



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO
DE MÉXICO



Facultad de Ciencias

**DISEÑO DE GUÍAS DE ONDA UTILIZANDO CRISTALES FONÓNICOS
PARA APLICACIONES DE LA DISIPACIÓN LOCAL DE ENERGÍA
ACÚSTICA**

TESIS

Que para obtener el título de **Licenciado en Física**

PRESENTA:

Guillermo Ramírez García

Asesor de tesis: Dr. Delfino Reyes Contreras

Coasesor: Dr. Miguel Mayorga Rojas

Toluca, México 2018

INDICE GENERAL

Introducción	4
Resumen	7
Objetivos	8
Justificación	9
Capítulo 1: Cristales fonónicos	10
Capítulo 2: COMSOL Multiphysics	38
Capítulo 3: Detalles de simulación	50
Capítulo 4: Resultados y discusión	63
Capítulo 5: Conclusiones	94
Agradecimientos	96

A mis padres Guillermo y Beatríz

Y a mi hermano Rogelio

Introducción

El objetivo de la presente tesis fue el diseño de guías de onda acústicas utilizando cristales fonónicos, para aplicaciones en el guiado y disipación local de energía acústica; el diseño se realizó mediante el uso del software COMSOL-Multiphysics.

Un cristal fonónico es una estructura formada por un arreglo periódico de dispersores de sonido dispuestos en una matriz. Estos arreglos pueden ser de una, dos o tres dimensiones, la periodicidad es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la banda. Una característica importante de los cristales fonónicos está relacionada con el hecho de que las propiedades elásticas (densidad, módulo de Young) de los dispersores y la matriz, difieren considerablemente, lo que da lugar a la formación de *bandgaps fonónicos*.

El *bandgap*, por su traducción banda prohibida, es un rango de frecuencias que no se transmiten a través del cristal. Ciertas frecuencias, al propagarse a través del cristal, serán transmitidas mientras que otras se reflejarán o se disiparán; esto como consecuencia de la estructura del cristal. Por lo tanto, al modificar la posición de la banda prohibida, así como el ancho mediante diferentes procesos, es posible guiar ondas acústicas, con frecuencia localizada en el *bandgap*. Ahora bien, modificar la estructura del cristal supondrá tener que cambiar el número de cilindros, su radio o disposición espacial; así como el parámetro de red o las características materiales de sus componentes (matriz y dispersores).

Los cristales diseñados fueron bidimensionales, conformados por cilindros de acero inoxidable, dispuestos cuadráticamente y embebidos en una matriz de agua. Se crearon varios diseños variando el radio de los cilindros y el parámetro de red (es decir la distancia que separa a los cilindros y que se mide desde el centro de la circunferencia de un cilindro hasta el centro del cilindro contiguo). Para crear las guías de onda, se extrajeron cilindros en posiciones específicas y consecutivas, lo que da origen a modos de resonancia localizados, permitiendo así que ciertas frecuencias en el bandgap acústico puedan viajar en el cristal.

La plataforma COMSOL permitió, además de diseñar los cristales, a visualizar los espectros de transmisión ultrasónica y los mapas de presiones tanto en el cristal original como en las guías de onda diseñadas, lo que permitió identificar las bandas de transmisión y el *bandgap*, así como la distribución de energía tanto al interior como el exterior del cristal. Además, se pudo determinar la energía acústica de entrada y de salida y por tanto la disipada en el interior del cristal.

La tesis se compone de 5 capítulos, en el primero se describe el concepto de cristal fonónico, sus características fundamentales, los fenómenos asociados y algunas de sus aplicaciones. Además de discutir el concepto de bandgap fonónico y cómo puede modificarse.

En el capítulo 2 se describen algunos detalles de la plataforma COMSOL Multiphysics, este capítulo estará enfocado en las características del programa, su interfaz gráfica y usos.

En el tercer capítulo titulado *Detalles de simulación* se detallan las características de los cristales fonónicos simulados y se incluirán diagramas para una mejor descripción.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones y se discutirán. Se presentarán los espectros de transmisión y mapas de presión de los diversos cristales y las guías de onda diseñados. Con el quinto y último capítulo se finalizará la tesis presentando las conclusiones.

RESUMEN

En la presente tesis se redacta el diseño de guías de ondas acústicas utilizando cristales fonónicos. Estos cristales se diseñaron utilizando el software Comsol Multiphysics y consistieron en: arreglos periódicos de cilindros de acero (dispersores de sonido) embebidos en una matriz de agua. Esto para que exista un contraste entre las características físicas de los materiales y por lo tanto sea posible observar los fenómenos relacionados con la interferencia de ondas.

Para crear las guías de ondas se sustrajeron dispersores de sonido, uno por uno, en posiciones específicas del cristal, lo que genera líneas de defectos a través de las cuales las ondas serán guiadas.

Además se eliminaron algunos dispersores del cristal, simultáneamente, para generar las guías de ondas y poder observar que sucedía dentro de las bandas prohibidas. Con esto se logró comprobar que es posible guiar ondas acústicas aún donde se encuentra originalmente la banda prohibida.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar guías de onda utilizando cristales fonónicos bidimensionales, a partir de la sustracción de dispersores de sonido en posiciones específicas del cristal, generando con ello, líneas de defectos a través de las cuales las ondas serán guiadas.

Objetivos Específicos

- Instruirse en el uso de la plataforma COMSOL-Multiphysics.
- Entender la física detrás de la simulación utilizando la paquetería “Interacción de ondas acústicas con material sólido” contenido en COMSOL.
- Simulación de diversos cristales fonónicos a través de COMSOL.
- Diseño de diferentes guías de onda, que permitan optimizar la liberación controlada de energía en el rango de frecuencias ultrasónicas.
- Mostrar el demultiplexado de ondas a través de guías de onda con al menos dos líneas de salida.
- Describir teóricamente, mediante el enfoque de la termodinámica de procesos irreversibles, las zonas de mínima y máxima disipación de energía.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de la presente propuesta de tesis, se justifica debido a que permitirá, por un lado, la formación de un estudiante de licenciatura, con conocimientos en la plataforma COMSOL-Multiphysics y su uso en el diseño de cristales fonónicos y su implementación como guías de onda. Por otro lado, permitirá la optimización del filtrado y guiado de ondas acústicas a partir de guías de onda basadas en cristales fonónicos para la liberación controlada de energía acústica en puntos específicos (liberación local). El diseño de guías de onda a partir de la sustracción de dispersores de sonido, con posiciones específicas, en un cristal fonónico, conllevará a que ondas de frecuencias específicas puedan atravesar el cristal y alcanzar puntos específicos. La energía liberada de manera local, podría ser útil para estimular células (sonoporación) o sensores de presión sensibles a diferentes niveles de presión, inducidos por frecuencias distintas (switches acústicos).

Capítulo 1:

CRISTALES FONÓNICOS

El objetivo del presente capítulo es introducir el concepto de cristal fonónico, sus características fundamentales, los fenómenos asociados y algunas aplicaciones. Se discute con énfasis el concepto de bandgap fonónico y cómo puede modificarse mediante diversos factores.

