



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

---

FACULTAD DE CIENCIAS

DISEÑO DE LENTES ACÚSTICAS UTILIZANDO CRISTALES  
FONÓNICOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

FÍSICO

PRESENTA:

PAULETTE DOTOR FERNÁNDEZ

DIRECTOR:

DR. DELFINO REYES CONTRERAS

FACULTAD DE CIENCIAS, UAEM

ASESOR ADJUNTO:

DR. MIGUEL MAYORGA ROJAS

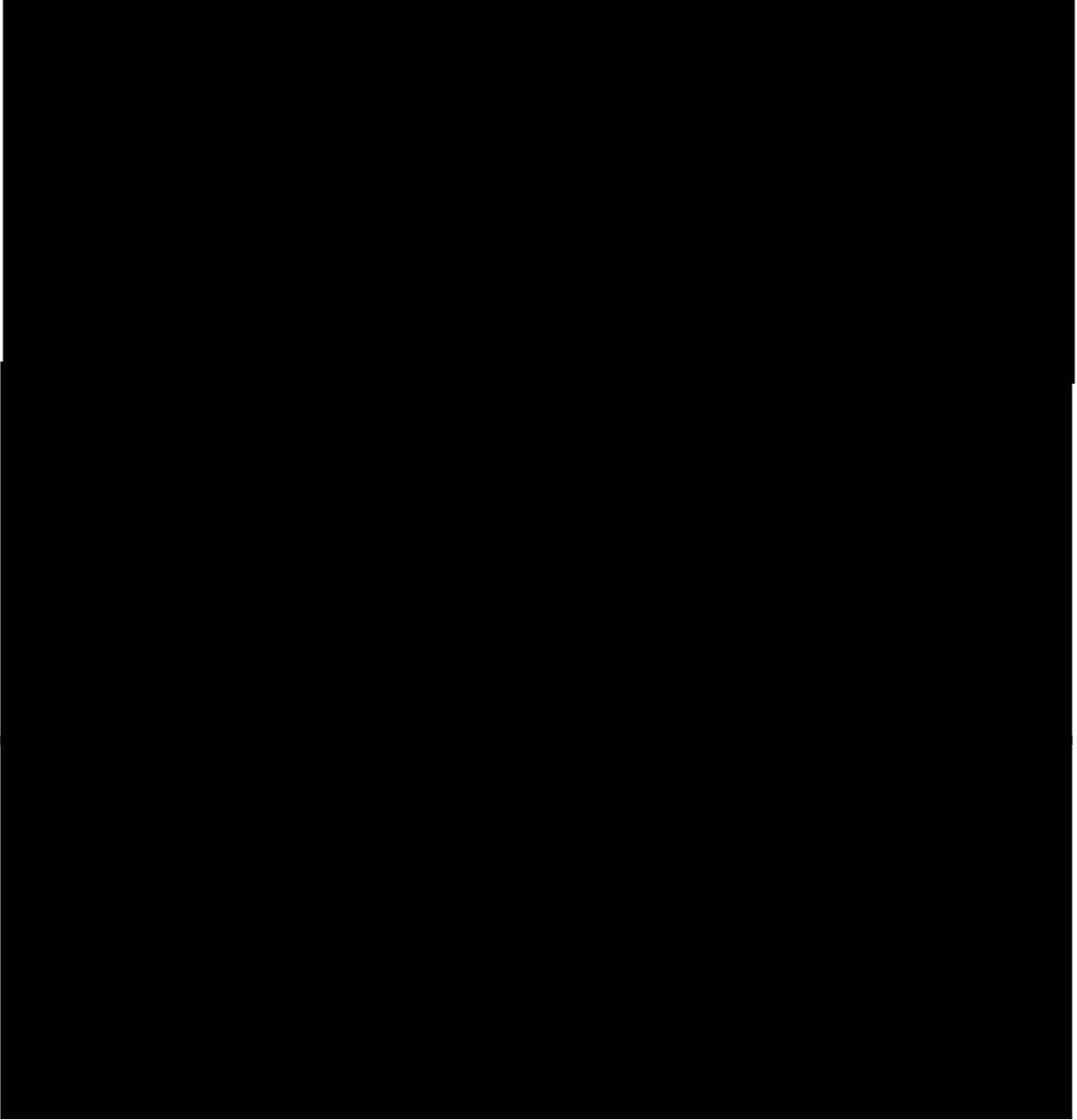
FACULTAD DE CIENCIAS, UAEM

TOLUCA, MÉXICO

JULIO 2019



## Agradecimientos



# Índice de contenido

<i>Capítulo 1. Propiedades fundamentales de cristales fonónicos</i> .....	9
1.1 Introducción.....	10
1.2 Bandgap fonónicos .....	11
1.3 Tipos de cristales fonónicos .....	12
1.3.1 Cristales unidimensionales.....	12
1.3.2 Cristales bidimensionales.....	13
1.3.3 Cristales tridimensionales .....	14
1.3.4 Cristales fonónicos con propiedades modulables.....	15
1.4 Fenómenos observados en cristales fonónicos .....	16
1.4.1 Colimación de ondas acústicas.....	16
1.4.2 Guiado de ondas acústicas.....	17
1.4.3 Atenuación de ondas acústicas.....	18
1.5 Enfocamiento de ondas acústicas utilizando cristales fonónicos .....	18
1.6 Aplicaciones .....	19
<i>Capítulo 2. COMSOL-Multiphysics</i> .....	21
2.1 ¿Qué es <i>COMSOL-Multiphysics</i> ? .....	22
2.2 Módulo de acústica ( <i>Acoustic Module</i> ) .....	26
2.2.1 Resolución de las ondas .....	27
2.2.2 Límites artificiales.....	27
2.2.3 Evaluación del campo acústico en la región de campo lejano.....	28
2.2.4 Representación integral de la ecuación de Helmholtz-Kirchhoff .....	28
2.3 Método de los elementos finitos.....	28
<i>Capítulo 3. Detalles de simulación</i> .....	31
3.1 Simulación .....	32
<i>Capítulo 4. Resultados y discusión</i> .....	38
4.1 Cristal A-08 (2) .....	39
4.1.1 Lente A-1.....	40
4.1.2 Lente A-2.....	43

4.1.3	Lente A-3.....	45
4.1.4	Lente A-4.....	47
4.1.5	Lente A-5.....	49
4.2	Cristal B-1.6 (4) .....	51
4.2.1	Lente B.....	52
4.3	Cristal C-1.6 (2.3).....	54
4.3.1	Lente C-1.....	55
4.3.2	Lente C-2.....	58
4.3.3	Lente C-3.....	59
4.4	Optimización del fenómeno de enfocamiento.....	61
4.4.1	Lente A-3.....	62
4.4.2	Lente A-5.....	62
4.4.3	Lente C-1.....	63
4.4.4	Lente C-3.....	64
	<b>Capítulo 5. Conclusiones.....</b>	<b>66</b>
	<b>Referencias .....</b>	<b>68</b>

# Índice de tablas y figuras

Figura 1.1	Cristal fonónico diseñado en COMSOL-Multiphysics .....	10
Figura 1.2	Esquema de un espectro de transmisión típico de un CF, donde puede apreciarse el bandgap fonónico y las bandas de propagación .....	11
Figura 1.3	Tipos de cristales fonónicos.....	12
Figura 1.4	Cristal fonónico finito compuesto por 6 celdas unitarias vidrio/cera-gel .....	13
Figura 1.5	Cristal bidimensional visto desde un costado .....	13
Figura 1.6	Ejemplo de cristal tridimensional .....	14
Figura 1.7	Cristales fonónicos ajustables basados en compuestos piezoeléctricos .....	15
Figura 1.8	Guiado de onda de un cristal fonónico a una frecuencia de 275 kHz .....	17
Figura 1.9	Escultura exhibida en la fundación Juan Marche .....	18
Figura 2.1	Ejemplo de acústica: análisis de la propagación de la onda de presión en un silenciador para un motor de combustión .....	24
Figura 2.2	Escritorio de COMSOL-Multiphysics .....	25
Figura 2.3	División en elementos finitos .....	30
Tabla 3.1	Densidad $\rho$ y velocidad longitudinal $c_l$ y velocidad transversal $c_t$ del sonido en acero y agua .....	32
Tabla 3.2	Parámetros geométricos de los 3 cristales fonónicos analizados.....	33
Figura 3.1	Lentes A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5 diseñadas partiendo del cristal A-0.8 (2) ....	34
Figura 3.2	Lente B diseñada a partir del cristal B-1.6 (4) .....	35
Figura 3.3	Lentes C-1, C-2, C-3 y C-4 diseñadas a partir del cristal C-1.6 (2.3).....	35
Figura 3.4	Diagrama de la lente A-1 donde se aprecia la fuente emisora, el área de enfocamiento y el área de transmisión .....	36
Figura 3.5	Mallado de la lente A-1 donde se aprecian los cilindros de acero inmersos en agua .....	36
Figura 4.1	Espectro del Cristal A-0.8 (2).....	40
Figura 4.2	Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs. Espectro de la lente A-1 .....	41
Figura 4.3	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-1 a una frecuencia de 491 kHz .....	42
Figura 4.4	Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs espectro de la lente A-2.....	43

Figura 4.5	Gráfica de colimación de la lente A-2 a una frecuencia de 587 kHz y gráfica de zona de focalización de la lente A-2 a una frecuencia de 597 kHz .....	44
Figura 4.6	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-2 a una frecuencia de 587 y 597 kHz .....	45
Figura 4.7	Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs espectro de la lente A-3.....	46
Figura 4.8	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-3 a una frecuencia de 591 kHz .....	47
Figura 4.9	Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs espectro de la lente A-4.....	48
Figura 4.10	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-4 a una frecuencia de 589 kHz .....	49
Figura 4.11	Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs. espectro de la lente A-5.....	50
Figura 4.12	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-5 a una frecuencia de 588 kHz .....	51
Figura 4.13	Espectro del Cristal B-1.6 (4) .....	52
Figura 4.14	Espectro de transmisión del cristal B-1.6 (4) vs. espectro de la lente B .....	53
Figura 4.15	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente B a una frecuencia de 341 kHz .....	54
Figura 4.16	Espectro del Cristal C-1.6 (2.3) .....	55
Figura 4.17	Espectro de transmisión del cristal C-1.6 (2.3) vs espectro de la lente C-1 ....	56
Figura 4.18	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente C-1 a una frecuencia de 399 kHz .....	57
Figura 4.19	Espectro de transmisión del cristal C-1.6 (2.3) vs espectro de la lente C-2 ....	58
Figura 4.20	Mapas de presión y gráfica del fenómeno de colimación encontrado en la lente C-2 a una frecuencia de 525 kHz.....	59
Figura 4.21	Espectro de transmisión del cristal C-1.6 (2.3) vs espectro de la lente C-3 ....	60
Figura 4.22	Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente C-3 a una frecuencia de 518 kHz .....	61
Figura 4.23	Dirección de propagación y eje transversal de la lente A-3 a 591 kHz.....	62
Figura 4.24	Dirección de propagación y eje transversal de la lente A-5 a 588 kHz .....	63
Figura 4.25	Dirección de propagación y eje transversal de la lente C-1 a 399 kHz .....	64
Figura 4.26	Dirección de propagación y eje transversal de la lente C-3 a 518 kHz .....	65

## RESUMEN

Existe un creciente interés (y necesidad) en la posibilidad de diseñar/construir materiales/estructuras que permitan concentrar energía acústica en puntos específicos, es decir, de construir lentes acústicas. Las estructuras que permiten alcanzar dicho efecto, son los cristales fonónicos, cuyas propiedades permiten la atenuación e incluso el aislamiento del sonido. El fin de la concentración de energía acústica en puntos y distancias específicas, es la posibilidad de inducir efectos en el material donde se concentra dicha energía. De particular interés, es la posibilidad de enfocar ondas de ultrasonido, debido a sus múltiples aplicaciones y a que, su interacción con materiales, principalmente biológicos y bajo ciertas condiciones, se considera no invasiva. En base a lo anterior, la presente tesis pretende diseñar computacionalmente, lentes acústicas a partir de cristales fonónicos, que permitan enfocar ondas de ultrasonido de diversas frecuencias a distancias diferentes (distancias focales distintas). Los resultados que se obtendrán coadyuvarían, en una siguiente etapa, a la manufactura optimizada de dichas lentes.

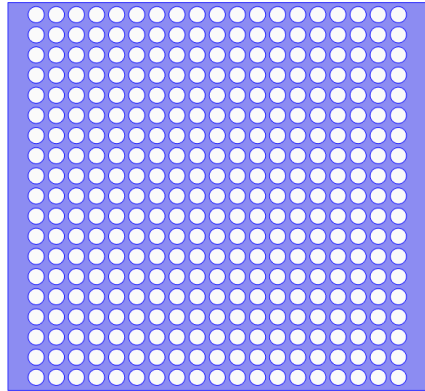
# *Capítulo 1*

## *Propiedades fundamentales de cristales fonónicos*

En el presente capítulo se introduce el concepto de cristal fonónico, sus características fundamentales, los fenómenos asociados y algunas aplicaciones. Se discute con énfasis el fenómeno de enfocamiento de ondas acústicas y sus posibles aplicaciones.

## 1.1 Introducción

Los cristales fonónicos (CFs) son estructuras artificiales y novedosas que ofrecen un control excepcional sobre la propagación de fonones, sean térmicos o acústicos, es decir, de ondas mecánicas. Los cristales fonónicos están conformados por dispersores de sonido, dispuestos de manera periódica en una matriz, con la particularidad de que, existe un contraste considerable entre la velocidad del sonido entre ambos componentes. Un ejemplo simple es la disposición de cilindros de acero inoxidable, cuya velocidad del sonido es de 5800 m/s, inmersos en una matriz de agua, cuya velocidad es de 1480 m/s, ambos a 20 °C [1].



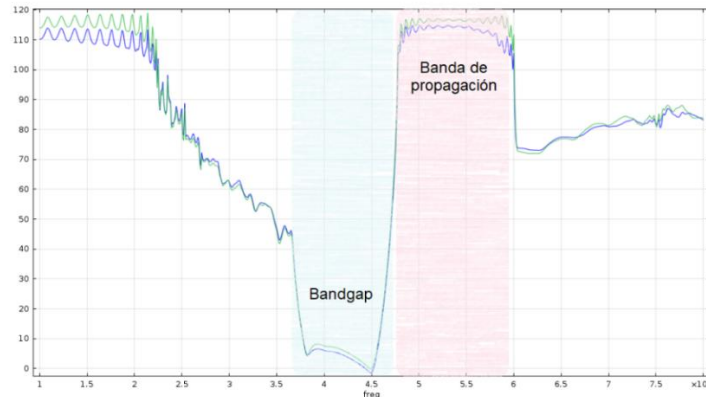
*Fig. 1.1:* Cristal fonónico diseñado en *COMSOL-Multiphysics*.

En la *Fig. 1.1* se muestra el diagrama de un cristal fonónico bidimensional (vista superior) diseñado en la plataforma *COMSOL-Multiphysics*; la estructura está conformada por cilindros de acero inoxidable, en un arreglo de 19x19, inmersos en una matriz de agua. Los cristales fonónicos se diseñan, por un lado, de tal forma que las propiedades elásticas o parámetros materiales (velocidad del sonido, densidad, módulo de Young) de sus componentes (dispersores y matriz) difieran considerablemente, hecho que impacta en sus propiedades acústicas y posibles aplicaciones. Por otro lado, la disposición espacial de los dispersores en la matriz, es decir, su topología (arreglo triangular, cuadrático, hexagonal, etc.), es de igual forma, un parámetro a considerar en su diseño, en función del objetivo que se persiga. [2].

## 1.2 *Bandgap* fonónicos

El contraste entre las propiedades materiales de los componentes del cristal, mencionados en la sección anterior, da lugar a lo que se conocen como bandas de frecuencia prohibida o *bandgaps*. En los cristales fonónicos, existen ondas mecánicas con frecuencias dentro de un rango específico, que no pueden propagarse al interior de la estructura periódica. Este rango de frecuencias prohibidas, se conoce como "*bandgap* fonónico" (BGF), y su conocimiento en un cristal específico, permite controlar el sonido de muchas maneras, útiles en estructuras que pueden actuar como filtros sónicos, aisladores, guías de onda o cavidades resonantes. Dicho *bandgap*, es el análogo que se presenta en un cristal electrónico o fotónico. Debido a los efectos de interferencia de onda, los *bandgaps* fonónicos ocurren para longitudes de onda del fonón, que son comparables con la periodicidad (parámetro de red) de la estructura [3]. Dada la naturaleza estructural de los CFs, la densidad y las constantes elásticas en su conjunto, cambian periódicamente. Este hecho, cambia la velocidad del sonido en el cristal, que, a su vez, lleva a la formación de un *bandgap* fonónico.

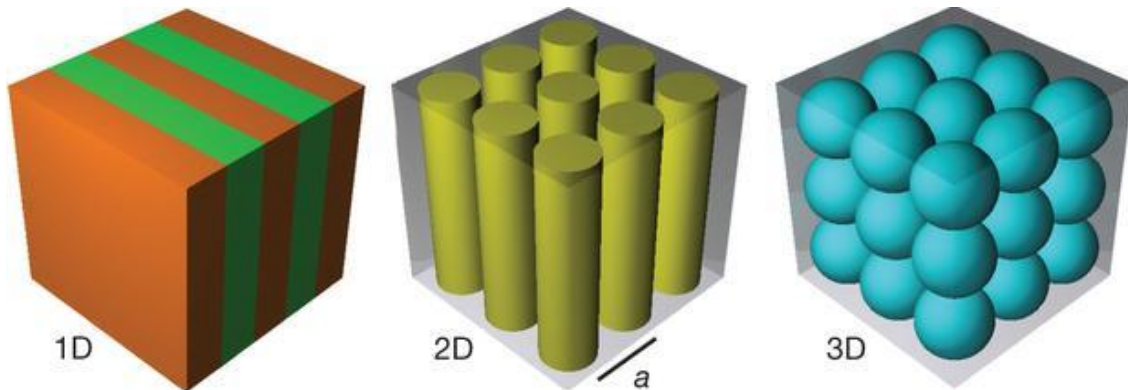
La pregunta de interés es: ¿por qué ciertas ondas no se propagan en los cristales fonónicos? Dado un cristal fonónico compuesto de al menos dos diferentes materiales, en cada interfaz, una onda entrante transfiere parte de su energía a la siguiente, dando origen a ondas reflejadas, las cuales luego interfieren entre sí. Si la interferencia es constructiva, toda la energía de la onda original se refleja, y por lo tanto la onda no se puede propagar a través del cristal. Por otro lado, si la interferencia es destructiva, toda la energía de la onda original se transmite a través del cristal. Es decir, la interferencia constructiva de las ondas secundarias da como resultado la creación del *bandgap* fonónico, mientras que la interferencia destructiva da origen a la formación de bandas de propagación (Transmisión) [1]. Un ejemplo de *bandgap* fonónico, se esquematiza en la *Fig. 1.2*, identificado en la región sombreada de color azul



*Fig. 1.2:* Esquema de un espectro de transmisión típico de un CF, donde puede apreciarse el *bandgap* fonónico y las bandas de propagación.

### 1.3 Tipos de cristales fonónicos

De acuerdo con la periodicidad en el espacio, los cristales fonónicos pueden ser unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, como se esquematiza en la *Fig. 1.3*. Independientemente de su dimensionalidad, sus propiedades acústicas pueden siempre modularse al modificar los parámetros materiales de sus componentes. Es conveniente mencionar que, en los últimos años, se han diseñado cristales fonónicos con propiedades acústicas modulables mediante agentes externos, como campos eléctricos, radiación IR, entre otros.

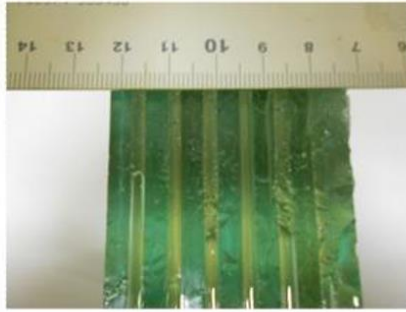


*Fig. 1.3:* Tipos de cristales fonónicos de acuerdo a su periodicidad. Extraída de <<Dispositivos fonónicos para el control del sonido y del calor>>. Recuperado de <https://francis.naukas.com/2013/11/20/fonones/>

A continuación, se discuten algunos resultados y ejemplos de los 3 tipos de cristales fonónicos (1D, 2D y 3D), además de algunas de sus posibles aplicaciones.

#### 1.3.1 Cristales unidimensionales

Los cristales fonónicos pueden ser enrejados simples unidimensionales; este cristal 1D, compuesto por capas alternas de dos materiales diferentes se puede usar para comprender intuitivamente cómo se forman los band gap. Un cristal 1D no tiene un band gap completo porque sus propiedades mecánicas son periódicas en una dirección. Cuando el vector de onda forma ángulos rectos a la dirección de propagación, no se reflejará, entonces no habrá ningún espacio de banda en esta dirección [4].

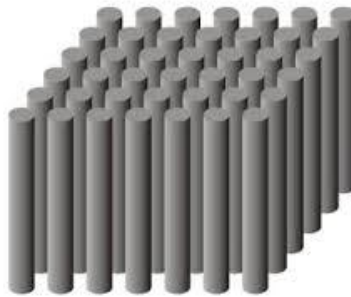


**Fig. 1.4:** Cristal fonónico finito compuesto por 6 celdas unitarias vidrio/cera-gel. El parámetro de red es 8 mm, las capas de vidrio y cera-gel son de 5 mm y 3 mm de grosor, respectivamente. Extraída de la referencia [5].

