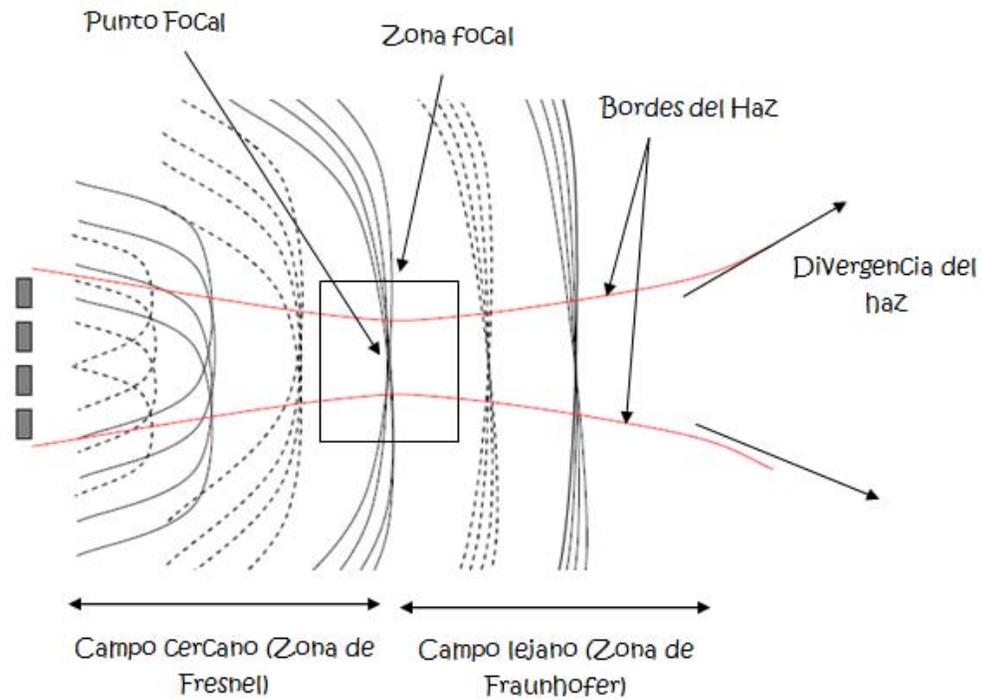


Fig. 1.12 Formación de un haz a partir de las ondas emitidas por una sonda formada por 4 elementos. [30]

1.4.4 Zona Focal

Es la zona dentro del campo acústico donde la resolución es óptima, es decir es la zona comprendida alrededor del punto focal. El diámetro del haz se reduce desde el transductor hasta la zona focal.

La longitud focal es la separación entre el transductor y el centro de la zona focal. El foco se puede clasificar en corto, medio y largo en función del tamaño de la zona focal o la distancia focal. Esta longitud se ha definido como la distancia de la superficie radiante hasta la posición del máximo en el eje. Todos los transductores, ya sea focalizados o no, producen ese máximo. En el caso de transductores no focalizados, la posición del máximo coincide con el valor del campo cercano.

1.4.5. Ancho del haz

El haz ultrasónico está constituido por un conjunto de vibraciones, que parten de un transductor, generalmente el ancho del haz ultrasónico está definido por el diámetro de la sonda emisora hasta que llega al punto focal y diverge finalmente (como se muestra en la fig. 1.13) en la zona lejana del campo acústico.

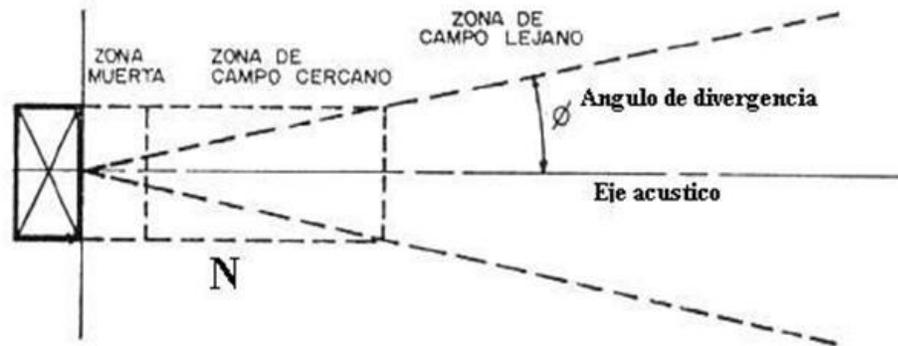


Fig. 1.13 Divergencia del haz ultrasónico [31].

Para un transductor circular la mitad del ángulo de divergencia se calcula teóricamente usando la ecuación 1.8:

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (1.8)$$

Dónde:

D. Es el diámetro el transductor (mm).

λ . Es la longitud de onda (mm).

θ . Ángulo de divergencia.

Cabe mencionar que:

A medida que se **augmenta** la frecuencia y el diámetro transductor, se **disminuye** la dispersión del haz.

A medida que **disminuye** la frecuencia y el diámetro transductor, **augmenta** la dispersión del haz.

A medida que **disminuye** la frecuencia y el diámetro del transductor, **aumenta** la amplitud del haz. [31]

Conformación del haz

Las primeras sondas estaban compuestas de un sólo transductor. Actualmente las sondas se pueden conformar a través del uso de un solo transductor o bien de un arreglo de transductores permitiendo la focalización y/o dirección del haz de ultrasónico. El número de elementos puede llegar a ser de 1000 en una sola sonda.

Según el principio de Huygens, la superficie del transductor se considera como un conjunto de elementos separados cada uno irradiando ondas hemisféricas hacia delante. Los elementos se mueven sincrónicamente y con amplitudes iguales. Consecuentemente, el campo de ultrasonidos producido por un conjunto lineal de elementos, se concentra en un haz que se hace más uniforme según se aumente la distancia al transductor. El haz es la región en la que las ondas están en fase. [30].

Los requisitos que se deben cumplir en la formación del haz son: preservar el ancho de banda que contiene toda la información acústica y preservar sin distorsión la información del objeto en la alineación de las ondas. [32]

Lóbulo principal

Es el correspondiente a la zona más cercana al foco hasta la primera aparición de los lóbulos laterales. Depende principalmente del diámetro del transductor. Además del haz principal (o lóbulo principal) de la energía ultrasónica existen dos tipos de lóbulos que se generan por diversos motivos (fig. 1.14), estos son los lóbulos laterales y los lóbulos de rejilla.

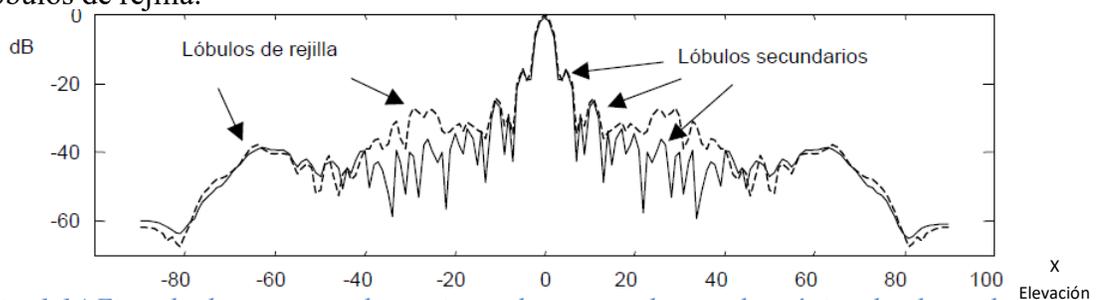


Fig. 1.14 Ejemplo de un campo de presiones de un transductor ultrasónico donde se observan los tipos de lóbulos generados [6].

Lóbulos de Rejilla

Los lóbulos de rejilla, que constituyen la más importante fuente de ruido acústico en la elaboración de imágenes, y que dependen en gran manera de la configuración geométrica de la apertura, en el diámetro del transductor, en la frecuencia y del ángulo de deflexión del haz. Los lóbulos de rejilla aparecen en aquellos puntos de campo en que la periodicidad entre los elementos del array es múltiplo de una longitud de onda como se muestra en la fig. 1.15. Generalmente tienen la misma amplitud que el lóbulo principal.

Debido a las periodicidades existentes en el array, las aportaciones al campo de ciertos elementos que están distanciadas entre sí a un valor constante, y para determinadas direcciones esta distancia es múltiplo del valor de una longitud de onda. Sobre esas direcciones las señales de los elementos se combinan en fase produciendo lóbulos conocidos como lóbulos de rejilla de gran amplitud y que, por tanto, dan lugar a falsas imágenes que hay que tratar de evitar. [6]

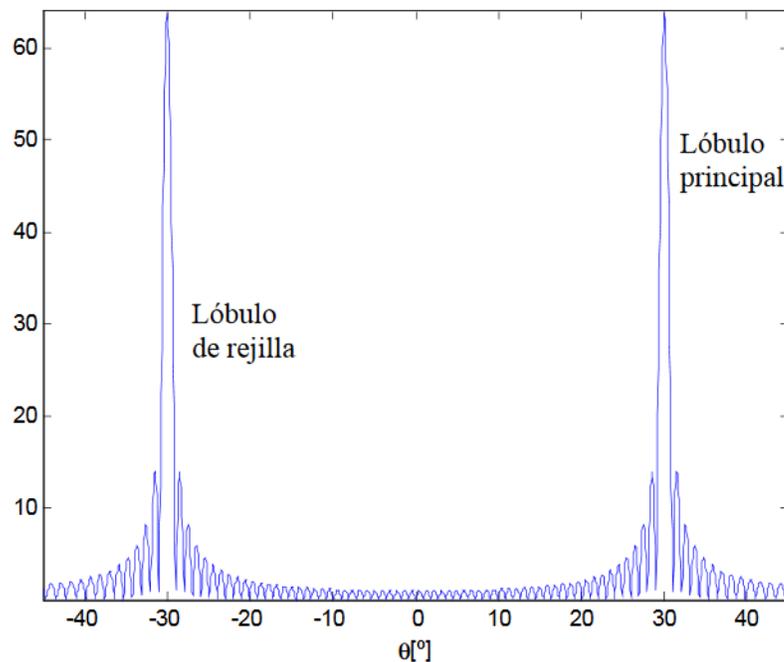


Fig. 1.15 Patrón lateral de un arreglo de 64 elementos separados por λ con deflexión de 30° [33].

Se puede observar el lóbulo principal situado a 30° y tenemos otro casi idéntico a -30° el cual es un lóbulo de rejilla con la misma amplitud como se caracterizan.

Si consideremos un arreglo lineal formado por N elementos puntuales que están separados entre sí a una distancia d y excitados en onda continua con desfases para focalizar en la dirección x_θ^F . En este caso, los lóbulos de rejilla adquieren una amplitud igual a la del lóbulo principal y, además, se encuentran en la dirección dada por la ecuación 1.9:

$$x_\theta^R = -\arcsin\left(\frac{\lambda}{d} - \sin x_\theta^F\right) \quad (1.9)$$

Podemos definir el nivel de lóbulos de rejilla (NLR) del arreglo, en unas condiciones de emisiones dadas, como la relación entre la amplitud de los lóbulos de rejilla LR y la del principal LP (ecuación 1.10).

$$NLR = \frac{LR}{LP} \quad (1.10)$$

Lóbulos Secundarios

La presencia de lóbulos secundarios deteriora la imagen, producen un ruido que limita el rango dinámico de la imagen. Por tales motivos se presta mucha atención a la reducción de la amplitud de los lóbulos secundarios.

Los lóbulos secundarios son la radiación en direcciones no deseadas que nunca puede ser totalmente eliminado como se observa en la fig. 1.14.

Así mismo se puede definir el nivel de lóbulos secundarios (NLS) como la relación entre la amplitud de los lóbulos secundarios LS y la del principal LP con la ecuación 1.11:

$$NLS = \frac{LS}{LP} \quad (1.11)$$

Aunque para algunos casos LS coincidirá con el pico de la amplitud de los lóbulos de rejilla (LR), lo que implicaría que $NLS = NLR$, sin embargo no siempre es así.

1.5 FOCALIZACIÓN

Los transductores focalizados concentran la energía de sonido en un lugar cuyo diámetro es menor que el de un haz no focalizado producido por un elemento transductor de la misma frecuencia y diámetro, y su importancia radica en el incremento de amplitud que se pueden lograr dentro de la zona focal, así como una mayor definición del haz.

Si el haz emitido no dispone de focalización, éste diverge gradualmente según atraviesa el medio, lo cual conduce a una pobre resolución espacial. El perfil del haz puede ser modificado mediante técnicas de enfoque. El enfoque reduce las dimensiones laterales del haz dentro de la zona de foco y por lo tanto mejora la resolución en profundidad y elevación. El fenómeno de enfoque ocurre en el punto del campo donde llegan simultáneamente todas las contribuciones de la superficie del transductor, esto es, en fase.

La colocación de lentes frente al transductor permite la focalización del haz. Las lentes circulares son usadas para elementos simples, consiguiendo un estrechamiento simétrico del haz. Para transductores en un arreglo lineal la focalización se logra con el uso de lentes acústicas que producen un estrechamiento del haz en un plano perpendicular al haz del ultrasonido.

1.5.1. Punto Focal

Es el punto en el cual el haz principal llega a su mejor diámetro y tiene su mejor resolución

En una exploración ultrasónica convencional el transductor se manipula para obtener una serie de imágenes bidimensionales, que al combinarse forman una imagen volumétrica de la zona de interés.

1.5.2. Mecánica

La generación del barrido del haz de ultrasonidos requiere el movimiento rotatorio o bien oscilatorio del cristal piezoeléctrico montado en la sonda. La focalización del haz

en este tipo de sondas es fija, y la calidad de la imagen es generalmente inferior a la de otras sondas que montan multi-transductores.

La exploración se puede realizar empleando un elemento mecánico motorizado para trasladar, girar, rotar un transductor convencional que adquiere una serie de imágenes ultrasónicas que abarcan el volumen de interés. [7]

- Lineal

Un mecanismo motorizado traslada linealmente el array lineal sobre la zona de exploración (fig. 1.16, inciso a).

- Sectorial

Un dispositivo motorizado se usa para girar alternativamente un arreglo lineal convencional sobre un eje paralelo a la superficie del transductor (fig. 1.16, inciso b y c).

- Rotacional

Un mecanismo motorizado rota un arreglo lineal 180° (fig. 1.16, inciso d).

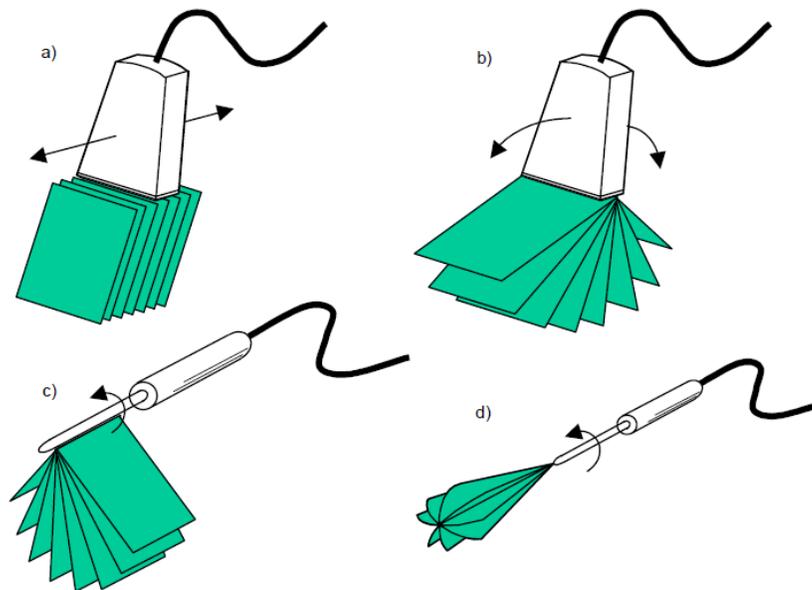


Fig. 1.16 Métodos de exploración mecánica: a) Exploración lineal, b) y c) Exploración sectorial y d) Exploración rotacional [7]

1.5.3. Electrónica

Una de las motivaciones de utilizar arreglos de elementos transductores es la posibilidad de deflejar electrónicamente el haz ultrasónico, esto es, sin movimientos mecánicos.

En una excitación común se retrasa para cada elemento un intervalo de tiempo. La vibración de cada elemento se propaga en el medio; como cada uno ha sido excitado en un instante de tiempo diferente como se observa en la fig. 1.17, el conjunto de las vibraciones crea un frente de ondas que se propaga en una dirección determinada, diferente del eje principal normal al transductor. [32]

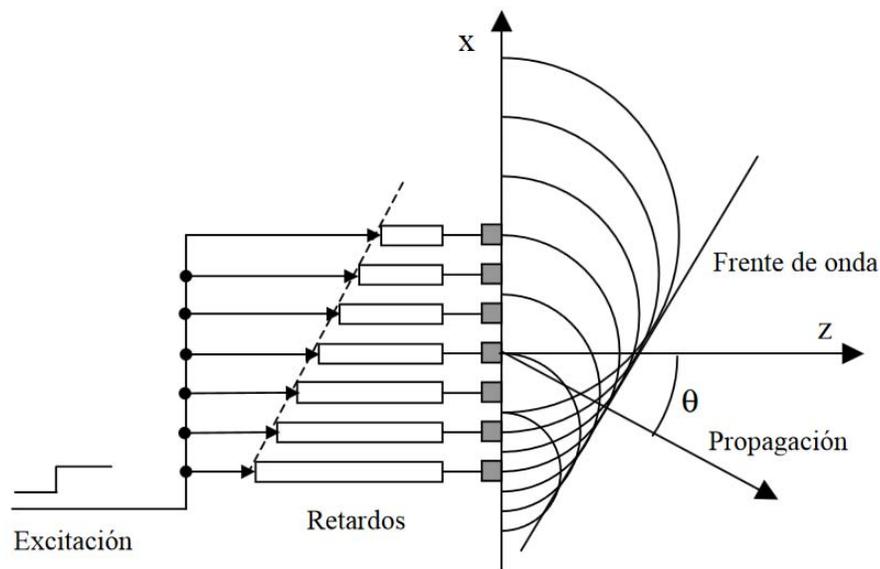


Fig. 1.17 Deflexión del Haz ultrasónico mediante retardos en cada elemento de un arreglo lineal [32].

Cada elemento se considera como un emisor individual. Igualmente en el procesamiento de las señales recibidas podemos introducir tiempos de retraso en cada señal asociada con cada elemento, consiguiendo así que las diferentes partes del frente de ondas se detecten al mismo tiempo. Este enfoque continuo se conoce como enfoque dinámico.

Controlando los retardos aplicados en emisión o recepción, el haz ultrasónico puede enfocarse en cualquier punto dentro del campo cercano de la apertura D , esto hasta una profundidad de $D^2/4\lambda$. En la figura 1.18 los retardos aplicados son simétricos alrededor del elemento central, para producir un foco en el eje del arreglo. El objetivo es retrasar

el disparo de cada elemento para que los frentes de onda individuales coincidan en el tiempo sobre el foco.

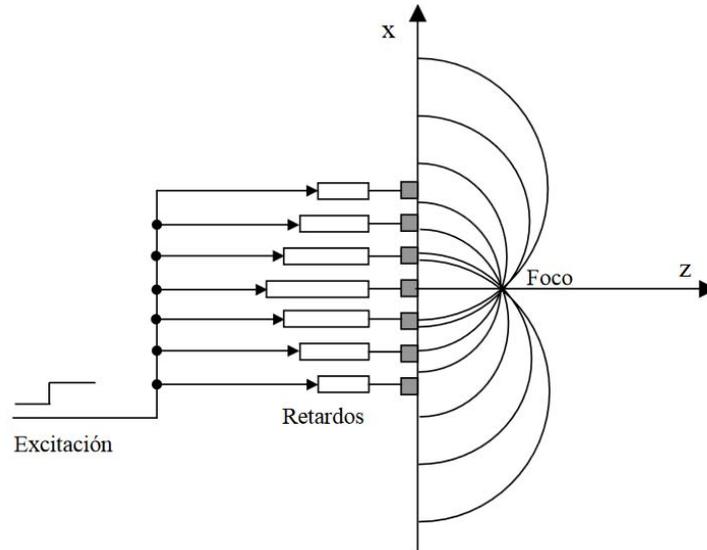


Fig. 1.18 Focalización del haz en emisión mediante retardos simétricos a partir del elemento central [32]

Focalización Dinámica

La técnica de focalización dinámica en recepción, es usada en los sistemas de imagen ultrasónica convencionales, para incrementar la resolución y el contraste de la imagen. En esta técnica se cambia el foco dinámicamente como se muestra en la fig 1.19 de manera que se encuentre situado en todo momento sobre el frente de ondas en propagación.

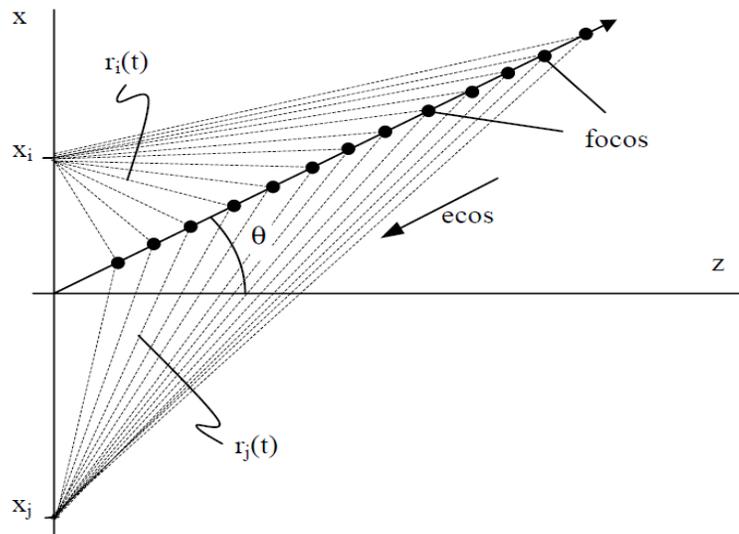


Fig. 1.19 Las distancias de cada elemento a cada foco son variables con el tiempo y diferentes para cada elemento. [7]

1.6 RESOLUCIÓN AXIAL Y LATERAL

La resolución es la separación mínima requerida para poder distinguir dos reflectores como distintos. La generación de la imagen requiere la producción discontinua o pulsada del ultrasonido. Cada pulso típicamente consta de tres ciclos. El producto de la longitud de onda por el número de ciclos del pulso determina la longitud del pulso, la cual define la resolución máxima a lo largo del eje del haz (resolución axial o longitudinal) [30].

La resolución axial depende de la frecuencia, la cual es constante en un transductor. En la figura 1.20 los reflectores A y B están separados por una distancia mayor que la longitud del pulso, de manera que la imagen los reconocerá como objetos diferentes. Sin embargo los reflectores C y D están separados por una distancia inferior que la longitud del pulso, por lo que, en la imagen aparecerán como un objeto único. [30]

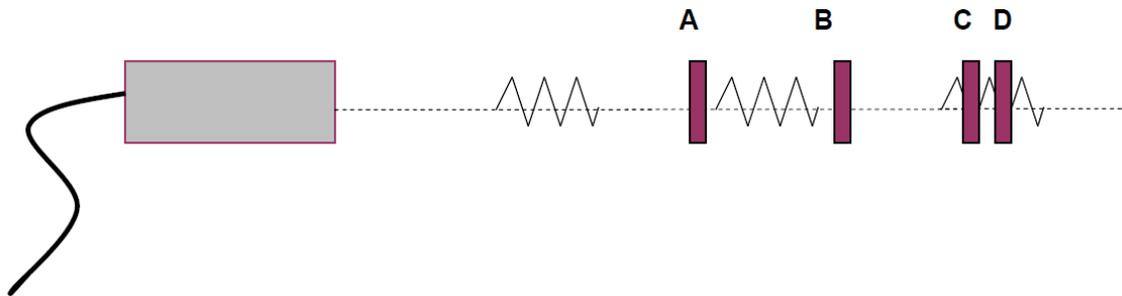


Fig. 1.20 Resolución Axial [30]

El ancho del haz ultrasónico determina la máxima resolución de los objetos situados en el plano perpendicular al eje axial. La focalización se emplea para alcanzar la máxima resolución lateral a una profundidad deseada.

En la figura 1.21. se muestra la detección de los elementos A y B según la resolución lateral del transductor ultrasonico.

Caso A: El ancho del haz, en la zona focal, es inferior a la distancia entre los puntos a estudio, permitiendo que la imagen los identifique como estructuras distintas.

Caso B: La distancia entre los puntos a estudio es inferior al ancho del haz. La imagen lo mostrará como un sólo objeto

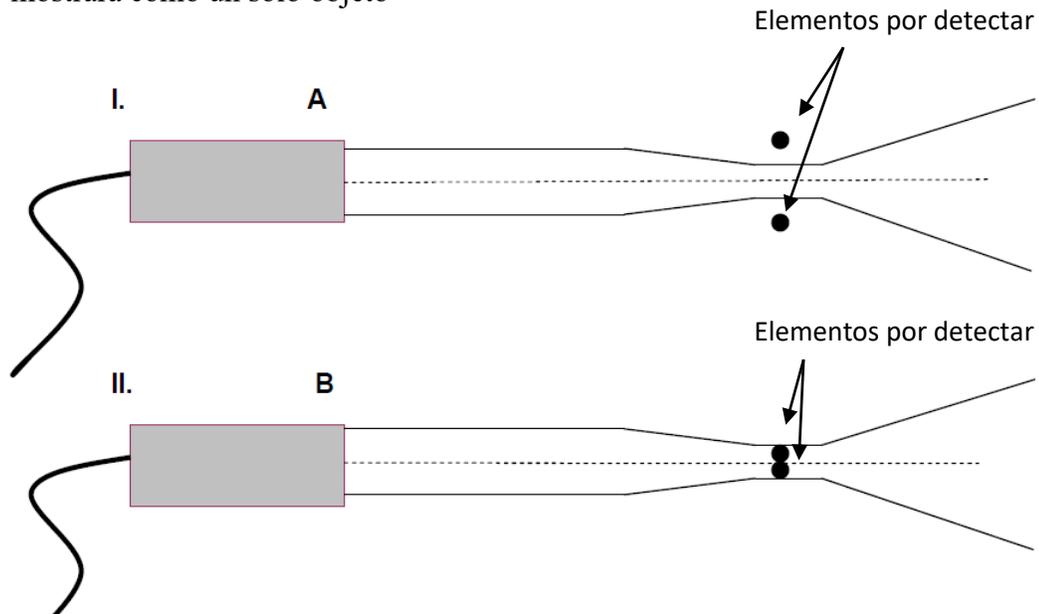


Fig. 1.21 Resolución Lateral [30]

La resolución de la imagen no sólo está determinada por el eje axial, sino también por las dimensiones laterales y el grosor del haz. La resolución lateral también conocida como transversal o azimutal varía con la focalización. El enfoque reduce las dimensiones laterales del haz, mejorando la resolución [30].

La amplitud y longitud del pulso ultrasónico se deberían hacer más cortas (con el uso de altas frecuencias) lo que nos permitiría mejorar la resolución espacial. [30]

Rango Dinámico

En un sistema, es la relación entre la señal discernible más alta y la detectable más pequeña. Está delimitado por el Nivel de lóbulos de rejilla y secundarios.

1.7 TRANSDUCTORES

Hoy en día los transductores se han convertido en una parte fundamental en la industria, indispensables en la automatización y control de procesos, medición y adquisición de ciertas variables que para la electrónica no serían legibles sin la intervención de los

mismos. Magnitudes como temperatura, presión, nivel de líquidos o cantidad de humedad son transformadas por un transductor en una señal eléctrica para poder ser procesadas.

Se pueden clasificar de acuerdo al tipo de señal que entregan en la salida:

Análogos y Digitales.

Así mismo se pueden clasificar de acuerdo a los tipos de energía que manejan, por ejemplo:

Electromagnéticos, fotovoltaicos, etc.

1.7.1 Transductores Ultrasónicos

Un transductor ultrasónico es un dispositivo que transforma la energía eléctrica en vibraciones a frecuencias ultrasónicas. Estas ondas rebotan desde el material hasta el punto o la zona de estudio que se requiere, se utilizan los ecos y sus tiempos de recorrido de esas ondas para su análisis médico o industrial.

“El elemento activo o elemento piezoeléctrico es el encargado de realizar la conversión electromecánica, el cual está conectado eléctricamente al exterior a través de contactos soldados en los electrodos que cubren al elemento piezoeléctrico. Junto a dicho elemento, se encuentran otros elementos no activos que determinan las características temporales de emisión y/o recepción. Estos elementos son el llamado “Backing” o contra masa y capa de acoplamiento” (fig. 1.22). [21]

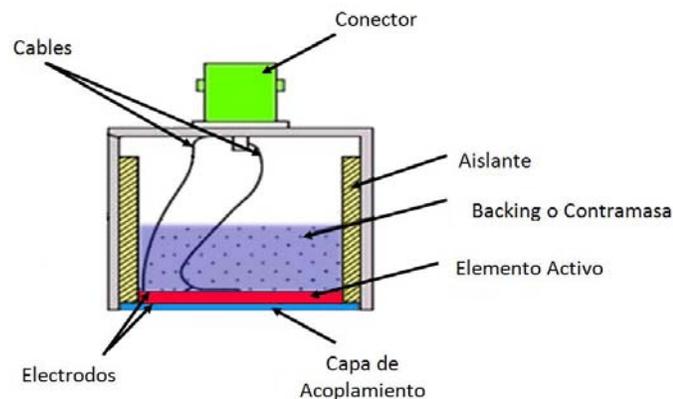


Fig. 1.22 Partes de un transductor ultrasónico

Los transductores ultrasónicos utilizan en su mayoría un elemento piezoeléctrico, del cual aprovechan el llamado “Efecto piezoeléctrico inverso”, que se produce cuando la generación de ondas (vibración mecánica) viene de la excitación de este material que a menudo se trata de cuarzos, cerámicas y el polímero PVDF.

Hay varios tipos de transductores de ultrasonido que son clasificados normalmente por su aplicación o por su diseño. Por ejemplo los transductores llamados de contacto son utilizados para ser aplicados directamente en una superficie para ser analizada, incluso los transductores de contacto pueden ser clasificados de acuerdo a su forma, como pueden ser matriciales, lineales o convexos.

1.7.2 Arreglos de Transductores

Existe un cierto número de industrias que requieren avances significativos en cuanto Inspección No Destructiva se refiere, emplean la inspección en línea, este tipo de industrias constantemente buscan mejoras en el desempeño de sus sistemas de monitoreo e inspección. Sus necesidades más comunes son referentes a incrementos en la productividad, reducción de áreas no inspeccionadas y mejoras en la detección y medición de discontinuidades. [22]

Se ha diseñado y desarrollado la técnica de conjuntos de transductores en fase. Este tipo de conjuntos o arreglos de transductores, contruidos a partir de un gran número de simples transductores estructurados en forma linear, anular, circular o en forma de arreglos matriciales, permiten que tareas como lo son el barrido electrónico, enfoques y deflexiones puedan llevarse a cabo, así como las ventajas asociadas en términos de aplicación práctica, flexibilidad, velocidad y facilidad de ciertas inspecciones. [22]

También se presentan diferentes aplicaciones que han implementado esta tecnología, incluyendo detalles acerca del tipo de transductor empleado en cada una de ellas. A través de estas aplicaciones, se remarcan los beneficios de esta tecnología en muchos campos, incluyendo las industrias: nuclear, aeronáutica e industrias que realizan inspección en línea. [22]

El concepto de arreglos de fase se basa en el uso de transductores construidos a partir de elementos individuales, en los cuales, cada uno puede ser manejado en forma independiente. Este tipo de transductores son conectados a unidades de control especialmente adaptadas, lo cual permite la recepción y transmisión de señales en forma independiente en cada canal. Este tipo de unidades también debe tener efecto en los diferentes retardos electrónicos de tiempo para cada canal, tanto en recepción como en transmisión.

1.7.2.1 Arreglo lineal de transductores.

Los elementos están colocados en una sola fila, este sensor es creado generalmente cortando el material piezoeléctrico en piezas rectangulares como se muestra en la fig. 1.23. Cuenta con amplia cobertura del haz, focalización variable, haz angular.

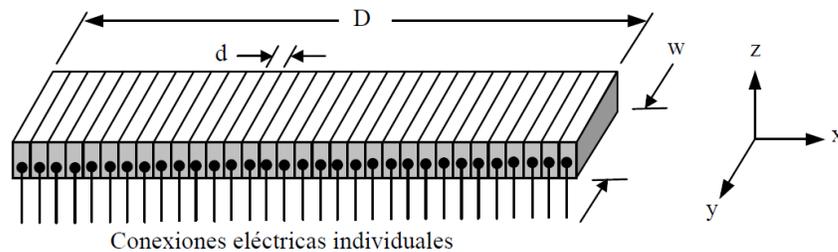


Fig. 1.23 Transductor lineal [32]

Lineal Curvo

Otro ejemplo de un arreglo lineal, Una sola fila de elementos que han sido curvados para producir el ángulo de la forma deseada o conforme a la geometría de la pieza que se está inspeccionando como se observa en la fig. 1.24. Puede estar diseñado de forma cóncava o convexa con radio fijo de curvatura. Con focalización y ángulo variable. Apto para aplicaciones en tubería, inspección del diámetro interno y externo [23].

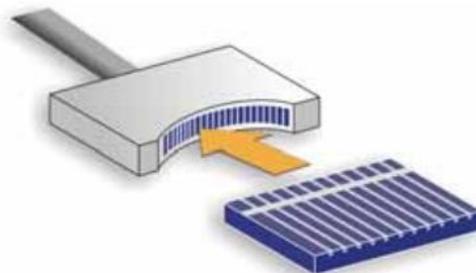


Fig. 1. 24 Transductor lineal curvo. [23]

1.7.2.2 Matriciales.

Los elementos están colocados en un arreglo matricial como se muestra en la fig. 1.25, estos sensores también pueden ser curvos, el haz puede estar orientado en tres dimensiones. Diseñado para múltiples aplicaciones.

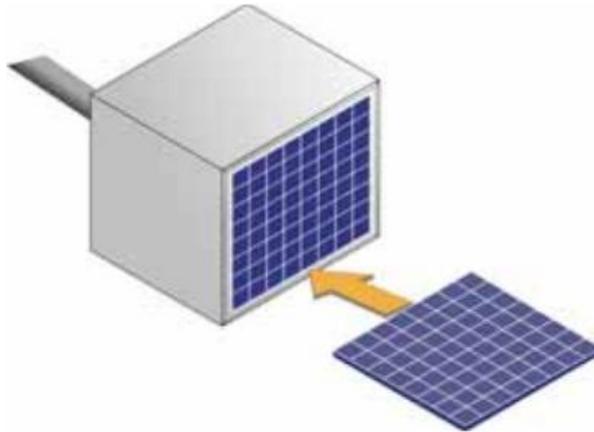


Fig. 1.25 Transductor Matricial. [23]

1.7.2.3 Anulares.

El arreglo de elementos es en forma de un anillo concéntrico (fig 1.26), se le puede dar una forma esférica para una pre focalización. Cuenta con la característica de haces muy pequeños a varias profundidades. Puede ser utilizado en inspecciones generales de inmersión y focalización variable.



