

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
DE UNA CERÁMICA
PIEZOELÉCTRICA MEDIANTE
ELEMENTOS FINITOS**

TESIS DE MASTER

Autor:

Patricia Ordóñez Cebrián

Director/es:

D.Francisco Camarena Femenía

D.Rubén Picó Vila

GANDÍA, 5 de Septiembre de 2011

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNA CERÁMICA PIEZOELÉCTRICA MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Autor: Patricia Ordóñez Cebrián

Director1: Francisco Camarena Femenía

Director2: Rubén Picó Vila

Resumen.- El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de una cerámica piezoeléctrica mediante su simulación con el método de elementos finitos. En primer lugar, se realizará una medida experimental de una cerámica cuadrada donde se extraerán diferentes parámetros: admitancia eléctrica, impedancia eléctrica y capacitancia. A partir de ahí, se realizarán diferentes comparativas con las distintas simulaciones generadas mediante elementos finitos. Primero, se simulará la cerámica cuadrada para validar el modelo de simulación y a partir de ahí, se introducirán las siguientes modificaciones: Cambio de geometría (simulación cerámica circular y cerámica en forma de anillo circular), cambio de espesor de la cerámica y cambio en el medio de propagación. Por último se modelará un transductor tipo Langevin al completo, mediante la adición de materiales, para observar las diferencias en su comportamiento con respecto al comportamiento individual de la cerámica.

Abstract. - The aim of this paper is to analyze the behavior of a piezoelectric ceramic by the simulation with the finite element method. First, there will be an experimental measurement of a square ceramic will be extracted parameters: electrical admittance, electrical impedance and capacitance. From there, there will be different with different comparative generated by finite element simulations. First, square ceramic is simulated to validate the simulation model and from there, with the following modifications: Changing geometry (ceramic circular simulation and ring-shaped circular ceramic), change the thickness of the ceramic and change propagation medium. Finally, we modeled a Langevin type transducer, by adding material to observe differences in behavior with respect to the individual behavior of the ceramic

ÍNDICE

I. Objetivos	5
II. Introducción	6
II.1. Ultrasonidos.....	6
II.1.1 Antecedentes Históricos.....	6
II. 1.2 Conceptos generales.....	7
II. 1.2.1 Características de los ultrasonidos.....	7
II. 1.2.2 Efectos de los ultrasonidos.....	9
II.2. Piezoelectricidad.....	10
II.2.1. Introducción teórica.....	10
II.2.2. Ecuaciones Piezoeléctricas y parámetros.....	11
II.3 Transductor Langevin.....	13
III. Método de Elementos Finitos	15
III.1. Conceptos generales.....	15
III.2. Consideraciones del método. Ventajas y Limitaciones.....	16
III.3. Paquete informático: PzFlex.....	17
IV. Datos experimentales	18
IV.1. Características y proceso de medida.....	18
IV.2. Resultados experimentales.....	19
V. Modelo y resultados de la simulación numérica	21
V.1. Características físicas de la cerámica piezoeléctrica.....	21
V.1.1. Modelo en PzFlex.....	21
V.1.2. Modelo en 3D.....	26
V.1.3. Resultados.....	27
V.2. Modificación de geometría y espesor.....	30
V.2.1. Disco cerámico.....	31
V.2.1.1. Modelo en PzFlex.....	31
V.2.1.2. Resultados.....	32
V.2.2. Anillo cerámico.....	36
V.2.2.1. Modelo en PzFlex.....	36
V.2.2.2. Resultados.....	36
V.3. Propagación de los ultrasonidos en el medio.....	40
V.3.1. Modelo en PzFlex.....	40
V.3.2. Extrapolación de Kirchhoff.....	41
V.3.3. Resultados.....	42
V.4. Adición de materiales. Transductor Langevin.....	44
V.4.1. Modelo en PzFlex.....	44
V.4.2. Resultados.....	46
VI. Conclusiones	50
VI.1. Conclusiones.....	50
VI.2. Líneas futuras.....	51

Agradecimientos	51
Referencias	52
Anexos	54
Anexo 1. Análisis realizado mediante Comsol Multiphysics.....	54
Anexo 2. Código PzFlex de todas las funciones que conforman el modelado....	59

I. OBJETIVOS:

Las cerámicas piezoeléctricas se han convertido en un material de gran importancia al representar el elemento principal en la mayoría de dispositivos y transductores ultrasónicos. Su principal función es convertir la energía eléctrica, en energía mecánica. Aunque hay otros grupos de materiales que pueden desempeñar la misma función, como los cristales de cuarzo, hidrosolubles, polímeros etc., la cerámica es la que aporta mayor flexibilidad de diseño y, además, gracias a sus propiedades físicas, presenta los mayores factores de conversión electromecánica, así como las características más favorables para la transducción de potencia. Desde su primera utilización se han producido grandes avances tecnológicos en diversos sectores industriales como por ejemplo imagen médica, limpieza ultrasónica, ensayos no destructivos etc.

Por otro lado, el método de análisis de “Elementos Finitos” es un procedimiento que permite realizar modelos geométricos, de gran complejidad, para analizar su comportamiento mediante simulación numérica, en circunstancias similares a las condiciones reales.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de una cerámica piezoeléctrica mediante su simulación con el método de elementos finitos. Para ello, se utilizará una muestra rectangular con la que se obtendrá datos experimentales de diferentes parámetros como: admitancia e impedancia eléctrica y capacitancia. Una vez extraídos estos datos, se realizarán diferentes simulaciones con distintas modificaciones y se compararán los resultados. En primer lugar, se simulará la muestra rectangular con el fin de validar el modelo y obtener una base para el resto de simulaciones. En segundo lugar, se analizará el comportamiento de la cerámica al cambiar de geometría (cerámica circular y cerámica en forma de anillo circular). En tercer y cuarto lugar se realizará un cambio en el espesor de la cerámica y en el medio de propagación en el que se encuentra ésta, respectivamente. En último lugar, se modelará un transductor tipo Langevin al completo, mediante la adición de materiales, para observar las diferencias en su comportamiento con respecto al comportamiento individual de la cerámica.

II. INTRODUCCIÓN

II. 1 *ULTRASONIDOS*

II.1.1 *Antecedentes Históricos*

El desarrollo de los ultrasonidos realmente empezó con la creación de transductores subacuáticos, para la detección de submarinos enemigos, durante la I Guerra Mundial. En cambio, su descubrimiento se remonta al siglo 18. El sacerdote y psicólogo italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799), fue el primero en advertir que alrededor de nosotros existían sonidos incapaces de detectarse por el oído humano [1]. Fue en el 1794 cuando corroboró sus ideas mediante un experimento con murciélagos, donde certificó que no sólo estos animales oían los sonidos inaudibles, sino que en vez de la vista, se guiaban de su oído para captar objetos en el aire y poderse moverse sin ningún tipo de colisión. Más adelante, se supo que los murciélagos emiten ondas con la laringe, que chocan con los objetos y retornan en forma de ecos que son captados por el oído e interpretados por el cerebro. Mediante este mecanismo, los murciélagos pueden conocer la distancia, orientación y forma del objeto. Esta forma de orientación es conocida en la actualidad como eco-localización y es particular de los murciélagos, los cetáceos y una sola especie de ave.

En el 1881 Pierre Curie, físico francés descubrió junto a su hermano Jacques Curie, que algunos tipos de cristales reaccionaban con un determinado potencial eléctrico cuando una tensión mecánica se ejercía sobre ellos [2]. Este comportamiento se conoce como el efecto piezoeléctrico. Posteriormente, ambos hermanos demostraron el efecto contrario: que los cristales se podían deformar cuando se sometían a un potencial. Este avance científico fue el que señaló el principio para la creación de lo que se conoce en la actualidad como el transductor de ultrasonidos. Años más tarde y tras el hundimiento del Titanic en 1912, Paul Langevin, físico francés, inventó el primer eco localizador para detectar icebergs. El hidrófono que así se llamaba, fue el primer transductor de ultrasonidos. Un aparato capaz de enviar y recibir ondas de alta frecuencia. Más tarde, fue usado para la detección de submarinos enemigos en la I Guerra Mundial (SONAR: Sound Navigation and ranging). Gracias a Langevin, el denominado padre de los ultrasonidos se dio el mayor paso en la historia de los ultrasonidos.

A finales de 1930, tenían lugar otros avances, esta vez en el sector de la medicina, gracias al Dr. Karl Dussik, un psiquiatra austriaco, que utilizó imágenes de ultrasonido en un intento de diagnosticar los tumores cerebrales. El procedimiento se llamaba "hyperphonography". En él, se utilizaba papel sensible al calor para registrar ecos. Es aquí donde las imágenes por ultrasonido tienen su inicio. En la década de 1940, el Dr. George Ludwig, Universidad de Pennsylvania, fue el primero en registrar y estudiar los

cambios que se producían en las ondas sonoras al viajar a través de los diferentes tejidos del cuerpo humano: órganos, músculos, etc.

A partir de ahí y hasta la actualidad se han hecho importantes avances tales como la creación de dispositivos para seguir el desarrollo fetal, escáner B-mode para observar el embarazo gemelar, aparatos para la detección de distintos tipos de cáncer etc. Cada día son más las personas interesadas en este campo de investigación, aportando su conocimiento ya sea en el ámbito médico, como en el de la eco localización, detección de imperfecciones en materiales, etc.

II.1.2 CONCEPTOS GENERALES

II.1.2 .1. Características de los ultrasonidos

El sonido es un fenómeno ondulatorio de naturaleza mecánica. Las variaciones de presión producidas se propagan en un medio elástico, no produciéndose así en el vacío.

El sonido se clasifica en diferentes rangos, teniendo como umbral el rango audible por los seres humanos que va desde los 20Hz a 20KHz aproximadamente. Por debajo de este rango, nos encontramos los infrasonidos que van desde los 0 a 20Hz y por encima, a partir de los 20Khz se encuentran los ultrasonidos.

Por lo tanto los parámetros que definen las ondas sonoras son los mismos que los ultrasonidos y son los siguientes:

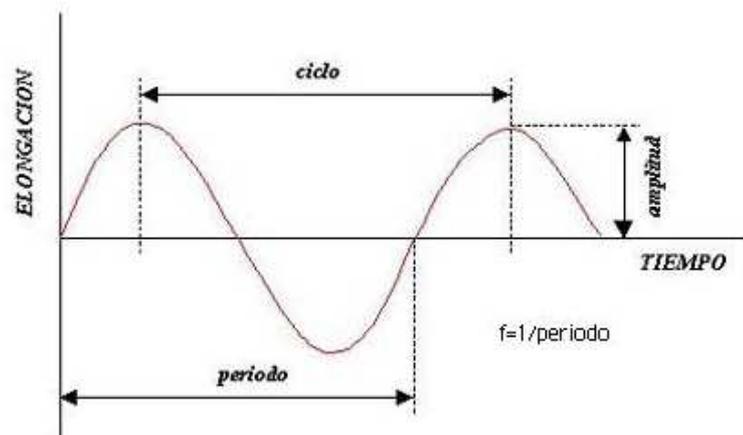


Fig.1. Parámetros de una onda sonora

- Frecuencia: Numero de ciclos completados por la onda por segundo. Su unidad en el sistema internacional es el Hertzio (Hz). Si realizamos la inversa obtenemos el periodo de la señal medido en segundos (s).
- Longitud de onda: Distancia entre dos puntos de la onda que presentan el mismo estado de vibración. Su unidad internacional es el metro (m).
- Velocidad: La velocidad acústica es el cociente entre la longitud de onda y el periodo de la señal. Se denomina velocidad de propagación y depende del medio material en el que se encuentre.
- Amplitud: Máximo desplazamiento de la partícula desde la posición de equilibrio.
- Presión Acústica: Fuerza por unidad de superficie existente en diversas zonas del material.
- Energía, Potencia e Intensidad: El haz sonoro transporta una determinada cantidad de energía producida por el transductor, si la consideramos por unidad de tiempo, es lo que se conoce como potencia. La unidad de potencia es el vatio (W). Dividiendo la potencia por la superficie del haz, obtenemos la *intensidad* (W/cm²). Esta última característica es de gran importancia en lo que se refiere al campo de los ultrasonidos. Así pues, para saber la cantidad de ultrasonidos que están llegando en cada momento a una zona, deberemos referirnos a la intensidad o densidad de potencia.
- Impedancia acústica: Característica del medio que atraviesa la onda. Relaciona la velocidad que la partícula adquiere en el momento de su vibración y la presión a la que está sometida. La impedancia da idea de la facilidad que un determinado medio ofrece al paso de las ondas sonoras a su través. 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 ($Z = \rho V$). 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.
- Atenuación: El haz de ultrasonidos va perdiendo intensidad conforme va avanzando por los tejidos. Esta pérdida por unidad de longitud se denomina *atenuación* [3]. La atenuación se produce por diferentes factores, desde la propia absorción de ultrasonidos por el medio, hasta las diversas reflexiones que puedan producirse por una inhomogeneidad del medio. También se producen dispersiones y pérdidas de dirección por refracción que lo hacen ineficaz a efectos terapéuticos. 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.

II. 1.2.2 *Efectos de los ultrasonidos*

Los efectos que pueden producir las ondas ultrasónicas se pueden dividir en tres categorías: físicos, químicos y médicos.

- **EFFECTOS FÍSICOS:** La cavitación es el efecto físico más importante. Este fenómeno se produce en los líquidos y su causa no es únicamente el ultrasonido. Cuando una onda presenta grandes amplitudes produce variaciones de presión a su paso. Si dentro de un líquido, la presión de este, se sitúa debajo de su punto de tensión de vapor, el líquido comienza a convertirse en gaseoso generando burbujas de vapor. Estas burbujas viajan a regiones de mayor presión y temperatura, pudiendo alcanzar valores, de presión y temperatura, de alrededor de 700MPa y 5000°C y pudiendo destruir superficies, tuberías etc. La cavitación depende de muchos parámetros como la frecuencia, viscosidad del medio, la presión externa y la intensidad. De ellos, depende la potencia en que se ocasione la cavitación o en qué condiciones se genere. Por ejemplo, a mayor frecuencia, menos tiempo tiene la burbuja para generarse y por lo tanto menor efecto tendrá la cavitación. En cambio, si aumentamos la presión externa, la colisión entre las burbujas se producirá con mayor violencia. Este fenómeno debemos de tenerlo en cuenta además de por su extremada peligrosidad, por las aplicaciones de gran interés que nos aporta, como es la "Súper-Cavitación", consistente en que los proyectiles lanzados por un submarino viajen dentro de una burbuja de aire consiguiendo mayor velocidad, ó la limpieza ultrasónica de maquinas diversas (motores de coches, hélices de aviones...) e incluso operaciones medicas como por ejemplo la liposucción.
- **EFFECTOS QUÍMICOS:** Todos los efectos están relacionados entre sí. Así, la cavitación también genera un efecto químico, ya que al generarse las burbujas se crean, entre las cavidades del medio, cargas eléctricas iguales y opuestas en extremos contrarios, el llamado efecto electrolítico.
- **EFFECTOS MÉDICOS:** Es innumerable la cantidad de aplicaciones que se han desarrollado gracias a los ultrasonidos y que han servido durante estos años para facilitar y mejorar los procesos médicos y los resultados dependientes de ellos. En este apartado se destacan dos de ellos:

- Imagen médica: Basada en los fenómenos de reflexión, que permiten generar una imagen y localizar variaciones en los tejidos internos del cuerpo permitiendo por ejemplo el control del feto durante el embarazo o tumores en determinados órganos del cuerpo. Aquí, deberemos tener en cuenta la atenuación que se produce en el haz ultrasónico al atravesar distintos medios con diferentes impedancias acústicas y establecer un compromiso entre la resolución de la imagen y dicha atenuación, ya que a más frecuencia se distinguirán mejor esas variaciones u objetos pero la onda sufrirá un mayor atenuamiento.
- Terapia: Gracias a los ultrasonidos también se puede tratar, o mejor dicho destruir, cálculos que se forman en el riñón, la vejiga o la vesícula biliar. también se usan otra técnicas que se basan en la aplicación de haces ultrasónicos, en determinadas zonas del cuerpo, para tratar problemas de tendinitis cuando existen calcificaciones.

II.2. PIEZOELECTRICIDAD

II.2.1. Introducción

En el año 1881, los hermanos Curie, científicos franceses de la Universidad de París, descubrieron un fenómeno que en la actualidad se considera de gran importancia. A través de experimentos con cristales de cuarzo, vieron que si una deformación era aplicada a uno de ellos, daba como resultado un potencial eléctrico en la superficie de sus caras. A este fenómeno lo llamaron piezoelectricidad (Piezo significa presión) [3]. Aproximadamente un año más tarde, descubrieron que el efecto era recíproco, ya que si un cristal de cuarzo era sometido a un determinado potencial eléctrico se generaba una deformación mecánica. Además constataron que este efecto era normalmente reversible y al dejar de someter a los cristales a un determinado campo eléctrico recuperaban su forma original.

Los materiales que poseen esta propiedad, es decir, los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría [4]. Estos materiales, están constituidos de moléculas que pueden ser polares o no polares, y que están alineadas en lo que se conoce como dominios. Así, el material presenta un momento dipolar distinto de cero y permanente. Son lo que podría decir el equivalente eléctrico de un imán. El fenómeno piezoeléctrico se debe a que el momento dipolar del que se habla, está completamente unido a la estructura física del elemento. Por tanto, si se aplica una deformación mecánica adecuada se altera el momento resultante.

II.2.2. Ecuaciones Piezoeléctricas y parámetros

Las ecuaciones que se presentan, relacionan las tensiones y deformaciones existentes en el material cuando se produce el fenómeno piezoeléctrico.

$$\begin{array}{l} \text{Ecuación piezo Inversa} \\ \sigma = -eE \end{array} \quad (1)$$

$$\begin{array}{l} \text{Ecuación Piezo Directa} \\ D = eS \end{array} \quad (2)$$

Donde

D= desplazamiento Eléctrico [**C/m²**]

e= constante piezoeléctrico [N/Vm]

S= deformación unitaria

E= campo eléctrico [N/C]

σ = Tensión unitaria

La primera ecuación (Efecto Piezo Inverso) explica que cuando se dispone por ejemplo de un disco, ya sea un cristal de cuarzo o una cerámica piezoeléctrica, y se aplica un potencial eléctrico en las superficies del mismo, se produce un campo eléctrico E, que a su vez es proporcional a una tensión unitaria dentro del disco. La constante de proporcionalidad que une a estas dos variables, es la constante piezoeléctrica e (N/Vm). Esta ecuación es válida sólo si se considera que la cerámica permanece amarrada, es decir, que su espesor se mantiene constante y no se ve afectado por el campo eléctrico[5].

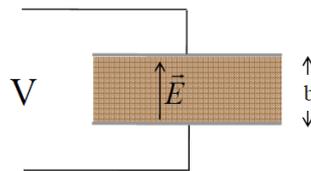


Fig.2. Esquema del efecto Piezo Inverso

Por otro lado el efecto piezoeléctrico directo se observa cuando el mismo disco es deformado por fuerzas externas. Esta deformación, representada por S, que se corresponde con la deformación unitaria, está acompañada por una polarización dieléctrica del material representado en la ecuación por el desplazamiento eléctrico. Esta ecuación, es válida sólo si el

disco esta eléctricamente cortocircuitado y el desplazamiento eléctrico es debido a las fuerzas de deformación.

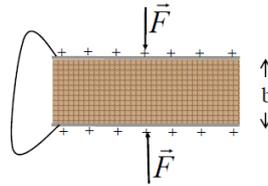


Fig.3. Esquema del efecto Piezo Directo

La constante piezoeléctrica, e , se puede intercambiar por el módulo piezoeléctrico d (m/V) y reescribir las ecuaciones del efecto piezoeléctrico de la siguiente forma:

$$S = -dE \quad (3)$$

$$D = d\sigma \quad (4)$$

Una vez definido de forma sencilla las relaciones existentes entre deformaciones y tensiones, si se tiene en cuenta todos los factores que influyen en el proceso piezoeléctrico, como es el campo eléctrico, las ecuaciones constitutivas finales quedan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \{S\} &= [s^E] \{T\} + [d^t] \{E\} \\ \{D\} &= [d] \{T\} + [\epsilon^t] \{E\} \end{aligned} \quad (5)$$

Otra consideración que se debe realizar y que es de gran importancia para entender el comportamiento de una cerámica real, es que el campo eléctrico, no sólo se relaciona con las tensiones y deformaciones normales en la dirección del mismo, sino también con las tensiones y deformaciones de las direcciones perpendiculares. Además, sobre un cuerpo se pueden aplicar muchos más esfuerzos que los tres pertenecientes a cada eje. Esto da lugar a una matriz de esfuerzos 3X3 en la que sólo 6 componentes son independientes:

$$[\sigma] = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}, \quad \begin{aligned} \sigma_{xy} &= \sigma_{yx} \\ \sigma_{xz} &= \sigma_{zx} \\ \sigma_{yz} &= \sigma_{zy} \end{aligned} \quad (6)$$

Por lo tanto se deberán relacionar los tres campos eléctricos con las tres coordenadas en las que se puede obtener movimiento. Esta relación es la siguiente:

Tensión y deformación	Campo eléctrico
xx=1 yz=4	x=1
yy=2 zx=5	y=2
zz=3 xy=6	z=3

Con esta simplificación y para describir de forma general la ecuación de la piezoelectricidad necesitaremos 18 constantes piezoeléctricas.

