

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA**

**DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DE LENTES ACÚSTICAS DE ÍNDICE
DE REFRACCIÓN VARIABLE PARA LA FOCALIZACIÓN DE
ULTRASONIDOS EN AGUA.**

TESIS DE MÁSTER

Autor:

Daniel Tarrazó Serrano

Director/es:

D. Rubén Picó Vila

D. Vicent Romero García

GANDIA, 2013

ÍNDICE

1.	ABSTRACT	3
2.	INTRODUCCIÓN	4
2.1.	CRISTAL DE SONIDO	4
2.2.	AXISIMETRÍA	5
3.	MOTIVACIÓN	6
4.	OBJETIVOS	7
5.	HERRAMIENTAS NUMÉRICAS	8
5.1.	MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS	8
5.2.	COMSOL Multiphysics.....	9
5.2.1.	MÓDULO FLUIDO-ESTRUCTURA	10
6.	DISEÑO DE LA LENTE	11
7.	DISEÑO DEL MODELO EN COMSOL Multiphysics.....	13
8.	RESULTADOS.....	21
8.1.	FOCALIZACIÓN DE LA LENTE ACÚSTICA.....	21
8.2.	OPTIMIZACIÓN.....	27
9.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	32
10.	AGRADECIMIENTOS.....	34
11.	BIBLIOGRAFÍA	36

1. ABSTRACT

En este trabajo se analizan las propiedades de propagación de las ondas sonoras en un sistema con simetría axial cuyos dispersores son toroides rígidos. El objetivo es el diseño, construcción y caracterización de un sistema para la focalización eficiente de las ondas mediante elementos pasivos (lente acústica). Mediante simulaciones numéricas en el dominio frecuencial, basadas en el método de los elementos finitos, se muestra la posibilidad de control espectral y espacial de las ondas acústicas propagándose a través de una estructura de compuesta de dispersores de tipo toroidal. El interés del uso de estructuras axisimétricas para la focalización radica en que ésta es la simetría presente en la mayoría de las fuentes acústicas tanto en el rango audible como en ultrasonidos ^[1].

En el trabajo se discuten los resultados numéricos y los datos experimentales que se han obtenido para una lente axisimétrica que trabaja en el rango de grandes longitudes de onda (régimen de homogenización) y se comporta como un lente con un gradiente espacial de índice de refracción. Las propiedades de focalización y la caracterización del foco obtenido mediante esta lente son el eje principal de este trabajo. El sistema está diseñado bajo la suposición de que las ondas se propagan en el régimen de la acústica lineal, y por tanto podría ser totalmente re-escalado a otros rangos de frecuencia. Con vistas a futuras aplicaciones en un futuro en ultrasonidos, donde la focalización cobra importancia en diversas aplicaciones.

The properties of sound wave propagation in a sonic crystal with axial symmetry is analyzed. The scatters are rigid toroids. The aim is the design, construction and characterization of a system to get an high focalization of waves through passive elements (acoustic lens).

The control of the frequency and spatial spectrum of the system is shown by means of numerical simulations in the frequency domain. Axi-symmetrical structures have been used for focalization purposes because it is the kind of symmetry found in most of the acoustic sources in the audible range as well as in ultrasound. The paper deals with the numerical results and the experimental data obtained for an axi-symmetrical lens working in the long wave length regime and behaves as a lens with a spatial gradient of refraction index. The system is designed under the supposition that the waves propagate according to lineal acoustic equations, and therefore it may be scaled to other frequency ranges.

2. INTRODUCCIÓN

2.1. CRISTAL DE SONIDO

Un cristal de sonido (CS) se puede denominar como aquel sistema en el que existe una distribución periódica de elementos en un medio fluido (normalmente aire o agua), ordenados según las dimensiones de la longitud de onda acústica con la que van a interactuar, de forma que tengan lugar los fenómenos de interferencia. De tal manera que se pueden encontrar CS de grandes dimensiones (figura 1) o bien de pequeñas dimensiones (figura 2).

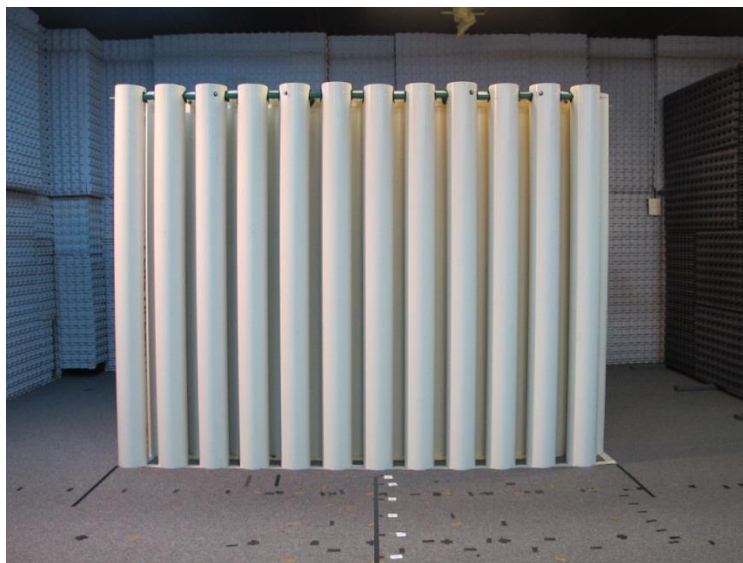


Figura 1 – Ejemplo de CS (Fuente: LAPSo)

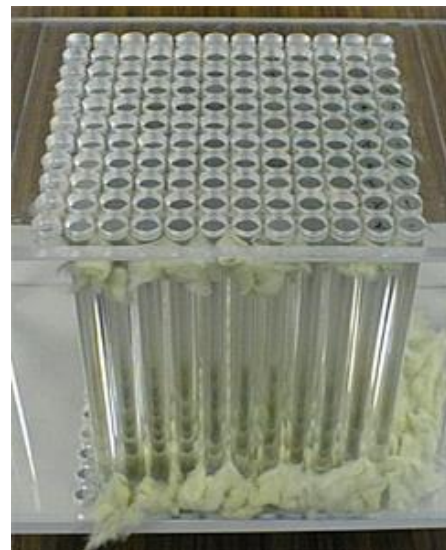
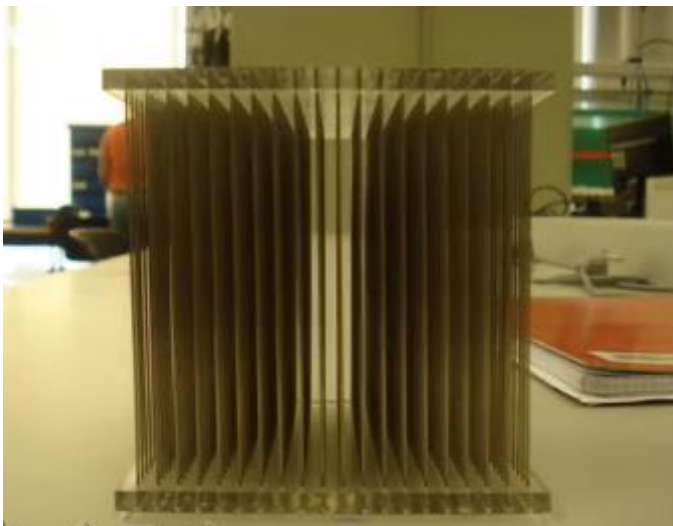


Figura 2 – Ejemplos de CS (Fuente: EPSG izquierda y SciForums derecha).

Una de sus propiedades principales es el *bandgap* o banda prohibida (BG). El BG es el rango de frecuencias en las que la propagación de ondas no se produce.

Otras propiedades relacionadas con la relación de dispersión son el control espectral y espacial del sonido que comportan posibles aplicaciones en el rango de los ultrasonidos como pueden ser la hipertermia o aplicaciones submarinas.

Lo interesante de estas estructuras es que para longitudes de onda mayores que la distancia entre dispersores, se pueden considerar como medios fluidos efectivos cuyas propiedades están definidas por su factor de llenado.

2.2. AXISIMETRÍA

La simetría axial (también llamada rotacional, radial o cilíndrica) es la simetría que existe alrededor de un eje, de modo que un sistema tiene simetría axial o axisimetría cuando todos los semiplanos tomados a partir de cierta mediatriz y conteniéndolo presentan idénticas características. ^[3]

Dada una recta e se llama simetría axial de eje e al movimiento que transforma a un punto P en otro punto P' verificando que:

- El segmento PP' es perpendicular a e .
- Los puntos P y P' equidistan del eje e .
- Dicho de otra forma el eje e es la mediatriz del segmento PP'

La simetría axial no solo se presenta entre un objeto y su reflexión, pues muchas figuras que mediante una línea pueden partirse en dos secciones que son simétricas con respecto a la línea. Estos objetos tienen uno (o más) ejes de simetría.

La simetría axial se da cuando los puntos de una figura coinciden con los puntos de otra, al tomar como referencia una línea que se conoce con el nombre de eje de simetría. En la simetría axial se da el mismo fenómeno que en una imagen reflejada en el espejo.

A los puntos que pertenecen a la figura simétrica se les llama puntos homólogos, es decir, A' es homólogo de A , B' es homólogo de B , y C' es homólogo de C . Además, las distancias existentes entre los puntos de la figura original son iguales que las distancias entre los puntos de la figura simétrica. En este caso: La simetría axial se puede dar también en un objeto con respecto de uno o más ejes de simetría.

Si se rotara la figura sobre el eje de simetría trazado, se podría observar con toda claridad que los puntos de las partes opuestas coinciden, es decir, ambas partes son congruentes.

Por tanto, la axisimetría nos indica que existe un eje sobre el cual el sistema gira formando una estructura periódica. Este estudio se centrará en el caso simple, es decir, un sistema 2D que gira sobre un eje \mathcal{A} de revolución formando la simetría (figura 3).

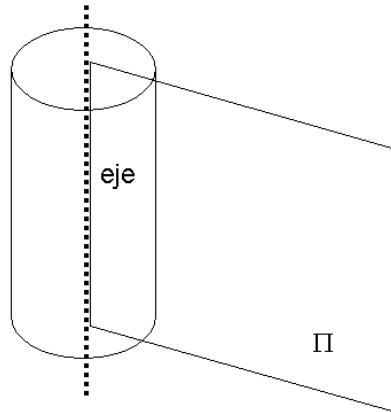


Figura 3 – Ejemplo de sistema axisimétrico.

3. MOTIVACIÓN

Las estructuras con simetría axial son de gran relevancia en los últimos años debido a su relación con las aplicaciones en la propagación de las ondas debido a la simetría entre fuente y objeto.

- Diseño de un axisimétrico en un medio efectivo usando gran longitud de onda.
- Control de filtrado espacial en el régimen de difracción.
- Formación de imágenes con sub-longitud de onda en el campo lejano.

4. OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son los siguientes:

- Diseño de una lente acústica para focalizar el campo producido por un transductor ultrasónico en agua.
- Aplicar la aproximación de grandes longitudes de onda para controlar las propiedades efectivas de un medio periódico que se considera homogéneo (metamaterial).
- Caracterizar mediante parámetros acústicos las propiedades del foco conseguido.
- Revisión del diseño original mediante la optimización de parámetros del campo focalizado por la lente acústica (intensidad y/o ancho focal).

Por lo tanto, re-escalaremos un diseño de la lente de perfil secante hiperbólico y evaluaremos su comportamiento cuando el conjunto de elementos del sistema se comporte como un medio homogéneo. Caracterizaremos el foco producido con parámetros acústicos como puede ser la amplificación sonora. Por último optimizaremos el diseño para lograr mejoras respecto al diseño original.

5. HERRAMIENTAS NUMÉRICAS

El análisis numérico o cálculo numérico es la rama de las matemáticas que se encarga de diseñar algoritmos para, a través reglas matemáticas simples, simular procesos matemáticos más complejos aplicados a procesos del mundo real. ^[4]

Desde este punto de vista, el análisis numérico proporcionará toda la base necesaria para llevar a cabo todos aquellos procedimientos matemáticos susceptibles de expresarse algorítmicamente, basándose en algoritmos que permitan su simulación o cálculo en procesos más sencillos empleando números.