Fig. 1.26. Transductor Anular. [23]

1.7.2.4. Anillos Segmentados.

El transductor ultrasónico es el elemento más crítico y del cual dependen las limitaciones de calidad de un sistema de imagen ultrasónica para aplicaciones médicas e industriales. Los arreglos de transductores han adquirido un gran auge porque permiten deflectar y focalizar el haz ultrasónico sin necesidad de mover el transductor y manteniendo buenas características de imagen. [6]

Un arreglo en dos dimensiones de matriz cuadrada ($N \times N$) puede deflectar y focalizar el haz en cualquier dirección de acimut y elevación, y de esta forma se puede obtener la imagen de un volumen frente a la apertura sin necesidad de mover el transductor, o bien obtener varios cortes de planos paralelos y/o perpendiculares al transductor, etc. Sin embargo, existen serias dificultades a la hora de construir arreglos de transductores debido a que requieren conectar un gran número de elementos muy pequeños. Esto es debido a que para eliminar los problemas de tener lóbulos de rejilla normalmente se mantiene una distancia entre elementos igual a $\lambda/2$. Por ejemplo, para un arreglo cuadrado de 20mm de lado que vibre a una frecuencia de 3.5MHz y con propagación en agua ($\lambda = 0.4\text{mm}$) la condición anterior requiere una distancia entre elementos de 0.2mm. Este arreglo tendría por tanto 10000 elementos cuadrados cuyo lado sería menor que 0.2mm. Hoy en día es impensable que se pueda fabricar un sistema de control para este arreglo con tal número de canales. (Teniendo en cuenta que el límite de canales de los sistemas comercializados esta en 256. Las conexiones eléctricas para tal densidad de elementos son también imposibles de realizar con las técnicas actuales. [6]

Para resolver este problema hay que reducir el número de elementos activos del arreglo, para lo cual se utilizan técnicas de sub muestreo, que están basadas en seleccionar elementos aleatoriamente, con alguna estrategia de complementariedad en emisión y recepción. Se han presentado numerosas estrategias capaces de mantener aceptables características del campo y reduciendo al mismo tiempo en más de un orden de magnitud el número de elementos activos. En cambio, estas soluciones producen una reducción drástica de la energía emitida.[6]

Una clara alternativa a esta solución es usar arreglos 2D de Anillos. Este tipo de aperturas tendrían dos claras ventajas: por un lado, su simetría axial permite obtener imágenes volumétricas con características casi invariantes, por otro lado, al ser el grado de periodicidad de estas aperturas claramente menor que el que ofrecen los arreglos de matriz cuadrada. Como consecuencia, se reducirían el número de elementos del arreglo, pero manteniendo la apertura plenamente activa [6].

2. ARREGLO DE ANILLOS SEGMENTADOS CON PVDF

Características

El cálculo del campo producido por un arreglo de transductores en forma de un anillo segmentado es más difícil de evaluar debido a la geometría compleja que tiene, sin embargo existe una metodología que permite la estimación del campo producido por el arreglo a través del análisis llamado “Respuesta al impulso”, la cual presenta las siguientes ventajas: [6]

- No tiene restricciones de aplicación.
- Es válida para geometrías irregulares, planas y no planas.
- No tiene restricciones respecto a la forma del pulso.

Estos arreglos están compuestos por un conjunto de anillos concéntricos, de igual anchura generalmente y divididos en sectores de igual dimensión para cada anillo.

El campo ultrasónico producido por un anillo es altamente directivo. Si el anillo se divide a su vez en segmentos, la apertura puede ser utilizada como un arreglo bidimensional capaz de generar imágenes tridimensionales.

Permite reducir de forma importante el número de elementos de la apertura manteniendo un campo de buena calidad.

2.1 GEOMETRÍA DE UN ANILLO SEGMENTADO

En base a variar ciertos parámetros de este tipo de arreglos podemos cambiar el campo acústico y la calidad de imagen.

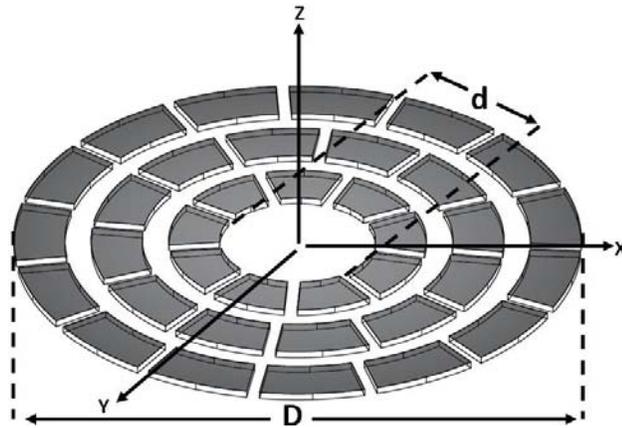


Fig. 2.1. Diámetro interno (d) y externo (D) de un arreglo de anillos segmentados

Algunos de estos parámetros son[6]:

- ❖ **Frecuencia [Hz].** f_c y el ancho de banda, B , de la señal de excitación del arreglo, considerando la atenuación del medio.
- ❖ **Diámetro [mm].** (*Interior, d*) que limita un espacio no activo en el centro del arreglo. (*exterior, D*) que junto con la frecuencia determinan la resolución lateral.
- ❖ **Distancia entre anillos [mm].** E_k Que puede ser fija para tener una distribución regular de los elementos, o variar para el diseño de alguna apertura específica.
- ❖ **Separación angular entre elementos [°].** ϕ_k , que en la mayoría de los casos se mantiene constante, con lo que tendríamos el mismo número de elementos para cada anillo, K , pero de mayor tamaño a medida que el anillo se aleje del centro.

- ❖ **Desfase entre anillos.** $\Delta\phi_k$, este parámetro permite aumentar la diversidad en la distribución espacial de los elementos y así romper la regularidad de la distribución.

A partir de esto se obtiene el número de elementos de cada anillo (ecuación 2.1):

$$N_k = \frac{2\pi}{\phi_k} \quad (2.1)$$

Dónde:
 N_k . Número de elementos de cada anillo
 ϕ_k . Separación angular entre elementos

Donde el número total de elementos que componen la apertura está dada por la ecuación 2.2:

$$N = \sum_{k=1}^K N_k = \sum_{k=1}^K \frac{2\pi}{\phi_k} \quad (2.2)$$

Dónde:
 N. Número total de elementos que componen la apertura

- ❖ Anchura radial de los elementos, e_k , puede ser igual o menor a E_k .
- ❖ Anchura angular de los elementos, α_k que puede ser menor o igual que ϕ_k

A partir de estos parámetros podemos deducir otros más.

- ❖ Como la posición central de los elementos (r_k, ϕ_{kj}). Definida por las ecuaciones 2.3 y 2.4:

$$r_k = \frac{d}{2} + \frac{E_1}{2} + (k - 1)E_k$$

Dónde:
 $K= 1, \dots, K$ es el orden del anillo en el arreglo.
 $J=0, \dots, N_k - 1$ es el orden del elemento del anillo.

(2.3)

$$\phi_{kj} = j\phi_k + \Delta\phi_k$$

(2.4)

Así mismo obtenemos el radio interno, R_{1k} (ecuación 2.5), y externo, R_{2k} , (ecuación 2.6) de cada segmento del anillo mediante:

$$R_{1k} = \frac{d}{2} + (k - 1)E_k$$

Y

$$R_{2k} = R_{1k} + e_k$$

Dónde:

R_{1k} . Radio interno decada segmento del anillo.

R_{2k} . Radio externo decada segmento del anillo.

d . Diámetro interior.

k - 1. Orden del elemento del anillo

E_k . Distancia entre anillos.

e_k . Anchura radial de cada elemento.

ϕ_k . Separación angular entre elementos

(2.5)

(2.6)

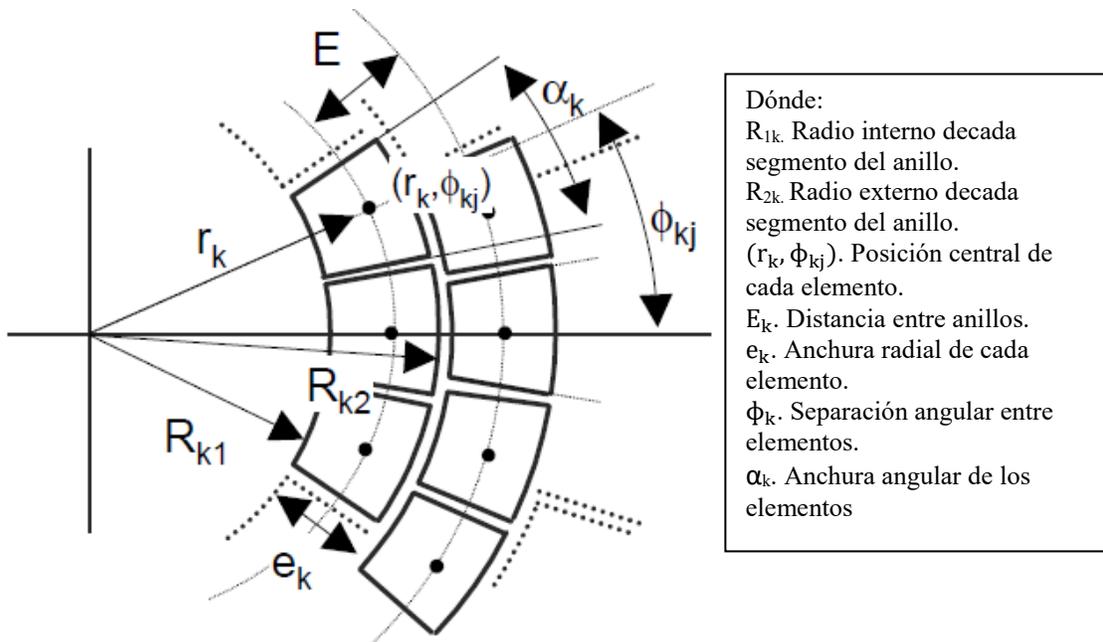


Fig. 2.2 Geometría de los elementos de un arreglo de anillos segmentados. (Óscar Martínez Graullera, 2000:77) [6]

Todos estos parámetros para el diseño de un arreglo de anillos segmentados suponen un trabajo complejo debido a la cantidad de variables involucradas, ya que al tener más de un anillo se requiere hacer el cálculo para cada uno de ellos.

2.2 CAMPO ACÚSTICO DE UN ARREGLO DE ANILLOS SEGMENTADOS

Aplicando la teoría de superposición de elementos se tiene que la respuesta al impulso de un arreglo de anillos segmentados formado por un número de elementos determinado se obtiene sumando las respuestas al impulso de cada uno de ellos (ecuación 2.7).

$$h_t(\vec{x}, t) = \alpha_i h_i(\vec{x} - \vec{x}_i, t - T_i) \quad (2.7)$$

Dónde:

$h_i(\vec{x}_i, t)$ Indica la respuesta al impulso para cada elemento i para el punto \vec{x} en el campo.

\vec{x}_i Es el centro del elemento y se obtiene mediante la ecuación 2.8.

$$\vec{x}_i = (r_k, \phi_i) = (r_k, \phi_{kj}) \quad (2.8)$$

T_i es el retardo aplicado a cada elemento en una dirección determinada. $x^F(x_\phi, x_\theta)$ (Ecuación 2.9)

$$T_i = R \sin x_\theta^F (\cos x_{\phi_1} \cos x_\theta^F + \sin x_{\phi_1} \sin x_\theta^F) \quad (2.9)$$

Se tiene el espacio en coordenadas esféricas (x_r, x_θ, x_ϕ) .

Dónde:

x_r . Proyección resultante de la suma del frente de ondas de cada elemento del anillo.

x_θ . Ángulo que la proyección forma con el eje z.

x_ϕ . Ángulo que la proyección sobre el plano xy forma con el eje x

El arreglo se sitúa en el plano $x_\theta = 90^\circ$.

Centrado en $x_r = 0$

En la fig. 2.3. Se observa la geometría de un arreglo de transductores en forma de anillo segmentado con sus parámetros previamente mencionados.

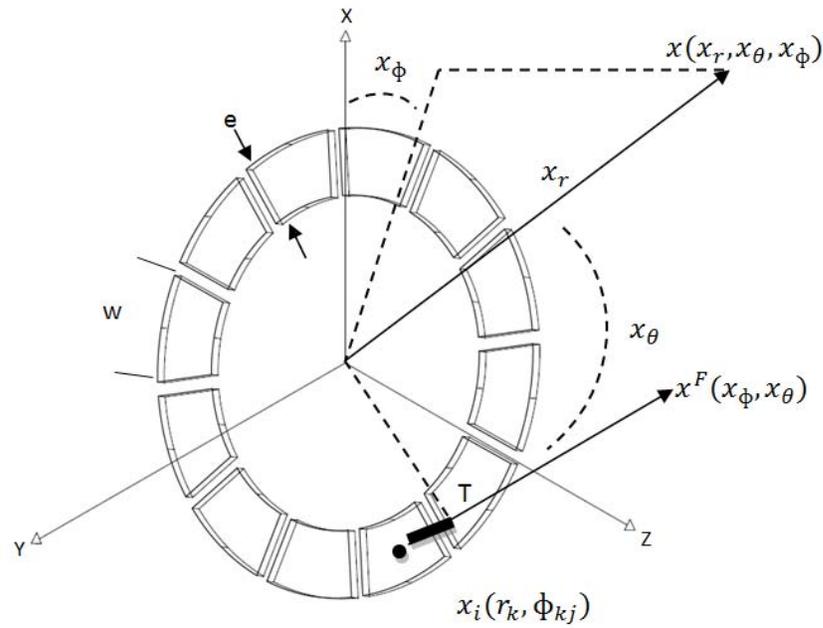


Fig. 2.3 Arreglo de transductor en el plano x, y, z

Sumando la respuesta al impulso de cada elemento del anillo se consigue la focalización del transductor, en la fig. 2.4 se muestra los parámetros de un arreglo de transductores en forma de anillo segmentado con sus parámetros en focalización:

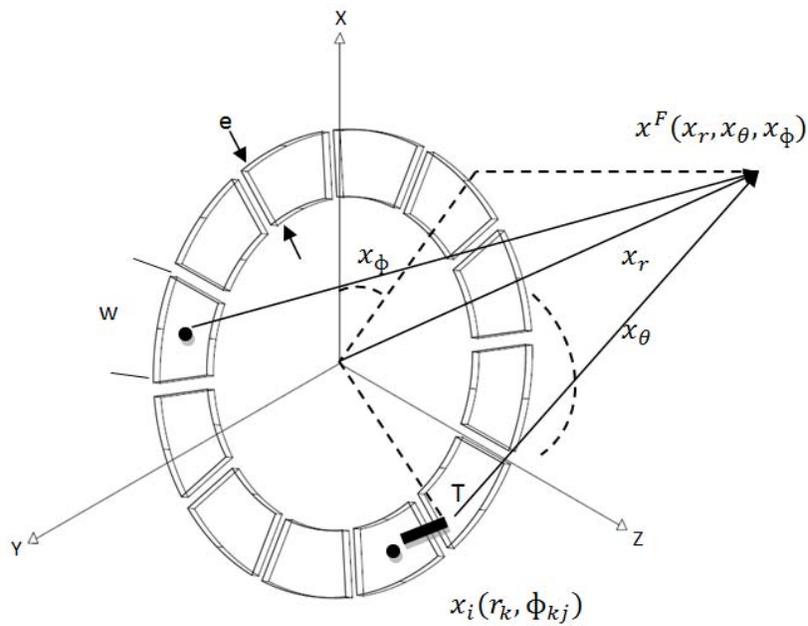


Fig. 2.4 Geometría del transductor en focalización

2.3 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DEL CAMPO ACÚSTICO

Cálculo aproximado del campo acústico.

Para reducir el cálculo del campo se utilizan métodos aproximados que son de gran ayuda, en las primeras etapas del diseño, las aperturas calculadas permiten suponer cuáles serán los datos parciales sobre el comportamiento general de una simulación, pese a que estos modelos no pueden sustituir por completo la respuesta del campo acústico, si permiten tener una buena aproximación de la respuesta del transductor [6].

La siguiente metodología fue obtenida del trabajo *Arrays de Anillos Segmentados para la generación de imagen ultrasónica 3D* (Óscar Martínez Graullera, 2000) [6] la cual se basa en aproximar las respuestas al impulso de cada elemento (segmento anular) del arreglo.

Considerando los elementos como emisores puntuales de ondas esféricas, la respuesta de cada elemento se modela mediante una Delta de Dirac, cuyo peso es inversamente proporcional a la distancia que existe entre el elemento y el punto del campo, y directamente proporcional al área del elemento. Entonces la respuesta al impulso del arreglo viene dada con la ecuación 2.10:

$$h_t(\vec{x}, t) = \sum_{i=1}^N s_i \frac{\delta(t - T_i - |\vec{x} - \vec{x}_i|/c)}{2\pi|\vec{x} - \vec{x}_i|} \quad (2.10)$$

Dónde:

s_i . Es el área del elemento

En el caso de un segmento anular se calcula con la ecuación 2.11:

$$s_i = (R_{1i}^2 - R_{2i}^2) \frac{\alpha_i}{2} \quad (2.11)$$

α_i . Es el ángulo del segmento circular.
 R_{1i} y R_{2i} . Son los radios (interior y exterior) del elemento i .

Considerando una excitación arbitraria $v(t)$ el campo de presiones viene dado por la ecuación 2.12:

$$p(\vec{x}, t) = p_o \frac{dv(t)}{dt} * \sum_{i=1}^N s_i \frac{\delta(t - T_i - \frac{|\vec{x} - \vec{x}_i|}{c})}{2\pi|\vec{x} - \vec{x}_i|} \quad (2.12)$$

Esta aproximación no toma en cuenta la difracción del elemento pero se facilita para excitaciones de banda estrecha y para la descripción de los lóbulos de rejilla producidos por aperturas complejas como las de arreglos de anillos segmentados.

El campo de presiones para banda estrecha viene dado por la ecuación 2.13:

$$p(\vec{x}, t, w) = -j \frac{wp_o c}{2\pi} \exp(jwt) \sum_{i=1}^N s_i \frac{\exp(jw(-T_i - \frac{|\vec{x} - \vec{x}_i|}{c}))}{|\vec{x} - \vec{x}_i|} \quad (2.13)$$

Desarrollando la distancia $|\vec{x} - \vec{x}_i|$ a partir de las coordenadas del punto $x(x_r, x_\theta, x_\phi)$ y aplicando el desarrollo binomial tendremos (ecuación 2.14):

$$p(\vec{x}, t, w) = -j \frac{wp_o c}{2\pi} \exp(jwt) \exp(jkx_r) \sum_{i=1}^N s_i \exp(jk(cT_i + (x_{xi} \cos x_\phi + x_{yi} \sin x_\phi) \sin x_\theta)) \quad (2.14)$$

Dónde:

$$k = 2\pi/\lambda$$

De esta ecuación tomamos el modulo que corresponde al Factor del Arreglo que describe el campo sobre el plano focal como (ecuación 2.15):

$$FA(\theta, \phi) = \left| \sum_{i=1}^N s_i \exp(jk(cT_i + (x_{ri} \cos x_{\phi_i} \cos x_\phi + x_{ri} \sin x_{\phi_i} \sin x_\phi) \sin x_\theta)) \right| \quad (2.15)$$

Dónde:

Las coordenadas:
 (x_{ri}, x_{ϕ_i}) . Son los centros de los elementos.

El resultado de esta expresión para el caso de un anillo puede ser presentado como sumatorio de funciones de Bessel como lo muestra la ecuación 2.16:

$$FA(\theta, \phi) = \sum_{i=1}^N I_i \exp j k x_{ri} \cos(x_\phi - x_{\phi i}) \sin x_\theta - \beta_i \quad (2.16)$$

Dónde:

x_{ri} . Es un valor constante para cualquier i
 I_i . Son los valores de apodización de la apertura

El valor x_{ri} es constante para cualquier i , ya que se considera que todos los elementos son iguales en dimensiones, los retardos de focalización se expresan con valores de fase de β_i que para una determinada dirección de deflexión (x_θ^F, x_ϕ^F) toma los siguientes valores (ecuación 2.17):

$$\beta_i = -k x_{ri} \cos(x_\phi^F - x_{\phi i}) \sin x_\theta^F \quad (2.17)$$

2.4 GEOMETRIA PROPUESTA

Se propone una geometría que consta de un anillo circular segmentado ya que con esta geometría tenemos bastantes ventajas en comparación a otras, se elimina la periodicidad entre los elementos, además el diseño con anillos segmentados es altamente directivo.

Si se quisiera construir este diseño, tiene grandes ventajas como la conexión de los electrodos a cada elemento del arreglo que a comparación de otras geometrías, por ejemplo un arreglo matricial, es más fácil la conexión de los mismos

El arreglo que se propone cuenta con las siguientes dimensiones, todas ellas a partir de la longitud de onda a la que se llegó con la frecuencia de operación que se utilizó para la simulación en el software.

Para la siguiente simulación se trabajara con un arreglo de anillos segmentados con las siguientes características que también se muestran en la fig. 2.5:

- Frecuencia de excitación: **2 MHz**
- Anillo Segmentado de **6 elementos**.
- Espesor de **28 micras**.
- Con un diámetro exterior de: **20λ e interior de: 14λ** .
- Un área de cada segmento de: **28.37 mm^2**
- Un área total de: **170.22 mm^2**

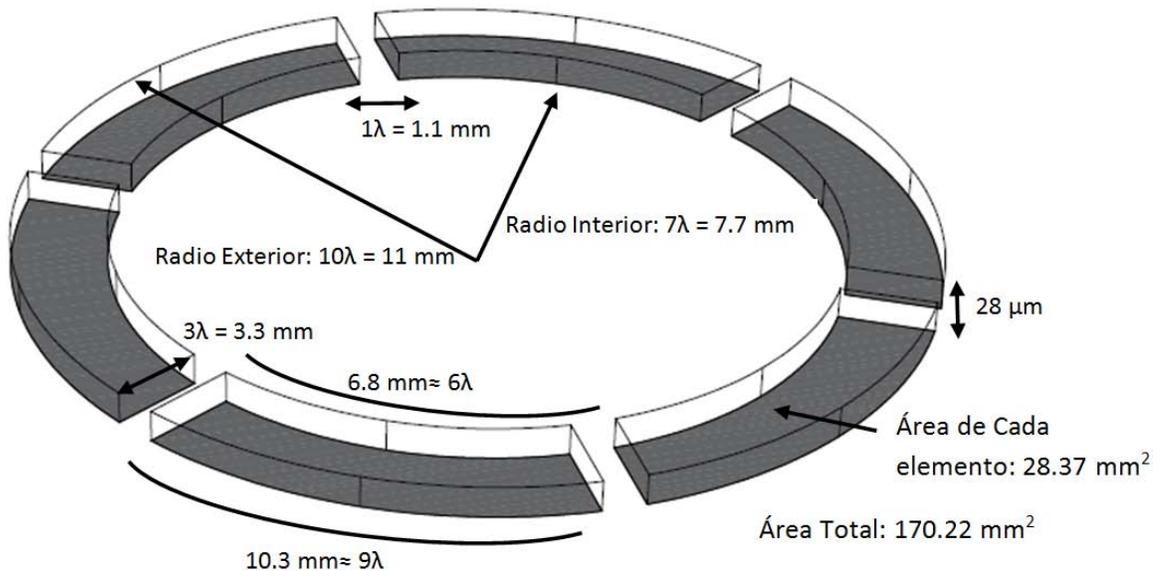


Fig. 2.5 Geometría propuesta. Anillo Circular Segmentado de seis elementos en dimensiones a múltiplos de la longitud de onda

3. METODOLOGÍA

3.1 SOFTWARE BASADO EN EL MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO (*COMSOL Multiphysics*)

Es un software de análisis por el método de elementos finitos que permite la simulación del comportamiento de modelos que pueden involucrar varios comportamientos físicos de los materiales que se disponen en sus librerías. Cuenta con productos adicionales complementarios que lo hacen compatible con otros softwares como Matlab y AutoCAD para ampliar aún más su plataforma de resolución de modelos.

Es un entorno integrado de gran alcance diseñado para la resolución de problemas interdisciplinarios, cuenta con una interfaz gráfica práctica en donde fácilmente se localizan sus áreas de trabajo.

Cuenta con área para el diseño de la geometría partiendo de formas simples y herramientas sencillas pero muy útiles cuando se necesita ensamblar, recortar, girar, duplicar y restar áreas, entre otras.

En COMSOL Multiphysics es posible ingresar las ecuaciones que describen alguna propiedad de un material, incluso crear el material dentro de su biblioteca para tenerlo disponible en nuestro modelado.

Distintas formas de mallado para el análisis, desde un mallado muy sencillo hasta uno bastante fino de todo el sistema, esto implica que el número de elementos en los que se divide el modelo, así como la necesidad de cómputo aumenta con la complejidad del mallado.

Disponemos de un “árbol del modelo” que da una visión completa del modelo; desde la geometría, las condiciones de contorno, el mallado, las físicas usadas, los estudios que se van a realizar, el post procesamiento y las maneras de visualización de nuestro problema.

Antes de realizar la simulación de la membrana rectangular se realizaron pequeñas simulaciones con el fin de fijar una frecuencia ideal para trabajar en el software, ya que se tiene que tener en cuenta para las dimensiones de las geometrías que se realizaron. Además de ver el comportamiento de las vibraciones sobre este material.

Se optó por trabajar a una frecuencia de 2MHz por la relación de tamaño que se podría aproximar al tamaño de un transductor real. En cuanto al voltaje aplicado a la señal de excitación no fue un parámetro tan relevante en el software ya que para fines de la simulación al variarlo no había cambios significativos en la intensidad de la vibración sobre la membrana.

Se realizó una simulación de una membrana de media longitud de onda por lado, donde esperábamos observar el valle de una onda en una de las caras de la membrana y una cresta del otro lado. Al hacer la simulación los resultados fueron satisfactorios.

También se realizó una simulación de una membrana de una longitud de onda por lado, donde se esperaba ver una la cresta y el valle de una onda en cada lado de la membrana y por ambas caras, lo cual se logró.

Una vez que se realizaron estas pequeñas pruebas se realizaron las simulaciones con mayor grado de complejidad, las cuales se documentan a continuación:

La primera de ellas consta en incrementar las dimensiones de la membrana.

La segunda simulación será la misma membrana con una metalización de plata por cada lado.

La tercera simulación consiste en una geometría que se propuso en el tema 2 y la simulación final consiste en tratar de metalizar esta geometría con capas de plata al igual que en la segunda simulación.

3.2 SIMULACIÓN DE UNA MEMBRANA RECTANGULAR

Empleando la tabla de datos que se logró reunir del PVDF, se simuló una membrana de PVDF de forma rectangular con la finalidad de ver el comportamiento del material con las propiedades recabadas y los parámetros que se calcularon en una geometría mucho más simple y sencilla antes de realizar la simulación con el anillo segmentado.

La simulación de la membrana rectangular cuenta con las siguientes características:

❖ DIMENSIONES

Espesor: 28 Micras

Ancho: 2 longitudes de onda (2λ)

Largo: 3 longitudes de onda (3λ)

❖ EXITACIÓN

En esta simulación, la membrana de PVDF se excitó con una señal sinusoidal con una frecuencia de 2 MHz a condición de 100 volts pico a pico. Se utilizó esta frecuencia ya que fue la frecuencia con la que se apreció de mejor manera las longitudes de onda sobre las geometrías con las que se comenzaron a realizar las pruebas, es decir fue la frecuencia que nos dio mejores resultados visibles. Sin dejar de tomar en cuenta que el PVDF posee un ancho rango de frecuencia de operación y que su frecuencia de resonancia es aproximadamente de 24 MHz.

De acuerdo a la ecuación 3.1 de la longitud de onda tendremos que cada longitud de onda tendrá las siguientes dimensiones en milímetros:

$$\lambda = \frac{V_{sound}}{f} \quad (3.1)$$

Cabe mencionar que la longitud de onda es un parámetro que podemos manipular directamente con la frecuencia que queramos utilizar, como se ha mencionado; dado que el PVDF posee un rango de frecuencias muy amplio, para la decisión de la frecuencia de

operación también se consideró la relación del tamaño del transductor y de la longitud de onda.

La velocidad de propagación del sonido en el PVDF es de **2200 m/s**, por lo tanto en la ecuación 3.2 obtenemos la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{2200 \text{ m/s}}{2,000,000 \text{ Hz}} = 0.0011 \text{ m} = 1.1 \text{ mm} \quad (3.2)$$

Lo primero que se debe de hacer para realizar la simulación es abrir el software *COMSOL Multiphysics 3.5* aparecerá una ventana llamada *Model Navigator* en la fig.3.1:

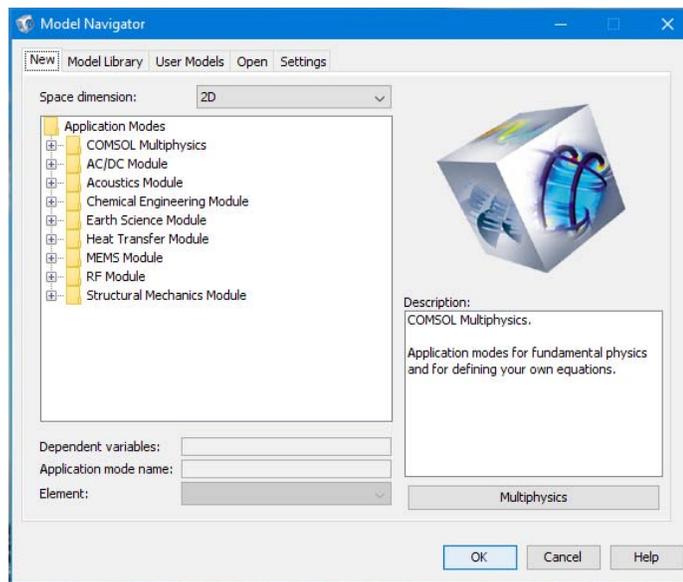


Fig. 3.1 Model Navigator

En esta ventana es donde se decide si la simulación por realizar será bidimensional o tridimensional así como las físicas o aplicaciones que estarán involucradas. Aquí se seleccionó en la pestaña “*Space Dimension*” la opción 3D, así como la opción “*Multiphysics*” ya que se requiere más de una física para este estudio.

Hecho esto, expandimos el módulo “*MEMS*” y el sub módulo “*Structurals Mechanics*” consecuentemente, a continuación se seleccionaron y agregaron los dominios donde se efectuó la simulación configurando los requisitos del software “*Solid Stress Strain*” y “*Piezo Solid*” como se muestra en la fig. 3.2:

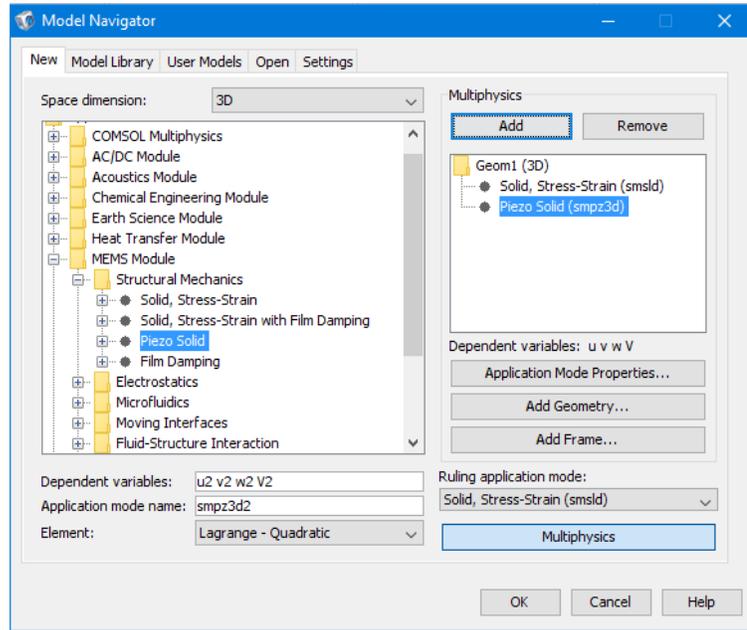


Fig. 3.2. Dominios “Solid Stress Strain” y “Piezo Solid”.

Una vez terminado este proceso entramos a la interfaz de trabajo de *COMSOL* (fig. 3.3), la cual consta del área de trabajo, las distintas herramientas de visualización y modificación del modelo, además de un panel de navegación “*model tree*” entre los sub dominios del proyecto, variables, constantes, geometrías y límites.

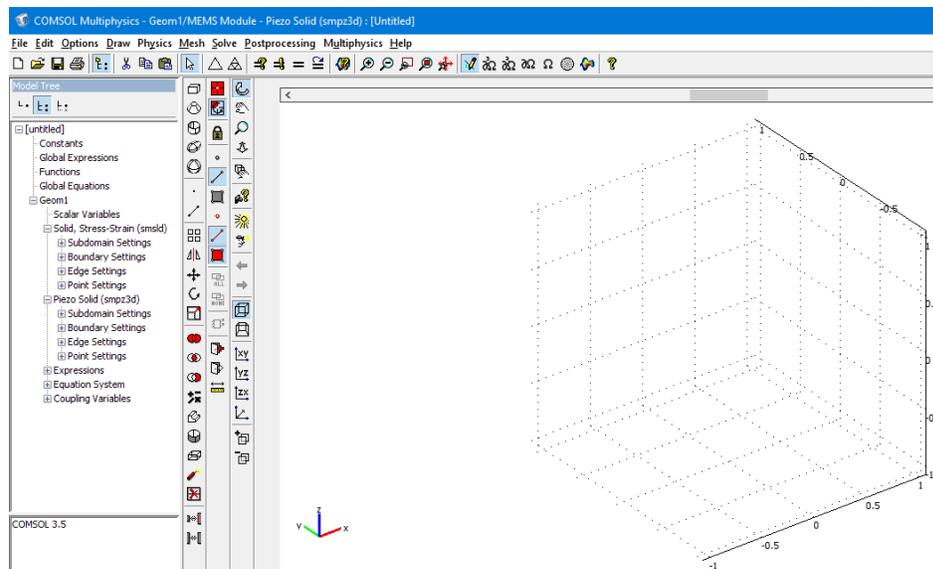


Fig. 3.3. Interfaz de *COMSOL Multiphysics 3.5*.

Para esto, ya teníamos definidas las dimensiones que se calcularon anteriormente en función de las longitudes de onda que queremos.

Como se puede ver, del lado izquierdo tenemos tres barras de herramientas, en la primera seleccionamos la primera opción “Block”, con la cual se hizo la forma de la membrana del PVDF (fig. 3.4).

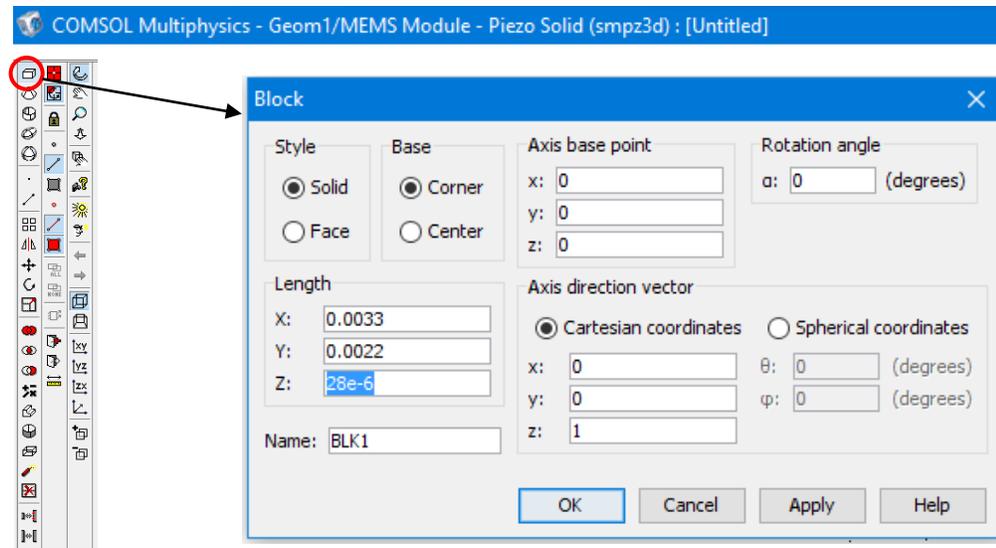


Fig. 3.4. Creación de la geometría

En esta ventana se ingresaron las medidas, cabe recordar que las unidades utilizadas son metros [m], siendo los ejes “x” y “y” el largo y el ancho, mientras que el eje “z” es el espesor o la profundidad.