Ecuación Piezo Inversa

(Tensión –carga)

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{24} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Ecuación Piezo Directa

(Deformación –carga)

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

II.3 TRANSDUCTOR LANGEVIN

El transductor de tipo Langevin o también denominado transductor "sándwich" es el transductor piezoeléctrico más característico utilizado en aplicaciones de potencia.

Este diseño se obtuvo al intentar generar transductores que trabajaran en rangos de baja frecuencia para producir cavitación. En un principio se utilizaron bloques cerámicos, pero la baja resistencia a la tensión de las cerámicas y las dimensiones necesarias para que vibraran a baja frecuencia los hicieron imprácticos. A partir de ahí, se decidió realizar un modelo de transductor basándose en el diseño de Langevin realizado para el cuarzo. Este diseño, consta de una estructura formada por dos anillos cerámicos de mismo espesor dispuestos entre dos cilindros metálicos, formando una estructura que vibra extensionalmente a media longitud de onda. Esta estructura, queda fijada a través de un tornillo que aumenta la resistencia a la tensión de las cerámicas y permite trabajar a los distintos materiales como si fueran uno.

Cada una de las partes que conforman el modelo presenta una funcionalidad determinada dentro del conjunto [7]. Así, se puede dividir el transductor en:

- Elemento Activo: Anillos cerámicos que convierten la energía eléctrica en energía ultrasónica.

- Backing o Apoyo: Cilindro metálico posicionado en la parte trasera del elemento activo. El material del cilindro suele ser normalmente acero, el cual posee una alta densidad y actúa como un gran atenuador capaz de controlar las vibraciones del

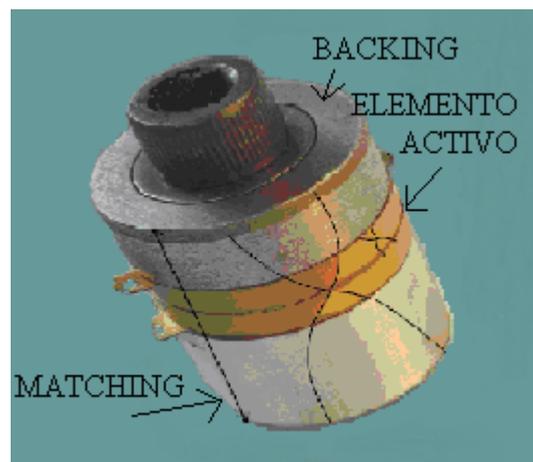


Fig.4. Transductor de Langevin

transductor, absorbiendo la energía que se produce en la parte trasera del elemento activo. De la adaptación de impedancias entre el backing y el elemento activo dependerá la resolución y la sensibilidad del transductor al completo.

- Matching o Placa Protectora: Cilindro metálico posicionado entre el elemento activo y el medio de transmisión cuya función es proteger a los anillos cerámicos del entorno y además servir de transformador acústico acoplando las impedancias acústicas del elemento activo y el medio. El espesor necesario para conseguir este efecto es de $1/4$ de la longitud de onda emitida. El material más común para este tipo de placa es el aluminio, con una impedancia

acústica de aproximadamente 1.7MRayls, situándose entre medio de los valores de impedancia de la cerámica (aprox. 2.8MRayls) y el agua (1.5MRayls).

Las dimensiones del backing y del matching se obtienen a partir de la ecuación de Langevin mostrada a continuación.

ECUACION DE LANGEVIN

$$\tan\left(\frac{\omega_s l_i}{v_i}\right) \cdot \tan\left(\frac{\omega_s l_c}{v_c}\right) = q_i$$

$i=1, 2$
 1= Head, aluminio
 2= Back, acero

$$q_i = \frac{\rho_{mc} v_c A_c}{\rho_{mi} v_i A_i} \quad (9)$$

l_c Espesor de cada cerámica
 l_i Espesor de medio "i"
 v_c Velocidad propagación en cerámica
 v_i Velocidad propagación en medio "i"
 ω_s frecuencia angular de resonancia

ρ_{mc} =Densidad de la cerámica
 ρ_{mi} =Densidad de la cerámica
 A_c =Área de la cerámica
 A_i =Área del medio

III. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica numérica que permite la resolución de problemas derivados de la física y de la ingeniería mediante su descripción en un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales [9]. El MEF realiza un modelo matemático que aporta una solución aproximada obtenida a partir del ensamblaje de las soluciones independientes de los elementos finitos.

III.1. CONCEPTOS GENERALES DEL MÉTODO

Los pasos a seguir ante cualquier proyecto de elementos finitos, independientemente del campo de aplicación, se pueden generalizar y son los siguientes:

PASO 1:

Definición del espacio geométrico. A este espacio se le denominará dominio y es donde se analiza el sistema. En este dominio se establece:

- Condiciones de contorno: Variables conocidas que condicionan al sistema a que actúe de una forma determinada
- Incógnitas: Variables del sistema que se desean obtener (desplazamientos, tensiones etc.)

PASO 2:

Discretización del dominio: Para resolver el problema, el método de elementos finitos individualiza el dominio en pequeños subdominios llamados elementos. Este proceso se denomina generación de malla.

Los elementos están formados por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre sí a todos los elementos.

PASO 3:

Cálculo de variables: Los nodos están caracterizados por un número finito de parámetros N , llamados grados de libertad. Cuando N tiende a infinito, las soluciones de los elementos finitos convergen a una solución que es independiente del modelado y que resuelve la incógnita buscada.

Las funciones utilizadas para el cálculo pueden ser ecuaciones lineales o polinomiales de alto orden dependiendo de la localización geométrica de los nodos. La resolución de estas ecuaciones se consigue a través de técnicas algebraicas lineales [11].

PASO 4:

Post-procesado: Interpretación de las variables (incógnitas) obtenidas a partir del análisis por elementos finitos. En esta paso, se testea si el diseño está respondiendo de una forma coherente y se puede considerar que el modelo es válido. Se establecerá una relación entre los cambios en las variables del diseño y los correspondientes cambios en el comportamiento del prototipo.

III.2. CONSIDERACIONES DEL MÉTODO. VENTAJAS Y LIMITACIONES

El MEF es un método aplicado a multitud de problemas de ingeniería. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en el proceso de creación del modelo matemático se introducen determinados errores que influirán en mayor o menor medida en el resultado final. Estos errores se dividen en: errores de modelado, de discretización y de solución.

Los errores de discretización son los únicos específicos del método y por tanto los únicos controlables. En cambio, los errores de modelado y de solución, afectan al modelo matemático [12]. El primero de ellos se introduce antes de usar MEF y el segundo será el resultado de los errores de redondeo acumulados por el módulo de cálculo.

Las ventajas y limitaciones del método son las siguientes:

VENTAJAS:

- Los fundamentos del método permiten realizar software de propósito general.
- No se requieren mallas estructuradas. Por ejemplo, al contrario que en el método de diferencias finitas, en el que los elementos deben distribuirse en filas y columnas de manera ortogonal, aquí cada elemento presenta una estructura independiente del resto.
- Tratamiento de geometrías complicadas
- Condiciones de contorno generales y no dependientes de cada elemento finito.

LIMITACIONES:

- El MEF calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, es decir, que el método no puede hacer un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer como variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente [12].
- El margen de error es desconocido. Aunque en algunos problemas se puede acotar en gran medida, en problemas no lineales o dependientes del tiempo no se puede llegar a conocer.
- La precisión del problema está ligado al refinado de la malla y por consiguiente al aumento del coste computacional

III.3. PAQUETE INFORMÁTICO: PZFLEX

En el presente trabajo se va a utilizar como programa de simulación para la creación de los modelos el software comercial PzFlex, de la empresa Weidlinger Associates Inc., USA.

PzFlex no es un software de propósito general, sino que está diseñado para la resolución de problemas ultrasónicos, piezoeléctricos y problemas de modelado térmico, lo que lo hace una herramienta muy útil para analizar el comportamiento de una cerámica piezoeléctrica. Se basa fundamentalmente en el análisis temporal, por lo que es adecuado para aplicaciones de banda ancha y propagación de ondas en un medio [13].

Las características principales del interface usado por PzFlex son:

- Entorno de simulación parecido al Visual C++ de programación. Ejecución de los programas de forma interactiva.

- Sistema de colores que alerta de la utilización de variables, funciones etc. Creación de un sistema jerárquico que permite una construcción del modelo de manera más sencilla.
- Capacidad del programa de mostrar gráficos, de forma simultánea, a la ejecución del análisis.
- Surtido de modelos plantilla, que permiten al usuario realizar modificaciones sobre ellos, sin tener que empezar desde cero.
- Integración CAD de modelado: PzFlex importa archivo STL desde el paquete de SolidWorks. Por otro lado, SolidWorks puede utilizar un filtro para importar otra clase de formatos, tales como Pro-E y el GID

IV. DATOS EXPERIMENTALES

IV.1. CARACTERÍSTICAS Y PROCESO DE MEDIDA

La muestra seleccionada para la medida en laboratorio presenta las siguientes características:

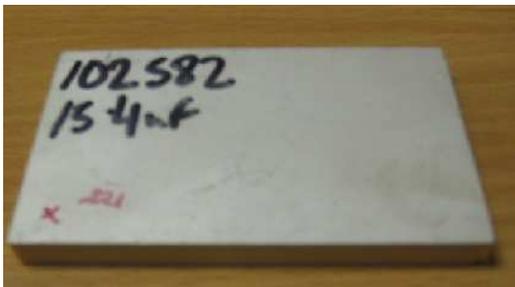


Fig.5. Muestra rectangular de la cerámica Pz29

Material	Pz 29
Geometría	Rectangular
Dimensiones	80 X 55 X 8 (mm)

Tabla .1. Características de la cerámica Pz29

Las especificaciones técnicas ofrecidas por el fabricante, empresa Ferroperm, son las mostradas a continuación:

Material Data For Standard Test Specimens								
Data are measured at 25°C and 24 hours after poling (Pz28 10 days after poling)								
	Symbol	Dimension	Pz28	Pz29	Pz34	Pz35	Pz46	
Electrical Properties								
Relative dielectric const. at 1 kHz	K_{33}	1	1000	2900	210	220	120	
Diell. dissipation factor at 1 kHz	$\tan \delta$	10^{-3}	4	19	14	6	4	
Curie temperature	T_c	°C	330	235	400	500	650	
Recommended working range	<	°C	230	150	150	200	550	
Electromechanical Properties								
Coupling factors								
	k_p	1	0.58	0.64	0.07		0.03	
	k_c	1	0.47	0.52	0.40	0.34	0.20	
	k_{31}	1	0.34	0.37	0.05		0.02	
	k_{32}	1	0.69	0.75	0.40		0.09	
Piezoelectric charge coefficients								
	$-d_{31}$	$10^{-12} C/N$	120	240	5		2	
	d_{32}	$10^{-12} C/N$	320	575	50	100	18	
	d_{15}	$10^{-12} C/N$	375	650	40	50	16	
Piezoelectric voltage coefficients								
	$-g_{31}$	$10^{-3} Vm/N$	13	10	3		2	
	g_{32}	$10^{-3} Vm/N$	34	23	25	43	17	
Frequency constants								
	N_p	Hz·m	2180	1970	2770		2470	
	N_c	Hz·m	2010	1960	2200	1550	2000	
	N_{31}	Hz·m		1410				
	N_{32}	Hz·m		1500				
Mechanical Properties								
Density								
	ρ	$10^3 kg/m^3$	7.70	7.45	7.55	5.60	6.55	
Elastic compliances								
	s_{11}^E	$10^{-12} m^2/N$	13	17	7		11	
	s_{33}^E	$10^{-12} m^2/N$	23	23	7		44	
	s_{11}^D	$10^{-12} m^2/N$	11	15	7		11	
	s_{33}^D	$10^{-12} m^2/N$	12	10	6		44	
Poisson's ratio								
	σ^E	1	0.31	0.34	0.22		0.21	
Mechanical Quality factor								
	Q_m	1	>1000	90	> 500	15 - 25	> 600	
Standard tolerances:			Electrical Properties ± 10 %					
			Electromechanical Properties ± 5 %					
			Mechanical Properties ± 2.5 % (Except for σ^E and Q_m)					

Fig.6. Hoja de especificaciones de las cerámicas Pz

Las mediciones experimentales se han llevado a cabo con un analizador de impedancias. Los pasos seguidos han sido:

1. Interconexión del analizador y la muestra rectangular
2. Aplicación de voltaje (V) en bornes de la cerámica
3. Barrido frecuencial, registrando los valores de corriente (I) a través de la muestra.

Los valores medidos quedan registrados en un software informático que de forma automática calcula las siguientes características físicas de la cerámica detalladas en la tabla 2:

CARACTERÍSTICA	ECUACIÓN	REPRESENTACIÓN
Admitancia	$Y = \frac{I}{V}$	- Angular (magnitud y fase) - Rectangular (real(G) e imaginaria(B)) (Siemens)
Impedancia	$Z = \frac{V}{I}$	- Angular (magnitud y fase) - Rectangular (real(R) e imaginaria(X)) (Ohmios)
Capacitancia	$C = \frac{B}{2 \cdot \pi \cdot f}$	- Amplitud (Faradios)

Tabla.2. Características físicas de la cerámica Pz29

Una vez ha finalizado el proceso se obtiene un archivo en formato .txt con toda la información, fácilmente manejable para su posterior comparación.

IV.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestran todas las gráficas obtenidas, a partir del analizador de impedancias, de las características físicas de la muestra rectangular pz29.

Estas son las siguientes:

1. Admitancia eléctrica de la cerámica. Parte Real e Imaginaria (Fig.7).

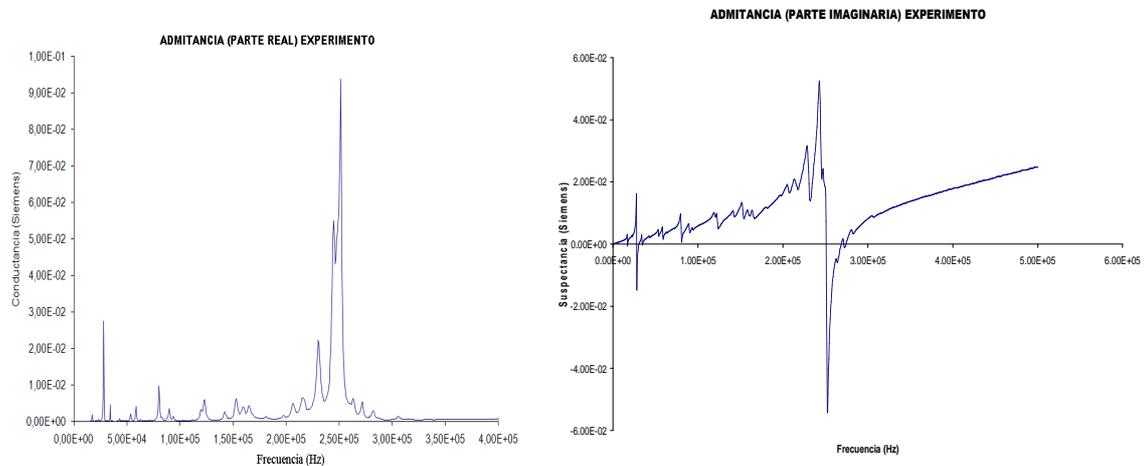


Fig.7. Admitancia eléctrica. Parte real e imaginaria respectivamente del primer modelo.

De esta gráfica se puede destacar los siguientes puntos:

- Frecuencia de resonancia a 251kHz. Es aquí donde se obtiene la mayor amplitud en la parte real de la admitancia (conductancia).
- Presencia de otros picos resonantes correspondientes a otros modos de vibración (modo radial, de cizalladura, etc.).
- Fluctuaciones en la parte imaginaria de la admitancia (susceptancia) debido a los demás modos vibracionales excitados, a parte del modo de resonancia en espesor.

2. Impedancia eléctrica

La impedancia eléctrica es la única variable que el software informático facilita tanto en forma angular, como en rectangular. La representación utilizada es la angular (magnitud y fase) (Fig.8), al ser esta la escogida en la mayoría de textos científicos.

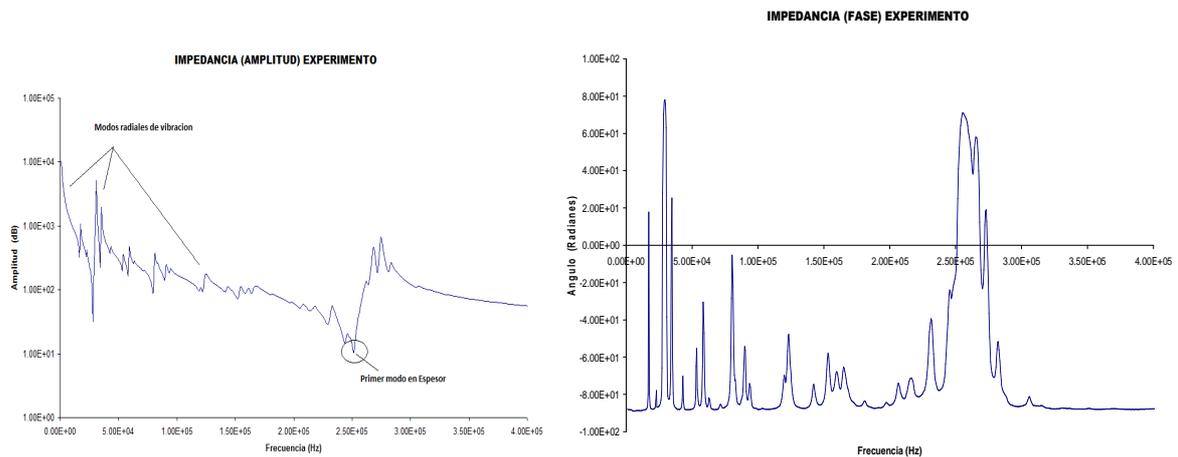


Fig.8. Impedancia eléctrica. Magnitud y fase respectivamente del primer modelo.

Las características a destacar son:

- Frecuencia de resonancia a 251kHz. En este caso se obtiene un mínimo en la magnitud de la impedancia. Esto es debido a que en esta frecuencia es donde existe la menor oposición al paso de corriente.
- Presencia de modos de vibración diferentes al modo en espesor. Menor definición de estos comparados con la gráfica de la parte real de la admitancia eléctrica.
- Gran influencia en la fase de la impedancia eléctrica, de los modos vibracionales, tanto a baja frecuencia (modos radiales), como en frecuencias próximas a la frecuencia de resonancia (modo de cizalladura).

3. Capacitancia eléctrica

La capacitancia de un dispositivo es la medida de la capacidad que tiene este para almacenar carga y energía potencial eléctrica. Será una variable de gran utilidad, para la creación de los circuitos electrónicos conectados a los transductores de ultrasonidos, ya sean transmisores o receptores. Desde el punto de vista práctico nos aportara información sobre si es factible manufacturar dicho transductor o cuanto voltaje se va a necesitar para excitar el transductor de

la forma correcta etc. La capacitancia depende proporcionalmente del área de la cerámica y de la constante dieléctrica e inversamente al espesor de esta.

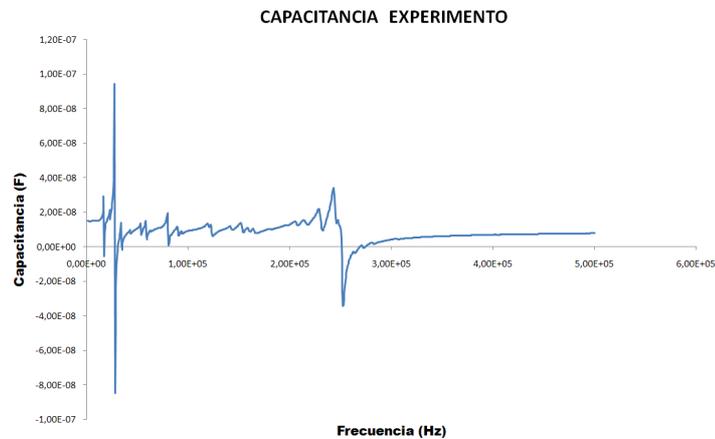


Fig.9. Capacitancia eléctrica del primar modelo

V. MODELO Y RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este apartado se detallan todos los modelos realizados y los resultados extraídos para caracterizar el comportamiento de la cerámica piezoeléctrica.

