

TRANSDUCTOR ULTRASONICO DE POTENCIA PARA CAMARAS DE TRATAMIENTO CON CAMPO ACUSTICO ESTACIONARIO DE ALTA INTENSIDAD

PACS: 43.38+n

V.M. Acosta¹, J. Bon², A. Pinto¹, E. Riera¹

¹ Dpto. Sensores y Sistemas Ultrasónicos (DSSU), ITEFI, CSIC.
Serrano 144, E28006 Madrid, Spain

² Food Technology Department Universitat Poliècnica de Valencia
E46022 Valencia, Spain
E-mail: vm.acosta@csic.es

ABSTRACT

This work describes the methodology used in the design and development of a piezoelectric transducer with flat rectangular-plate radiator and piston like radiation. The directive radiation is achieved by steps reflectors. The emitter and reflectors are placed in a cavity where high sound pressure levels are achieved in a standing wave field. This way enough energy is stored to enhance the kinetic of the drying process. For this purpose, a power transducer with a piezoelectric vibrator and a flat flexural vibrating plate has been designed and optimized. The power capacity of the transmitter is given by the volume of the ceramic stack, by the fatigue strength of the vibrating plate and by the operation stability at the working frequency. It is also important to avoid coupling with another untuned modes and to avoid heating in the stack ceramic and in the critical plate-vibrator coupling zone. Therefore, strict design criteria are required that can ensure a stable response of the transducer under power operation without producing fails or fatigue cracks at ultrasonic frequencies.

RESUMEN

En este trabajo se describe la metodología utilizada en el diseño y desarrollo de un transductor piezoeléctrico de placa rectangular plana con radiación tipo pistón. La radiación directiva se consigue mediante reflectores escalonados. El emisor y los reflectores se colocan en una cavidad donde se consigue alcanzar altos niveles de presión sonora al crear un campo estacionario. De ésta forma, se consigue almacenar energía suficiente para acelerar la cinética del proceso de secado. Se ha diseñado y optimizado un transductor, constituido por un vibrador piezoeléctrico y una placa plana vibrando a flexión. La capacidad de potencia del emisor, viene dada por el volumen de las cerámicas, la resistencia a fatiga de la placa vibrante y la estabilidad de funcionamiento a la frecuencia de trabajo. Además es importante evitar el acoplamiento con otros modos no deseados, calentamientos en el bloque de cerámicas y en la zona crítica de acoplamiento placa-vibrador. Para ello se requieren aplicar criterios de diseño muy estrictos. Así se puede asegurar un funcionamiento estable del transductor, sin llegar a provocar fallos o grietas de fatiga a frecuencias ultrasónicas.

INTRODUCCION

En la práctica es difícil alcanzar un diseño, construcción y montaje perfectos de un transductor piezoeléctrico. Los síntomas de un diseño o montaje defectuoso se manifiestan a través de la aparición de ruidos, calentamientos locales y variaciones de parámetros tales como la impedancia acústica, ancho de banda o incluso el rendimiento. El desacople de piezas por defectos de mecanizado o por pérdidas de tensión mecánica en los tornillos, roces entre las piezas o incluso la aparición de microgrietas en los materiales puede ser consecuencia de un montaje en el que no se ha llevado a cabo un control riguroso de los materiales utilizados, del proceso de fabricación o del montaje del conjunto.

Los principales criterios de diseño para un correcto funcionamiento del transductor, son: 1) frecuencia de resonancia del transductor, próxima a la frecuencia de resonancia de la placa radiante. 2) correcta posición de los nodos en las superficies de fijación. 3) máxima amplitud de desplazamiento en la boca del amplificador mecánico. 4) separación de otros modos propios cercanos al modo de trabajo, ya sean modos propios de la placa, del vibrador o de cualquiera de sus componentes. El emisor que se presenta en este trabajo está constituido básicamente por un vibrador tipo sándwich, un amplificador mecánico (AM) de la vibración, y una placa radiante con superficie extensa. Estos elementos están acoplados mecánicamente uno a continuación del otro, de manera que la vibración generada por el elemento transductor y el AM excite la placa radiante en uno de sus modos flexionales de vibración.