1.1 Definición de Cristal fonónico

En Física del Estado Sólido, se define un cristal (electrónico), como un arreglo de átomos dispuestos periódicamente, de tal forma que un electrón viajando a través de él, estará sujeto a un potencial periódico tipo pozo, determinado principalmente por la distancia interatómica (distancias del orden de 10^{-10} m (Å)). Tales arreglos pueden ser de una, dos o tres dimensiones; su periodicidad da lugar a una estructura de bandas permitidas y prohibidas para los electrones.

En el estudio de la física del estado sólido, y en particular dentro de la teoría de semiconductores, es bien conocido el fenómeno de estructura de bandas, donde los niveles electrónicos se agrupan en bandas continuas separadas por regiones prohibidas o "bandgaps". Este fenómeno puede interpretarse dentro del marco de la mecánica cuántica como consecuencia del comportamiento ondulatorio de los electrones dentro del cristal.

En décadas pasadas, se han desarrollado una nueva clase de materiales artificiales, que tienen la propiedad de controlar la propagación de fotones (luz), conocidos como metamateriales fotónicos o "cristales fotónicos". Los cristales fotónicos están constituidos por una distribución periódica de materiales con diferente constante dieléctrica de tal forma que, la disposición específica de dichos

materiales permite el control de la propagación de fotones, es decir fotones con cierta longitud de onda pueden viajar o no a través de la estructura fotónica, dependiendo de la naturaleza y disposición de sus componentes. En cristales fotónicos, la dinámica del fotón está sujeta a una función dieléctrica periódica [1].

Recientemente, en especial durante los inicios de la década de los 90's, se implementó el diseño de estructuras similares a los cristales fotónicos, pero con la capacidad de controlar la propagación de ondas mecánicas y/o acústicas, es decir fonones. Este tipo de estructuras se conocen como "cristales fonónicos" o metamateriales acústicos.

Los cristales fonónicos son estructuras formadas por arreglos periódicos de dispersores de sonido, dispuestos en una matriz de cualquier material. Una de las características más importantes de tales estructuras, es que las propiedades elásticas (densidad, velocidad del sonido, Módulo de Young) de sus componentes, los dispersores y la matriz, difieren considerablemente. Por ejemplo, los dispersores pueden ser cilindros de acero, inmersos en una matriz de agua; en este caso, la densidad del acero es 7800 Kg/m^3 , mientras que la del agua es de 1000 Kg/m^3 . En la Figura 1.1 se muestra el ejemplo de un cristal fonónico diseñado en la plataforma COMSOL; la estructura está formada por un arreglo de veinte por veinte cilindros de acero inmersos en agua (área verde).

El sonido es un tipo de onda mecánica y longitudinal, y se propaga por medios físicos, por lo tanto, para lograr la dispersión y el control de la propagación de los fonones es necesario un contraste en la densidad del medio o velocidad del sonido. Para ello los cristales fonónicos deben tener una estructura de tal forma

que exista una función periódica espacial de la densidad y/o velocidad del sonido [2, 3].

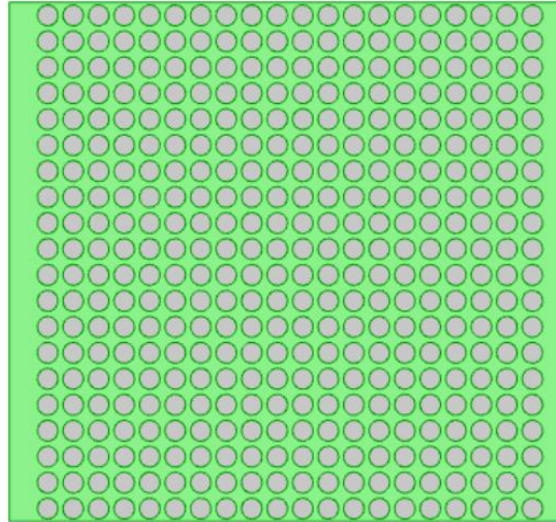


Fig. 1.1 Cilindros de acero inmersos en una matriz de agua. Diseño creado en COMSOL Multiphysics.

La existencia de un contraste en las propiedades elásticas de los componentes que conforman al cristal fonónico, propiedades dieléctricas en un cristal fotónico o la distancia interatómica en un cristal electrónico, da lugar a la aparición de lo que en la literatura se conoce como *bandgap* fonónico, fotónico o electrónico, respectivamente, cuyas características se describen a continuación.

1.2 Concepto de *bandgap*

El *bandgap* o banda prohibida se define como la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción, como se ilustra en la Figura 1.2. Se denomina banda de valencia a la

región de energías electrónicas (bandas) más alta que ocupan los electrones en el cero absoluto, mientras que la banda de conducción se define como el intervalo de energías electrónicas que permiten a los electrones acelerarse por la presencia de un campo eléctrico externo y por lo tanto la inducción de corrientes eléctricas.

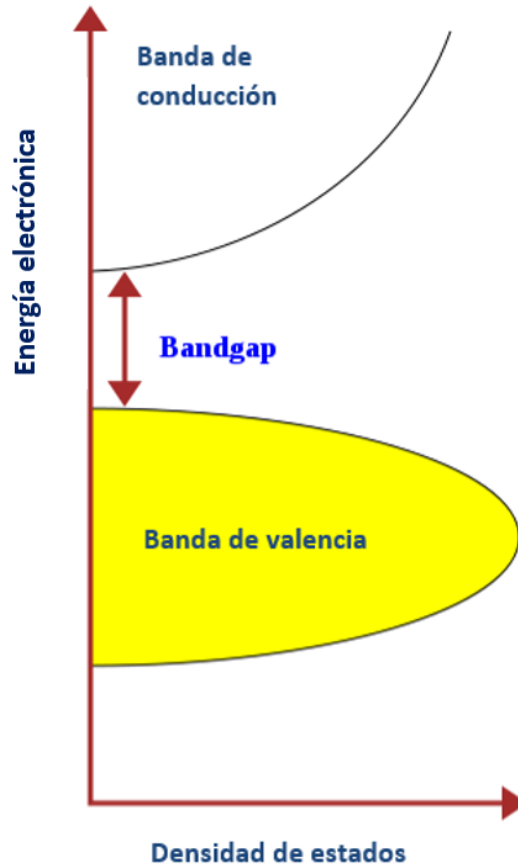


Fig. 1.2 Estructura de bandas

La existencia de electrones en la banda de conducción es crucial para el proceso de conducción eléctrica y su número depende del tipo de material. En los aislantes, los electrones de la banda de valencia están separados de la banda de conducción, por una banda prohibida grande (*bandgap*). En los conductores, como

los metales, la banda de valencia se superpone con la banda de conducción; mientras que en los semiconductores, existe una banda prohibida suficientemente pequeña entre las bandas de valencia y conducción, de tal forma que los electrones pueden pasar de una región de energía a otra; proceso que puede ser inducido por calor u otra clase de excitación (Figura 1.3).