V.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CERÁMICA PIEZOELÉCTRICA

Este primer modelo, es el que establece si la simulación numérica realizada por el paquete informático PzFlex, es válida y por tanto, los resultados obtenidos son próximos a los datos experimentales, mencionados en el punto anterior.

Para realizar esta comparativa, se modela la muestra utilizada en el laboratorio con las mismas dimensiones y geometría.

En los siguientes subapartados se muestra por un lado, el proceso de modelado y por otro los resultados obtenidos.

V.1.1. Modelo en PzFlex

El proceso de modelado en PzFlex consta de los siguientes pasos:

1. Geometría del objeto
2. Definición del los materiales
3. Condiciones de contorno
4. Señal de excitación
5. Mallado
6. Condiciones eléctricas

A continuación se detallan cada uno de ellos.

1. Geometría del objeto

Lo primero que se ha de buscar, es la existencia de simetría. Identificar los planos de simetría existente y definir unas apropiadas condiciones de contorno va a reducir significativamente el coste computacional de nuestro modelo. PzFlex dispone de tres opciones a la hora de dibujar el modelo [14].

- Simetría axial: Rotación de la geometría respecto a un eje (X o Y) de 360°
- Plano de Simetría: El modelo se presenta infinitamente largo en la dirección z
- Modelo 3D: Geometría al completo sin aproximaciones a excepción de la simetría.

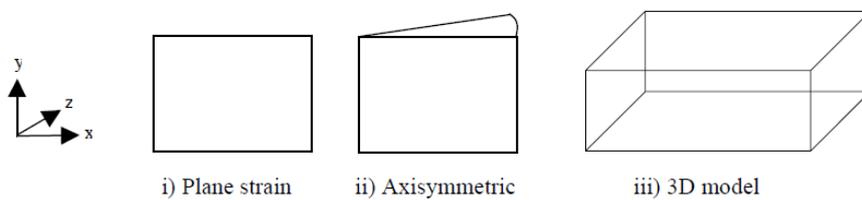


Fig.10. Ilustración de los varios tipos de geometría disponibles en PzFlex

En este caso, se utiliza la opción de plano de simetría, simplificando el cubo rectangular de (80x55x8mm) a un rectángulo en 2D con simetría en el eje X de dimensiones (40x8mm), e infinitamente largo en la dirección z. Esta simplificación se tendrá en cuenta cuando se definan las condiciones eléctricas del material.

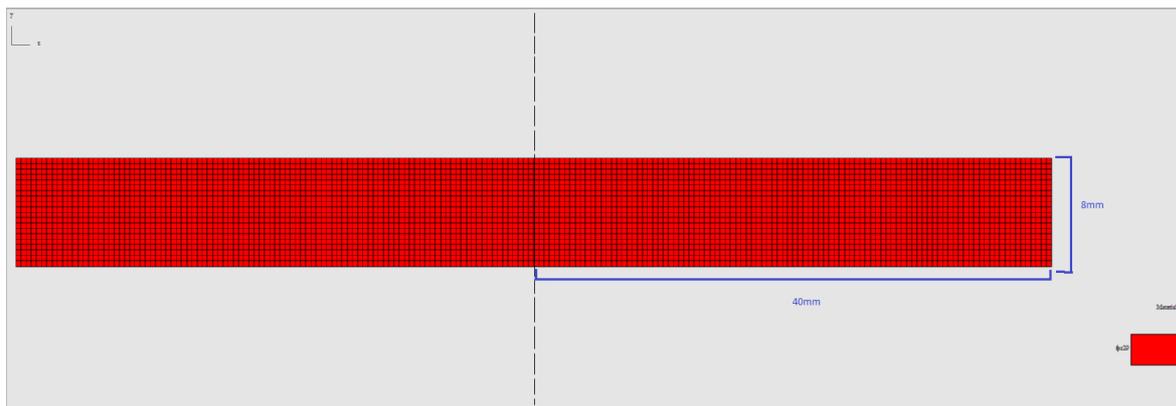


Fig.11. Representación del modelo generado en PzFlex con el plano de simetría aplicado

2. Definición de los materiales

PzFlex permite el análisis sobre dos tipos de materiales, isotrópicos y anisotrópicos. Las características descritas en cada uno de ellos son: La densidad, la velocidad longitudinal, transversal y la atenuación. Además ofrece una librería de materiales piezoeléctricos, que se pueden ampliar si se introducen todas las propiedades que el programa necesita.

Esta elección es uno de los puntos más delicados en la cadena de modelado y hay que tenerlo bastante en cuenta, sobre todo en la etapa de resultados.

En el presente proyecto se ha utilizado las medidas de las características realizadas en el laboratorio en lugar de escoger las especificaciones técnicas ofrecidas por el fabricante. Estos datos son los siguientes:

CONSTANTES DIELECTRICAS: Establecen una proporcionalidad entre el desplazamiento eléctrico y el campo eléctrico aplicado. Determinan la capacitancia de la cerámica piezoeléctrica, que a su vez es determinante en el cálculo y proyección de los circuitos adaptadores de impedancia.

$$k_{33} = 1340.$$

$$k_{11} = 1220.$$

DENSIDAD: Cantidad de masa contenida por unidad de volumen

$$\rho = 7460 \text{ kg/m}^3$$

FACTOR DE CALIDAD MECÁNICO: Es el que determina el rendimiento y el ancho de banda del material. Por ejemplo, si se desea hacer uso del material en aplicaciones de potencia se buscará un factor Q elevado que representa pocas pérdidas y menor ancho de banda. En cambio, si lo que se busca es sensibilidad, se necesitará un mayor ancho de banda obteniendo así un factor Q pequeño y unas pérdidas considerables. En las cerámicas piezoeléctricas las pérdidas dieléctricas no son muy elevadas mientras que en la construcción de un transductor real el factor de calidad mecánico se considera un parámetro determinante.

$$Q = 120.$$

CONSTANTES ELÁSTICAS Y DE RIGIDEZ: Establecen una proporcionalidad entre la deformación y la tensión aplicada.

$$c_{11} = 1.34e11 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$c_{33} = 1.09e11 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$c_{44} = 1.85e10 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$c_{12} = 0.897e11 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$c_{13} = 0.857e11 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

$$c_{66} = 2.20e10 \text{ (N/m}^2\text{)}$$

CONSTANTES PIEZOELÉCTRICAS: Establecen una proporcionalidad entre la generación de cargas y las tensiones mecánicas aplicadas:

$$e_{15} = 13.4 \text{ (N/Vm)}$$

$$e_{31} = -5.06 \text{ (N/Vm)}$$

$$e_{33} = 21.2 \text{ (N/Vm)}$$

3. Condiciones de contorno

PzFlex permite cuatro condiciones de contorno. Estas son las siguientes:

- Symm: Ningún movimiento a través del plano.
- Fixd: Posición fija de todos los nodos. No existencia de movimiento
- Absr: Las ondas incidentes son absorbidas
- Vel: Velocidad prescrita en el modelo

Si no se establece ningún tipo de condición, el programa pondrá por defecto condición de contorno libre.

Las condiciones de contorno son importantes por dos razones. La primera es que de su correcta definición, dependerá en gran parte la aproximación de nuestro modelo a la realidad y además a menudo es útil para poder simplificarlo. En este primer diseño, donde se tiene la cerámica en aire para observar su comportamiento mientras oscila libremente, se aplica la condición de contorno libre en todos los extremos excepto en el lateral izquierdo, el cual presenta condición de simetría.

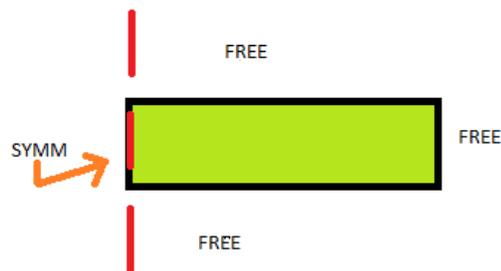


Fig.12. Esquema de las condiciones de contorno aplicadas en el primer modelo

4. Señal de excitación

PzFlex utiliza un resolovedor en el dominio temporal (análisis transitorio). El modelo se excita durante un determinado periodo, registrando toda la información en archivos en régimen

temporal. PzFlex dispone de herramientas como la transformada de Fourier que permiten la conversión de información entre el dominio temporal a frecuencial ó viceversa.

La señal de excitación en el modelo, será un ciclo de una señal senoidal a la frecuencia de resonancia del modo en espesor. Además, se debe asegurar que a los restantes modos vibracionales les llega suficiente energía para ser excitados.

5. Mallado

La frecuencia de resonancia en el modo en espesor, mencionada en el apartado anterior, también influye en el mallado del diseño, ya que con ella y con la velocidad mínima se obtiene la mínima longitud de onda y de ahí el tamaño de elemento siguiendo la siguiente relación.

$$\lambda = v / f \quad (10)$$

$$\text{Tamaño elemento de mallado} = \lambda / n^{\circ} \text{ elementos}$$

Siendo,

λ , longitud de onda

v , velocidad

f , frecuencia

Esta, es una forma de asegurarse que en la frecuencia de resonancia el modelo esta perfectamente mallado.

Los parámetros del modelo son;

$v = 4000$ m/s, velocidad de las ondas en la cerámica piezoeléctrica

$f = 250$ kHz, frecuencia de resonancia testada a través de los resultado experimentales

N° elementos = 50, la única condición es que tiene que se mayor que 20

$\lambda = 0.016$ m

Tamaño elemento de mallado = $3.2e-4$ m

6. Condiciones eléctricas

En PzFlex, para modelar de forma correcta los desplazamientos que ocurren en los materiales piezoeléctricos debido al campo eléctrico aplicado, es necesario hacer uso de un comando llamado “wndo” [15] que define los límites dónde se aplican las condiciones eléctricas. Éste, crea una ventana alrededor del material piezoeléctrico para realizar el cálculo electrostático. Esta ventana, sólo se debe aplicar donde el campo eléctrico tiene efecto, ya que

incrementa en gran medida el tiempo computacional. Una vez creada la ventana se tiene que definir la posición de los electrodos y por ultimo especificar el voltaje en ellos.

En el primer diseño, la ventana piezoeléctrica se aplica en todo el modelo, definiendo dos electrodos:

- Electrodo TOP: Parte superior de la cerámica, a lo largo de todo el eje X y con un potencial eléctrico de 1V.

- Electrodo BOT: Parte inferior de la cerámica, a lo largo de todo el eje X y conectado a tierra.

El esquema se muestra en la fig.12:

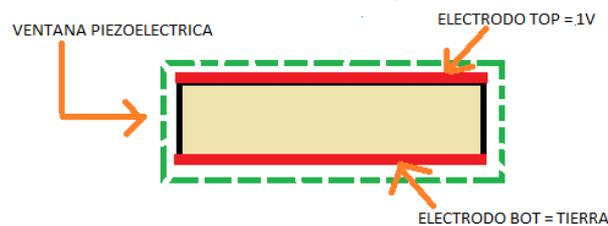


Fig.13. Esquema de las condiciones de eléctricas aplicadas en el primer modelo

Otro dato a tener en cuenta en este apartado es que al haber aplicado simetría en el eje X y al posicionar los electrodos en el mismo eje, se escala el valor del voltaje en un factor 2 para obtener un valor aproximado a la realidad, ya que el voltaje modelado sólo está aplicado en la mitad de la cerámica.

V.1.2. Modelo en 3D

En el apartado anterior se ha explicado el procedimiento de modelado en PzFlex para un diseño en 2D de una muestra rectangular. La creación de un diseño en 3D no es necesaria ya que, el modelo en 2D sólo simplifica el eje Z considerándolo infinito y al trabajar en el modo en espesor, esta simplificación no ejerce una gran influencia en el resultado final. Sin embargo, se ha generado un modelo en 3D para cerciorarse de que las desviaciones que se producen no son significativas. Las características son exactamente las mismas excepto por estas consideraciones:

1. Se añaden las coordenadas en el eje Z
2. No se escala el potencial eléctrico en los electrodos ya que se dispone del modelo al completo
3. Todas las condiciones de contorno son libres, al no existir ningún plano de simetría.

El diseño es el siguiente:

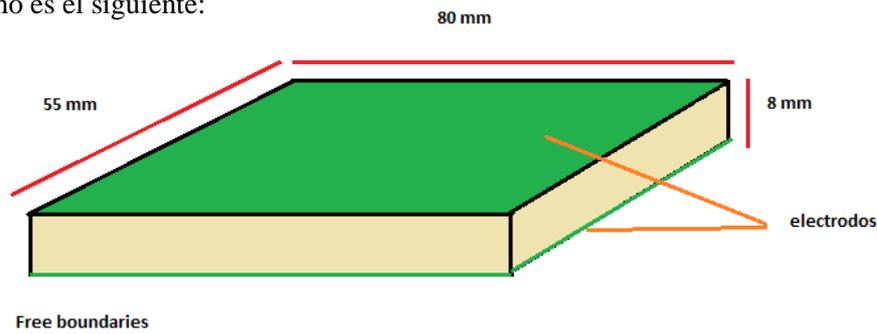


Fig.14. Representación del diseño 3D del primer modelo

V.1.3. Resultados

Las variables calculadas en PzFlex han sido:

1. Parte real de la admitancia eléctrica (conductancia). (Fig.15)
2. Magnitud de la impedancia eléctrica (Fig.16)
3. Capacitancia eléctrica (Fig.17)
4. Amplitud de desplazamiento en el eje Y (modo en espesor). (Fig.18)

Se ha necesitado de un programa de post-procesado auxiliar para calcular las dos primeras variables. La capacitancia se ha extraído de la parte imaginaria de la admitancia, siguiendo la ecuación mostrada en la tabla 2, mientras que la amplitud de desplazamiento se ha obtenido de manera directa a través de la introducción de un comando de PzFlex antes de comenzar la simulación.

Las gráficas obtenidas son las siguientes:

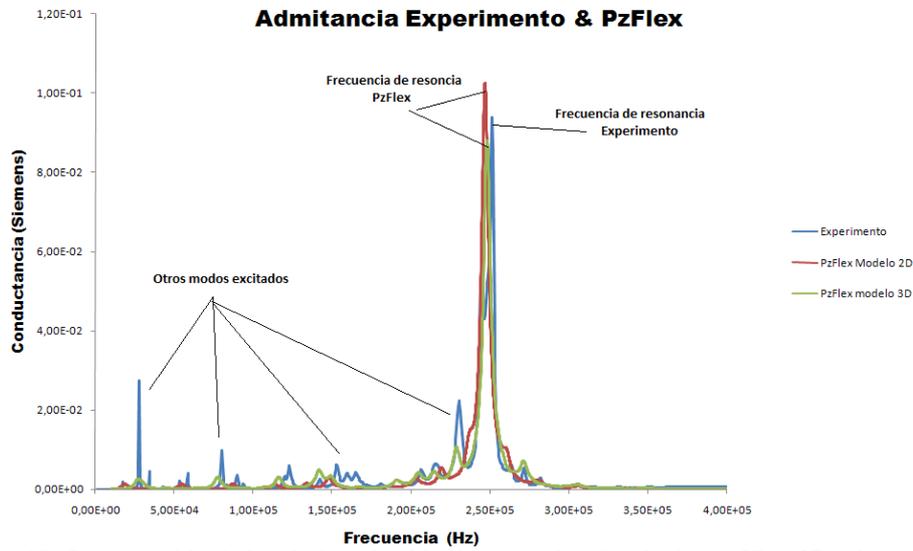


Fig.15. Comparación de la admittancia eléctrica entre las simulaciones 2D y 3D y las medidas experimentales. Representada la parte real (conductancia (Siemens)) en función de la frecuencia.

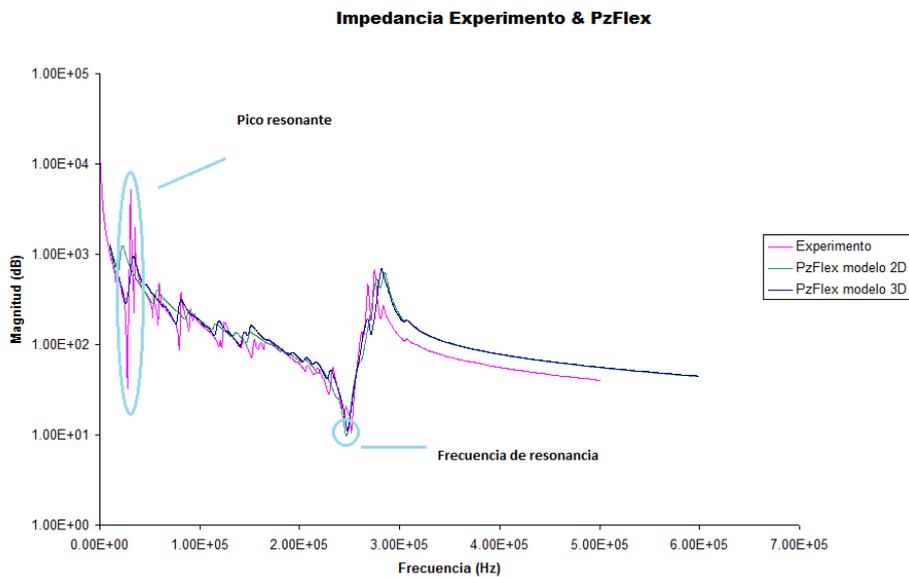


Fig.16. Comparación de la impedancia eléctrica entre las simulaciones 2D y 3D y las medidas experimentales. Representada la magnitud (dB) en función de la frecuencia

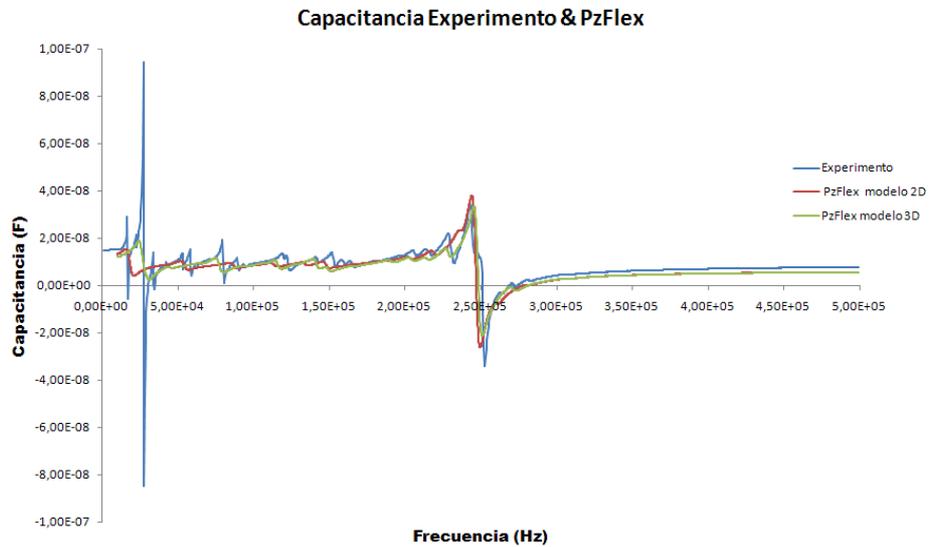


Fig.17. Comparación de la capacitancia eléctrica entre las simulaciones 2D y 3D y las medidas experimentales. Representada la amplitud (Faradios) en función de la frecuencia.

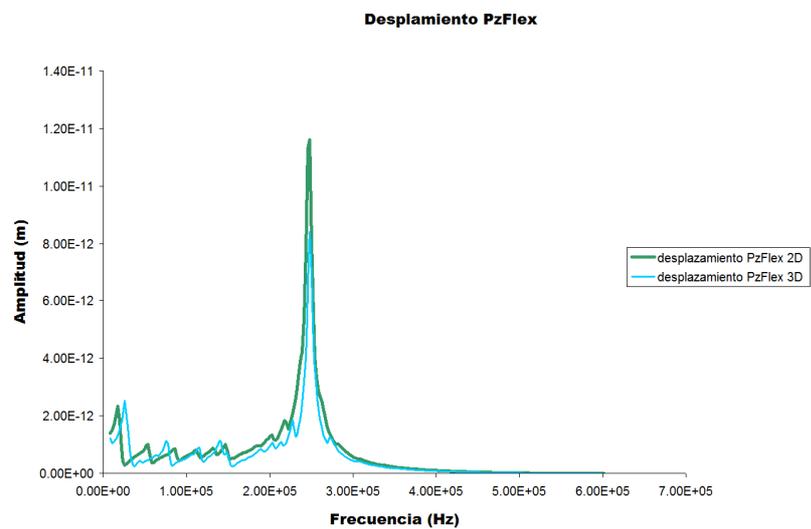


Fig.18. Comparación de la amplitud de desplazamiento (m) en el eje Y, entre las simulaciones 2D y 3D en función de la frecuencia

Los resultados extraídos a partir de ellas son:

1. Primera gráfica (Fig.15):

- a. La frecuencia de resonancia en ambas simulaciones se produce a 248kHz. Se obtiene una desviación del 0.8% respecto a los datos experimentales
- b. Los valores de conductancia son de $1.01e-1$ y $8.77e-2$ Siemens en 2D y 3D respectivamente. Es importante que estos valores se encuentren dentro de un rango próximo al valor real, pero su exactitud, dependerá de muchos factores como por ejemplo tener en cuenta que el programa actúa en condiciones ideales, que las propiedades de los materiales aunque estén medidas, pueden no ser completamente exactas y afectar a los resultados, las condiciones aplicadas en el modelo etc.
- c. En la simulación en 2D, los demás modos vibracionales quedan fuertemente atenuados haciéndose casi imperceptibles. Esto es debido a la simplificación efectuada en el modelo.
- d. En el modelo en 3D los modos, aunque mas atenuados que en el experimento, se ven reflejados en el resultado acercándose con gran exactitud al experimento en frecuencia.