Se ha estudiado la propagación de ondas elásticas de tipo longitudinal en un cristal fonónico de periodicidad unidimensional, conformado por capas alternadas de cera-gel y vidrio, siendo el ancho de la celda unitaria del orden de milímetros, como se muestra en la *Fig. 1.4*. Se reportó, por ejemplo, que la existencia de las bandas de transmisión y los *bandgaps* asociados al cristal, pueden fácilmente ser verificados para el rango de frecuencias estudiado de 400 kHz a 1.5 MHz. Por otra parte, se concluyó que, al estudiar la transmisión de ondas con incidencia normal a las capas, es importante considerar que el haz emitido por los transductores no es perfectamente perpendicular a la multicapa. Esta pequeña contribución angular es capaz de excitar modos relacionados con vibraciones de tipo transversal en el sistema [5].

### 1.3.2 Cristales bidimensionales

Los cristales bidimensionales (2D) constan de estructuras o cilindros dispuestos en diferentes arreglos, inmersos en una matriz de material diferente, como se muestra en la *Fig. 1.5*. En estos cristales, se predijo teóricamente la existencia de band gaps absolutos antes de demostrarse experimentalmente [4].



**Fig. 1.5:** Cristal bidimensional visto desde un costado. Extraída de <<Estructura de bandas en un cristal fotónico unidimensional y bidimensional>> Revista ECIPerú.

Se pueden distinguir tres clases de cristales bidimensionales principalmente, *sólido- sólido*, *fluido- fluido* y la combinación de éstos *sólido- fluido*. Los cristales *sólido- sólido* consisten en dispersores de sonido sólidos inmersos en una matriz sólida [6]. Kushawa y colaboradores, por ejemplo, consideraron solo el modo de vibración de polarización transversal, con desplazamiento elástico paralelo a los cilindros y perpendicular a los vectores de onda, específicamente para cilindros de Ni dispersos en una matriz de Al y el caso contrario, Al (Ni). En dicho trabajo, se encontraron bandas prohibidas fonónicas que se extienden a lo largo de la primera zona de Brillouin en ambos casos. Así mismo, se investigó la dependencia del *bandgap* en la composición del material y en los parámetros físicos de los componentes involucrados en el sistema compuesto [7].

Las estructuras periódicas sólido-fluido son conocidas como cristales fonónicos mixtos y están conformados generalmente por dispersores de sonido sólidos inmersos en una matriz fluida, sea aire o algún líquido. Un gran contraste en las propiedades físicas entre los dos materiales se satisface con frecuencia (dependiendo especialmente de las características de la fase sólida), particularmente para el caso de las combinaciones sólido-gas. Estos sistemas presentan modos complejos de vibración, debido a que el medio líquido, que sólo permite modos longitudinales, mientras que los sólidos permiten tanto modos longitudinales como transversales [6].

### 1.3.3 Cristales tridimensionales

Los cristales tridimensionales constan de dispersores esféricos tridimensionales (3D) distribuidos en un fluido o sólido. Para diseñar un cristal fonónico que tenga un *bandgap* completo, la densidad y la velocidad del sonido deben variar en las tres direcciones del espacio, sin embargo, no todas las estructuras 3D formarán dicho *bandgap* [4].

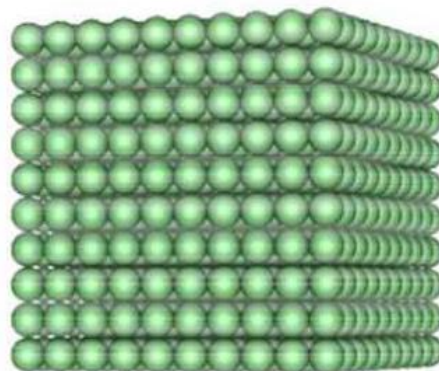


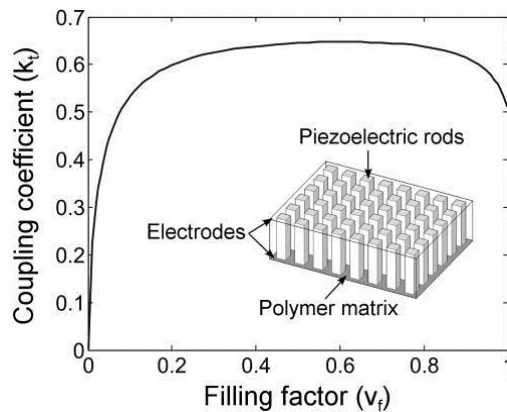
Fig. 1.6: Ejemplo de cristal tridimensional. Adaptado de <<Cristal tridimensional>>. Recuperado de <https://image3.slideserve.com/5525418/definiciones5-n.jpg>

Por ejemplo, se han reportado artículos en los que se encontraron topologías 3D en un sistema de cristal fonónico de 2 materiales que producen grandes *bandgaps* angulares, de todo tipo y normalizados para cada una de las tres simetrías consideradas [8].

### 1.3.4 Cristales fonónicos con propiedades modulables

La propagación de una onda mecánica a través de un cristal fonónico se controla principalmente por el contraste en las propiedades mecánicas de los dispersores y la matriz, así como la forma, el tamaño y la disposición de los dispersores, y el vector de onda de la onda acústica incidente [9]. Una vez que se ha fabricado un cristal fonónico, sus propiedades son fijas y solo pueden modularse en la medida en que se pueda cambiar cualquiera de las variables anteriores. Los primeros cristales fonónicos sintonizables se modulaban a través de sus propiedades hilemórficas<sup>1</sup>, ya sea cambiando físicamente el tamaño de los dispersores en el cristal o rotando el cristal por completo [10].

Muchos métodos logran el ajuste cambiando las propiedades hilemórficas de la estructura, manipulando los parámetros de la red, por ejemplo. La manipulación de los parámetros del material, e incluso la manipulación de combinaciones de parámetros hilemórficos y materiales en cristales fonónicos, se ha demostrado más recientemente mediante la implementación de materiales piezoeléctricos como se aprecia en la *Fig. 1.7* y elastómeros dieléctricos en estructuras sónicas que incluyen cristales fonónicos. [9].



**Fig. 1.7:** Cristales fonónicos ajustables basados en compuestos piezoeléctricos. Extraída de << Tunable phononic crystals based on piezoelectric composites with 1-3 connectivity>> The Journal of the Acoustical Society of America.

<sup>1</sup> Todo cuerpo se encuentra constituido por materia y forma.

El ajuste de estructuras sónicas ha sido demostrado o explorado teóricamente. Por ejemplo, se ha reportado que dos guías de onda sintonizables con diferentes radios internos pueden emplearse para filtrar y separar dos frecuencias específicas de una señal de entrada de banda ancha [11]. En otro trabajo se logró controlar el band gap y modificar las características acústicas del sistema mediante diferentes campos eléctricos aplicados [12], o modificando las propiedades magnéticas de los dispersores [13]. De igual manera, en algunos trabajos, se ha controlado la profundidad de dispersores [14] y la rotación del cristal [15].

## 1.4 Fenómenos observados en cristales fonónicos

Debido a las posibles características de *bandgap* completo, los cristales fonónicos se pueden diseñar seleccionando parámetros físicos y geométricos, con la finalidad de observar diferentes fenómenos, por ejemplo, el guiado de ondas acústicas. Además, basándose en el diseño de contornos de frecuencia equitativa de un cristal fonónico, también puede observarse el enfocamiento y la colimación de ondas acústicas de diversas frecuencias. A continuación, se describen brevemente algunos de los fenómenos mencionados.

### 1.4.1 Colimación de ondas acústicas

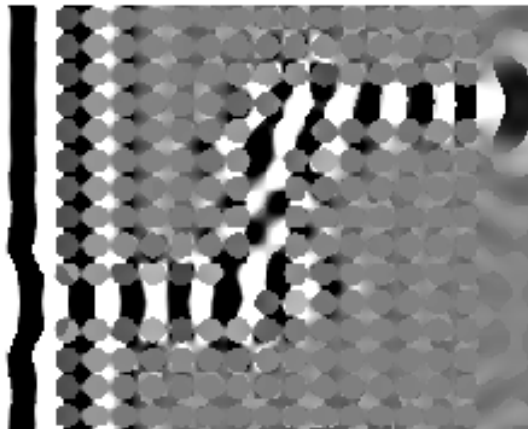
Mediante resultados de simulación numérica, se ha demostrado que las ondas acústicas dentro de los bandgaps parciales tienden a ser colimadas en la dirección en la que está permitida la propagación [16].

Debemos recordar que la colimación es la alineación de un sistema óptico para obtener un haz paralelo de rayos luminosos, por lo cual, esta teoría de la luz puede aplicarse en el sonido por lo cual, Qiu y Liu han investigado numéricamente cómo las cavidades resonantes formadas por defectos de línea en los cristales fonónicos afectan la colimación del sonido y la mejora de la señal [17]. Sus resultados muestran que es posible obtener una fuente acústica altamente direccional con una gran mejora de la radiación, operando a la frecuencia de borde de banda del cristal fonónico. Estos métodos han allanado una vía para la colimación acústica basada en cristales fonónicos; sin embargo, solo funcionan dentro de una banda de frecuencia estrecha, y por lo tanto no son prácticos para muchas aplicaciones.

### 1.4.2 Guiado de ondas acústicas

Un cristal fonónico que exhibe un *bandgap* completo es, en teoría, una trampa perfecta para cualquier onda generada dentro de él. En consecuencia, si una fuente acústica (resonador) se coloca en el centro de una cavidad fonónica, la energía emitida queda atrapada en su interior. En la práctica, sin embargo, siempre existirán imperfecciones que conducen a pérdidas. Además, dado que un cristal fonónico infinito no puede ser construido a mano, la trampa no puede ser perfecta. Si la fuente de la onda se coloca fuera del cristal fonónico, será posible transferir, en virtud de las características del cristal, una parte de la energía acústica a la cavidad fonónica. Esta transferencia, sin embargo, solo puede ocurrir eficientemente para frecuencias bien definidas. Tal objeto que permite la selección de una frecuencia altamente pura, se le conoce como un resonador [18].

La cavidad que se ha descrito es, de hecho, un defecto del cristal fonónico. Al elegir correctamente la organización de una secuencia de defectos, es posible restringir las ondas para seguir una ruta determinada, que se denomina guía de ondas, como se muestra en la *Fig. 1.8*.



*Fig. 1.8:* Guiado de onda de un cristal fonónico a una frecuencia de 275 kHz. Extraída de << Experimental study of guiding and filtering of acoustic waves in a two dimensional ultrasonic crystal >> HAL.

Las ondas incidentes en la entrada de la guía de ondas (lado derecho del cristal en la *Fig. 1.8*) no tienen otra opción más que seguir la dirección de los defectos, debido a que cualquier otra dirección estará prohibida, siempre que dicha frecuencia se encuentre dentro del *bandgap* del cristal fonónico. De este modo, es posible definir trayectorias relativamente arbitrarias, siempre que las ramas de la guía de ondas permanezcan separadas por un grosor de cristal fonónico suficiente. De este modo, se pueden lograr guías de onda con ángulos de  $90^\circ$ , a la par con sistemas de demultiplexado y distribución de canales. Esta posibilidad abre el camino hacia el

diseño de circuitos fonónicos, es decir, la distribución de la energía acústica a múltiples puntos en el espacio. Las aplicaciones potenciales también incluyen el procesamiento de señales para comunicaciones, así como el enrutamiento de ondas acústicas en sistemas de imágenes por ultrasonido o terapia [18].

### 1.4.3 Atenuación de ondas acústicas

Una de las primeras observaciones de ésta índole, fue la realizada para medir la atenuación acústica de una escultura exhibida en la fundación Juan March en Madrid, y que actualmente se encuentra en el campus de la UPV *Fig 1.9.*, la cual parecía poseer una estructura rígida apropiada para los experimentos.



*Fig. 1.9:* Escultura exhibida en la fundación Juan March.

Un equipo de científicos, descubrió que Eusebio Siempre (autor de la escultura), construyó lo que se denomina cristal fonónico. Realizada con tubos de 3 cm de diámetro dispuestos en una estructura periódica con una distancia de 10 cm entre los centros de los tubos, formando un círculo en una plataforma de 4 m de diámetro, éste cristal fonónico tiene un *bandgap* alrededor de la frecuencia (audible) de 1,6 kHz [19].

## 1.5 Enfocamiento de ondas acústicas utilizando cristales fonónicos

Enfocar ondas elásticas a través de lentes fonónicas (ondas electromagnéticas en el caso de una lente óptica) es, definitivamente, uno de los fenómenos más llamativos, y que se ha vuelto uno de los objetivos más importantes en el estudio tales estructuras periódicas. Lo anterior, debido principalmente a que, el diseñar una estructura que emule una lente óptica, es decir que concentre la energía acústica en un

punto o región, fuera del cristal, tendría diversas aplicaciones en el campo de la medicina, ingeniería, entre otros [20].

Uno de los primeros reportes asociados con el uso de cristales fonónicos para el diseño de lentes acústicas, fue desarrollado a partir de un arreglo hexagonal de cilindros de aluminio dispuestos en aire [21]; la lente diseñada mostró ser capaz de enfocar ondas de 1.7 kHz. Posteriormente, se mostró la posibilidad de enfocar ondas con una frecuencia de 1.57 MHz a partir de un cristal 3D, compuesto por esferas de tungsteno embebidos en agua [22]. A partir de entonces, se han reportado diversos trabajos sobre el tema; por ejemplo, el enfocamiento de ondas de 550 kHz a través de un cristal formado por cilindros de acero dispuestos de forma triangular en metanol [23].

El enfocamiento de ondas acústicas esta soportado esencialmente, por el hecho de que, en un medio anisotrópicamente elástico, la velocidad de grupo y el vector de onda no son paralelos, de tal forma que, ondas con diferente vector de onda, tienen una velocidad de grupo muy similar, lo que lleva a que el flujo de energía acústica, siguiendo la dirección de propagación de la velocidad de grupo, sea canalizada a lo largo de una trayectoria perfecta [24]. Así mismo, el enfocamiento de ondas acústicas, has sido validado en términos de índices de refracción y velocidad de grupo negativos [22, 23].

## 1.6 Aplicaciones

El concepto de cristal fonónico es demasiado reciente históricamente, por lo que, aunque ha impactado en la investigación científica, aún hay muchas preguntas abiertas y resta mucho trabajo, tanto teórico como experimental, antes de que tengan aplicaciones en la vida cotidiana. Una primera aplicación fue inicialmente sugerida por Kushwaha y colegas [25], y está asociado con aislamiento acústico; cabe mencionar que Kushwaha es considera el pionero, a nivel mundial, de la investigación asociada con cristales fonónicos. Una segunda aplicación, es la construcción de rompeolas; Hu y Chan, de la Technology University de Hong-Kong propusieron en 2005 [26], usar estas estructuras para focalizar las olas hacia una planta eléctrica, con el fin de convertir la energía mecánica en energía eléctrica.

Los ejemplos mencionados muestran dos aplicaciones con dimensiones muy diferentes, sin embargo, los cristales fonónicos también pueden tener aplicaciones en escala micro y nanoscópica, debido a avances recientes en tecnologías de microfabricación. En ese sentido, se sabe que para periodicidades de unas pocas micras o menos, aparecen bandas prohibidas en las frecuencias en los pocos cientos de MHz,

hasta un rango de pocos GHz, exactamente dentro del campo de las comunicaciones inalámbricas, así, nuevos dispositivos mezclando microelectrónica y ondas acústicas podrían ser diseñados y extender las capacidades de los teléfonos móviles y redes inalámbricas, por ejemplo [2].

En el mismo tenor, tales estructuras, también posibilitan aplicaciones del control de los fonones, como en el desarrollo de "termocristales", que regulen la temperatura de un espacio de interés [27]. Trabajos más recientemente reportados, ha permitido que los cristales fonónicos muestren potenciales aplicaciones como aislantes acústicos, espejos acústicos perfectos o supresores de ruido y, mediante la introducción de defectos, como resonadores, cavidades o guías de ondas elásticas [28]. En el intervalo de megahertz (MHz), los cristales fonónicos pueden ser útiles para aplicaciones de ultrasonido biomédico o microscopía acústica [5]. En aplicaciones biomédicas, podría tener impacto en la detección de osteoporosis de manera sencilla, por medio del diseño de un sistema a base de ondas acústicas para determinar la composición de un hueso [29].

# Capítulo 2

## *COMSOL-Multiphysics*

En el presente capítulo se describen detalles de la plataforma *COMSOL-Multiphysics*, enfocándose principalmente en el módulo de acústica. Esta herramienta permite la simulación de las propiedades acústicas de los cristales fonónicos que se analizan en la presente tesis.

## 2.1 ¿Qué es *COMSOL-Multiphysics*?

*COMSOL Multiphysics* es una herramienta de modelado y análisis para prototipaje virtual de fenómenos físicos. *COMSOL Multiphysics* puede modelar virtualmente cualquier fenómeno físico que pueda describirse con ecuaciones diferenciales parciales (PDE), incluyendo transferencia de calor, movimiento de fluidos, electromagnetismo y mecánica estructural, soportando la integración de problemas de diferentes campos (Metafísica).

Las herramientas integradas en *COMSOL* permiten que el usuario pueda modelar simultáneamente cualquier combinación de fenómenos. A través de tales herramientas, *COMSOL* integra las dos formas posibles de modelar (a través de aplicaciones predefinidas que permiten crear el modelo, fijando las cantidades físicas que caracterizan el problema, y a través de las ecuaciones que modelan el problema) y permite combinarlas. La estructura sobre la que *COMSOL* trabaja, es un sistema de Ecuaciones Diferenciales Parciales (PDEs), una descripción matemática de varios fenómenos físicos basados en diversas leyes. *COMSOL* simplifica el desarrollo de aplicaciones a través del uso de la Biblioteca de Modelos, que incorpora ejemplos de diversas áreas de aplicación [30].

Las herramientas de modelado y simulación de *COMSOL*, junto con las librerías disponibles para él, lo convierten en una herramienta aplicable en un amplio abanico de áreas, entre las que destacamos:

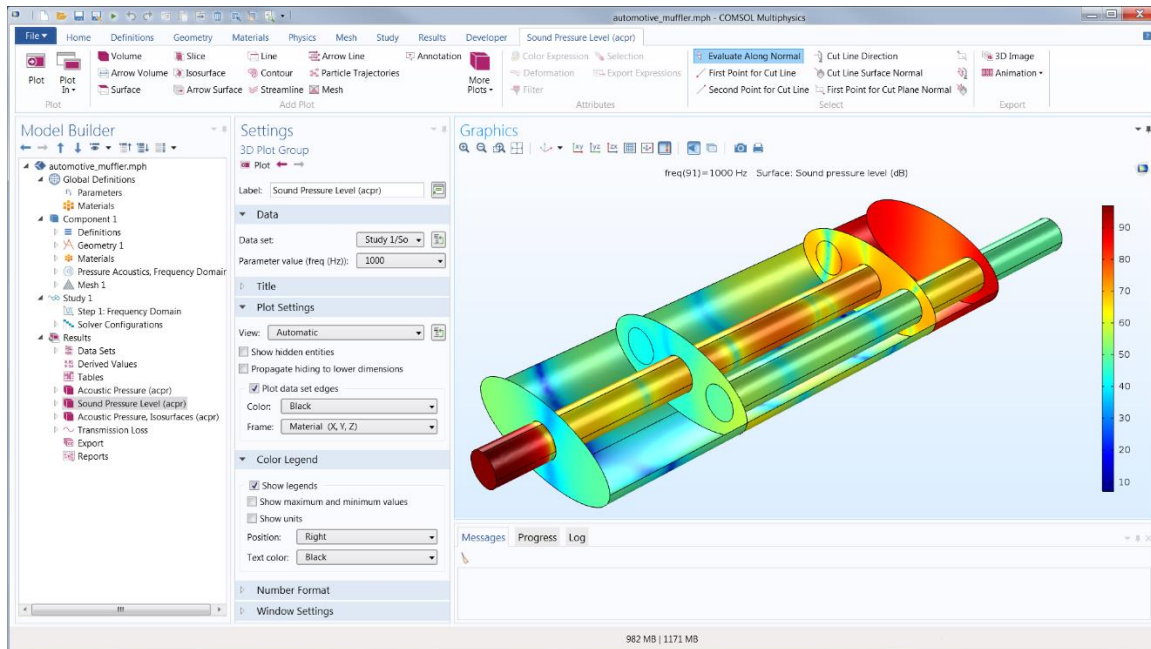
- Acústica, electromagnetismo, sistemas microelectromecánicos (MEMS), ingeniería de microondas, componentes de radiofrecuencia, dispositivos semiconductores, propagación de ondas.
- Reacciones químicas, difusión, dinámica de fluidos, fluidos en medios porosos, transferencia del calor, fenómenos de transporte.
- Mecánica de estructuras.
- Física, geofísica, óptica, fotónica, mecánica cuántica.
- Sistemas de control.

- Modelado de componentes.
- Matemática aplicada.

Para lo cual se cuenta con los siguientes módulos:

- *AC/DC Module*
- *Acoustics Module*
- *Batteries & Fuel Cells Module*
- *CAD Import Module*
- *CFD Module*
- *Chemical Reaction Engineering Module*
- *Corrosión Module*
- *ECAD Import Module*
- *Electrochemistry Module*
- *Electrodeposition Module*
- *Fatigue Module*
- *File Import for CATIA v5*
- *Geomechanics Module*
- *Heat Transfer Module*
- *Material Library*
- *MEMS Module*
- *Microfluidics Module*
- *Molecular Flow Module*
- *Multibody Dynamics Module*
- *Nonlinear Structural Materials Module*
- *Optimization Module*
- *Particle Tracing Module*
- *Pipe Flow Module*
- *Plasma Module*
- *RF Module*
- *Semiconductor Module*
- *Structural Mechanics Module*
- *Subsurface Flow Module*
- *Wave Optics Module*

Para el desarrollo de la presente tesis el módulo que se empleó fue *Acoustic Module*, por lo que posteriormente se hablará más a detalle acerca de dicho módulo, el cual está diseñado para la medición, producción y utilización de ondas acústicas. La **Fig. 2.1** nos muestra una simulación acústica, diseñada en *COMSOL-Multiphysics*, a partir del módulo de acústica.