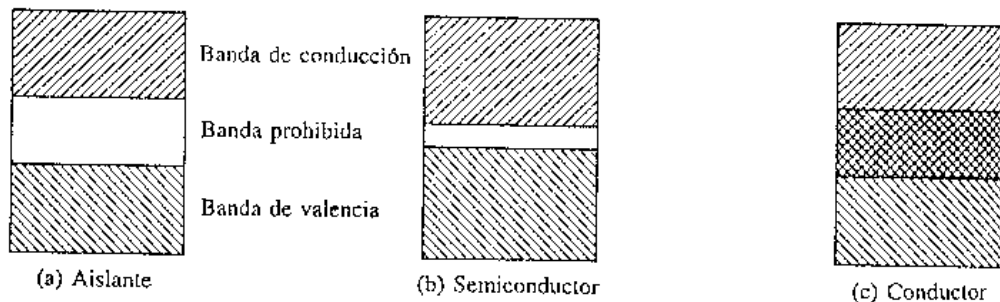


Fig. 1.3 (Diferencias de separación entre bandas de valencia y bandas de conducción para materiales aislantes, semiconductores y conductores.)

En el caso de los *aislantes*, hay una gran región de energías prohibidas entre las energías de los electrones de valencia y la energía a la que se pueden mover los electrones libremente por el material (la banda de conducción). Este hecho conlleva esencialmente a que la posibilidad de inducir una corriente eléctrica en un aislante sea casi nula. Con respecto a los *semiconductores*, aunque no ocurre conducción a 0 K, a temperaturas superiores un número finito de electrones puede alcanzar la banda de conducción y proporcionar una corriente significativa.

En los *conductores*, como resultado de que sus electrones de valencia están esencialmente libres, la existencia de corrientes eléctricas es una de sus características fundamentales. Lo anterior, se puede apreciar gráficamente en la

Figura 1.3, como la superposición de la banda de valencia con la banda de conducción, es decir, una fracción de los electrones de valencia podrá moverse a través del material.

1.2.1 Bandgap Fonónico

La modificación en la periodicidad de las propiedades elásticas en un cristal fonónico da origen a la formación de bandas prohibidas fonónicas (*bandgaps* fonónicos). El *bandgap* fonónico se define como el intervalo de frecuencias o longitudes de onda que son prohibidas, es decir que no pueden propagarse a través del cristal fonónico. En tales estructuras, la posición del bandgap se determina por las propiedades elásticas de sus componentes que, como se ha mencionado anteriormente, pueden ser la densidad, velocidad del sonido o Modulo de Young, también conocido como módulo de elasticidad. De igual forma, el bandgap es controlado por su topología, es decir, la disposición espacial de los dispersores en la matriz, debido a que pueden estar dispuestos cuadrática, triangular o hexagonalmente, por ejemplo. Recientemente, se ha mostrado que la posición del bandgap fonónico, también puede modularse mediante agentes externos, por ejemplo, a través de radiación infrarroja, campos eléctricos o magnéticos, entre otros [3, 4, 5].

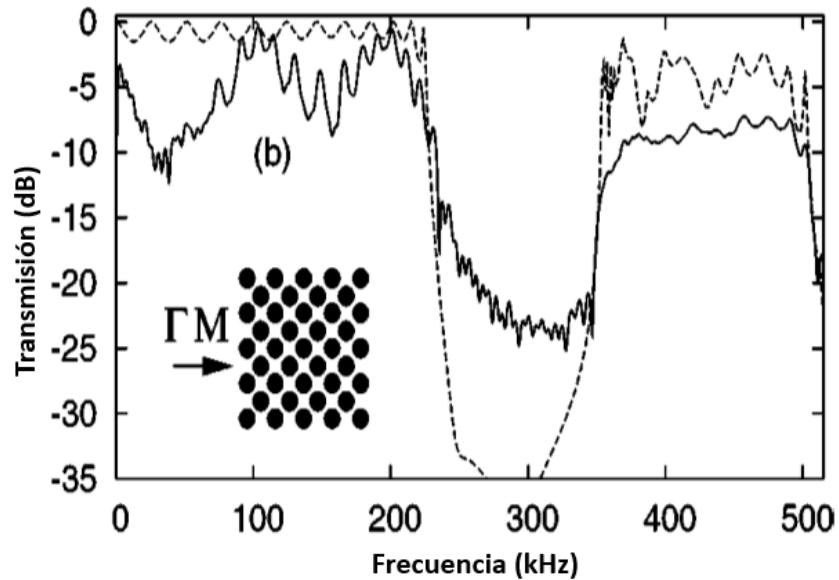


Fig. 1.4. Espectros de transmisión donde se puede observar la banda prohibida (bandgap) extendiéndose desde los 212 hasta los 312 kHz. Adaptado de [20]

Las ondas acústicas difieren de las ondas luminosas en varios aspectos. Las primeras son ondas mecánicas, esto significa que no pueden viajar a través del vacío, mientras que las ondas luminosas son electromagnéticas y pueden viajar a través del vacío. De manera general, las ondas mecánicas que viajan a través de un gas o un líquido son conocidas como ondas acústicas, mientras que las que viajan a través de un sólido son llamadas ondas elásticas.

La propagación de ondas mecánicas en un medio está descrita por una relación de dispersión que relaciona la frecuencia ω y el vector de onda k de la onda propagada. La relación de dispersión para ondas viajeras en un medio homogéneo es muy simple: $\omega=c*k$, donde c es la velocidad del sonido en el medio de transmisión. La relación de dispersión para materiales no homogéneos como los cristales fonónicos es más complicado.

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, ondas reflejadas, las cuales luego interfieren entre sí. Si la interferencia es constructiva, toda la energía de la onda original se refleja de regreso 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.

1.2.2 Formas de controlar la posición del bandgap

El mecanismo general para la apertura de la banda prohibida está basado en la interferencia destructiva de las ondas dispersadas por las inclusiones, esto significa que se requiere de un bajo contraste entre las propiedades elásticas de los materiales.

Lo anterior, y tomando como referencia la Figura 1.1, puede ejemplificarse si en la matriz en la que están inmersos los cilindros se cambia el medio, es decir el agua, por alguna otra sustancia, hecho que modificaría la densidad del medio de transmisión y por lo tanto la velocidad de propagación del sonido. Lo mismo ocurriría si se cambia el tipo de material conformando a los cilindros dispersores, manteniendo al agua como matriz [6, 7].

Uno de los aspectos de gran interés en el diseño de los cristales fonónicos es el poder controlar la posición del bandgap fonónico y por lo tanto las bandas de transmisión y de ahí a sus posibles aplicaciones.

1.3 Tipos de cristales fonónicos

La existencia de bandgaps absolutos se predijo teóricamente, antes de demostrarse de forma experimental, en varios cristales fonónicos constituidos, principalmente, por componentes sólidos y posteriormente por la combinación de componentes sólidos y fluidos [8,9]. Esto demostró que la existencia y el ancho de las bandas dependen de la naturaleza de los materiales que constituyan el cristal, el contraste entre las características físicas de las inclusiones en la matriz, la forma de las inclusiones y su geometría en el arreglo, así como el relleno de las inclusiones.