2. Segunda gráfica (Fig.16)

- a. Frecuencia de resonancia a 248kHz. Se observa un mínimo en magnitud. Se produce la misma desviación en los modelos, que la que se producía en la admitancia eléctrica, al estar inversamente relacionadas
- b. Atenuación, en las simulaciones, de los picos resonantes a baja frecuencia, incluyendo el de mayor amplitud, a la frecuencia de 27kHz que se corresponde con el modo radial de vibración.

3. Tercera gráfica (Fig. 17)

Forma de onda mas suavizada en los modelos en 2D y 3D al estar los distintos modos vibracionales mas atenuados que en los datos experimentales.

4. Cuarta gráfica (Fig.18)

De esta variable no se disponen datos experimentales comparables, pero se considera de importancia para observar:

1. La atenuación al cambiar de medio de propagación.
2. La frecuencia de resonancia en el modo en espesor

En esta grafica se observa que:

- a. La frecuencia de resonancia obtiene el máximo desplazamiento.
- b. La amplitud de desplazamiento queda condicionada de igual manera que el valor de la conductancia.

Concluimos que los modelos diseñados en PzFlex se aproximan con suficiente rigor a la muestra medida, por lo que a partir de aquí las modificaciones que se realicen en la simulación y los resultados obtenidos, se consideran fiables para analizarlos como si de una cerámica real se tratase.

V.2. MODIFICACIÓN DE GEOMETRÍA Y ESPESOR

En esta sección se modifican dos aspectos físicos de la cerámica, como son la geometría y el espesor. Los diseños realizados están hechos en 2D debido al ahorro computacional y se dividen en dos: El disco cerámico y el anillo cerámico.

V.2.1. Disco cerámico

En este diseño transforma la muestra en forma de cubo rectangular, que se simula en el primer modelo, a una muestra tipo cilíndrica. Con esta geometría se realizan dos modelos:

1. Modelo 1: Espesor 8 mm y 80mm de diámetro
2. Modelo 2: Espesor 5mm y 30mm de diámetro

En el primer modelo se mantiene el espesor de la muestra que se tenía en un principio mientras que en el segundo modelo, se reduce tanto el espesor como el diámetro. Se escogen estas dimensiones porque son unas de las más comunes que se disponen en el mercado.

V.2.1.1. Modelo en PzFlex

Los dos modelos presentan las mismas características de modelado que en el primer diseño excepto por la opción de simetría. En este caso, en vez de usar plano de simetría se utiliza simetría axial en el eje Y (Fig.19). PzFlex interpreta este eje como un eje de revolución en el que la geometría dibujada gira hasta conseguir el objeto deseado

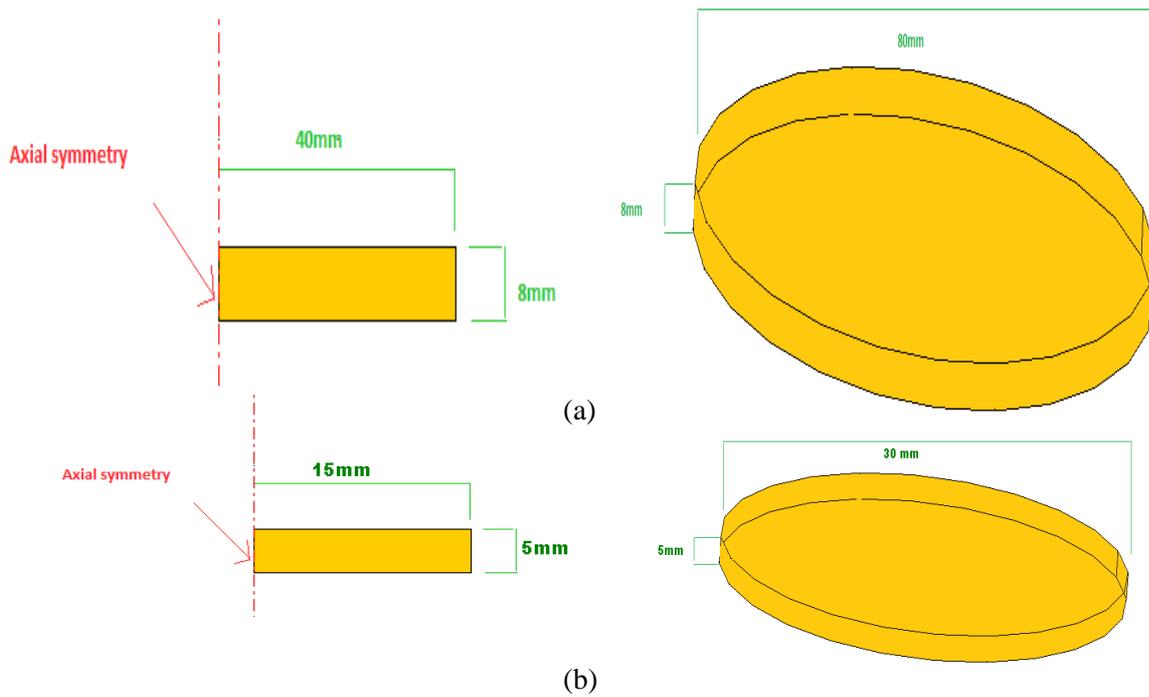


Fig.19. Representación de la geometría dibujada en PzFlex de los modelos 1 (a) y 2 (b)

V. 2.1.2. Resultados

Los resultados obtenidos están divididos en dos bloques:

- BLOQUE 1: Comparativa entre la muestra rectangular y el modelo 1.

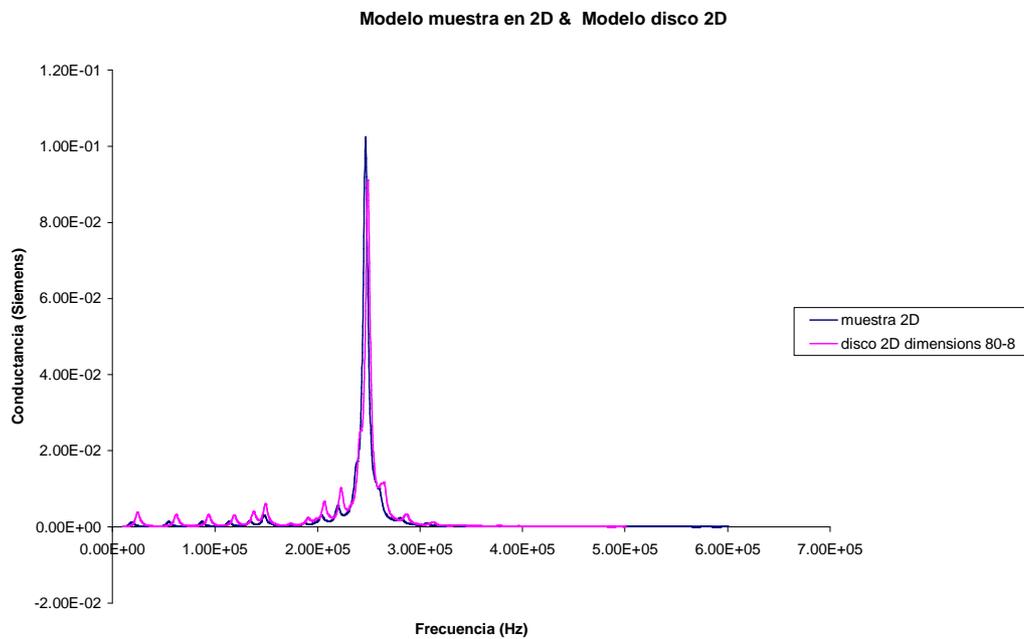


Fig.20. Comparación de la admitancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de la muestra rectangular y el disco cerámico de 8mm de espesor y 80mm de diámetro. Representada la conductancia (S) en función de la frecuencia.

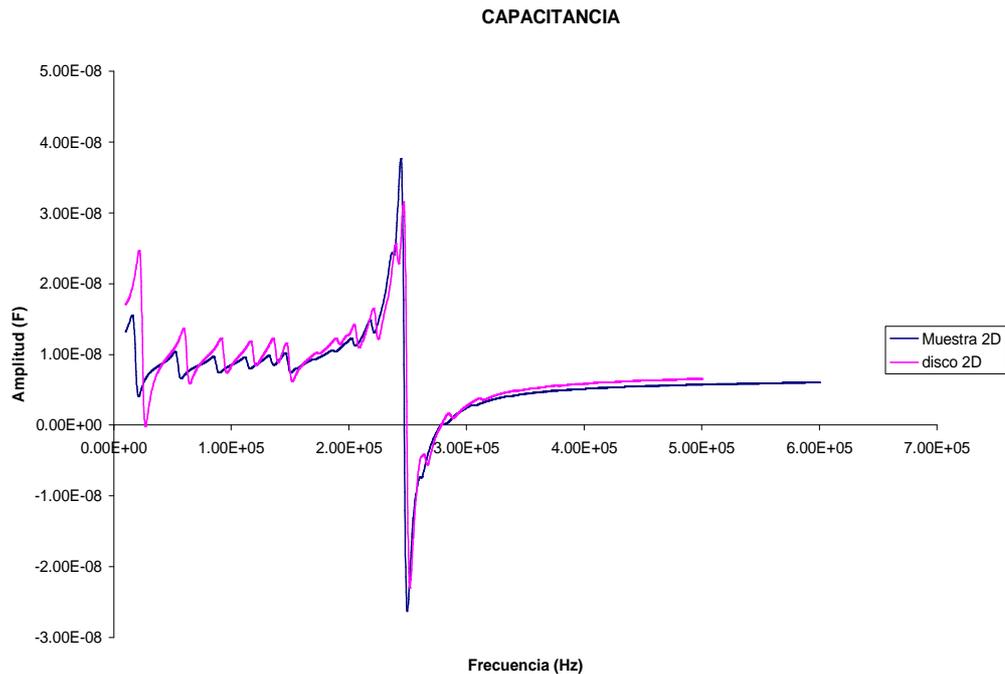


Fig.21. Comparación de la capacitancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de la muestra rectangular y el disco cerámico de 8mm de espesor y 80mm de diámetro Representada la amplitud (Faradios) en función de la frecuencia.

De estas gráficas se destaca:

- a. Obtención de la misma frecuencia de resonancia pero con menor amplitud de la conductancia.
- b. Los modos vibracionales (radiales y de cizalladura) aumentan su amplitud y varían ligeramente en frecuencia.
- c. Incremento a baja frecuencia del valor de la capacitancia en el disco, respecto a la muestra. La capacitancia depende de la permitividad del material, del espesor y del área de la cerámica. En el modelo no se ha modificado el espesor pero si el área, incrementándola. Al ser la capacitancia directamente proporcional a él, ésta sufre un incremento de igual forma, quedando reflejado en la fig.21

- BLOQUE 2: Comparativa entre el modelo 1 y 2.

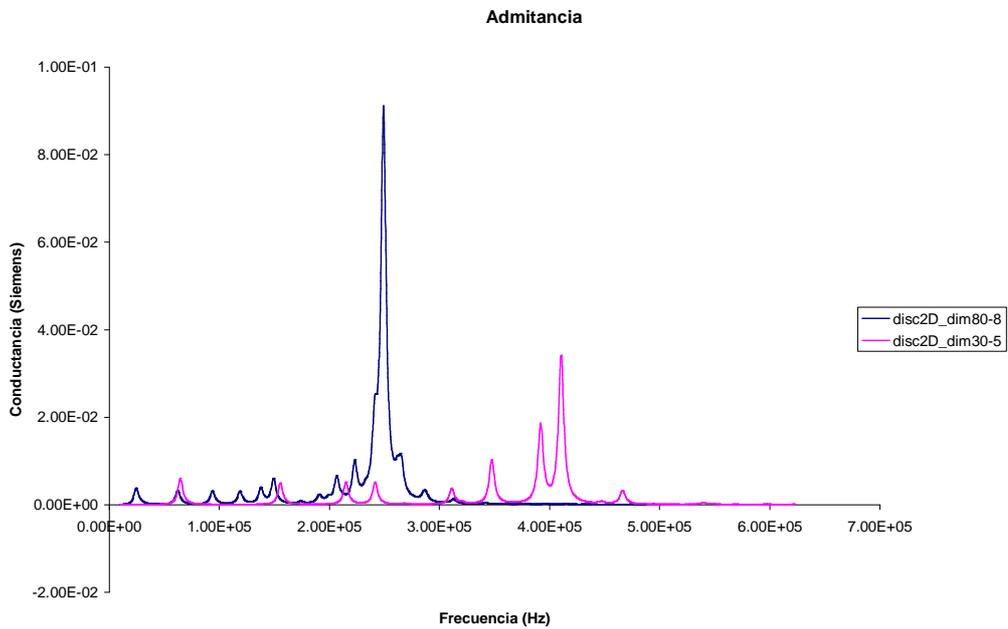


Fig.22. Comparación de la admitancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico. Representada la conductancia (S) en función de la frecuencia.

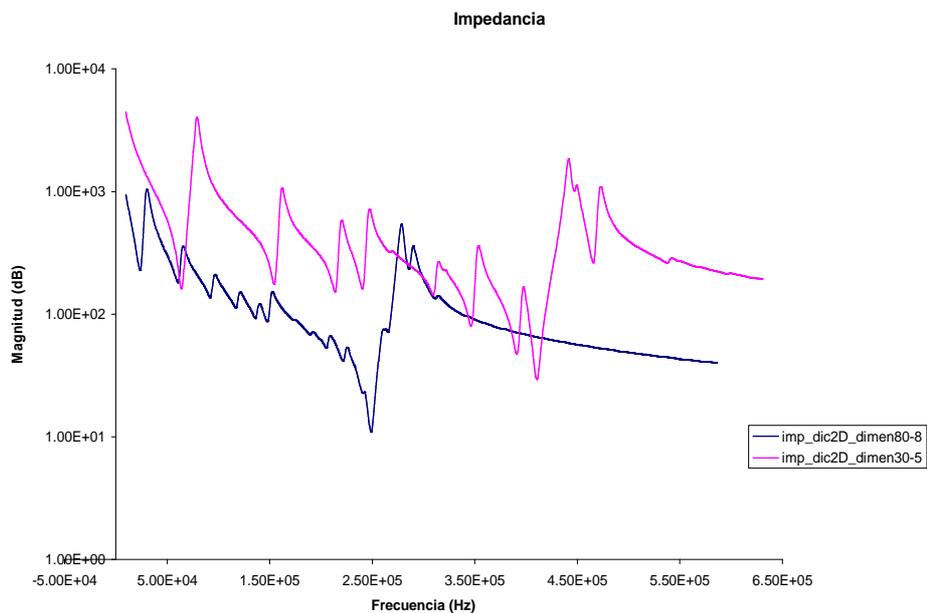


Fig.23. Comparación de la impedancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico. Representada la magnitud (dB) en función de la frecuencia.

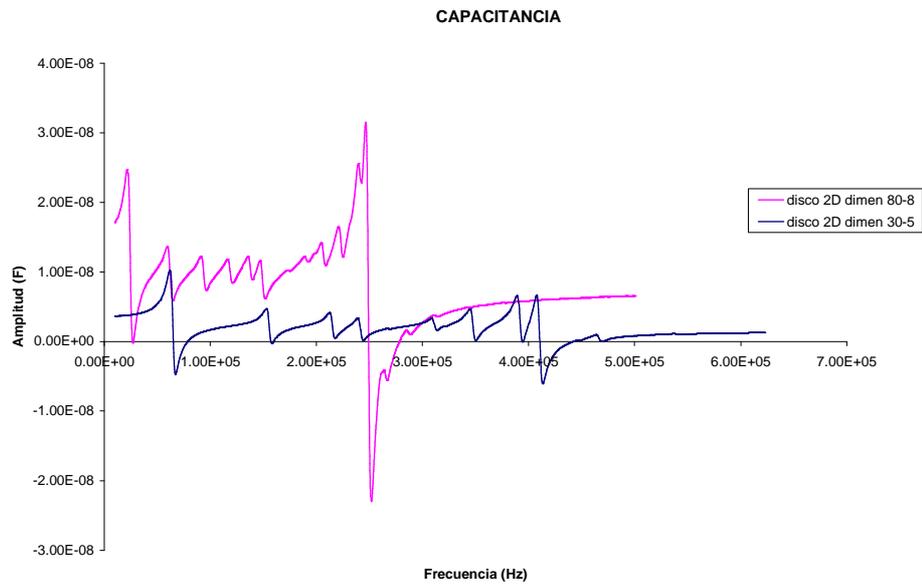


Fig.24. Comparación de la capacitancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico Representada la amplitud (F) en función de la frecuencia.

En general, de las tres variables representadas se extrae como diferencias principales las siguientes:

1. Desplazamiento de la frecuencia de resonancia en el modo en espesor, así como los demás modos vibracionales a un rango frecuencial mayor. El valor de la frecuencia de resonancia en el modo en espesor depende inversamente del espesor de la muestra.

$$f_r = \frac{c}{2 * t} \quad (11)$$

Siendo

f_r , Frecuencia de resonancia en modo espesor

c , velocidad de la onda en la cerámica

t , espesor de la cerámica

Si se resuelve esta ecuación para los dos modelos:

MODELO 1:

$$f_r = \frac{4000(\text{m/s})}{2 * 0.008(\text{m})} = 250\text{kHz}$$

MODELO 2:

$$f_r = \frac{4000(\text{m/s})}{2 * 0.005(\text{m})} = 400\text{kHz}$$

Como se puede comprobar se obtiene el mismo resultado analíticamente que el ocasionado en la simulación.

2. La amplitud de la frecuencia de resonancia de los modos radiales y de cizalladura se ve incrementada, mientras que la frecuencia de resonancia del modo en espesor sufre una disminución.

3. La amplitud de la capacitancia además de sufrir un desplazamiento en frecuencia como ocurre en las restantes variables, sufre una disminución en amplitud. Esto es debido, de igual manera que en el bloque 1, al área de la cerámica, pero esta vez con el efecto inverso, ya que aquí no aumenta el área si no que se disminuye. En este caso, también se reduce el espesor de muestra lo que incrementaría el valor de capacitancia, pero la reducción en espesor es solo de 3 mm mientras que el área del disco de dimensiones 30 X 5 es siete veces menor que el modelo del primer disco por lo que este efecto solapa al resto.

V.2.2. Anillo cerámico

En el siguiente modelo se trabaja con el disco cerámico del modelo 2 (30mm de diámetro y 5mm de espesor), introduciendo un anillo circular interno con el que se obtiene el anillo cilíndrico. Este tipo de anillos son los utilizados en la construcción de transductores tipo Langevin. El orificio presente en ellos se utiliza para introducir el tornillo que une las cerámicas con el resto de los materiales.

V.2.2.1 Modelo en PzFlex

Este diseño presenta las mismas características que en los modelos del disco cerámico. Solamente se debe separar el rectángulo del eje rotacional, una distancia igual al radio del círculo interno, para que al girar se cree el orificio deseado (Fig.25).

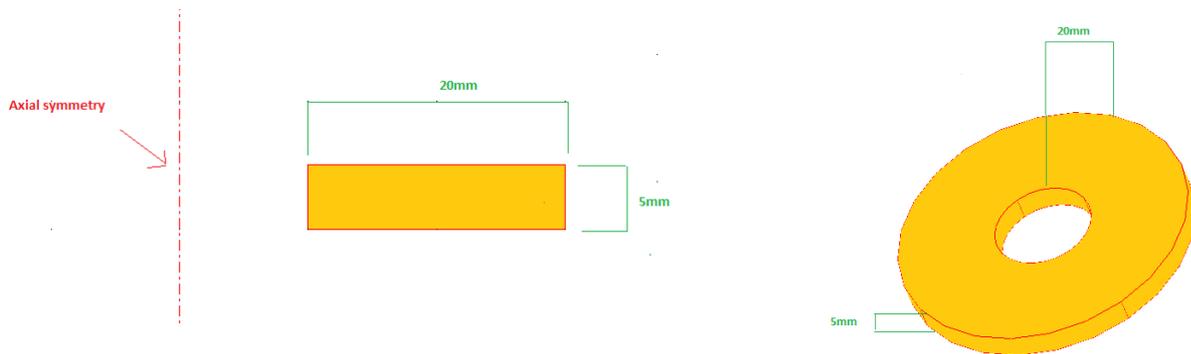


Fig.25. Representación de la geometría dibujada en PzFlex del anillo cerámico

V2.2.2 Resultados

En las siguientes gráficas se muestran las variables de admitancia, impedancia y capacitancia en función de la frecuencia. En ellas se comparan los resultados obtenidos con los modelos del disco cerámico y el anillo cerámico.