**Fig. 2.1** Ejemplo de acústica: análisis de la propagación de la onda de presión en un silenciador para un motor de combustión. Extraída de <<Acoustics example *COMSOL*- Multiphysics>> Recuperado de <https://imgv2-1-f.scribdassets.com/img/document/384330131/original/32214457c5/1543306156?v=1>.

En la **Fig. 2.2** se puede observar la interfaz gráfica de *COMSOL*, en la que se muestra lo que un usuario observa cuando comienza con el proceso de modelado. *COMSOL* proporciona un entorno completo e integrado para simulación y modelado de diversos problemas en física [31].

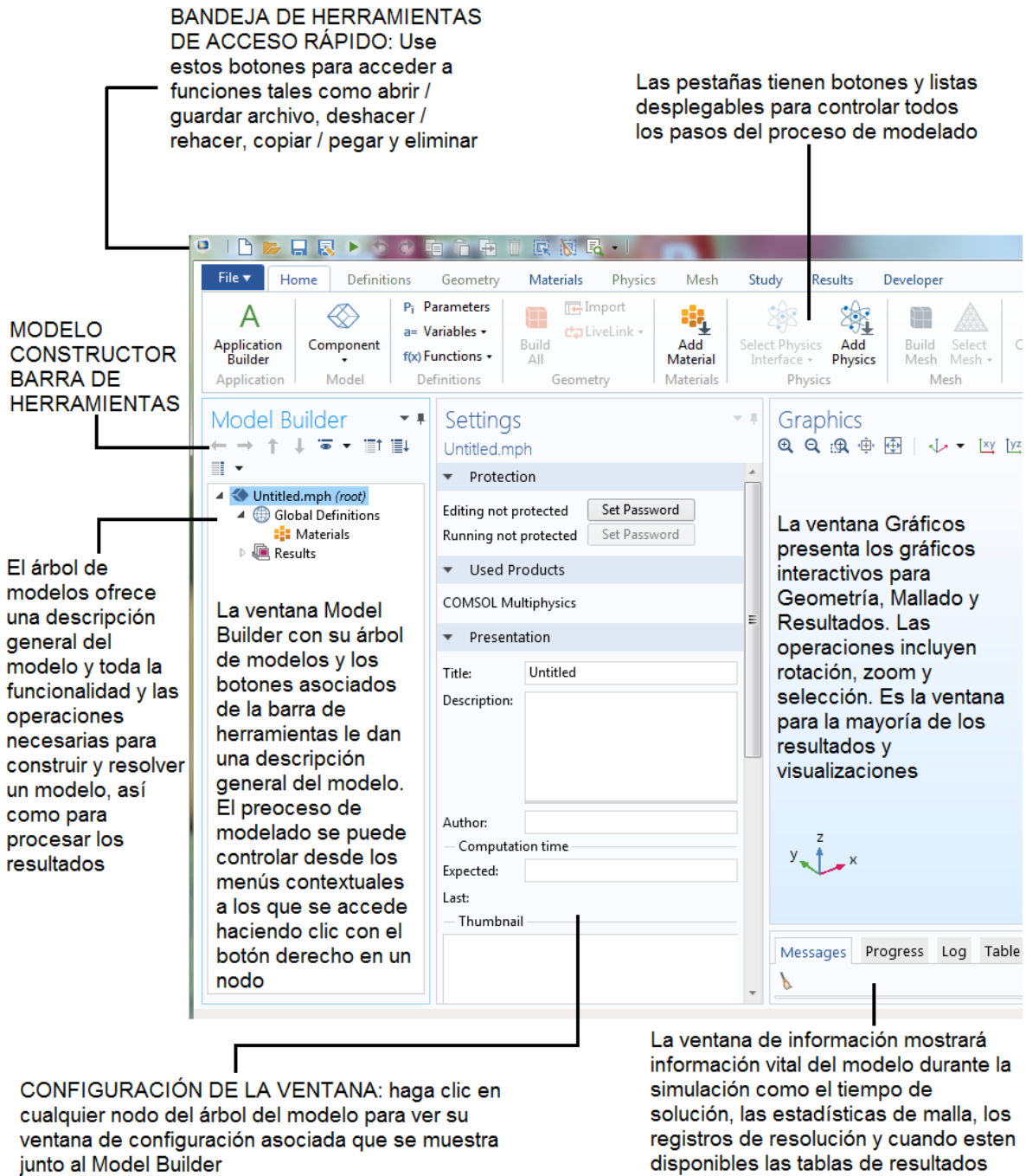


Fig 2.2 Escritorio de COMSOL-Multiphysics

## 2.2 Módulo de acústica (*Acoustic Module*)

El Módulo acústico es un complemento del software *COMSOL Multiphysics* que proporciona herramientas para modelar acústica y vibraciones, fenómenos útiles para aplicaciones tales como altavoces, dispositivos móviles, micrófonos, silenciadores, sensores, sonar y medidores de flujo [32]. Varias características hacen que este módulo esté particularmente adaptado a resolver este tipo de problemas. Por ejemplo, el dominio teórico de la mayoría de los problemas acústicos es infinito, pero el modelado de este dominio está por encima de las capacidades de cualquier ordenador. Para permitir un modelado correcto de un espacio truncado bien definido, el *Acoustics Module* utiliza capas perfectamente adaptadas (PML), una técnica que ha surgido como la más adecuada y precisa manera de truncar un entorno acústico abierto. Un PML es un dominio adicional que absorbe la radiación incidente sin producir reflexiones; proporciona buenos rendimientos para un amplio rango de ángulos de incidencia y no es muy sensible a la forma de los frentes de onda.

Otro elemento clave de estudios acústicos, es el amortiguamiento, *Acoustics Module* ofrece tres maneras de introducir la absorción tanto en sólidos como en fluidos: utilizando el método Delany-Bazley, donde el usuario introduce información sobre la resistividad de flujo; proporcionando un coeficiente de absorción específico; o con un método de absorción general, donde los usuarios pueden importar datos de materiales complejos a partir de medidas en un material amortiguante. El módulo viene con una Librería de Modelos que contiene más de una docena de casos con una discusión teórica detallada seguida de instrucciones paso a paso, pero los usuarios pueden también simplemente cargar uno de los modelos proporcionados. Un ejemplo estudia cómo diseñar un woofer e involucra el acoplamiento multifísico de aspectos electromagnéticos, acústicos y estructurales. Otro analiza el problema de un tubo abierto, que es un ejemplo de referencia clásico, a la hora de tratar resonancias. Un tercer estudio analiza la reflexión de modos de propagación hacia adelante en la toma de un motor reactor, incluyendo un flujo compresible y PMLs para truncar el dominio; los resultados se comparan con simulaciones publicadas y con soluciones semianalíticas [33].

Entre las áreas de aplicación se pueden incluir la industria de audio, como el diseño de altavoces, ya sean altavoces individuales o los sistemas empotrados en aparatos electrónicos como teléfonos móviles, para detección y caracterización de objetos submarinos, y procesamiento de campo lejano para predecir patrones de radiación y potencia de señal.

Existen algunas dificultades durante el modelado de acústica, como los requisitos severos para la solución del mallado, el modelado de los límites artificiales y el modelado de los materiales amortiguadores reales. Para resolver estos problemas o dificultades y simplificar el proceso de modelado, el módulo de Acústica en *COMSOL Multiphysics* incluye algunas características que se describirán a continuación.

### 2.2.1 Resolución de las ondas

Las soluciones a los problemas de acústica son similares a los de las ondas. Dichas ondas están caracterizadas por una longitud de onda  $\lambda$  en el espacio, cuyo valor depende de la frecuencia ( $f$ ) y la velocidad del sonido  $c$  en algún medio, de acuerdo con la Ecuación (1)

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

Esta ecuación se resuelve en el mallado. Para que la solución en la rejilla discreta tenga algún significado deben existir al menos dos grados de libertad, *DOFs*, por sus siglas en inglés (*Degrees of Freedom*), por longitud de onda en la dirección de propagación. Debido a que la dirección de propagación de manera general se desconoce, en la práctica resulta bien el dirigir una malla isotrópica con aproximadamente doce *DOFs* por longitud de onda en promedio, independientemente de la dirección de propagación. Por lo tanto, el número de *DOFs* en una malla resuelta es aproximadamente: 12 veces la longitud del modelo medido en longitudes de onda en una dimensión, 144 veces el área del modelo medido en longitudes de onda al cuadrado en dos dimensiones y 1728 veces el volumen del modelo medido en longitudes de onda al cubo en tres dimensiones.

### 2.2.2 Límites artificiales

En la mayoría de los casos, el patrón de ondas acústicas que se simula, no está contenido en una cavidad cerrada. Es decir, hay límites en el modelo que no representan un límite de ningún tipo. En cambio, la condición del límite debe representar la interacción entre el patrón de onda dentro del modelo y todo lo externo. Estas condiciones se conocen, genéricamente, como condiciones de contorno artificial.

### 2.2.3 Evaluación del campo acústico en la región de campo lejano.

El módulo de acústica proporciona funcionalidad para evaluar el campo de presión en la región de campo lejano. El dominio de solución para un problema de dispersión o radiación se puede dividir en dos zonas, reflejando el comportamiento de la solución a diversas distancias de objetos y fuentes. En la región de campo lejano, las ondas dispersas o emitidas son localmente planas; la velocidad y la presión están en fase. Y la relación entre la presión y la velocidad se aproxima a la impedancia de espacio libre de una onda plana.

El movimiento más cercano a las fuentes en la región de campo cercano, la presión y la velocidad gradualmente se desfazan. Esto significa que el campo acústico contiene energía que no viaja hacia afuera o irradia.

### 2.2.4 Representación integral de la ecuación de Helmholtz-Kirchhoff

En muchos casos, resolver la ecuación de Helmholtz-Kirchhoff en todas las partes del dominio donde se requiere, no es práctico ni necesario. Para medios homogéneos, la solución en cualquier parte fuera de una superficie cerrada que contenga todas las fuentes, puede escribirse como una integral límite en términos de las cantidades evaluadas en la superficie. Para evaluar la integral de Helmholtz-Kirchhoff es necesario conocer los valores de Dirichlet y Neumann en la superficie. Aplicando la acústica, esto significa que si se conoce la presión y la derivada normal en una superficie cerrada, se puede calcular el campo acústico en cualquier punto externo [34].

## 2.3 Método de los elementos finitos

*COMSOL Multiphysics* es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos. El método de los elementos finitos (FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy complejas. La solución obtenida por FEM es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El FEM convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras) [35].

Mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (PDE) se pueden describir una gran variedad de sistemas físicos. Estas ecuaciones describen las variaciones de las propiedades en el espacio y a lo largo del tiempo, y necesitan de ciertas condiciones (iniciales y de contorno) para su resolución. Las soluciones analíticas solo son posibles en casos muy determinados, pero no a nivel general.

El entorno de trabajo de *COMSOL* incorpora las fases fundamentales: definición del problema, resolución del mismo y post-procesado. La definición del problema se inicia seleccionando los modelos físicos a utilizar e introduciendo la geometría. El segundo paso consiste en especificar las propiedades físicas y las condiciones iniciales y de contorno en los diferentes subdominios de estudio. En la etapa de resolución pasa se define una malla de cálculo y se especifican los parámetros del método de cálculo a utilizar. En este punto ya se puede ejecutar el cálculo para la resolución del problema. La tercera etapa consiste en el procesado de resultados, se utilizan herramientas que nos permiten una gran versatilidad en la representación gráfica de los resultados obtenidos, así como de herramientas de cálculo matemático que nos permiten, entre otras cosas, integrar propiedades en subdominios y contornos [36].

A través de la plataforma *COMSOL*, se divide el modelo a analizar, en elementos discretos, de acuerdo con la teoría FEM y, en el caso del módulo de acústica, se resuelve la ecuación de onda (Ecuación 2) en cada uno de los nodos, que son los puntos de coincidencia entre elementos contiguos (detalles de cómo establecer los nodos, se darán el siguiente capítulo). En la Figura 2.3 se muestra un esquema de dichos elementos.

$$\nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (2)$$

Por lo tanto, los valores de potencia acústica que arroja *COMSOL*, son el promedio de todas las potencias medidas, al resolver la ecuación de onda, en cada nodo, es decir, *COMSOL* resuelve dicha ecuación millones de veces (dependiendo del modelo) y arroja un valor de potencia o presión acústica para una frecuencia específica.

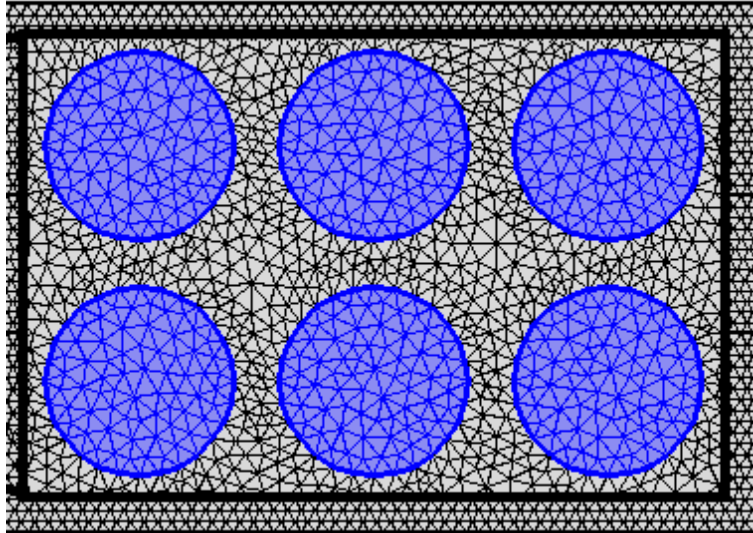


Fig. 2.3: División en elementos finitos

# Capítulo 3

## Detalles de simulación

En el presente capítulo se muestran los detalles de las simulaciones de los cristales fonónicos analizados en la presente tesis. Se describen con detalle, el diseño de las lentes, incluyendo sus representaciones gráficas para una mejor comprensión.

### 3.1 Simulación

Se ha mencionado en el capítulo anterior que los cristales fonónicos están conformados por dispersores de sonido, dispuestos de manera periódica en una matriz, con particularidad de que, existe un contraste alto entre la velocidad del sonido en los dispersores y la matriz [1].

En base a ello, los cristales fonónicos bidimensionales diseñados en la presente tesis, están conformados por un arreglo de 19x19 cilindros de acero inoxidable, dispuestos cuadráticamente en una matriz de agua.

Para lograr esto, en la ventana *Model Builder*, de la plataforma *COMSOL*, se fue describiendo el modelo de la siguiente manera. En el nodo *Definitions*, se agregan las variables utilizadas para la visualización y el análisis de la solución. Se agregan las constantes físicas y las variables geométricas de los materiales y el cristal, obteniendo el arreglo de 19x19 cilindros, quedando también definidos los límites, tanto de los dispersores como de la caja de simulación. La información sobre densidades y constantes elásticas para los materiales conformando al cristal están dadas en la siguiente *Tabla 3.1*.

*Tabla 3.1.* Densidad  $\rho$  y velocidad longitudinal  $c_l$  y velocidad transversal  $c_t$  del sonido en acero y agua.

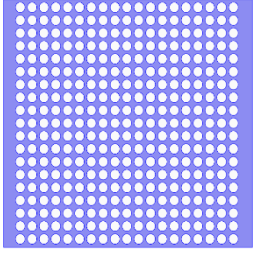
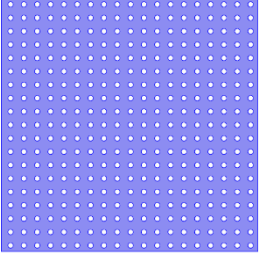
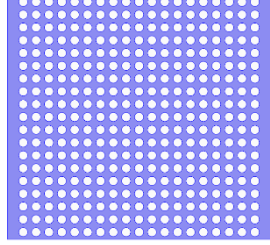
Material	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$c_l(\text{m/s})$	$c_t(\text{m/s})$
Acero	7,780	5,825	3,227
Agua	1,000	1,490	-

A continuación, en el apartado *Geometry* se seleccionan las partes que serán aisladas dentro de la geometría y se elige la forma en que se dividirá nuestro diseño. Y en *Materials* se agregan los materiales utilizados en el modelo (agua y acero) y se definen los dominios de los cilindros y el material utilizado.

En la *Tabla 3.2* se muestran los 3 cristales diseñados. El primero A-0.8 (2), estuvo conformado por cilindros de radio de 0.8 mm y un parámetro de red de 2 mm.

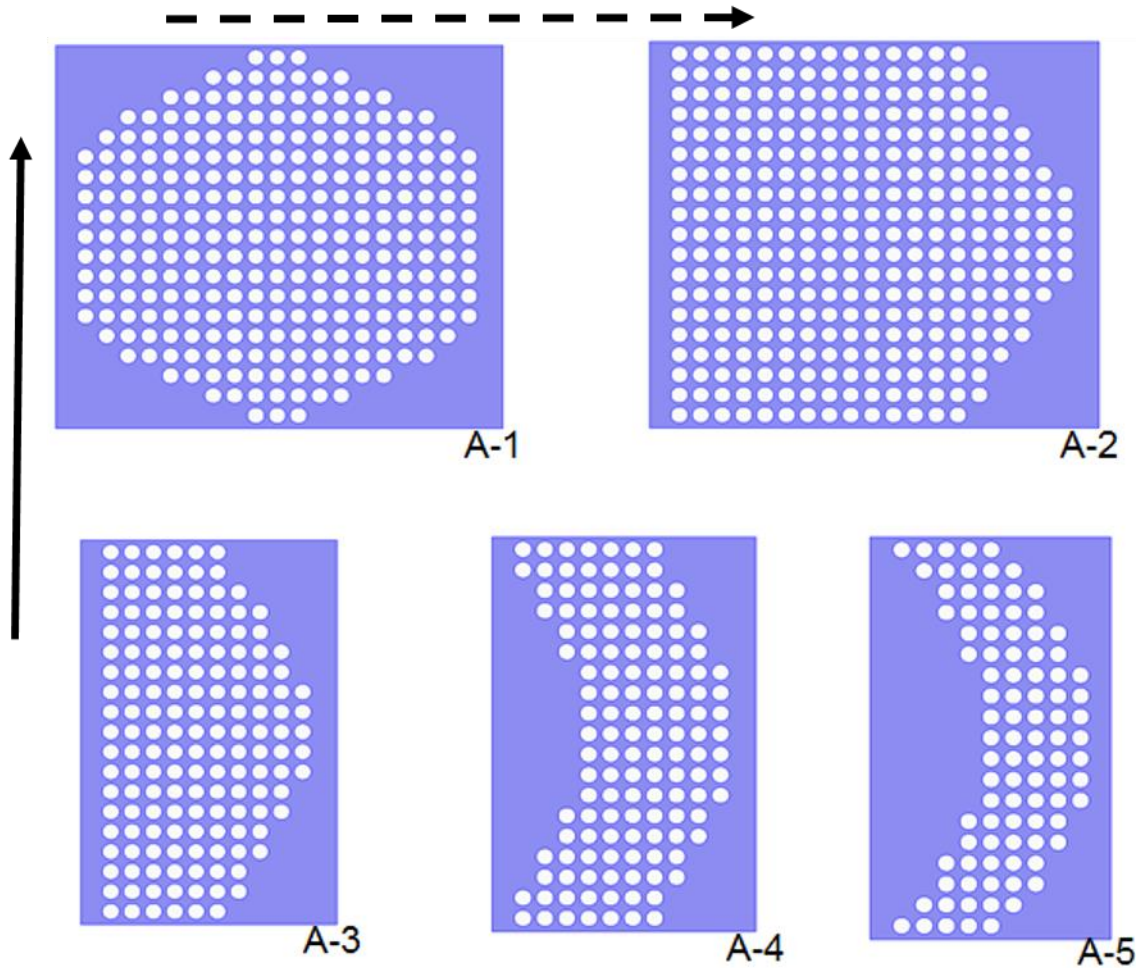
En el caso de los cristales B-1.6 (4) y C-1.6 (2.3), el radio fue 1.6 mm, mientras que los parámetros de red fueron 4 mm y 2.3 mm, respectivamente.

**Tabla 3.2:** Parámetros geométricos de los 3 cristales fonónicos analizados.

Nombre	Radio (r)	Parámetro de red (a)	Figura
Cristal A-0.8 (2)	0.8 mm	2 mm	
Cristal B-1.6 (4)	1.6 mm	4 mm	
Cristal C-1.6 (2.3)	1.6 mm	2.3 mm	

En base al objetivo de la tesis, a partir de los cristales analizados, se diseñaron diferentes lentes acústicas, al modificar la forma inicial los cristales mostrados en la **Tabla 3.1**. Para conseguir la geometría deseada, se eliminan cilindros en ciertas posiciones, logrando que los restantes conjuntamente adquieran formas lenticulares, como puede observarse en la **Fig. 3.1**, correspondiente al Cristal A-0.8 (2). Cabe mencionar que, a pesar de saber que la luz se comporta de diferente manera que el sonido, dichas lentes están inspiradas en diseños bien conocidos de lentes ópticas.

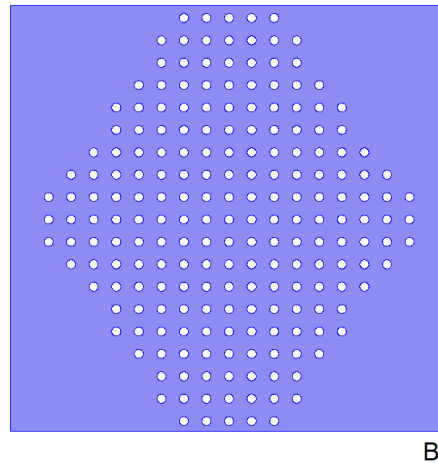
Inicialmente, con el Cristal A-0.8 (2) podemos observar en la *Fig. 3.1* que los parámetros empleados permitieron el diseño de cinco lentes, la lente A-1 tiene una forma biconvexa, la lente A-2 convexa al igual que A-3, mientras que A-4 y A-5 poseen forma de menisco variando entre estas su tamaño. Las últimas 3 lentes estuvieron conformadas únicamente por 10 periodos del cristal en la dirección de propagación (flecha punteada, la flecha continua es perpendicular a la propagación), siendo 19 para las primeras.