Para el diseño numérico de los transductores se aplica el método de los elementos finitos (FEM), usando el código comercial COMSOL Multiphysics v 5.1 [1] válido para el acoplamiento multifísico de la piezoelectricidad, componentes estructurales y modelización de campo acústico lineal. Previamente se realiza una primera aproximación de algunos de sus componentes mediante un cálculo analítico. La caracterización de las propiedades mecánicas del material de la placa radiante y de cada uno de los componentes estructurales que forman el transductor es muy importante si se quiere obtener mayor precisión en el cálculo numérico y una óptima validación experimental. Para ello se utilizan técnicas de evaluación no destructiva, midiendo las velocidades de propagación de ondas acústicas longitudinales y transversales en cada uno de los 3 ejes (X, Y, Z) dentro del sólido. Posteriormente se determinan analíticamente las propiedades ortotrópicas del material.

DISEÑO ANALITICO DEL TRANSDUCTOR

Como datos de partida en el diseño del transductor se lleva a cabo un cálculo analítico del sándwich para obtener las dimensiones aproximadas de la masa y contramasa [2]. También se puede realizar un cálculo analítico del AM para determinar las longitudes en función del diámetro [3]. Para el diseño de la placa radiante se comienza por una primera aproximación de las dimensiones de la placa vibrante fijando la frecuencia en función del proceso. Se usan las ecuaciones de placa plana rectangular de extremos libres [4, 5] para determinar el resto de las dimensiones para el número de líneas nodales que se desea.

En general el vibrador que excita la placa se diseña considerando que actúa como una barra axisimétrica compuesta por diferentes materiales vibrando libremente en un modo extensional con modos resonantes múltiplos enteros de $\lambda/2$, donde λ representa la longitud de onda. El AM se diseña para resonar a $\lambda/2$, actuando como amplificador del movimiento vibratorio del extremo radiante del sándwich con una sección mayor, conectada al sándwich y una sección menor conectada a la placa vibrante. La unión entre las dos secciones tiene un radio de curvatura para disminuir las tensiones en la transición [3]. A éste transductor se le ha añadido otro $\lambda/2$ en la parte delgada con el fin de alargar el AM sin modificar su factor de amplificación para que el vibrador no interfiera en la radiación de los reflectores.

PLACA RADIANTE

La placa radiante es uno de los componentes más importantes ya que condiciona la máxima capacidad de potencia del transductor, y su geometría determina la focalización o direccionalidad del campo acústico radiado según las necesidades requeridas en la aplicación. La direccionalidad del emisor, hasta ahora se ha conseguido mediante placas de perfil escalonado y biescalonado. Con un nuevo diseño de emisor ultrasónico con placa plana y reflectores escalonados [6] se obtiene una alta direccionalidad de forma más económica y sencilla, aprovechando además las dos caras radiantes de la placa. El objetivo es poner en fase la radiación emitida de todas las zonas de vibración de la placa. Se obtienen mediante un análisis modal realizado con FEM todos los modos próximos a la frecuencia de resonancia deseada. Seguidamente se busca el modo de vibración flexional con 12 líneas nodales transversales paralelas al lado corto. Su geometría y materiales vienen condicionados por la aplicación; frecuencia requerida para el proceso, capacidad de potencia y distribución de campo acústico. La distribución de desplazamientos de una placa plana es bastante homogénea como se observa en la figura 1a.