Se pueden definir, de manera general, tres clases de cristales fonónicos, sólido-sólido [10], fluido-fluido y la combinación sólido-fluido [11]. La apertura de los anchos de banda acústicas requiere dos condiciones principales. Primero, que exista un alto contraste físico, velocidad del sonido y densidad, entre los materiales de las inclusiones y la matriz. La segunda, es presentar un relleno suficiente de la inclusión de la matriz, es decir, una fracción de llenado adecuada.

A continuación, se describen algunos ejemplos de cristales fonónicos sólido-sólido, sólido-fluido y fluido-fluido, así como los resultados obtenidos de algunos trabajos ilustrativos.

1.3.1 Cristal fonónico sólido-sólido

Los cristales fonónicos sólido-sólido consisten en dispersores de sonido sólidos inmersos en una matriz también sólida. Cabe mencionar que este tipo de cristales fonónicos fueron los primeros en ser analizados por investigadores como Sigalas, Economou y Kushwaha, de manera independiente. A partir de esos trabajos, se sentaron las bases teóricas y necesidades experimentales para el estudio de cristales fonónicos. [12,13]

Como caso particular, se describen a continuación algunos resultados relacionados con la estructura de bandas y la existencia de bandgaps absolutos en cristales fonónicos constituidos por dos materiales conocidos, sustrato de silicio (dispersores) y resina (matriz). En la Tabla 1 se muestran los parámetros físicos de estos dos materiales.

Material	ρ (kg/m ³)	C_{11} (x10 ¹¹ dyn/cm ²)	C_{44} (x10 ¹¹ dyn/cm ²)	C_{12} (x10 ¹¹ dyn/cm ²)	C_1 (m/s)	C_t (m/s)
Sustrato de Silicio	2,331	16.57	7.962	6.39	8,430	5,844
Resina	1,180	0.761	0.159	0.443	2,540	1,161

Tabla 1. Tabla de densidades y constantes elásticas para el silicio y la resina. Densidad y constantes elásticas C_{11} , C_{44} y C_{12} del sustrato de silicio y resina [14].

Se considera que el silicio es un material cúbico con un eje cristalográfico¹ paralelo a la dirección de propagación; mientras que la resina es isotrópica, i.e. no depende de la elección de los ejes para su medición. Estos materiales presentan

¹ Con el propósito de dar nombre a las caras de los cristales, se hace necesaria la utilización de unos ejes de referencia o coordenadas que sirven para ubicar en posición las respectivas formas externas del cristal. Estos son los llamados Ejes cristalográficos, que se deben tomar paralelos a las aristas reales del cristal.

grandes contrastes entre sus densidades y constantes elásticas, tal como se muestra en la Tabla 1; el silicio es un material duro mientras que la resina es más bien suave, es decir, cumplen la primera condición para la existencia del bandgap absoluto.

En un primer caso, la composición del cristal consistió en un arreglo de cilindros de silicio dispuestos cuadráticamente en una matriz de resina. En la Figura 1.5-a se muestra un ejemplo de las curvas de dispersión para el arreglo descrito. La fracción de llenado, expresión para la fracción de llenado ($f = \pi(r^2 \cdot a^{-2})$) definido por β es igual a 0.68. En dicho reporte, se encontró que, en el rango de frecuencias analizado, se pueden identificar dos bandgaps completos para las polarizaciones en el plano y fuera de este. Así mismo, se concluyó que la elección del factor de relleno $\beta=0.68$, produce casi el bandgap completo más grande.

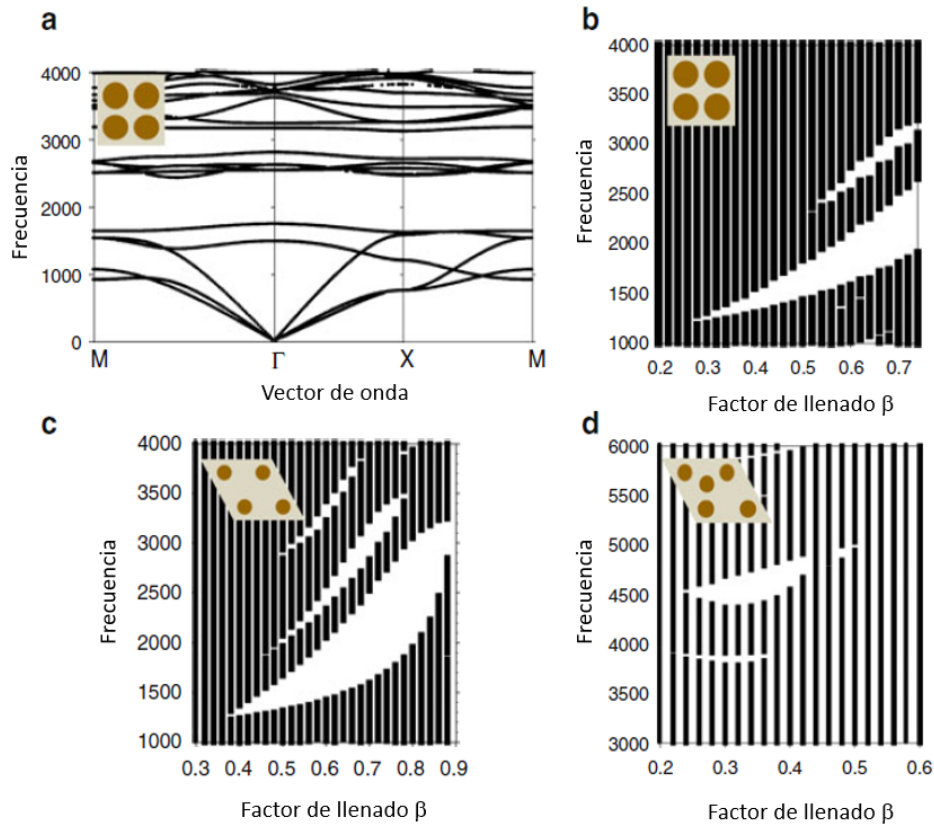


Fig. 1.5 Existencia de bandgap en un cristal fonónico hecho de inclusiones de silicio duro en una matriz de resina suave. a) Ejemplo de una curva de dispersión para un arreglo cuadrado con un factor de relleno $\beta=0.68$. Gráfica de los Bandgaps para b) arreglo cuadrado, c) arreglo hexagonal y d) arreglo en forma de panal en función de sus factores de relleno. Adaptado de [14].

La evolución del ancho del bandgap, descrita por el area blanca de la Figura 1.5-b se presenta como función de factor de llenado. El primer intervalo del bandgap completo es el más grande y está abierto sobre una amplia gama del factor de llenado, por arriba de 0.2. En la Figura 1.5-c se presenta la evolución del bandgap para un arreglo hexagonal. Se obtuvieron tres bandgaps, el más grande, por ejemplo, se observó para una fracción de llenado $\beta > 0.36$. Finalmente para un arreglo de panal, Figura 1.5-d, se puede observar un bandgap completo y grande a altas frecuencias y para fracciones de llenado en un rango de $0.24 < \beta < 0.44$.

Tales resultados muestran que, tanto la posición como ancho del bandgap, pueden modularse; para el caso descrito, al modificar tanto la fracción de llenado como la topología de los dispersores (cuadrada, hexagonal o de panal). Como conclusión, en inclusiones duras en matrices suaves, se obtuvieron bandgaps grandes para arreglos hexagonales y cuadrados, y el cuadrado permite fracciones de relleno inferiores.