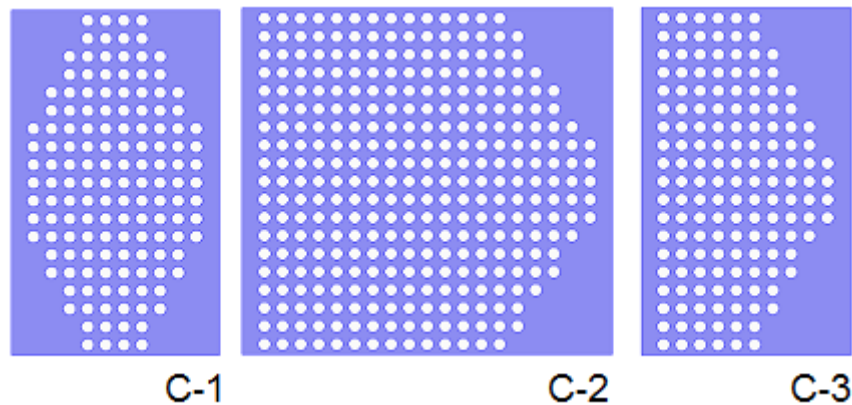
*Figura 3.1:* Lentes A-1, A-2, A-3, A-4 y A-5 diseñadas partiendo del cristal A-0.8 (2).

El Cristal B-1.6 (4) permite diseñar una lente biconvexa B *Fig. 3.2* donde logramos observar que los cilindros a diferencia de la lente biconvexa A-1, se encuentran más separados entre sí debido a los parámetros que se emplearon como se muestra en la *Tabla 1*. Por último, se diseñaron cuatro lentes partiendo del Cristal C-1.6 (2.3), C-1 lente delgada de forma biconvexa, C-2 y C-3 plano convexa con la variación en C-3 en que se diseñó más delgada y para finalizar, C-4 menisco, como se

muestra en la **Fig. 3.3**. Es conveniente mencionar que estrictamente, se diseñaron las mismas lentes con cada cristal, sin embargo, los que se presentan, son solo aquellas con las que el enfocamiento de ondas es visible parcial o totalmente.



**Fig. 3.2:** Lente B diseñada a partir del cristal B-1.6 (4).



**Fig. 3.3:** Lentes C-1, C-2, C-3 y C-4 diseñadas a partir del cristal C-1.6 (2.3 mm).

El análisis de las propiedades acústicas de las lentes y los cristales a diferentes frecuencias se llevó a cabo al establecer una fuente emisora, un área de transmisión y un área de focalización en la ventana *Model Builder*, el resultado grafico de esto se aprecia en la ventana *Graphics*, siendo el diagrama el que se aprecia en la **Fig, 3.4**. Es de gran importancia mencionar que este proceso se realiza para todos los cristales y lentes pero solo se incluyen aquí los diagramas de la lente A-1 para ejemplificar. El área de transmisión total es la suma del área de enfocamiento y las regiones grises en

la Fig. 3.4. Aunque *COMSOL* proporciona la distribución de energía al interior del cristal, en éste caso, no se hizo ningún análisis en la sección que comprende el cristal.

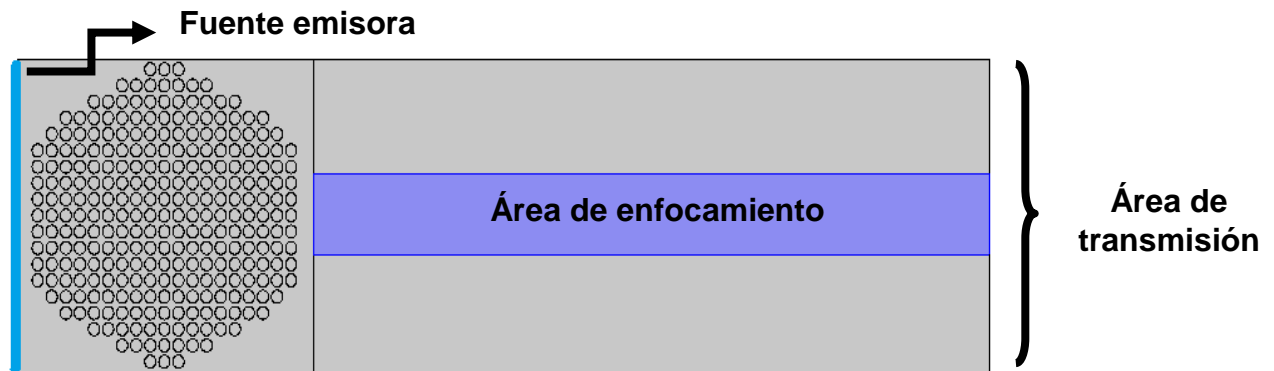


Fig. 3.4: Diagrama de la lente A-1 donde se aprecia la fuente emisora, el área de enfocamiento y el área de transmisión

El método de elementos finitos da información del comportamiento del modelo analizándolo mediante la combinación de la información de todos los elementos del modelo para lo cual es necesario aplicar el proceso de mallado. Una vez teniendo definida la geometría y los materiales, se crea una malla en la sección *Mesh*; esta sección contiene una lista de opciones para seleccionar una técnica de mallado necesario.

El proceso de mallado consiste en que, una vez creado el modelo geométrico, el programa subdivide el modelo en partes pequeñas de formas sencillas llamadas elementos, conectadas en puntos comunes llamados nodos; esto es en lo que esencialmente consiste el método de elementos finitos. El modelo finalmente quedó como se muestra en la Fig. 3.5

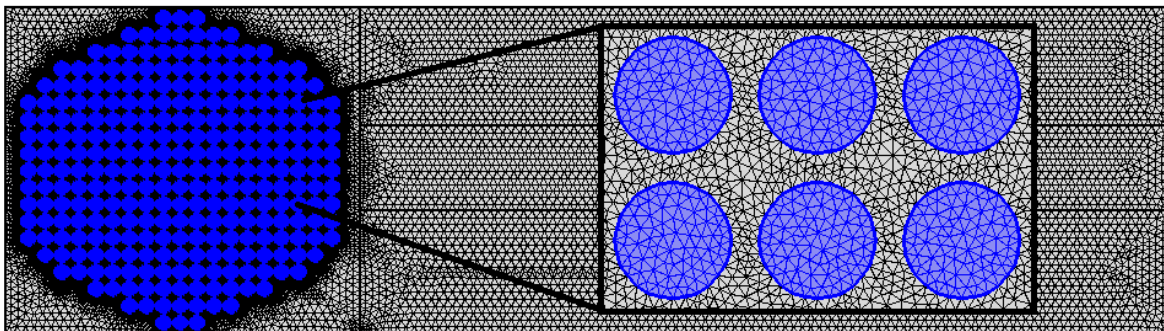


Fig. 3.5: Mallado de la lente A-1 donde se aprecian los cilindros de acero inmersos en agua.

Una vez definidas las características del modelo en *Study* se añaden los cambios realizados y se realiza el análisis. Elegimos el rango de frecuencias en el que queremos analizar la estructura, en este caso de 100 a 800 kHz y finalmente se selecciona

*Compute*, el cual generará los pasos del estudio correspondientes para generar la solución.

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

En el presente capítulo se muestran los resultados de los cristales y las lentes diseñadas, a partir de los 4 cristales fonónicos planteados, tal como se describió en el capítulo anterior.

Como se mencionó en el capítulo anterior, para una mejor visualización y discusión, los cristales se etiquetaron como **A-0.8 (2)**, que corresponde al cristal cuyos dispersores tienen un parámetro de red de 2 mm y un radio de 0.8 mm; **B-1.6 (4)**, correspondiéndole 4 mm de parámetro de red y 1.6 mm de radio; **C-1.6 (3)**, parámetro de red de 3 mm y radio 1.6 mm; por último **D-1.6 (2.3)**, con parámetro de red de 2.3 mm y radio de 1.6 mm. Partiendo de esto, también se etiquetan las lentes planteadas con estos cristales: **A-1**, **A-2**, **A-3**, **A-4** y **A-5** para las lentes diseñadas con el cristal A-0.8 (2), **B** para la lente del cristal B-1.6 (4) y finalmente **C-1**, **C-2**, **C-3** y **C-4** para aquellas lentes diseñadas a partir del cristal C-1.6 (2.3). Cabe mencionar que, durante el análisis se diseñaron más lentes, en las que no se pudo observar el fenómeno de enfocamiento, por lo que no son presentadas en la tesis.

## 4.1 Cristal A-0.8 (2)

Como se esquematiza en la *Tabla 1* este cristal está conformado por un arreglo de 19x19 dispersores de sonido. La *Fig. 4.1* contiene el espectro de transmisión de dicho cristal, donde puede apreciarse la presencia de 2 bandas de transmisión, la primera, ubicada entre 100 kHz y 220 kHz, mientras que la segunda se encuentra entre 480 kHz y 600 kHz. Se puede observar la disminución en la intensidad transmitida en un 40 % entre 240 y 350 kHz, siendo la transmisión casi 0 dB entre 380 y 480 kHz.

Esta última región de frecuencias, puede ser identificada como el *bandgap* caracterizando al cristal. Lo anterior indica que el cristal actúa como un atenuador entre 240 y 350 kHz, aproximadamente, mientras que este funciona como un espejo acústico perfecto en la región del *bandgap*, permitiendo de ese modo, establecer que el primer cristal diseñado, permite el aislamiento del sonido por completo en el rango de frecuencias descrito.

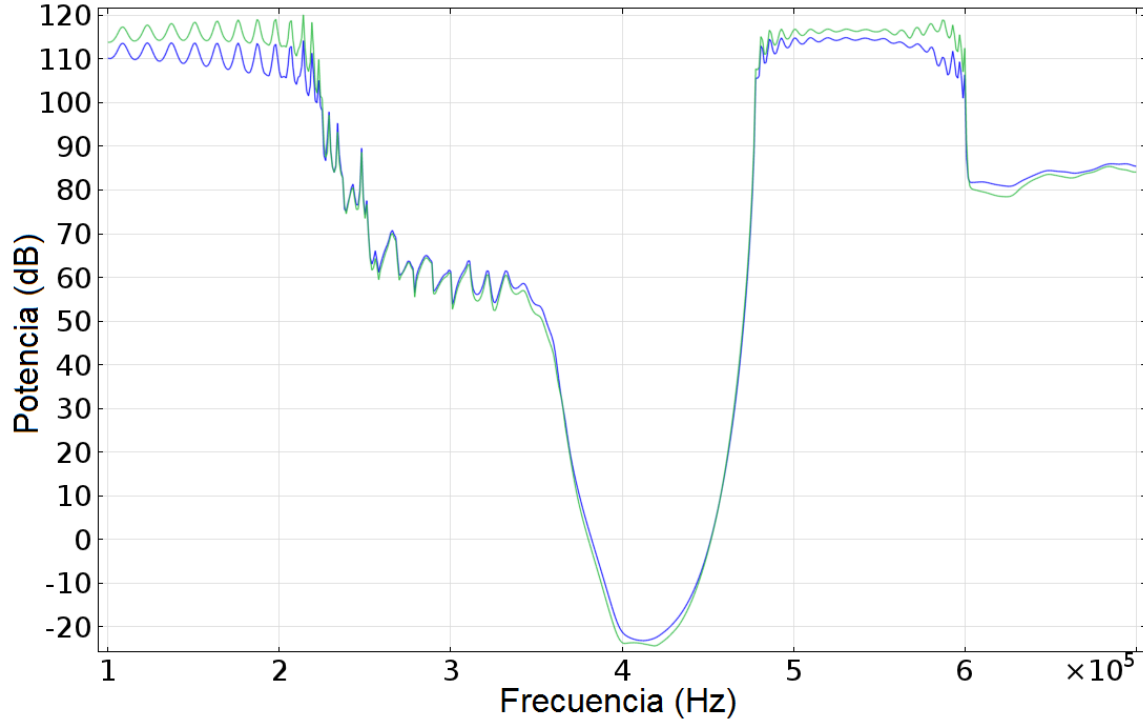


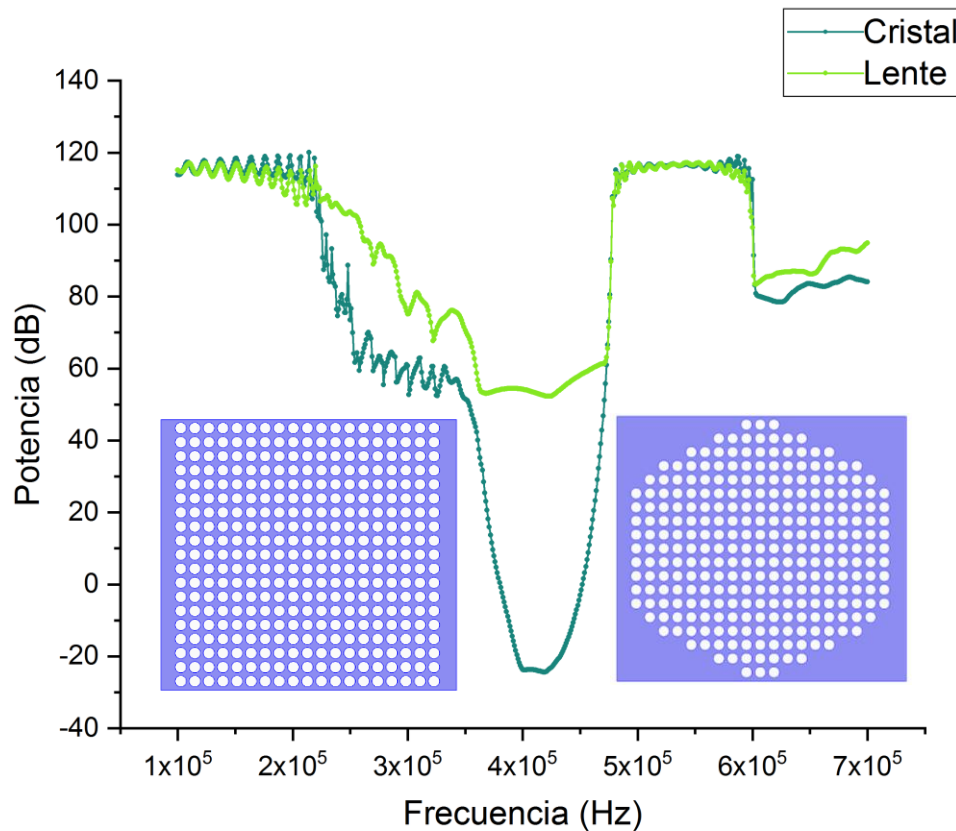
Fig. 4.1: Espectro del Cristal A-0.8 (2).

Como se describió en el Capítulo anterior, la potencia transmitida para cada frecuencia, se promedió en el área de transmisión, en donde se trazó también un rectángulo en el centro, con un ancho de 10 mm (Ver *Figura 3.4*), región a lo largo de donde se presume, será enfocada la energía acústica por las lentes diseñadas. Es por ello que el espectro mostrado en la *Figura 4.1*, aparecen dos líneas: la azul corresponde a la potencia medida en el área total de transmisión, mientras que la verde corresponde al rectángulo trazado en el centro. Puede observarse que no hay variaciones significativas, salvo al final de la segunda banda de transmisión, entre 585 y 592 kHz. Lo anterior conlleva a establecer que el cristal por sí solo, no está funcionando como una lente, debido a la diferencia mínima. Diferencias significativas para diversas frecuencias, fueron encontradas en las lentes, como se discutirá en las secciones posteriores.

#### 4.1.1 Lente A-1

La primera lente del Cristal A-2 (2) con forma biconvexa, modifica esencialmente las características de transmisión de la región de atenuación y el *bandgap*, es decir, el espectro de transmisión se modifica entre 220 y 470 kHz. Las bandas de transmisión, presentan variaciones mínimas, como puede apreciarse en la

*Fig. 4.2*, donde se hace una comparación del espectro del cristal perfecto y el espectro de la lente; los insertos corresponden a cada estructura.



**Fig. 4.2.** Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs. Espectro de la lente A-1.

El análisis de los mapas de presión, permite obtener la distribución de potencia acústica a lo largo del centro del área de enfocamiento. Para una frecuencia de 491 kHz, se muestra, en la *Fig. 4.3-(a)*, cómo se comporta la potencia a diferentes distancias de la lente en dicha región. Puede observarse que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 70 mm de la lente, con un incremento de aproximadamente 6 dB (decibeles). En la *Fig. 4.3-(b)*, se muestra el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, proporcionada por *COMSOL Multiphysics*, mientras que la *Fig. 4.3-(c)* contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 55 y 75 mm a lo largo del área de enfocamiento.

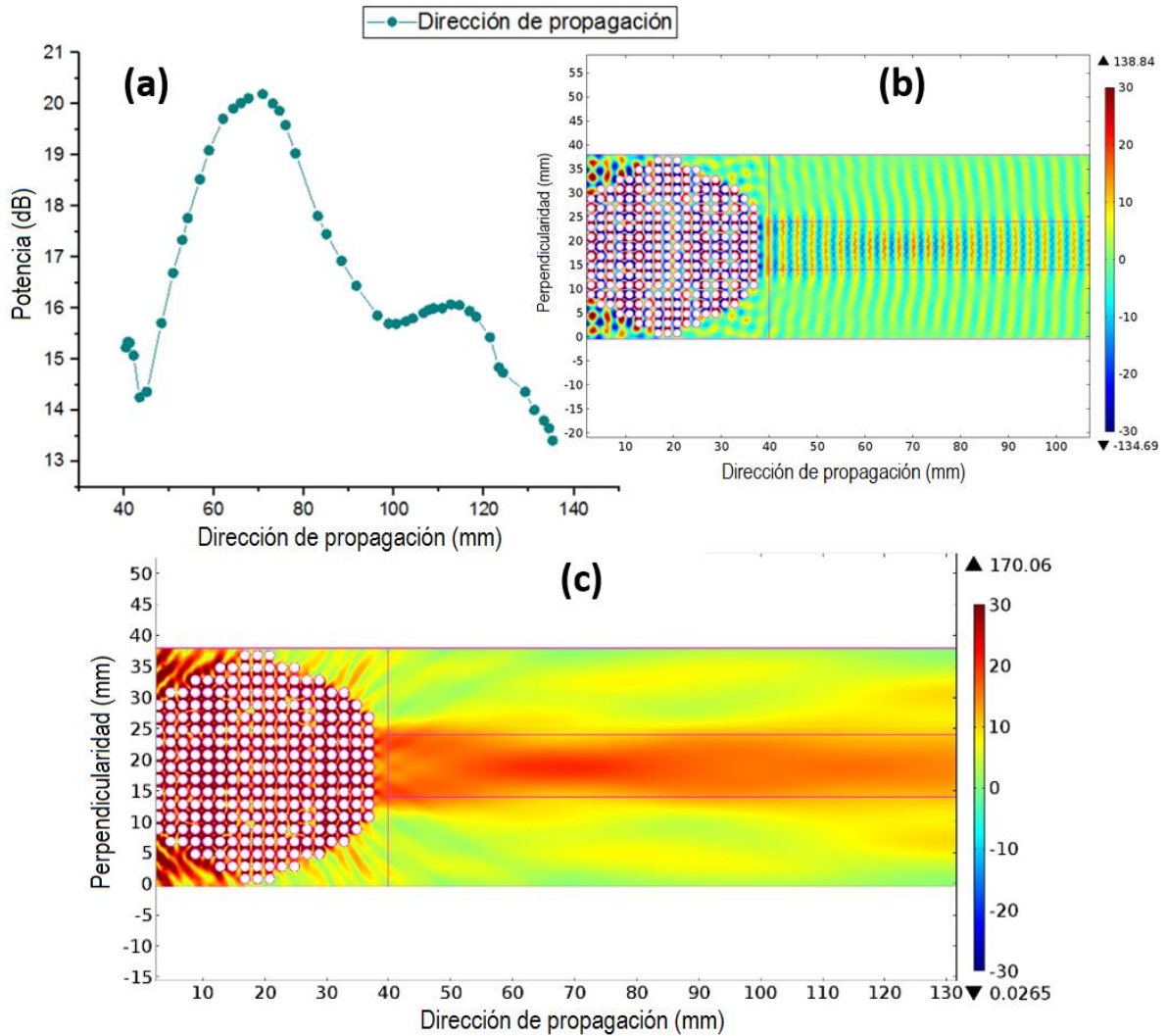


Fig. 4.3: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-1 a una frecuencia de 491 kHz.

Es preciso mencionar que ondas de ultrasonido de 491 kHz, pueden ser enfocadas, sin embargo, la energía no es concentrada con eficiencia en un área pequeña y no se muestra un contraste de energías considerable, 6 dB. Así mismo, 491 kHz, corresponde a una longitud de onda de 3.014 mm, por lo que, considerando un área de enfocamiento de 20 mm a lo largo del eje de propagación, la cual corresponde a 6.63 longitudes de onda ( $6.63\lambda$ ), se puede establecer que la lente no enfoca eficientemente a la energía acústica de dicha frecuencia. Así mismo, es conveniente destacar que no se encontró ninguna otra frecuencia que mostrara un efecto similar para la lente en cuestión.

### 4.1.2 Lente A-2

Se sabe que el sonido no se comporta como la luz, sin embargo, se diseñó una lente plana convexa correspondiente al Cristal A-2 (2) debido a que, el caso de radiación electromagnética (fotones de luz), este tipo de lente permite enfocar rayos paralelos en un punto. El espectro de transmisión de a lente diseñada mantiene casi la misma forma que la correspondiente al cristal, con un aumento en la potencia transmitida en la región de atenuación y del *bandgap* (220- 480 kHz), como se puede apreciar en la *Fig. 4.4*.