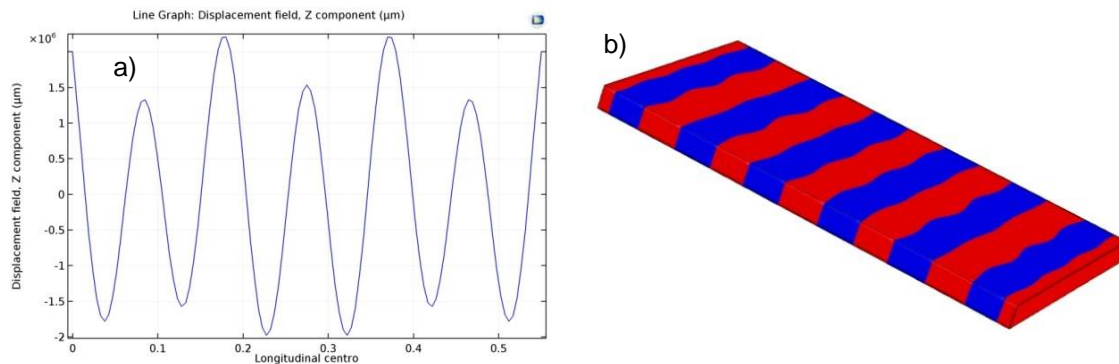


Fig. 1.- a) Distribución de desplazamientos y b) fase de la placa plana.

En la figura 1 se muestra la distribución de desplazamientos de la placa vibrante, así como la fase de vibración. Se observa la homogeneidad de su distribución de desplazamientos. Una vez realizado el análisis modal y determinada la frecuencia de resonancia del modo deseado, se realiza un cálculo de la máxima capacidad de potencia de la placa [7], mediante un análisis armónico a la frecuencia de trabajo aplicando una carga de desplazamiento perpendicular a la superficie radiante en cualquier punto de la placa. La capacidad de potencia quedará limitada por la resistencia máxima a la fatiga ultrasónica del material [8].

CERAMICAS PIEZOELECTRICAS PZT802

Las cerámicas constituyen el corazón del vibrador ultrasónico al ser el componente en el que la energía eléctrica de excitación se transforma en energía mecánica de vibración. Las propiedades más importantes que deben reunir éstas cerámicas son: alto factor de calidad mecánico ($Q_m > 1000$), y temperatura máxima de trabajo de 100°C . No es recomendable sobrepasar los 70°C para trabajo en continuo a fin de garantizar una larga vida útil. Las cerámicas envejecen bajo el efecto de la presión y de la temperatura acelerándose el proceso si el efecto de ambas se conjunta. Otro aspecto importante a tener en cuenta es el pre-stress al que debe estar sometido el stack de cerámicas, y que debe ser de entre 25 MPa y 30 MPa, mientras que la tensión dinámica máxima recomendada es de 20 MPa. Las tolerancias geométricas de paralelismo deben ajustarse a las normas USA: DOD-STD-1376A (SH). Para las cerámicas estándar: Hasta $\varnothing 50$ mm se permite un defecto máximo de paralelismo inferior o igual a 0,03 mm. Hasta $\varnothing 100$ mm se permite un defecto máximo de paralelismo inferior o igual a $\leq 0,06$ mm. Actualmente se utilizan cerámicas compuestas por Titanato Zirconato de Plomo,

de bajas pérdidas mecánicas y eléctricas, cuya denominación comercial es: Morgan Matroc Electroceramics MM PZT8 \varnothing_{ext} 38 x \varnothing_{int} 13 x 6,35. En general para la modelización numérica de las cerámicas sus propiedades electro-mecánicas son obtenidas directamente de los valores de catálogo del fabricante. Aunque existe una dispersión en las propiedades electro-mecánicas del material, debidos a su falta de homogeneidad, el error que se obtiene mediante el cálculo en el análisis dinámico del transductor completo es despreciable con respecto a la variabilidad producida por la carga dinámica del resto de los componentes metálicos del dispositivo vibrante. La figura 2 muestra la comparación de la respuesta dinámica entre la medida experimental de una cerámica PZT802 con un Analizador de Impedancias HP 4191A y los resultados obtenidos del modelo 3D mediante el cálculo numérico usando un modelo sin pérdidas y con los valores de catálogo.