En general, estos métodos se aplican cuando se necesita un valor numérico como solución a un problema matemático, y los procedimientos "exactos" o "analíticos" (manipulaciones algebraicas, teoría de ecuaciones diferenciales, métodos de integración, etc.) son incapaces de dar una respuesta. Debido a ello, son procedimientos de uso frecuente por físicos e ingenieros, y cuyo desarrollo se ha visto favorecido por la necesidad de éstos de obtener soluciones, aunque la precisión no sea completa. Debe recordarse que la física experimental, por ejemplo, nunca arroja valores exactos sino intervalos que engloban la gran mayoría de resultados experimentales obtenidos, ya que no es habitual que dos medidas del mismo fenómeno arrojen valores exactamente iguales.

5.1. MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El método de los elementos finitos (FEM) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. ^[5]

El FEM está pensado para ser usado en ordenadores y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El requisito básico para utilizar esta herramienta es que las condiciones de contorno y las condiciones iniciales del problema a considerar sean conocidas de antemano.

El FEM permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico del problema. De esta forma se dividen en sub-dominios no-intersectantes entre sí denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo

elemento finito. Además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla.

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (1D, 2D o 3D). Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

5.2. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. También ofrece una amplia y bien gestionada interfaz a MATLAB y sus “toolboxes” que proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, pre-procesado y post-procesado. Además proporciona una interfaz similar a COMSOL Script. Los paquetes son multiplataforma. Además de las interfaces de usuario convencionales basadas en físicas, COMSOL también permite entrar sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (EDP).^[6]

En este caso se trabajará con el módulo acústico de este software. Contiene incorporados modos de aplicación “Contains” y ajustes de contornos para el modelado de propagación acústica en sólidos y fluidos estacionarios. También modela aplicaciones aeroacústicas en fluidos móviles.

5.2.1. MÓDULO FLUIDO-ESTRUCTURA

La interacción fluido-estructura se refiere al proceso en el cual las vibraciones de la estructura generan ondas de presión acústica sobre el medio que la envuelve. El modelado con la interacción fluido-estructura implica utilizar dos campos de la física: el acústico y la mecánica estructural.

Cuándo la relación de impedancias se puede considerar a efectos prácticos infinita se puede considerar la estructura como un sólido el cual se comporta como una condición de contorno rígida. Podemos mostrar como ejemplo el caso del medio aire con una estructura de metacrilato. Calculamos la impedancia acústica del aire y del metacrilato que corresponde al producto de la densidad por la velocidad de propagación en cada medio tal y como se muestra a continuación.

$$Z_{\text{aire}} = \rho_{\text{aire}} \cdot c_{\text{aire}} = 1.21 \cdot 340 \approx 410 \text{ Rayls}$$

$$Z_{\text{metacrilato}} = \rho_m \cdot c_m = 1190 \cdot 2700 \approx 3.2 \cdot 10^6 \text{ Rayls}$$

$$\frac{Z_{\text{metacrilato}}}{Z_{\text{aire}}} = \frac{3.2 \cdot 10^6}{410} = 7800$$

Como se puede observar, la relación es de 7800 veces mayor por tanto podemos considerarlo como sólida la estructura y aproximar que esta se comportará de forma infinitamente rígida.

En el caso que contemplamos, contamos con dos materiales, agua y aluminio. Podemos definir como hemos realizado en el caso anterior las impedancias de los mismos.

$$Z_{\text{agua}} = \rho_{\text{agua}} \cdot c_{\text{agua}} = 1000 \cdot 1500 \approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ Rayls}$$

$$Z_{\text{aluminio}} = \rho_{\text{aluminio}} \cdot c_{\text{aluminio}} = 2700 \cdot 5100 \approx 13.8 \cdot 10^6 \text{ Rayls}$$

$$\frac{Z_{\text{aluminio}}}{Z_{\text{agua}}} = \frac{13.8 \cdot 10^6}{1.5 \cdot 10^6} = 9.2$$

En el caso que estamos considerando tenemos que la relación entre aluminio y agua es de 9 veces superior. No podemos considerar la estructura como rígida y es por ello que debemos de considerar la influencia de la estructura. Debido a esto se utiliza el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones del sólido y del fluido. En este caso en particular se ha utilizado el módulo de COMSOL Acoustic-Structure que nos permite considerar los efectos tales como pérdidas, deformaciones, etc.)

6. DISEÑO DE LALENTE

El objetivo de este trabajo es el diseño de una lente axisimétrica para su aplicación en ultrasonidos, sobre todo para aplicaciones submarinas. La lente que se presenta en este trabajo consiste en una distribución de planos hechos de dispersores toroidales concéntricos de aluminio, cuyos radios, R , varían en el plano radial de la lente para caracterizar las propiedades de refracción del sistema. En la figura 4 se puede ver un esquema de la lente que se estudia en este trabajo.

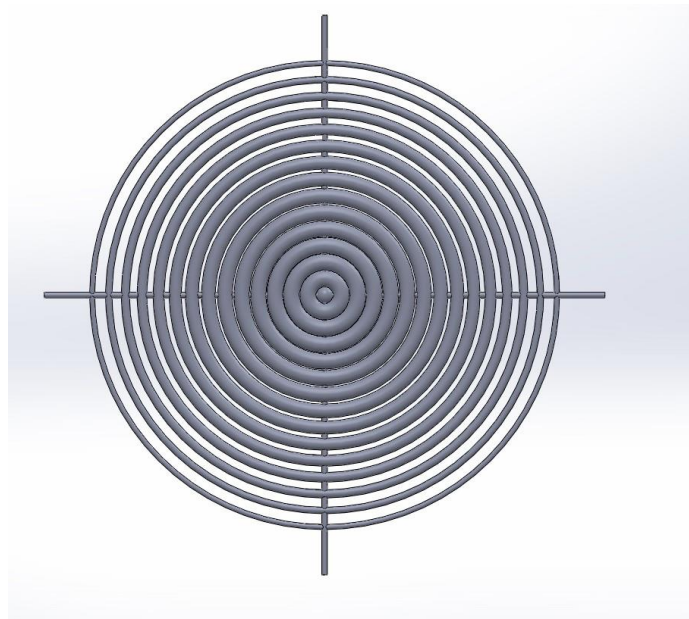


Figura 4 – Vista frontal de la lente

Debido a la simetría de revolución de la lente, podemos hacer el estudio en el plano axial. El diseño de la lente se realiza para frecuencias que cumplen la relación $\lambda > 4a$, donde la longitud de onda es muy grande en comparación con la distancia entre dispersores y el medio se considera homogéneo. Para que el medio se comporte como lente, debemos introducir un perfil de índice de refracción que introduzca los desfases necesarios para producir focalización detrás de la lente. Este perfil viene dado por el de secante hiperbólica ^[7].

$$n(r) = n_o \operatorname{sech}(\alpha r)$$

Ecuación 1 – Secante Hiperbólica

Dónde $n_o = n(r = 0)$ es el índice de refracción en el eje $z(r = 0)$ y α es el coeficiente de gradación.

$$\alpha = \frac{1}{h} \cosh^{-1} \left(\frac{n_o}{n_h} \right)$$

Ecuación 2 – Coeficiente de gradación

Donde h es el radio de la lente, y n_h el índice de refracción de la lente en sus extremos ($r = \pm h$). Para nuestro diseño hemos elegido $n_o = 1$ y $n_h = 1.33$ (con $h = 7a$). Los sistemas con comportamiento lineal, pueden ser escalables si se mantienen las relaciones de aspecto y las relaciones de propiedades físicas. Por ello, normalmente se utilizan variables normalizadas respecto a alguna distancia característica, como es el paso de red (a) y alguna propiedad característica del medio, como es la velocidad de propagación (c_{host}). Por lo tanto solo basta con mantener la relación de aspecto entre los dispersores, que viene caracterizada por el factor de llenado, $f = \pi R^2/a^2$ para la completa caracterización en cualquier medio de propagación lineal.

Tabla 1 – Relación entre radios de los elementos y factor de llenado

		Aire		Agua		
	Fila	R (mm)	f (%)	R (mm)	f (%)	
	1	18.2	65	0.82	65	
	2	17.5	60	0.79	60	
	3	17	57	0.77	57	
	4	15	44	0.68	44	
	5	13.5	36	0.61	36	
	6	11	24	0.50	24	
	7	8.5	14	0.38	14	
	8	6	7	0.27	7	

La impedancia acústica del aluminio con respecto a la del agua es del orden de 9 veces superior. De tal manera, las ondas pueden penetrar en el dispersor. Por ello, es necesario considerar la interacción fluido-estructura para abordar el problema.

7. DISEÑO DEL MODELO EN COMSOL Multiphysics

Para poder simular el modelo mediante el método de elementos finitos diseñaremos el sistema utilizando el software específico, en este caso COMSOL Multiphysics.

➤ **Paso 1: Creación del modelo.**

Dado que el tipo de estructura se puede resolver con un corte axisimétrico se ha seleccionado la dimensión espacial de tipo 2D axisimétrico.

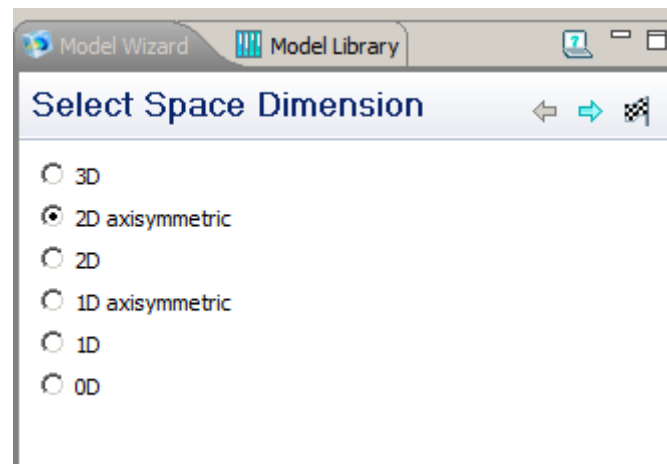


Figura 5 – Selección espacial del modelo

➤ **Paso 2: Selección de la física del modelo.**

Como se ha explicado anteriormente, se debe utilizar el módulo fluido-estructura, en inglés *acoustic-solid interaction*. También se añade el módulo de optimización para realizar posteriormente con el mismo modelo dicho proceso.

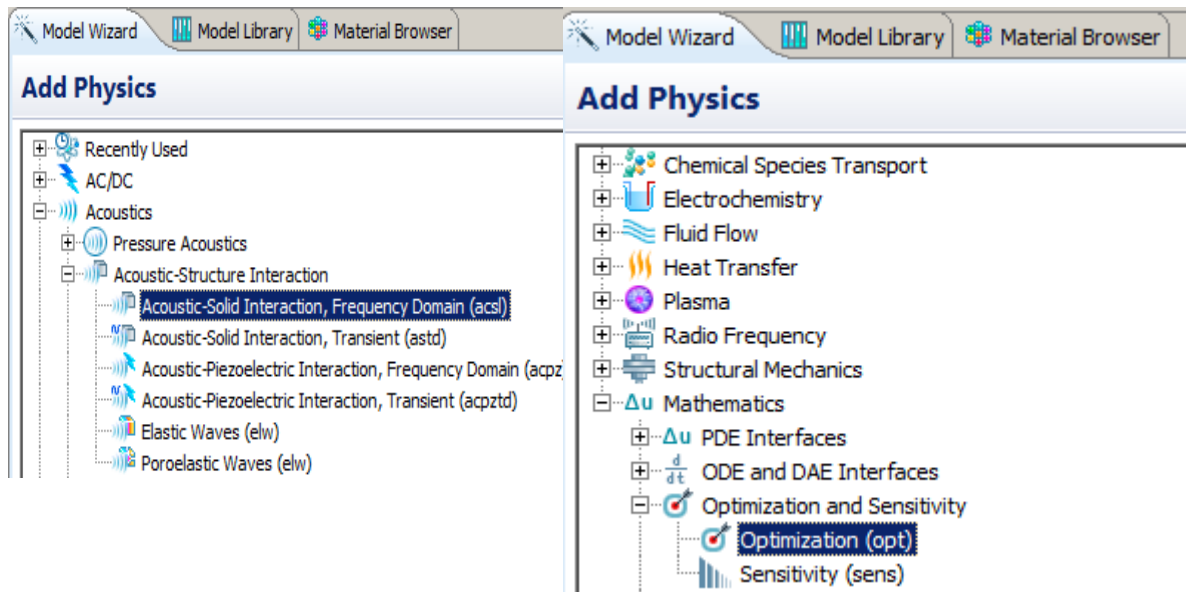


Figura 6 – Selección de la física del modelo

➤ **Paso 3: Tipo de estudio.**

Dado que se va a estudiar el sistema en función de la frecuencia habrá que seleccionar el tipo de estudio como *Frecuencia Domain*.