1.3.2 Cristal sólido-fluido

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 de vibración complejos, como el líquido que sólo permite modos longitudinales, mientras que los sólidos permiten tanto modos longitudinales como transversales [14].

Como ejemplos ilustrativos, en la presente sección, se describirán dos diferentes casos; el primero consiste en un cristal fonónico conformado por inclusiones sólidas inmersas en una matriz de agua, y el caso opuesto, es decir donde la matriz es sólida y los cilindros barras de agua. Para el primer caso el cristal fonónico fue constituido por cilindros de acero inmersos en una matriz de

agua. La información sobre densidades y constantes elásticas para los materiales conformando al cristal están dadas en la siguiente Tabla 2.

Material	ρ (kg/m ³)	c_l (m/s)	c_t (m/s)
Acero	7,780	5,825	3,227
Agua	1,000	1,490	—

Tabla 2. Densidad ρ y velocidades longitudinal c_l y transversal c_t del sonido en acero y agua. Adaptado de [14]

La Figura 1.6 muestra, en la parte izquierda del diagrama, la estructura de bandas a lo largo de la dirección ΓX de la zona irreducible de Brillouin, calculado para un arreglo cuadrado de cilindros de acero de radio $r/a=0.38$. En el lado derecho del diagrama se muestra el espectro de transmisión para el cristal, obtenido usando el método FDTD (Finite difference time domain).

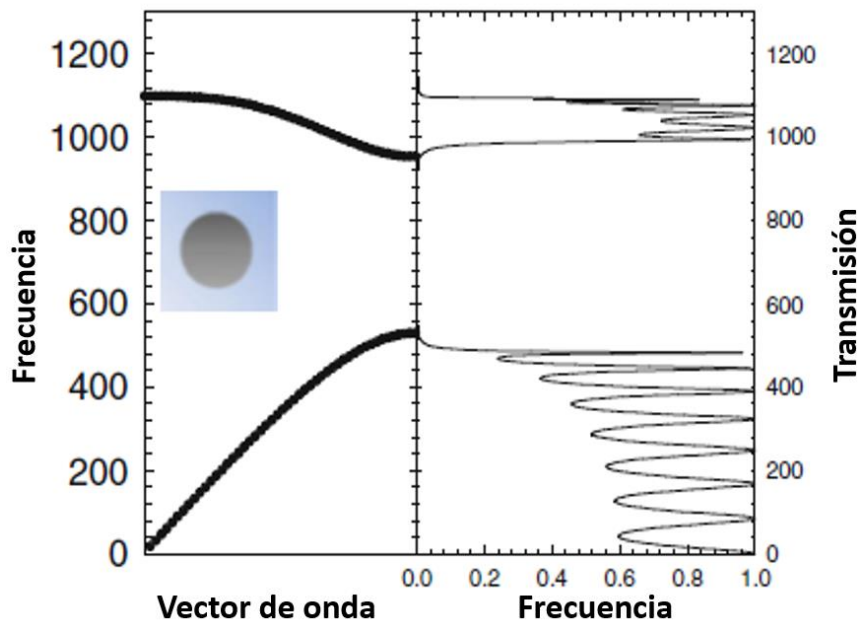


Fig. 1.6 Curvas de dispersión, (parte izquierda de la gráfica) y transmisión (parte derecha de la gráfica) de un cristal fonónico compuesto de cilindros de acero de radio $r/a=0.45$ inmersos en una matriz de agua. Adaptado de [14].

En éste caso se calcularon, de manera similar, las curvas de dispersión y el espectro de transmisión para tubos huecos de acero con agua en su interior, como se muestra en la Figura 1.7 [15,16]. El radio interno $r_1/a=0.22$ con el mismo radio del ejemplo anterior $r/a=0.38$. Al analizar el espectro de transmisión, la característica más notable es la existencia de una banda de paso estrecha localizada dentro del bandgap del cristal fonónico en $f_a=780\text{m/s}$. Conforme el radio interno incrementa de 0.2 a 0.25, la frecuencia de la banda de paso estrecha decrece. El hecho de que exista una banda de transmisión angosta en el bandgap está relacionada con la naturaleza de los cilindros huecos, los cuales funcionan como una guía de ondas para una frecuencia específica. La posibilidad de guiar ondas acústicas se discutirá más adelante.

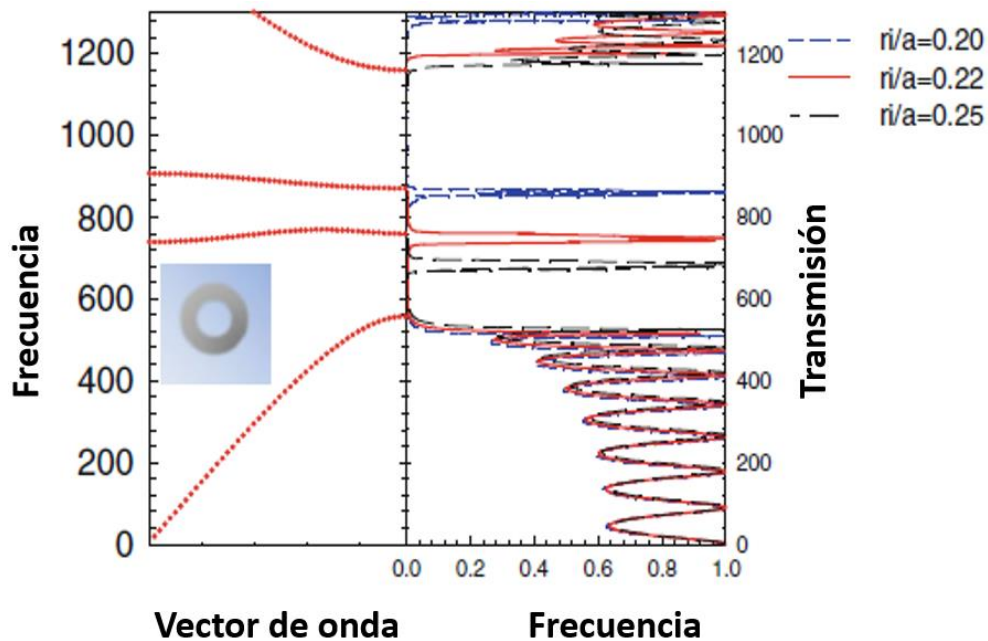
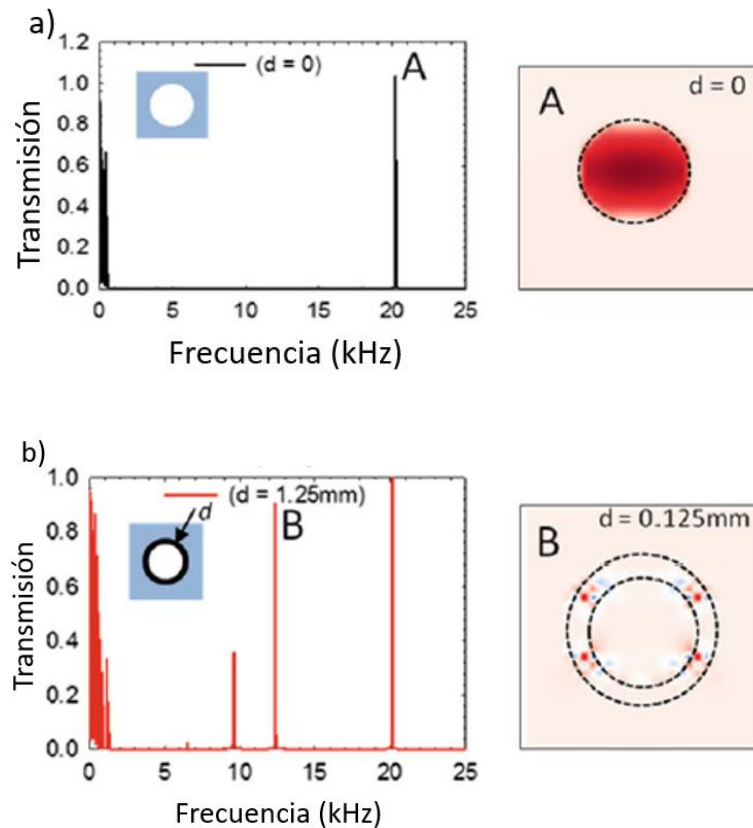