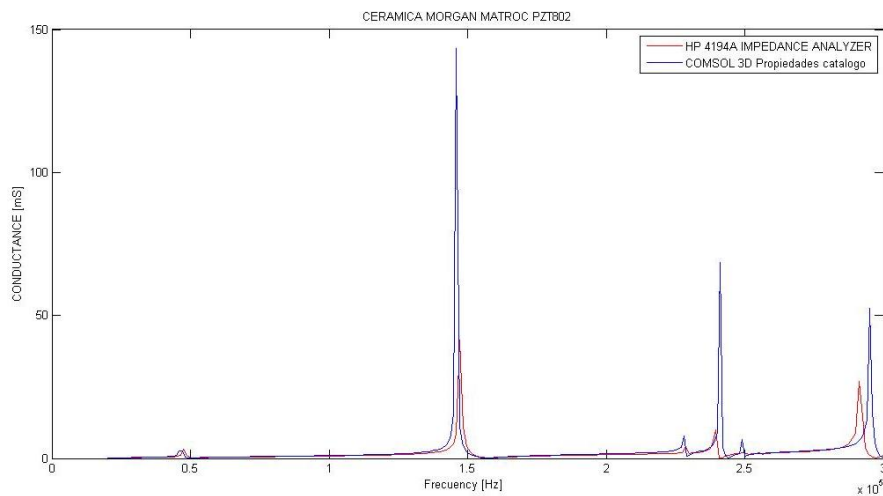


Fig 2.- Validación numérico-experimental modelo piezoelectricidad.

En la figura 3 se muestra la deformación en el modo “thickness” de un anillo piezoeléctrico, y la influencia de sus otras dimensiones en la deformación del modo espesor.

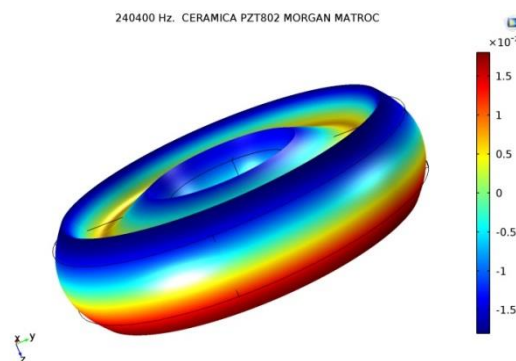


Fig 3.- Distribución desplazamientos y deformación de un anillo cerámico PZT802 en su modo “thickness”

SANDWICH PIEZOELÉCTRICO

El sándwich o elemento de transducción consiste en cuatro cerámicas piezoeléctricas en paralelo, colocadas dos a dos con las polaridades en direcciones opuestas y separadas por unos terminales eléctricos. Los elementos piezoeléctricos con sus terminales van acoplados mecánicamente a dos cilindros de acero inoxidable, la masa y la contramasa, constituyendo el

sándwich piezoeléctrico. Todos estos elementos van unidos entre sí por medio de un tornillo central que además conecta eléctricamente la masa y la contramasa, pero que está aislado mediante un casquillo de teflón de las cerámicas piezoeléctricas y de los terminales eléctricos, fig. 4.

El volumen de las cerámicas viene determinado por tres factores: Límites eléctricos [9], mecánicos y térmicos [10]. El límite eléctrico viene principalmente limitado por el campo eléctrico que es posible aplicar a la cerámica, la máxima energía que puede almacenar, y el factor de acoplamiento electromecánico K_{33} . El límite mecánico está determinado por la máxima tensión mecánica que deben soportar las cerámicas dentro de su límite elástico. Para las cerámicas del tipo PZT-8 éste valor es del orden de 20 MPa. El límite térmico está determinado por el punto de Curie (temperatura a la cual la cerámica pierde sus propiedades piezoeléctricas, es decir, se despolariza). Por ello, se recomienda que no exceda el rango 70 – 120°C en función del tipo de cerámica. Mediante FEM también se puede realizar un análisis estático aplicando un pretensado en las cerámicas de 250 kg/cm² [4]. El pretensado tiene como fin incrementar la resistencia a la fatiga, mejorar el acoplamiento entre las fases y disminuir las pérdidas mecánicas y la impedancia eléctrica. A continuación, se realiza un análisis modal para la obtención de la frecuencia de resonancia del sándwich piezoeléctrico, que servirá de validación durante el proceso de montaje del sándwich.