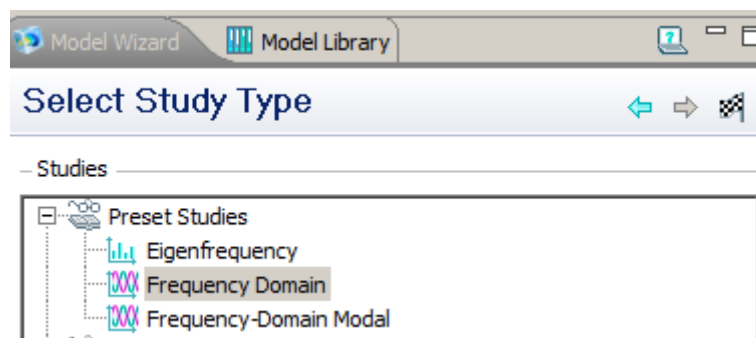


Figura 7 – Selección del tipo de estudio

➤ **Paso 4: Definiciones globales.**

Definiremos los parámetros globales del sistema estos son la distancia de la fuente y la distancia entre anillos del toroide tanto en el eje z como en el eje r. Después definimos la longitud de la fuente. Estos parámetros nos servirán para de manera posterior proceder a la optimización del sistema como hablaremos más adelante.

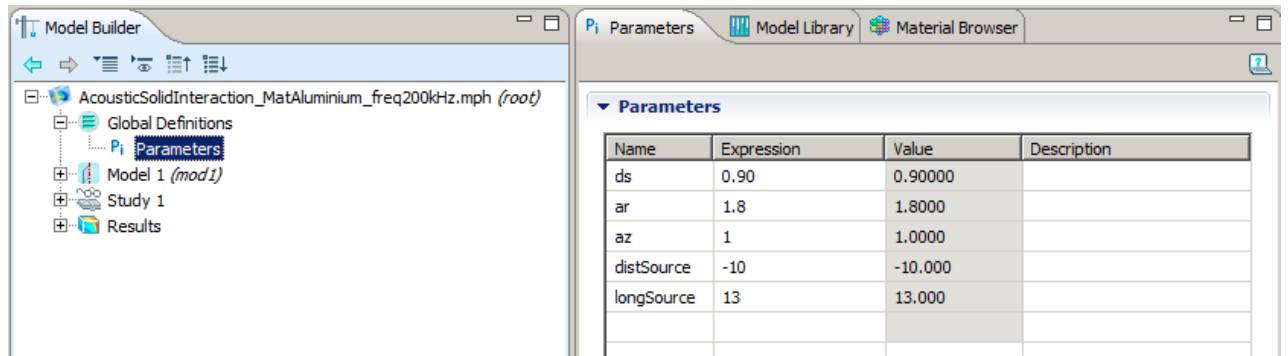


Figura 8 – Definiciones globales

➤ **Paso 5: Definición de la geometría.**

Una vez definidos los parámetros globales, importaremos una fila de elementos del modelo a partir de un diseño CAD. Este diseño está realizado para que pueda ser importado en un sistema de simulación 2D axisimétrico. Se importa solamente una fila para que la distancia entre filas pueda ser utilizada de manera posterior en el sistema de optimización. Procedemos a terminar el diseño geométrico incluyendo el resto de elementos mediante la función *array* en el modelo geométrico del programa. También se incluye un *Bézier Polygon* Para terminar con el diseño, incluimos un rectángulo que contendrá el medio, en este caso agua. Una vez se realizan estos pasos se muestra un ejemplo del sistema presentando el modelo geométrico (figura 7.5).

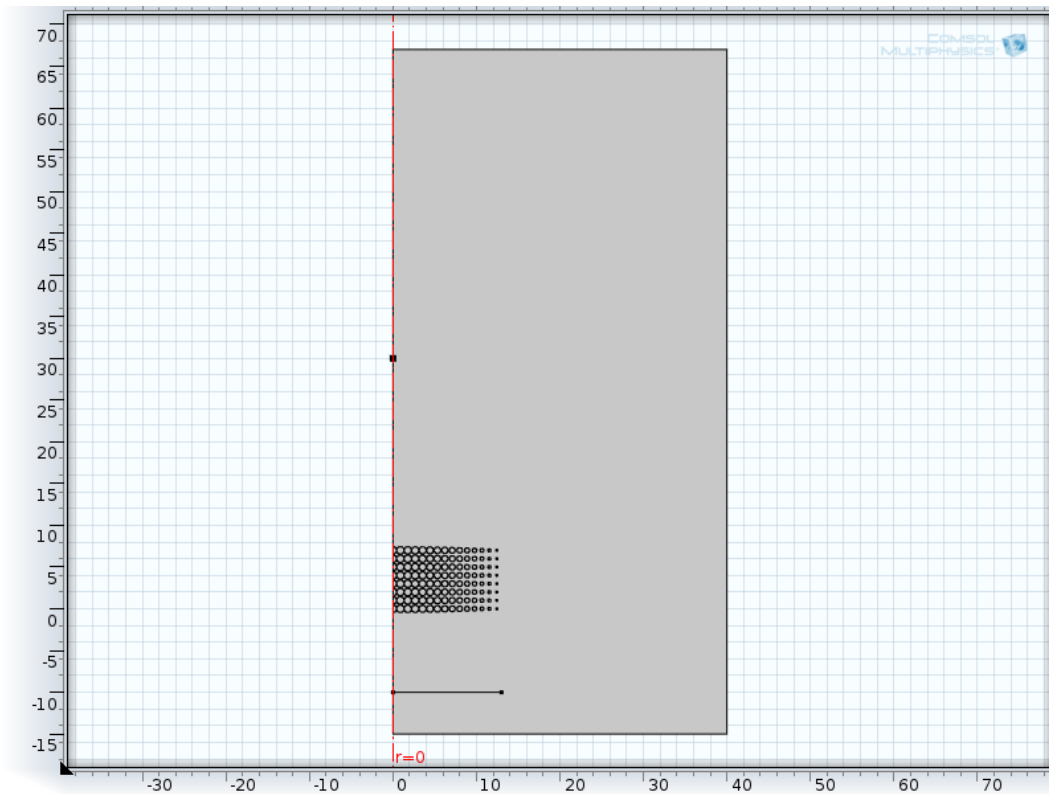


Figura 9 – Modelo geométrico en COMSOL

➤ **Paso 6: Definición de los materiales.**

Dadas las condiciones de contorno del problema, se deben añadir los materiales agua y aluminio al modelo. A continuación se seleccionan los dominios y se asignan los materiales, para la estructura aluminio y para el medio compuesto de agua.

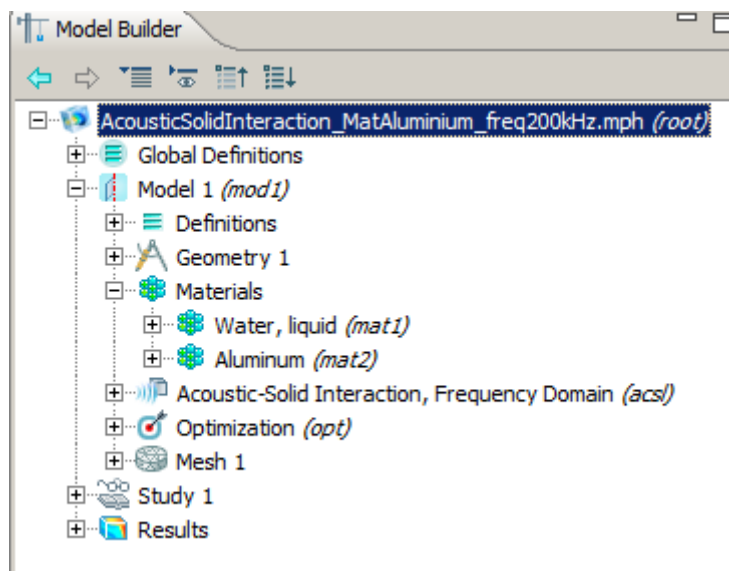


Figura 10 – Asignación de materiales a los dominios.

➤ **Paso 7: Definición de parámetros del ACSL**

Este paso es muy determinante para una buena simulación con el programa. Se deben de tener claras las condiciones de contorno e iniciales del problema para establecer los dominios y valores oportunos.

El dominio del medio será incluido en *Pressure Acoustic Model*. Los contornos del toroide en *Acoustic-Structure Boundary* y el dominio en *Linear Elastic Material*. En el caso de los valores iniciales la presión y el desplazamiento inicial son considerados nulos. Además se debe añadir una presión a lo que actuará como transductor, en este caso se le asigna un valor normalizado de 1 Pascal.

Por último incluimos la PML en los contornos del medio seleccionando los correspondientes dominios en *Plane Wave Radiation*, ya que consideramos que radiamos en un medio infinito sin reflexiones.

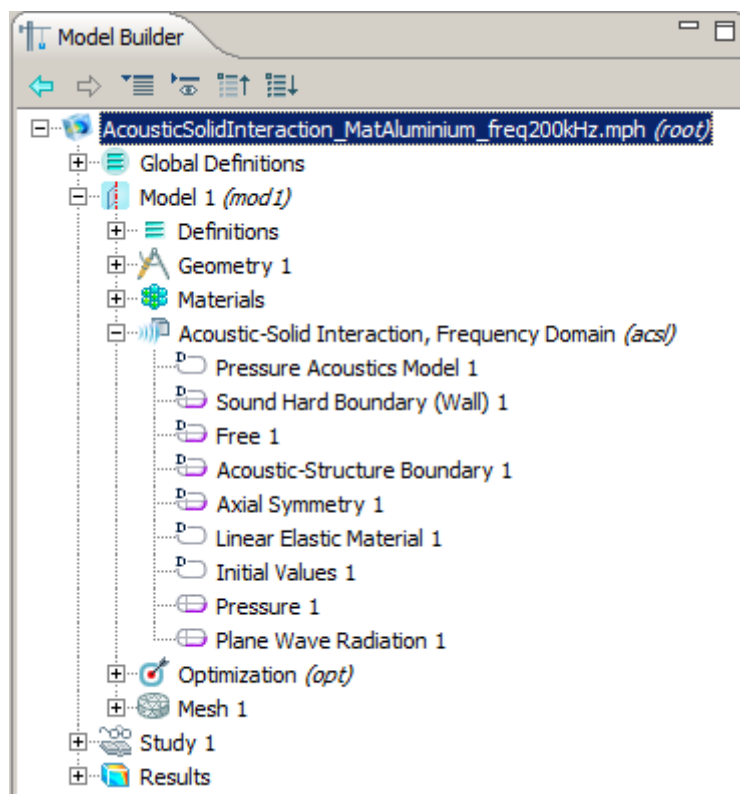


Figura 11 – Definición de los parámetros del Acoustic-Solid Interaction

➤ **Paso 8: Parámetros de optimización.**

Uno de los objetivos es optimizar el diseño inicial de la lente para lograr una mayor amplificación sonora en el foco. Por ello el programa nos permite la maximización o minimización de la expresión que el usuario determine.

En este caso utilizaremos la función *probe* para determinar un punto sobre el cual se desea realizar la focalización y sobre este punto utilizaremos la expresión de la presión absoluta para lograr la optimización (figura 7.8.a). Para terminar de configurar este módulo se debe acceder al apartado *Study* y acceder a la pestaña de optimización. Una vez allí se selecciona el tipo maximización y añadimos los parámetros de control. Estos son la distancia entre planos del toroide y la distancia de la fuente.