Fig. 1.7 (Parte izquierda) Curvas de dispersión para cilindros huecos de radio interno $r_1/a=0.22$ llenos de agua. (Parte derecha) Curvas de transmisión para cilindros huecos de radio interno variable.

Las curvas de dispersión calculadas para el radio interno $r/a=0.22$ presentan dos bandas planas dentro del bandgap. La de abajo, donde $f_a=780\text{m/s}$ encaja perfectamente en el paso de banda estrecho observado en el espectro de transmisión. La de arriba, donde $f_a=900\text{m/s}$ no contribuye a la transmisión. Esta banda es llamada “deaf band”, *banda sorda*, dado que no puede ser excitada debido a la simetría [17].

1.3.3 Cristal fluido-fluido

En éste aparatado, se asume que los materiales que constituyen al cristal fonónico son dos diferentes fluidos. Por ejemplo, cilindros de aire (bidimensionales) o burbujas de aire (tridimensionales) en una matriz de agua.



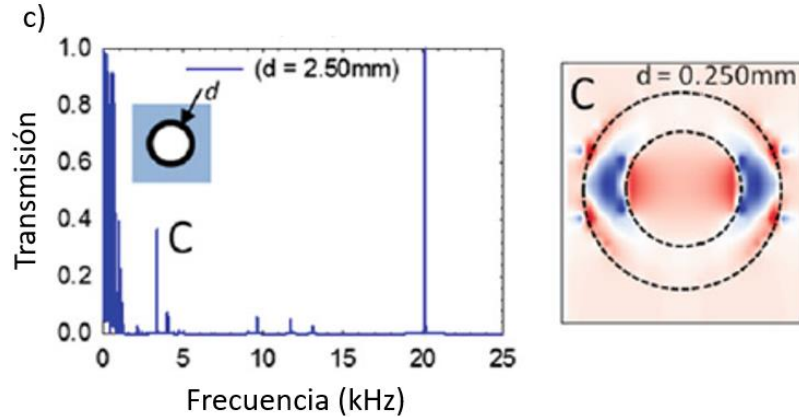


Fig. 8 Coeficientes de transmisión para tres valores de espesor del polímero: (a) $d=0$, (b) $d=1.25\text{ mm}$ y (c) $d=2.5\text{ mm}$. El parámetro de red es $a=20\text{ mm}$ y el radio interno del tubo (cilindro de aire) es 5 mm . Los mapas de campo desplazamiento a la derecha de cada diagrama corresponden al ejemplo de los picos transmitidos.

En la figura 1.8-a se ilustra el coeficiente de transmisión para un arreglo cuadrado de cilindros de aire en un fondo agua para un factor de relleno $\beta=20\%$. El parámetro de red es $a=20\text{ mm}$ en un rango de frecuencia debajo del intervalo audible. Se puede observar un bandgap grande que se extiende desde los 0.5 hasta los 20 kHz, seguido de un pico agudo. Por lo tanto este sistema tiene la propiedad de impedir la propagación del sonido en un dominio de frecuencia grande, siendo el periodo del cristal sonoro mucho más pequeño que la longitud de onda acústica en el aire. El pico A, a 20 kHz corresponde al modo localizado dentro del cilindro de aire, como se ve en la Figura 1.8 [18].

Ahora se considera un sistema más práctico con cilindros de aire rodeados por una capa delgada de un polímero, inmersos en agua. En ese trabajo, se realizaron los cálculos de los espectros de transmisión para diferentes grosores de

la capa del polímero, como puede verse en las Figuras 1.8-b y c. Las constantes de densidad y elasticidad de los dos materiales se muestran en la tabla 3.

Material	ρ (kg/m ³)	C_l (m/s)	C_t (m/s)
Polímero Suave	995	1,000	20
Aire	1,000	340	--

Tabla 3 Densidad ρ y velocidad del sonido en el aire y el polímero.

Se demostró que los cilindros huecos hechos de un polímero suave y elástico con aire adentro y dispuesto sobre una rejilla cuadrada en agua puede dar lugar a bandgaps acústicos muy grandes a bajas frecuencias [19].

1.4 Fenómenos observados en cristales fonónicos

1.4.1 Guiado de ondas acústicas

Es posible guiar ondas acústicas si la distancia de separación entre los cilindros dispersores conformando al cristal es modificado, o si se modifica el número de estos, removiendo uno o más cilindros, como se muestra en la Figura 1.9.

La existencia de *bandgaps* en cristales fonónicos puede ser de gran utilidad para funciones como el guiado de ondas y el filtrado en estructuras integradas. La capacidad de adaptar las propiedades acústicas a los cristales fonónicos y más específicamente de sus guías de ondas los hace particularmente adecuados para una alta gama de aplicaciones, desde tecnología de transductores hasta el filtrado y la guía de ondas acústicas

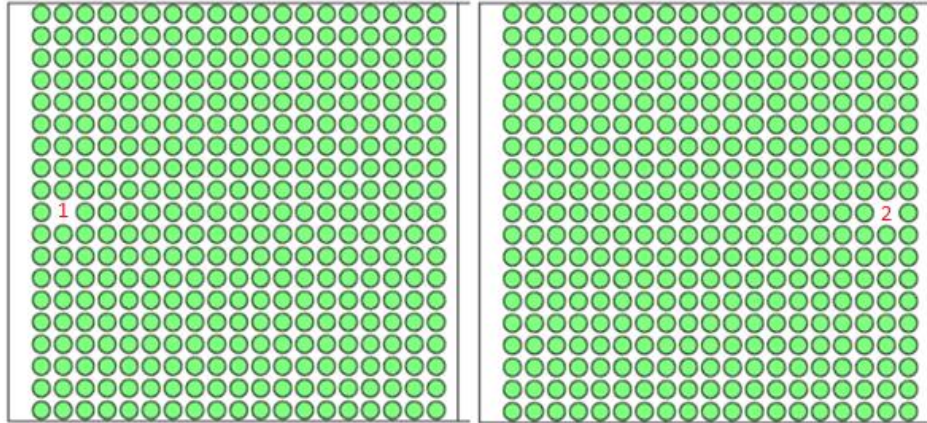


Fig. 1.9 Diseño de cristales fonónicos, se muestra un arreglo de 19x19 cilindros de acero inmersos en agua (círculos verdes). Los espacios en blanco 1 y 2 son los defectos del cristal, es decir se eliminaron esos cilindros de acero para modificar la banda de transmisión.