VIBRADOR ULTRASONICO

El vibrador mostrado en la figura 5 está constituido por el sándwich piezoeléctrico y un amplificador mecánico (AM) que consiste en una barra metálica cilíndrica con dos tramos múltiples de $\lambda/4$ de longitud y de distinta sección cuya transición tiene un determinado radio de curvatura. La sección mayor es igual a la de los cilindros del elemento de transducción. La transformación de amplitud viene dada por la razón de las áreas de las dos secciones. Generalmente se trata de un elemento resonante a media longitud de onda cuyo objetivo es amplificar la vibración del elemento de transducción para obtener una elevada amplitud en el extremo en conexión con la placa radiante. En este transductor se le ha añadido otra media longitud de onda con el fin de alargar la longitud del vibrador, de tal modo que no interfiera en la radiación de la placa obstaculizando su transmisión a través de los reflectores. Se ha realizado un modelo por elementos finitos obteniendo la respuesta dinámica del vibrador, y se ha buscado su modo extensional donde se obtiene la mayor amplitud de desplazamiento en la punta.

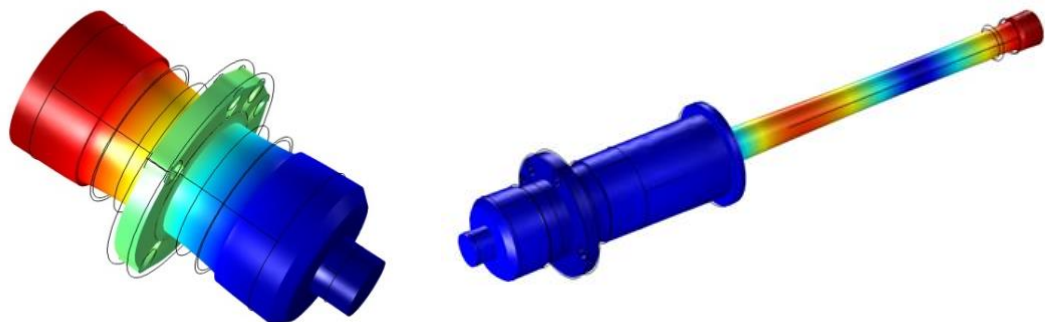


Fig. 4.- Modo extensional de resonancia del sandwich *Fig. 5.- Modo extensional de resonancia del vibrador*

En la figura 6 se muestra la distribución axial del AM de los modos de resonancia próximos a la frecuencia de trabajo. Destaca claramente la amplificación del modo extensional a la frecuencia de 22798 Hz correspondiendo a un factor de amplificación de 10.