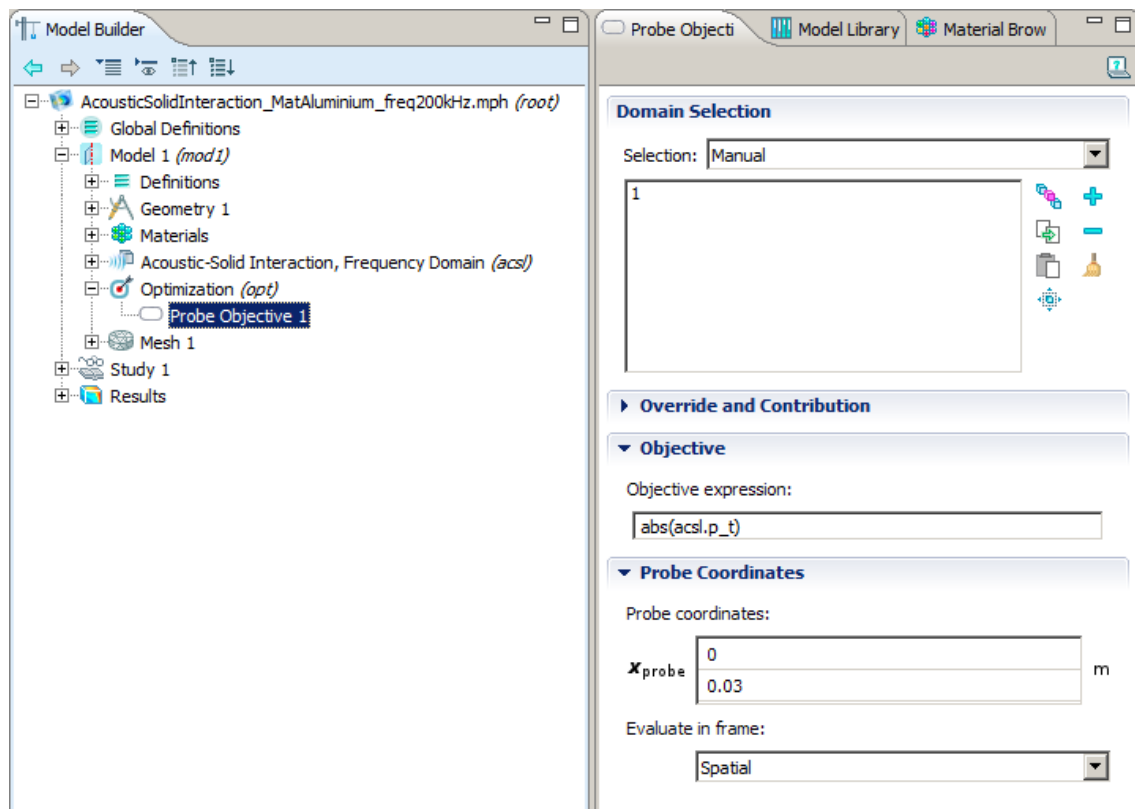


Figura 12 – Parámetros de optimización.

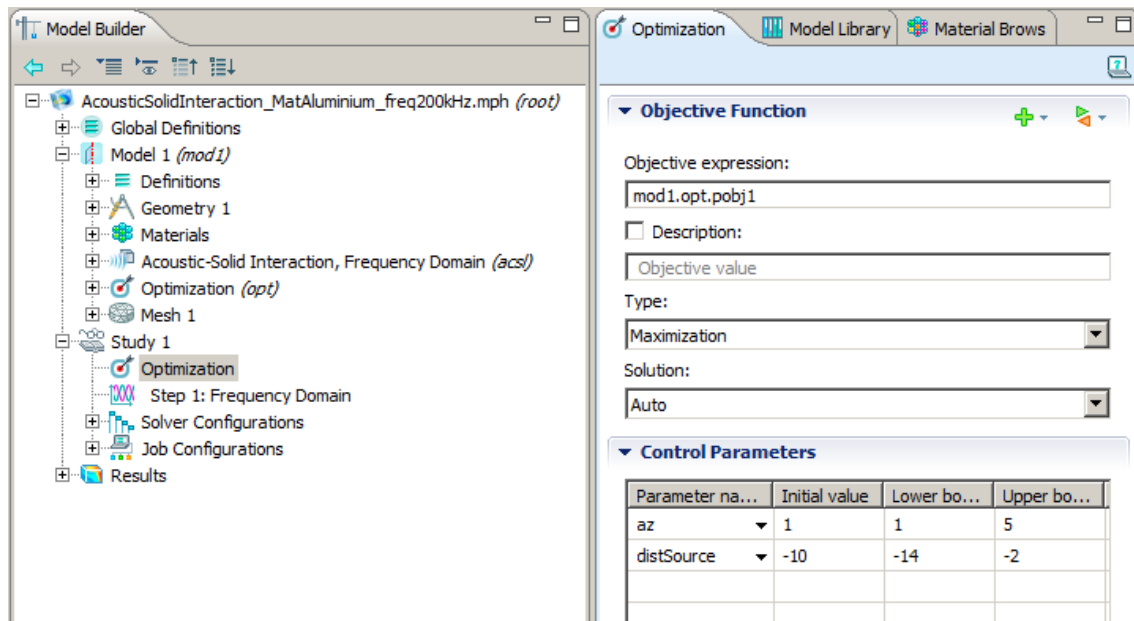


Figura 13 – Configuración del estudio de optimización.

➤ Paso 9: Selección de la malla.

Para determinar el tamaño de la malla hay que conocer la frecuencia de trabajo. En este caso dadas las dimensiones del sistema y para cumplir con el régimen de homogenización se utilizará una frecuencia de trabajo de 200 kHz. A partir de la frecuencia de trabajo se debe de tener en cuenta el tamaño máximo de los elementos de la malla (Δx) para que no existan errores numéricos producidos por *aliasing* u otros fenómenos de dispersión.

Se limita el tamaño máximo de malla a partir de la siguiente ecuación,

$$\Delta x = \frac{\lambda}{8} \quad \text{Ecuación 3 – Limitación de la malla}$$

Resolviendo la ecuación a partir de sustituir la longitud de onda por velocidad de propagación y frecuencia obtenemos,

$$c = \lambda \cdot f \rightarrow \Delta x = \frac{c_{agua}}{8 \cdot f} = \frac{1500}{8 \cdot 200 \cdot 10^3} \approx 0.9 \text{ mm}$$

Quedaría configurado por tanto tal y como se muestra en la siguiente figura.

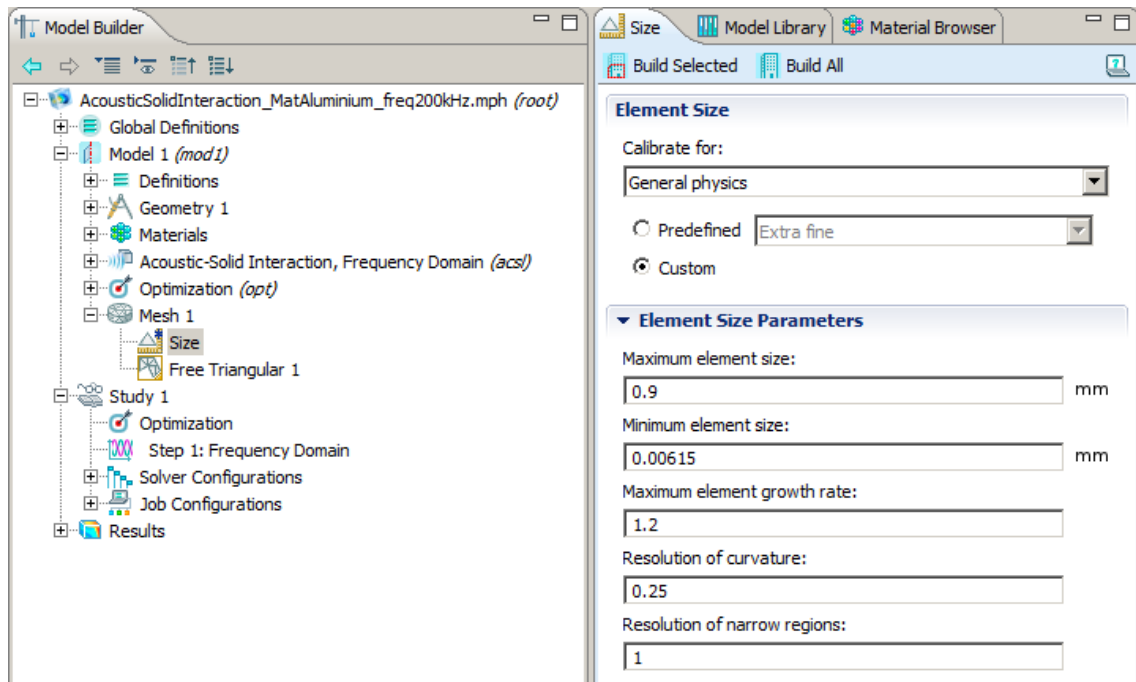


Figura 14 – Selección del tamaño de la malla

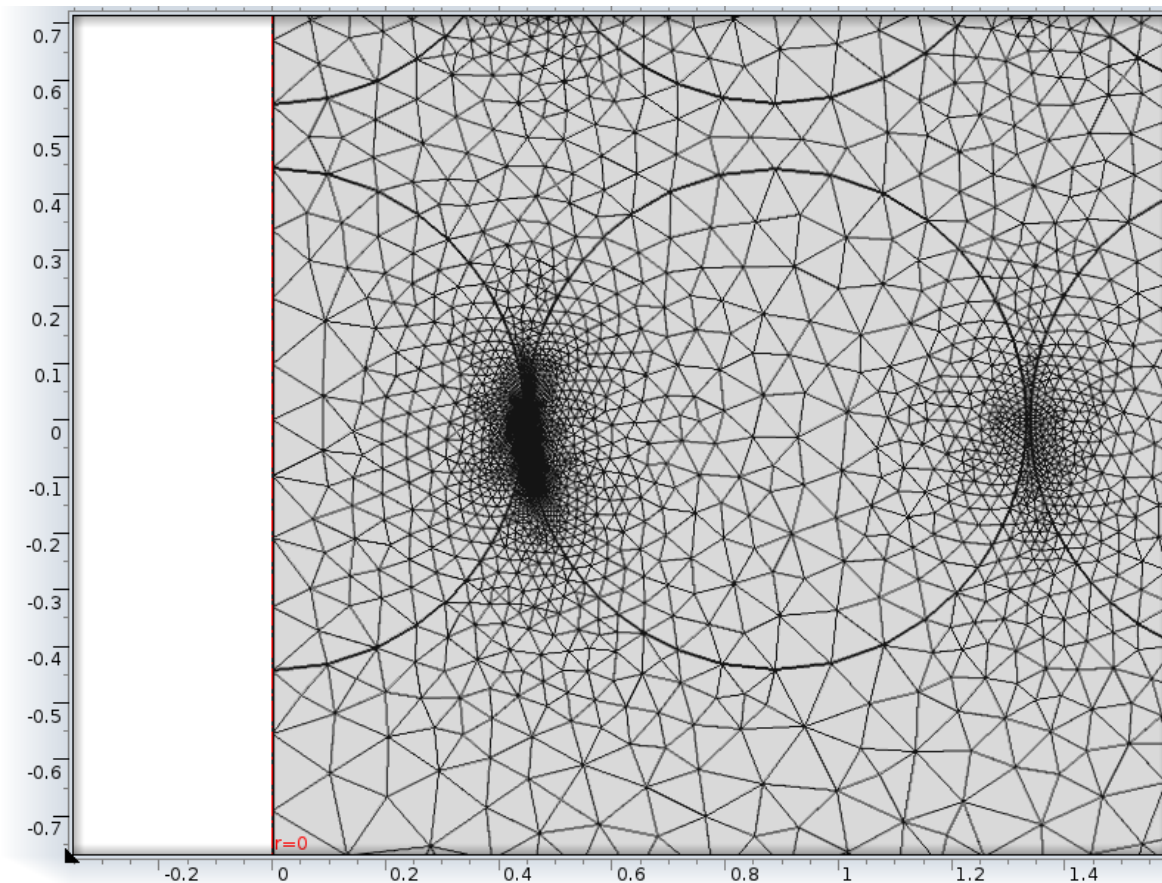


Figura 15 – Detalle del mallado.

8. RESULTADOS

En el siguiente apartado se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación. En primer lugar se comentan los resultados sin optimización para demostrar que este tipo de lentes produce el filtrado espacial llegando a focalizar el haz. Posteriormente se muestran los resultados que se obtienen una vez se procede a optimizar el sistema.

8.1. FOCALIZACIÓN DE LALENTE ACÚSTICA

A continuación se muestran los resultados obtenidos utilizando el método de los elementos finitos mediante el COMSOL Multiphysics. En este caso, solo se ha utilizado el módulo fluido-estructura. Mediante esta simulación se puede comprobar si realmente el re-escalado a agua es correcto y de esta forma observar si se produce al igual que ocurre con el caso de aire el efecto de focalización.