A continuación, se describe un ejemplo que muestra el guiado de ondas acústicas. Como una estructura básica, se consideró un cristal fonónico mixto, sólido-fluido, bidimensional. Constituido por cilindros de acero inmersos en una matriz de agua. Estas inclusiones tuvieron un arreglo periódico en un enrejado cuadrado con un parámetro de red $a=3$ mm y un radio $r= 1.25$ mm resultando en un factor de relleno $\beta= 0.55$. Esto asegura que el cristal fonónico muestra un bandgap absoluto de tipo Bragg en la gama de ultrasonidos que se extiende desde los 250 hasta los 325 kHz. Se investigó, primero, las propiedades del cristal fonónico que contenía una guía de onda recta obtenida al quitar una fila de cilindros a lo largo de la dirección de propagación. Y se calculó la transmisión a través de la guía como una función de frecuencia Figura 1.10. El mapa del campo de desplazamiento correspondiente a la frecuencia 290 kHz muestra que la transmisión puede estar asociada con un alto confinamiento del campo dentro de la guía de ondas.

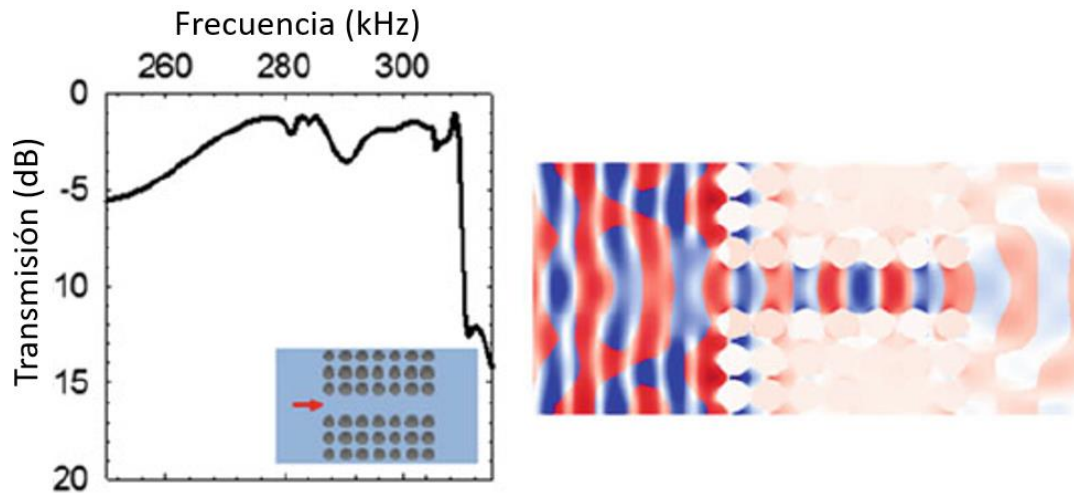


Fig. 1.10 Derecha: espectro de transmisión calculado en el intervalo de frecuencias del bandgap y campos de desplazamiento en $f=290$ kHz a través de una guía de ondas recta; Izquierda: mapa de presiones donde se puede observar la transmisión y disipación de energía acústica. Adaptado de [20]

Se puede demostrar la flexión de la onda acústica construida por la eliminación de los dispersores en un amplio rango de frecuencias dentro del *bandgap* absoluto del cristal fonónico perfecto [20]. En la Figura 1.11 se muestra la curva de transmisión obtenida a través de la guía de ondas que forma el ángulo agudo. También se puede demostrar la flexión de la onda acústica construida por la eliminación de los dispersores en una amplia gama de frecuencias dentro de la brecha de banda absoluta del cristal fonónico perfecto [20].

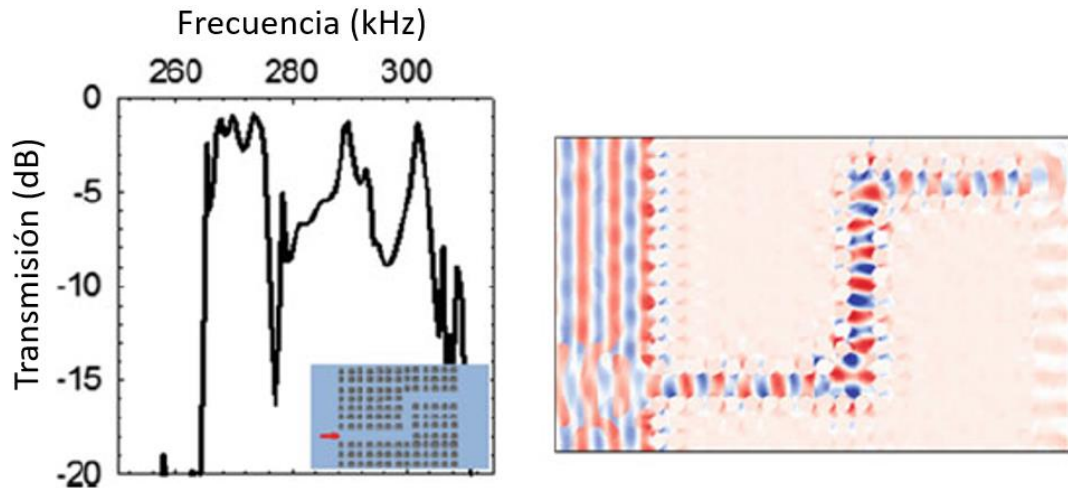


Fig. 1.11 Espectro de transmisión calculado en el intervalo de frecuencias del bandgap y campos de desplazamiento en $f=290$ kHz a través de una guía de ondas curvada. Adaptado de [20].

Citando un segundo ejemplo; se ha reportado el guiado de ondas utilizando cristales fonónicos, a partir de un arreglo bidimensional de cilindros sólidos de acero sumergidos periódicamente en agua (Figura 1.12), la guía de onda se constituyó por una línea de cilindros de acero huecos colocados a través del eje “Y”. Los cilindros huecos, además, tuvieron diferentes radios alternando la configuración de los cilindros [8]. Tal configuración mostró ser útil para el guiado de ondas de 161 o 194 kHz, dependiendo del diámetro interno de los cilindros huecos. Así mismo, cambiando la naturaleza del líquido con el que se llenan los cilindros huecos, por ejemplo, sustituyendo el agua dentro de los cilindros con mercurio para frecuencias de 154 a 139 kHz [16].