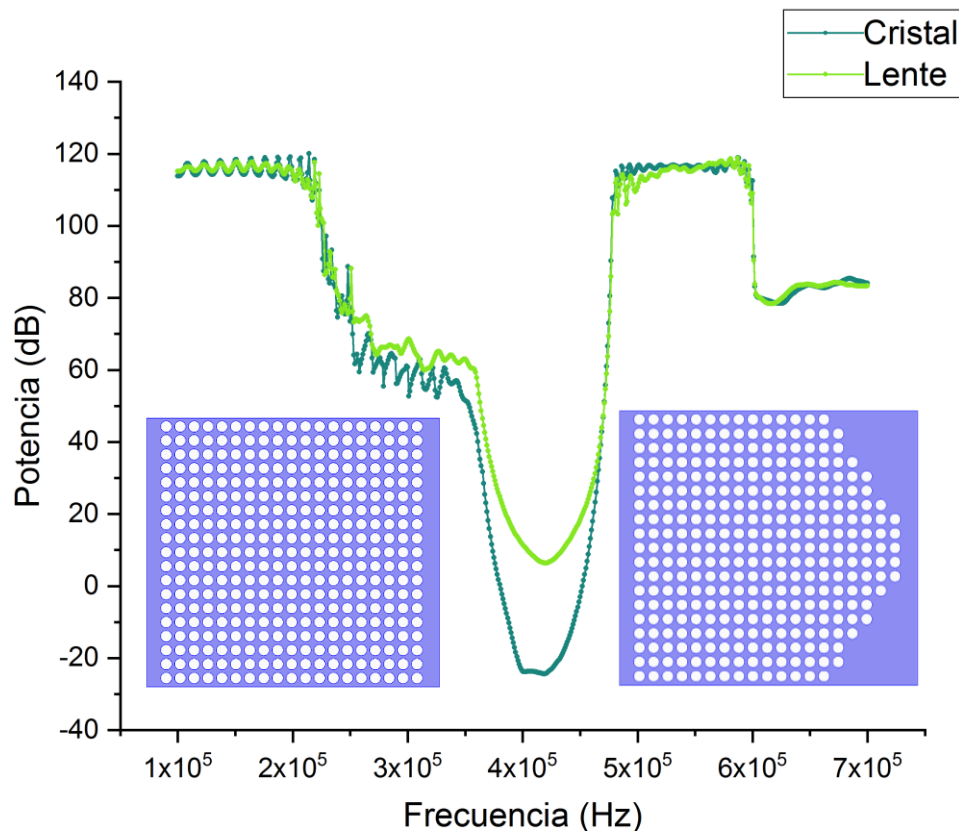
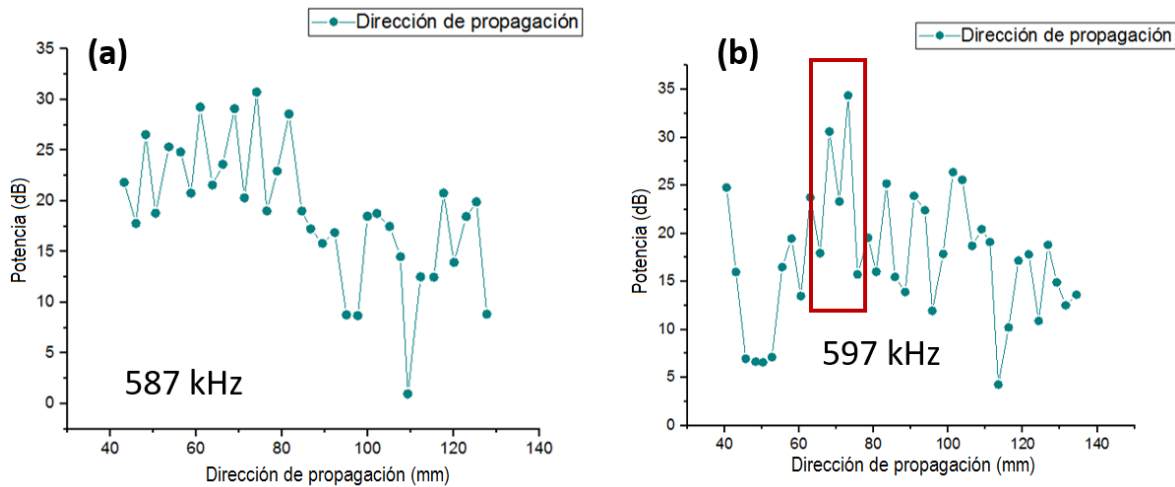


Fig. 4.4. Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs espectro de la lente A-2.

En la *Fig. 4.5*, se muestra un análisis similar al descrito en la *Fig. 4.3-(a)*, pero para la lente A-2, donde puede apreciarse que, para 587 kHz (4.5-a), no se observa un posible enfocamiento, sin embargo, entre 40 y 85 mm, la intensidad oscila alrededor de 25 dB, comportamiento típicamente observado en un colimador acústico. Para el caso de 597 kHz, se observa que la intensidad aumenta en las distancias marcadas con el rectángulo rojo. A 65 y 78 mm, la potencia registrada es de 16 dB en promedio, sin

embargo, ésta aumenta hasta 35 dB en puntos localizados en medio de tal región, es decir, la potencia aumenta casi 20 dB, más de un orden de magnitud. Cabe mencionar que en puntos fuera de dicho rango, la potencia se mantiene oscilando entre 20 y 25 dB, esto es, una diferencia aún de 10 dB. Aunque no se observa un patrón de incremento de la potencia bien definido, puede concluirse que la energía acústica se está enfocando en dicha área, que oscila en 13 cm a lo largo del eje de transmisión. En éste caso, la longitud de onda de dicha frecuencia corresponde a 2.48 mm, por lo que el área de enfocamiento correspondería a aproximadamente  $5\lambda$ ; una lente acústica eficiente, es aquella que pueda enfocar en al menos  $2\lambda$ .



**Fig. 4.5:** Gráfica de colimación de la lente A-2 a una frecuencia de 587 kHz y gráfica de zona de focalización de la lente A-2 a una frecuencia de 597 kHz.

La **Fig. 4.6** contiene los mapas de presión para ambas frecuencias, tanto en modo de onda como de energía total; (a) y (b) corresponde a 587 kHz, mientras que (c) y (d) expresan lo mismo, para una frecuencia de 597 kHz. Puede observarse que para 587 kHz, no se observa el área de enfocamiento. En el caso de 597 kHz, se aprecia una reducción en la región de máxima intensidad, sin embargo, no se observa un contraste suficiente para establecer con claridad el área de enfocamiento.

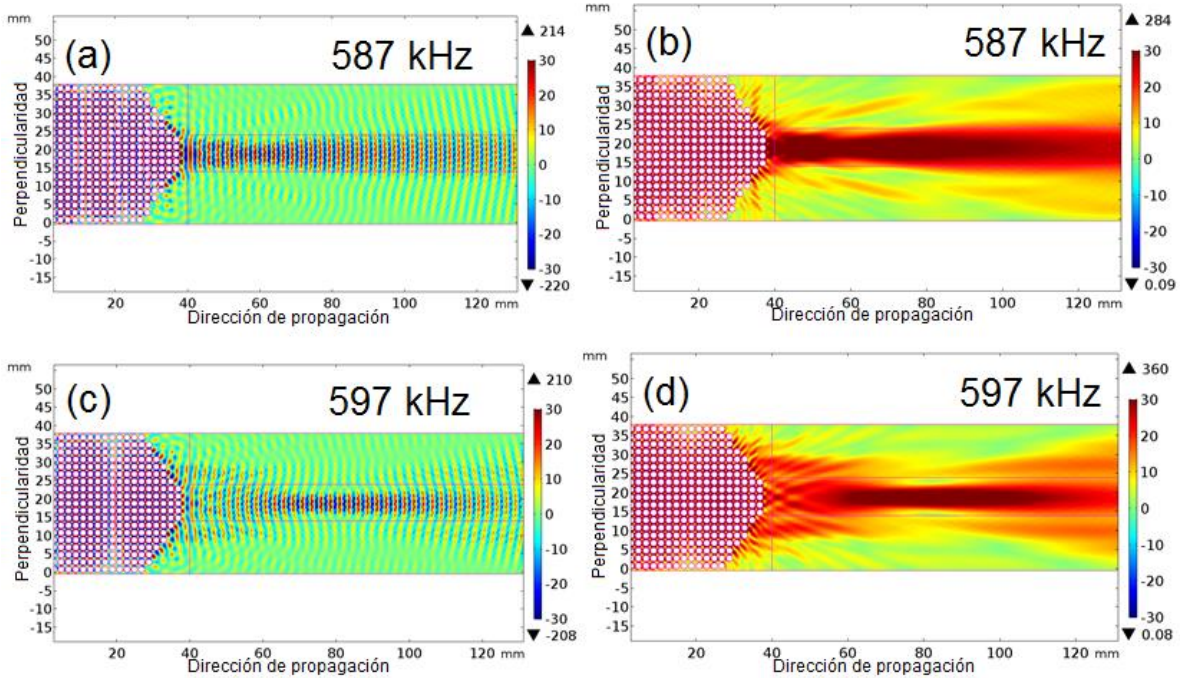


Fig. 4.6: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-2 a una frecuencia de 587 y 597 kHz.

### 4.1.3 Lente A-3

La tercera lente del Cristal A-2 (2), plana convexa, modifica básicamente las características de transmisión de la región de atenuación y el *bandgap*, es decir, el espectro de transmisión se modifica entre 250 y 470 kHz. Las bandas de transmisión, presentan variaciones mínimas, como puede apreciarse en la Fig. 4.7, donde se hace una comparación similar a las anteriores entre el espectro del cristal y el de la lente; la forma de ambas estructuras se muestra en los insertos.

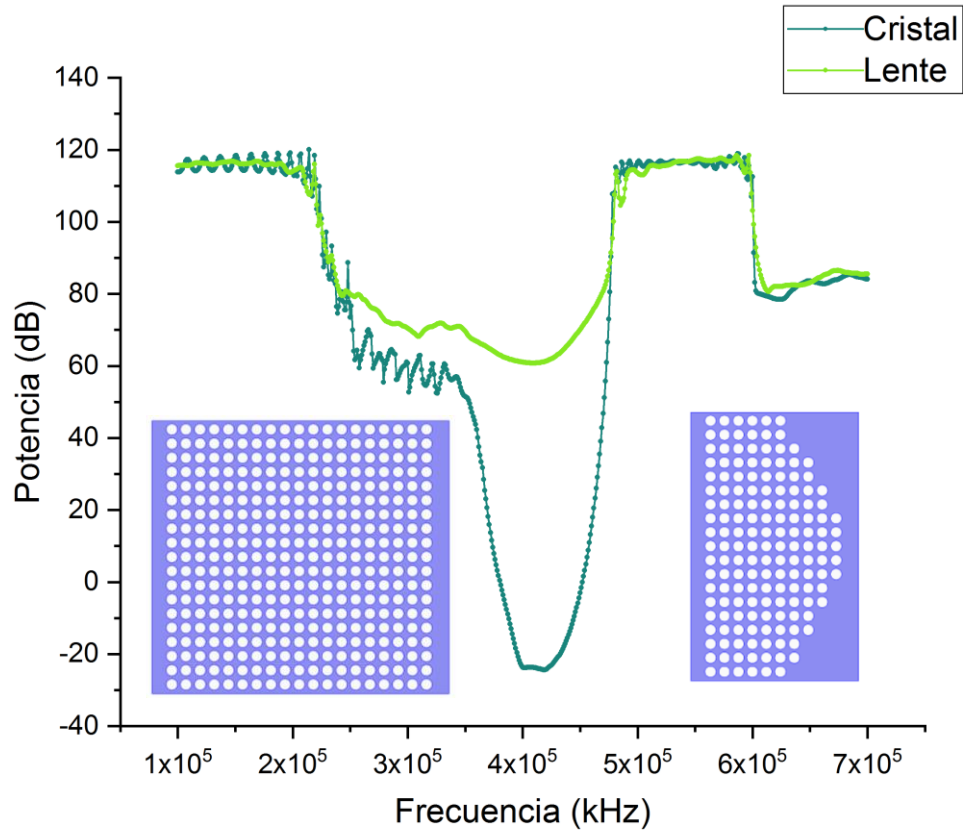


Fig. 4.7. Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs espectro de la lente A-3.

El análisis de los mapas de presión para una frecuencia de 591 kHz, se muestra, en la **Fig. 4.8-(a)**, donde se aprecia cómo se comporta la potencia a diferentes distancias de la lente en dicha región. Puede observarse que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 28 mm de la lente, con un incremento de aproximadamente 10 dB. En la **Fig. 4.8-(b)**, se muestra el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, proporcionada por *COMSOL*, mientras que la **Fig. 4.8-(c)** contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 30 y 65 mm a lo largo del área de enfocamiento.

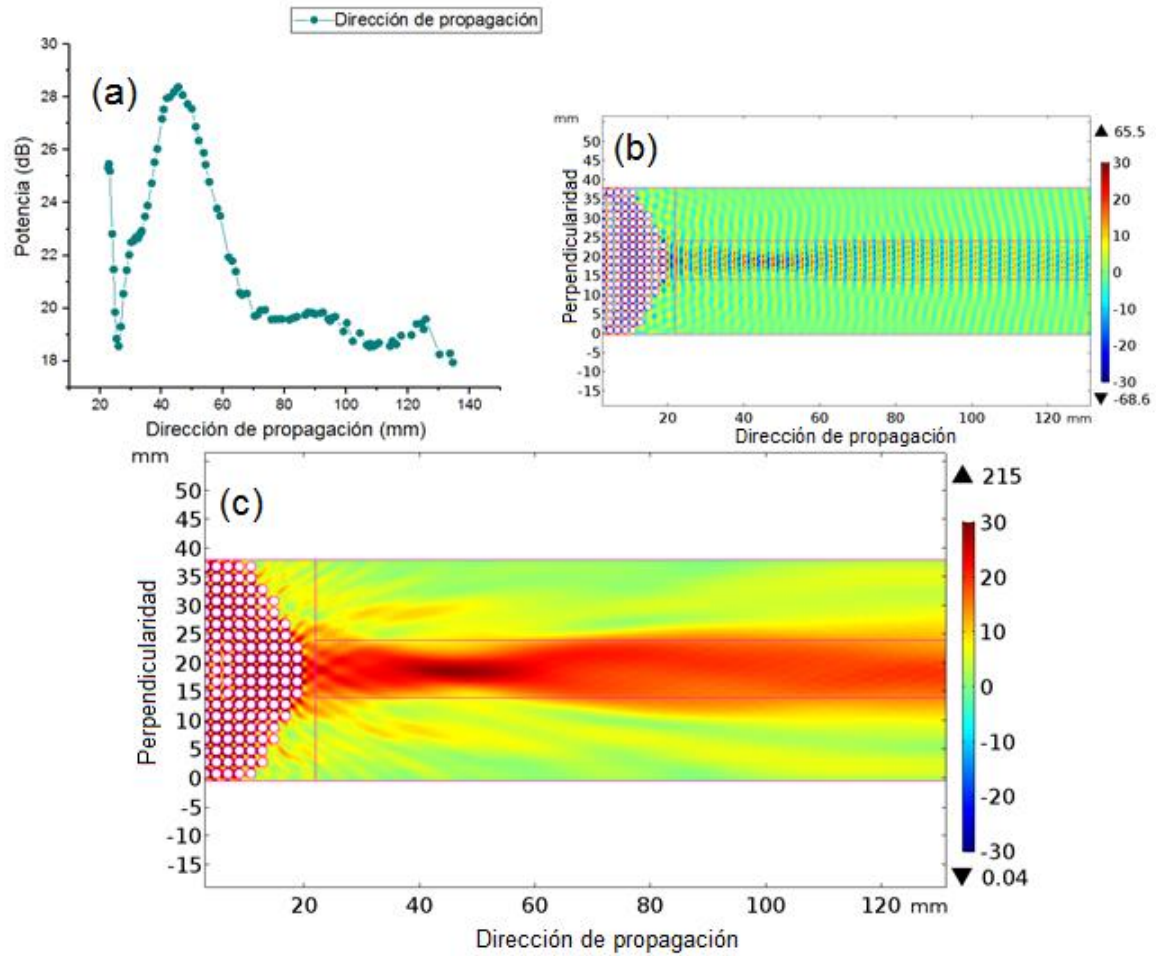


Fig. 4.8: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-3 a una frecuencia de 591 kHz.

Debido a que 591 kHz, corresponde a una longitud de onda de 2.5 mm y considerando un área de enfocamiento de 20 mm aproximadamente, a lo largo del eje de propagación, la cual corresponde a 6.63 longitudes de onda ( $6.63\lambda$ ), se puede establecer que la lente enfoca la energía acústica de dicha frecuencia, sin embargo, no lo hace de manera tan eficiente.

#### 4.1.4 Lente A-4

Partiendo del cristal A-0.8 (4) se diseña una lente con forma de menisco convergente, este modifica esencialmente las características de transmisión de la región de atenuación y el *bandgap*, es decir, el espectro de transmisión se modifica entre 200 y 500 kHz. Las bandas de transmisión, presentan variaciones mínimas, como en los

casos anteriores, hecho que puede apreciarse en la *Fig. 4.9*, donde se hace una comparación del espectro del cristal y el espectro de la lente.

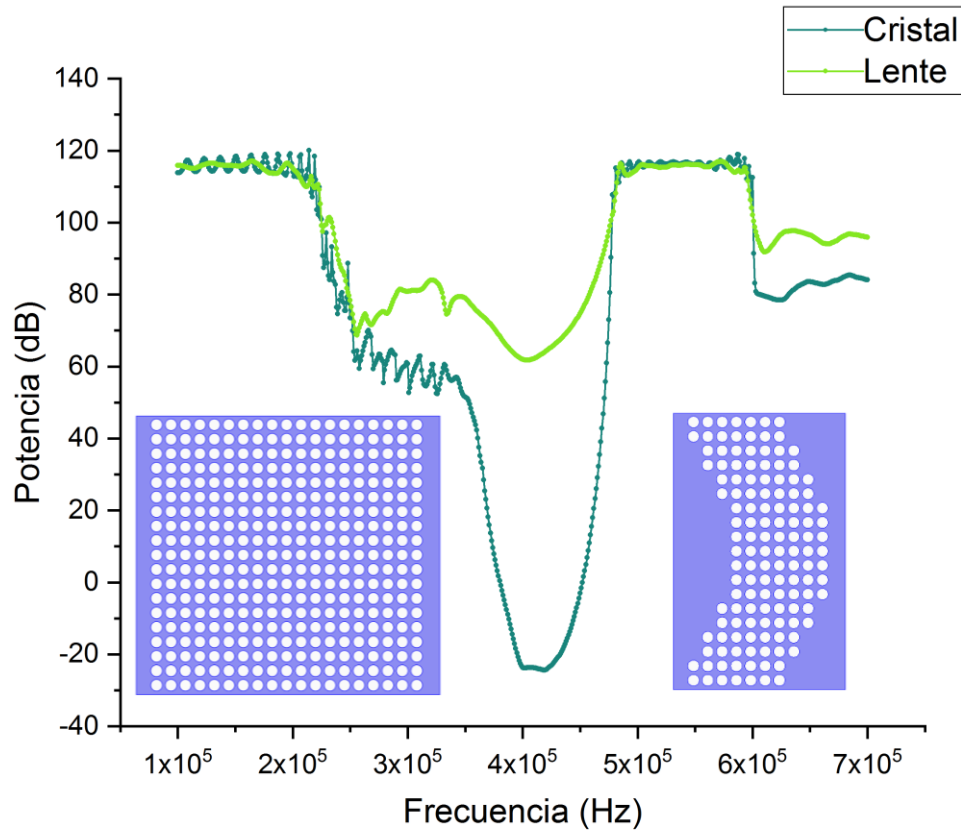


Fig. 4.9. Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs espectro de la lente A-4.

El análisis de los mapas de presión de esta lente para una frecuencia de 589 kHz, se muestra en la *Fig. 4.10-(a)*, en donde puede apreciarse cómo se comporta la potencia a diferentes distancias de la lente en dicha región. Se observa que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 27 mm de la lente, con un incremento de 5 dB. En la *Fig. 4.10-(b)*, se muestra el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, mientras que la *Fig. 4.10-(c)* contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 50 y 90 mm a lo largo del área de enfocamiento.

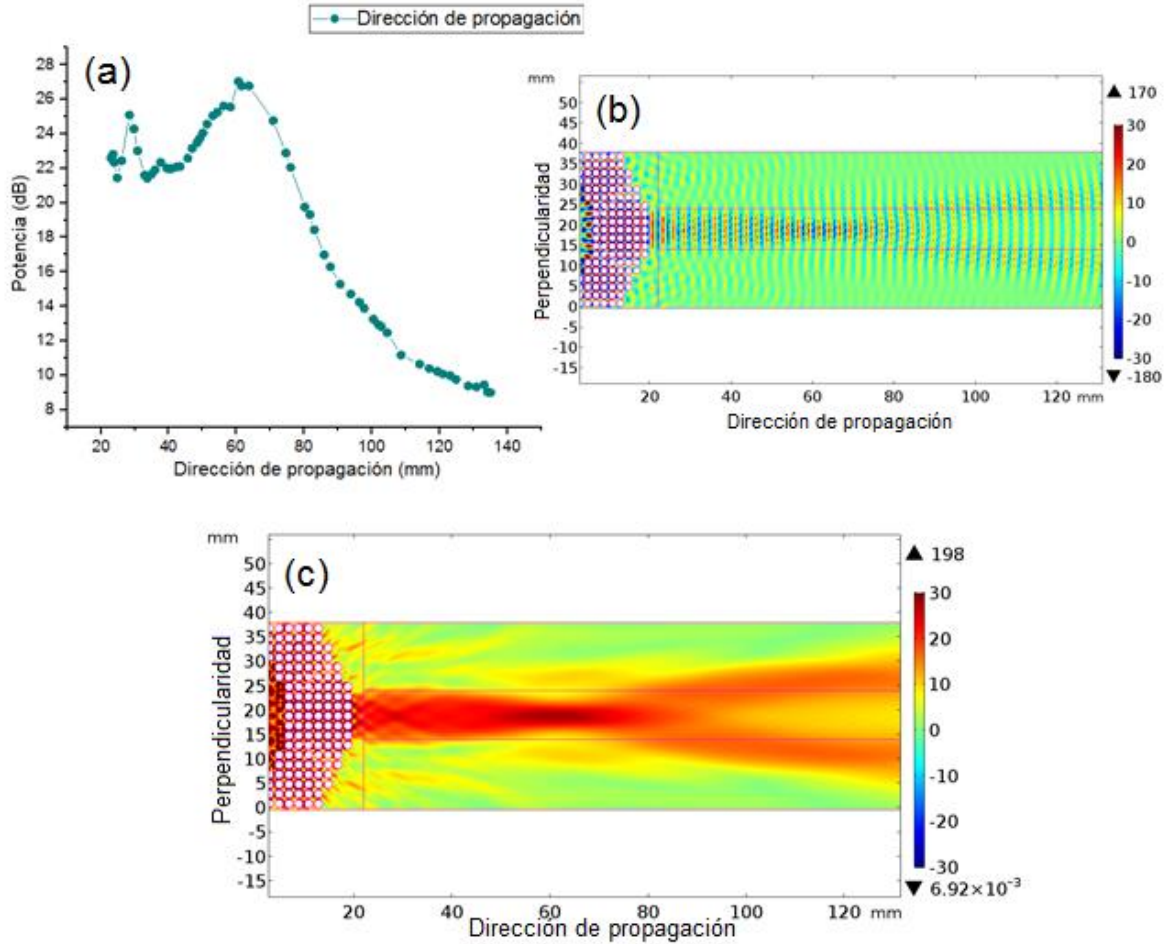


Fig. 4.10: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-4 a una frecuencia de 589 kHz.