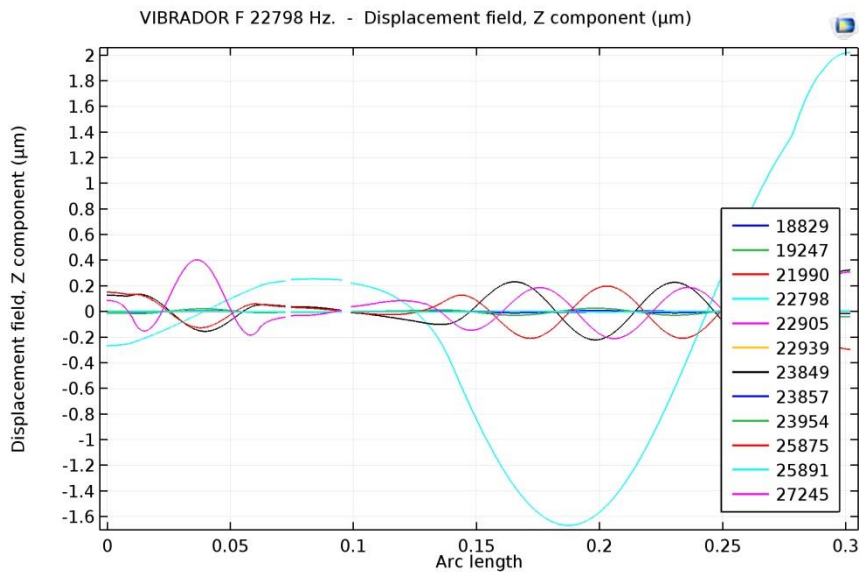


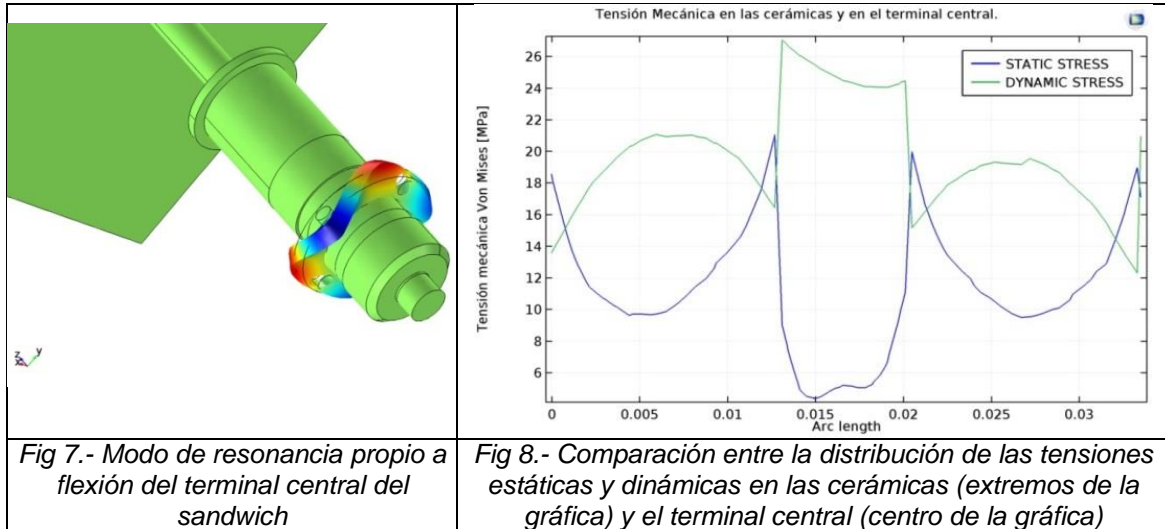
Fig. 6.- Distribución de desplazamientos en diferentes modos propios de resonancia del vibrador. Cada línea representa el desplazamiento vs. la longitud de arco para cada frecuencia.

TRANSDUCTOR DE PLACA

Mantener la estabilidad de funcionamiento de un transductor de potencia requiere un diseño y ajuste complejo debido al elevado número de modos de resonancia presentes en la estructura. Para ello es necesario modelizar la estructura completa en 3D y analizar minuciosamente los resultados del análisis dinámico obtenido en el cálculo numérico. Es importante alejar los modos propios de la estructura vibrante completa del modo de trabajo. Resonancias propias del terminal central (figura 7), modos de flexión, torsión y otros modos que se puedan excitar por cercanía al modo de trabajo. Es importante que los puntos donde se va a fijar el vibrador en la carcasa exterior del transductor coincidan con los nodos del vibrador, donde el desplazamiento es cero. Un desplazamiento en la posición de los nodos en el vibrador, provoca calentamientos y ruidos. La amplitud de desplazamiento en la boca del amplificador, así como en el centro de la placa debe ser máxima. La frecuencia de la placa debe ser muy próxima a la del transductor completo. La capacidad de potencia viene limitada por el material, así como de la distribución de desplazamientos que debe ser lo más homogénea posible en toda su superficie.