En la parte de superior del dibujo tenemos una barra de la cual podemos hacer uso de herramientas de “Zoom” (fig. 3.5) para acercar o alejar la geometría dependiendo de cómo lo necesitemos.

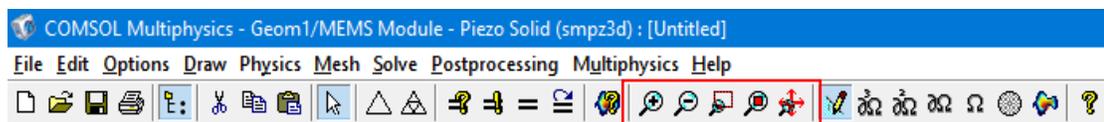


Fig. 3.5. Herramientas de Zoom

En la fig. 3.6 se muestra la geometría de la membrana, en este paso aun es solo una figura ya que no está relacionada con algún material, el color rosa indica que está seleccionada, esto quiere decir que esta geometría será afectada por la mayoría de las configuraciones que se realicen a partir de ese momento como:

Definir límites, asignar un material, modificar dimensiones o borrar algunas partes, entre otras.

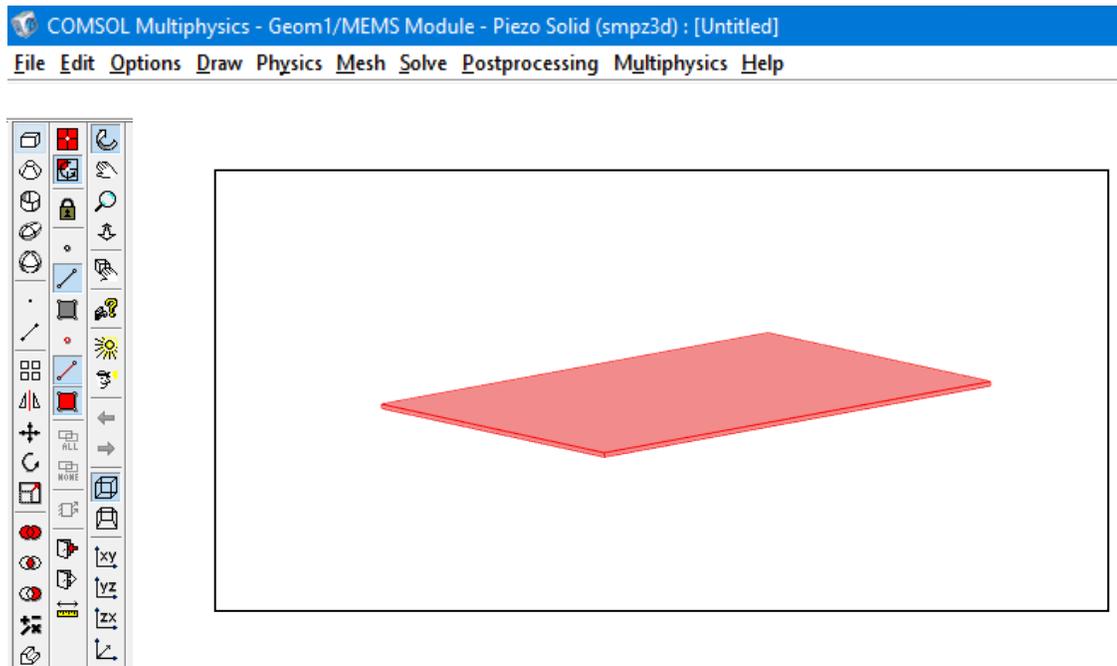


Fig. 3.6. Geometría del Transductor.

Con sólo dar un “*clic*” fuera de esa geometría deja de estar seleccionada (fig. 3.7) y no se podrá realizar alguna modificación a su estructura o su composición. Incluso todas las opciones de configuración para geometrías se deshabilitan automáticamente.

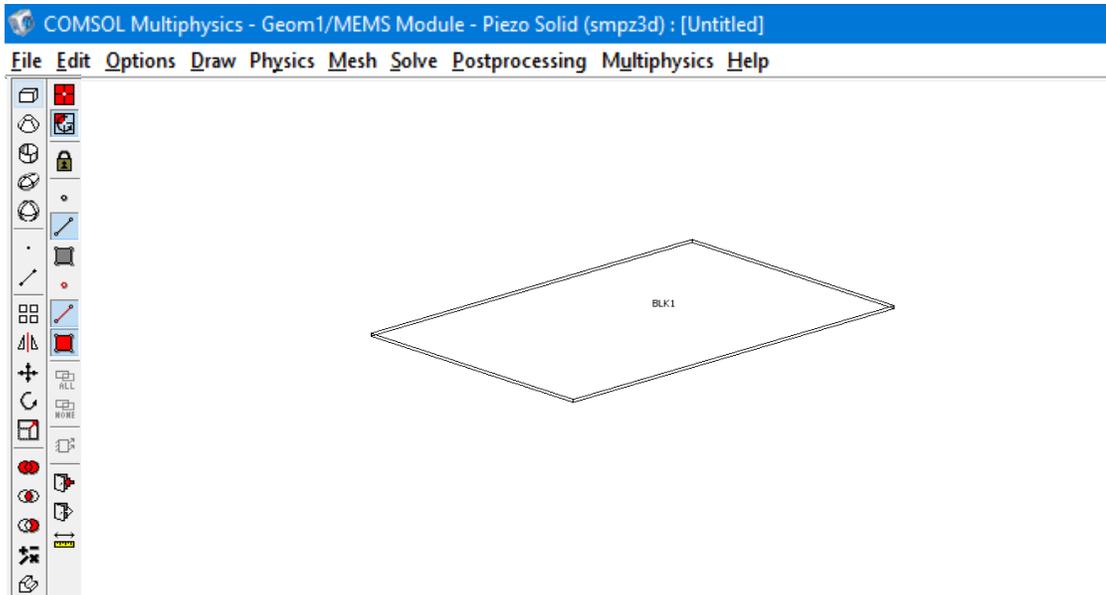


Fig. 3.7. Geometría del transductor (Sin selección)

Seleccionamos en el “*Model Tree*” la opción “*constants*”, en la cual podemos agregar constantes que podemos referenciar en formulas (Esto se hace para ahorrar espacio y tiempo cuando se definan ciertas expresiones) para la solución de nuestro problema más adelante.

En la siguiente ventana de la fig. 38. se agregó la constante de la frecuencia a la cual se trabajó para esta simulación (2 MHz).

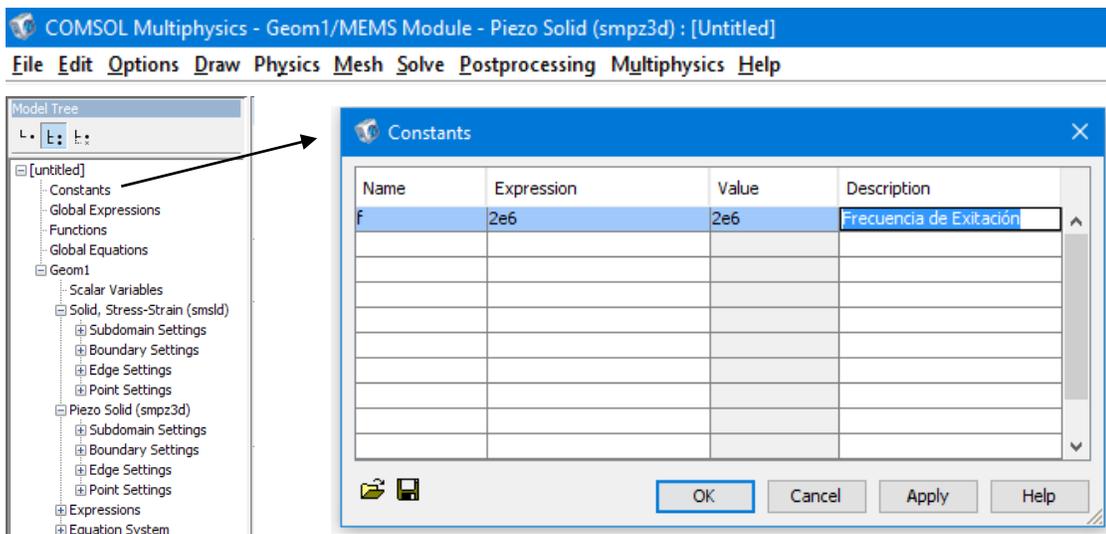


Fig. 3.8. Constantes del Modelo

Como ya se había dicho, en *COMSOL*, si algún material no se encuentra en la librería de materiales, podemos crearlo. Este es el caso del PVDF, en la barra de menús entramos al menú “*Options*” y seleccionamos “*Materials/ Coefficients Library*”

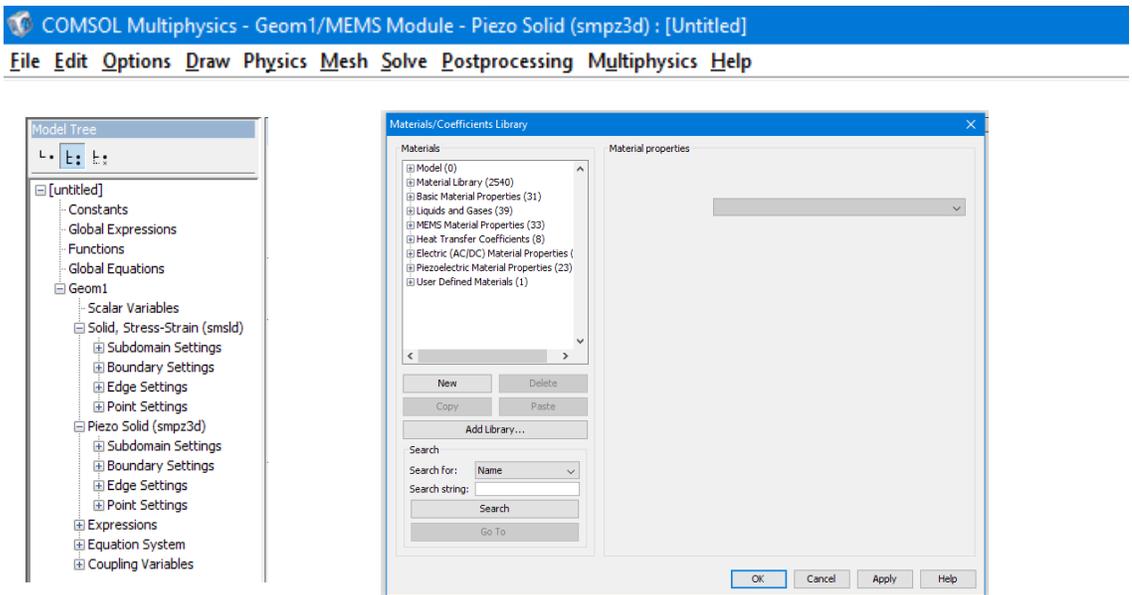


Fig. 3.9. Librería de Materiales de *COMSOL Multiphysics*

En esta ventana de la fig. 3.9 se observa una lista de materiales agrupados en distintas aplicaciones o físicas, aunque se tiene una gran variedad de materiales de la librería predeterminada de *COMSOL Multiphysics*; no hay alguno que tenga las características del PVDF. Dentro de la lista de materiales se encuentra una opción llamada “*Model*” la cual se encuentra vacía, esto es porque aún no se definía que materiales iban a conformar nuestro modelo.

Para la creación del nuevo material (fig. 3.11) pulsamos la opción “*New*”. Como se puede observar las propiedades del material vienen organizadas en: propiedades elásticas, eléctricas, de fluido, piezoeléctricas, térmicas y en la última pestaña podemos visualizar todas las anteriores. Aquí ingresamos la tabla de datos que se obtuvo de varios trabajos y artículos dónde hablan de este material y sus aplicaciones como transductor, además de hojas de datos técnicos de algunos fabricantes.

Es importante que cada parámetro o propiedad que se ingresó cuente con las unidades correspondientes de los valores que se están capturando. Es decir, si ingresamos la Densidad del PVDF, el valor numérico será:

1780

Sin embargo es esencial que se ingresen las unidades, no solo el valor numérico, la forma correcta es la que se muestra en la fig. 3.10:

rho	1780[kg/m ³]	Density
-----	--------------------------	---------

Fig. 3.10 Forma correcta de ingresar los valores en la tabla de propiedades. (Valor y Unidad)

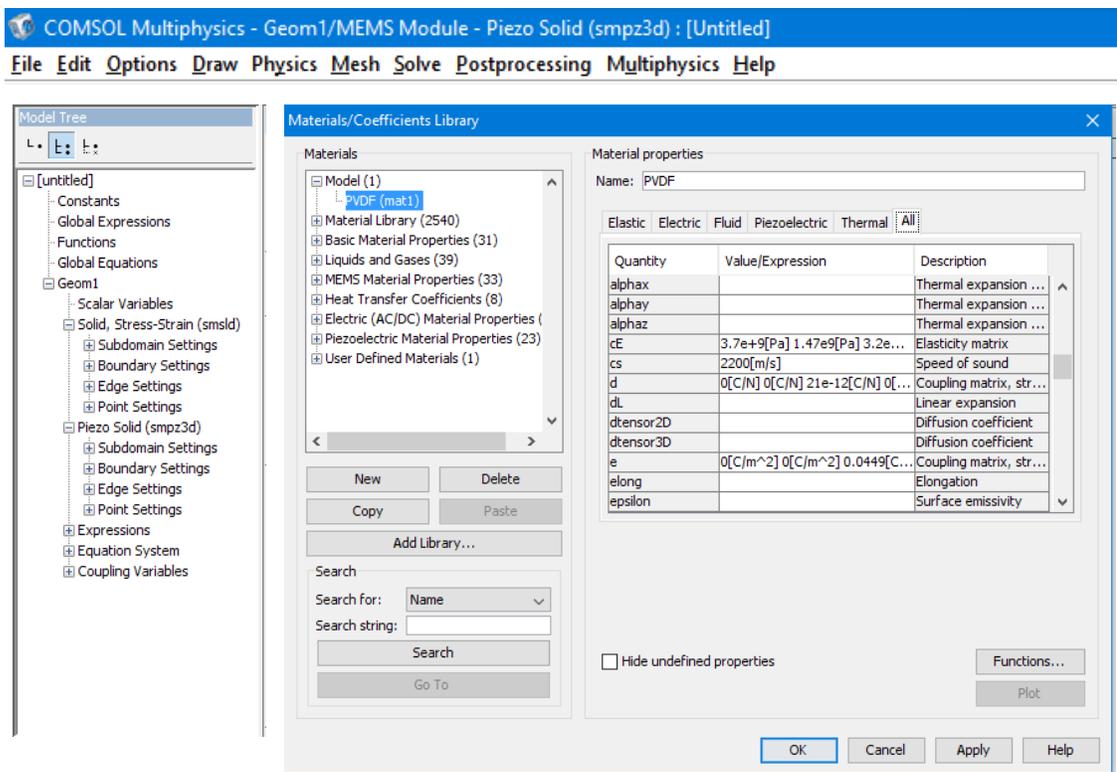


Figura 3.11 Creación de nuevo material, ingresando tabla de datos que se conformó

Una vez que se creó el material e ingresado sus propiedades necesitábamos asociarlo a la geometría, para esto se seleccionó el dominio “Solid, Stress- Strain” en el “Model Tree”, ya que bajo este subdominio asociamos el material PVDF a la geometría,

posteriormente en la barra de menús seleccionamos la pestaña “Physics” y finalmente la opción “Subdomain Settings”, donde se desplegara la siguiente ventana en la fig. 3.12:

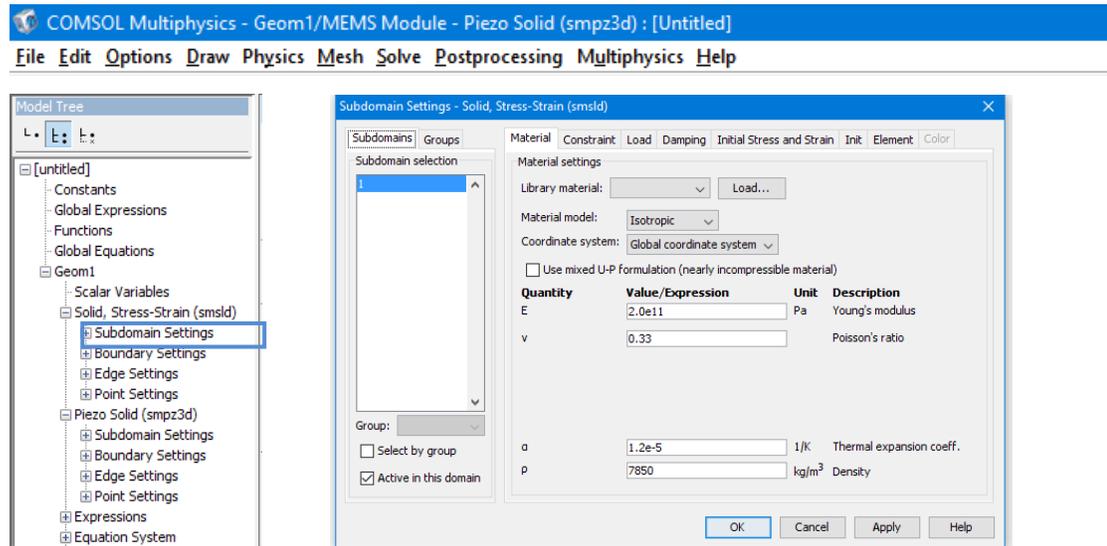


Fig. 3.12. Ventana de Ajustes del Subdominio “Solid, Stress- Strain”

En el lado izquierdo se encuentra la sección “Subdomain Selection” (fig. 3.13) donde podemos observar las geometrías del modelo numeradas. En nuestro caso solo tenemos una, la seleccionamos y en la etiqueta “Library Material” seleccionamos el material que ingresamos (PVDF). Una vez realizado esto, el material quedó asociado al rectángulo que había creado.

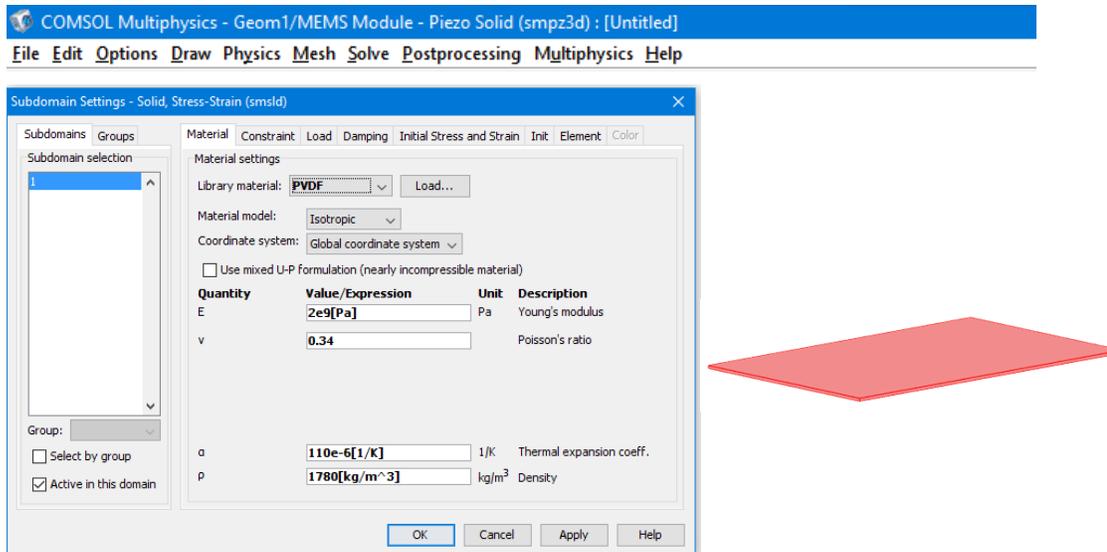


Fig. 3.13. Asociación del Material PVDF con la geometría rectangular

Si antes de abrir la ventana de ajustes del dominio no se seleccionó la geometría, se selecciona dentro de la lista de geometrías, como ya se dijo para este caso solo hay una.

El siguiente paso fue definir las características de la membrana de acuerdo a los dominios que se seleccionaron (*Solid*, *Stress-Strain* y *Piezo Solid*). Características que definen el modelo, como la señal de excitación, el modo de vibración (espesor) y definir las características eléctricas de las caras de la membrana (Positivo y tierra).

Para definir esto, del lado izquierdo aparece una sección antes mencionada “*Model Tree*”, donde seleccionamos el dominio “*Piezo Solid*” como se muestra en la fig. 3.14.

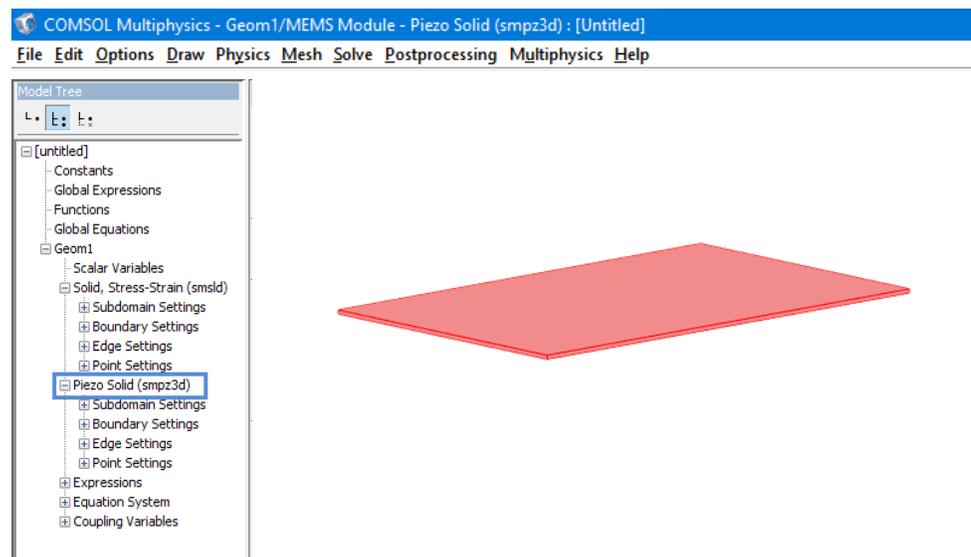


Fig. 3.14. Selección del Dominio “*Piezo Solid*”

En la barra de menus se encuentra la pestaña “*Physics*” y a la opción “*Boundary Settings*” donde se configuraron los límites de la membrana desde los bordes hasta las caras, todo esto en la siguiente ventana (fig. 3.15):

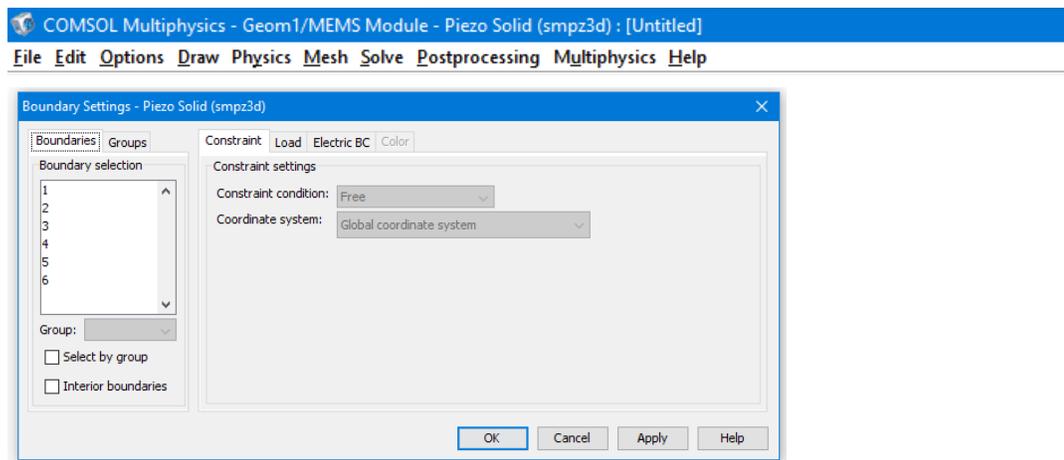


Fig. 3.15. Ventana de Ajustes de límites del dominio “Piezo- Solid”

Aquí seleccionamos cada sección de la membrana (lados y espesor):

Al seleccionar cada sección, en el dibujo esta se muestra de color rosa, podemos observar que las secciones 1, 2, 5 y 6 corresponden al espesor de la membrana, mientras que las secciones 3 y 4 corresponden a las caras de la misma.

Se necesita que vibren ambas caras de la membrana, pero no el espesor para ello se hizo la siguiente configuración en la tabla 3.1.

Sección	Parte de la Membrana	Configuración
1	Espesor	Fixed
2	Espesor	Fixed
3	Cara	Free
4	Cara	Free
5	Espesor	Fixed
6	Espesor	Fixed

Tabla 3.1. Configuraciones para el dominio “Piezo- Solid”

Para las secciones 1, 2, 5, 6 correspondientes a la tabla 3.1:

En la pestaña “*Constraint*” seleccionamos la opción “*Constraint condition*” en “*Fixed*”, ya que estas secciones son del espesor y no necesitamos que vibre hacia los lados (fig.3.16).

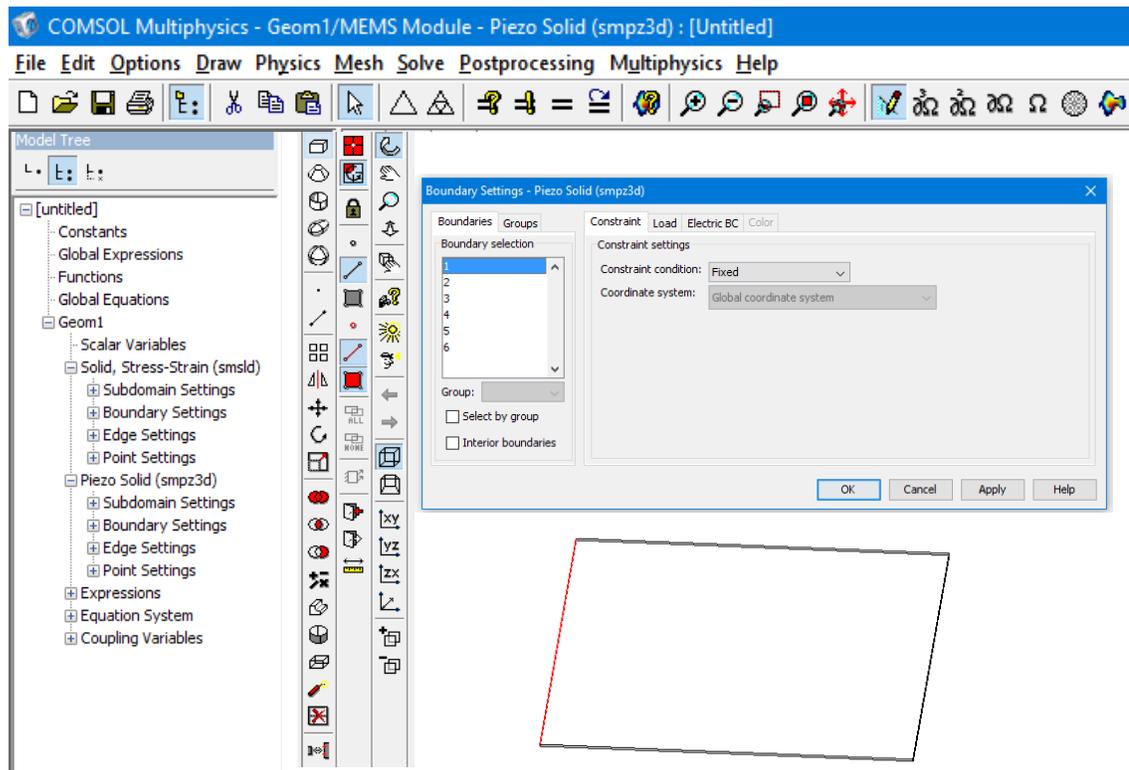


Fig. 3.16. Límites de la Membrana fijos

Mientras que para las secciones 3 y 4 de la tabla 3.1:

Dejamos esa opción en “*Free*” porque son las caras de la membrana y queremos que vibren libremente ya que estas partes de la membrana son las de mayor área y son las que emiten las ondas acústicas que necesitamos ver de acuerdo a los cálculos hechos previamente (fig.3.17).

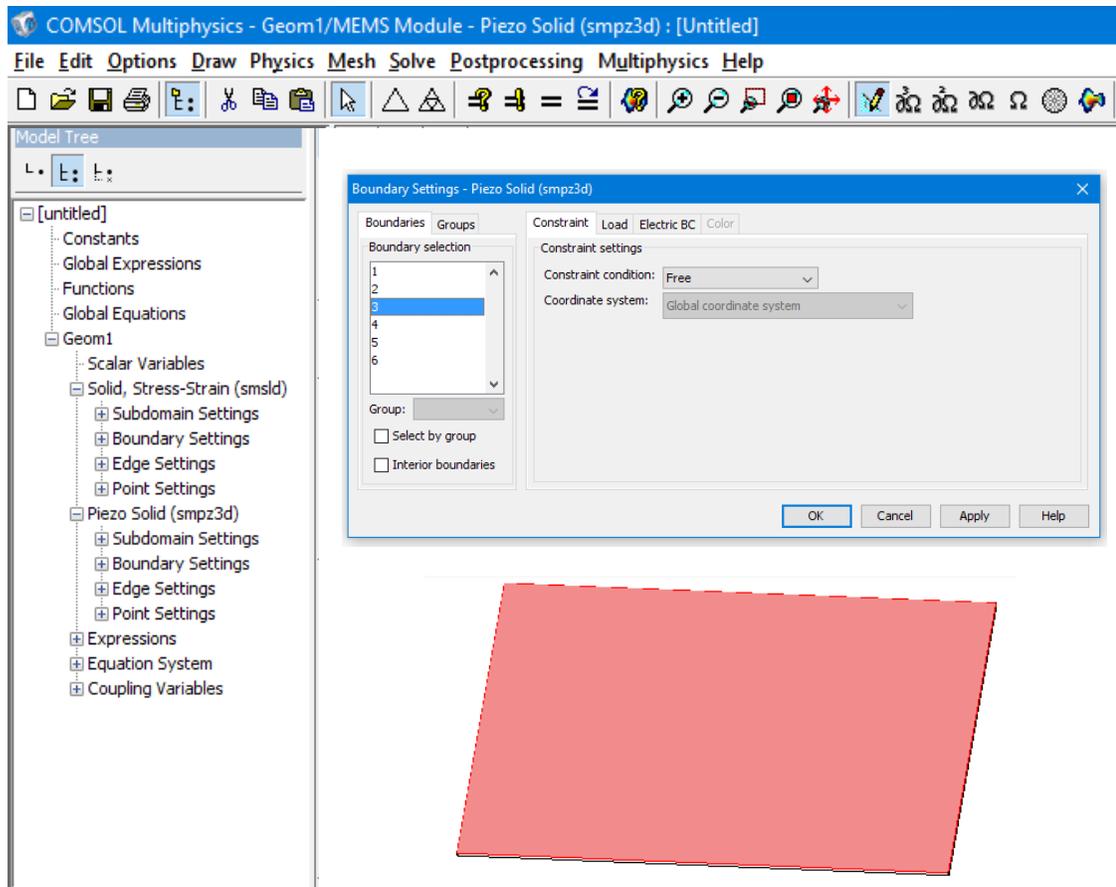


Fig. 3.17. Caras de la membrana libres.

Ahora en la pestaña “*Electric BC*” modificamos solo en las secciones 3 y 4 lo siguiente:

Utilizamos la sección 3 para la señal de excitación, en la cual ingresamos la siguiente señal senoidal en la pestaña “Boundary Conditions” y la opción “Electric Potencial” como se muestra en la fig. 3.18:

La forma correcta de ingresar los valores es mediante la ecuación 3.3:

$$100 * \sin(2 * \pi * f * t) * (t < 1/f)$$

(3.3)

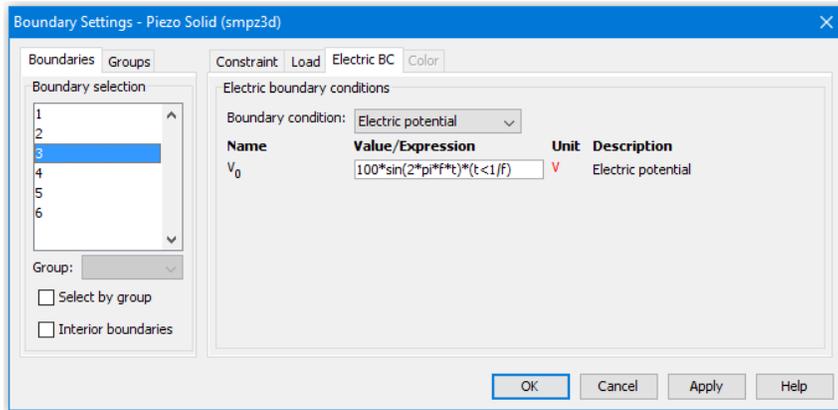


Fig. 3.18. Señal de excitación en una de las caras de la membrana

Para la sección 4 en la pestaña “Electric BC” solo seleccionamos en “Boundary Conditions” la opción “Ground” (fig. 3.19).

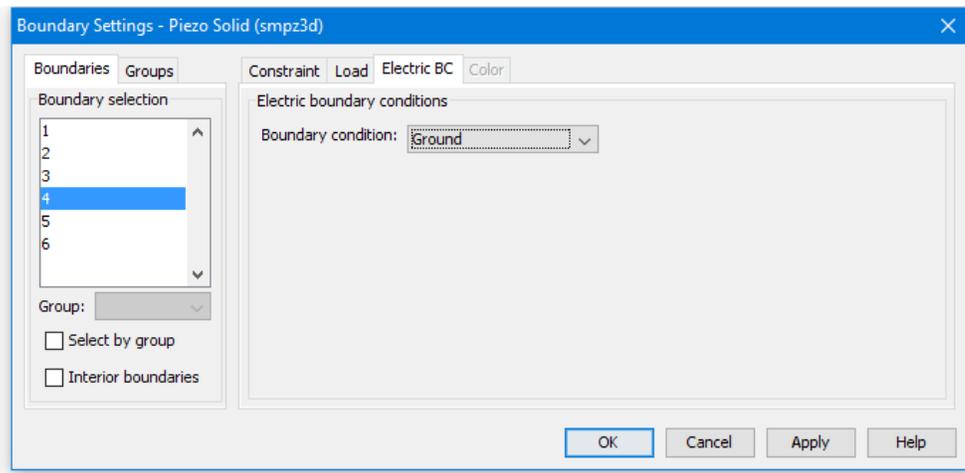


Fig. 3.19. Configuración de una de las caras de la membrana como tierra

Para el dominio “Solid, Stress-Strain”, hicimos el mismo procedimiento seleccionando en el “Model Tree” este dominio, después en el menú “Physics” la opción “Boundary Settings” donde realizamos las mismas configuraciones como se muestra en la fig. 3.20 para la pestaña “Constraint Settings” que en el dominio “Piezo Solid”.