Para una frecuencia de 589 kHz, corresponde a una longitud de onda de 2.51 mm, por lo que, se puede establecer que la lente enfoca la energía acústica de dicha frecuencia, sin embargo, el contraste de intensidades es muy pequeño (5 dB), por lo que no puede considerarse un enfocamiento eficiente.

#### 4.1.5 Lente A-5

Por último, del cristal A-0.8 (4) se diseña una lente con forma de menisco, este nuevamente modifica esencialmente las características de transmisión de la región de atenuación y el *bandgap*, es decir, el espectro de transmisión se modifica entre 200 y 500 kHz. Las bandas de transmisión, no presentan variaciones considerables, como puede apreciarse en la Fig. 4.11, donde se hace una comparación del espectro del cristal y el espectro de la lente.

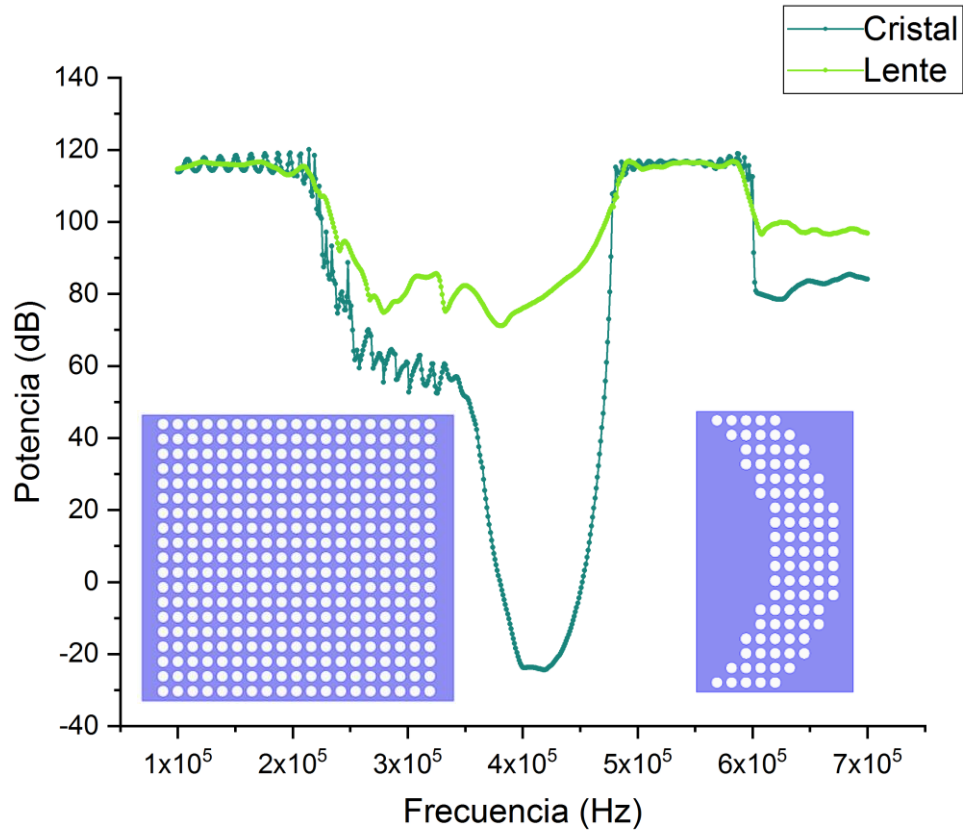


Fig. 4.11. Espectro de transmisión del cristal A-0.8 (2) vs. espectro de la lente A-5.

Los mapas de presión para una frecuencia de 588 kHz, se muestran en la *Fig. 4.12-(a)*, donde se puede observar el comportamiento de la potencia a diferentes distancias de la lente en dicha región. Puede observarse que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 27 mm de la lente, con un incremento de aproximadamente 8 dB. En la *Fig. 4.12-(b)*, se incluye el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, proporcionada por *COMSOL*, mientras que la *Fig. 4.12-(c)* contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 35 y 85 mm a lo largo del área de enfocamiento.

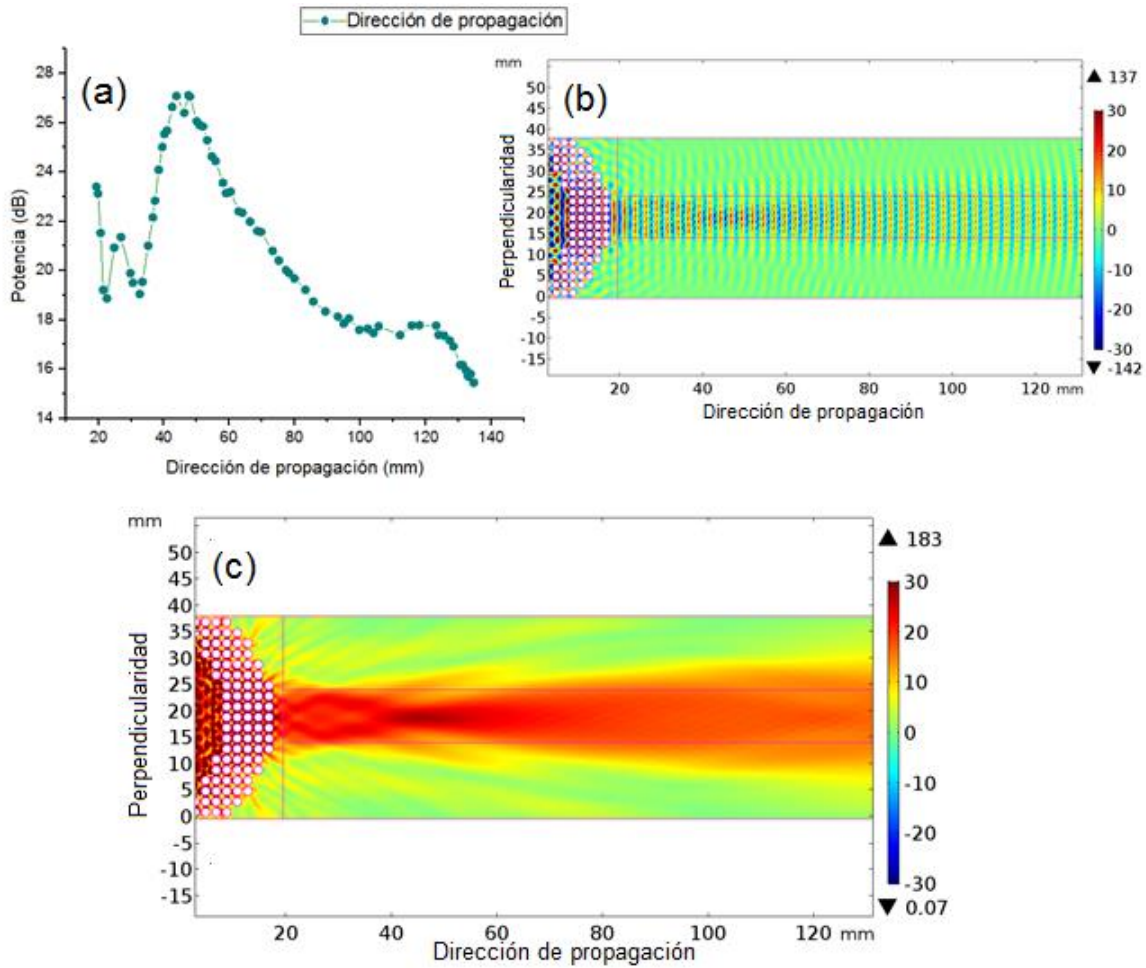


Fig. 4.12: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente A-5 a una frecuencia de 588 kHz.

Por lo tanto, para ondas con una frecuencia de 588 kHz cuya longitud de onda corresponde a 2.52 mm, por lo que es posible determinar que esta lente enfoca la energía acústica, sin embargo, como en casos anteriores, no lo hace de manera eficiente, debido a que el contraste entre las intensidades en el área de enfocamiento y fuera de ella, no es muy significativa (8 dB), pero es de resaltarse que la tendencia de enfocamiento está presente.

## 4.2 Cristal B-1.6 (4)

Como se esquematiza en la *Tabla 1*, este cristal está conformado por un arreglo de 19x19 dispersores de sonido. La *Fig. 4.13* contiene el espectro de transmisión de dicho cristal, donde puede apreciarse la presencia de 2 bandas de transmisión, la primera, ubicada entre 100 kHz y 150 kHz, mientras que la segunda se encuentra entre

210 kHz y 380 kHz. Se puede observar la disminución en la intensidad transmitida entre 150 y 210 kHz por debajo de los 70 dB. Esta región de frecuencias, puede ser identificada como el *bandgap* caracterizando al cristal, sin embargo, debido a la reducción en intensidad de sólo el 30 %, el cristal actúa como un atenuador entre 150 y 210 kHz, aproximadamente, y no como un espejo. En un diagrama de bandas, dicha región estaría representando un *bandgap* incompleto del cristal.

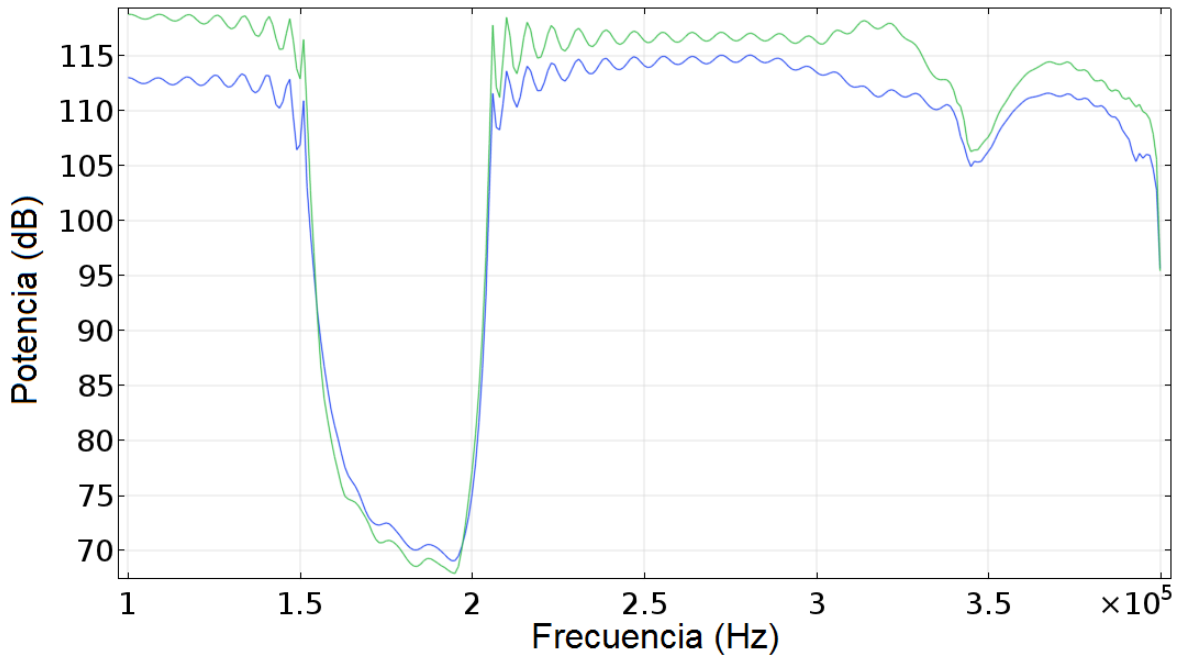
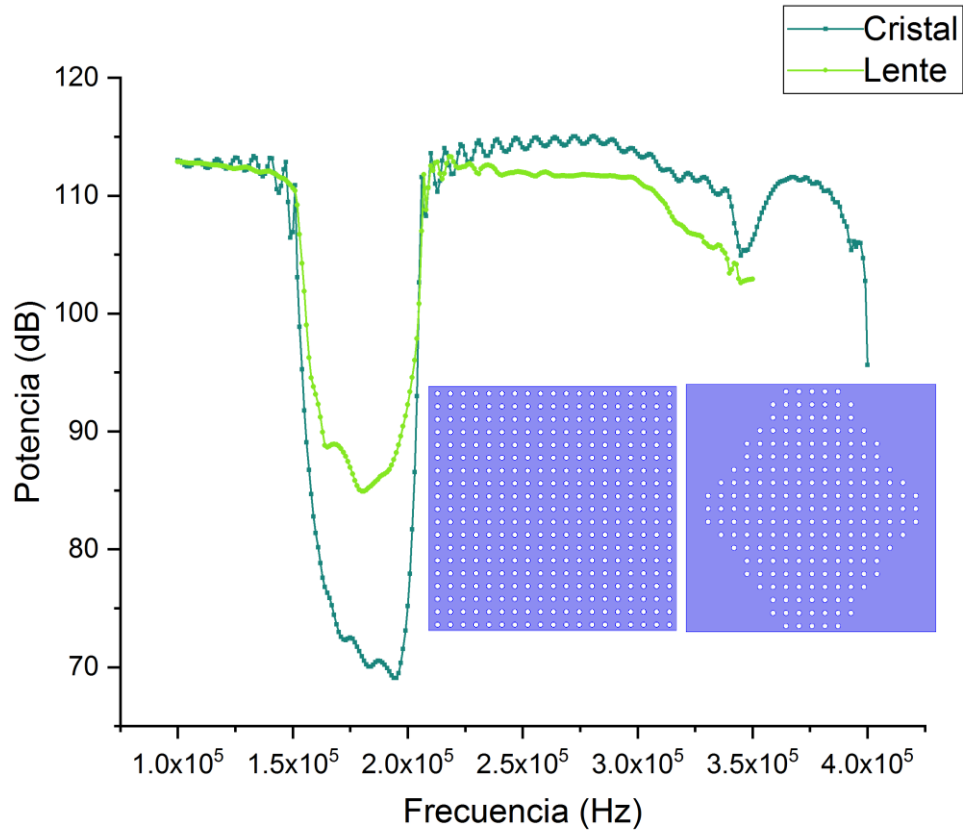


Fig. 4.13: Espectro del Cristal B-1.6 (4).

#### 4.2.1 Lente B

A partir del cristal B-1.6 (4), se diseñó una lente con forma biconvexa; esta lente modifica fundamentalmente las características de transmisión de la región de su *bandgap*, es decir, el espectro de transmisión se modifica entre los 140 y 200 kHz. Las bandas de transmisión, presentan variaciones mínimas, como puede apreciarse en la Fig. 4.14; los insertos corresponden a las estructuras analizadas.



*Fig. 4.14:* Espectro de transmisión del cristal B-1.6 (4) vs. espectro de la lente B.

En la *Fig. 4.15-(a)* podemos observar la intensidad transmitida a lo largo del área de enfocamiento para una frecuencia de 341 kHz, en éste caso se observa que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 20 mm de la lente, con un incremento de aproximadamente 4 dB. En la *Fig. 4.15-(b)*, se muestra el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, mientras que la *Fig. 4.15-(c)* contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 125 y 175 mm a lo largo del área de enfocamiento.

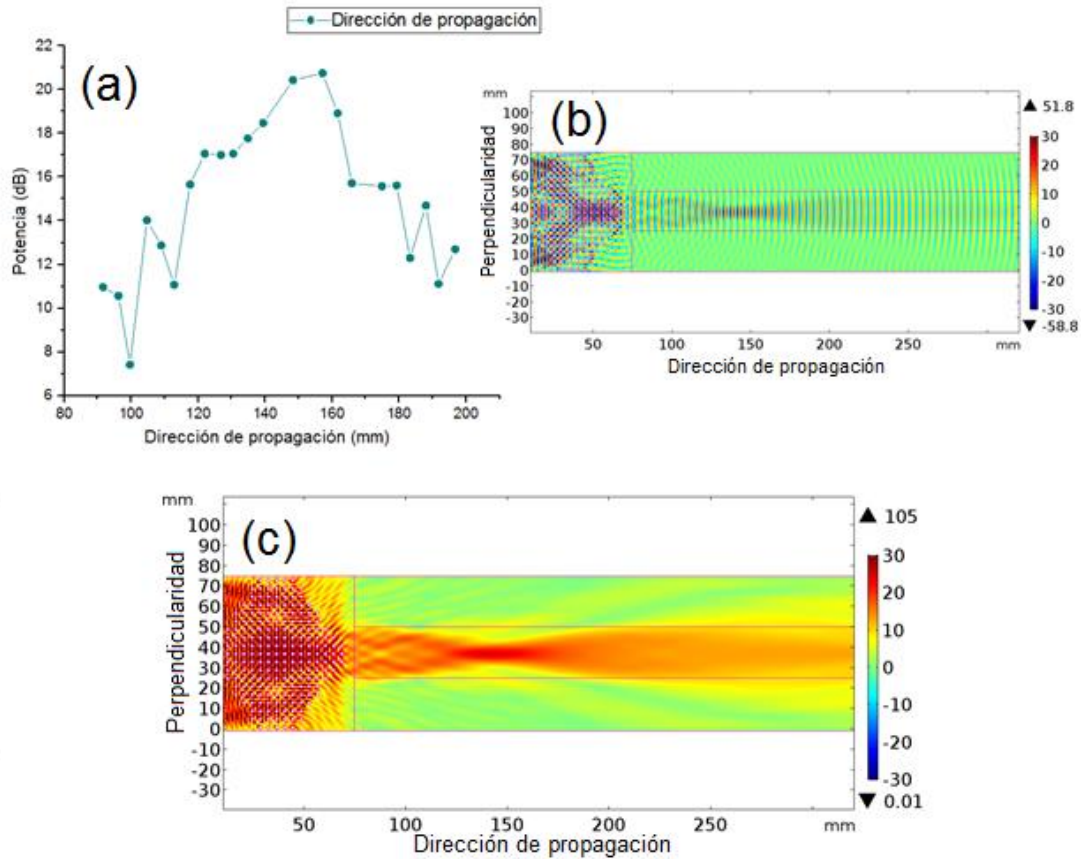


Fig.

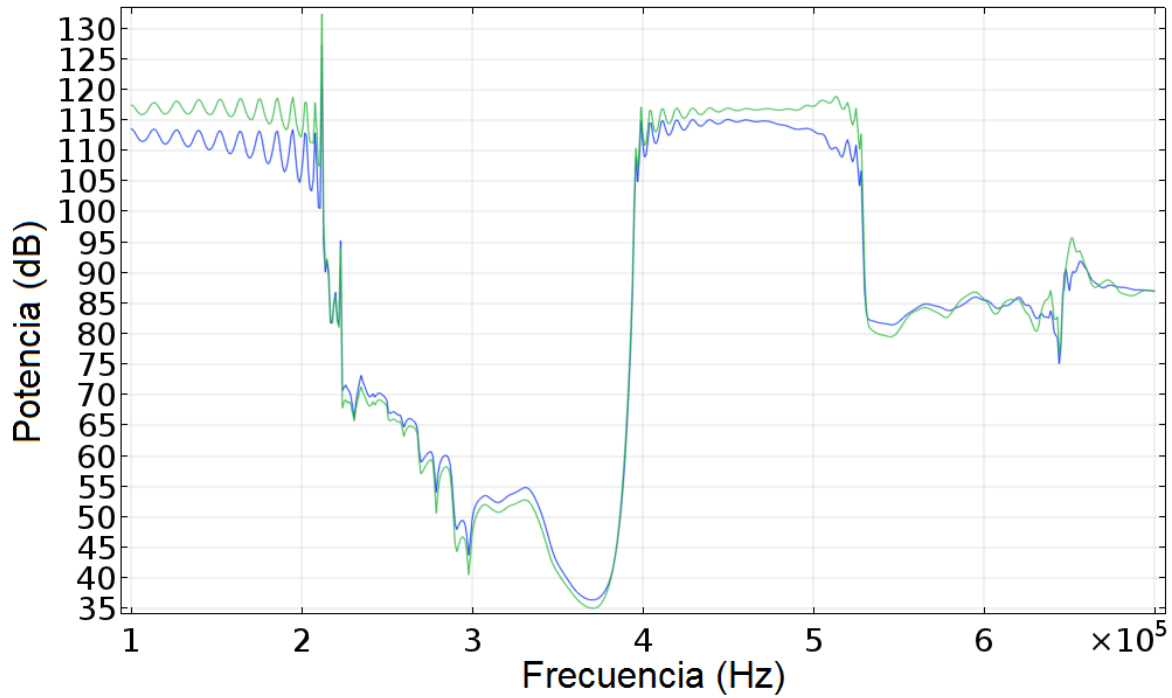
4.15: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente B a una frecuencia de 341 kHz.