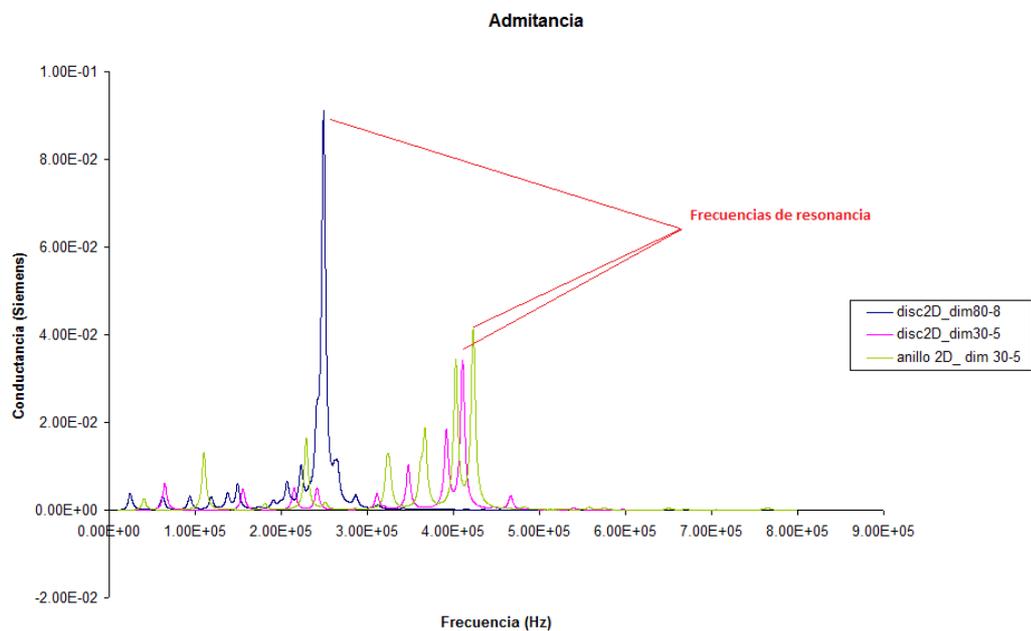


Fig.26. Comparación de la admitancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico y del anillo cerámico. Representada la conductancia (S) en función de la frecuencia

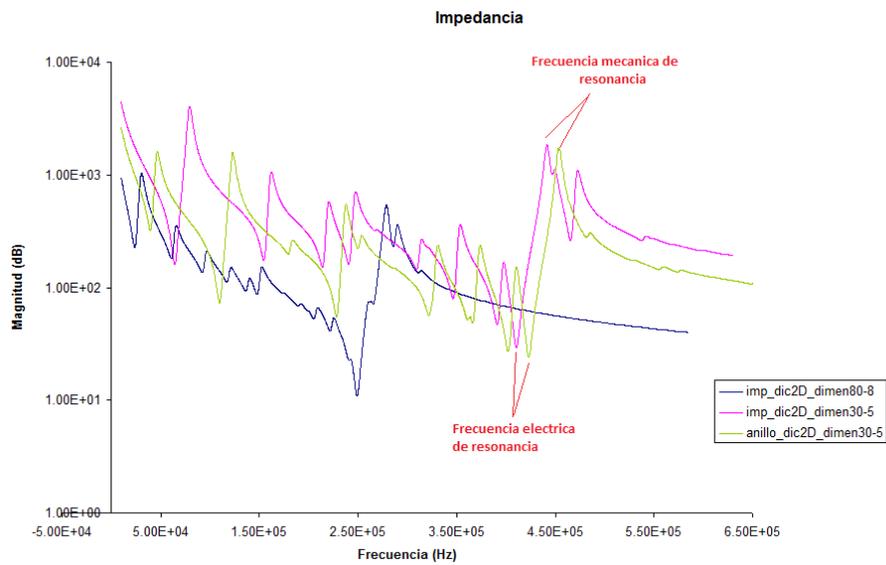


Fig.27. Comparación de la impedancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico y del anillo cerámico. Representada la magnitud (dB) en función de la frecuencia.

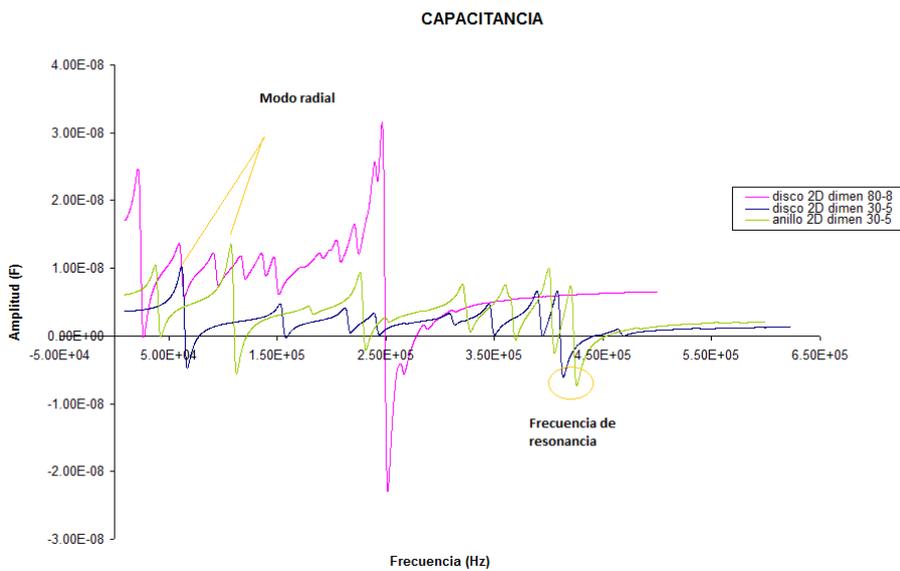


Fig.28. Comparación de la capacitancia eléctrica entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico y del anillo cerámico. Representada la amplitud (F) en función de la frecuencia.

Las características principales extraídas son:

- Incremento de la frecuencia de resonancia en el modo en espesor en 20kHz. Los demás picos resonantes por consiguiente sufren el mismo desplazamiento.

- En la capacitancia, se debería observar un decremento al presentar el mismo espesor que en el disco cerámico del modelo 2, pero con un área menor. Sin embargo, al calcularse la capacitancia de forma práctica a través de la conductancia, y al tener esta última los demás modos vibracionales con mayor amplitud, éstos quedan reflejados como muestra la fig.32, incrementando la capacitancia en el anillo y quedando por encima del disco de igual dimensiones.

Para finalizar con este apartado se ha realizado una última comparativa de la amplitud de desplazamiento en el eje Y, de todos los modelos realizados hasta ahora (Fig.29)

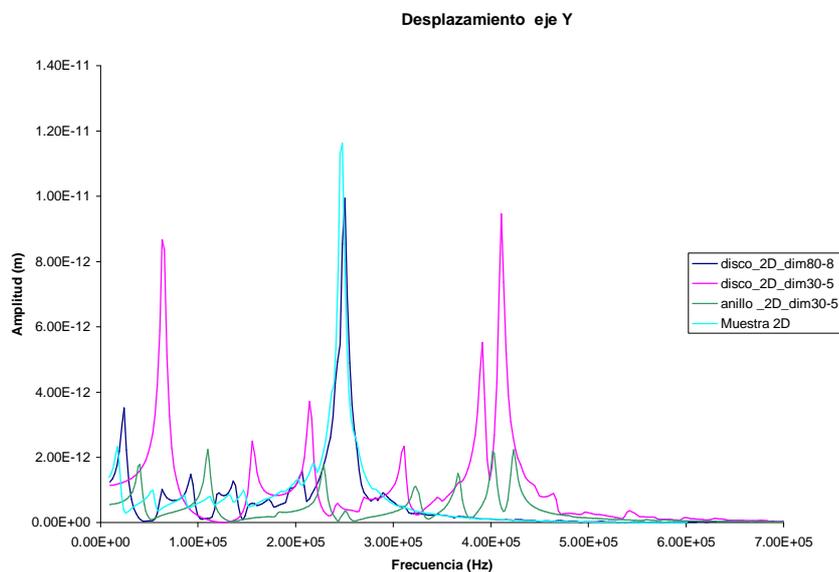


Fig.29. Comparación de la amplitud de desplazamiento en el eje Y, entre las simulaciones en 2D de los modelos 1 y 2 del disco cerámico, el modelo del anillo cerámico y el modelo de la muestra rectangular

A través de ella se observa que:

- A mayor área de superficie de la cerámica, mayor amplitud de desplazamiento en el eje Y. Se obtiene la mayor amplitud con la muestra rectangular y la menor con el anillo cerámico.
- El disco cerámico, de 30mm de diámetro y 5mm de espesor, es el que presenta la mayor amplitud de los demás modos vibracionales frente a la muestra rectangular que es el que los tiene más atenuados.

La figura 30 muestra el movimiento que se produce en el anillo cerámico a una frecuencia de 109kHz. Esta frecuencia corresponde a un modo radial de vibración, representando el desplazamiento a 0 grados (a) y a 180 grados (b).

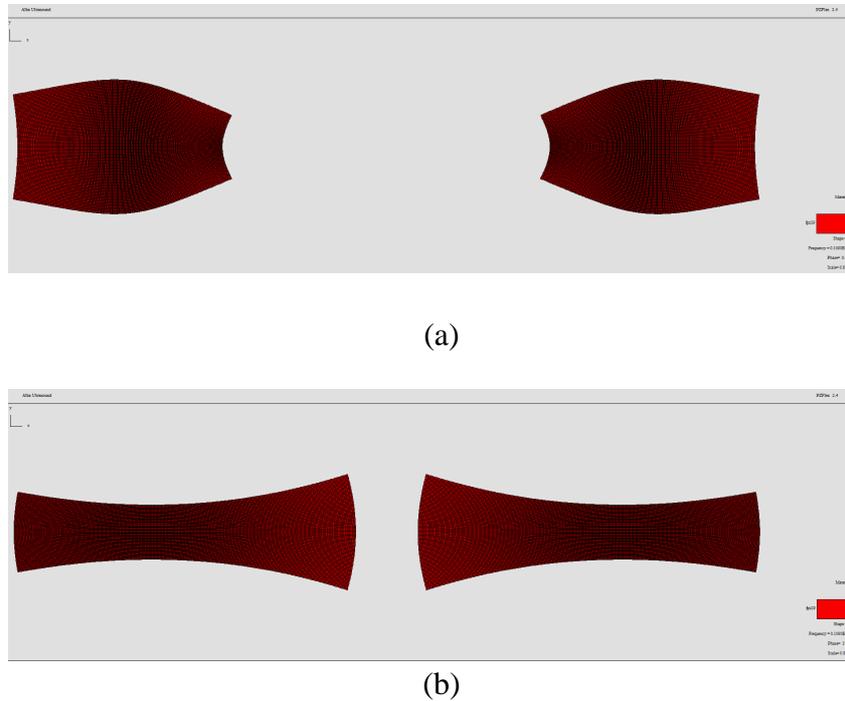


Fig.30. Representación de un movimiento armónico radial a 109kHz en el anillo cerámico. Representación a 0 grados (a) y 180 grados (b)

V.3. PROPAGACIÓN DE LOS ULTRASONIDOS EN EL MEDIO

Los modelos presentados hasta ahora han sido simulados en aire, permitiendo que las cerámicas oscilen libremente sin ningún tipo de fuerzas aplicadas sobre ellas. Los cambios introducidos han sido siempre modificaciones que afectaban directamente a la cerámica de forma física.

En esta sección se va introducir el diseño del anillo cerámico en un medio distinto (agua), para observar que fenómenos se producen en el comportamiento de este.

V.3.1. Modelo en PzFlex.

Las modificaciones aplicadas en este diseño son las siguientes:

1. Se definen las coordenadas del medio donde se introduce el transductor. Se establece 50 mm de agua desde los extremos del anillo, tanto en el eje Y como en el eje X.
2. Se definen condiciones de contorno absorbentes. En este modelo, el límite del diseño no es la cerámica, sino el agua. Para evitar reflexiones de la onda, que afecten a los resultados, es necesario definir contornos absorbentes excepto en el contorno donde se aplique la simetría axial, como ocurría en el anterior modelo.
3. Por último la velocidad mínima de este modelo con la que se calcula el tamaño del elemento, ya no es la velocidad de la cerámica sino la del agua disminuyendo de 4000m/s a 1500m/s.

El esquema del modelo es el siguiente:

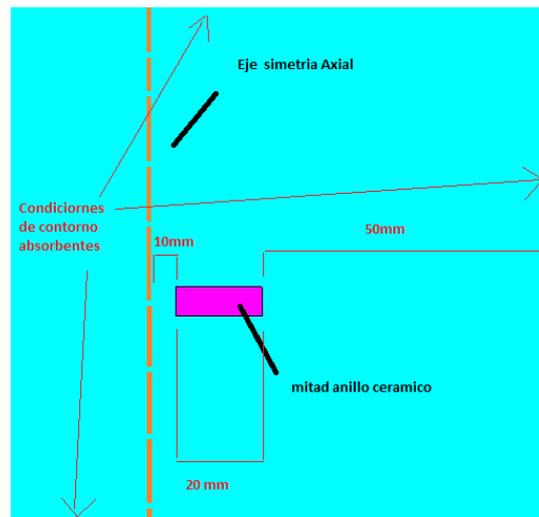


Fig.31. Esquema de la geometría del anillo cerámico en agua

V.3.2. Extrapolación de Kirchhoff

Con el fin de evitar el incremento exponencial de la carga computacional que se ocasiona, al incluir en el modelo grandes regiones de transmisión para medir presiones a determinadas distancias, las técnicas de extrapolación, están siendo usadas para producir campos en los que existe una transmisión homogénea de las ondas sin la necesidad de un número excesivo de elementos.

Los pasos a seguir en PzFlex para obtener la información de forma correcta se describen a continuación:

- Definición de un plano de datos que se posiciona a un número determinado de elementos (usualmente de 8 a 10) entre el límite entre el transductor y el medio a propagarse.
- Entre el plano de datos y el límite del modelo debe haber al menos una longitud de onda para que las condiciones de contorno aplicadas en el modelo no afecten a la extrapolación.

La figura 32 muestra el diseño sin la ventana de kirchhoff (izquierda) y una vez aplicada esta (derecha).

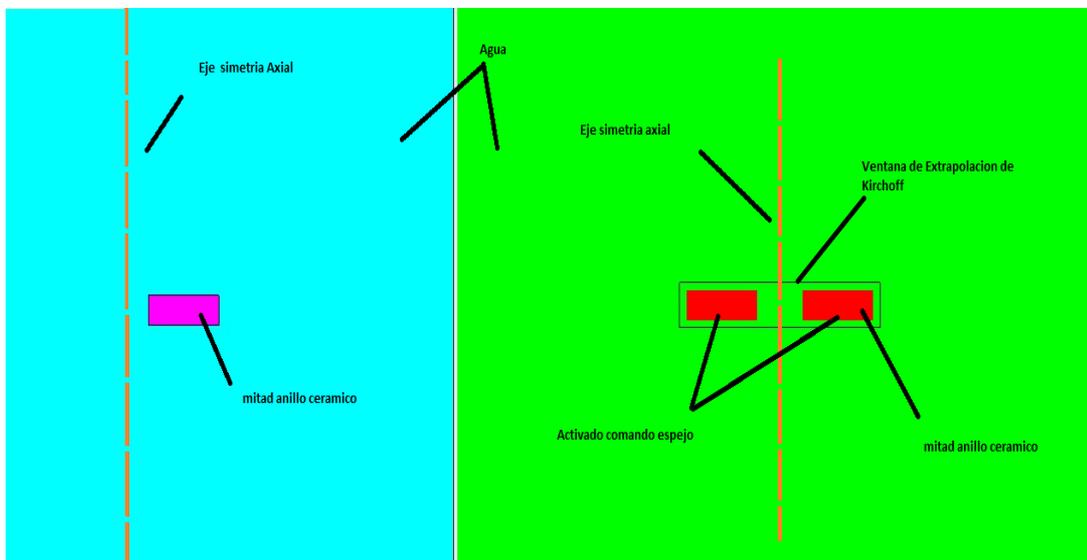


Fig.32. Esquema de la geometría del anillo cerámico sumergido en agua. Representación del modelo sin ventana de extrapolación y con ventana (comando espejo activado)

V.3.3. Resultados

En este punto se comparan las características físicas fundamentales del diseño del anillo cerámico en aire frente al anillo cerámico en agua.

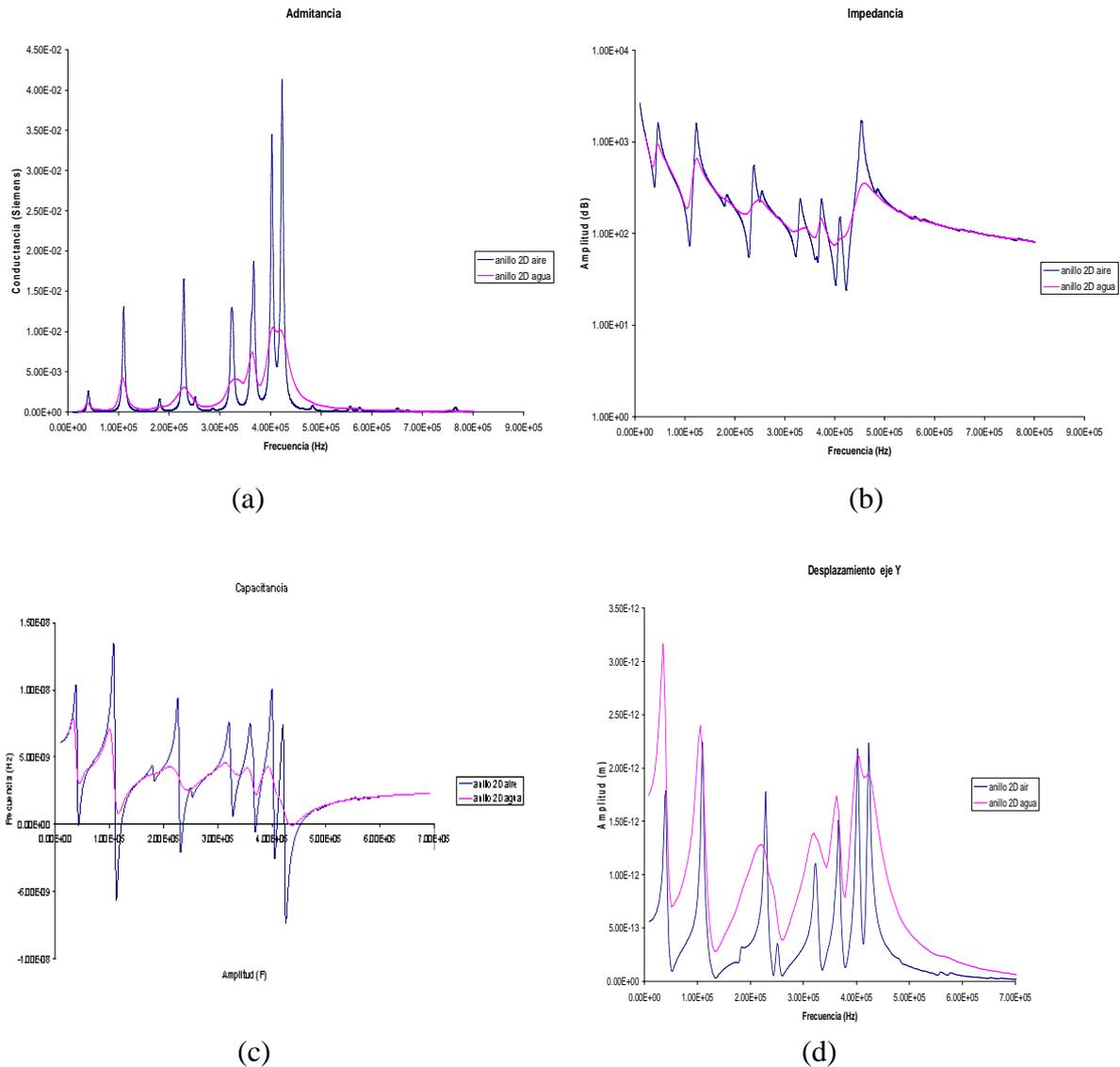


Fig.33. Gráficas comparativas del diseño del anillo cerámico en aire frente al diseño del anillo cerámico en agua. Representación de la parte real de la admitancia eléctrica (a); magnitud de la impedancia eléctrica (b); capacitancia eléctrica (c) y amplitud de desplazamiento en el eje Y (d)

Se aprecian dos diferencias:

1. Atenuación de la forma de onda de todas las variables del anillo cerámico sumergido en agua. Este efecto es producido por la cantidad de energía que se transmite, al propagarse las ondas ultrasónicas por este medio.
2. Ligerio desplazamiento de la frecuencia de resonancia en el agua. Disminución de 20kHz
3. Incremento de los modos radiales a baja frecuencia del anillo cerámico en el agua.