El punto más crítico que puede limitar la capacidad de potencia de la placa vibrante, es el acoplamiento entre la placa y el vibrador. El cambio de la vibración extensional en el vibrador, a flexional en la placa, implica un diseño óptimo de la conexión entre el amplificador mecánico y la placa, mediante modificaciones en el espesor de la arandela del tornillo de la placa, así como en los radios de curvatura de la arandela, del agujero y de la boca del AM con el fin de disminuir las tensiones mecánicas en el punto de conexión. Se deben minimizar las tensiones mecánicas en ésta zona, y dejar que la tensión máxima en el transductor esté localizada en la placa. Entonces será válido el cálculo de la capacidad de potencia estimado durante el diseño de la placa y se obtendrá la máxima potencia admisible de la placa radiante. Pero si durante su funcionamiento existe un acoplamiento de modos con una distribución de desplazamientos para la que no ha sido diseñado el transductor la placa se puede romper por fatiga. Para ello debemos analizar todos los modos de resonancia propios de la estructura, separando mediante modificaciones en la geometría los modos de resonancia cercanos a la frecuencia de trabajo, así como los modos cercanos a sus armónicos. Además hay que analizar las tensiones dinámicas en las cerámicas piezoeléctricas para la potencia nominal del transductor con el fin de minimizar los efectos no lineales de las cerámicas. En la figura8 se muestran las tensiones

estáticas tras el pretensado del sándwich de 25 MPa y las dinámicas para la máxima capacidad de potencia de la placa.



CAMARA TRATAMIENTO

Una vez diseñado el transductor, se modeliza la cámara de tratamiento con el fin de obtener la distribución de presión acústica en su interior, en éste caso con los reflectores a 45°. El elevado número de elementos de todos los componentes estructurales y piezoeléctricos más todo el volumen de aire de la cámara de tratamiento, donde se recomienda un tamaño máximo de elemento de diez veces la longitud de onda, implica decenas de millones de grados de libertad de varias físicas acopladas (estructura, piezoelectricidad, acústica). Por limitaciones de capacidad computacional debe simplificarse y modelizarse únicamente la placa ya diseñada dentro de la cámara. La influencia del volumen de aire modelizado en la respuesta dinámica del transductor es prácticamente despreciable, por lo que podemos de modelar su interacción con el vibrador. En la figura 9 se muestra la placa radiante dentro de la estructura de reflectores a 45°, así como la cámara de tratamiento donde se colocarán las bandejas con las muestras a deshidratar.

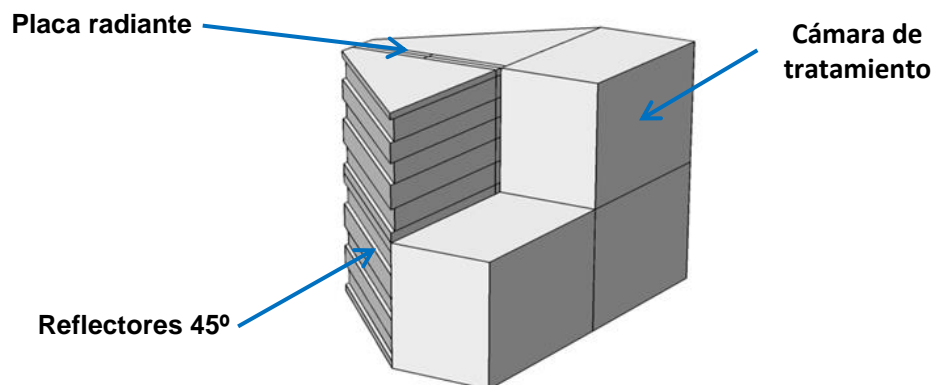


Fig 9.- Geometría de la cámara de tratamiento y placa radiante

En el cálculo del campo acústico se han obtenido valores promedios de nivel de presión sonora de 167 dB en el interior de la cámara (Figura 10). Actualmente se están realizando medidas de campo acústico para la validación de los resultados donde también queremos determinar empíricamente la atenuación no-lineal en el interior de la cámara [11].