Para las secciones 1, 2, 5 y 6 de la tabla 3.1:

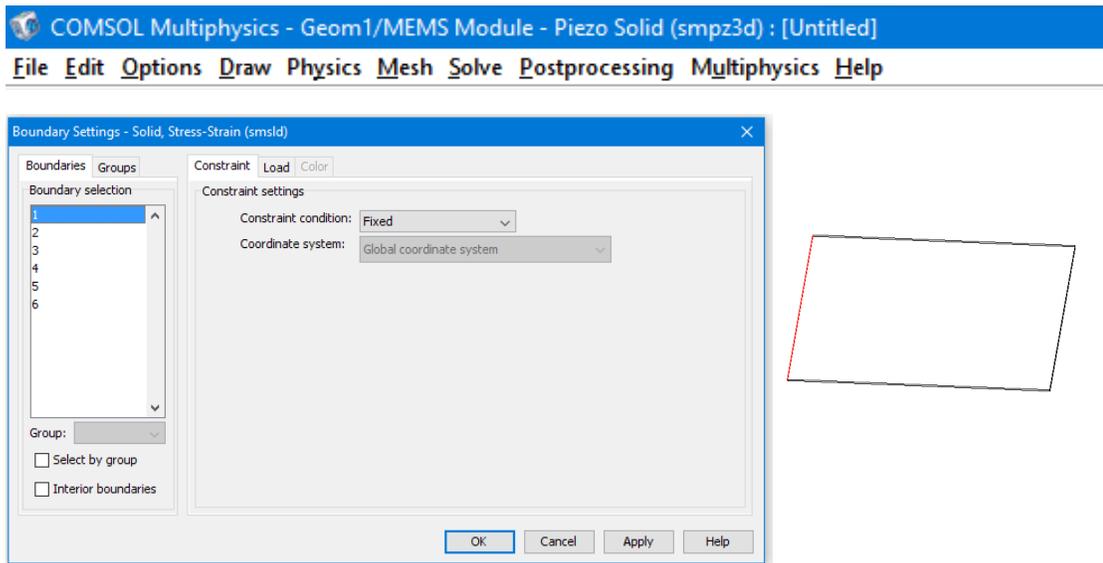


Fig. 3.20. Límites de la membrana fijos

Para las secciones 3 y 4 como se muestra en la fig. 3.21:

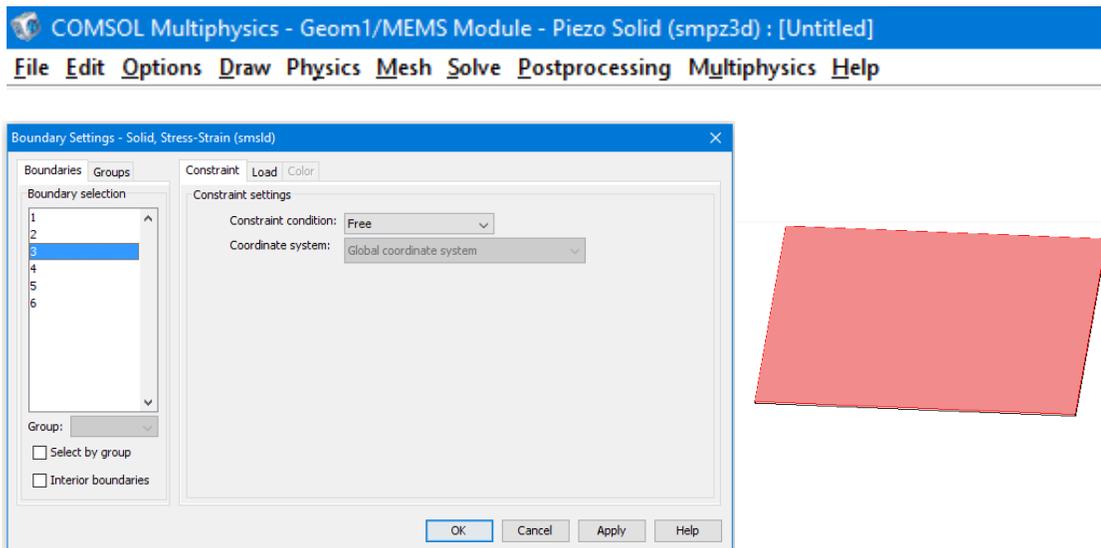


Fig. 3.21. Caras de la membrana libres

El siguiente paso fue el mallado, para esto fuimos al menú "Mesh", la opción "Free Mesh Parameters" seleccionamos el mallado más grueso (fig. 3.22) o el más sencillo (menos número de elementos finitos y por lo tanto menos recursos y menor tiempo en el procesamiento) "Extremely coarse".

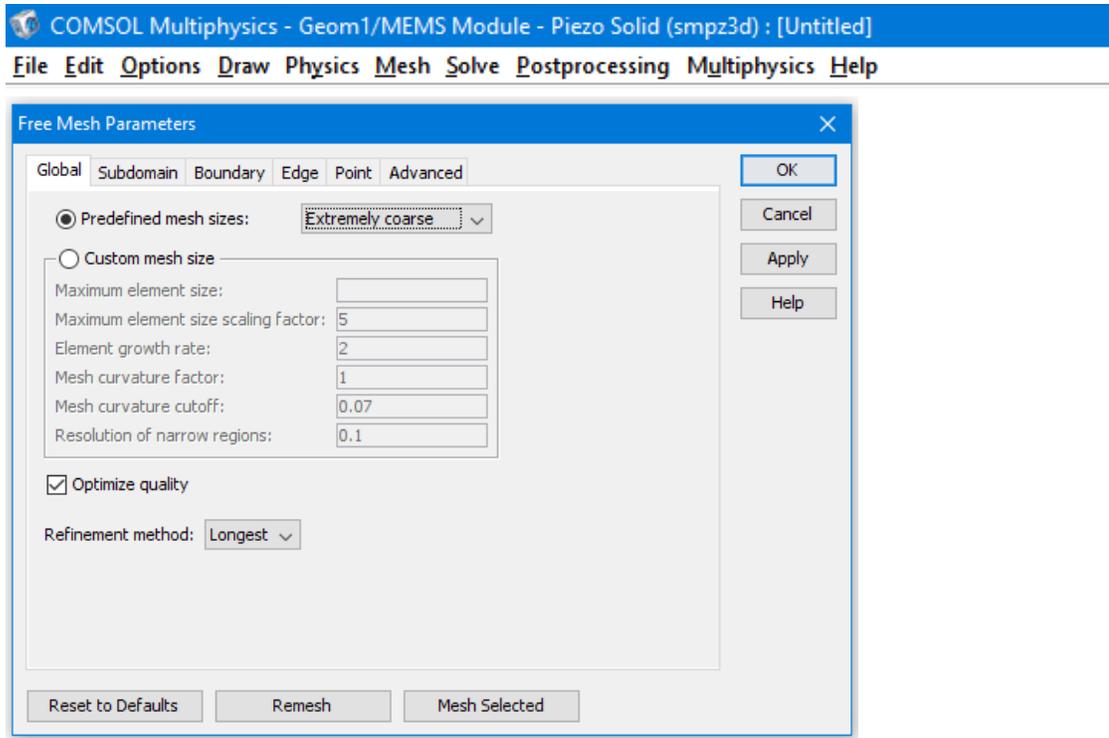


Fig. 3.22. Parámetros del Mallado

Se selecciona el botón “Remesh” y aparece una nueva vista del modelo, donde tenemos el mallado que estamos aplicando como se muestra en la fig. 3.23.

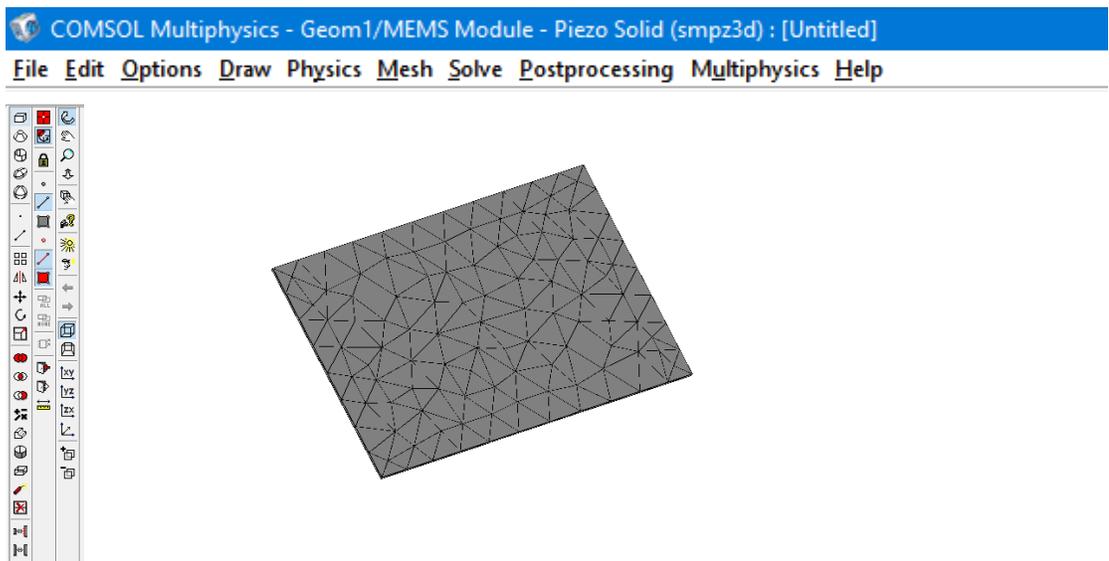


Fig. 3.23. Mallado de la membrana de PVDF

Se procedió a realizar la simulación, para esto fuimos al menú “Solve” y seleccionamos la opción “Solver Parameters” como se observa en la fig. 3.24.

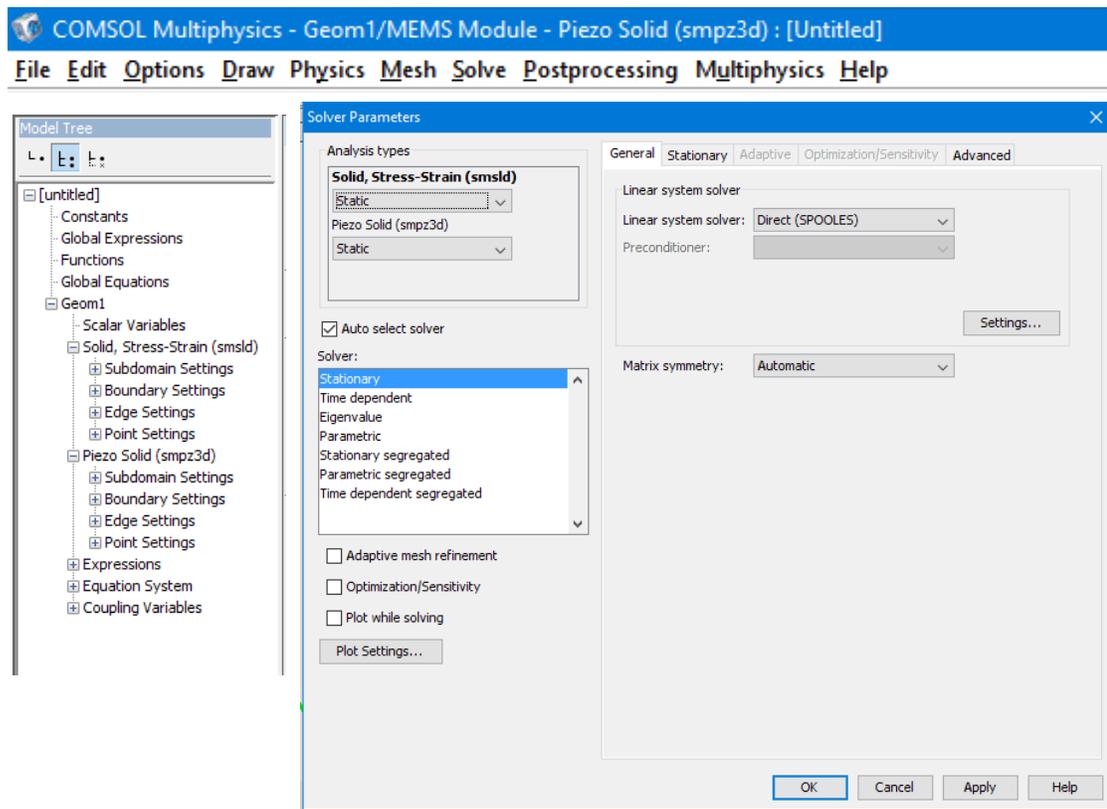


Fig. 3.24 Parámetros de Resolución

Primero en el apartado “Analysis types” modificamos en el dominio “Solid, Stress-Strain” para hacer un estudio en el tiempo, entonces seleccionamos la opción “Transient”. Aquí es donde se ingresó el tiempo de inicio de la simulación, el fin y el tiempo de muestreo, esto se observa en la fig. 3.25.

Tenemos tres parámetros: el inicio, el tiempo de paso, y el tiempo de la simulación:

Como excitamos a una frecuencia 2 MHz el tiempo de la simulación será:

$$5 \times 10^{-7} \text{ [s]}$$

El tiempo de muestreo será 100 muestras por cada ciclo, lo cual sería:

$5 \times 10^{-9} [s]$

Con lo cual los valores que ingresamos y en la nomenclatura correcta fueron:

$0: 5e-9: 5e-7$

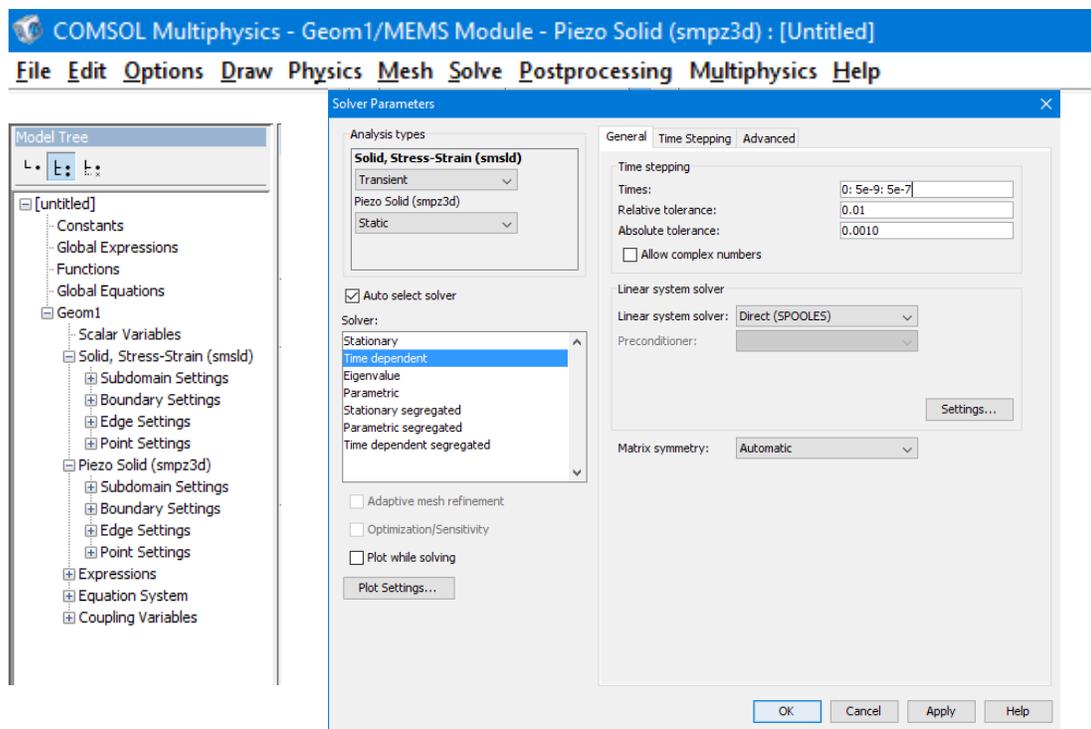


Fig. 3.25. Ajuste de parámetros de resolución

Seleccionamos el menú “solve” y después la opción “Solve Problem”, haciendo esto se muestra la ventana de la fig. 3.26, que indica que el modelo se está resolviendo:

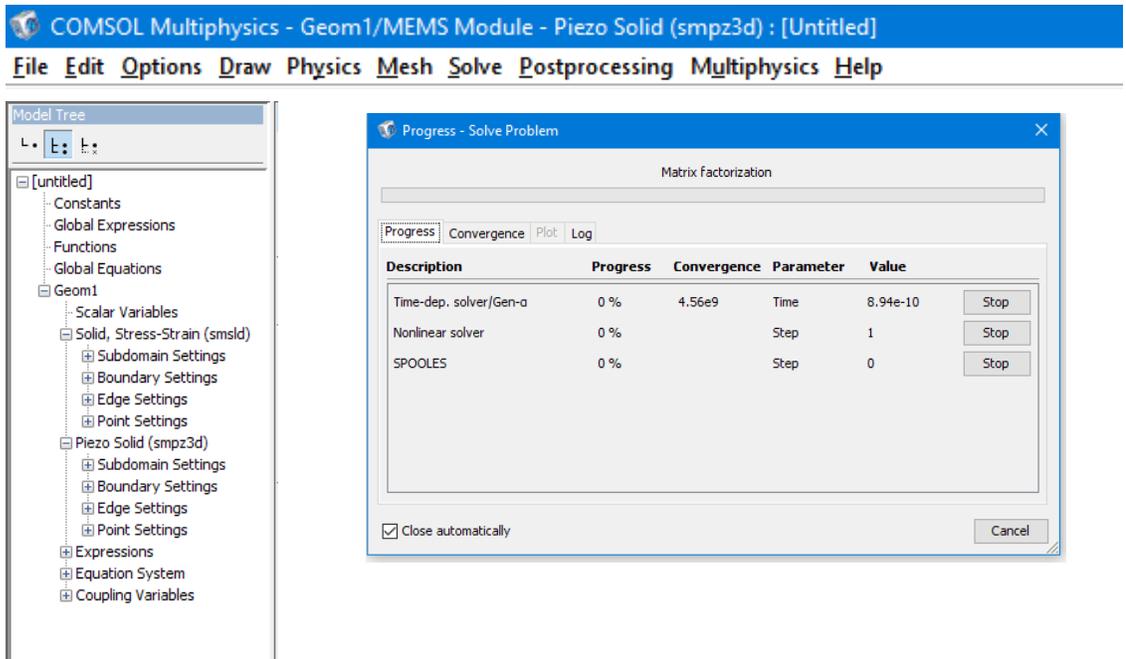


Fig. 3.26. Proceso de resolución del Modelo.

Al término de este proceso se mostró el modelo resuelto de una forma ya predeterminada por COMSOL, la cual es una visualización del modelo en varias capas, como en la fig. 3.27:

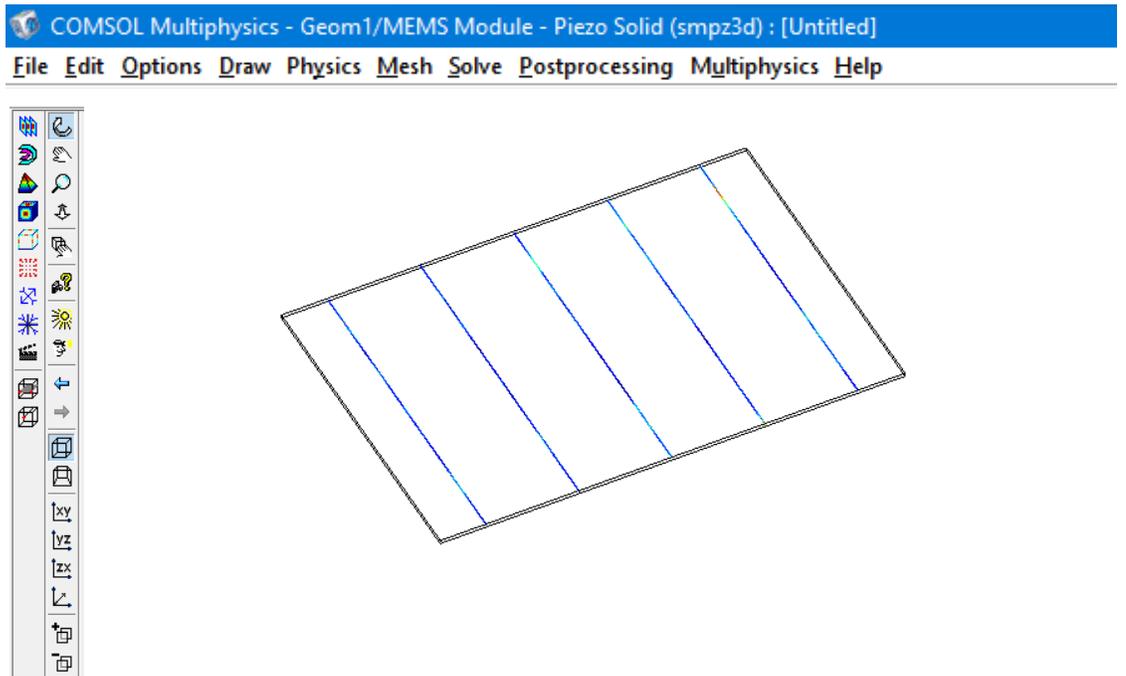


Fig. 3.27. Modelo resuelto en la forma predeterminada de COMSOL

Para una mejor apreciación de las longitudes de onda diseñadas se cambiaron los parámetros de post- procesamiento, en el menú “*Postprocessing*” y en la opción “*Plot Parameters*” la ventana de la fig. 3.28 donde habilitamos la opción “*Deformed Shape*” como se muestra en la ventana:

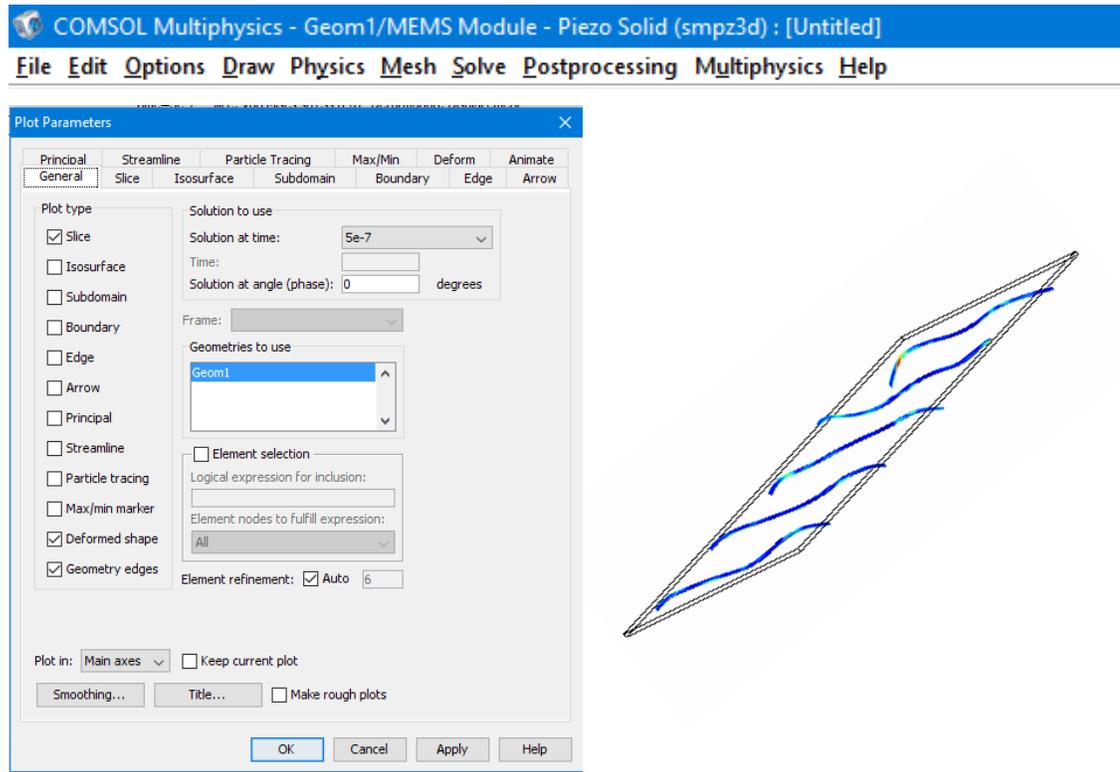


Fig. 3.28. Parámetros de Post- Procesamiento

Para finalizar en la barra de herramientas seleccionaremos la opción “*Boundary Plot*”, con esto lograremos apreciar los resultados mostrados en la fig. 3.29 que planteamos al inicio, y las longitudes de onda que calculamos:

Para esta simulación se trabajó con un mallado sencillo, el cual consta de **606 elementos poligonales**, se aplicó una **frecuencia de operación de 2 MHz**.

Se obtuvo un desplazamiento máximo para esta membrana de PVDF de **45 nanometros** como se aprecia en la fig. 3.29.

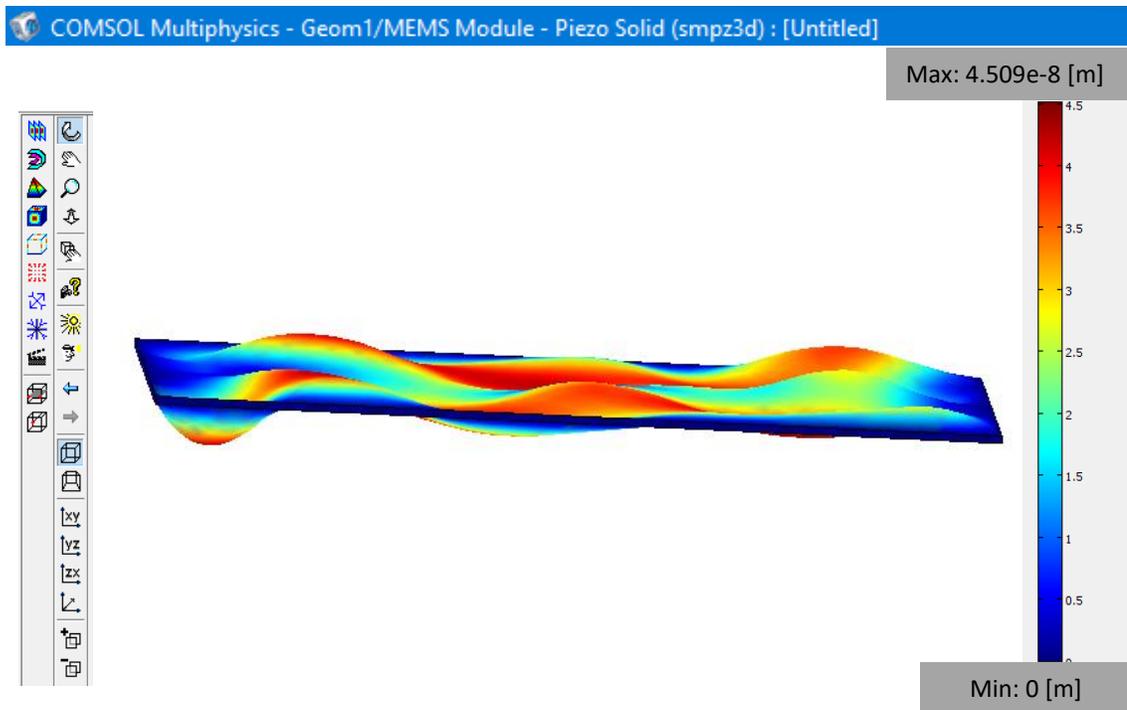


Figura 3.29. Resultado de la simulación de una membrana de PVDF.

3.3 SIMULACIÓN DE UNA MEMBRANA RECTANGULAR METALIZADA

Un transductor ultrasónico se conforma del material piezoeléctrico (PVDF) y de dos capas de metalización; una de cada lado de la membrana, estas metalizaciones actúan como los electrodos del transductor y en la mayoría de los casos suele ser de plata. Con la simulación que se presenta a continuación se pretende obtener una aproximación del comportamiento real de la membrana metalizada.

El desarrollo de esta simulación es muy parecido a la anterior, el primer paso es crear la geometría del modelo, para ello se crean tres rectángulos con las dimensiones de la membrana anterior y para las capas de metalización las siguientes:

Ancho: 2.2 mm

Largo: 3.3 mm

Espesor: 4 micras

Observando lo anterior, las dimensiones en dos dimensiones son las mismas que la membrana, puesto que queremos cubrirla, el espesor promedio comercial es de 4 micras, con ayuda de las herramientas que provee *COMSOL* debemos hacer que las fronteras de las capas de plata colinden con las fronteras de la membrana de PVDF, como lo muestra la fig. 3.30:

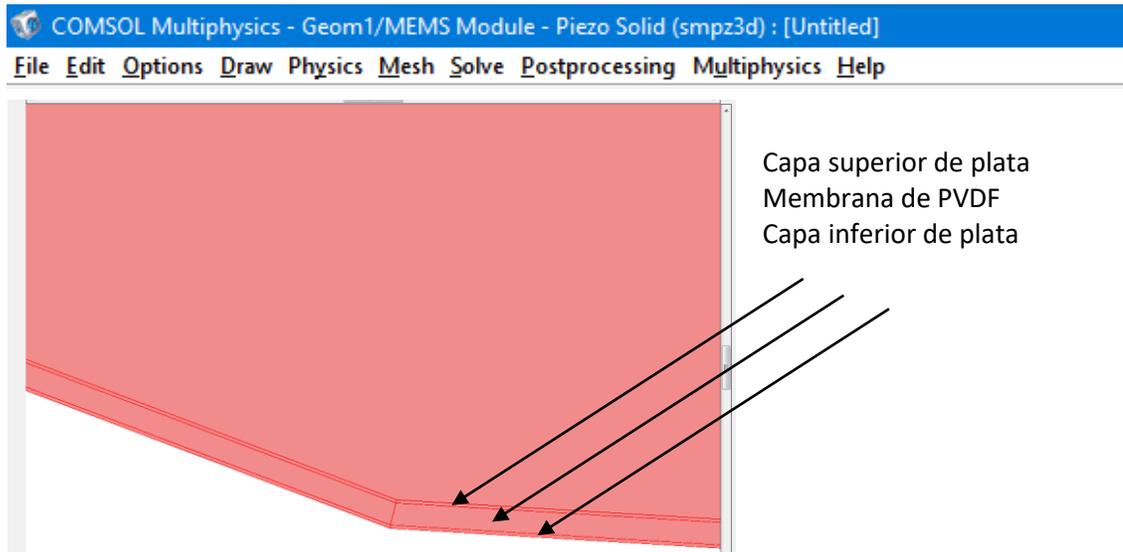


Fig. 3.30 Geometría de la membrana con dos capas más de plata

Al término de la simulación obtuvimos los siguientes resultados de la fig. 3.31:

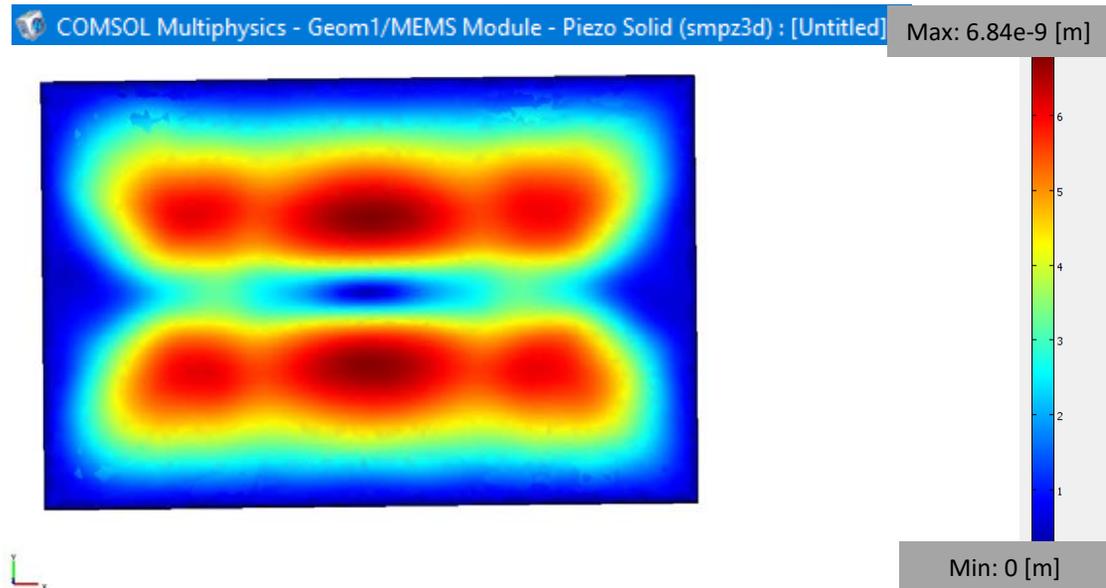


Fig. 3.31. Resultado de la simulación, vista superior.

El mallado para esta simulación donde se incrementó las capas de metalización consta de **75,820 elementos**. La frecuencia de operación que se utilizó fue de **2 MHz**.

Se obtuvo un desplazamiento máximo en la membrana de PVDF de **6.8 nanómetros**.

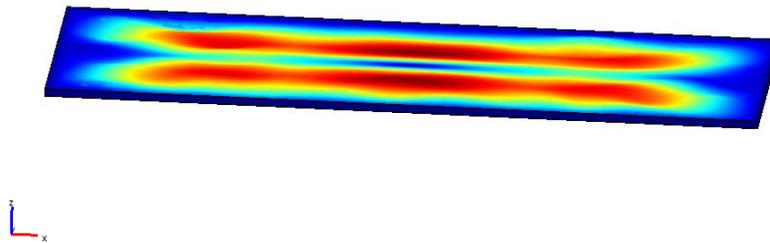
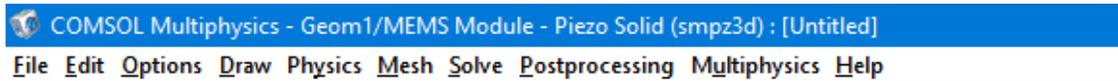


Fig. 3.32. Resultado de la simulación, vista lateral

En la fig. 3.32 se observan mejor las longitudes de onda con respecto a la simulación sin los electrodos físicamente, aunque también se aprecia una atenuación del desplazamiento en el eje “Z”.

3.4 SIMULACIÓN DEL ANILLO SEGMENTADO

Para la siguiente simulación se trabajara con un arreglo de anillos segmentados con las siguientes características (fig. 3.3):

- Frecuencia de excitación: 2 MHz
- Anillo Segmentado de **6 elementos**.
- Espesor de **28 micras**.
- Con un diámetro exterior de: **20 λ** e interior de: **14 λ** .
- Un área de cada segmento de: **28.37 mm²**
- Un área total de: **170.22 mm²**

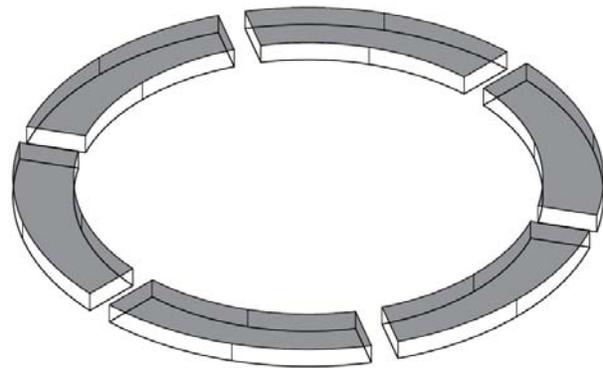


Fig. 3.33 Anillo Circular Segmentado de 6 elementos.