Por último, y gracias a la extrapolación de Kirchhoff explicada anteriormente se ha calculado el patrón de directividad del anillo a la frecuencia de resonancia (400kHz) y a una distancia de 1 metro, donde queda reflejado los niveles de presión desde un ángulo de 0° hasta 90°. El ancho de banda del transductor a -3dB es de 6°. El patrón de directividad muestra simetría al igual que lo hace el modelo.

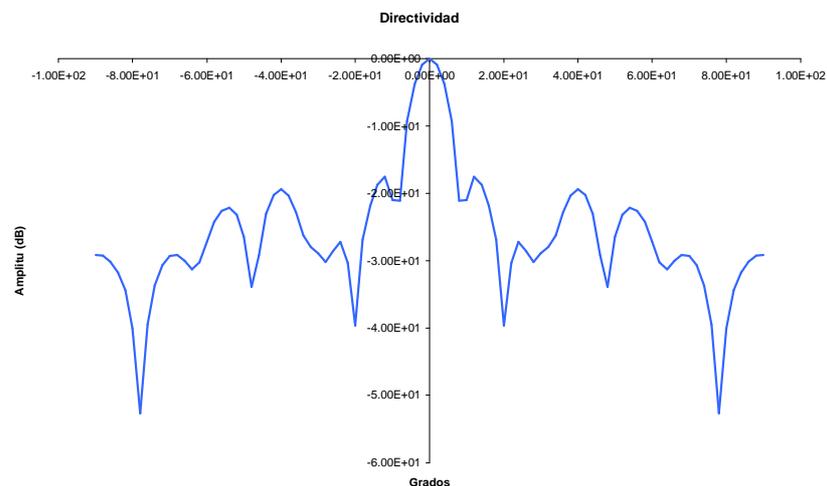


Fig.34. Gráfica de directividad del anillo cerámico sumergido en agua a una frecuencia de 400kHz

V.4. ADICIÓN DE MATERIALES. TRANSDUCTOR LANGEVIN

La última sección de este apartado está dedicada a la modificación del comportamiento de la cerámica piezoeléctrica mediante la adición de materiales. En particular, se va a diseñar un transductor de Langevin formado por los tres elementos que lo conforman explicados en el punto (II.3).

V.4.1. Modelo en PzFlex

Se generan dos modelos en 2D y con simetría axial:

1. Transductor de Langevin en aire
2. Transductor de Langevin en agua.

A través de la ecuación de Langevin se despeja tanto la longitud del bloque de aluminio (matching), como la del bloque de acero (backing). Los datos necesarios para el cálculo son los siguientes:

- Frecuencia de resonancia a la que va a trabajar el transductor: 40kHz
- Espesor del conjunto de bloques cerámicos: 10mm
- Datos de densidad y velocidad de todos los componentes:

	CERAMICA	ALUMINIO	ACERO
DENSIDAD (kg/m ³)	7460	2690	7900
VELOCIDAD (m/s)	4230	6303	5900

Tabla.3. Densidad y velocidad de los elementos que componen el transductor de Langevin

Al introducir los datos en la ecuación las longitudes obtenidas son:

	ALUMINIO	ACERO
LONGITUD (cm)	2.25	2.09

Tabla.4. Longitud de los materiales que conforman los anillos metálicos

Por lo tanto las dimensiones de todos los elementos que conforman el transductor de Langevin son las siguientes:

	Número	Material	Longitud (cm)	Anchura (cm)
Backing	1	Acero	2.09	3
Cerámica	2	Pz29	0.5	3
Electrodos	3	Hardset	0.1e-4	3
Matching	1	Aluminio	2.25	3
Tornillo (cabeza)	1	Acero	1	1.5
Tornillo Cuerpo	1	Acero	3.89	1

Tabla.5. Descripción de los materiales utilizados para el transductor tipo Langevin

1. Transductor de Langevin en aire
 - a. Definición de las nuevas coordenadas correspondientes al bloque de aluminio, acero, al nuevo bloque cerámico y al tornillo.

- b. La velocidad mínima utilizada para obtener el tamaño del elemento finito es la velocidad del sonido en el aire (343m/s), en lugar de la velocidad del sonido en la cerámica. Al tratarse de un sistema más complejo, con diferentes materiales, se escoge esta, que es la mínima del sistema, para asegurarse de obtener un buen mallado en todo el conjunto. Sobre todo en la unión entre los materiales.
 - c. Aplicación de una señal de Prestress antes de la función de excitación. En un sistema real, para conseguir compactar todos los materiales y que trabajen como uno solo, se aplica, a través del tornillo, una presión que hace que los elementos del sistema permanezcan juntos y vibren a una determinada frecuencia de resonancia. En PzFlex, esta señal es una función escalonada de 1MPa, aplicada por un lado entre la cabeza del tornillo y el backing, y por otro lado y en dirección opuesta, entre el matching y el tornillo, creando la misma condición de presión que en el caso real. Además, con ella, se aumenta la resistencia a la tensión de las cerámicas lo que facilita el correcto funcionamiento de estas. PzFlex es un software que trabaja de forma lineal, e interpreta las uniones entre los diferentes materiales de forma ideal, trabajando toda la geometría de igual manera. Esto implica por tanto, que el resultado obtenido con o sin Prestress es el mismo y por tanto no es necesario incluirlo en el diseño. Sin embargo el estudio se ha realizado con Prestress ya que es el modo que más se aproxima a la realidad.
2. Transductor de Langevin en agua.
- a. Definición de las dimensiones del medio donde se sumerge el transductor, en este caso el agua. Se ha escogido unas dimensiones de 90X90mm asegurándose que las distancias sean más grandes que la longitud de onda (37.5mm).
 - b. Condiciones de contorno absorbentes para evitar las reflexiones que se producen en los límites del modelo.
 - c. Velocidad mínima se modifica a 1500m/s (agua), al cambiar el medio de transmisión.

La figura 35 muestra el esquema final del transductor en agua. El transductor en aire presenta el mismo exceptuando el agua que rodea a la geometría.

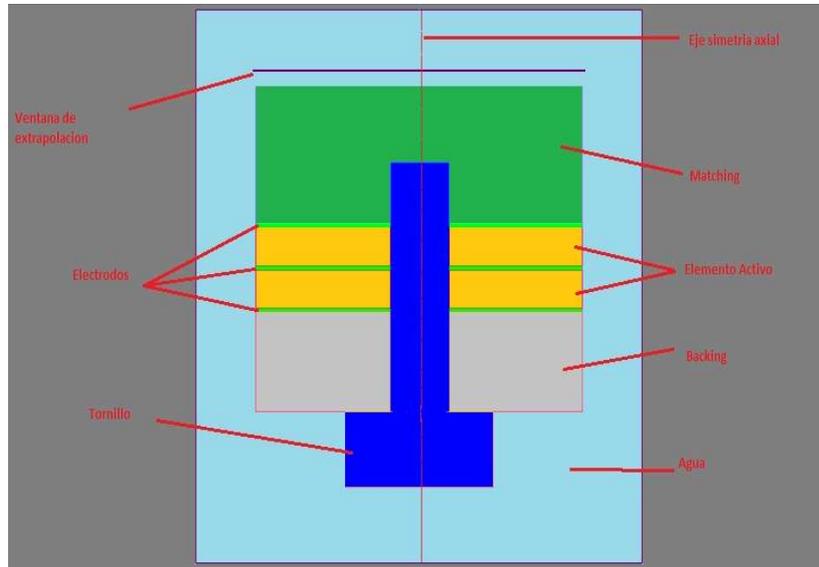


Fig.35. Esquema de la geometría del transductor de Langevin en PzFlex.

V.4.2. Resultados

1. Parte real de la admitancia eléctrica del transductor de Langevin en agua. Representación de la señal con y sin prestress.

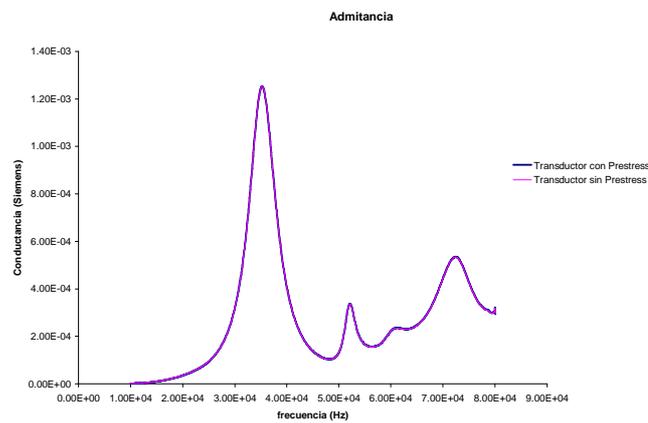


Fig.36. Representación de la admitancia eléctrica del transductor de Langevin con y sin la señal de Prestress

2. Comparativa características físicas fundamentales del transductor de Langevin en aire frente al transductor de Langevin en agua.

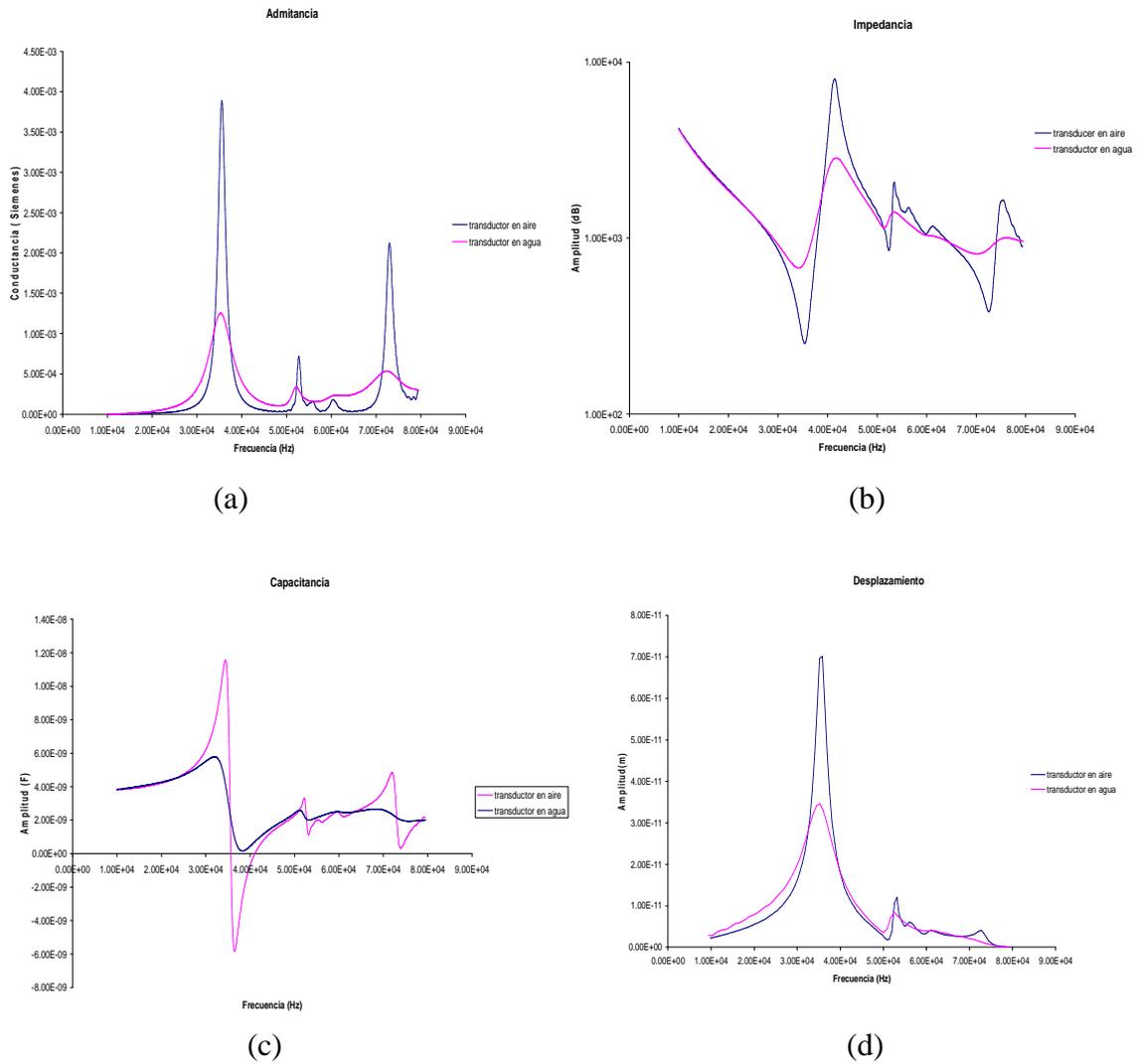


Fig.37. Gráficas comparativas del diseño del transductor de Langevin en aire frente al diseño del transductor de Langevin en agua. Representación de la parte real de la admitancia eléctrica (a); magnitud de la impedancia eléctrica (b); capacitancia eléctrica (c) y amplitud de desplazamiento en el eje Y (d)

3. Directividad del transductor de Langevin en agua. Representación a la frecuencia de resonancia en el modo en espesor (35kHz) y a una distancia de 1metro.

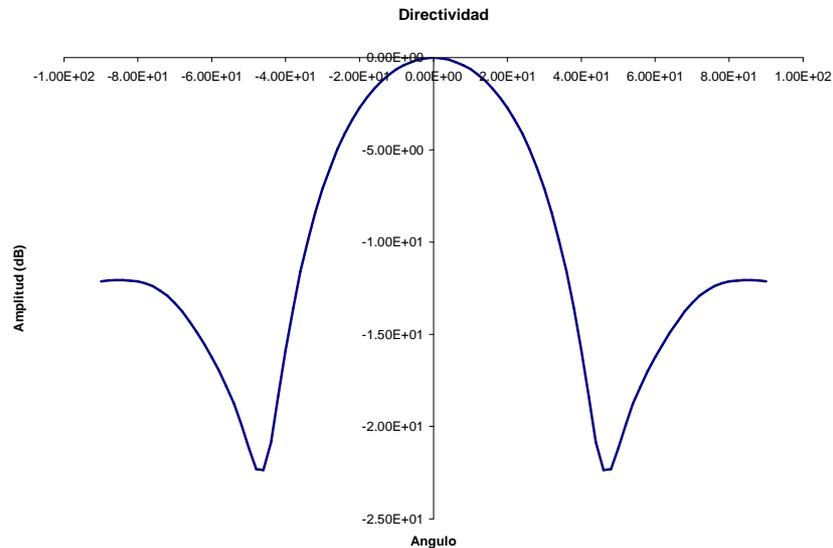


Fig.38. Gráfica de directividad del transductor de Langevin sumergido en agua a una frecuencia de 35kHz

Las conclusiones extraídas a partir de ellas son:

- Obtención del mismo resultado con o sin la señal de Prestress.
- Disminución de la frecuencia de resonancia del modo en espesor a 35.8kHz, debido al acoplamiento de los bloques metálicos
- Atenuación de la amplitud de las variables del diseño del transductor sumergido en agua, respecto al modelo en aire.
- Excitación de otros dos modos vibracionales a las frecuencias de 52kHz y 72kHz.
- El ancho de banda a -3dB es de 44°. Éste es siete veces mayor que el que se obtiene con el anillo cerámico. Esto es debido a que la frecuencia de resonancia del anillo es de orden mayor y por lo tanto más directiva, reduciéndose el ángulo del haz principal.

Para ofrecer una imagen visual del movimiento del transductor en aire, se ha representado el desplazamiento de éste a la frecuencia de resonancia del modo en espesor (35kHz) y a la frecuencia de resonancia de modo radial (72kHz).

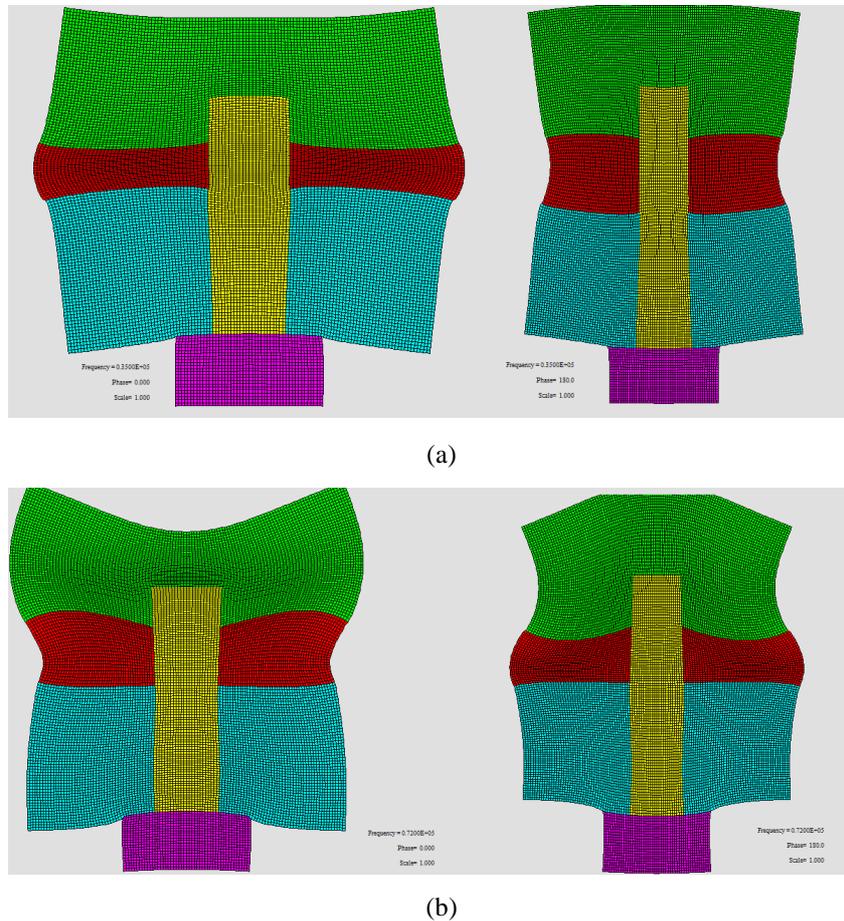


Fig.39. Representación a 0 y 180 grados de dos movimientos armónicos del transductor de tipo Langevin a las frecuencias de 35kHz (a) y 72kHz (b)

Para finalizar con el estudio de la cerámica piezoeléctrica se realiza una última comparativa de la amplitud de desplazamiento en el eje Y de todos los modelos simulados en la presente trabajo fin de máster.

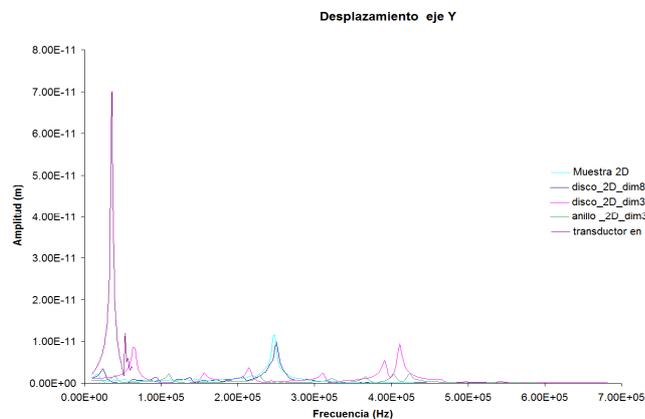


Fig.40. Amplitud de desplazamiento en el eje Y de todos los diseños realizados

La gráfica refleja un considerable aumento del desplazamiento en el transductor de Langevin a la frecuencia de resonancia, en comparación con los demás modelos. Esto refleja la eficacia que posee el backing a la hora absorber reflexiones que se producen en la cara posterior del bloque cerámico y que provocan interferencias no deseadas en el comportamiento del sistema. En definitiva el transductor presenta una mayor eficiencia que el resto de los modelos.

VI. CONCLUSIONES

VI.1. CONCLUSIONES

Se ha realizado un estudio del comportamiento de una cerámica piezoeléctrica, cambiando propiedades físicas propias de ésta y también características del entorno.