Como se ha mencionado, para el estudio de las lentes consideramos que el área de enfocamiento de 20 mm corresponde a 6.63 longitudes de onda por lo cual, siendo una frecuencia de 341, estaríamos hablando de 4.34 mm como su longitud de onda; lo cual permite establecer que la onda no enfoca eficientemente la energía en esa frecuencia.

### 4.3 Cristal C-1.6 (2.3)

De la *Tabla 3.2*, este cristal está conformado por un arreglo de 19x19 dispersores de sonido. La *Fig. 4.16* contiene el espectro de transmisión de dicho cristal, donde puede apreciarse la presencia de 2 bandas de transmisión, la primera, ubicada entre 100 kHz y 200 kHz, mientras que la segunda se encuentra entre 400 kHz y 525 kHz. Se puede observar la disminución en la intensidad transmitida entre 200 y 320 kHz, siendo la transmisión de 40 dB en promedio entre 320 y 400 kHz. Esta última región de frecuencias, puede ser identificada como el *bandgap* caracterizando al cristal. Lo

anterior indica que el cristal actúa como un atenuador entre 200 y 400 kHz, aproximadamente.



*Fig. 4.16:* Espectro del Cristal C-1.6 (2.3).

### 4.3.1 Lente C-1

Partiendo del cristal C-1.6 (2.3), se diseñó una lente con forma biconvexa, este modifica esencialmente las características de transmisión de la región de atenuación y el *bandgap*, es decir, el espectro de transmisión se modifica entre 200 y 400 kHz, como puede apreciarse en la *Fig. 4.17* donde se hace una comparación del espectro del cristal y el espectro de la lente.

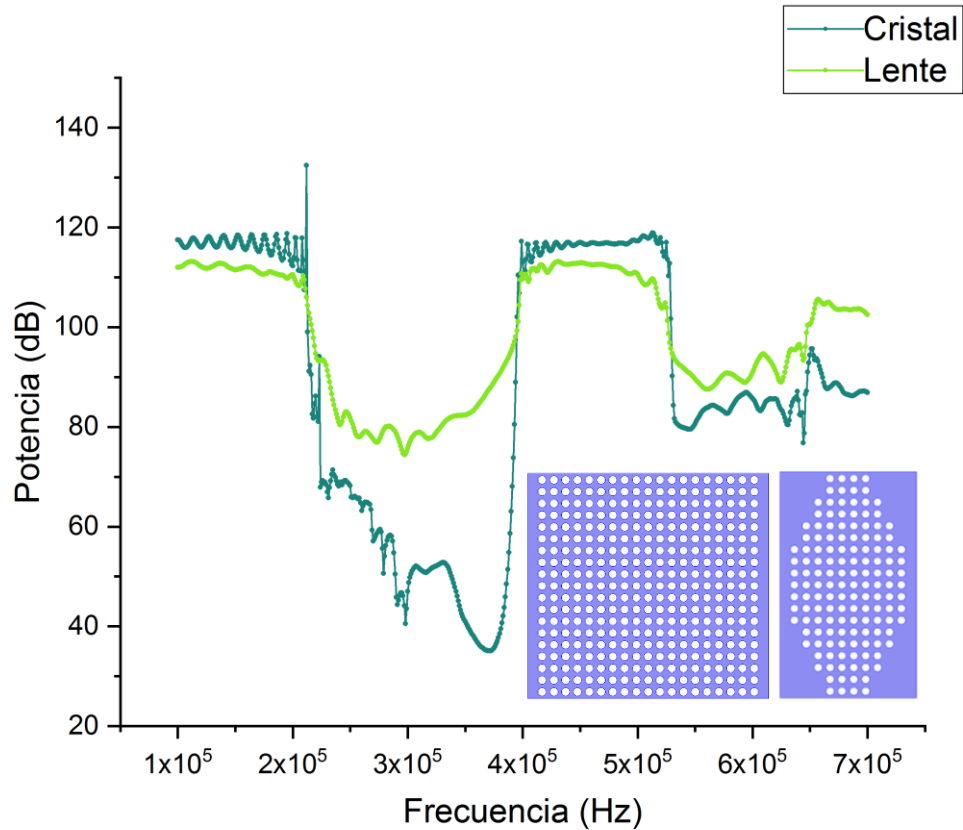
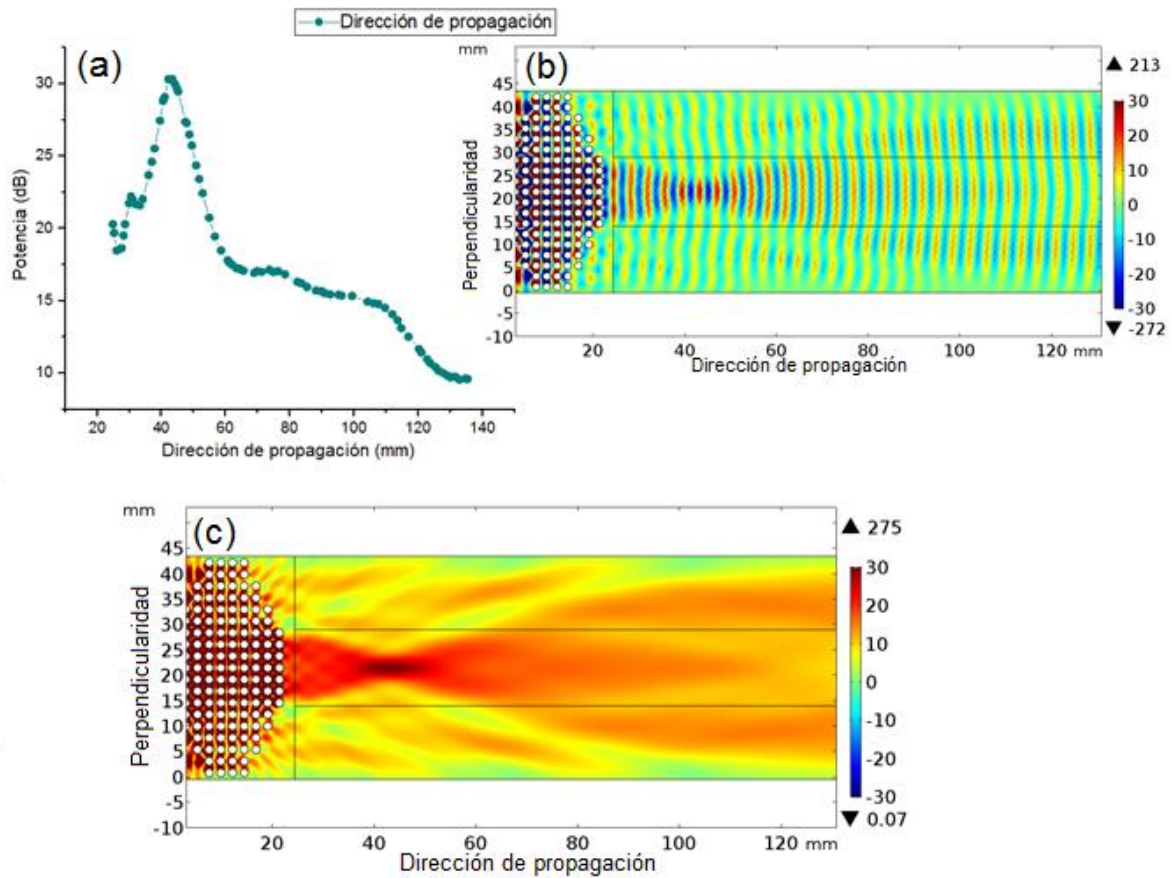


Fig. 4.17: Espectro de transmisión del cristal D-1.6 (2.3) vs espectro de la lente D-1.

El análisis de los mapas de presión para una frecuencia de 399 kHz, se muestra, en la *Fig. 4.18-(a)*, donde se puede observar cómo se comporta la potencia a diferentes distancias de la lente en dicha región. Puede observarse que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 30 mm de la lente, con un incremento de aproximadamente 10 dB. En la *Fig. 4.18-(b)*, se muestra el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, proporcionada por *COMSOL Multiphysics*, mientras que la *Fig. 4.18-(c)* contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 35 y 50 mm a lo largo del área de enfocamiento.

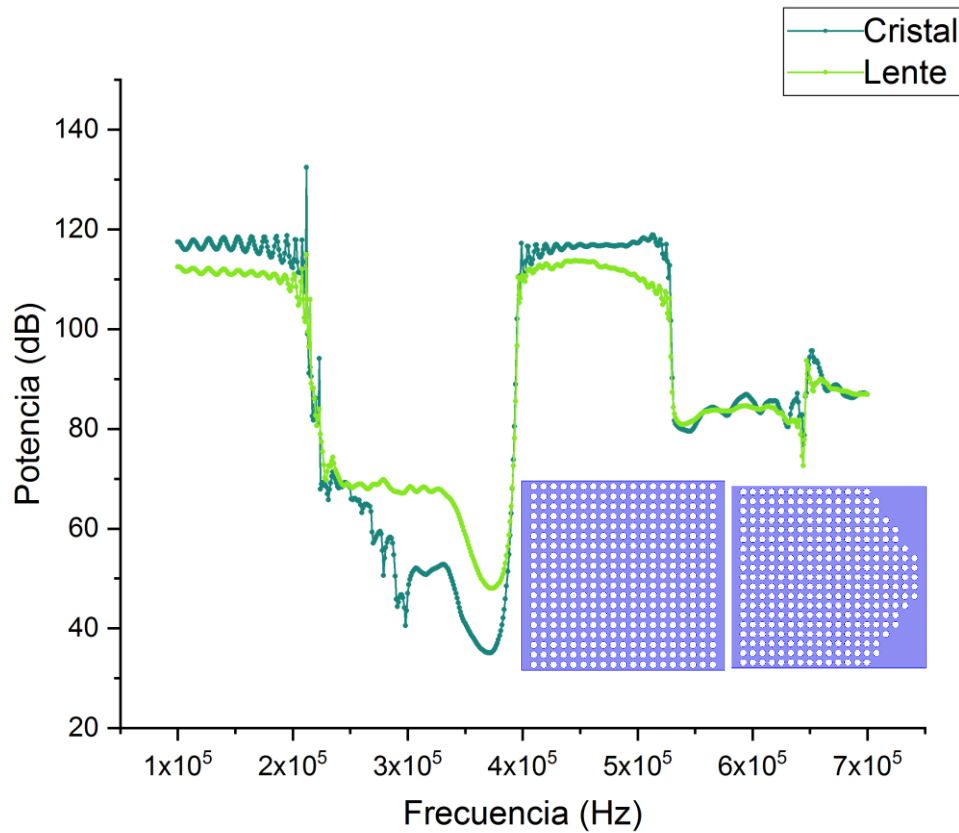


*Fig. 4.18:* Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente C-1 a una frecuencia de 399 kHz.

Al analizar esta lente a una frecuencia de 399 kHz podemos determinar que corresponde a una longitud de onda de 3.71 mm, en éste caso, el área de enfocamiento tiene 15 mm de largo en la dirección de transmisión, que corresponde a  $4.04\lambda$ . En esta lente C-1, podemos observar el efecto esperado en este trabajo, la lente enfoca la energía acústica a una frecuencia de 399 kHz en una región correspondiente a  $4.04\lambda$  y un contraste de intensidades de al menos 10 dB. Este resultado uno de los más importantes del presente trabajo, debido a que corrobora el hecho de que es posible enfocar el sonido utilizando lentes acústicas basadas en cristales fonónicos.

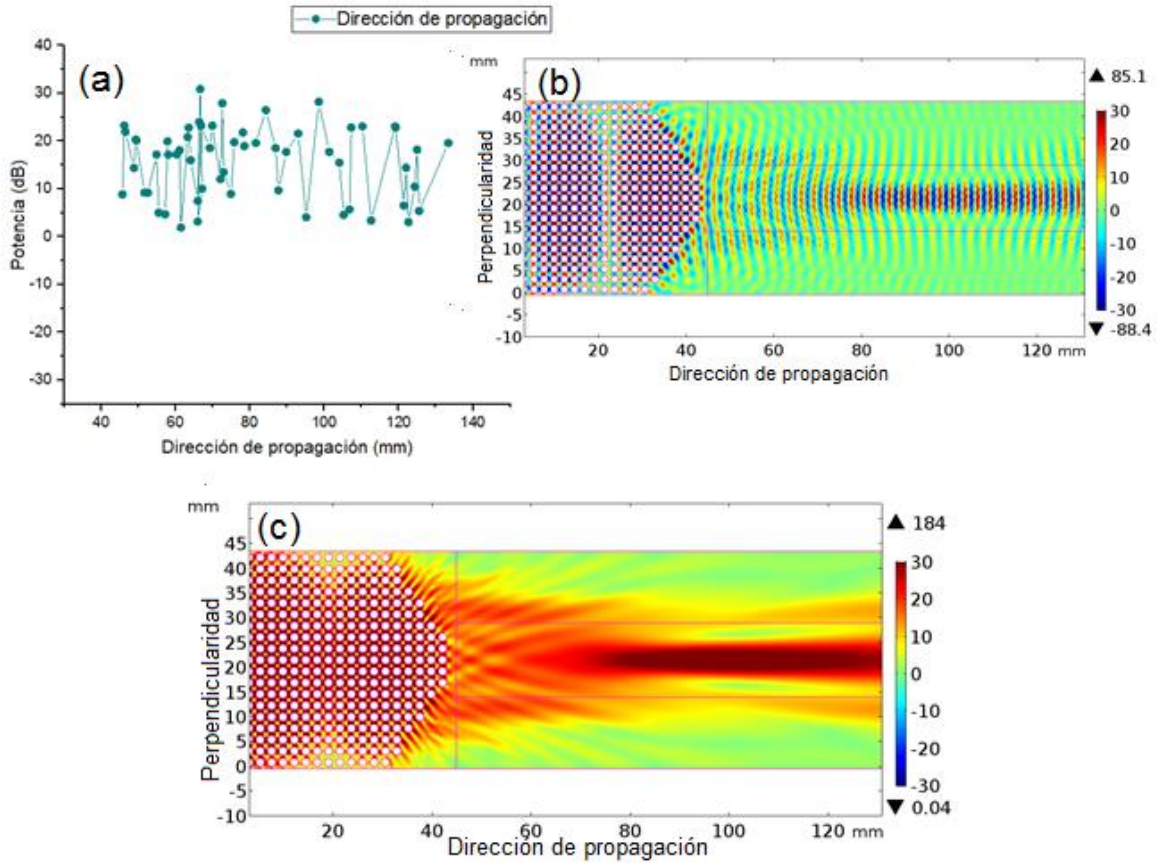
### 4.3.2 Lente C-2

Con los resultados del cristal C-1.6 (2.3) se diseña una lente con forma plano convexo. Esta lente modifica su región de atenuación y su *bandgap* entre los 200 kHz y 400 kHz, como puede apreciarse en la *Fig. 4.19* donde se hace una comparación de los espectros de ambas estructuras.



*Fig. 4.19:* Espectro de transmisión del cristal C-1.6 (2.3) vs espectro de la lente C-2.

En la *Fig. 4.20*, se muestra un análisis similar a las demás lentes, sin embargo, para lente C-2, puede apreciarse que a una frecuencia de 525 kHz *Fig. 4.20-(a)*, no se observa un posible enfocamiento, sin embargo, entre 45 y 130 mm, la intensidad oscila alrededor de 20 dB, comportamiento típicamente observado en un colimador acústico y no de una lente acústica.



*Fig. 4.20:* Mapas de presión y gráfica del fenómeno de colimación encontrado en la lente C-2 a una frecuencia de 525 kHz.

### 4.3.3 Lente C-3

Así mismo, se diseñó una lente con forma plano convexo, la cual modifica la misma región de frecuencias que la lente C-2. Las bandas de transmisión no se alteran entre el cristal y la lente. La *Fig. 4.21* contiene la comparación del espectro del cristal y el espectro de a lente.

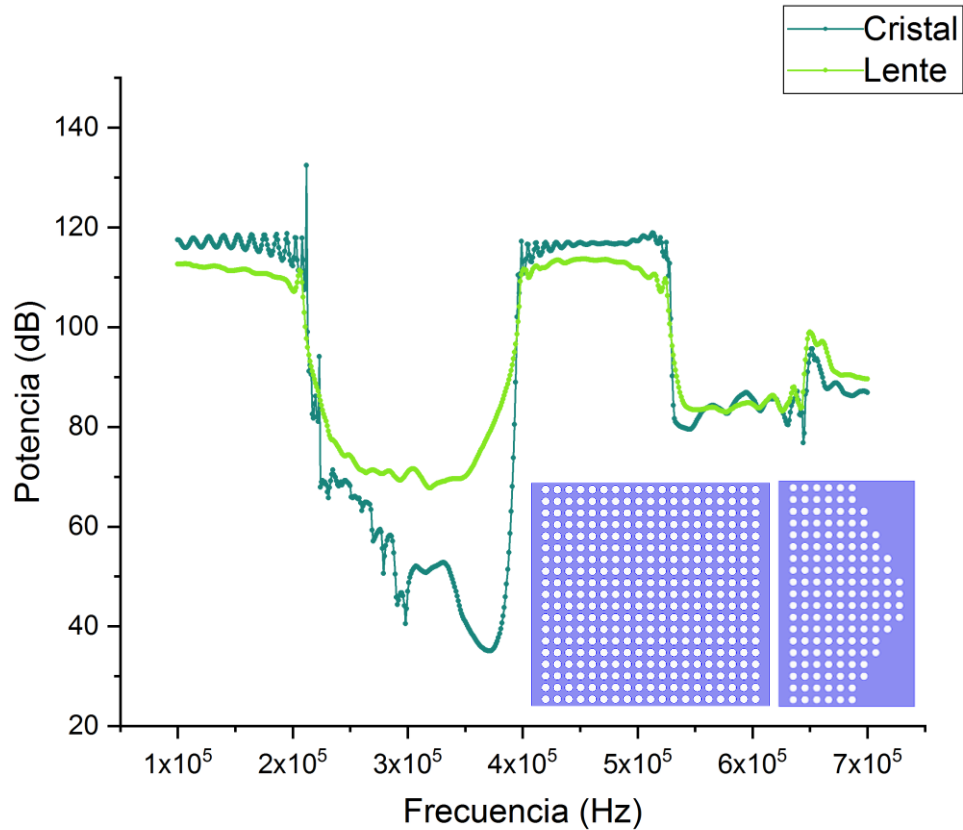


Fig. 4.21: Espectro de transmisión del cristal C-1.6 (2.3) vs espectro de la lente C-3.

En el análisis de los mapas de presión para una frecuencia de 518 kHz; se observa en la Fig. 4.22-(a), cómo se comporta la potencia a diferentes distancias de la lente en dicha región. Puede establecerse que la potencia alcanza un máximo a aproximadamente 34 mm de la lente, con un incremento de aproximadamente 12 dB. En la Fig. 4.22-(b), se muestra el mapa de presiones en la modalidad de forma de ondas, proporcionada por COMSOL, mientras que la Fig. 4.22-(c) contiene la distribución de energía total. En ésta última se puede apreciar que la energía acústica se concentra en un área entre 40 y 70 mm a lo largo del área de enfocamiento. La longitud de onda en éste caso, corresponde a 2.86 mm, es decir, la energía acústica se concentra en un área de  $10.48\lambda$  en la dirección de propagación. El largo de la región de enfocamiento es grande, sin embargo, la diferencia en intensidades es de un orden de magnitud, por lo que puede establecerse que la lente diseñada con el cristal descrito tiene la tendencia de enfocamiento.

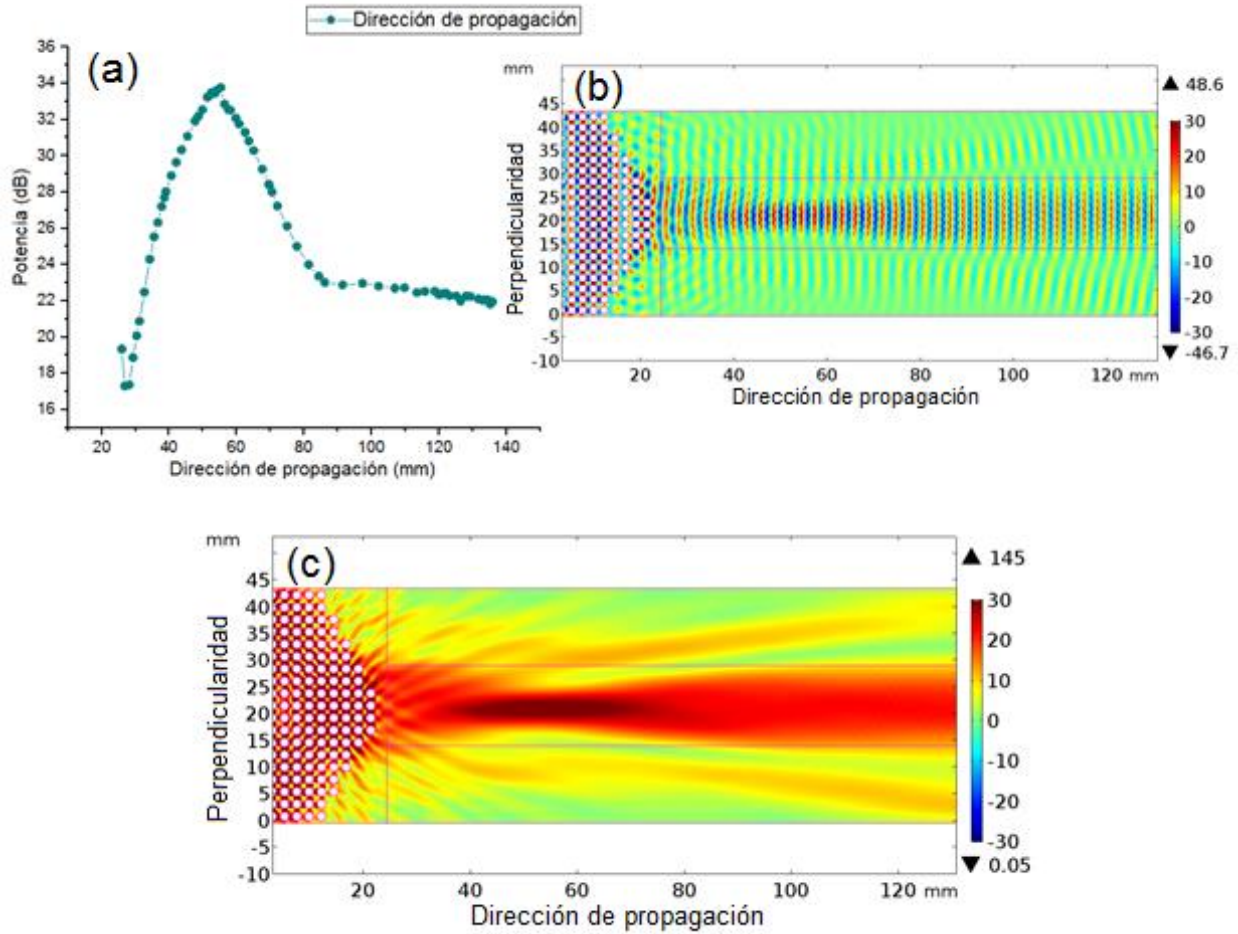


Fig. 4.22: Mapas de presión y gráfica de zona de focalización de la lente C-3 a una frecuencia de 518 kHz.