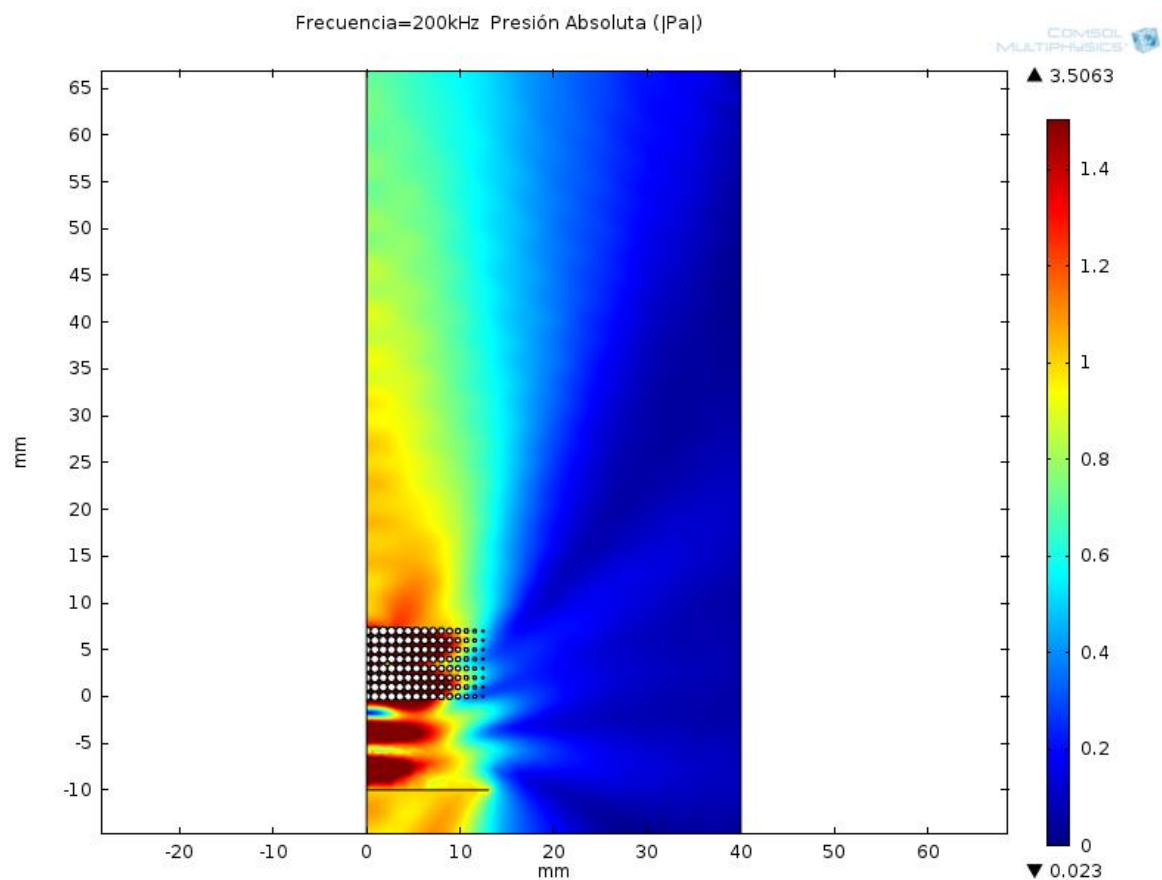


Figura 16 - Campo acústico (valor absoluto de la presión, $|p|$) vista 2D en el plano axial.

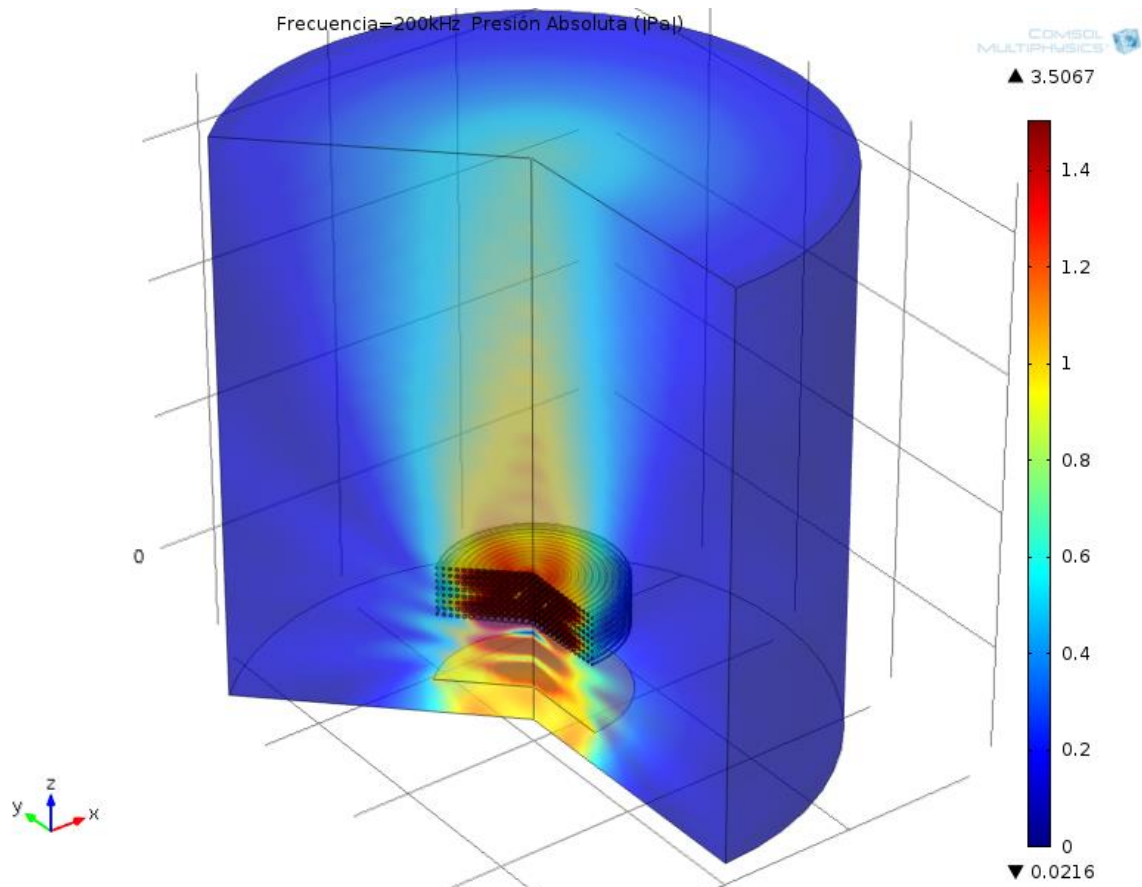


Figura 17 - Campo acústico (valor absoluto de la presión, $|p|$) vista en 3D del campo de presión en volumen axial.

Tal y como se muestra en las figuras anteriores, se puede observar el efecto de filtrado. Queda demostrada de esta forma que se provoca una focalización que viene siendo el efecto de la eliminación de los lóbulos laterales.

Dado que la presión emitida por la fuente es de 1 Pascal, en las figuras se muestran varias zonas con una presión superior a la presión inicial. Podemos observar que existen zonas de presión acústica en las zonas anteriores a la lente. Este efecto se puede explicar cómo las reflexiones causadas cuando la onda incide sobre la lente que tienen un efecto de excitar los modos propios de la cavidad entre la lente y la fuente.

Otra zona de alta presión se encuentra en el interior de la lente donde se llega también a niveles que alcanzan los 3.5 Pascales de presión.

Una vez atravesada la lente se muestra un único haz que tiene como convergencia entre los 30 y 40 milímetros. Estos resultados son útiles a la hora de

buscar una optimización en el sistema intentando mejorar el diseño de la lente y teniendo un punto de partida.

Con estas figuras, se puede afirmar que la lente de corte secante hiperbólica produce los mismos efectos en agua que los producidos en aire y que realmente se ha realizado de forma correcta el re-escalado aire a agua.

Uno de los efectos producidos cuando tratamos con unos elementos que no son considerados como infinitamente rígidos son las pérdidas energéticas debidas a la interacción con la estructura. En las siguientes figuras se muestran los desplazamientos producidos en la estructura cuando es atravesada por ondas acústicas. A pesar de tratarse de desplazamientos ínfimos, estos deben de ser estudiados.

Se puede explicar este poco desplazamiento relacionando la presión con el desplazamiento tal y como se muestra en la siguiente ecuación.

$$z = \frac{p}{u} \quad \text{Ecuación 4 – Impedancia}$$

Donde p es la presión, u es el desplazamiento. Por tanto deducimos la velocidad como la derivada del desplazamiento en función del tiempo.

$$u = \omega \cdot x = 2\pi f x \rightarrow x = \frac{p}{(z \cdot \omega)}$$

Donde x y u son los valores absolutos del desplazamiento y la velocidad y z la impedancia en el cilindro. Si calculamos de forma aproximada el orden de magnitud justificamos teniendo en cuenta que tomamos la presión en el cilindro como la presión en el fluido por las condiciones de continuidad obtenemos el siguiente orden de magnitud.

$$x = \frac{1}{13.8 \cdot 10^6 \cdot 2\pi \cdot 2 \cdot 10^5} \approx 10^{-11}$$

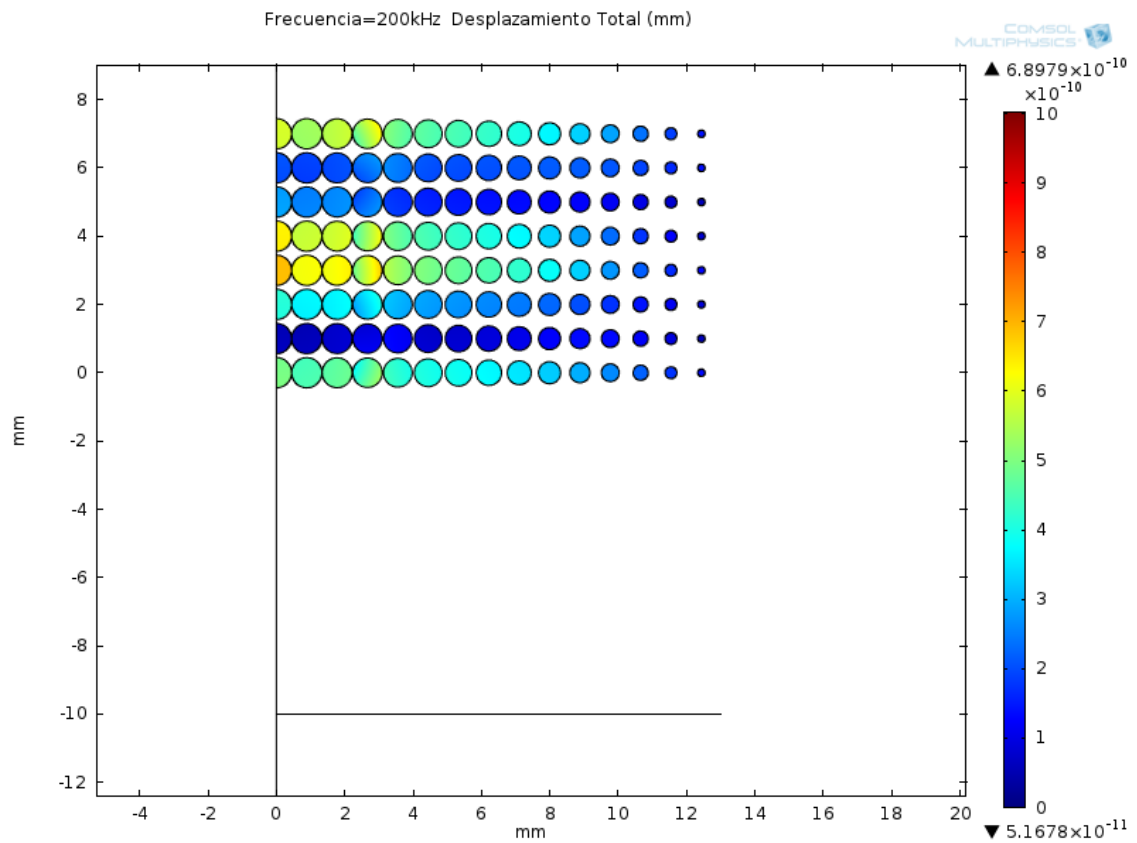


Figura 18 – Desplazamiento producido, vista 2D en el plano axial.