Se han estudiado de forma particular cinco variables: Impedancia, Admitancia, Capacitancia, Amplitud de desplazamiento y Directividad. A partir de ellas, se han obtenido diversos resultados para cada diseño, extrayendo las siguientes conclusiones:

En primer lugar, la transformación de la geometría de la cerámica de una muestra en forma de cubo rectangular a una muestra cilíndrica no influye, ni en el valor de la frecuencia de resonancia en el modo en espesor, ni en las demás frecuencias resonantes de los distintos modos, pero sí, en la amplitud de estos. Se produce una mayor influencia de los modos radiales y de cizalladura (mayor amplitud), frente a una disminución de la amplitud de conductancia, en la frecuencia de resonancia del modo en espesor. Además, este efecto se intensifica al introducir un orificio interno.

En segundo lugar, la modificación del espesor de la cerámica provoca un desplazamiento de la frecuencia de resonancia en el modo en espesor, con una relación inversamente proporcional, como cabía esperar. Los modos resonantes sufren el mismo desplazamiento.

En tercer lugar, la transmisión de las ondas ultrasónicas en un medio de propagación distinto del aire, en este caso agua, provoca la atenuación de la amplitud de todas las variables, debido a la cantidad de energía consumida para la transmisión de las ondas en este medio. Además, se observa una mayor excitación de los modos radiales a baja frecuencia. Este efecto, puede ser debido a que las condiciones de contorno absorbentes del modelo no estén actuando de forma correcta y provoquen una interferencia constructiva a baja frecuencia.

Por último, la adición de materiales a la cerámica piezoeléctrica, conformando un transductor de tipo Langevin, provoca que todo el sistema trabaje a una frecuencia de rango inferior, regida por la ecuación de Langevin. Además, se produce un incremento de la eficiencia del sistema, al obtener una mayor amplitud de desplazamiento, en la frecuencia de

resonancia en el modo en espesor, lo cual es uno de los objetivos que se persiguen con este tipo de transductores.

En conclusión, las simulaciones realizadas en el presente trabajo se pueden adoptar como base para futuros estudios al presentar, por un lado, resultados próximos a los datos experimentales y por otro, resultados coherentes que verifican ecuaciones analíticas. Este trabajo también ha permitido demostrar la viabilidad del software PZFlex para el diseño de transductores complejos, como es el caso de los transductores de Langevin.

VI.2. *LÍNEAS FUTURAS*

Una de las posibles vías de estudio para futuros análisis es el estudio de una muestra piezoeléctrica pero no sólo formada por material cerámico, sino por una mezcla de polímero y cerámica, que se conoce comúnmente como piezocomposite.

Como se ha visto en este trabajo, en los anillos circulares utilizados en los transductores tipo Langevin la amplitud de los modos radiales y de cizalladura se ven incrementados en amplitud, pudiendo solapar a la frecuencia de resonancia en el modo en espesor (frecuencia de trabajo), causando interferencias indeseadas.

Son diversos los artículos que afirman que el uso de los piezocomposite estabilizan este comportamiento, atenuando esos modos resonantes, y quedando solamente la frecuencia de interés.

Por otro lado, el estudio del comportamiento de un array de cerámicas o transductores en términos de fase y propagación nos puede aportar datos de relevancia en referencia a eficiencia de transmisión, energía transmitida etc.

El software podría ser utilizado para el diseño de transductores con gran ancho de banda y con capacidades de potencia elevada, de gran utilidad en aplicaciones submarinas y médicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Dr. Andrew Tweedie por enseñarme a utilizar la mayoría de los comandos utilizados en el código PzFlex. A mis tutores, Francisco Camarena y Rubén Picó, por sacar tiempo para resolverme dudas, aun estando en el extranjero y muy especialmente a mi familia y amigos que han estado apoyándome en todo momento durante este año.

REFERENCIAS

- [1] Dra.Dulia Orteg, Historia del ultrasonido: El caso chileno. Revista chilena de Radiología, Vol.10 nº 2 (2004)
- [2] Shaul Katzir, “Measuring constants of nature: confirmation and determination in piezoelectricity (2003)
- [3] Heinrich Kuttruff, “Ultrasonics: Fundamental and applications” (1989)
- [4] J.A Gallego Juárez, “Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers”. Instituto de Acústica CSIC. Madrid, Spain
- [5] Cheeke, J. David, “Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves”
- [6] N.F.Ivina, “Analysis of the Natural Vibrations of Circular Piezo ceramic Plates of variable thickness”. Makarov Pacific Naval Institute. Rusia, December 12, 2000.
- [7] F.Camarena, “Transductor tipo sándwich para Aplicaciones ultrasónicas en frutas”. Techni-Acústica, Gandía 2006.
- [8] A. Carnicero, “Introducción al método de los elementos finitos”.
- [9] Juan C. Heinrich, “The finite element method: basic concepts and applications”.
- [10] Barna Aladár Szabó, “Finite element analysis”. Ivo Bsbaska (2003)
- [11] R. M. Jimenez Rodriguez, “Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de discos cerámicos”. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [12] O.Zienkiewicz, “El método de los elementos finitos”. (2001)
- [13] Gerald Harvey, “An Investigation into the simulation and measurement of high intensity ultrasonic systems”. University of Stathclyde. March 2008.
- [14] PZFlex User Manual. Weidlinger Associates Inc., USA.

[15] PZFlex Command Reference. Weidlinger Associates Inc., USA.

ANEXOS

Anexo 1: Análisis realizado mediante Comsol Multiphysics.

En el siguiente anexo se muestra un análisis auxiliar realizado con otro software de simulación, en concreto Comsol Multiphysics 3.5.

Comsol es un software de propósito general. A través de un interfaz gráfico se define geometría, condiciones de contorno, mallado, parámetros del resolutor etc. Obteniendo a través del procesado los resultados deseados.

Se ha realizado un diseño de la muestra rectangular, que se utilizó para las medidas en el laboratorio, para comparar por un lado con los datos experimentales y por otro, con el primer modelo en PzFlex presentado en este trabajo. El módulo escogido ha sido el de acústica, en el subapartado de piezoelectricidad. El análisis realizado ha sido un análisis de respuesta en frecuencia.

A partir de aquí se define el diseño, de igual forma que se definía en PzFlex, a través de los siguientes puntos:

1. Geometría del objeto

Se realiza una simulación en 3D. Las dimensiones utilizadas son las mismas que presenta la muestra rectangular en la realidad (80X55X8 mm).

La figura 41 muestra la geometría dibujada:

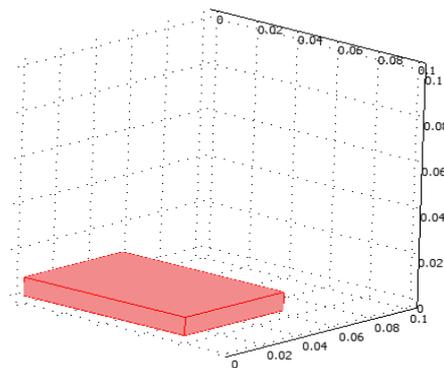


Fig.41 Geometría muestra rectangular dibujada en Comsol Multiphysics

2. Definición de los materiales

El material utilizado es la cerámica Pz29, de la empresa Ferroperm, con los mismos datos que se utilizaron para el modelo en PzFlex.

3. Condiciones de contorno

Al tratarse de un modelo en 3D y al querer estudiar el comportamiento de la cerámica cuando oscila libremente en el aire, todas las superficies del modelo presentan condiciones de contorno libre como en el modelo en 3D de PzFlex.

4. Señal de excitación

Al trabajar en régimen frecuencial no se necesita ningún tipo de señal de excitación, en función del tiempo. El programa, con las determinadas condiciones eléctricas, realiza un barrido frecuencial, dentro del rango que se desee, En este modelo está definido de 10kHz a 400kHz en pasos de 10kHz y mide las propiedades necesarias para el procesado (Tensión, Campo eléctrico, desplazamiento, desplazamiento eléctrico etc.)

5. Mallado

El mallado en Comsol se puede realizar de dos formas diferentes. En la primera, el programa da la opción de inicializar una determinada malla e ir refinándola si es necesario. En la segunda y en la que utiliza en el diseño, se definen los parámetros de la malla. Aquí se escoge el subdominio que deseas mallas y se indica el tamaño máximo del elemento. También se puede escoger la forma del elemento: triangular o cuadrada y la tasa de crecimiento.

Que una malla sea la adecuada o no, depende de la siguiente condición:

$$\Delta x = \lambda / 10, \text{ con } \lambda = c / f$$

Siendo

Δx : distancia entre extremos del elemento finito.

λ : longitud de onda

c : velocidad de propagación

f : frecuencia

De todos los elementos restrictivos presentes en la ecuación, el más restrictivo que se va a encontrar es el de la frecuencia, ya que, si se trabaja con frecuencias elevadas, del orden de las ultrasónicas, la longitud de onda será muy pequeña y por lo tanto más pequeño tendrá que ser el elemento. El problema de esto, ya no es generar el mallado sino que el ordenador tenga suficiente memoria para ejecutar todo análisis sin quedarse bloqueado.

Como se desea comparar los resultados entre los dos modelos, en vez de realizar la ecuación mencionada anteriormente, simplemente se definirá el máximo tamaño del elemento con las mismas dimensiones que el elemento de PzFlex: (3.2e-4m).

6. Condiciones eléctricas

Las condiciones eléctricas definidas en Comsol son las siguientes:

- Ground: Se aplica cero potencial en la superficie inferior de modelo. Es el equivalente del electrodo conectado a tierra del modelo Pzflex.
- Electric Potencial: Se define un determinado potencial en la cara superior del objeto en concreto 1V
- Zero charge /symmetry: Especifica que el componente normal del desplazamiento es 0. Se utiliza para las caras exteriores del objeto.

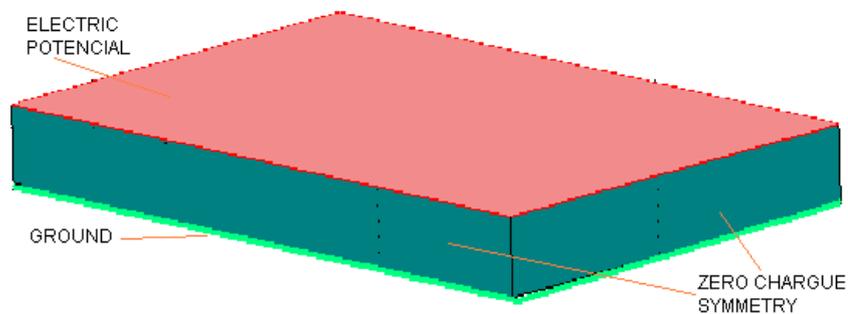


Fig.42 Esquema de las condiciones eléctricas de la muestra rectangular, en Comsol Multiphysics

Las incógnitas a resolver en el procesado son las definidas a continuación:

- Amplitud de desplazamiento en el eje Z (modo en espesor)
- Admitancia eléctrica

La primera variable, se obtiene directamente en el procesado mientras que la segunda necesitas seguir una serie de pasos. Estos pasos son:

1. Integración de la densidad de corriente en el eje Z siguiendo la siguiente ecuación:

$$I = \int_0^r j_z(r) 2\pi r dr \quad (12)$$

2. Definición de la admitancia como variable escalar. La admitancia se define mediante la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{V}{I} \quad (13)$$

Siendo,

Y, Admitancia eléctrica

V, Potencial eléctrico (V) definido, como variable de entrada, en una de las superficies de la cerámica

I, Intensidad (A) obtenida a partir de la integración, de la densidad de corriente, de una de las superficies de la cerámica

En las gráficas siguientes se muestran los resultados obtenidos:

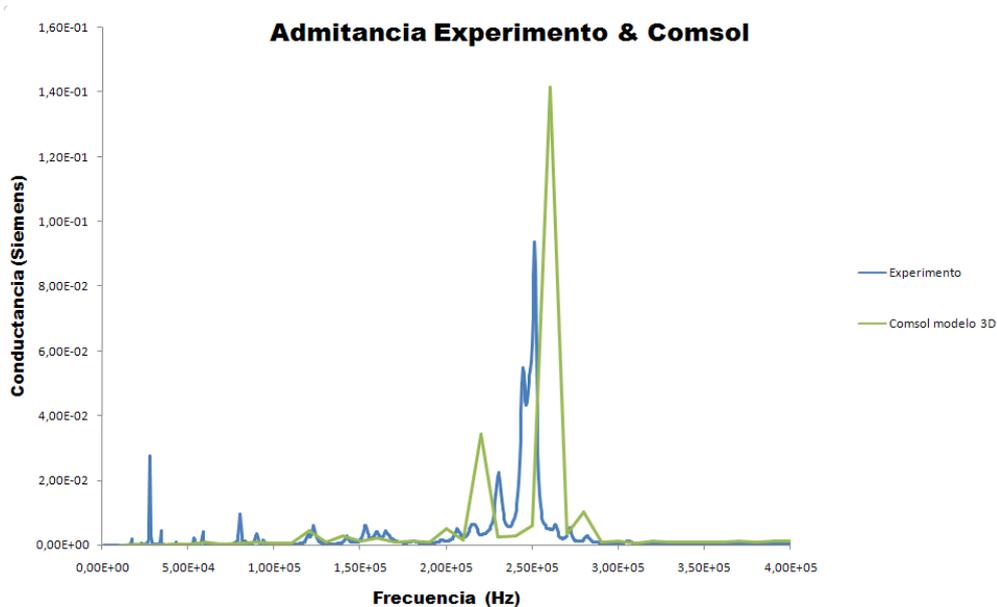


Fig.43 Comparación de la admitancia eléctrica entre la simulación en 3D en Comsol de la muestra rectangular y los datos experimentales. Representada la conductancia (S) en función de la frecuencia

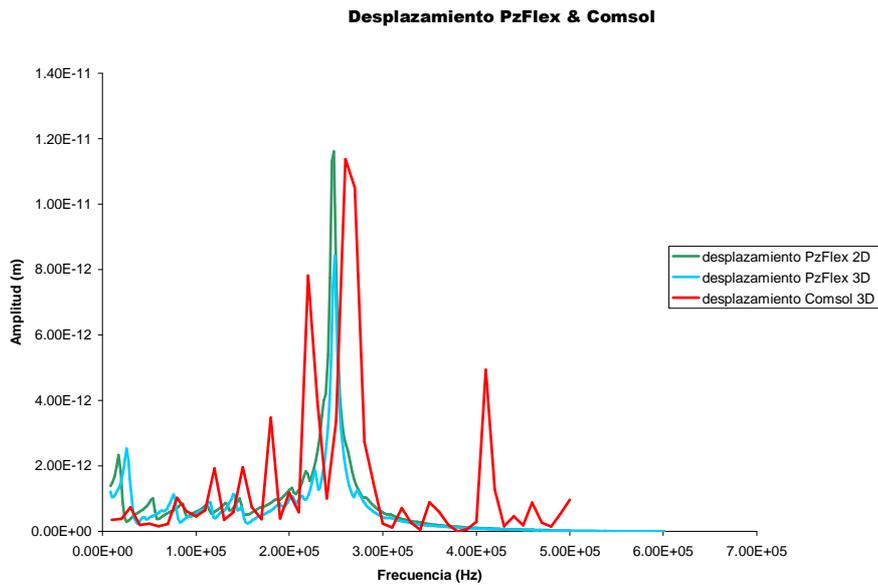


Fig.44 Comparación de la amplitud de desplazamiento entre las simulaciones en 2D y 3D en PzFlex de la muestra rectangular y la simulación en 3D en Comsol. Representada la conductancia (S) en función de la frecuencia

A partir de ellas se extrae:

- La frecuencia de resonancia en Comsol es de 260KHz, presentando mayor valor de conductancia.
- Los demás modos resonantes quedan solapados, no diferenciándose a qué modo corresponde cada uno.

En conclusión, la aproximación realizada con Comsol está bastante alejada de la realidad no pudiéndola tomar como válida para posteriores análisis.


```
c
c
c
c
c *****
geom
  xcrd $x1 $x2 $i1 $i2
  ycrd $y1 $y2 $j1 $j2
  ycrd $y2 $y3 $j2 $j3
end

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c
c *****
MATERIAL SITE DEFINITION
c
c
c *****
site
  regn air /* air
  regn $ceramic $i1 $i2 $j1 $j2
  regn $electrode $i1 $i2 $j2 $j3
end

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c
c *****
PLOT MODEL
c
c
c *****
grph /* Plot the model to screen
  plot matr
  mirr x on
end

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c
c *****
BOUNDARY CONDITIONS
c
c
c *****
```



```

ceramic_air3D.fnxinp

C *****
C
C
C COORDINATE X
C
C *****

symb x1 = 0.0
symb x2 = $x1 + $width_cer

C *****
C
C
C COORDINATE Y
C
C *****

symb y1 = 0.0
symb y2 = $y1 + $thick_cer
symb y3 = $y2 + $thick_elec

C *****
C
C
C COORDINATE Z
C
C *****

symb z1 = 0.0
symb z2 = $z1 + $depth_cer

C *****
C
C
C I-J CO-ORDINATE SYSTEM
C
C *****

.C *****
C
C
C COORDINATE I
C
C *****

symb i1 = 1 /* index for centre of PZT ring element
symb i2 = $i1 + nint ( ( $x2 - $x1 ) / $box ) /* set i-index for edge of PZT
symb indgrd = $i2 /* Set maximum i-index

C *****
C
C
C COORDINATE J
C
C *****

symb j1 = 1 /* index for centre of PZT ring element
symb j2 = $j1 + nint ( ( $y2 - $y1 ) / $box ) /* set j-index for edge of PZT
symb j3 = $j2 + nint ( ( $y3 - $y2 ) / $box )

symb jndgrd = $j3 /* Set maximum j-index

C *****
C
C
C COORDINATE k
C
C *****

symb k1 = 1 /* index for centre of PZT ring element
symb k2 = $k1 + nint ( ( $z2 - $z1 ) / $box ) /* set k-index for edge of PZT
symb kndgrd = $k2 /* Set maximum i-index

C *****
C
C
C GRID COMMAND
C
C *****

```

```

grid $indgrd $jndgrd $kndgrd      /* Create grid,

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c *****

geom
  xcrd $x1 $x2 $i1 $i2
  ycrd $y1 $y2 $j1 $j2
  ycrd $y2 $y3 $j2 $j3
  zcrd $z1 $z2 $k1 $k2
end

c *****
c
c
c
c
c
c
c *****

site
  regn air      /* air
  regn $ceramic $i1 $i2 $j1 $j2 $k1 $k2
  regn $electrode $i1 $i2 $j2 $j3 $k1 $k2
end

c *****
c
c
c
c
c
c
c *****

PLOT MODEL

grph      /* Plot the model to screen
  plot matr
  mirr x on
c mirr z on
  end

c
c
c
c *****

BOUNDARY CONDITIONS

if ( $n_boundflag eq 0 ) then
  /* Free top and bottom boundaries
boun
  side 1 symm
  side 2 free
  side 3 free
  side 4 free
  side 5 free
  side 6 free
else
  /* Absorbing top and bottom boundaries
boun
  side 1 symm
  side 2 absr
  side 3 absr
  side 4 absr
  side 5 absr
  side 6 absr
endif

c *****
c
c
c
c
c
c
c *****

DRIVING FUNCTION

func sine $freqint 1. 0. 0.5      /* Single cycle sine wave at frequency of interest

c *****
c
c
c
c *****

CHOOSE PROPERTIES TO CALCULATE AND INSERT BELOW

calc

```



```

c *****
c PLOTTING PROCEDURE
c *****

proc plot save
exec $nexec2

grph
  nview 4          /* NVIEW opens a window with a specific setup i.e split into 3 subwindows
  colr tabl data 6
  view 1
  plot 1
  view 2
  plot 2
  view 3
  plot 3 /*charge time hist
  view 4
  plot 6
  imag          /* used for .avi generation
end

end$ proc

c *****
c Call procedure PLOT
c *****
proc plot $nloops /*executes 'plot' nloops times

symb #msg 1      /* Shows a message in the console window
Type 't' or 'term' to continue plotting
term

c *****
c
c          Save symbol variables to file for later use
c
c *****

symb #get { labl } jobname          /* find name of run
symb #save symb.$labl              /* save in symb file

stop                               /* return to command prompt

c *****

circ

/* Create first circuit
defn resdmp1                      /* Name of circuit
elem rest sers $vrest             /* Define resistor

c *****
c Create electrode
c *****

piez
  wndo $i1 $indgrd $j1 $j2        /* specify electric window

  defn top $ascale
  node $i1 $indgrd $j2 $j2        /* place active electrode on top of drive element
c conn top resdmp1 volt func

  defn bot $ascale
  node $i1 $indgrd $j1 $j1

  bc top volt func 1.
  bc bot grnd
end

c *****
c
c
c          CHOOSE TIME HISTORIES TO STORE AND INSERT BELOW
c
c *****

pout
  hist func                      /* The input function TIME HIST - 1
  histname electrode vq all       /* Saves voltage and charge (vq) for uppos electroded in TIME HIST - 2 & 3
  histname avrg a disp_top
end

shap
  data ydsp
  node $i1 $indgrd $j1 $j2
  freq 2.5e5