Se diseñó la geometría del anillo con las dimensiones planteadas como se muestra en la fig. 3.34:

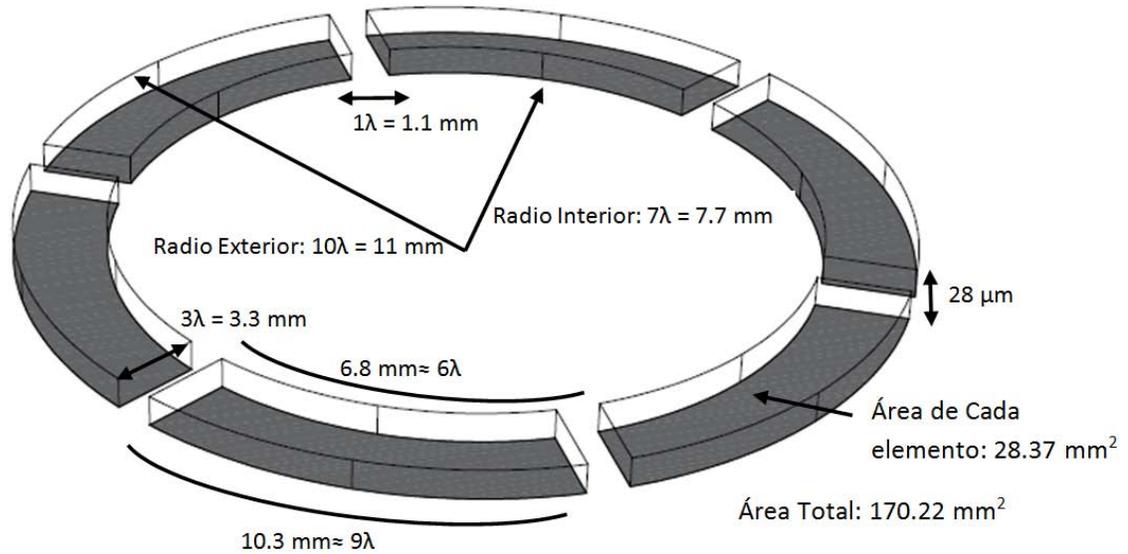


Fig. 3.34. Dimensiones del arreglo en longitudes de onda (λ)

Simulación del Anillo Circular Segmentado

Se decidió hacer la siguiente simulación gracias a la respuesta obtenida con las simulaciones de la membrana rectangular. Al igual que en la anterior el primer paso es abrir el software *COMSOL Multiphysics 3.5*, realizando las configuraciones necesarias dependiendo de las físicas que se requieren y el plano de trabajo que se desea.

Como se puede observar esta geometría es mucho más compleja por lo que la dificultad de esta simulación radica en su creación. Una vez diseñado el transductor en forma de anillo segmentado en función de las longitudes de onda (λ) y teniendo todas sus dimensiones se creó esta geometría en el software de la siguiente manera:

Empezando por crear la circunferencia que será el material PVDF con la herramienta “Cilindro” como se muestra en la fig. 3.35.

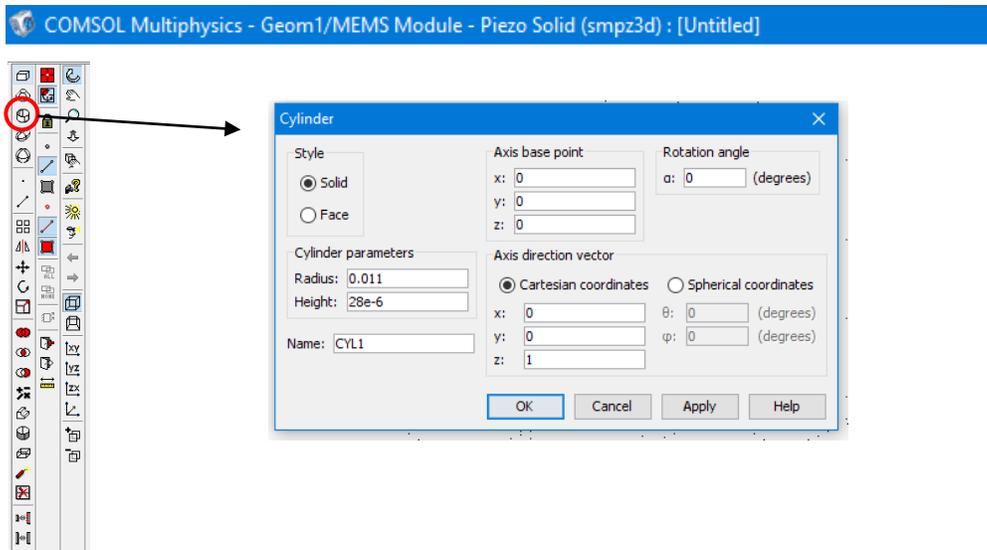


Fig. 3.35 Herramienta cilindro

Aquí ingresamos las dimensiones de la primera circunferencia siendo esta el diámetro exterior del anillo (fig. 3.36).

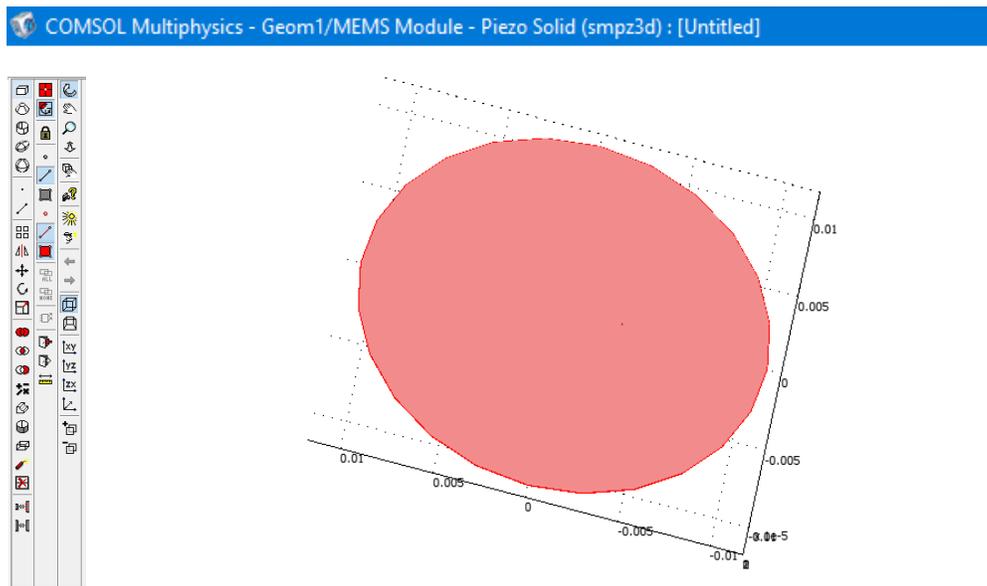


Fig. 3.36 Primera circunferencia del anillo segmentado (Diámetro Exterior)

Posteriormente se creó la siguiente circunferencia con la que nos ayudaremos para formar el diámetro interior. Seleccionamos nuevamente la herramienta de “cilindro” y creamos el siguiente elemento con las dimensiones del diámetro interior como en la fig. 3.37.

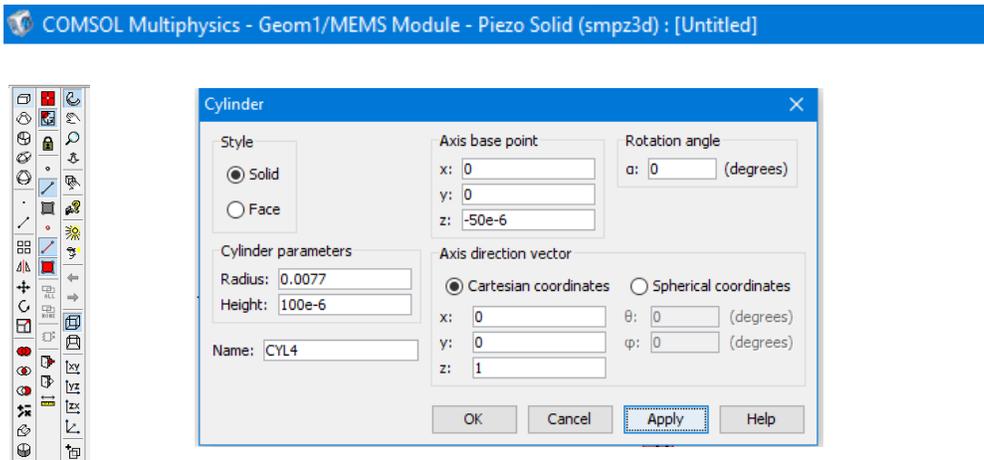


Fig. 3.37 Creación del diámetro exterior con la herramienta cilindro

Como se observa se crea esta nueva circunferencia con el diámetro menor (1.7 milímetros) que será el diámetro interno del anillo. A esta circunferencia se le debe dar un espesor mayor a la otra circunferencia para asegurar el corte y así obtener el anillo que es el resultado de la resta del área del cilindro 1 menos el área del cilindro dos como se observa en la fig. 3.38.

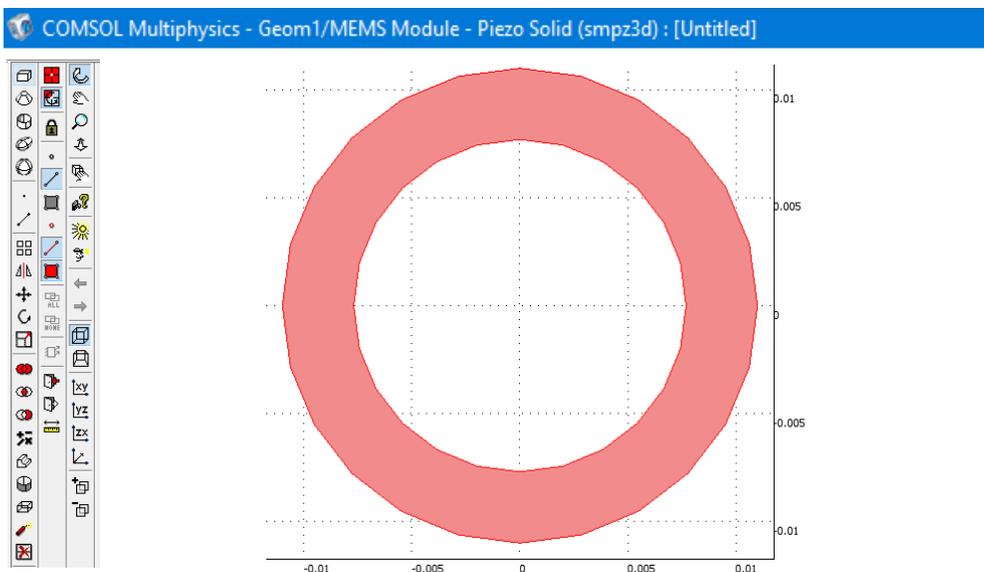


Fig. 3.38 Geometría del anillo principal del transductor.

El transductor a simular es un anillo circular segmentado, por lo cual aún nos faltaba dividir este anillo, para ello se realiza lo siguiente:

Nuevamente con ayuda de la herramienta “*Crear un objeto compuesto*” se crearon seis bloques cuya área se restara a la del anillo y así crear el anillo segmentado. Para crear los bloques debemos comprender que la única dimensión que debe ser exacta es el ancho, que será la separación de los segmentos del anillo.

Dimensiones de los bloques (fig. 3.39):

Largo (eje y): El largo debe ser algún valor mayor a 3.3 milímetros, ya que 3.3 milímetros es el ancho del anillo, para asegurar las medidas de los espacios; el largo será de 7 milímetros.

Ancho (eje x): Este valor tiene que ser exacto ya que es la separación entre cada anillo, y es 1.1 milímetros.

Altura: Para dar la altura a los bloques se consideró la altura del anillo (28 micras) comenzando sobre el eje z en el punto 0, ingresamos una altura superior a esta y una referencia más baja en el eje z para asegurar los cortes. En este caso 100 micras de altura y la referencia en: – 50 micras para el eje z.

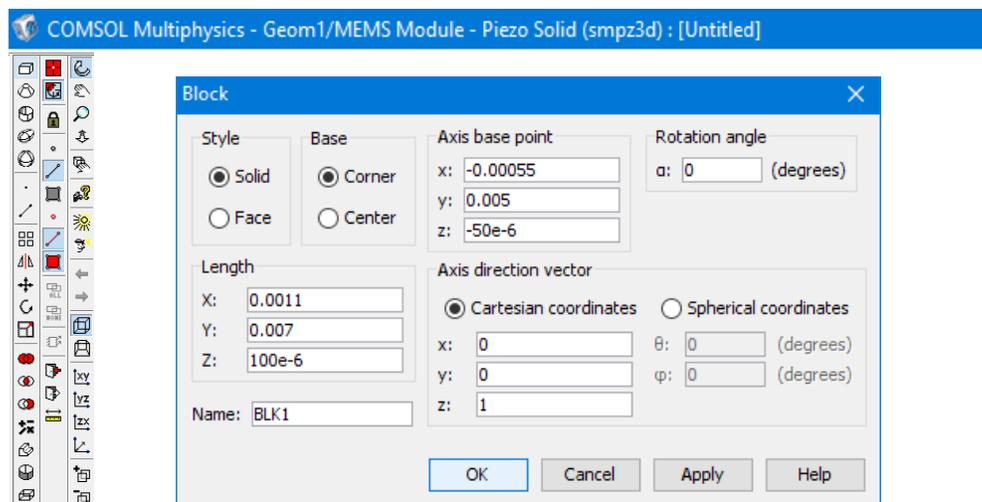


Fig. 3.39 Creación de los bloques que servirán como corte

En total el anillo tiene 6 cortes, para facilitar la creación de los bloques seleccionamos el que hemos creado, lo duplicamos y agregamos un desplazamiento negativo en el eje “y” para posicionarlo en la parte de abajo como se muestra en la fig. 3.40.

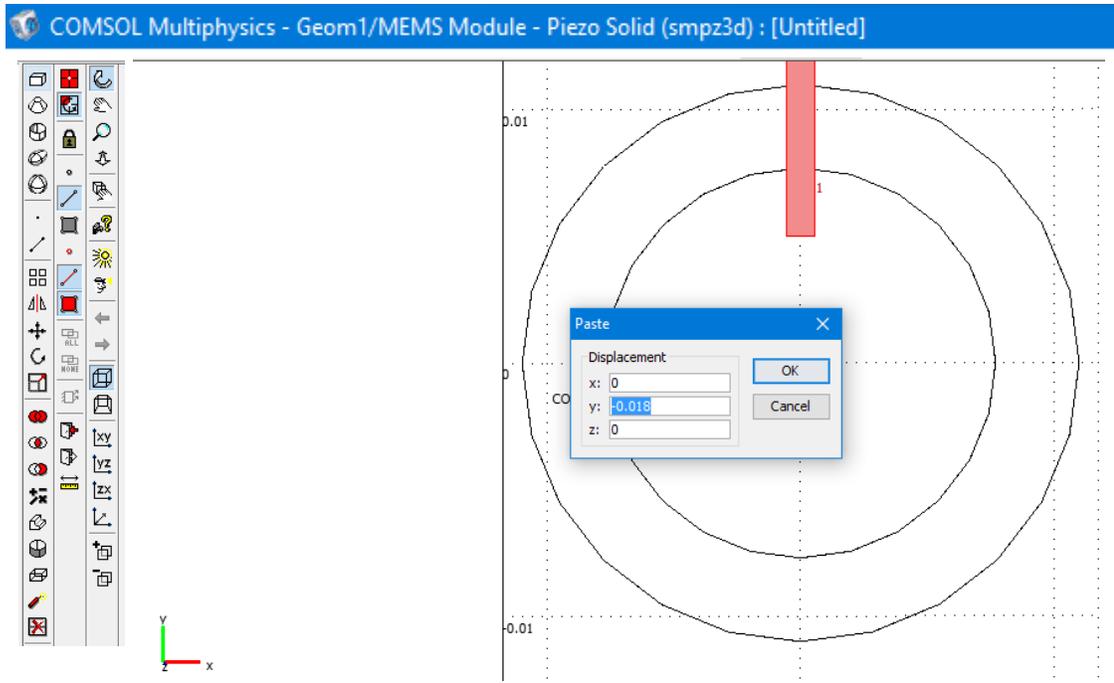


Fig. 3.40 Creación de un bloque a partir de otro.

El nuevo bloque quedara ubicado de la siguiente manera (fig. 3.41):

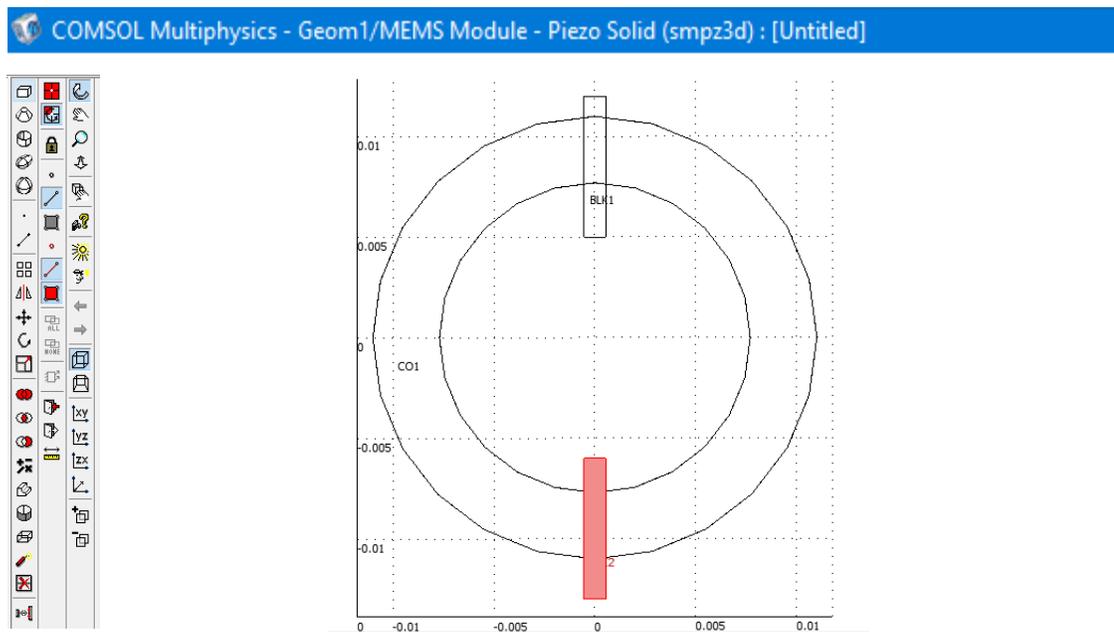


Fig. 3.41 Bloques 1 y 2 de corte.

El siguiente paso para crear los 4 bloques que faltan fue crear dos copias de cada uno de estos bloques, pero sin darles algún desplazamiento, es decir que queden una encima de la otra. Tres de cada lado. Para colocarlos a la misma distancia alrededor del anillo y así lograr que los segmentos del mismo sean del mismo tamaño usaremos la herramienta rotar para girar los bloques.

Al final tenemos dos grupos de tres bloques, de grupo se seleccionó un bloque el cual se roto 60° , mientras que el bloque restante de cada grupo se roto 120° :

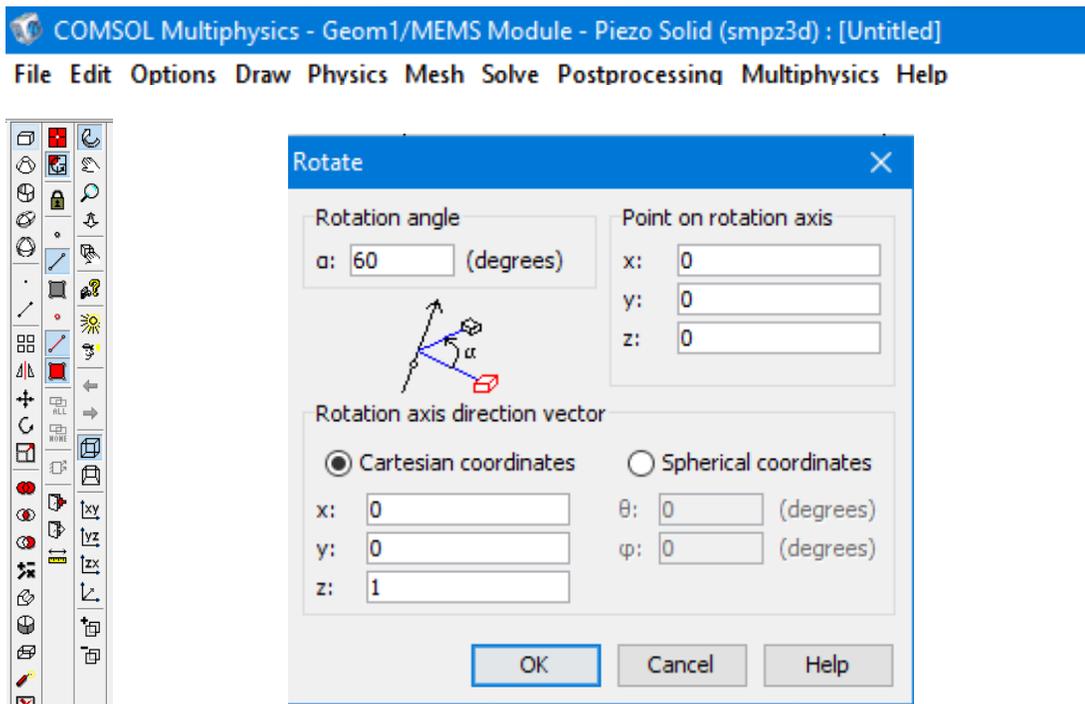


Fig. 3.42 Herramienta para rotar objetos.

En la fig.3.42 se muestra la herramienta que se usó para separar los dos grupos de bloques mediante una rotación de 60° y 120° respectivamente para cada grupo.

Una vez realizado esto obtuvimos el acomodo de los bloques en la fig. 3.43:

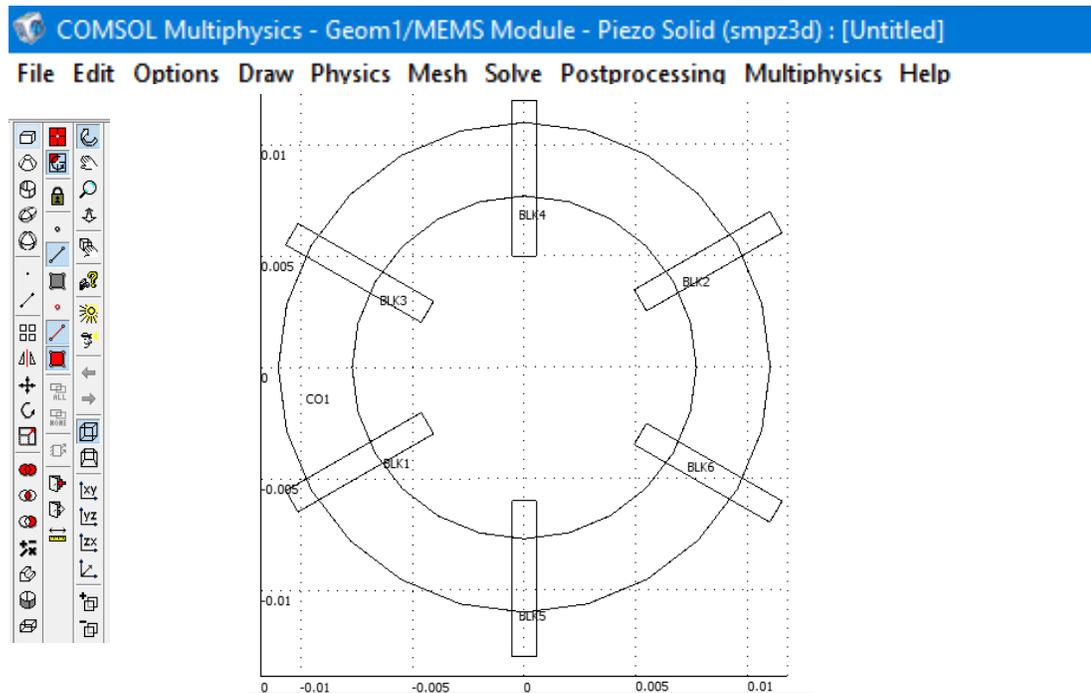


Fig. 3.43 Cortes marcados en el anillo con los bloques creados y rotados.

Terminado este paso se tienen las marcas donde se harán los cortes al anillo, lo que queda es restar el área de todos los bloques al área total del anillo como en la fig. 3.44.

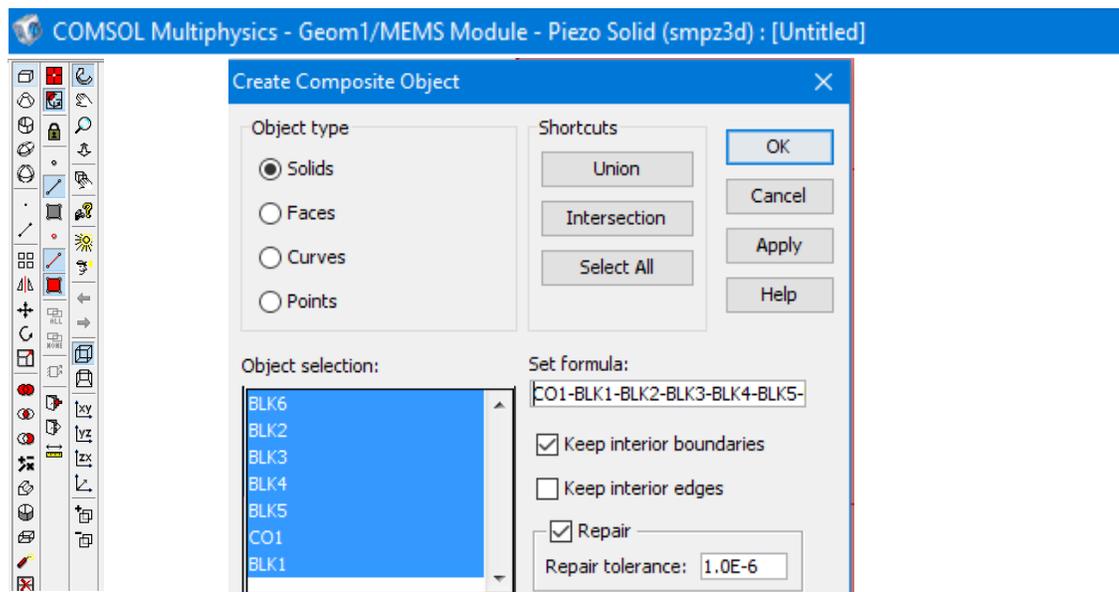


Fig. 3.44 Cortes al anillo segmentado con los bloques creados.

Con esto obtuvimos la geometría final del arreglo de transductores (fig. 3.45) para su simulación.

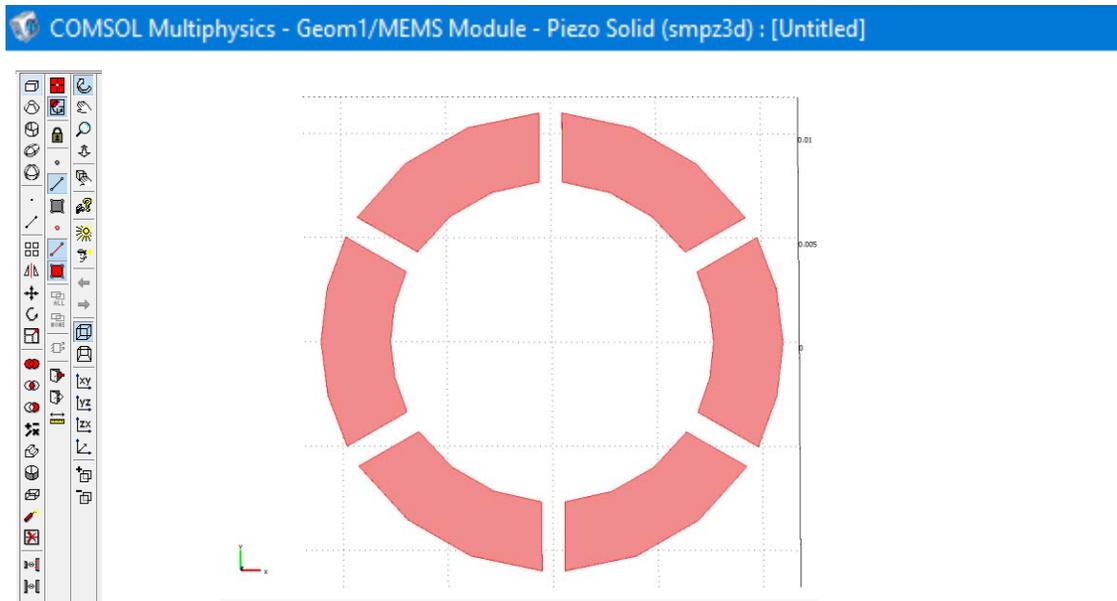


Fig. 3.45 Anillo Circular segmentado.

Se ingresaron las constantes del modelo, que en estas simulaciones solo es la frecuencia de operación 2 (MHz). Así mismo se ingresó la tabla de datos del material PVDF en la librería de materiales de COMSOL y posteriormente asociarlo a cada segmento del anillo bajo el dominio “*Solid, Stress- Strain*”.

Se definieron las características de cada parte de los anillos segmentados en cada uno de los subdominios del modelo; características como la señal de excitación y el modo de vibración se definen bajo el dominio “*Piezo Solid*”, la configuración de los límites y áreas de los segmentos se realizaron bajo ambos subdominios.

De acuerdo a lo que se pretende en la simulación, lo cual es que el arreglo de transductores vibre en modo espesor se configuraron los límites del modelo de la siguiente manera:

Las caras de mayor área deben vibrar de manera libre, mientras que todos los bordes de los segmentos del anillo deben permanecer fijos. Cada segmento de anillo cuenta con 2

caras de mayor área que son la entrada de la señal de excitación y la tierra respectivamente.

El resto de las fronteras son los bordes de cada segmento del anillo, estos bordes se configuraron fijos o inmóviles con la opción “*Fixed*”.

Las caras exteriores del lado nombrado como A se usaron para la señal de excitación mientras que las del lado B para la tierra.

Dentro de la pestaña “*ELECTRIC BC*” en la opción “*Boundary condition*” seleccionamos “*Electric Potential*” e ingresaremos la siguiente señal de la tabla 3.2:

Caras Exteriores de los segmentos	Condición Eléctrica
Lado A	Señal de excitación: $100 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot (t < 1/f)$
Lado B	<i>Ground</i>

Tabla 3.2. Condiciones eléctricas

Como se puede observar la señal de excitación depende de la variable frecuencia, la cual se definió anteriormente.

Hasta este paso se tuvo el modelo completamente definido, quedando por realizar el mallado, la solución del modelo y el trabajo de post procesamiento. Para realizar el mallado (fig. 3.46) tuvimos que tomar en cuenta el número de elementos del modelo, ya que la solución del problema demandara más recursos del equipo y por lo tanto más tiempo de simulación.

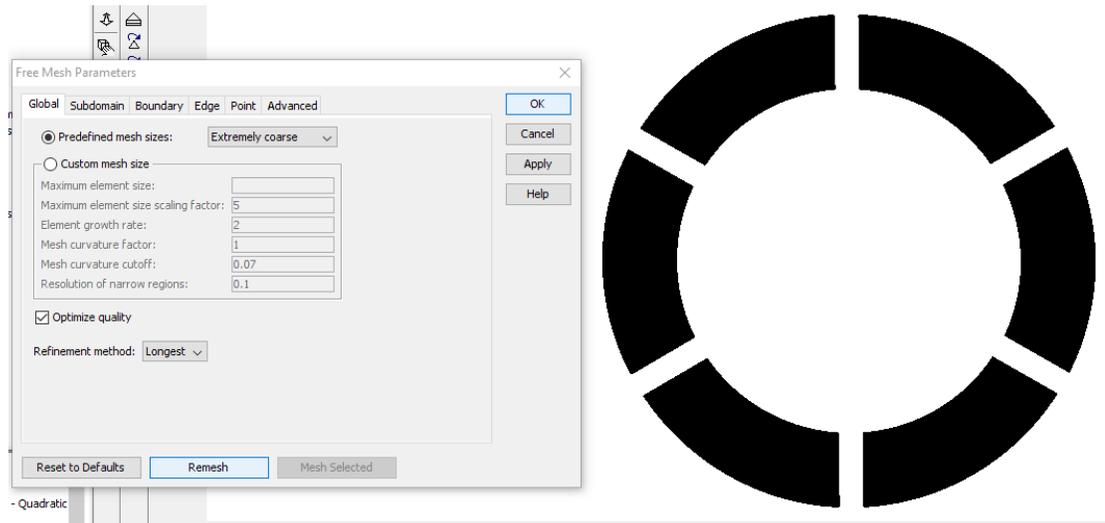


Fig. 3.46 Mallado “Extremety Coarse”.

Se aplicó el mallado más sencillo, el que menos recursos del equipo demanda, ya que es una geometría compleja y un mallado más fino que conste de más elementos no podrá resolverse.

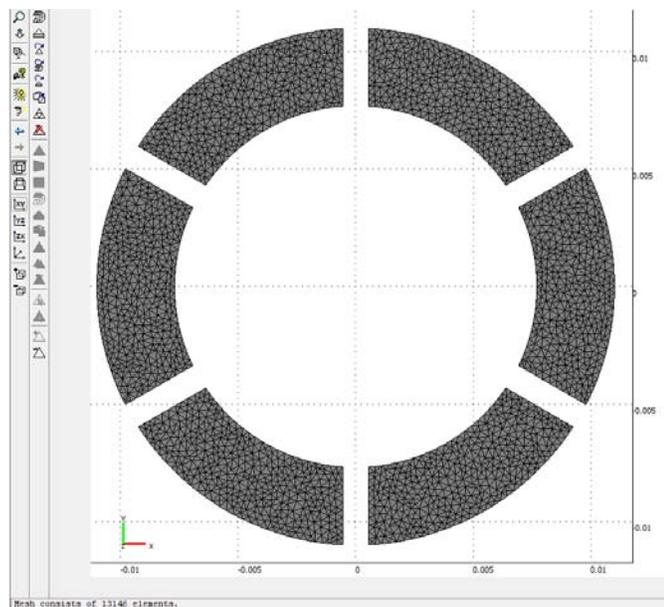


Fig. 3.47 Resultado del Mallado del modelo, número de elementos: 13146

Al término de la creación del mallado, el software nos muestra el número de elementos en el que se dividió el modelo, en este caso el modelo a resolver consiste de 13, 146 elementos (fig. 3.47).

Parámetros Finales.

En el menú “Solve” aplicamos los parámetros finales del análisis en el tiempo dentro del subdominio “Solid, Stress- Strain” sobre el cual están las vibraciones mecánicas. Esto se hizo indicando el tipo de análisis (en el tiempo), y los tiempos que delimitan ese análisis.

Dado que la frecuencia de operación que se manejo fue de 2 MHz el tiempo en el que queremos el análisis será: 5×10^{-7} [s]. Esto quiere decir que nuestro análisis en el tiempo comprende de 0 a 5×10^{-7} segundos.

El tiempo de muestreo será 100 muestras por cada ciclo, lo cual sería: 5×10^{-9} segundos, con lo cual los valores que ingresaremos serán los de la tabla 3.3:

Análisis en el Tiempo			
Tiempo de Inicio	Tiempo de Muestreo	Tiempo de Termino	Forma de Ingresar los valores
0	$5e-9$	$5e-7$	0: $5e-9$: $5e-7$

Tabla 3.3 Duración del análisis en el tiempo.