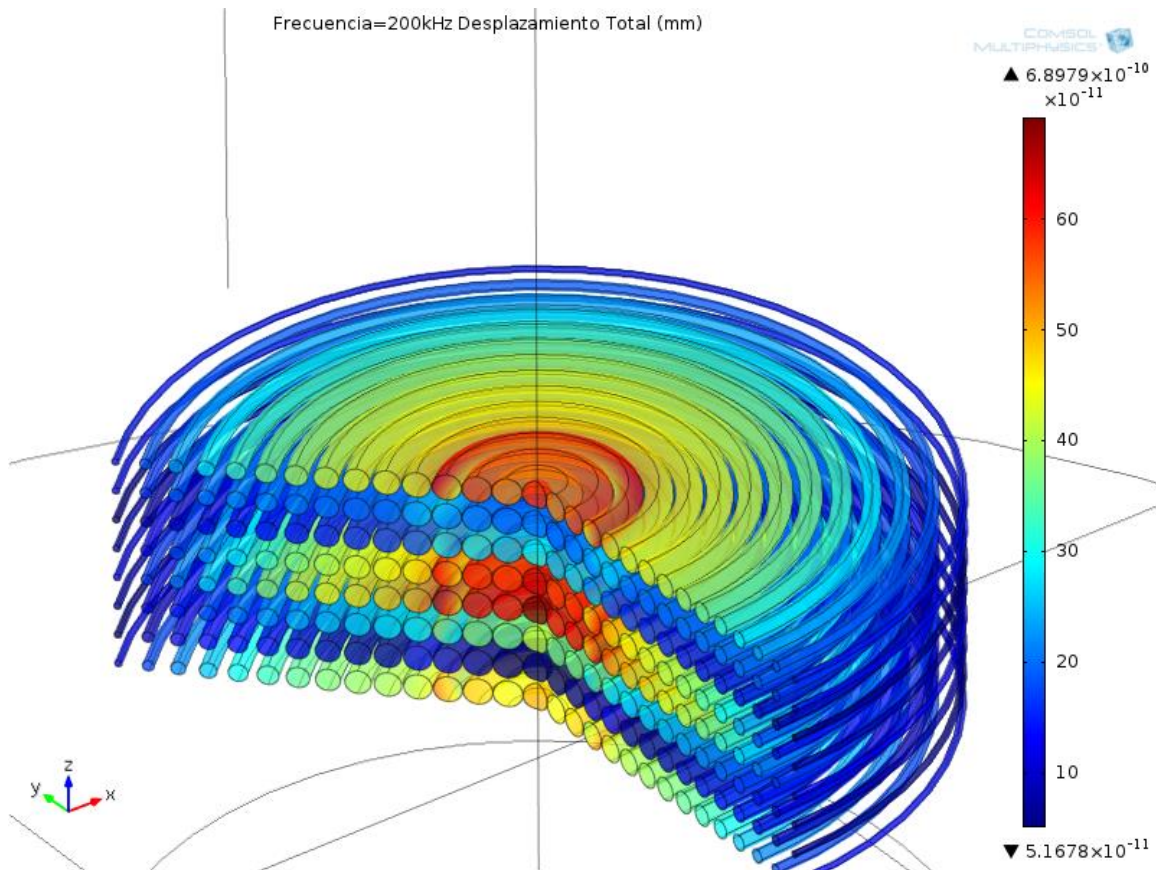


Figura 19 - Desplazamiento producido, vista en 3D.

En las figuras anteriores se observan que los mayores desplazamientos están provocados en el centro de la lente en su mayoría, centrándose sobre todo en los toroides situados en el eje.

Además del desplazamiento provocado dado que se encuentran en el eje, deben de tenerse en cuenta otros efectos como la excitación de modos propios del toroide. Esta excitación de modos propios puede producir una pérdida energética del sistema. Aunque este no es caso de estudio si podría servir como un estudio en líneas futuras.

Por último, en la siguiente figura se muestra una gráfica que muestra la presión absoluta en función de la distancia. Contando que la lente está situada en 0 mm y abarca hasta los 10 mm podemos ver los niveles de presión una vez es atravesada la lente.

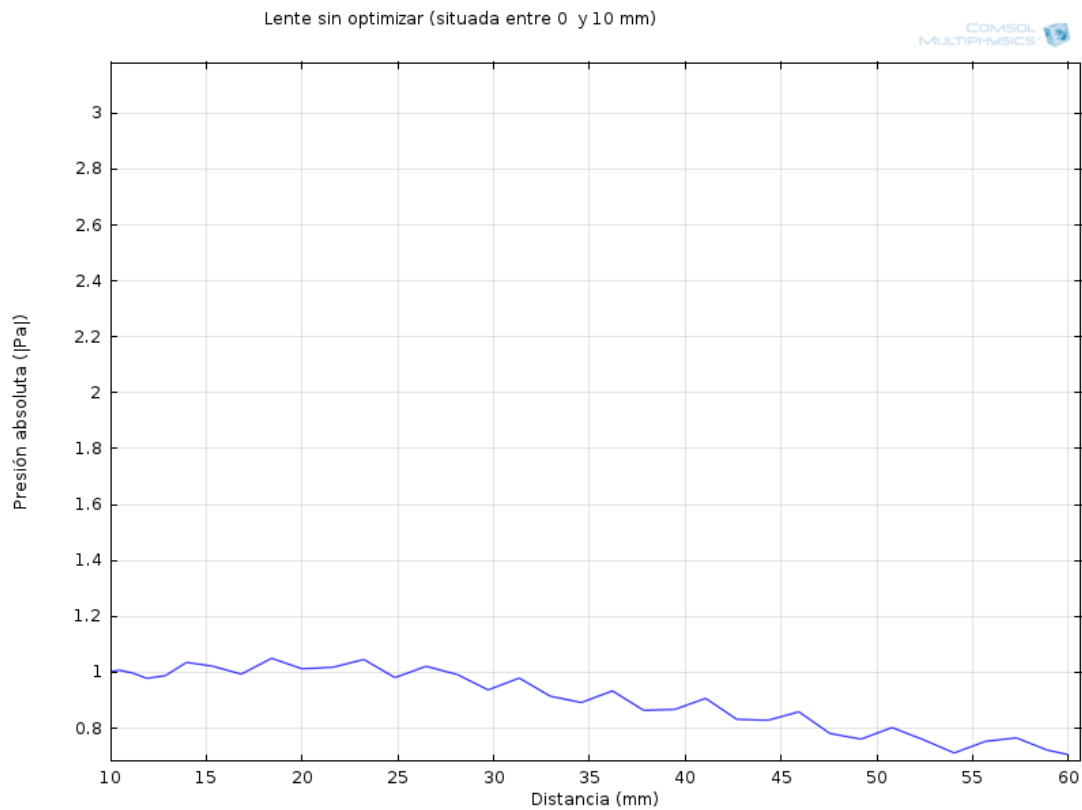


Figura 20 – Gráfica de la presión absoluta en función de la distancia.

No se aprecian grandes incrementos de la presión, sobretodo se mantienen los valores en torno a 1 Pascal entre los 10 y los 30 milímetros. A partir de esta distancia la presión comienza a decaer. Esto nos da a entender que a pesar de producirse el filtrado espacial y concentrar la energía sobre el eje, no se consigue un incremento de la presión de manera eficiente.

Estos datos nos serán útiles a la hora de evaluar si se obtiene una mejoría en el diseño de la lente mediante la optimización.

8.2. OPTIMIZACIÓN

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con la lente una vez se aplica el módulo de optimización del programa.

Los parámetros que han sido utilizados para la optimización de la focalización de la estructura son la distancia entre toroides y la distancia fuente-objeto. El objetivo de la optimización es conseguir la maximización de la presión absoluta en un punto determinado situado a una distancia de 20 mm del sistema completo medida desde su final.

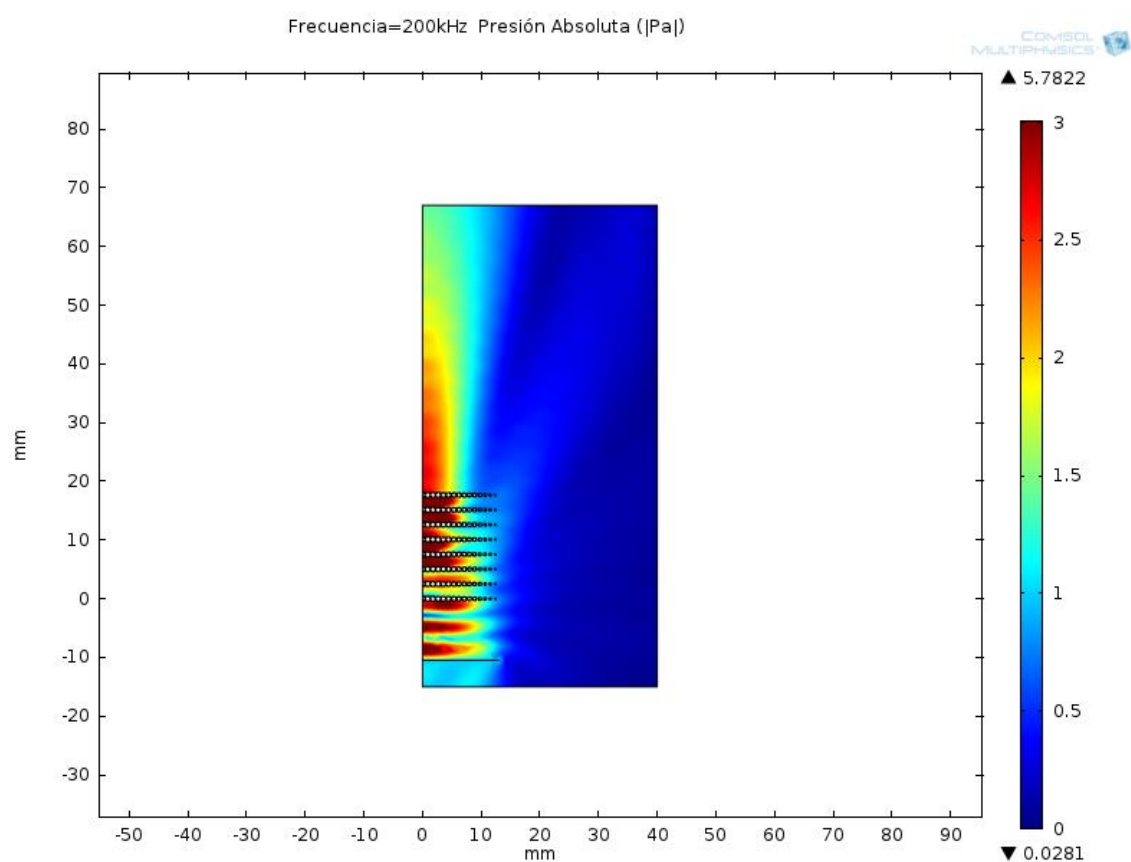


Figura 21 - Campo acústico (valor absoluto de la presión, $|p|$) vista 2D en el plano axial.

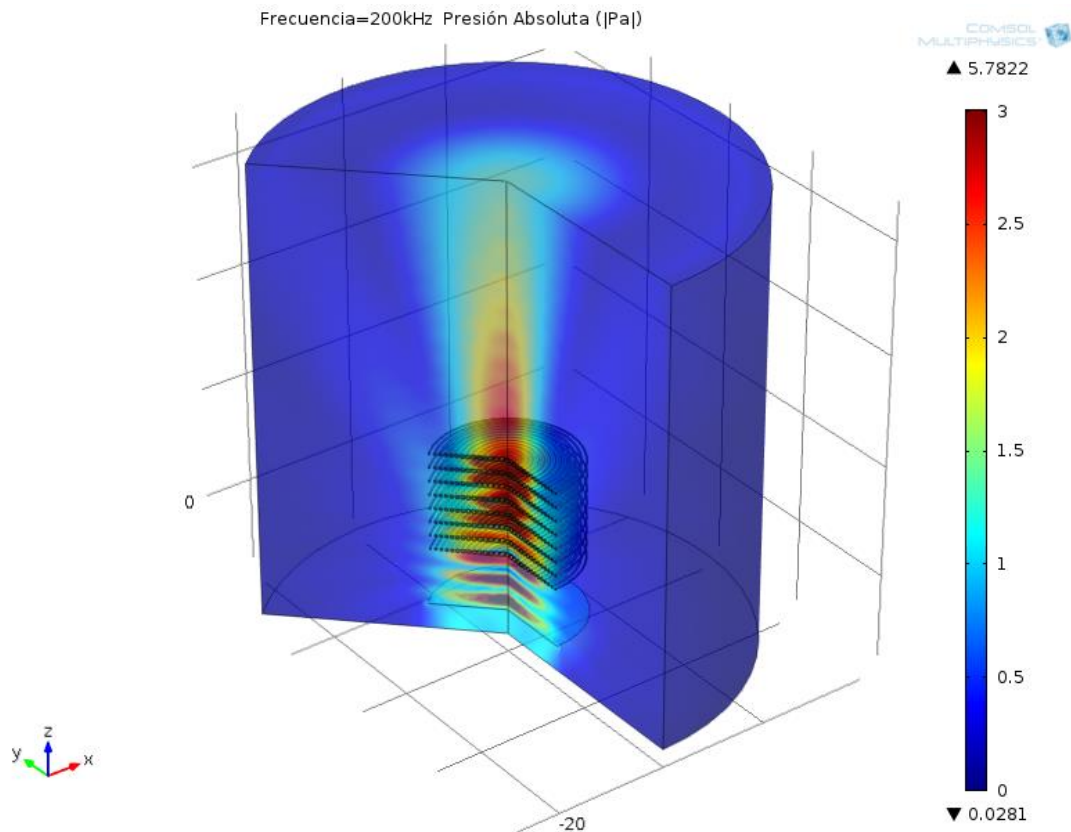


Figura 22 - Campo acústico (valor absoluto de la presión, $|p|$) vista en 3D del campo de presión en volumen axial.