```

```

c
c          PROCESS MODEL
c
c *****

prcs

c *****
c
c          INSERT EXEC COMMAND TO RUN MODEL BELOW
c
c *****

grph
  set imag tiff
  nnew 1
  line on
  plot matr
  imag
  end

symb #msg 1  /* Shows a message in the console window
Material Plotted - Type 't' or 'term' to continue
term

symb #get { step } timestep
symb simtime = $n_cycles * ( 1. / $freqint )
symb nexec = nint ( $simtime / $step )

symb nloops = 50
symb nexec2 = nint ( $nexec / $nloops )

c *****
c Set graphical output to AVI or TIFF for Windows and Linux respectively
c *****

grph
symb #get sysname
symb #get { iloc } charloc $sysname WIN  /* find what system code runs on
if ( $iloc ne 0 ) then
  set imag avi          /* set imag output as AVI
else
  set imag tiff        /* set imag output as TIFF
endif
end
end

```



```

c *****
/* Read Materials file
  symb #read general.matr

c *****
/* Select boundary conditions
  symb n_boundflag = 0.          /* 0 = Free boundaries at top and bottom
                                /* 1 = Absorbing boundaries at top and bottom

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c *****

/* MESHING : Element size below

  symb wavevel = 4000.
  symb freqint = 400e3
  symb freqdamp= $freqint
  symb wavelgth = $wavevel / $freqint
  symb elem = 70
  symb box = $wavelgth / $elem

/* NUMBER CYCLES
  symb n_cycles = 100.

c *****
c
c
c
c
c
c
c *****

  symb ceramic = fpz29

  symb electrode = hard

*****

X-Y CO-ORDINATE SYSTEM

*****
*****

COORDINATE X

*****

  symb x1 = 0.0
  symb x2 = $x1 + ( $width_cer / 2 )

*****

COORDINATE Y

*****

  symb y1 = 0.0
  symb y2 = $y1 + $thick_cer
  symb y3 = $y2 + $thick_elec

*****

I-J CO-ORDINATE SYSTEM

*****
*****

COORDINATE I

```

```

> *****
symb i1 = 1 /* index for centre of PZI ring element
symb i2 = $i1 + nint ( ( $x2 - $x1 ) / $box ) /* set i-index for edge of PZI
symb indgrd = $i2 /* Set maximum i-index
> *****
>
>
> COORDINATE J
>
>
> *****

symb j1 = 1 /* index for centre of PZI ring element
symb j2 = $j1 + nint ( ( $y2 - $y1 ) / $box ) /* set j-index for edge of PZI
symb j3 = $j2 + nint ( ( $y3 - $y2 ) / $box ) /* Set maximum j-index
symb jndgrd = $j3

> *****
>
>
> GRID COMMAND
>
> *****

grid $indgrd $jndgrd axiy /* Create grid, axi-symmetric around y axis

> *****
>
>
> GEOM COMMAND
>
> *****

yeom
xcrd $x1 $x2 $i1 $i2
ycrd $y1 $y2 $j1 $j2
yord $y2 $y3 $j2 $j3
end

c *****
c
c
c MATERIAL SITE DEFINITION
c
c
c *****

site
regn air /* air
regn $ceramic $i1 $i2 $j1 $j2
regn $electrode $i1 $i2 $j2 $j3
end

c *****
c
c
c PLOT MODEL
c
c
c *****

grph /* Plot the model to screen
plot matr
mirr x on
end

c *****
c
c
c BOUNDARY CONDITIONS
c
c
c *****

if ( $n_boundflag eq 0 ) then
/* Free top and bottom boundaries
boun
side 1 symm
side 2 free
side 3 free
side 4 free

else

```

```

boun
    side 1 symm
    side 2 absr
    side 3 absr
    side 4 absr

endif

c *****
c
c
c          DRIVING FUNCTION
c
c *****

func sine $freqint 1. 0. 0.5      /* Single cycle sine wave at frequency of interest

c *****
c
c          CHOOSE PROPERTIES TO CALCULATE AND INSERT BELOW
c
c *****

calc
disp
pres                               /* Calculating pressures
avrg disp_top ydsp unit regn $i1 $indgrd $j3 $j3 /* avrg element top of matching layer
end

c *****
c
c          ELECTRICAL FIELD APPLICATION
c
c *****

c *****
c Create a circuit for electrode
c -----
circ

/* Create first circuit
defn resdmp1                               /* Name of circuit
elem rest sers $vrest                       /* Define resistor

c *****
c Create electrode
c *****

piez
wndo $i1 $indgrd $j1 $j2 /* specify electric window

defn top
node $i1 $indgrd $j2 $j2 /* place active electrode on top of drive element
c conn top resdmp1 volt func

defn bot
node $i1 $indgrd $j1 $j1

bc top volt func 1.
bc bot grnd
end

c *****
c
c
c          CHOOSE TIME HISTORIES TO STORE AND INSERT BELOW
c
c *****

pout
hist func                               /* The input function TIME HIST - 1
histname electrode vq all /* Saves voltage and charge (vq) for uppos electrod in TIME HIST - 2 & 3
histname avrg a disp_top
end

shap
data ydsp
node $i1 $indgrd $j1 $j2
freq 2.5e5

end

```

```

procs

c *****
c
c             INSERT EXEC COMMAND TO RUN MODEL BELOW
c
c *****

grph
  set imag tiff
  nview 1
  line on
  plot matr
  imag
  end

symb #msg 1 /* Shows a message in the console window
Material Plotted - Type 't' or 'term' to continue
term

symb #get { step } timestep
symb simtime = $n_cycles * ( 1. / $freqint )
symb nexec = nint ( $simtime / $step )

symb nloops = 50
symb nexec2 = nint ( $nexec / $nloops )

c *****
c Set graphical output to AVI or TIFF for Windows and Linux respectively
c *****

grph
symb #get sysname
symb #get { iloc } charloc $sysname WIN /* find what system code runs on
if ( $iloc ne 0 ) then
  set imag avi /* set imag output as AVI
else
  set imag tiff /* set imag output as TIFF
endif
end

c *****
c PLOTTING PROCEDURE
c *****

proc plot save
exec $nexec2

grph
  nview 4 /* NVIEW opens a window with a specific setup i.e split into 3 subwindows
  colr tabl data 6
  view 1
  plot 1
  view 2
  plot 2
  view 3
  plot 3 /*charge time hist
  view 4
  plot 6
  imag /* used for .avi generation
  end

end$ proc

c *****
c Call procedure PLOT
c *****
proc plot $nloops /*executes 'plot' nloops times

symb #msg 1 /* Shows a message in the console window
Type 't' or 'term' to continue plotting
term

c *****
c
c             Save symbol variables to file for later use
c
c *****

symb #get { labl } jobname /* find name of run
symb #save symb.$labl /* save in symb file

stop /* return to command prompt

```

ANILLO 2D EN AIRE:

```

ring_2d.finp
mp omp 12
titl ring_2D
symb #get { labl } jobname /* create name to label files
symb #echo on /* no restart file saved

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c
c
c *****

c *****
c
c
c
c
c
c
c
c
c *****

/* MODEL 2D with simetry
|
/* Width ceramic AXIS X
symb width_cer = 30.e-3
symb width_hole = 10.e-3

/* Thickness Layers
symb thick_cer = 5e-3
symb thick_elec = 0.0e-3
c *****
/* Resistance circuit
symb vrest = 50. /* better maiching with the electrodes

/* Read Materials file
symb #read general.matr
c *****
/* Select boundary conditions
symb n_boundflag = 0. /* 0 = Free boundaries at top and bottom
/* 1 = Absorbing boundaries at top and bottom

/* Frequency shapes
symb freq1 = 109e3
symb freq2 = 228e3
symb freq3 = 324e3
symb freq4 = 367e3
symb freq5 = 403e3
symb freq6 = 423e3
c *****
c
c
c
c
c
c
c *****

/* MESHING : Element size below
symb wavevel = 343.
symb freqint = 400e3
symb freqdamp= $freqint
symb wavelgth = $wavevel / $freqint
symb elem = 15
symb box = $wavelgth / $elem

/* NUMBER CYCLES
symb n_cycles = 120.

```



```

c
c
c
c *****
geom
xcrd $x1 $x2 $i1 $i2
xcrd $x2 $x3 $i2 $i3
ycrd $y1 $y2 $j1 $j2
ycrd $y2 $y3 $j2 $j3
end

c *****
c
c
c
c
c
c *****
MATERIAL SITE DEFINITION
c *****

site
regn void /* air
regn $ceramic $i2 $i3 $j1 $j2
regn $electrode $i2 $i3 $j2 $j3
end

c *****
c
c
c
c
c
c *****
PLOT MODEL
c *****

grph /* Plot the model to screen
plot matr
mirr x on
end

c *****
c
c
c
c
c
c *****
BOUNDARY CONDITIONS
c *****

if ( $n_boundflag eq 0 ) then
/* Free top and bottom boundaries
boun
side 1 symm
side 2 free
side 3 free
side 4 free

else
/* Absorbing top and bottom boundaries
boun
side 1 symm
side 2 absr
side 3 absr
side 4 absr

endif

c *****
c
c
c
c
c
c *****
DRIVING FUNCTION
c *****

func sine $freqint 1. 0. 0.5 /* Single cycle sine wave at frequency of interest

c *****
c
c
c
c *****
CHOOSE PROPERTIES TO CALCULATE AND INSERT BELOW
c *****

calc
disp
pres /* Calculating pressures
avrg disp_top ydsp unit regn $i1 $indgrd $j3 $j3 /* avrg element top of matching layer
end

```

```

c *****
c Create a circuit for electrode
c *****

circ

/* Create first circuit
defn resdmp1          /* Name of circuit
elem rest sers $vrest /* Define resistor

c *****
c Create electrode
c *****

piez
wndo $i2 $indgrd $j1 $j2 /* specify electric window

defn top
node $i2 $indgrd $j2 $j2 /* place active electrode on top of drive element
c conn top resdmp1 volt func

defn bot
node $i2 $indgrd $j1 $j1

bc top volt func 1.
bc bot grnd
end

c *****
c
c
c          CHOOSE TIME HISTORIES TO STORE AND INSERT BELOW
c
c
c *****
pout
hist func          /* The input function TIME HIST - 1
histname electrode vq all /* Saves voltage and charge (vq) for uppous electrod in TIME HIST - 2 & 3
histname avrg a disp_top
end

c
c          CHOOSE MODE SHAPES TO CALC
c
c *****

c Define modal frequencies and area
shap
node $i1 $indgrd $j1 $j3

freq $freq1
freq $freq2
freq $freq3
freq $freq4
freq $freq5
freq $freq6

data ydsp
data pize

end

c *****
c
c          PROCESS MODEL
c
c
c *****

prcs

c *****
c
c          INSERT EXEC COMMAND TO RUN MODEL BELOW
c
c
c *****

grph
set imag tiff
nview 1
line on
plot matr
imag
end

```



```

c                               BOUNDARY CONDITIONS
c
c
c *****

/* Absorbing top and bottom boundaries
boun
  side 1 symm
  side 2 absr
  side 3 absr
  side 4 absr

c *****
c
c                               EXTRAPOLATION DEFINITION
c
c *****
/* KIRCHOFF EXTRAPOLATION VARIABLES
symb numext = 8                /* number of nodes away from source for EXTR boundary
symb iext1 = $i1                /* EXTR boundary indices
symb iext2 = $i4 + $numext
symb jext1 = $j2 - $numext
symb jext2 = $j11 + $numext
extr
  ref in $x1 $y6 0            /* set internal reference point for pressure gradient calculation
  defn kirc                    /* kirchoff extrapolation

  node $iext1 $iext2 $jext2 $jext2 /* completely enclose device
  node $iext2 $iext2 $jext1 $jext2 /* completely enclose device
  node $iext1 $iext2 $jext1 $jext1 /* define node surface

  end

c *****
c
c                               DRIVING FUNCTION
c
c *****

func sine $freqint 1. 0. 1. 0. 0. delay /* Single cycle sine wave at frequency of interest

c *****
c

```

```

c *****
c
c          CHOOSE PROPERTIES TO CALCULATE AND INSERT BELOW
c
c *****

calc
  disp
  pres
  avrg disp_top ydsp unit regn $i1 $i4 $j11 $j11 /* Calculating pressures
  end
  /* avrg element top of matching layer

shap
  freq 35e3
  freq 52e3
  freq 72e3
  end

c *****
c
c          ELECTRICAL FIELD APPLICATION
c
c *****

c *****
c Create a circuit for electrode
c *****

circ

  /* Create first circuit
  defn resdmp1 /* Name of circuit
  elem rest sers $vrest /* Define resistor
  end

c *****
c Create electrode
c *****

piez
  wndo $i2 $i4 $j5 $j8 /* specify electric window

  defn actv
  node $i2 $i4 $j5 $j5 /* place active electrode on top of drive element

  defn ground
  node $i2 $i4 $j8 $j8

  conn actv resdmp1 volt func /* Drive applied through circuit
  bc ground grnd
  /* make bottom electrode ground
  slvr dogd * cont /* Use fast piezo solver
  end

data
  hist step 3 /* Create a step function drive
  0.0 0.0
  1.0e-9 1.0
  1.0 1.0

plod
  pdef pld1 step $prestress /* Pressure load is step function, scaled my $prestress
  vctr vct1 0. 1. 0. /* Create vector up the way
  vctr vct2 0. -1. 0. /* Create vector down the way
  sdf2 pld1 vct1 hard fpz29 $i2 $i4 $j5-1 $j5+1 /* Apply pressure between nylon and ceramic near tail mass
  sdf2 pld1 vct2 hard fpz29 $i2 $i4 $j7-1 $j7+1 /* Apply pressure between nylon and ceramic near head mass
  end

c *****
c
c          CHOOSE TIME HISTORIES TO STORE AND INSERT BELOW
c
c *****

pout
  hist func /* Save drive function
  histname electrode vg actv /* Save the voltage and charge from the "actv" electrode
  histname avrg a disp_top

  end

c *****
c
c          PROCESS MODEL
c
c *****

drlx auto
  wndo $i2 $i4+1 $j4-2 $j8+2

prcs

```

```

c *****
c
c                               PLOT MODEL
c *****

grph

  nview 1
  ttl 1
Kirchoff Extrapolation Example
  colr tabl matr 4 /* set material colour table to 4
  colr tabl data 6 /* set data colour tabl to 6
  line off
  mirr x
c *** Draw extrapolation boundary line ***
  draw node $iext1 $iext2 $jext2 $jext2 /* completely enclose device
  draw node $iext2 $iext2 $jext1 $jext2 /* completely enclose device
  draw node $iext1 $iext2 $jext1 $jext1 /* define node surface

  end

c Now let's look at what has been created

grph

  set iamg tiff
  nview 1 /* create a display window with one 'sub window'

  plot matr /* plot all elements, with a different colour for
            /* each material
  end
  symb #msg 1 /* Shows a message in the console window
Material Plotted - Type 't' or 'term' to continue
term
c *****
c
c                               INSERT EXEC COMMAND TO RUN MODEL BELOW
c *****

symb #get { step } timestep /* store timestep size in variable 'step'

proc showstate save
grph

  nview 2 2

```

CÁLCULO ADMITANCIA E IMPEDANCIA:

```

analysis.revimp
|
| *****
| c
| c           Analyse Impedance
| c
| c *****
|
| c Read history file
| read f1 transducer_w.flxhst          /* Read time history
|
|
| c Input variables
| symb npad = 10
| symb fmin = 10.e3
| symb fmax = 80.0e3
| symb tag = ceramica_aire
|
|
| c Calculate frequency domain
| freq
|   file f2           /* Local file to store results
|   type amp         /* Results will be amplitude and phase
|   time pad $npad   /* Zero pad
|   impd f1 2 f1 3   /* Calculate the impedance of the disk
|
|   file f3           /* Calculate admittance and store
|   type real
|   time pad $npad
|   admt f1 2 f1 3
|
|   end
|
| freq
|   file f4           /* Local file to store results
|   type amp         /* Results will be amplitude and phase
|   fft f1 4         /* Results will be amplitude and phase
|   end
|
| c Plot impedance graphs
| grph
|   nview 2
|   pset wndo $fmin $fmax          /* Scale x
|   plot f2 1                      /* Plot the impedance of the device
|   set log y on
|   plot f2 2
|
| c Wait for user input
| term
|
|
| c Plot admittance graphs
| grph
|   nview 2
|   pset wndo $fmin $fmax          /* Scale x
|   plot f3 1                      /* Plot the conductance of the device
|
|   plot f3 2
|   end
|
| c Wait for user input
| term
|
|
| c Save data to text file
| grph
|   pset wndo $fmin $fmax          /* Scale x
|   plot f2 1 f2 2
|   writ onex imp_$tag.txt
|
|   plot f3 1 f3 2
|   writ onex adm_$tag.txt
| grph
|   pset wndo $fmin $fmax          /* Scale x
|   plot f4 1 f4 2
|   writ onex ydsp_$tag.txt
|
|
| end

```

MODOS ARMÓNICOS:

```
shape.fixinp
!rest file transducer_w.flxrsto      /* Name of restart file
rest                               /* Restart the model
rest no                             /* Don't overwrite the restart file

mp omp 12

symb mode_num = 3
symb scale = 0.5
symb zoom_num = 1.0

c *****
c
c          Create mode shape video
c
c *****

grph

set imag avi                        /* set image type to avi movie
eye -1, 1, -1.
line on /* turn grid lines on
comb matr void watr

mirr x on
end

do loop2 I 0 350 10                /* Loop through phase angles

grph
nview 1

view 1
disp $scale
plot shap $mode_num $I           /* Plot mode shape (number) for angle I
zoom $zoom_num

imag                               /* Write to movie frame
end

end$ loop2
```

PATRÓN DE DIRECTIVIDAD:

```

beamfreq.revinp
-----
mp omp 12
c *****
c
c          INSERT YOUR DATA READ COMMANDS BELOW
c
c *****

symb fname = transducer_w
c symb #read symb.$fname      /* read in symbol variables

c symb #read s_3D_cd_water.h
read fl '$fname.flxhst'      /* read in time histories

c *****
c
c          POST PROCESSING PARAMETERS
c
c *****

c *****
c
c Set parameters for extrapolation
c Generate an 'arc' centred on the front of the ceramic
c And take a single point on that to extrapolate to
c
c *****

symb npad = 3                /* FFT padding factor for finer delta-f
symb freqbeam = 40.e3        /* frequency to take beam profile at
symb radius = 10.           /* radius of extrapolated line - 1m for farfield
                             /* value of rx taken from FE calculated point
symb startz = 0.            /* first point on axis
symb endz = 0.              /* final point on axis
symb strtang = -90.         /* first angle
symb endang = 90.           /* final angle
symb ipointz = 91           /* number of angles to calc

c *****
c
c          EXTRAPOLATION
c
c *****

axis
defn beam cyl2  0. 0. 0.    1. 0. 0.    0. 1. 0.
end

extr
data $fname.flxext      /* read in extrapolation data
file f2 cler kirc       /* name output file
c   mirr x- symm        /* list any symmetry conditions (axisymmetry already accounted for)
c   mirr z- symm

surf cylin beam $radius $startz $endz 1 $strtang $endang $ipointz /* specify extrapolation point
calc 1 stor              /* calculate
end

c *****
c
c          PLOT EXTRAPOLATION
c
c *****

symb nmid = ( $ipointz - 1 ) / 2 + 1

grph
plot f2 $nmid

end

term

c *****
c
c          MANIPULATE DATA - TIME OR FREQUENCY
c
c *****

```

```

c *****
c
c Mirror beam data into array called 'beam'.
c Must create the array first.
c
c *****

c *****
c
c MANIPULATE DATA - TIME TO FREQUENCY
c *****

freq
file fn
time pad $npad
fft fla 1 /* get frequency response of drive for normalisation
end

do loop I 1 $ipointz

freq
file f3 cler /* use 'cler' option to remove previous FFT and save memory
time pad $npad
wndo hann righ
fft f2 $I
end

make
file f4 cler
curv { f3 1 } / { fn 1 }
end

symb #get { freq vall } curvvalu f4 1 $freqbeam interp /* read array value for FFT'd pressure
symb #set $vall beam $I 1 /* set positive half of new array
c symb #set $vall beam $ipntneg 1 /* set negative half of new array
c symb ipntpos = $ipntpos + 1 /* increment positive place counter
c symb ipntneg = $ipntneg - 1 /* increment negative place counter
end$ loop

c *****
c Plot beam profile and write out to temp file for scaling
c *****

grph
nvw 1
plot beam
writ onex nolb temp.dat
end

read bml colm temp.dat /* read back in as time history

c *****

```