Una vez que se ajustaron estos parámetros, se procedió a la resolución del modelo, el cual como ya se ha mencionado demoró cierto tiempo dado el número de elementos del transductor y por ende el número de elementos del mallado. El resultado que mostro COMSOL fue el siguiente:

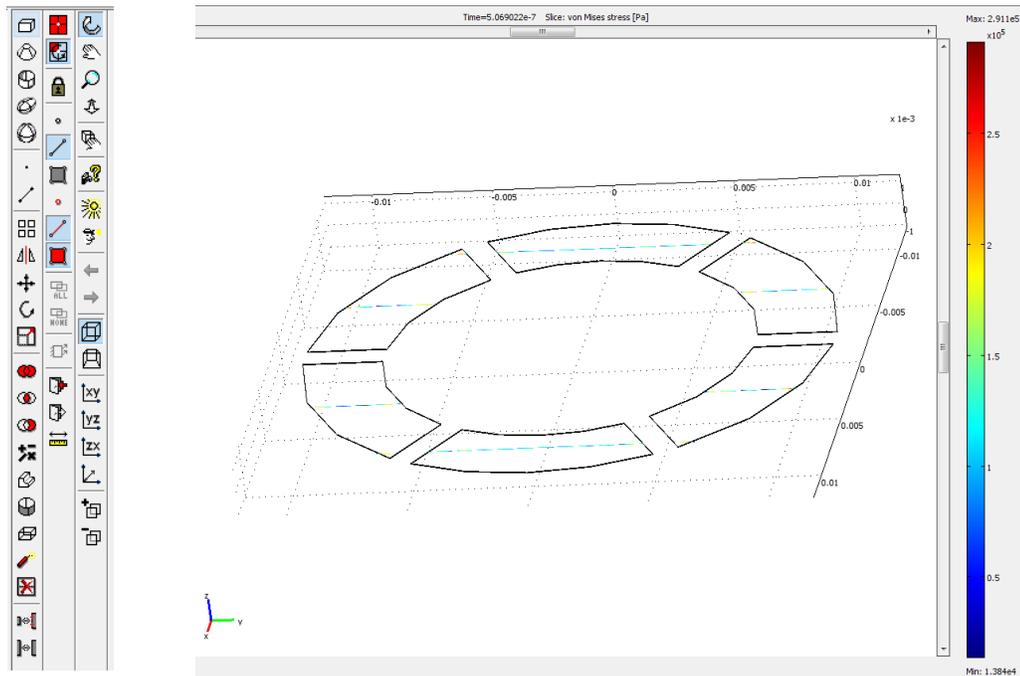


Fig. 3.48 Resultado de la simulación del anillo circular segmentado.

En esta forma de visualización (fig. 3.48) se muestra la vibración en capas, lo cual no nos da una vista general de lo que pretendemos obtener, además de observar las longitudes de onda sobre cada segmento del anillo por lo que a este resultado se le aplicaron parámetros de Post- Procesamiento.

Esto se realizó dentro del Menú “*Post procesamiento*” y la opción “*Parámetros de graficación*”, en la pestaña “*Tipo de Gráfico*” se habilitaron las casillas “*Deformed Shape*” y “*Geometry Edges*” con lo cual se aprecia mejor el desplazamiento sobre el eje Z, como se muestra en la fig. 3.49 aun mostrado en capas.

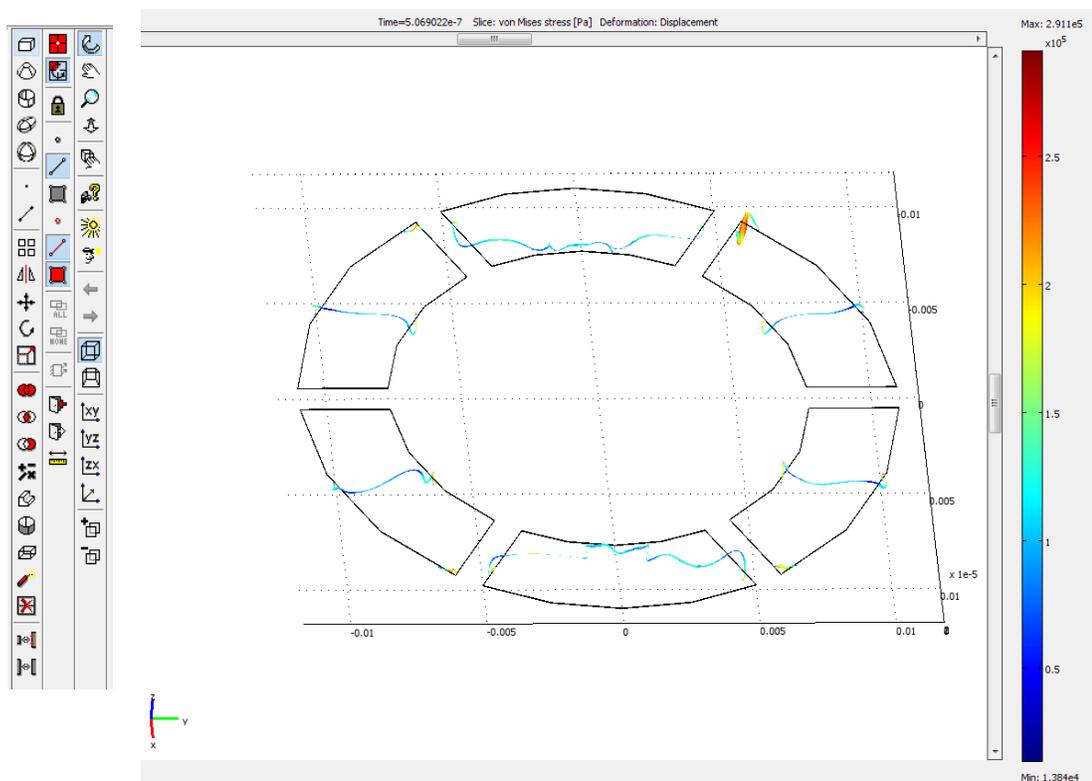


Fig. 3.49 Vista de las deformaciones en relieve sobre el anillo circular segmentado.

El último parámetro de post procesamiento fue cambiar el modo de visualización del gráfico, el cual cambió de *capas* a gráfico por *límites* donde se aprecia de una mejor manera las vibraciones y en especial las longitudes de onda sobre la superficie de cada segmento del anillo, así como la intensidad de las mismas escaladas mediante colores.

En la fig. 3.50 se observa el término de la simulación de la membrana de PVDF con un espesor de $28\mu\text{m}$, un número de **elementos del mallado de 2,191** (Mallado del anillo completo: **13,146** elementos.) y un desplazamiento máximo (**vibración**) de **43 nm**.

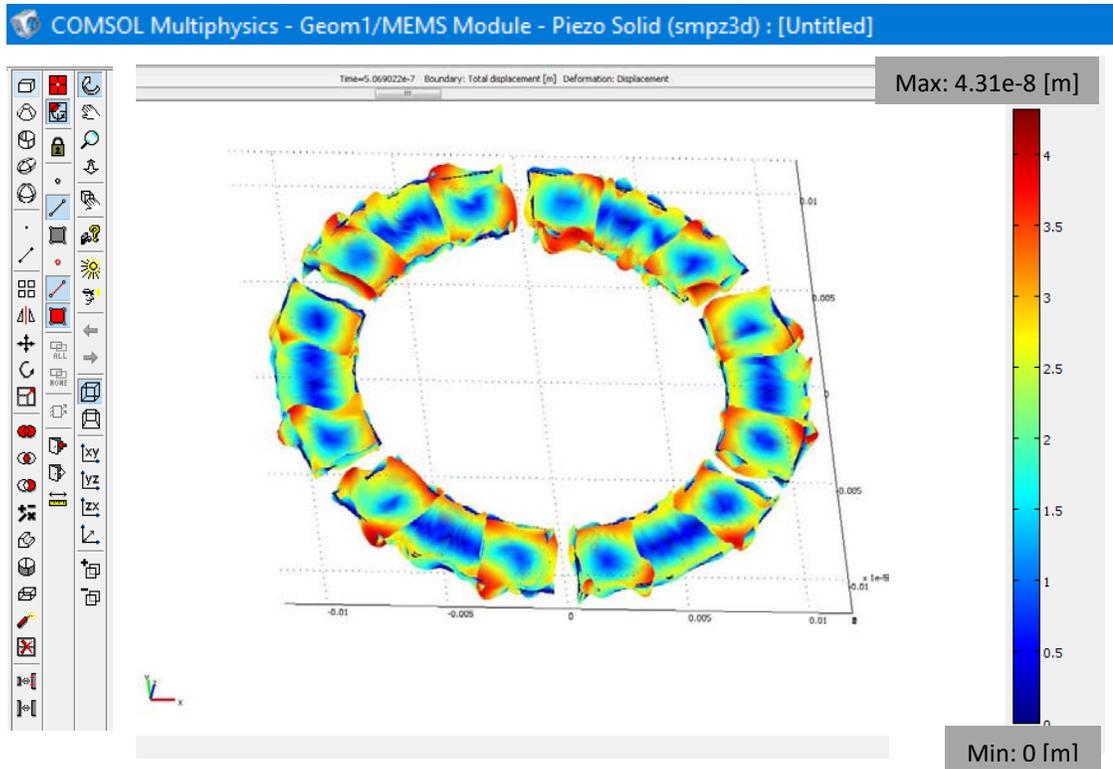


Fig.3.50 Simulación terminada con trabajo de post procesamiento.

Al ayudarnos de la herramienta de “Zoom” y analizar un elemento en particular como en la fig. 3.51 podemos observar las longitudes de onda sobre la superficie de acuerdo al arreglo que se propuso al principio.

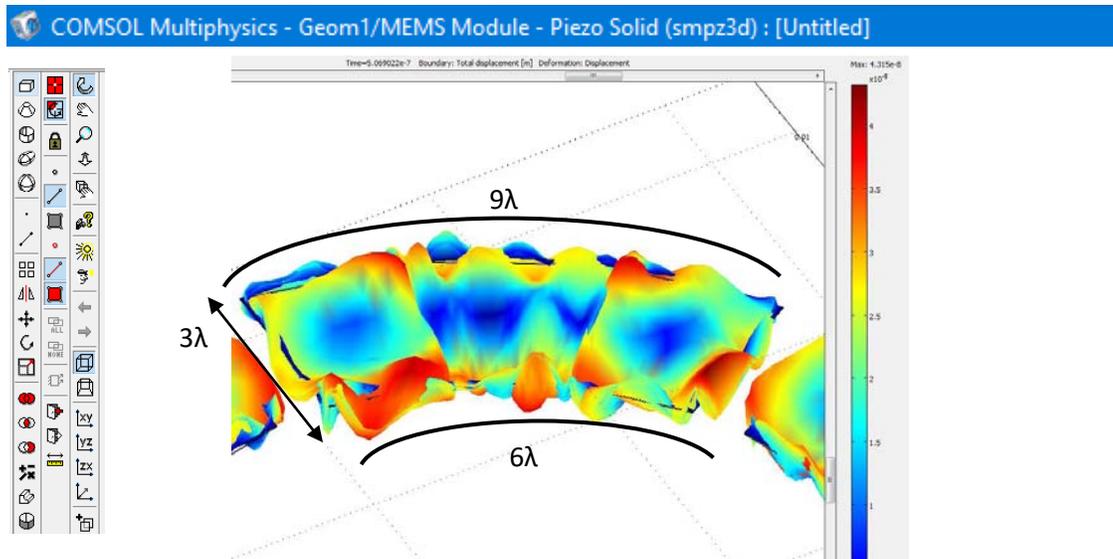


Fig. 3.51 Segmento del anillo al término de la simulación.

En gran medida se observan las longitudes de onda que se plantearon, algunas se perciben con mayor intensidad y longitud que otras, lo que se puede atribuir a la complejidad de la geometría, al hecho de que el material se creó en la base de datos y el tipo de mallado. Sin embargo debemos tomar en cuenta que es una simulación y por lo tanto una aproximación.

3.5 SIMULACIÓN DEL ANILLO SEGMENTADO METALIZADO

Para la siguiente simulación se trabajó con un arreglo de anillos segmentados con las siguientes características mostradas también en la fig. 3.52:

- Frecuencia de excitación: **2 MHz**
- Anillo Segmentado de **6 elementos**.
- Espesor de **28 micras**.
- Con un diámetro exterior de: **20λ** e interior de: **14λ** .
- Un área de cada segmento de: **28.37 mm^2**
- Un área total de: **170.22 mm^2**
- Película de plata por ambos lados (Espesor): **4 micras**. (Cada una)
- Espesor total con metalización: **36 micras**.

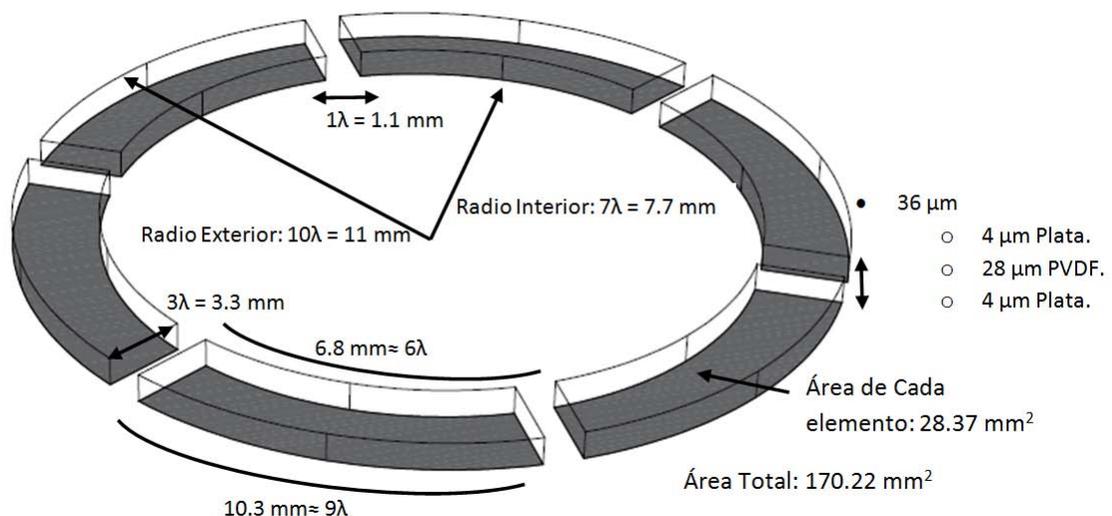


Fig. 3.52 Geometría del Anillo Circular Segmentado Metalizado.

Para la siguiente simulación se tomó como base una simulación más sencilla, la cual es la simulación de la membrana de dimensiones 3 x 2 longitudes de onda.

Al igual que en la anterior simulación el primer paso es abrir el software *COMSOL Multiphysics 3.5*, realizando las configuraciones necesarias dependiendo de las físicas que se requieren y el plano de trabajo que se desea.

3.5.1 Geometría

Como podemos observar esta geometría es mucho más compleja por lo que la dificultad de esta simulación radica en su creación. Una vez diseñado el transductor en forma de anillo segmentado en función de las longitudes de onda (λ) y teniendo todas sus dimensiones, se creó esta geometría en el software de la siguiente manera:

Empezando por crear la circunferencia que será el material PVDF con la herramienta “Cilindro” como en la fig. 3.53.

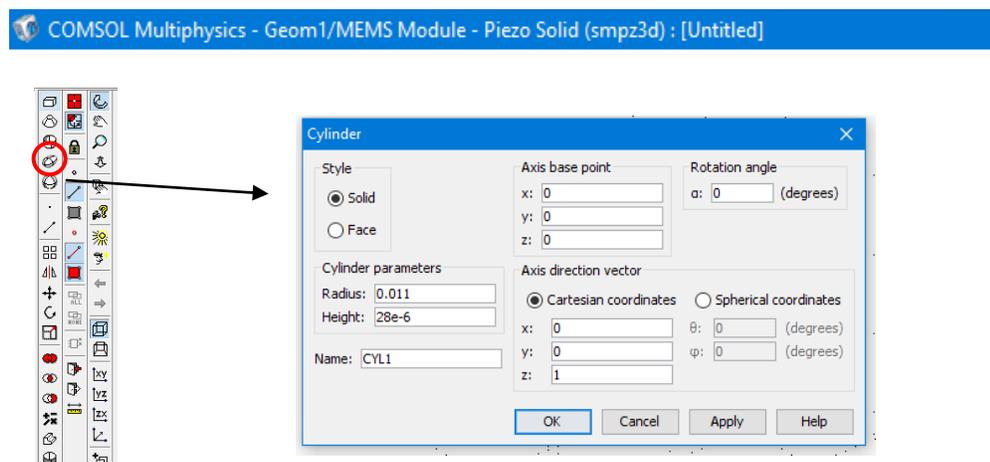


Fig. 3.53 Herramienta cilindro.

Aquí ingresamos las dimensiones de la primera circunferencia siendo esta el diámetro exterior del anillo (fig. 3.54).

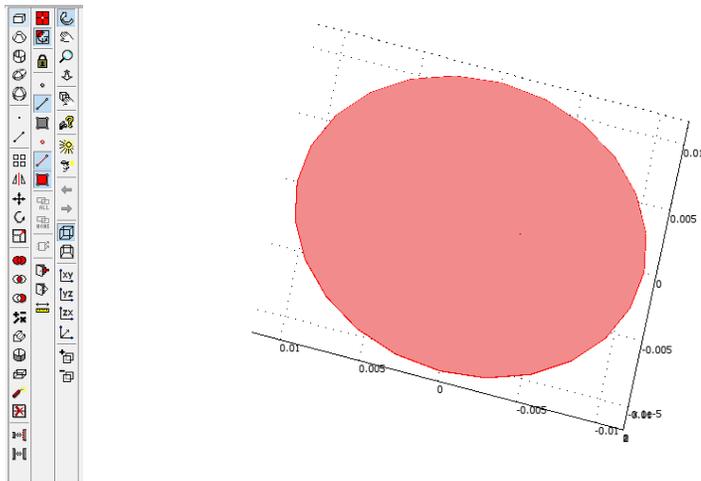


Fig. 3.54 Primera circunferencia del anillo segmentado (Diámetro Exterior).

Para esta simulación se sumaron dos capas de metalización (Plata), una por cada lado. Para ello crearemos dos circunferencias más. El espesor de estas capas es de 4 micras.

El radio de esta circunferencia debe ser el mismo de la circunferencia principal (11 milímetros ya que la capa de metalización será al final de las mismas dimensiones del anillo segmentado. Este anillo se creó por partes y resulta más sencillo poner todas las capas que necesitamos y después cortar todas ellas para obtener el anillo.

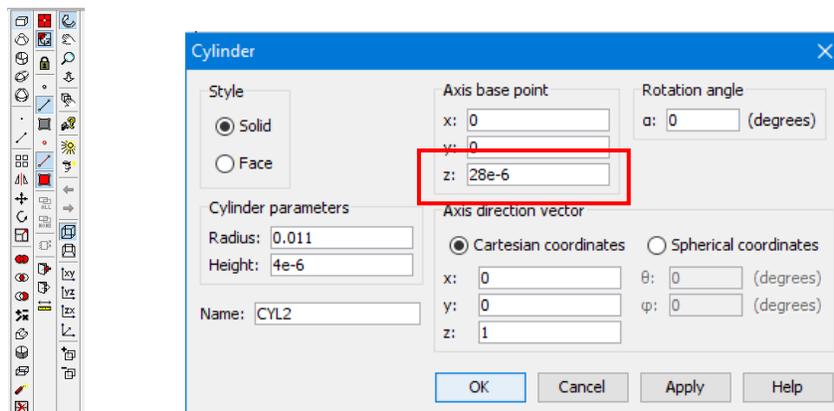


Fig. 3.55 Primera capa de la metalización.

Como podemos observar en la fig. 3.55 ingresamos el radio de 11 mm y la altura de 4 micras de esta película de plata. En el apartado “*Axis base point*” o punto de referencia en el plano cambiamos solo el punto de referencia en el eje z, para que esta membrana se coloque por encima de la que ya habíamos creado.

Recordamos que la membrana anterior posee una altura de 28 micras, ese valor fue nuestra referencia para colocar ahí la nueva circunferencia. Presionamos “OK” y procedimos a realizar la geometría de la otra capa de metalización.

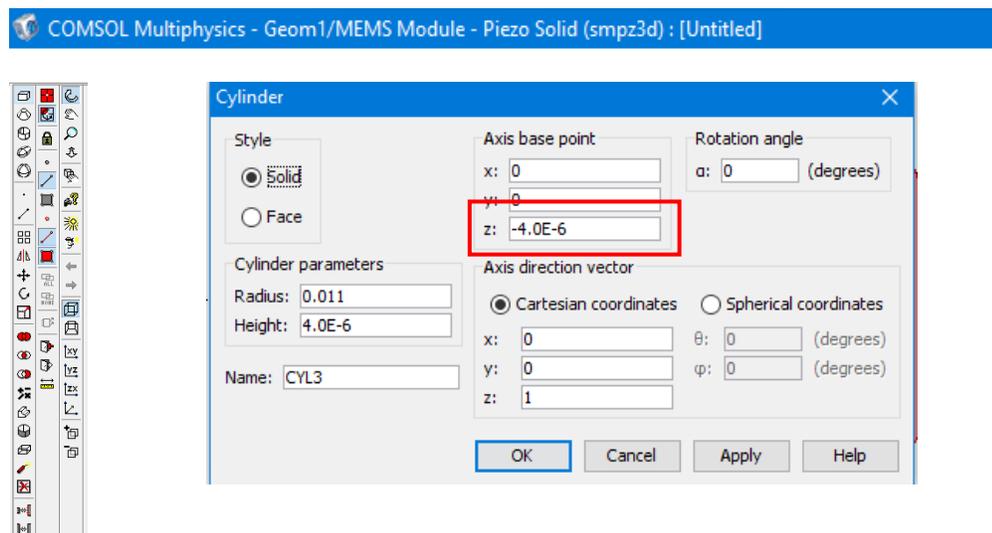


Fig. 3.56 Segunda capa de metalización.

Para esta tercera circunferencia (segunda capa de metalización) ingresamos de igual manera un radio de 11 milímetros, y una altura de 4 micras (fig. 3.56).

Pero la referencia en el eje z cambió, ya que esta capa se colocó por debajo de las dos que ya tenemos (Primera metalización y membrana de PVDF). Teniendo en cuenta que la primera circunferencia empieza en el valor 0 sobre el eje z, y la altura de esta segunda capa de metalización es de 4 micras, la referencia a utilizar y donde se colocara esta capa será 4 micras.

Presionando “OK” tenemos listas las tres capas que componen el transductor y pudimos proceder a realizar los cortes para obtener el anillo circular segmentado.

Realizando un acercamiento con la herramienta de “Zoom” en la orilla de las geometrías observamos en la fig. 3.57 las tres capas siendo la del centro la de mayor espesor.

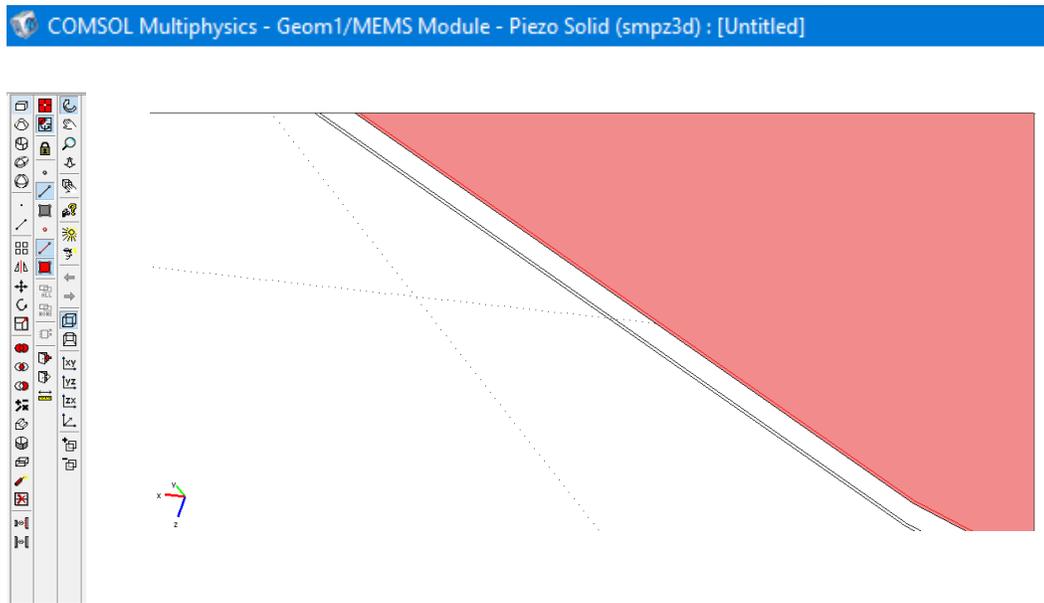


Fig.3.57 Acercamiento de las tres circunferencias.

Posteriormente se creó la siguiente circunferencia con la que nos ayudaremos para formar el diámetro interior. Seleccionamos nuevamente la herramienta de “cilindro” y creamos el siguiente elemento con las dimensiones del diámetro interior (fig. 3.58).

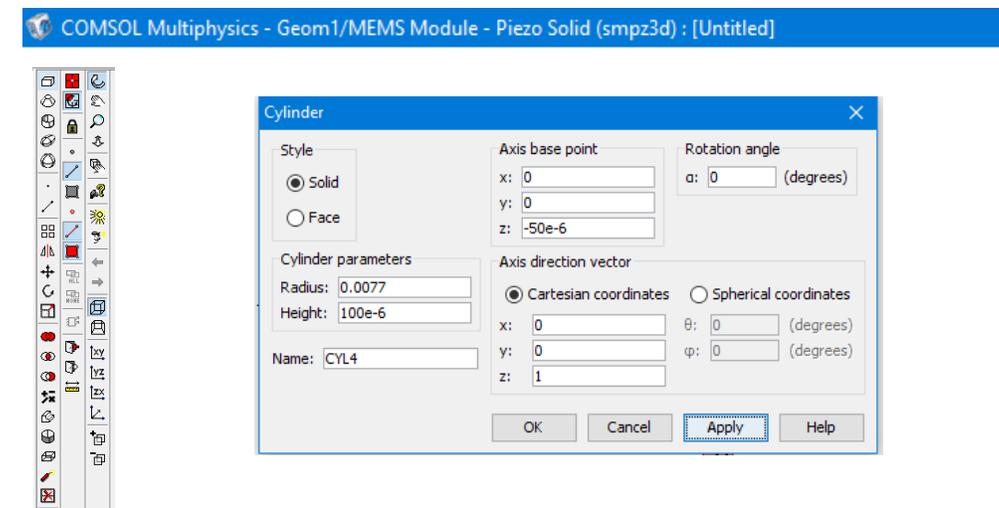


Fig. 3.58 Creación del diámetro exterior con la herramienta cilindro.

Como se observa se crea esta nueva circunferencia con el diámetro menor (7.7 milímetros) que será el diámetro interno del anillo.

Recordando que tenemos tres capas ya creadas con un espesor total de 36 micras, entonces el espesor de esta circunferencia que nos va a servir para cortar las demás tendrá que ser mayor, para este caso se propuso de 100 micras. Además debemos tener en cuenta que las capas que ya tenemos empiezan en -4 micras sobre el eje z, por eso esta capa se puso como referencia a -50 micras para asegurar que las otras capas fueran cortadas perfectamente (fig. 3.59).

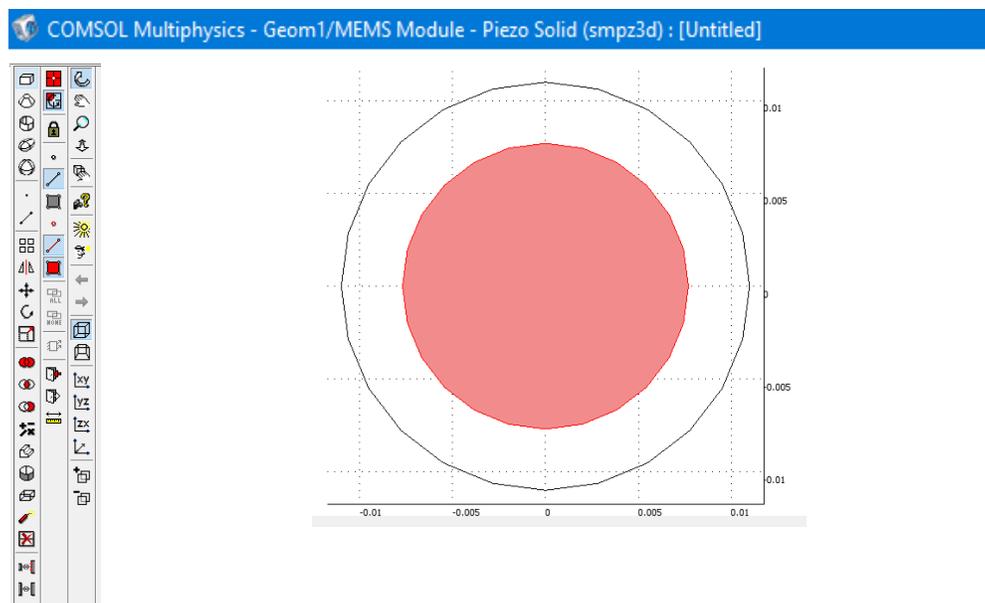


Fig. 3.59 Vista superior de las circunferencias creadas.

A continuación se creó el anillo haciendo una resta de áreas:

A los cilindros 1,2 y 3 se le restó el cilindro 4 con la herramienta “*Crear un objeto compuesto*” tal y como se muestra en la fig. 3.60:

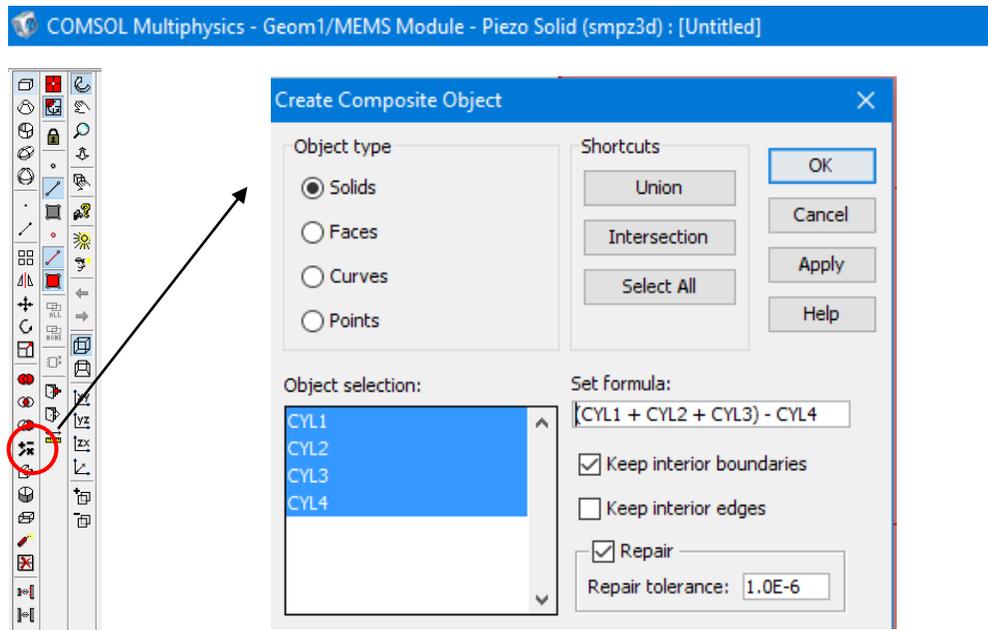


Fig. 3.60 Herramienta “Crear un objeto compuesto”

Aquí ingresamos los objetos que deseamos restar, en este caso ingresamos “(CYL1+ CYL2+ CYL3– CYL2)” (Área del cilindro número 1, 2 y 3 menos el área del cilindro número 4). Al presionar “OK” tendremos el anillo (fig. 3.61).

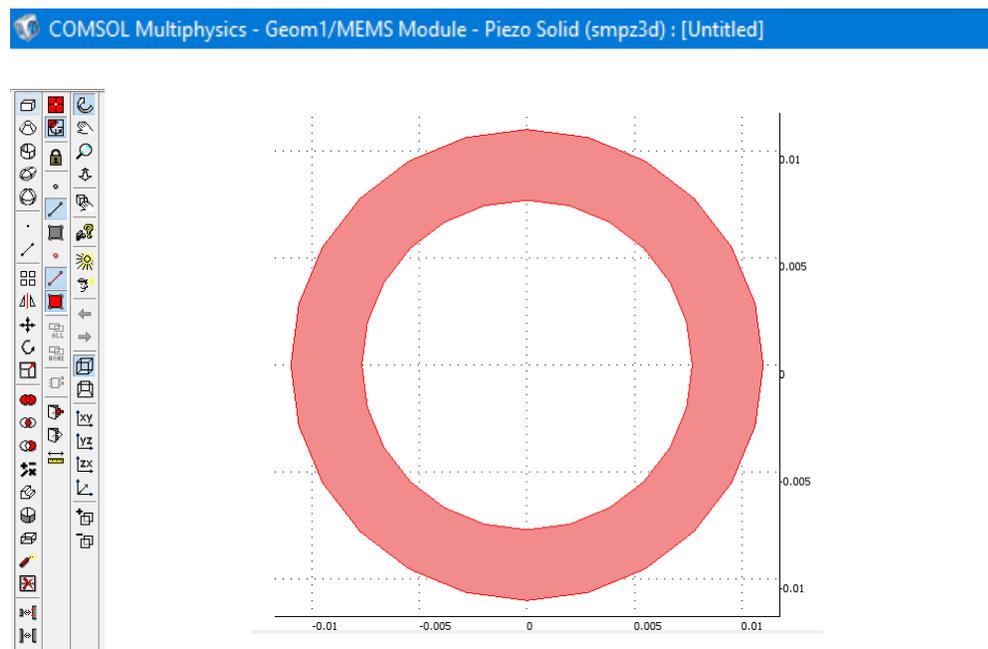


Fig. 3.61 Geometría del anillo principal del transductor.

Cabe mencionar que el transductor a simular es un anillo circular segmentado, por lo cual aún nos falta dividir este anillo, para ello se realiza lo siguiente:

Como ya vimos, la herramienta “Crear un objeto compuesto” nos ayuda a crear un nuevo elemento a partir de otros, sumando o restando sus áreas. Aprovechando esta característica creamos seis bloques que restaremos al anillo para así crear el anillo segmentado. Para crear los bloques debemos comprender que la única dimensión que debe ser exacta es el ancho, que será la separación de los segmentos del anillo.

Dimensiones de los bloques:

Largo (eje y): Pondremos algún valor mayor a 3.3 milímetros, ya que 3.3 milímetros es el ancho del anillo y para asegurar que se realice el corte de las áreas correspondientes ponemos un largo de 7 milímetros como se observa en la fig. 3.62.

Ancho (eje x): Este valor tiene que ser exacto ya que es la separación entre cada anillo, y es 1.1 milímetros como se observa en la fig. 3.62.

Altura: Teniendo en cuenta que la altura total del anillo es 36 micras comenzando sobre el eje z en -4 micras, pondremos una altura superior a esta y una referencia más baja en el eje z para asegurar los cortes. En este caso 100 micras de altura y la referencia se pondrá en: -50 micras para el eje z como se observa en la fig. 3.62.

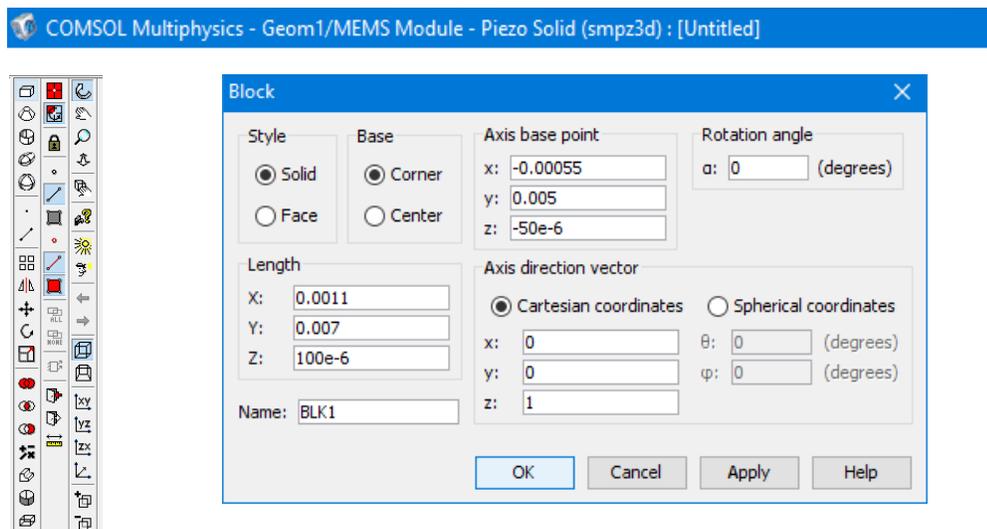


Fig. 3.62 Creación de los bloques que servirán como corte.