En las figuras mostradas anteriormente se puede observar claramente que los resultados de la optimización no afectan en absoluto a los objetivos. Sigue produciéndose el filtrado espacial como en el caso anterior.

Como era de esperar también se provocan 3 zonas donde los niveles de presión alcanzan sus máximos. En la zona anterior a la lente, en el interior de la lente y en la zona posterior. Análogamente al caso anterior, los elevados niveles de presión provocados en la zona anterior a la lente son producidos por las reflexiones entre el transductor y la lente llegando a generar ondas estacionarias. De igual forma en el interior de la lente obtenemos esos niveles de presión. Dado que ahora la separación entre los toroides se ha incrementado era de esperar que se generaran ondas estacionarias entre secciones de la lente. Por último se ha conseguido unos mayores niveles de presión absoluta en el eje y que al final del apartado se ha calculado como la amplificación sonora producida y que es objeto de estudio de este proyecto.

A continuación, de igual forma que el apartado anterior, se muestran los desplazamientos provocados debido a la interacción entre la lente y las ondas que la atraviesan.

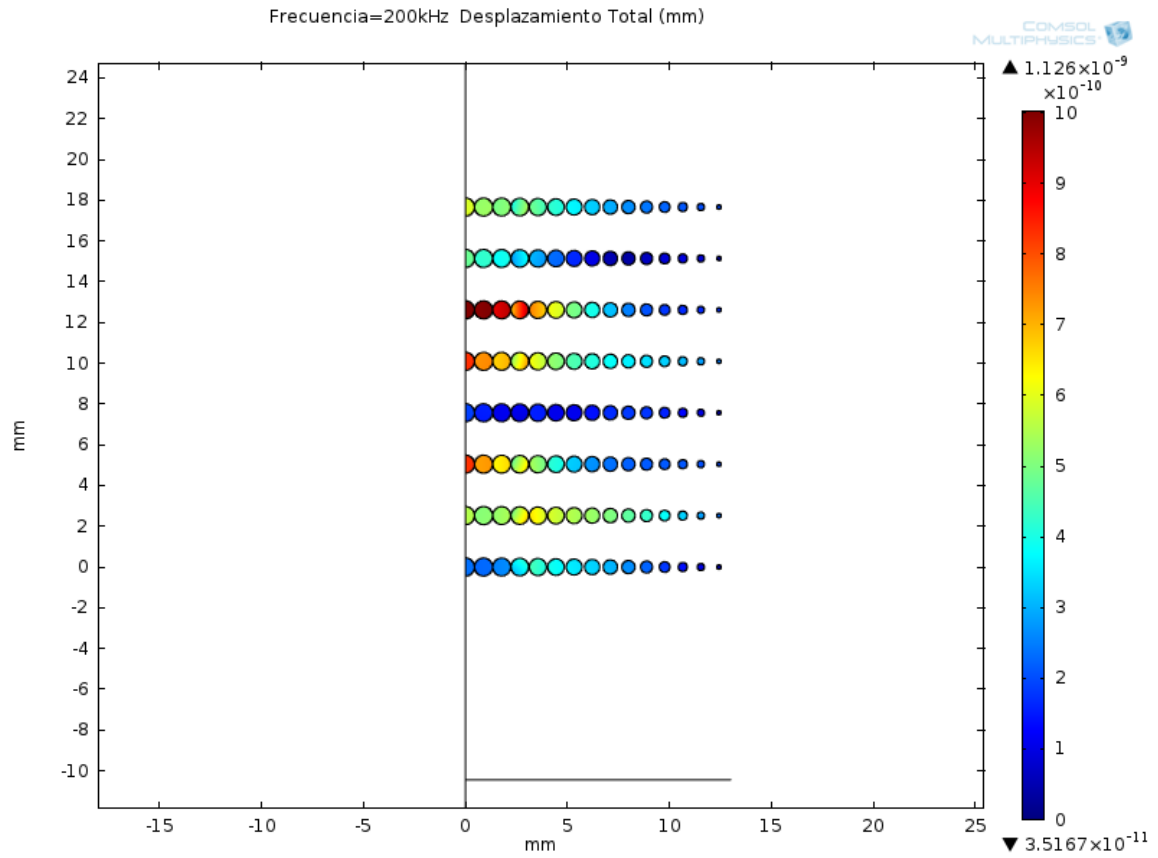


Figura 23 – Desplazamiento producido, vista 2D en el plano axial.

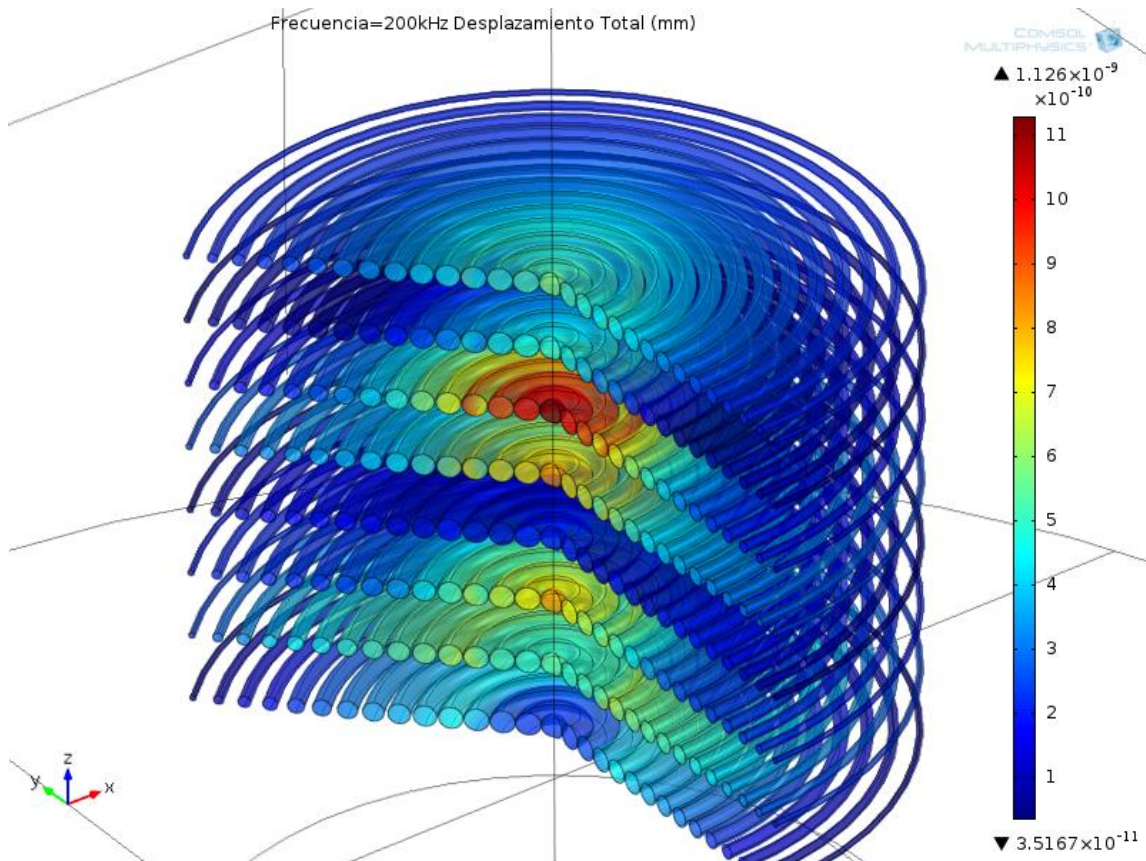


Figura 24 - Desplazamiento producido, vista en 3D.

En esta serie de simulaciones se han obtenido unos desplazamientos de 1 orden de magnitud superior al caso anterior. Aunque esta vez solo ha sido provocado en su mayoría en una de sus filas en la zona de toroides centrales. Se podría deducir que la separación entre filas de toroides afecta al desplazamiento de los mismos.

Al fin y al cabo los desplazamientos suponen una pérdida energética y por tanto una reducción en la eficiencia de la lente ya que el objetivo es que focalice la mayor cantidad de energía posible. Habría que comparar en estudios futuros si realmente aun con mayores desplazamientos pero concentrados en una zona más concreta del toroide mejora significativamente la eficiencia del mismo.

En la última figura se muestra una gráfica análoga al caso anterior. Se muestra la presión absoluta en función de la distancia. Contando que la lente está situada en el punto 0 y abarca hasta los 20 milímetros, se obtienen los siguientes resultados.

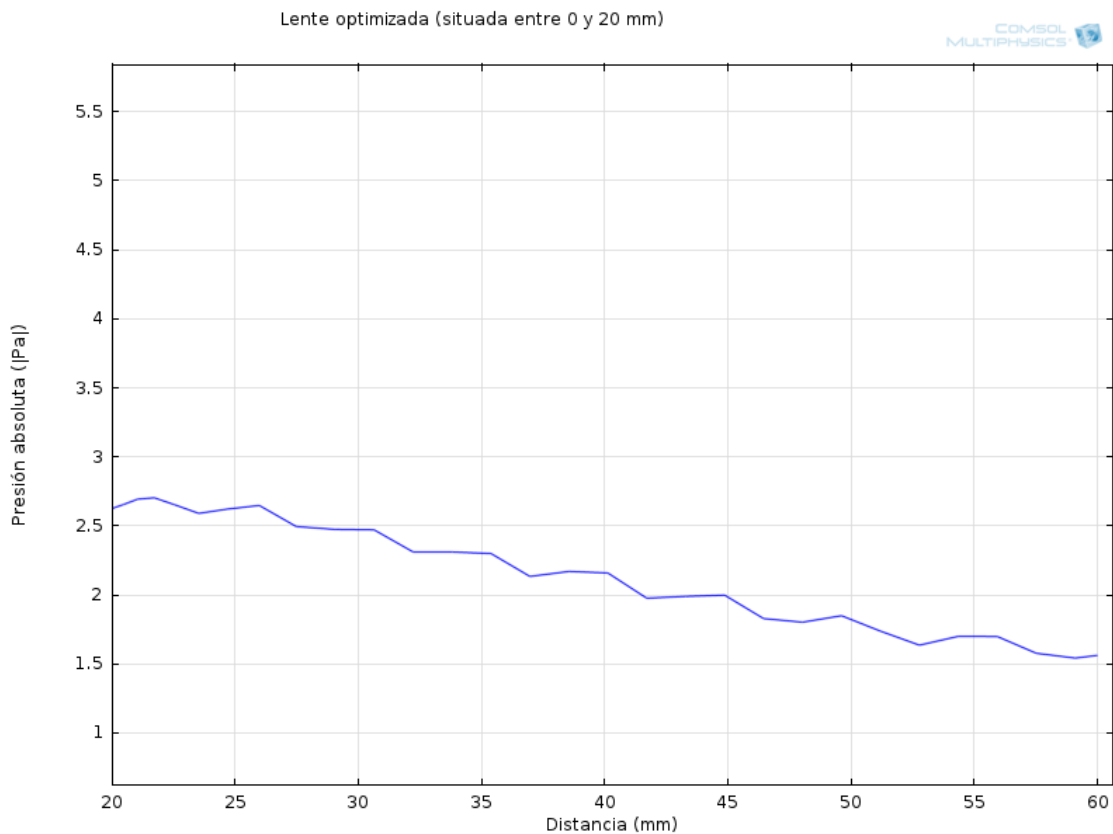


Figura 25– Gráfica de la presión absoluta en función de la distancia.