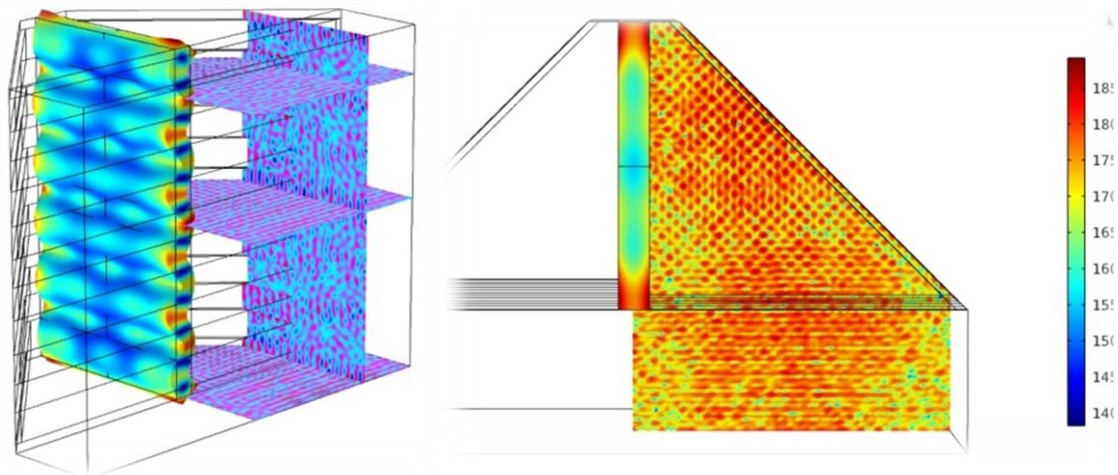


Fig 10.- Distribución de presiones en el interior de la cámara.

COMENTARIOS FINALES

La realización de modelos mediante el método de los elementos finitos de físicas acopladas entre la piezoelectricidad, la parte estructural y su interacción con el medio fluido, es válido para el diseño de transductores piezoeléctricos de potencia. A pesar de las limitaciones computacionales podemos realizar simplificaciones que nos aproximen el cálculo numérico a los resultados experimentales. La modelización de efectos no lineales en las cerámicas piezoeléctricas con potencia y la no-linealidad del medio serían los siguientes pasos para una validación completa de éstos dispositivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al MINECO la financiación del proyecto del plan nacional DPI 2012 – 37466-C03-01 (USDIS)

REFERENCIAS

- [1] Users Guide COMSOL Multiphysics 5.1.
- [2] Neppiras, E.A., 1973. *The prestressed piezoelectric sandwich transducer*, Ultrasonics International Conference Proceeding, 295-302.
- [3] Beldford, John F., 1960. *The stepped horn*. Proceeding Natl. Electronics Conference. Chicago
- [4] Leissa, Arthur, W., 1993. *Vibration of Plates*, Ohio State University
- [5] Caldersmith, G.W , 1984. *Vibrations of orthotropic rectangular plates*, J. Acoustica 56, 144-152
- [6] Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., Riera-Franco de Sarabia, E., Vázquez-Martínez , F., Campos-Pozuelo, C., V.M. Acosta-Aparicio, V.M., 2002. *Recent developments in vibrating-plate macrosonic transducers*. Ultrasonics, 40 (1-8) 889-93.
- [7] F. Vázquez M., G. Rodríguez C., C. Campos P., L.Elvira S., J.A. Gallego Juárez. *Nuevos avances en el desarrollo de transductores macrosónicos de placa escalonada*. Congreso Ibérico de Acústica, 14-16 Septiembre 1998, Lisboa. Libro de Comunicasoes, 387-390.
- [8] Campos –Pozuelo, C., and Gallego-Juárez, J.A., 1996. *Limiting strain of metals subjected to high-intensity ultrasound*. Acta Acustica united with Acustica, 82, 823-828
- [9] Gallego-Juárez, J.A., Rodríguez-Corral, G., 1973. *Análisis mediante circuito equivalente de un emisor ultrasonoro con placa vibrante*. Electrónica Física Aplicada, 16(4) 605-615.
- [10] J. Van Randerat R.E. Settingrington 1974. *Piezoelectric ceramics*. PHILIPS. Application book.
- [11] Mednikov, E.P., 1965. *Acoustic coagulation and precipitation of aerosols*. Consultants Bureau New York.