Las referencias en los ejes “x” y “y” sirven para colocar el bloque en el lugar correcto. Para el eje x, necesitamos colocarlo a la mitad del ancho de separación que tendrá el anillo. Como el ancho de separación es de **1.1 milímetros**, la referencia quedara en **0.55 milímetros**. Mientras que para el eje y, solo debemos asegurarnos que el bloque cubra completamente el ancho del anillo donde se hará el corte, para este caso la referencia nos quedara en **5 milímetros**.

Necesitamos en total 6 cortes en el anillo, ya que este es de seis segmentos, para facilitar la creación de los bloques seleccionamos el que hemos creado, presionamos las teclas Control + c para copiar y Control + v para pegar y así hacer una copia exacta del bloque que antes hicimos.

Al teclear Control + v aparecerá un cuadro de dialogo donde nos pregunta que desplazamiento le queremos dar a ese nuevo bloque con respecto al original. Lo ubicamos exactamente del lado opuesto donde se encuentra el original, es decir, lo ubicamos en el lado negativo del eje y. Así que el único desplazamiento que se hizo fué en el eje y, recordando que el bloque debe cubrir completamente el ancho del anillo le ponemos un desplazamiento de -18 milímetros (fig. 3.63).

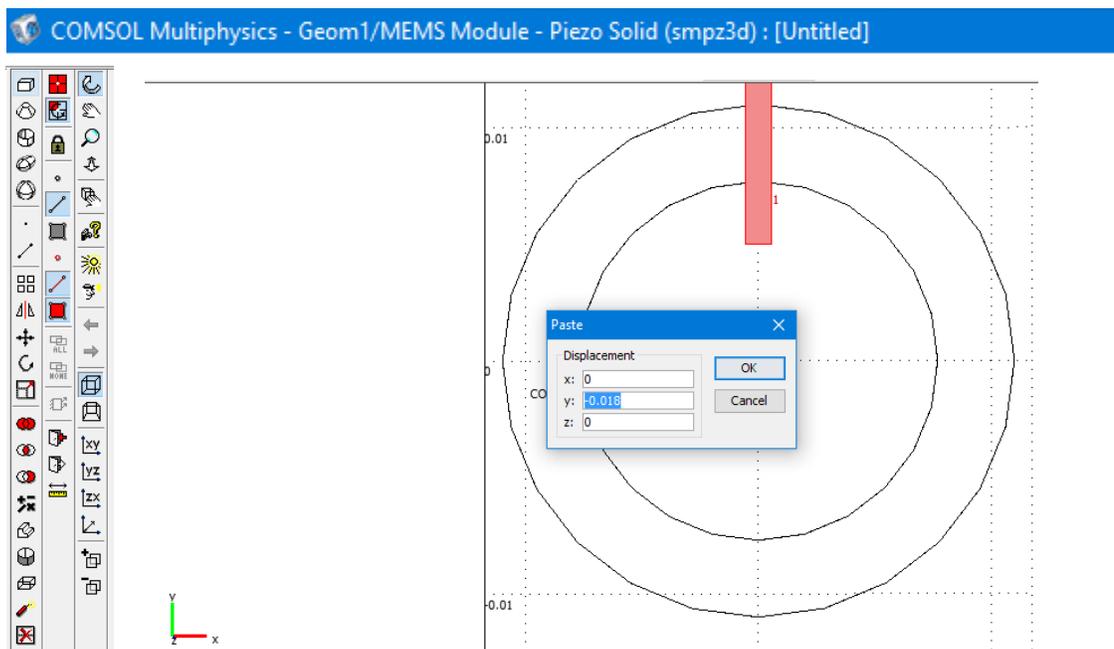


Fig. 3.63 Creación de un bloque a partir de otro.

El nuevo bloque quedara ubicado como en la fig. 3.64:

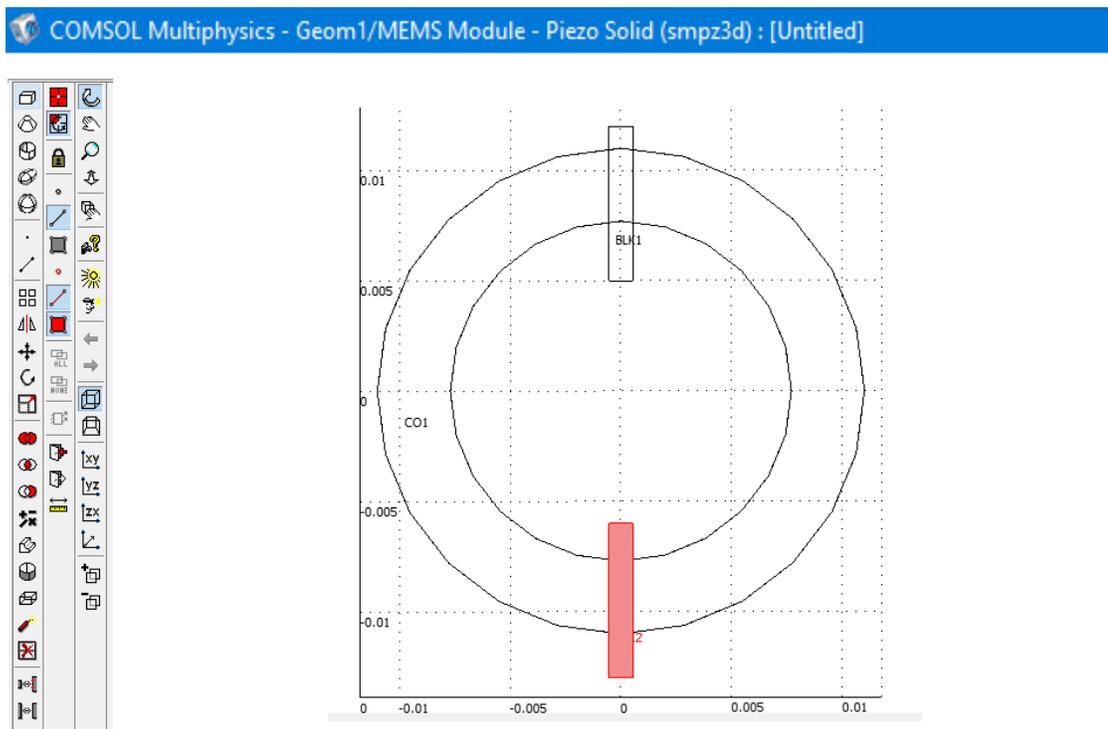


Fig. 3.64 Bloques 1 y 2 de corte.

El siguiente paso para crear los 4 bloques que faltan es crear dos copias de cada uno de estos bloques, pero sin darles algún desplazamiento, es decir, que queden una encima de la otra. Tres de cada lado.

Para acomodarlos a la misma distancia alrededor del anillo y así lograr que los segmentos del mismo sean del mismo tamaño usamos la herramienta rotar para girar los bloques.

Seleccionamos un bloque del grupo del eje y positivo y posteriormente esta herramienta: Donde en el apartado de “Ángulo de rotación” ingresamos 60 grados como se muestra en la fig. 3.65.

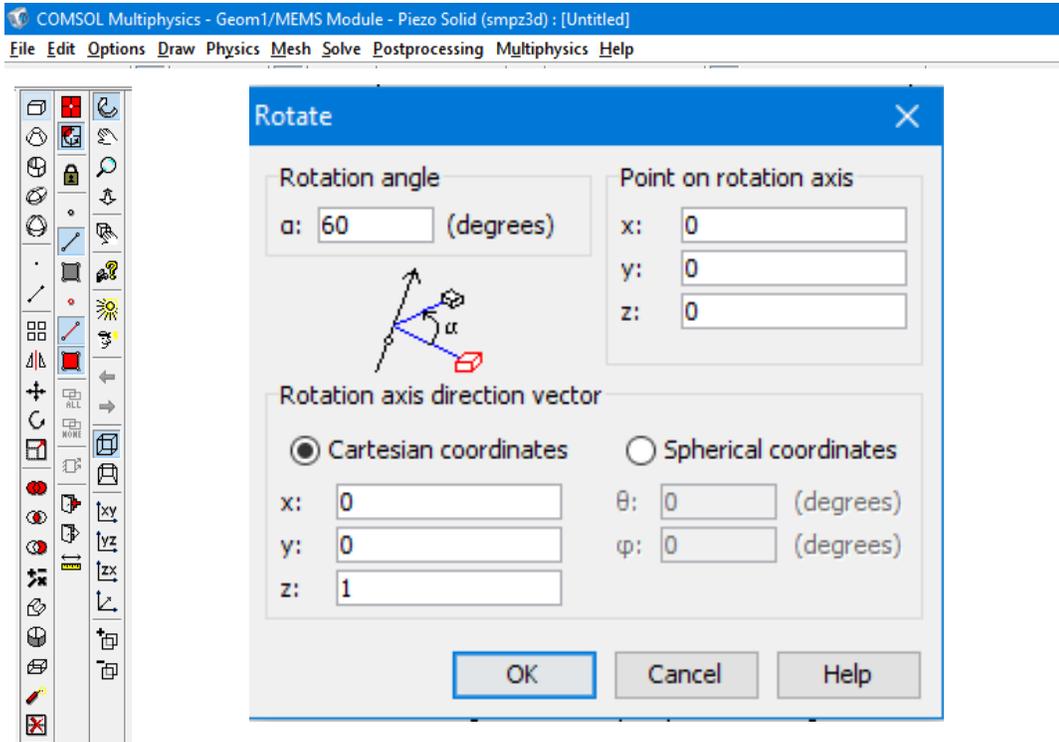


Fig. 3.65 Herramienta para rotar objetos.

Seleccionaremos el otro bloque que aún queda de ese grupo de 3 originalmente y se rotará a 120 grados, una vez realizado este proceso contaremos con tres divisiones marcadas del anillo segmentado como se muestra en la fig. 3.66:

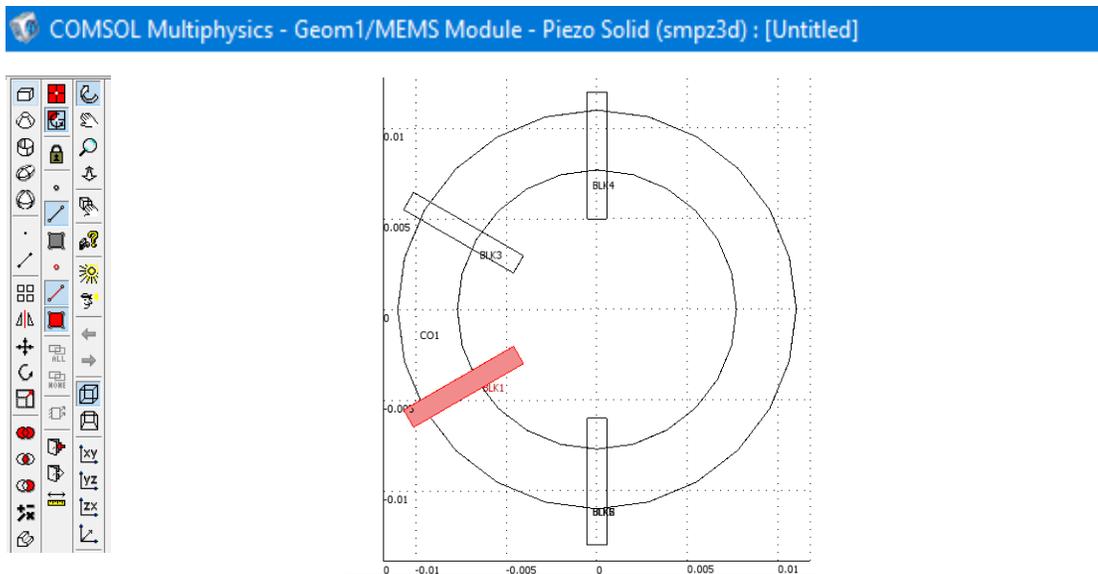


Fig. 3.66 Marcado de 3 divisiones del anillo segmentado.

Se realizó el mismo proceso para el grupo de bloques restante quedando al final de la manera que se muestra en la fig. 3.67:

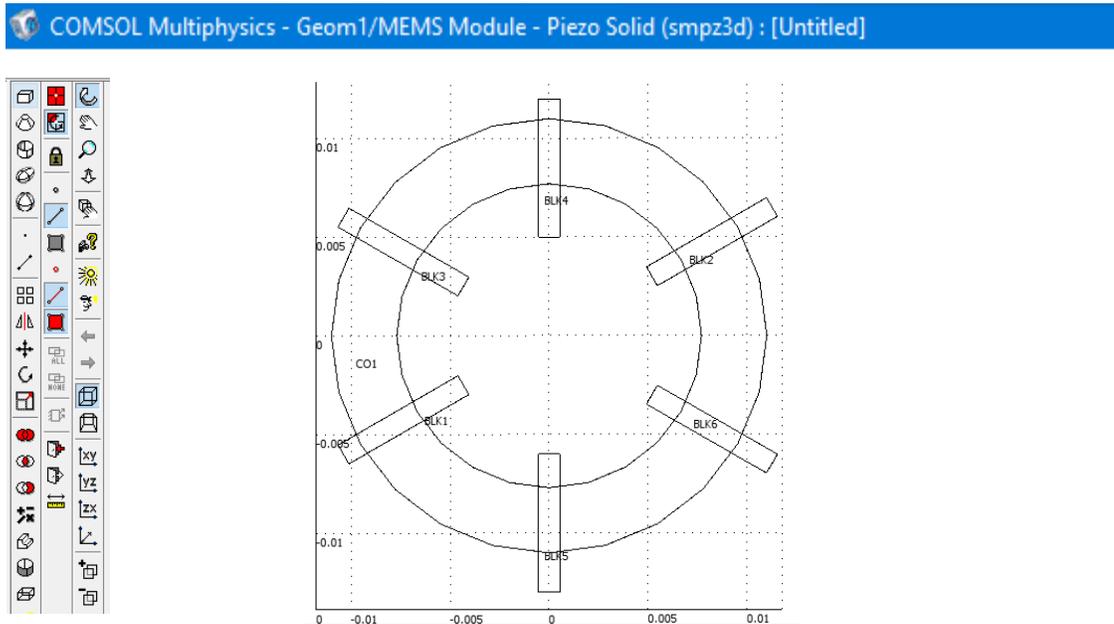


Fig. 3.67 Cortes marcados en el anillo con los bloques creados y rotados.

Terminado este paso ya teníamos marcado donde se harían los cortes al anillo, esto se realiza usando nuevamente la herramienta “Crear un objeto compuesto” (fig. 3.68) en donde restamos el área de los seis bloques que se crearon y ubicaron estratégicamente al área del anillo.

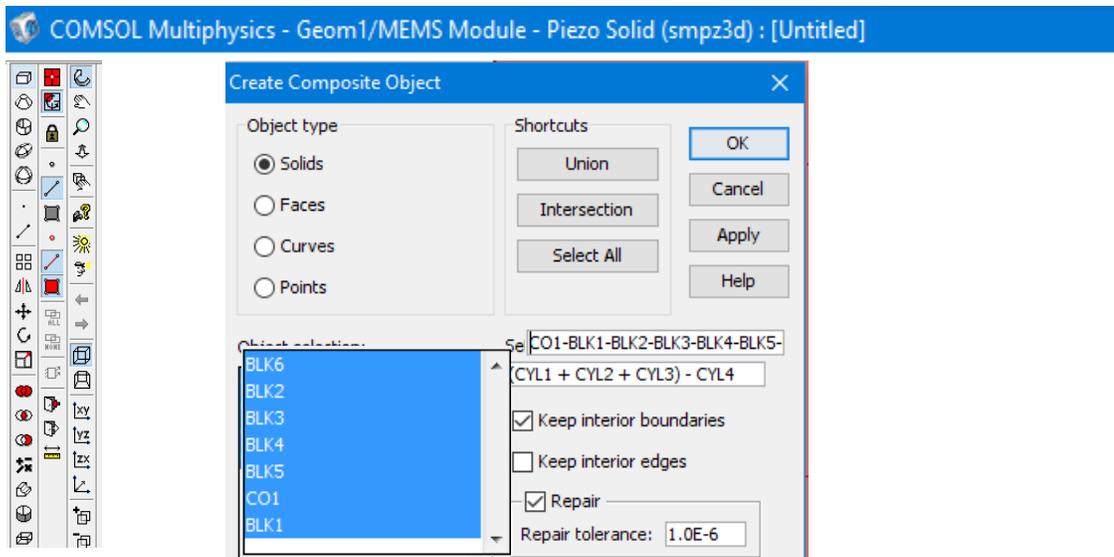


Fig. 3.68 Cortes al anillo segmentado con los bloques creados.

Al presionar “OK” se generaron los cortes marcados y la geometría ahora quedó de la siguiente forma (fig. 3.69):

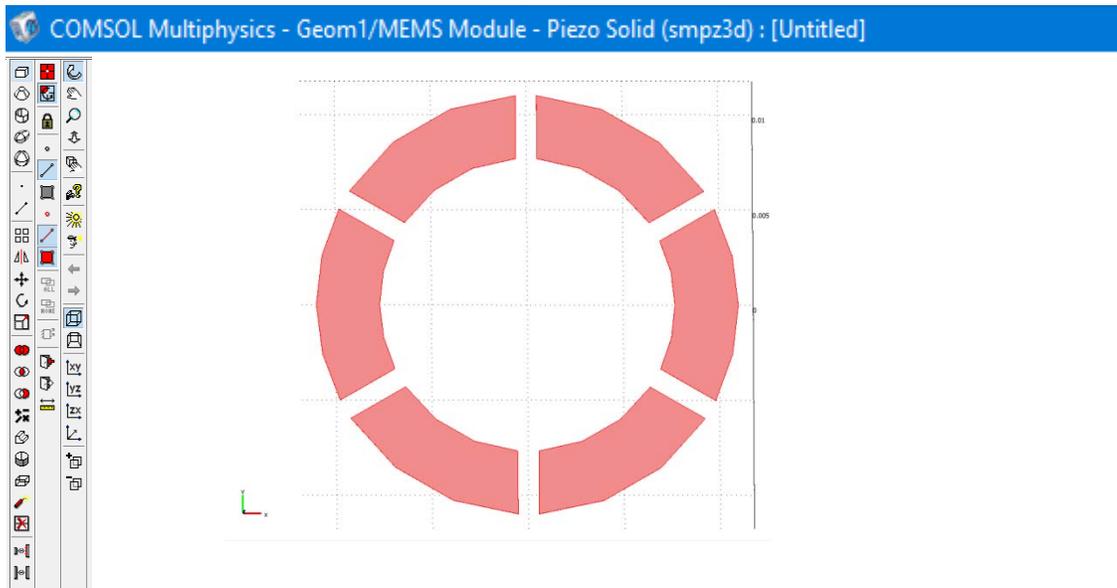


Fig. 3.69 Anillo Circular segmentado.

Una vez creada la geometría, ingresamos el valor de la frecuencia 2 (MHz) en el apartado de constantes.

3.5.2 Tabla de Datos del Material.

Posteriormente se creó el material PVDF en la librería de materiales de *COMSOL* con la tabla de datos (Tabla 1.2).

Una vez creado el material e ingresado sus propiedades necesitábamos asociarlo a la geometría que le corresponde, esto se realizó bajo el dominio “*Solid, Stress- Strain*”.

En la ventana de la fig. 3.70 es donde se relaciona el material con la geometría que se creó previamente.

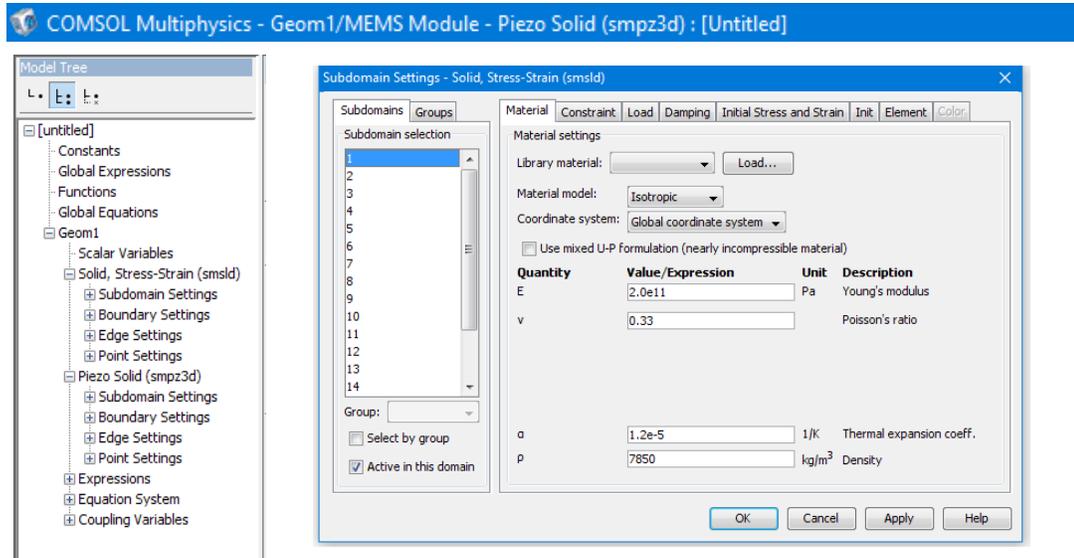


Fig. 3.70 Ventana de Ajustes del Subdominio “Solid, Stress- Strain”.

En la sección de “Subdomain selection” observamos las secciones de las cuales se compone el modelo. Como sabemos cada segmento del anillo cuenta con tres capas: la capa central, que es la principal y es de material PVDF; las de los extremos, que son las metalizaciones de plata. Por lo tanto tendremos un total de 18 secciones (tres por cada anillo). Con ayuda de la herramienta de “Zoom” podemos observar que las secciones quedan distribuidas como se muestra en la tabla 3.4:

Material	Secciones
Metalización de Plata Inferior	1, 4, 7, 10, 13 y 16
PVDF	2, 5, 8, 11, 14, y 17
Metalización de Plata Superior	3, 6, 9, 12, 15 y 18

Tabla.3.4 División de Secciones por material

Se realizan las correspondientes asignaciones tal como se realizó con la membrana rectangular.

El siguiente paso en esta simulación es definir las características del arreglo de transductores en forma de anillo segmentado de acuerdo a los dominios que se seleccionaron (*Solid, Stress-Strain* y *Piezo Solid*).

Características que definen el modelo, como la señal de excitación, la configuración para que la membrana vibre en modo espesor, así como definir las caras de la membrana (Positivo y tierra). Para definir esto, debemos percatarnos que en el “Model Tree”, el dominio “Piezo Solid” se encuentre seleccionado.

En la barra de menús se encuentra la pestaña “Physics” y la opción “Boundary Settings” donde se configuraron los límites tanto de la membrana de material PVDF como de las metalizaciones: desde los bordes hasta las caras.

3.5.3 Definir contornos (dominios y subdominios).

De acuerdo a lo que se pretende en la simulación, lo cual es que el arreglo de transductores vibre en modo espesor, se configuraron los límites del modelo de la siguiente manera:

Las caras de mayor área deben vibrar de manera libre mientras que todos los bordes de los segmentos del anillo deberán permanecer fijos. Cada segmento de anillo cuenta con 4 caras de mayor área; las cuales son 2 caras de metalización y las dos caras de la membrana de material PVDF que comparten frontera con la metalización de plata, a las que no se puede modificar sus propiedades o restricciones.

Las fronteras que deben vibrar libremente del arreglo del anillo segmentado se muestran en la tabla 3.5:

FRONTERAS QUE VIBRAN LIBREMENTE	
SEGMENTO	SECCIÓN
1	3, 6, 9, 10
2	19, 22, 25, 26
3	29, 32, 35, 36
4	57, 60, 63, 64
5	70, 73, 76, 77
6	89, 92, 95, 96

Tabla 3.5. Secciones del anillo segmentado que vibran libremente.

El resto de las fronteras son los bordes de cada segmento del anillo, estos bordes son tanto de la metalización como del material PVDF, todos estos bordes deben quedar fijos o inmóviles con la opción “*Fixed*”.

El siguiente paso es cambiar las condiciones eléctricas en la pestaña “*Electric BC*”, donde definiremos qué caras serán la entrada de la señal de excitación y qué caras serán la tierra.

Para esto tenemos que ayudarnos de herramienta de “*zoom*” para poder observar cuál es la capa final de cada extremo de cada segmento del anillo y que todas las caras de un lado sean la alimentación, así como todas las caras del otro lado sean la tierra.

Con ayuda de la herramienta “*zoom*” observamos que las caras exteriores de los segmentos quedan identificadas en la tabla 3.6:

Segmento	Caras Exteriores	
	Lado A	Lado B
1	3	10
2	19	26
3	29	36
4	57	64
5	70	77
6	89	96

Tabla 3.6. Caras exteriores de cada segmento del anillo.

Las caras exteriores del lado nombrado como A se usaran para la señal de excitación mientras que las del lado B se usaran para la tierra.

Dentro de la pestaña “*ELECTRIC BC*” en la opción “*Boundary condition*” seleccionamos “*Electric Potential*” e ingresaremos la señal de la tabla 3.7:

Caras Exteriores de los segmentos	Condición Eléctrica
Lado A	Señal de excitación: $100 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot (t < 1/f)$
Lado B	Ground

Tabla 3.7. Condiciones eléctricas

Como se puede observar la señal de excitación depende de la variable frecuencia, la cual se definió anteriormente.

En cuanto al dominio “*Solid, Stress-Strain*” realizaremos el mismo procedimiento para la opción “*Boundary Settings*”. Estas configuraciones son definir las fronteras del modelo; es decir cuales vibraran libremente y cuales se mantendrán fijas.

3.5.4 Mallado.

Al tener ya definidas todas las características con las cuales trabajaremos nuestra simulación del modelo se realiza el mallado del mismo. Para ello se consideró el número de capas y fronteras que resultaron del modelo, esto se ve reflejado en el tiempo de solución del problema y el número de recursos que se requiere.

Se utilizará el mallado que menos recursos consuma, es decir, el más sencillo (“*Extremely coarse*”). Tendremos como resultado los segmentos del anillo divididos en pequeñas secciones. La elección del mallado se muestra en la fig. 3.71.

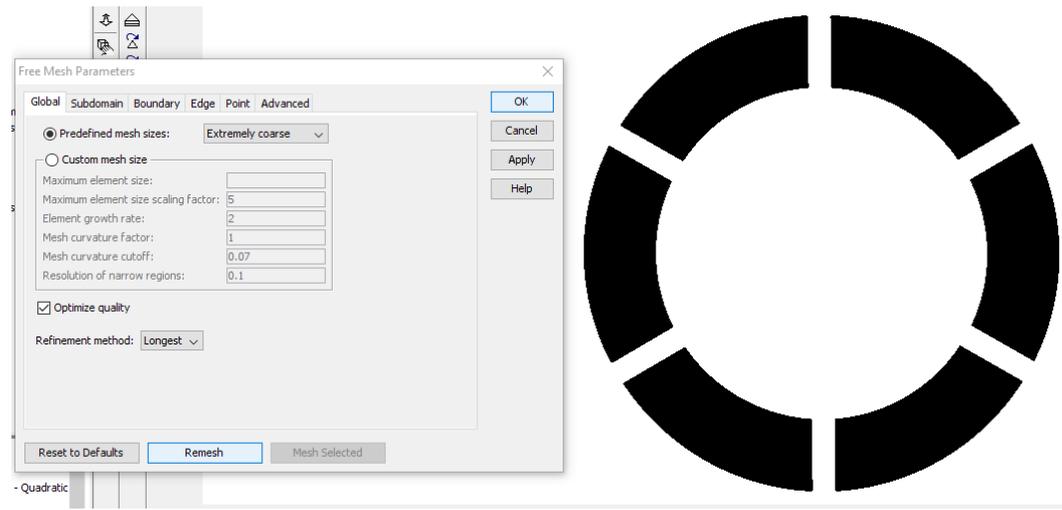


Fig. 3.71 Mallado "Extremety Coarse".

3.5.5 Parámetros Finales.

Posterior a esto, se especificaran ciertos parámetros finales para la resolución de este modelo, vamos al menú "Solve" y seleccionamos la opción "Solver Parameters". Realizaremos un análisis en el tiempo dentro del dominio "Solid, Stress- Strain", ya que este dominio es el que rige las vibraciones mecánicas. Proseguimos a darle a la simulación un tiempo de inicio, un tiempo final y además un tiempo de muestreo.

Ya que la frecuencia de la señal de excitación fué de 2 MHz, el tiempo en el que queremos el análisis será: 5×10^{-7} segundos. Esto quiere decir que nuestro análisis en el tiempo comprende de 0 a 5×10^{-7} segundos.

El tiempo de muestreo es de 100 muestras por cada ciclo, lo cual sería: 5×10^{-9} segundos, con lo cual los valores que ingresamos serán los de la tabla 3.8:

Análisis en el Tiempo			
Tiempo de Inicio	Tiempo de Muestreo	Tiempo de Terminación	Forma de Ingresar los valores
0	5e-9	5e-7	0: 5e-9: 5e-7

Tabla 3.8. Duración del análisis en el tiempo.

Como se observa en la tabla, esta es la manera correcta de ingresar los valores en la ventana correspondiente de Tiempos.

Seleccionamos el menú “solve” y después la opción “Solve Problem”, haciendo esto se muestra la ventana de la fig. 3.72, que indica que el modelo está siendo resuelto:

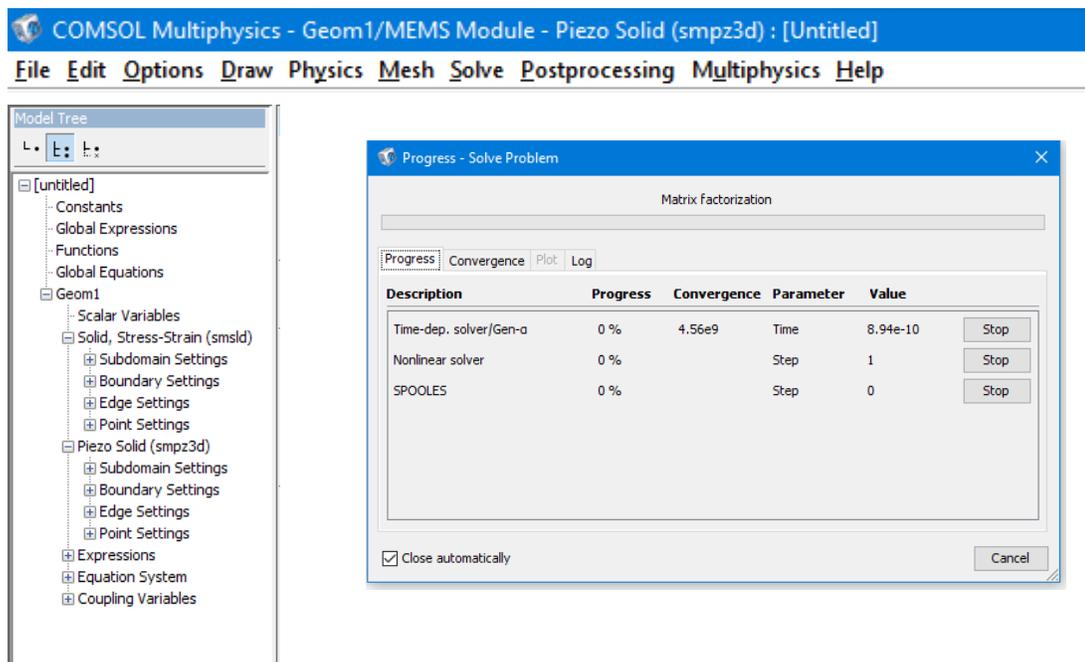


Fig. 3.72. Proceso de resolución del Modelo.

Dado que es un modelo que tiene demasiados elementos, fronteras y configuraciones, demandará demasiados recursos al equipo donde se quiera realizar esta simulación, por lo cual es muy probable que el equipo no responda o aparezca un mensaje donde dice que los recursos del equipo no son suficientes y simplemente se cancelará.

Sabemos que los seis segmentos del anillo son iguales, por lo cual podemos hacer la simulación para un solo segmento del anillo y teniendo en cuenta que no tenemos un medio en el cual propagar las vibraciones, estas serán las mismas para cada segmento de anillo.

Dicho esto, eliminamos cinco de los seis segmentos de anillo, para poder realizar la simulación con solo uno. A continuación se hizo el mallado nuevamente y la simulación. Al término de esta simulación obtuvimos la visualización de la fig. 3.73:

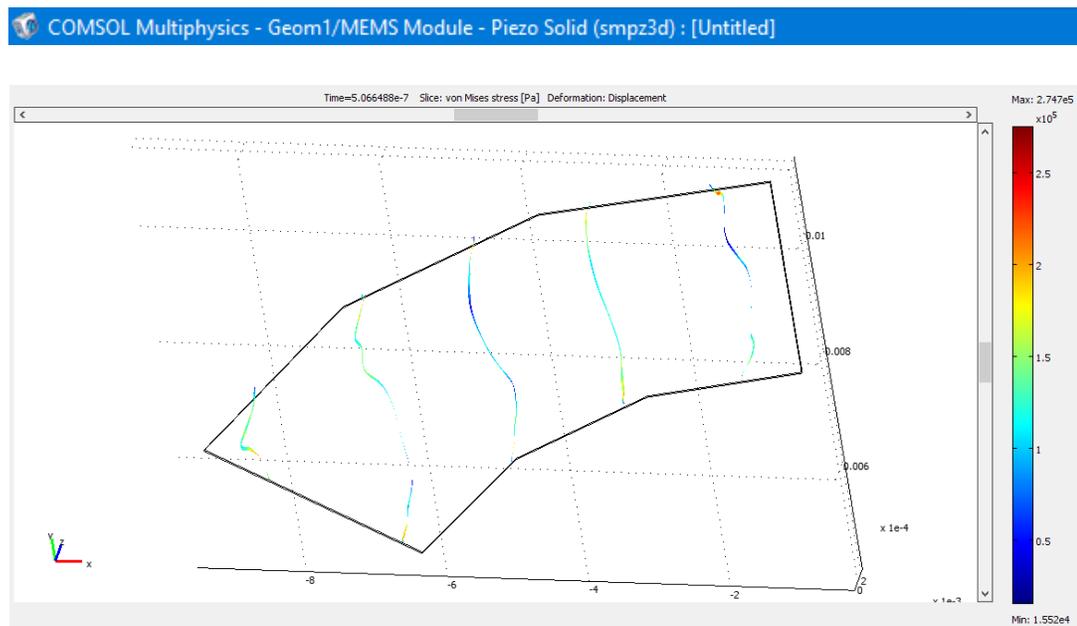


Fig. 3.73 Fin de la Simulación.

3.5.6 Post Procesamiento.

Esta vista esta predefinida en *COMSOL*, es decir, para apreciar de una mejor manera las longitudes de onda, necesitamos hacer un poco de trabajo de post- procesamiento que consiste en modificar ciertos parámetros que nos ayudaron a una mejor interpretación de los resultados. La primera de estas modificaciones es ver las vibraciones de manera de relieve sobre el eje “Z” dentro del elemento (fig. 3.74).