A partir de la siguiente ecuación, resultados calculados a partir de la ecuación 5.1 que muestra la amplificación sonora donde ρ_c y ρ_s son las presiones con la lente y sin la misma respectivamente.

$$AS(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{\rho_c}{\rho_s} \right) \quad \text{Ecuación 8.1 – Amplificación sonora}$$

Si contamos que la optimización está realizada para un punto situado entre los 20 y los 30 milímetros podemos calcular la amplificación sonora como,

$$AS(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{2.5}{1} \right) \approx 8 \text{ dB}$$

Este resultado nos da a entender que se mejora en 8 dB respecto a la no utilización de una lente de simetría axial con corte de secante hiperbólica. Con lo cual

ya se puede afirmar que no solamente se produce el efecto de filtrado espacial sino que se logra una focalización en un punto de energía significativo.

9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Referente a los objetivos, en este trabajo se ha abordado la simulación mediante el programa de basado en el método de elementos finitos COMSOL Multiphysics. Se han trabajado conceptos acerca de la creación de los modelos y del estudio de los resultados que este paquete matemático ofrece junto las posibilidades de procesado de datos.

Se ha realizado el diseño de la lente acústica con simetría axial para la focalización de las ondas sonoras, construida con varios planos de toroides concéntricos de radio variables.

También se ha validado la estructura mediante la simulación acústica con el método de elementos finitos, al igual que ocurre con el aire también se provoca el efecto de focalización. Además cabe destacar que la optimización de la estructura a partir del diseño original ha hecho incrementar significativamente la amplificación sonora hasta 8 dB.



Figura 26– Gráfica de la presión absoluta en función de la distancia.

En la figura 26 se puede comparar de manera gráfica los resultados obtenidos en conjunto de la lente con y sin optimización.

En líneas futuras se podría realizar un diseño físico que implemente la línea de mejoras estudiadas. Estas mejoras podrían ser por ejemplo cambiar la geometría de las celdas. Así como el estudio de la afectación de los desplazamientos de la estructura a nivel energético y ver como se podría mejorar la eficiencia de la misma.

10. AGRADECIMIENTOS

Parte del dispositivo experimental utilizado en la realización del trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea FEDER con los proyectos FIS2011-29734-C02-01 and -02 and PAID/2012/253.

Este proyecto fue expuesto por medio de un poster en la XXXIV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de física celebrado entre el 15 y 19 de Julio del año 2013 en la especialidad de Tecnologías Físicas con título: "Control espectral sobre la propagación de ondas acústicas en un medio con simetría axial compuesto de dispersores toroidales rígidos". Mi más sincera gratitud al comité organizador del XXXIV Reunión Bienal de la Real Sociedad Española de Física por la concesión de la beca por la cual se cubrían parte de los gastos de inscripción.

Mi agradecimiento ad aeternum a mis directores de la tesina D. Rubén Picó Vila y D. Vicent Romero García por su apoyo y ayuda. Así como todos los compañeros del departamento de física de la EPSG.

A mis padres y mi hermana por apoyarme en todo momento a lo largo de estos años.

A Raquel, por su cariño y comprensión en todos los momentos difíciles y por arrancarme una sonrisa cuando más lo necesitaba.

A mi familia en general, que a pesar de todo siempre están a tu lado y en especial a mi madrina cuya generosidad es inestimable.

Eppur si muove.



Focalización de ondas acústicas mediante una lente formada por dispersores toroidales rígidos.

D. Tarrazó-Serrano¹, R. Rodó¹, V. Romero-García², A. Cebrecos³, N. Jiménez¹, V.J. Sánchez-Morales¹, L.M. García-Rañó¹ y J.V. Sánchez-Pérez²

¹Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC),

²Instituto Universitario de Matemática Pura y Aplicada,

³Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València (UPV), Spain

datarser@gmail.com, rplco@fis.upv.es, virogari@gmail.com



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Resumen

En este trabajo se analizan las propiedades de propagación de las ondas sonoras en un sistema con simetría axial cuyos dispersores son toroides rígidos. El objetivo es el diseño, construcción y caracterización de un sistema para la focalización eficiente de las ondas mediante elementos pasivos (lente acústica). Mediante simulaciones numéricas en el dominio frecuencial, basadas en el método de los elementos finitos, se muestra la posibilidad de control espectral y espacial de las ondas acústicas propagándose a través de una estructura de compuesta de dispersores de tipo toroidal. El interés del uso de estructuras asimétricas para la focalización radica en que ésta es la simetría presente en la mayoría de las fuentes acústicas tanto en el rango audible como en ultrasonidos. En el trabajo se discuten los resultados numéricos y los datos experimentales que se han obtenido para una lente asimétrica que trabaja en el rango de grandes longitudes de onda (régimen de homogenización) y se comporta como un lente con un gradiente espacial de índice de refracción. Las propiedades de focalización y la caracterización del foco obtenido mediante esta lente son el eje principal de este trabajo. El sistema está diseñado bajo la suposición de que las ondas se propagan en el régimen de la acústica lineal, y por tanto podría ser totalmente re-escalado a otros rangos de frecuencia con vistas a líneas futuras en el campo de los ultrasonidos, donde la focalización cobra importancia en diversas aplicaciones.

Motivación

Las estructuras con simetría axial son de gran relevancia en los últimos años debido a su relación con las aplicaciones en la propagación de las ondas debido a la simetría entre fuente y objeto.

- Diseño de un acústico en un medio efectivo usando gran longitud de onda.
- Control de filtrado espacial en el régimen de difracción.
- Formación de imágenes con sub-longitud de onda en el campo lejano.

Diseño de la lente en agua

El objetivo de este trabajo es el diseño de una lente asimétrica para su aplicación en ultrasonidos, sobre todo para aplicaciones submarinas. La lente que se presenta en este trabajo consiste en una distribución de planos hechos de dispersores toroidales concéntricos de aluminio, cuyos radios, R , varían en el plano radial de la lente para caracterizar a las propiedades de refracción del sistema. En la Figura 1 se puede ver un esquema de la lente que se estudia en este trabajo.

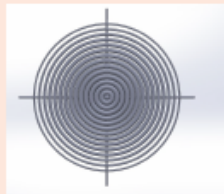


Figura 1. Vista frontal de la lente.

Debido a la simetría de revolución de la lente, podemos hacer el estudio en el plano axial. El diseño de la lente se analiza para frecuencias que cumplen la relación $\lambda > 4a$, donde la longitud de onda es muy grande en comparación con la distancia entre dispersores y el medio se considera homogéneo. Para que el medio se comporte como lente, debemos introducir un perfil de índice de refracción que introduzca los desfases necesarios para producir focalización detrás de la lente. Este perfil viene dado por el de secante hiperbólica,

$$n(r) = n_0 \operatorname{sech}(\alpha r), \quad (1)$$

donde $n_0 = n(r=0)$ es el índice de refracción en el eje z ($r=0$) y α es el coeficiente de gradación,

$$\alpha = \frac{1}{h} \cosh^{-1} \left(\frac{n_0}{n_h} \right), \quad (2)$$

donde h es el radio de la lente, y n_h el índice de refracción de la lente en sus extremos ($r = \pm h$). Para nuestro diseño hemos elegido $n_0 = 1$ y $n_h = 1.33$ (con $h = 7a$).

Los sistemas con comportamiento lineal, pueden ser escalables si se mantienen las relaciones de aspecto y las relaciones de propiedades físicas. Por ello, normalmente se utilizan variables normalizadas respecto a alguna distancia característica, como es el paso de red, a , y alguna propiedad característica del medio, como es la velocidad de propagación, $c_{\text{med}}.$ Por lo tanto solo basta con mantener la relación de aspecto entre los dispersores, que viene caracterizada por el factor de llenado, $f = \pi R^2/a^2$ para la completa caracterización en cualquier medio de propagación lineal.

Fila	Aire		Agua	
	R (mm)	f (%)	R (mm)	f (%)
1	18.2	65	0.82	65
2	17.3	60	0.79	60
3	17	57	0.77	57
4	15	44	0.68	44
5	13.3	36	0.61	36
6	11	24	0.50	24
7	8.5	14	0.38	14
8	6	7	0.27	7

Tabla 1. Valores de diseño para una lente con perfil de secante hiperbólica en agua y aire.

La impedancia acústica del aluminio con respecto a la del agua es del orden de 12 veces superior. De tal manera, las ondas pueden penetrar en el dispersor. Por ello, es necesario considerar la interacción fluido-estructura para abordar el problema.

Agradecimientos

El trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea FEDER con los proyectos FIS2011-29734-C02-01 and -02 and PAID/2012/253. D.T. está agradecido por la beca otorgada por la Beca de Física. V.R.G. agradece el soporte de los contratos post-doctorales de la UPV CEI-01-11.

Focalización de la lente acústica

A continuación se muestran los resultados obtenidos utilizando el método de los elementos finitos mediante el COMSOL Multiphysics. En este caso, solo se ha utilizado el módulo acústico-estructural. Mediante esta simulación se puede comprobar si realmente el re-escalado a agua es correcto y de esta forma observar si se produce al igual que ocurre con el caso de aire el efecto de focalización.

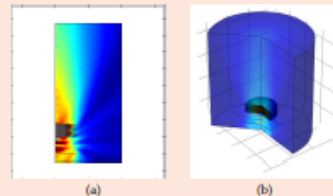


Figura 2. Campo acústico (valor absoluto de la presión, |p|). (a) vista 2D en el plano axial. (b) vista en 3D del campo de presión en colores.

Optimización

Los parámetros que han sido utilizados para la optimización de la focalización de la estructura son la distancia entre toroides y la distancia fuente-objeto. El objetivo de la optimización es conseguir la maximización de la presión absoluta en un punto determinado situado a una distancia de 20 mm del sistema completo medida desde su final. Definiendo los grados de libertad y los límites se obtienen los siguientes resultados.

$$AS(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{p_2}{p_1} \right) = 8 \text{ dB} \quad (3)$$

donde p_1 y p_2 son las presiones con la lente y sin la misma respectivamente.

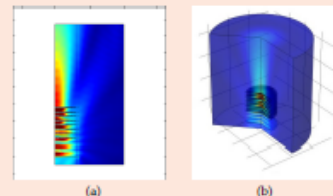


Figura 3. Campo acústico (valor absoluto de la presión, |p|). (a) vista 2D en el plano axial. (b) vista en 3D del campo de presión en colores.

Conclusiones

Se ha realizado el diseño de la lente acústica con simetría axial para la focalización de las ondas sonoras construida con varios planos de toroides concéntricos de radio variables. También se ha validado la estructura mediante la simulación acústica con el método de elementos finitos, al igual que ocurre con el aire también se provoca el efecto de focalización obteniendo una amplificación sonora de 3 dB. Además cabe destacar que la optimización de la estructura a partir del diseño original ha hecho incrementar significativamente la amplificación sonora hasta 8 dB. En líneas futuras se podría realizar un diseño físico que implemente la línea de mejoras estudiadas.

Referencias

• V. Romero-García, et al., *IMECE2012, ASME* (2012)
 • B.G. Lucas and T.G. Muir, *J. Acoust. Soc. Am.* 72 (4), 1289 (1982)
 • T.-M. Chang, et al., *New Jour. Phys.*, 14, 035011, (2012).
 • L. Sanchez, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 97, 054103 (2010).

11. BIBLIOGRAFÍA

[1] V. Romero-García, R. Picó, A. Cebrecos, L.M. Garcia-Raffi, J.V. Sánchez-Pérez, V.J. Sánchez-Morcillo. Focusing properties of axisymmetric acoustic metamaterials made of toroidal scatterers. Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, IMECE2012, November 9-15, 2012, Houston, Texas, USA.

[2] B.G. Lucas and T.G. Muir. The field of a focusing source. J. Acoust. Soc. Am. 72 (4), 1289 (1982)

[3] Girbau J.: *Geometria diferencial i relativitat*. Universitat Autònoma de Barcelona [1993].

[4] Nick Trefethen: *The definition of numerical analysis*. SIAM News [1992-
Noviembre]

[5] O.C. Zienkiewicz y R. L. Taylor: *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. FPI UPV

[6] Manual de usuario de COMSOL Multiphysics.

[7] T.-M. Chang, et al. Opt. Exp., **19**, 16154, (2011).

- T.-M. Chang, et al., New Jour. Phys., **14**, 035011, (2012).
- E.T.F. Rogers et al. , Nat. Mat., Advanced Online Publication, 1-4, (2012).