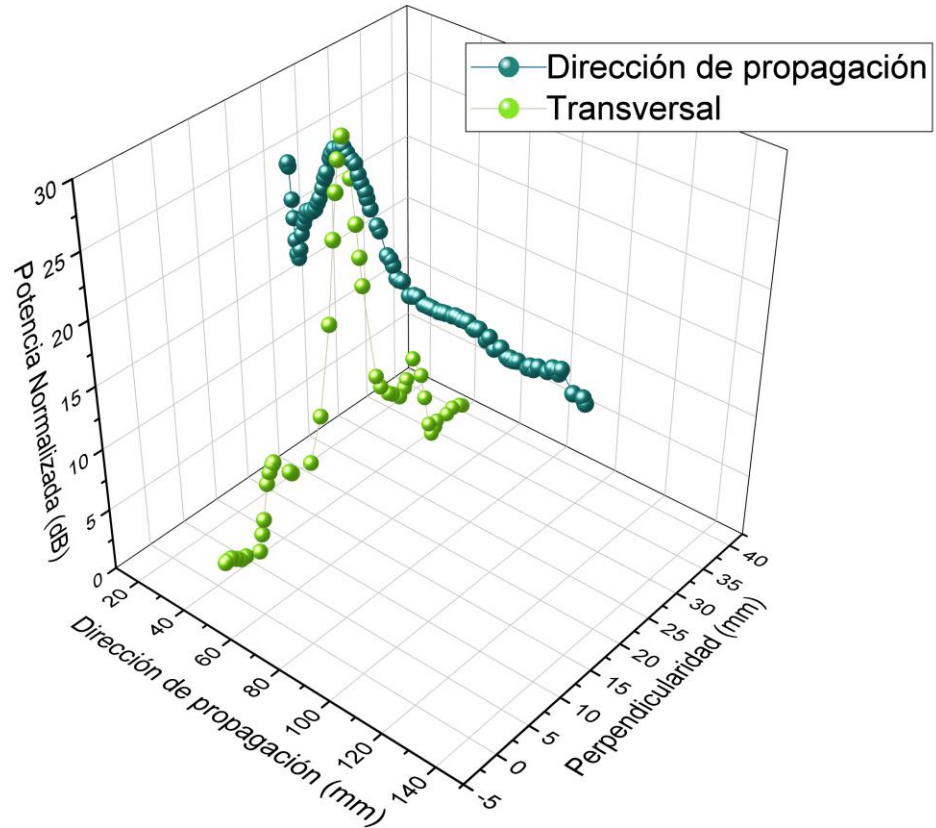
## 4.4 Optimización del fenómeno de enfocamiento

Para finalizar el análisis del enfocamiento de ondas de ultrasonido utilizando cristales fonónicos, en ésta sección se analizan las intensidades transmitidas, a lo largo del eje de propagación y, a la distancia en que se observa el máximo de intensidad, se analiza la intensidad registrada en la dirección perpendicular al eje de propagación. Este análisis permite visualizar el enfocamiento en una gráfica 3D. Las lentes y frecuencias seleccionadas para dicho análisis, fueron aquellas que mostraron el efecto de enfocamiento más claro, como se describe a continuación.

Posteriormente se seleccionaron lentes donde se mostraron las mejores focalizaciones y se analizaron los datos de su dirección de propagación y su eje transversal.

### 4.4.1 Lente A-3

Continuando con el cristal A-0.8 (2), tenemos esta lente a una frecuencia de 591 kHz, la cual mostró un área de focalización entre 30 mm y 65 mm en su dirección de propagación. En la **Fig. 4.26** podemos observar que su punto más alto se encuentra en 25 dB, tanto como en su dirección de propagación y su eje perpendicular.



*Fig. 4.23:* Dirección de propagación y eje transversal de la lente A-3 a 591 kHz.

### 4.4.2 Lente A-5

Esta lente a una frecuencia de 588 kHz, muestra un área de focalización entre 35 mm y 85 mm en su dirección de propagación. En la **Fig. 4.28** podemos observar que el punto donde se cruzan tanto la gráfica de Dirección de propagación y el eje transversal es en 20 dB, tanto como en su dirección de propagación y su eje transversal.

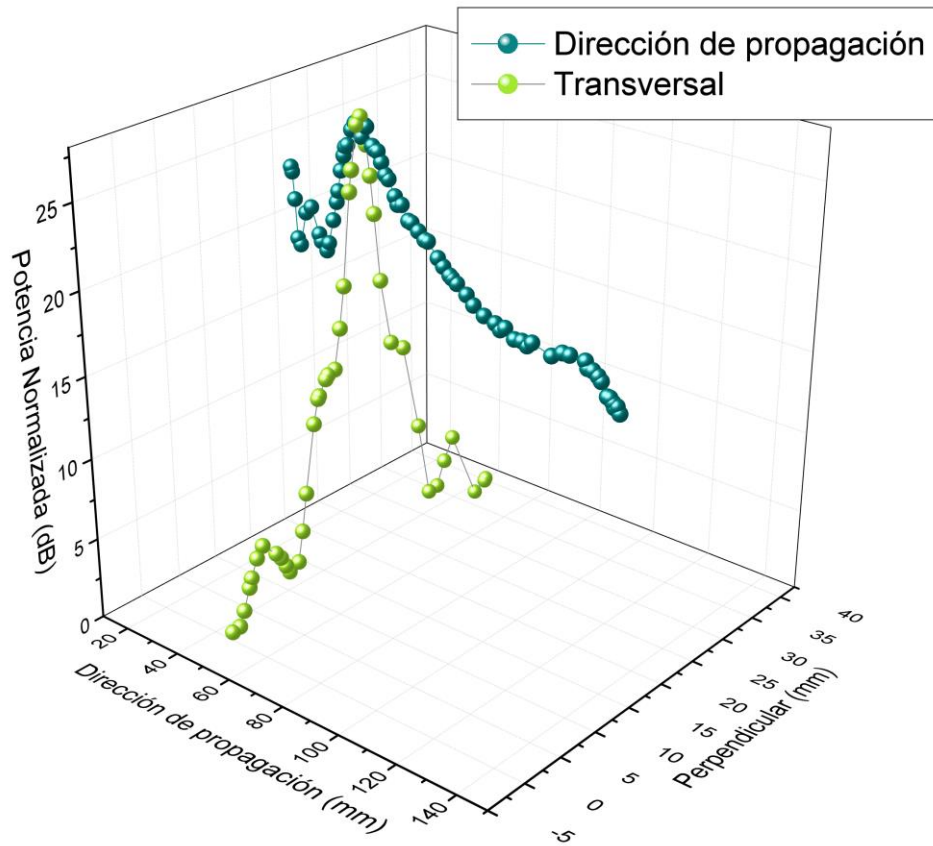


Fig. 4.24: Dirección de propagación y eje transversal de la lente A-5 a 588 kHz.

#### 4.4.3 Lente C-1

El cristal C-1.6 (2.3) permite el diseño de esta lente cuya a frecuencia de 399 kHz mostró un área de focalización entre 35 mm y 60mm. Podemos observar en la *Fig. 4.29* el punto más alto en donde se cortan nuestras dos gráficas es en 25 dB. Esta lente nos permitió observar con claridad que es posible enfocar el sonido.

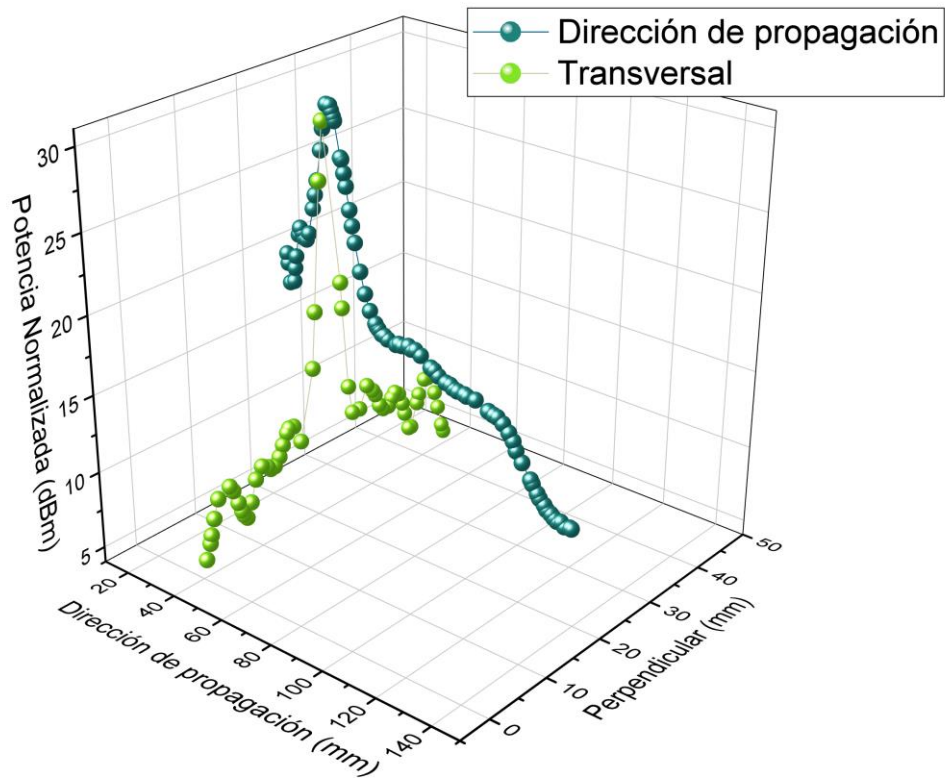


Fig. 4.25: Dirección de propagación y eje transversal de la lente C-1 a 399 kHz.

#### 4.4.4 Lente C-3

Por último, la lente C-3 a una frecuencia de 518 kHz, muestra un área de focalización entre 35 mm y 70 mm y el punto donde empatan su dirección de propagación con su eje transversal es en 30 dB como se logra apreciar en la *Fig. 4.30*.

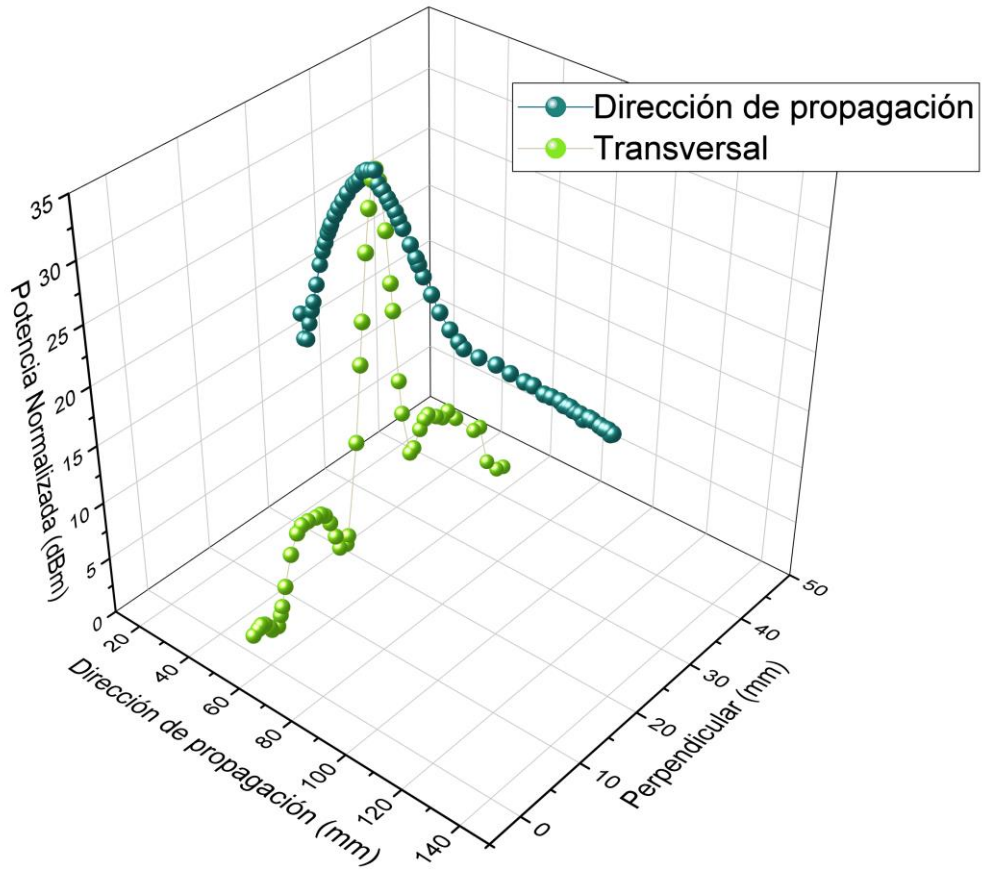


Fig. 4.30: Dirección de propagación y eje transversal de la lente C-3 a 518 kHz.

# Capítulo 5

## Conclusiones

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se han cubierto los objetivos tanto general como específicos que se propusieron.

Las lentes ópticas son utilizadas para concentrar la energía de los fotones, en un punto específico. Pues bien, se ha demostrado que un cristal fonónico formado por cilindros de acero inmersos en agua, nos da la facilidad de construcción de estructuras lenticulares las cuales permiten enfocar ondas de ultrasonido.

Los cristales diseñados computacionalmente tenían diferentes diámetros, los cuales permitieron realizar diversos modelos de lentes acústicas. Todo esto se logró en base a una plataforma de modelado multi-físico denominada COMSOL Multiphysics, la cual fue una excelente herramienta para la obtención de espectros de transmisión y mapas de presión de las estructuras lenticulares que se diseñaron.

A partir de los espectros de transmisión y los mapas de presión se encontraron diversas áreas de focalización en ciertos lentes, siendo la lente C-1 la que arrojó los mejores datos.

Por último, el comportamiento de los fonones a diferencia de los fotones como se observa en este trabajo permite que este se pueda enfocar en áreas mas no en un punto específico lo cual será de gran utilidad pues permitirá inducir efectos en donde se concentre dicha energía debido a que su interacción con materiales, principalmente biológicos y bajo ciertas condiciones, se considera no invasiva.

## Referencias

- [1] Gorishnyy, T., Maldovan, M., Ullal, C. y Thomas, E. (2005). Sound ideas. *Physics World.*, p. 2.
- [2] Tomás Ibiza, F. (2013). *Estudio numérico de la focalización de ondas evanescentes con una estructura periódica*. Trabajo final de grado. Universidad Politécnica de Valencia, Gandia. pp. 1-8.
- [3] Maldovan, M. (2013). Sound and heat revolutions in phononics. *Nature*, v. 503.
- [4] Armenise, M., Campanella, C., Ciminelli, C., Dell’Olio, F., Passaro, V. (2010). Phononic and photonic band gap structures: modelling and applications. *Physica Procedia*, v. 3.
- [5] Manzanares-Martinez, B., Zayas, M., Manzanares-Martinez, J., Gálvez González, L. y Ham, C. (2014). ONDAS LONGITUDINALES EN CRISTALES FONÓNICOS DE PERIODICIDAD UNIDIMENSIONAL. *ResearchGate*. p. 1.
- [6] Pennec Y, Vasseur JO, Djafari-Rouhani B, et al. (2010) Two dimensional phononic crystals: examples and applications. *Surface Science Reports* 65(8): 229–291.
- [7] M.S. Kushwaha, P. Halevi, G. Martinez, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani,, “Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites”, *Phys.Rev. B* 49, 2313 (1993).
- [8] L. Yang, Y. Yang, G. James, S. Ankit, 3D phononic cristales with ultra-wide band gaps, *Scientific* , n. 43407 (2017)

- [9] E. Walker, D. Reyes, M. Mayorga, A. Krokhin, Z. Wang, A. Neogi, Tunable ultrasonic phononic crystal controlled by infrared radiation, *Appl. Phys. Lett.* 105 (2014).
- [10] Y. Wu and Z. Q. Zhang, “Dispersion relations and their symmetry properties of electromagnetic and elastic metamaterials in two dimensions,” *Phys. Rev. B* 79, 195111 (2009).
- [11] A. Khelif, P. A. Deymier, B. Djafari-Rouhani, J. O. Vasseur, and L. Dobrzynski, “Two-dimensional phononic crystal with tunable narrow pass band: Application to a waveguide with selective frequency,” *J. Appl. Phys.* 94(3), 1308 (2003).
- [12] Jia-Yi Yeh, “Control analysis of the tunable phononic crystal with electrorheological material,” *Physica B* 400, 137–144 (2007).
- [13] V. Malinovsky and D. Donskoy, “Electro-magnetically controlled acoustic metamaterials with adaptive properties,” *J. Acoust. Soc. Am.* 132(4) 2866–2872 (2012).
- [14] J. Wang, X. Xu, X. Liu, and G. Xu, “A tunable acoustic filter made by periodical structured materials,” *Appl. Phys. Lett.* 94, 181908 (2009).
- [15] C. Goffaux and J. P. Vigneron, “Theoretical study of a tunable phononic band gap system,” *Phys. Rev. B* 64, 075118 (2001).
- [16] L. S. Chen, C. H. Kuo, and Z. Ye, Acoustic imaging and collimating by slabs of sonic crystals made from arrays of rigid cylinders in air, *Appl. Phys. Lett.* 85, 1072 2004.
- [17] C. Qiu Z. Liu, Acoustic directional radiation and enhancement caused by band-edge states of two-dimensional phononic crystals *Appl. Phys. Lett.* 89, 063106 2006.

- [18] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, and B. DjafariRouhani, Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides, *Appl. Phys. Lett.* 84, 4400-4402 (2004).
- [19] Martinez Sala, R.; Sánchez, J.V.; Gómez, V. & Llinares, J. (1995). "Sound attenuation by sculpture". *Nature*, v. 378.
- [20] Spadoni, A. y Daraio, C. (2010). Generation and control of sound bullets with a nonlinear acoustic lens. *PNAS* v. 107 no. 16
- [21] F. Cervera, L. Sanchis, J. V. Sánchez-Pérez, R. Martínez-Sala, C. Rubio, F. Meseguer, C. López, D. Caballero, J. Sánchez-Dehesa, *Refractive Acoustic Devices for Airborne Sound*, *Phys. Rev. Letts.*, 88 (2002) 023902.
- [22] S. Yang, J. H. Page, Z. Liu, M. L. Cowan, C.T. Chan, P. Sheng, Focusing of Sound in a 3D Phononic Crystal, *Phys. Rev. Letts.*, 93 (2004) 024301.
- [23] J. H. Page, Focusing of ultrasonic waves by negative refraction in phononic crystals, *AIP Advances* 6, (2016) 121606.
- [24] J. H. Page, Z. Liu, S. Yang, Focusing of acoustic waves by negative refraction in phononic crystals, 3rd International Conference on Phononic Crystals/Metamaterials, Phonon Transport and Phonon Coupling, Paris, France, May 31-June 5, 2015.
- [25] Kushwaha, Manvir S. (1997). Stop-bands for periodic metallic rods: Sculptures that can filter the noise. *Applied physical letters*, v. 70, n. 24.
- [26] Hu, Xinhua y Chan, C. T. (2005). Refraction of Water Waves by Periodic Cylinder. *Applied physical letters*, v.95, n.4.

- [27] Maldovan, M. (2013). Narrow Low-Frequency Spectrum and Heat Management by Thermocrystals. *Applied physical letters*, v. 110, n. 5.
- [28] R. H. Olsson y I. El-Kady. (2009). Microfabricated phononic crystal devices and applications. *Measurement Science and Technology*, v.20, n.1
- [29] Villegas, D. De León-Pérez, F. Pérez-Álvarez, R. Arriaga J. (2015). Phonon tunneling through a double barrier system. *Physica B: Condensed Matter*, V. 463, pp. 7-14.
- [30] COMSOL Multiphysics 5.3<sup>a</sup>, Description, Addlink. Recuperado de: <https://www.addlink.es/productos/comsol-multiphysics>
- [31] Comsol; Introduction to Comsol Multiphysics, Version 4.4 © 1998-2014 Comsol.
- [32] COMSOL (2016) by COMSOL Inc. COMSOL Multiphysics® Acoustics Module Software for Acoustics and Vibration Analysis. Recuperado de: <https://www.comsol.com/acoustics-module>
- [33] COMSOL Multiphysics 5.3<sup>a</sup>, Características, Addlink. Recuperado de: <https://www.addlink.es/productos/comsol-acoustics-module#caracteristicas>
- [34] Acoustic Module. User Guide, Version 4.1 © 1998–2010 COMSOL AB.
- [35] Frías, E. (2004), Aportaciones al estudio de las maquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. (Tesis doctoral). Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- [36] Torres R., Grau J., (2007), Introducción a la mecánica de fluidos y transferencia de calor con COMSOL Multiphysics, pp. 9,10.