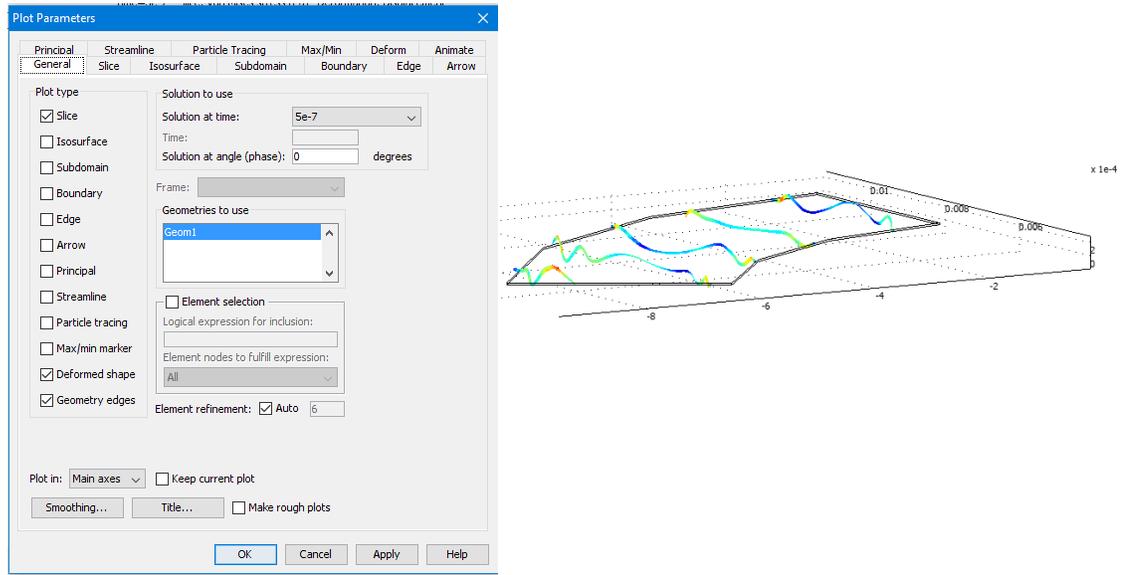


Fig. 3.74 Plot Parameters.

Finalmente la segunda modificación consiste en el modo de visualización del modelo: mientras por default tenemos una vista en *capas* o pliegos aplicaremos la vista de *límites* o *bordes* que es la opción que más se acomoda a nuestras necesidades (fig. 3.75). Con esto se observan claramente las vibraciones a lo largo del segmento del anillo segmentado.

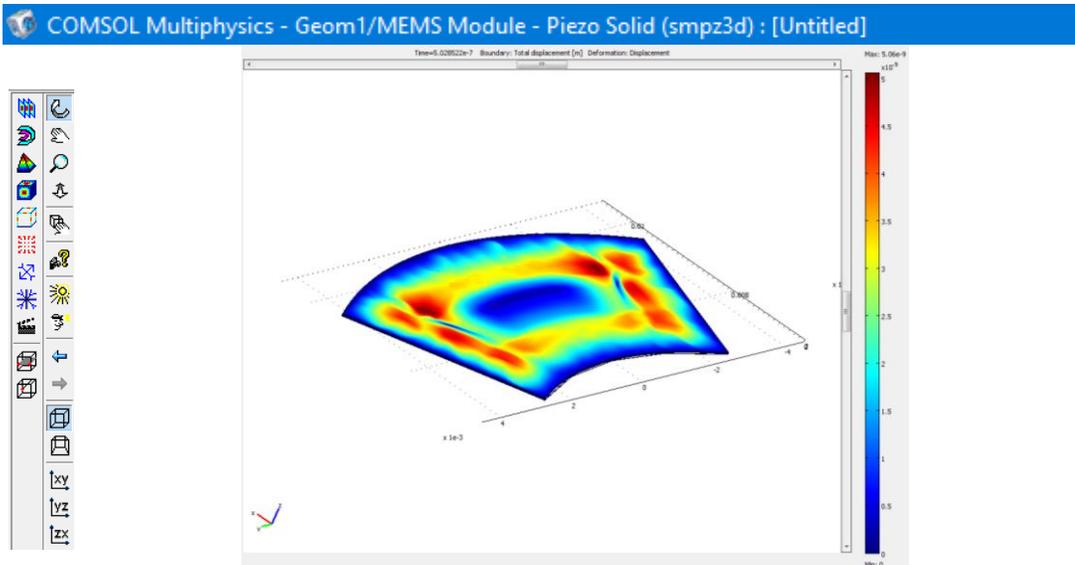


Fig. 3.75 Simulación terminada con post procesamiento.

De acuerdo con lo que se planteó al inicio de la simulación tenemos que la distancia en longitudes de onda de cada segmento del anillo sería de 3, 9 y 6 longitudes respectivamente.

Se puede observar claramente la distancia de tres longitudes de onda, en cuanto a las distancias de los diámetros (interno y externo) del segmento de anillo. Se puede observar la intensidad de la vibración en dicha zona aunque no claramente las longitudes de onda, esto se debe a la geometría que estamos empleando. El comportamiento de las vibraciones mecánicas sobre esta membrana de PVDF siempre dependerá de la forma geométrica con la que estemos trabajando.

Se puede concluir para esta simulación que se obtuvieron resultados que satisfacen los parámetros con los que se propuso y se desarrolló la simulación. Desde el cálculo de las longitudes de onda con la frecuencia y la velocidad de propagación del sonido en el material, hasta cada una de las propiedades del material de PVDF para que los resultados fueran lo más cercanos a la realidad, sin dejar de tener en cuenta que es una simulación y por lo tanto una aproximación.

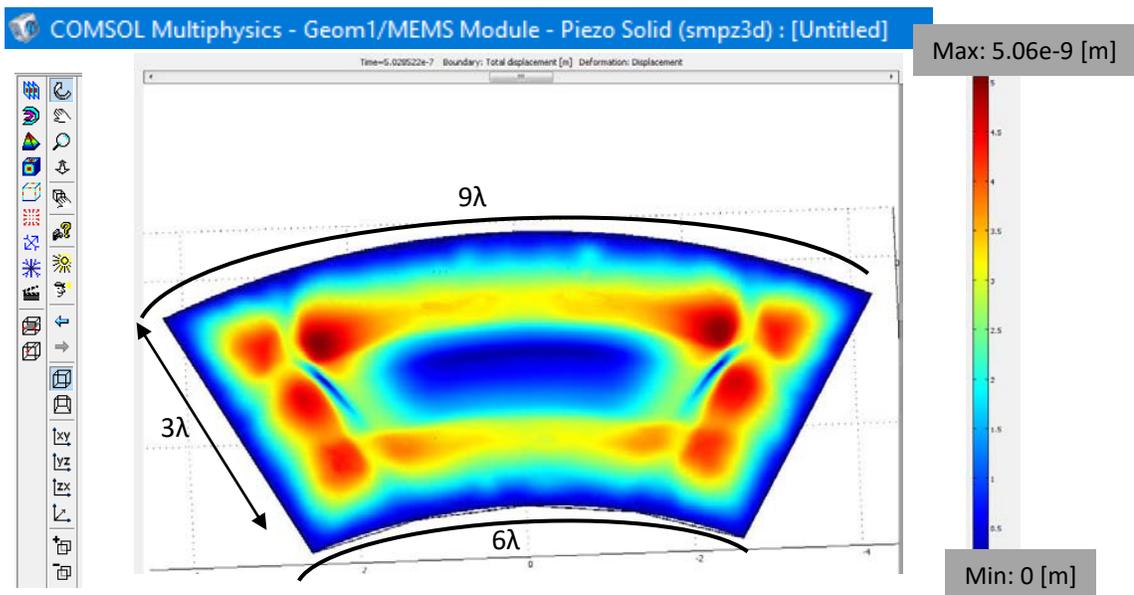


Fig. 3.76 Vista superior del segmento del anillo segmentado con metalización.

En la fig. 3.76 se muestra una vista superior del segmento del anillo segmentado con metalización que se logró simular.

Es importante mencionar que el número de elementos del cual constaba la simulación del anillo metalizado completo era de 1, 445,080 elementos.

Sin embargo para esta simulación de un solo segmento, el número de elementos disminuye considerablemente a 241,425.

Para esta simulación así como para las anteriores se trabajó con una frecuencia de operación de 2 MHz.

El desplazamiento máximo que se obtuvo en este segmento del anillo metalizado fue de 5.06 nanómetros.

4.RESULTADOS

En el desarrollo del tema 3 se realizaron simulaciones del material PVDF en distintas variaciones de las geometrías con las que se trabajó, de dichas simulaciones se reportaron sólo las más representativas y de las cuales los resultados obtenidos son más claros y concisos.

A estas geometrías propuestas, les fueron aplicados variaciones en los distintos parámetros como el voltaje de excitación, la definición de bordes, el mallado, la frecuencia de operación, la cual también modifica el ancho de la longitud de onda y el comportamiento del modelo en la simulación.

Después de varias pruebas se decidió trabajar con una frecuencia de 2 MHz, ya que el rango de frecuencias para trabajar del PVDF es vasto. Aunado a esto, realizando los cálculos necesarios, la longitud de onda para estas simulaciones fue de 1.1 mm. Para comprobar que al utilizar esa frecuencia de operación tenemos dicha longitud, se realizaron pruebas simulando membranas de medidas múltiplos de 1.1 mm. De ahí se partió para realizar una simulación con un modelo más complejo incrementando las dimensiones de la geometría.

- Resultado de la simulación de una membrana cuadrada de 0.55 mm, siendo media longitud de onda (fig. 4.1):

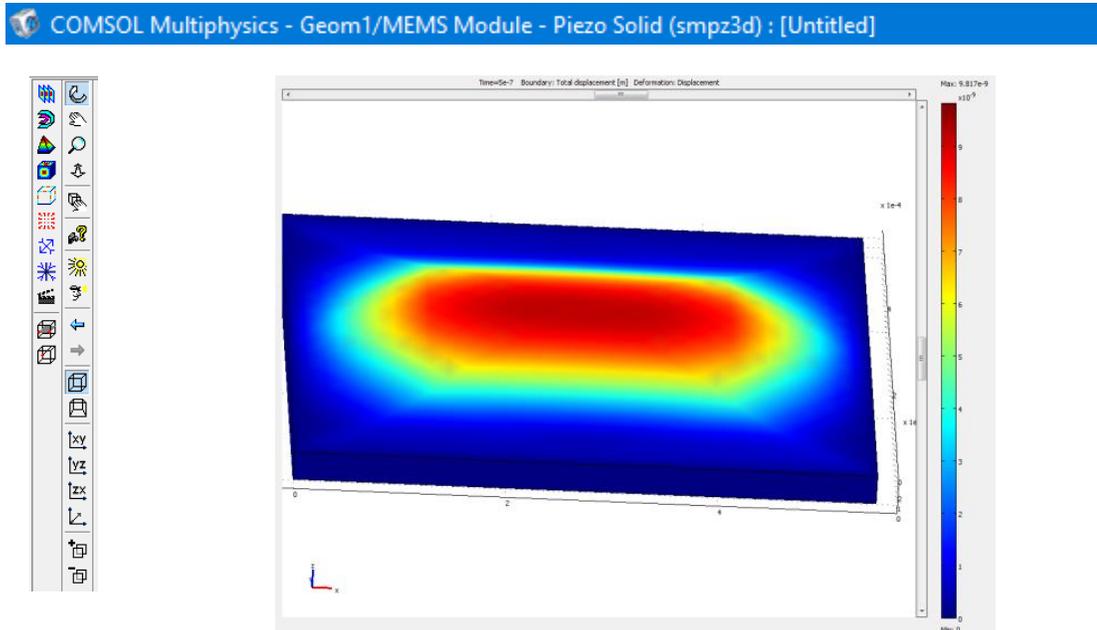


Fig. 4.1 Simulación de una membrana de $\frac{1}{2}$ longitud de onda.

Se observa la vibración sólo en un punto y en una sola cara de la membrana, si volteamos la membrana se observa una hendidura, ya que al ser media longitud de onda sólo tendrá una cresta o valle, pero no ambas.

Se obtuvo una vibración máxima de 9.81 nanómetros.

- Resultado de la simulación de una membrana cuadrada de 1.1 mm o una longitud de onda de onda:

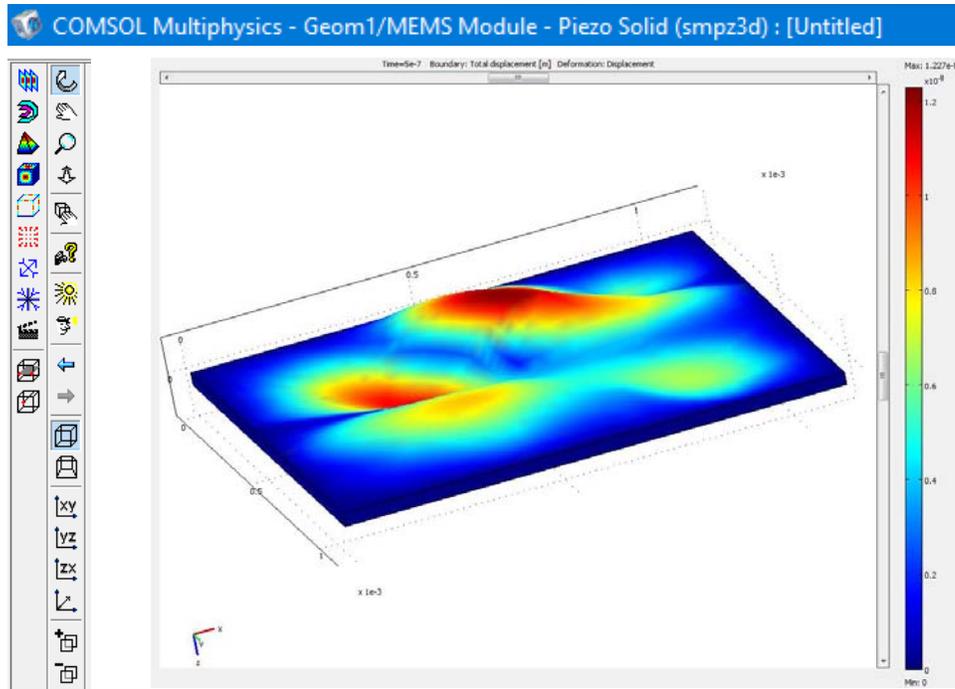


Fig. 4.2 Simulación de una membrana de 1 longitud de onda. Máxima vibración de 12 .27 nanómetros.

En la fig. 4.2 se muestra como resultado una longitud de onda por cada lado, es decir, un valle y una cresta por lado, si bien una longitud de onda se aprecia con mayor desplazamiento mecánico, claramente se ven formadas las lambdas que corresponden a esas medidas.

La primera simulación que se presenta en este trabajo consta de una membrana rectangular de dimensiones 2 x 3 longitudes de onda, de la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Se tienen las longitudes de onda calculadas sobre la membrana, con el trabajo de post procesamiento tenemos como resultado el desplazamiento mecánico en la membrana acotado por colores que muestran los niveles de intensidad del mismo en metros.

Para la segunda simulación se utilizó como base la anterior membrana rectangular agregando a ésta una capa de metalización de plata inferior y superior de 4 micras de espesor, la cual cambió en cierta forma los resultados obtenidos con la membrana sin metalizar.

Al realizar el post procesamiento se tiene que las capas de metalización frenaron las vibraciones en la membrana, es decir, disminuyó la intensidad con la que se presentaba el desplazamiento, sin embargo se siguen presentando vibraciones y se siguen distinguiendo las zonas de intensidad sobre la membrana.

Para la siguiente simulación pusimos a prueba la geometría propuesta en este trabajo; El anillo circular segmentado el cual consta de seis segmentos de anillo de iguales características. Este modelo consta de más elementos y por lo tanto son más configuraciones de los parámetros mecánicos y eléctricos, límites, de resolución y de post procesamiento que consumen más recursos del equipo, todo esto se ve reflejado en el tiempo para resolver el modelo.

Con base en las simulaciones anteriores de geometrías más simples, se obtuvo que en el arreglo del anillo circular segmentado las vibraciones de mayor intensidad se presentaran en los bordes de cada segmento.

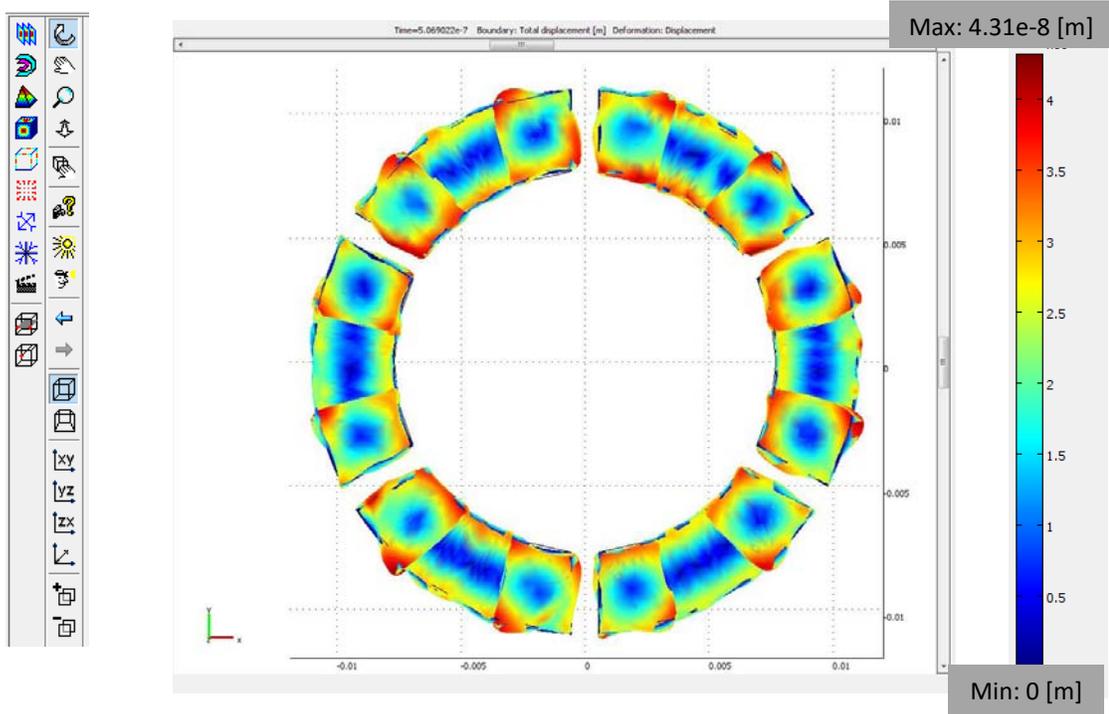


Fig.4.3 Anillo Circular Segmentado.

El mallado para esta simulación consta de 13,146 elementos, se trabajó con una frecuencia de operación de 2 MHz.

El desplazamiento máximo en la membrana de PVDF fue de 43 nanómetros.

De acuerdo a la escala de colores que representa la intensidad de las vibraciones en la fig. 4.3, se obtuvo mayor desplazamiento en las orillas de cada segmento, mientras que el centro de cada elemento carece de vibraciones.

Para la última simulación se metalizó con una capa de plata el anillo circular segmentado al igual que con la membrana rectangular, pero simplemente los recursos del equipo donde se intentó correr la simulación no fueron suficientes para realizar el proceso. Para la simulación del anillo segmentado sin metalizar, el número de elementos resultado del mallado fue de 13, 146. Al agregar el metalizado al anillo y realizar el

mallado más sencillo que nos permite *COMSOL* se obtuvo un mallado con 1, 445, 080 elementos, lo cual demuestra que se potencia el uso de recursos del equipo, dado eso se decidió hacer la simulación con un solo elemento del anillo segmentado.

Después de eliminar los otros cinco elementos y aplicar el mallado al segmento restante metalizado tenemos un total de 241, 425 elementos.

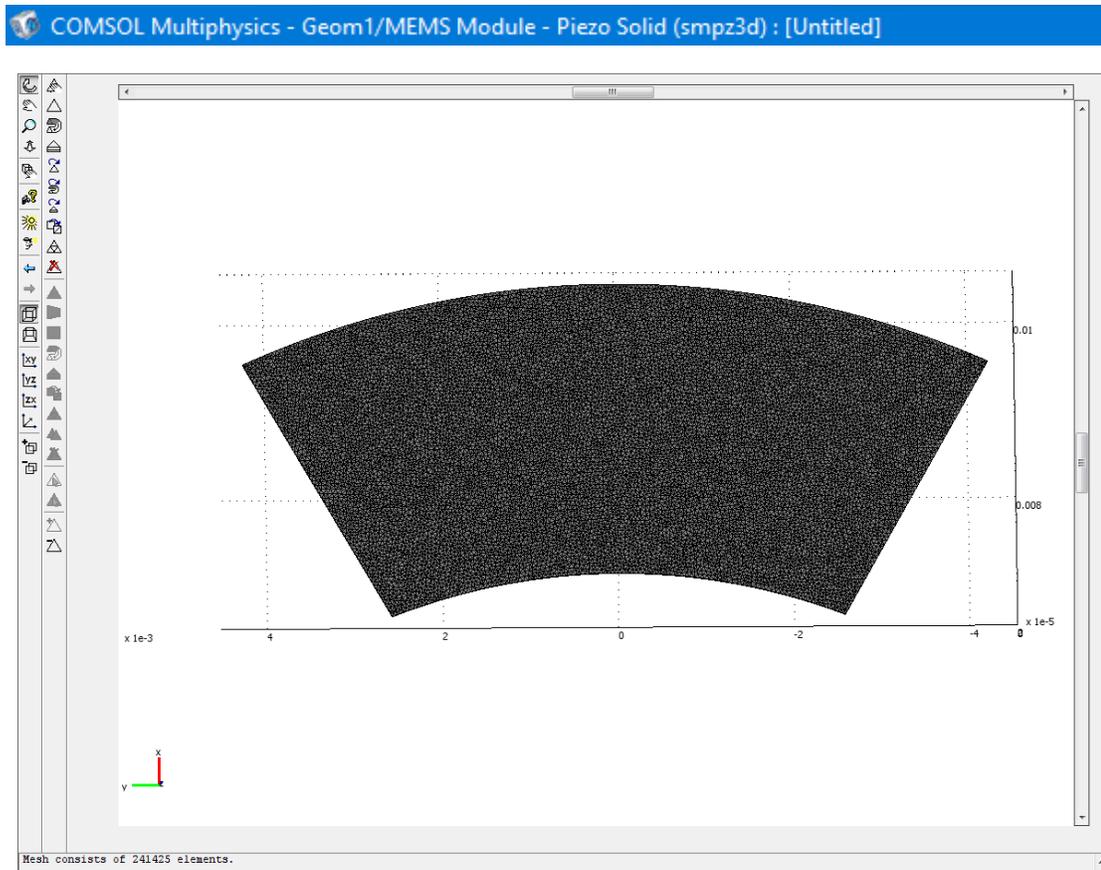


Fig. 4.4 Mallado del segmento del anillo metalizado.

En comparación al anillo circular segmentado sin metalizar son muchos más elementos a analizar en un sólo segmento del anillo metalizado como se observa en la fig. 4.4, el incremento es exponencial y se debe a las dos capas de metalización que se agregaron a la simulación del anillo segmentado.

5. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Al inicio del presente trabajo se planteó como objetivo principal realizar la simulación empleando el método del elemento finito de un transductor ultrasónico con la geometría propuesta de un anillo circular segmentado de material PVDF a fin de observar: el comportamiento del transductor en cuanto a la focalización de su campo de radiación; ventajas y desventajas del uso de PVDF como elemento piezoeléctrico y las cualidades o beneficios que aporta este tipo de geometría.

Con base en el objetivo que se planteó inicialmente en el presente trabajo, uno de los puntos más importantes por cumplir, fue el de contar con una simulación lo más apegada a los cálculos teóricos del transductor ultrasónico con PVDF, para ello fue necesario recabar los datos provenientes del fabricante de PVDF, para posteriormente introducirlos en el formato requerido por Comsol. Todo esto fue necesario ya que la tabla de datos (tabla 1.2 del tema 1) del PVDF no se encontraba en el listado de materiales que viene precargado en el software.

Se recabaron datos de sus propiedades, las cuales se complementaron con distintos artículos y trabajos donde se habla del PVDF, incluso de hojas de datos técnicos de fabricantes de este polímero. Para tener una base de datos confiables y completos se consideraron coeficientes como la densidad, el coeficiente de expansión térmica, propiedades eléctricas, así como la velocidad de propagación del sonido en este material y por supuesto las más importantes: las propiedades piezoeléctricas. Como se ha mencionado, este material posee propiedades piezoeléctricas dentro de las cuales fue necesario alimentar una matriz de elasticidad, matrices de acoplamiento y de permitividad, tanto para el momento de la tensión, como para la deformación del material. Sin dejar de mencionar la matriz de resistencia a la vibración.

Todos estos datos se ingresaron en la biblioteca de materiales del software para conformar el PVDF. Cabe mencionar que cada dominio del modelo necesita cumplir con

ciertos parámetros y propiedades de los materiales para poder arrojar resultados congruentes en una simulación. Es decir, si tuviéramos incompleta la tabla de datos de las propiedades piezoeléctricas del PVDF, el dominio “*Piezo Solid*” entregaría resultados erróneos o la simulación no se podría completar.

Una vez que se contaba con una tabla de datos del PVDF bastante sólida se comenzó por realizar pruebas simples con geometrías básicas y variando la frecuencia de operación, teniendo en cuenta el amplio rango de frecuencias que tiene el PVDF para actuar como elemento piezoeléctrico.

Después de trabajar a distintas frecuencias, y teniendo en cuenta tanto la relación entre la velocidad de propagación del sonido en el PVDF y la frecuencia de operación que nos da como resultado la longitud de onda y el promedio de tamaño de algunos transductores fabricados, se acordó para estas simulaciones trabajar a una frecuencia de 2Mhz y por consecuencia tener una longitud de onda de 1.1 milímetros. ($\lambda = 1.1 \text{ mm}$).

En este punto comenzaron las pruebas en geometrías diseñadas todas ellas a partir de múltiplos de la lambda definida. Desde elementos cuadrados de PVDF de 1λ por lado donde se observan: una cresta y un valle desde la perspectiva de los ejes “x” o “y”, ya que las vibraciones entregadas por la simulación se presentan sobre el eje “z”. Hasta llegar a un elemento de 3λ por 2λ donde se aprecian claramente las crestas y valles correspondientes a estas dimensiones. Con los resultados mostrados en esta simulación podemos comprobar la veracidad y confiabilidad de la tabla de datos reunida.

Como parte de la simulación y a fin de tener los precedentes necesarios antes de aumentar la dificultad en la geometría de los elementos, se metalizo el elemento de PVDF de dimensiones 3λ por 2λ con una capa de plata de 4 micras de espesor por cada lado del elemento. Esto sugirió un reacomodo en la definición de fronteras, ya que al fijar estas capas de plata al PVDF, la excitación del elemento pasó a estar en una de las caras de plata y ya no directamente en el PVDF. De acuerdo a las vibraciones graficadas

sobre el elemento, las capas de plata redujeron considerablemente la intensidad de las mismas.

Para el diseño del anillo circular segmentado se siguió la misma metodología de las simulaciones anteriores, la cual es elaborar geometrías en dimensiones a partir de múltiplos de la λ calculada con la frecuencia de operación que mejor nos dio resultado empleando este software. Una vez definidas las bases de la simulación para la geometría propuesta, se elaboró el diseño del anillo segmentado al entorno de *COMSOL* empleando las ventajas de sus herramientas de dibujo.

El anillo segmentado cuenta con un radio interno de 7λ , un radio externo de 10λ , restando estos dos tenemos la anchura radial del anillo de 3λ . Del perímetro formado por las circunferencias del radio exterior e interior tenemos que cada segmento del anillo tiene una anchura angular de aproximadamente 9λ en su diámetro exterior y de 6λ en su diámetro interior. Con una separación entre los segmentos de 1λ .

Definiendo contornos y áreas se realizó esta simulación en la cual se obtuvo como resultado las vibraciones esperadas desde el diseño de este transductor. Los resultados son apreciables en cualquiera de las dimensiones que se le dio al anillo segmentado, son muy claros en la anchura radial de cada elemento, son menos visibles pero considerables en la anchura angular de los segmentos. Las vibraciones entregadas al término de la simulación sobre el eje “z” son más intensas en los bordes de la geometría, sin embargo las vibraciones están presentes a lo largo de cada elemento.

Finalmente se trató de metalizar este diseño con capas de plata como se realizó con el elemento de dimensiones 3λ por 2λ con la finalidad de aproximarse un poco más a un transductor fabricado, como actualmente se fabrican pequeños transductores a base de geometrías muy básicas de material PVDF metalizado. Esta simulación se intentó realizar en equipos con gran alcance en memoria RAM y velocidad de procesamiento, sin embargo no fue posible completarla debido al gran número de elementos en los que el mallado divide al modelo; 1, 445, 080 elementos exactamente. Por ello se efectuó la

simulación de un solo segmento del anillo metalizado, siendo esta simulación más costosa en cuanto a recursos de cómputo que la simulación del anillo segmentado completo sin metalizar.

Los resultados de esta simulación convergen con los resultados del elemento rectangular de PVDF metalizado, presentando vibraciones sobre el segmento del anillo pero en menor intensidad debido a las capas de plata puestas en los extremos del segmento.

La simulación de un transductor ultrasónico de material PVDF empleando el método del elemento finito es una alternativa confiable y una excelente aproximación a la respuesta que nos pudiera dar el transductor construido para ser evaluado.

Se cumple en gran medida con el objetivo del presente trabajo porque se logró realizar la simulación del anillo circular segmentado, pudiendo observar el comportamiento del material que a pesar de no tenerlo en su librería de materiales, nos da excelentes resultados en las vibraciones de los arreglos en las simulaciones, todo esto de acuerdo a los parámetros que se plantearon al inicio de cada simulación. Para el anillo metalizado solo se logró simular un segmento por las limitaciones de los equipos de cómputo.

Para futuras investigaciones, un trabajo interesante a realizar es la simulación completa del transductor en forma de anillo circular segmentado, evaluar su capacidad de focalización de su campo de radiación. Incluso aumentar el número de anillos segmentados y analizar su campo de radiación, además de agregar un medio de propagación en el cual observar el alcance de sus campos.

6. REFERENCIAS

[1] *Piezo Film Sensors Technical Manual*, 1005663-1 REV B, Measurement Specialties, Inc, Norristown, PA, 1999.

[2] bove-ag, plásticos y elastómeros S.L., *PVDF Fluoruro de Polivinilideno, Características Generales* [online]. Disponible en: http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_pvdf.html.

[3] GoodFellow, *Polifluoruro de Vinilideno, Información sobre el material* [online]. Disponible en: www.goodfellow.com/S/Polifluoruro-de-Vinilideno.html.

[4] Martín A. Salazar, Fabio A. Guarnieri, *Análisis y Evaluación del Comportamiento de Sensores Piezoeléctricos, Mecánica Computacional Vol. XXIX*, Asociación Argentina de Mecánica Computacional, 2010, pp. 6665-6684.

[5] Ravinder S. Dahiya, Maurizio Valle, “*Appendix A: Fundamentals of Piezoelectricity*”. In *Robotic Tactile Sensing, Technologies and System*, Springer, Center for Materials and Microsystems Fondazione Bruno Kessler, Trento, Italy, 2013, pp. 125- 210.

[6] O. Martínez Graullera. (2000). *Arrays de Anillos Segmentados para la generación de imagen ultrasónica 3D* (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

[7] Gregorio Godoy Vilches. (2004). *Metodología de diseño de arrays bidimensionales de geometría anular para la generación de imagen ultrasónica volumétrica* (Tesis Doctoral). Universidad de Jaén, España.

[8] Rodolfo J. Petrearse Hernández. (2013). *Modelación y simulación mediante elemento finito de un transductor de PVDF* (Tesis para obtener el grado de Ing. Eléctrico- Electrónico). UNAM, Ciudad de México.

[9] Angeles Rael Antonio, *Línea del tiempo del ultrasonido* [online]. Disponible en: es.slideshare.net/mpd16/lnea-del-tiempo-del-ultrasonido.

[10] Francisco Gutiérrez Melero, *Principios de piezoelectricidad, Innovación y experiencias educativas*, Revista Educativa, Jaén, España, 2010.

[11] Morgan Advanced Materials, *Titanato Zirconato de Plomo (PZT)* [online]. Disponible en: www.morgantechnicalceramics.com/materials/lead-zirconate-titanate-pzt.

[12] Ayuda Electrónica, *Materiales Piezoeléctricos* [online]. Disponible en: ayudaelectronica.com/materiales-piezoeléctricos.

[13] Patricia Ordóñez Cebrián. (2011). *Estudio del comportamiento de una cerámica piezoeléctrica mediante elementos finitos*. (Tesis de Master en Ingeniería acústica). Universidad Politécnica de Valencia. Gandía, España.

[14] La guía, Acústica, *Descripción de la onda Sonora*, [online]. Disponible en: fisica.laguia2000.com/acustica/descripcion-de-la-onda-sonora.

[15] Francisco J. García Castillo, Capitulo 4. *Características del Sonido*, Trabajo de Graduación.

[16] Propiedades acústicas, *Conceptos Fundamentales*. [Online]. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TemaII.2.4.ACUSTICAS.pdf>.

[17] Proachema Myanyang, *PVDF Piezoelectric Films*. [Online]. Disponible en: <http://www.myprochema.com/pvdf-piezoelectric-films.htm>.

[18] *Transductores de Ultrasonido PZT-4/ PZT-8*, UCE Ultrasonic co., Ltd. [Online]. Disponible en: <http://www.ultra-piezo.com/2011/0717/728.html>.

[19] *¿Cómo funcionan los tacómetros?*, eHow en Español. [Online]. Disponible en: http://www.ehowenespanol.com/funcionan-tacometros-como_112551/.

[20] J. S. HARRISON AND Z. OUNAIE, *Piezoelectric Polymer*, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, 2001.

[21] Carlos RUBIO, Obdulio MARRERO. *The Open Access NDT Database, Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI); Querétaro, México.*

[22] *Tecnología de Transductores Multi-Elemento con Arreglos en Fase* [Online]. Disponible en: <http://www.geocities.ws/pndmx/PAT.html>.

[23] *Catálogo de transductores de Arreglo de Fase*, ILOG S.A. DE C.V., [Online]. Disponible en: http://www.llogsa.mx/descarga/files_catalogo/transductor/Cat_Transductores_Arreglo.pdf.

[24] María Rocío Peña Maestre, *Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico focalizado* (Tesis para obtener el grado de Ing. En Sistemas de Telecomunicación, sonido e Imagen), Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Gandía, Gandía, España, 20014.

[25] *Fundamentos de la tecnología Piezoeléctrica* [Online]. Disponible en: <https://www.piceramic.com/en/piezo-technology/fundamentals/#c10760>.

[26] Piezo technology. Piezoelectric Ceramic Products, *Fundamentals*, Characteristics and applications, 2014, pp. 11-12.

[27] Propiedades Acústicas, *Conceptos Fundamentales, Sonido*. [Online]. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TemaII.2.4.ACUSTICAS.pdf>.

[28] Rafael Vela Cabello, *Caracterización de la Respuesta Piezoeléctrica de Compuestos Basados en PVDF – BaTiO₃* (Proyecto Final de Carrera) Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.

[29] Patricia Ordóñez Cebrián, *Estudio del Comportamiento de una Cerámica Piezoeléctrica mediante elementos finitos*, (Tesis de Máster), Gandía, España, 2011.

[30] José María Escribano, *Sección III Imagen por Ultrasonidos*, Hospital Universitario Vall d'Hebró.

[31] Innovacion Non Destructive Testing Service and Training NDT Level III, Ultrasonic Testing Level1. Capítulo 4, *Teoría y operación de Transductores*. [Online] Disponible en: <http://www.ndtelearning.com/ut-li-cap-4.html>.

[32] Montserrat Padilla Romero, *Conformación de haces ultrasónicos mediante muestreo selectivo con codificación delta* (Tesis Doctoral), Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004.

[33] Jorge Camacho Sosa Días, *Imagen Ultrasónica por coherencia de fase* (Tesis Doctoral), Universidad Computense de Madrid, España, 2011.