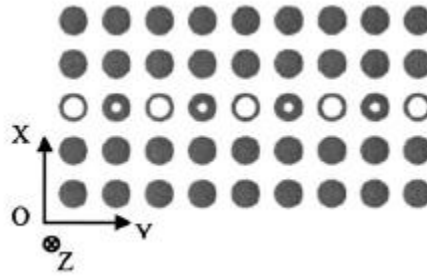


Fig. 1.12 Vista esquemática de un cristal fonónico con una guía de onda compuesta por cilindros macizos de acero. [8]

1.4.2 Filtrado de ondas acústicas

Otro de los fenómenos observados en cristales fonónicos, es el filtrado de ondas acústicas. Particularmente, se describe dicho fenómeno a partir del análisis del comportamiento de un cristal fonónico en el que se introduce un defecto dentro de una guía de ondas, como puede apreciarse en la Figura 1.13. El defecto funciona como una cavidad resonante de longitud igual al periodo, que se obtiene removiendo una inclusión cilíndrica unida a la guía de onda.

La presencia del defecto no altera considerablemente las propiedades de transmisión a través de la guía de onda. Sin embargo, se puede observar un pico de transmisión angosto que aparece aproximadamente a 290 kHz. Dicho pico, originalmente no aparecía en el espectro de transmisión de la guía de onda asociada, por lo que se asume que el defecto filtra la onda ultrasónica de la frecuencia mencionada. En el lado izquierdo de la Figura 13-a, se presenta distribución de energía en el arreglo fonónico.

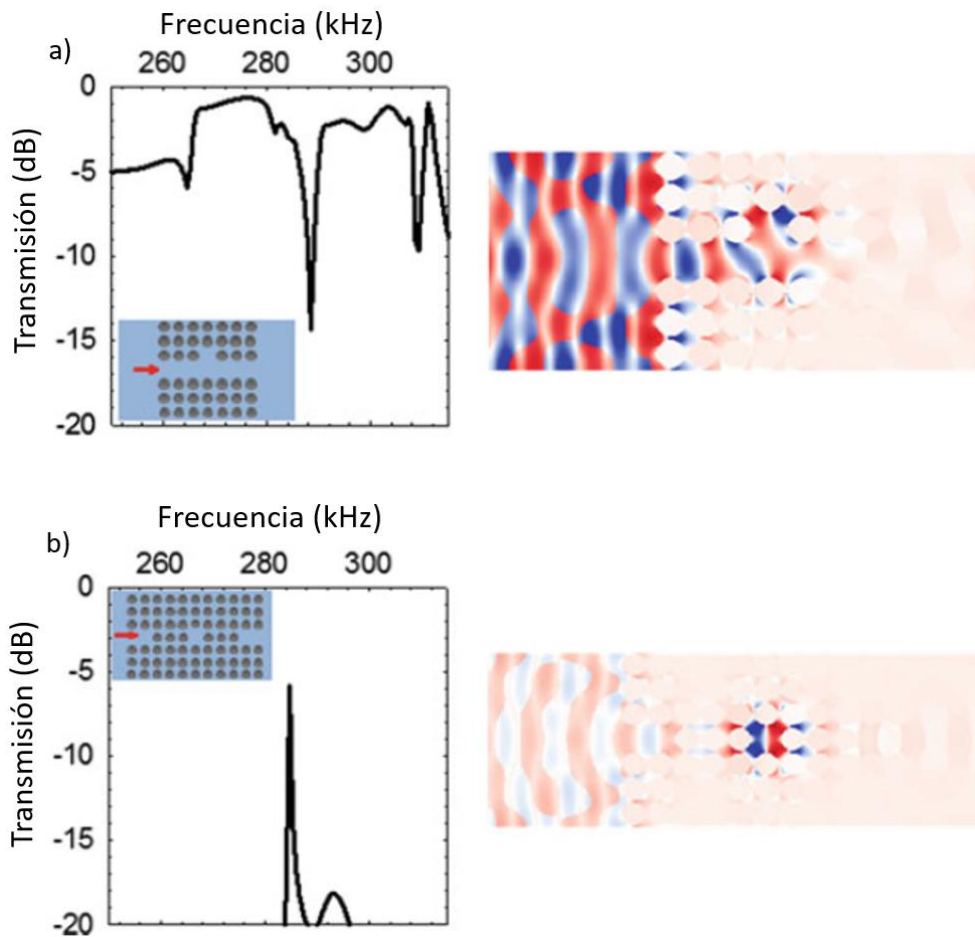


Fig. 1.13-a Espectros de transmisión calculados cuando se inserta una cavidad a un lado de la guía. 13-b Espectros de transmisión calculados cuando se inserta una cavidad dentro de la guía de onda. Adaptado de [20]

En la Figura 1.13-b, se muestra la misma cavidad dentro de la guía de onda. Sin embargo, a esta cavidad le anteceden tres cilindros de acero y le siguen otros tres, es decir, se forma una cavidad resonante. El espectro de transmisión muestra un pico que se produce a la frecuencia de resonancia de la cavidad, aproximadamente a la misma frecuencia que en el caso anterior, 290 kHz. Dicho pico de transmisión se debe a un acoplamiento entre los modos de cavidad y las guías de onda, debido a los efectos de tunelaje.

1.4.3 Demultiplexado de ondas acústicas

Uno de los fenómenos de gran interés en el diseño de cristales fonónicos, es el demultiplexado de ondas acústicas, que consiste esencialmente en separar la onda en dos ramas para después recuperarlas o no.

Para ello discutiremos las propiedades del demultiplexado en un cristal fonónico con arreglo en Y, constituido por cilindros huecos. La geometría se puede observar en la Figura 1.14. Esta guía de onda se alterará modificando los radios de los cilindros, $r_1=1.2$ mm y $r_2=1.0$ mm, se seleccionan dos frecuencias para el punto de entrada. Estas frecuencias corresponden a los dos anchos de banda de las guías de onda, la guía de onda se divide, entonces, en dos brechas. Cada brecha está constituida por cilindros huecos diseñados para la propagación de ondas de una sola frecuencia correspondiente a un ancho de banda en específico. Se calcula las señales transmitidas en la salida de cada brecha en el arreglo en Y. En la Figura 1.15 se muestra el espectro de transmisión calculado de las señales de salida a las dos brechas. El espectro claramente muestra la superposición de las ondas soportadas por la unión de las guías de ondas que son separadas y dirigidas hacia las dos brechas que forman la Y. La gráfica del campo de desplazamiento se representa en la Figura 1.15 para las dos frecuencias consideradas: 161 y 194 kHz [16].

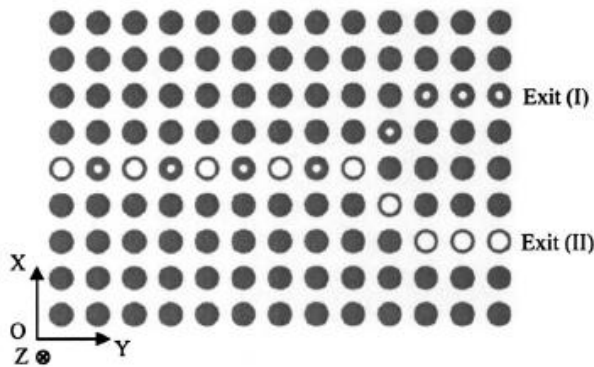


Fig. 1.14 Esquema de una guía de ondas en

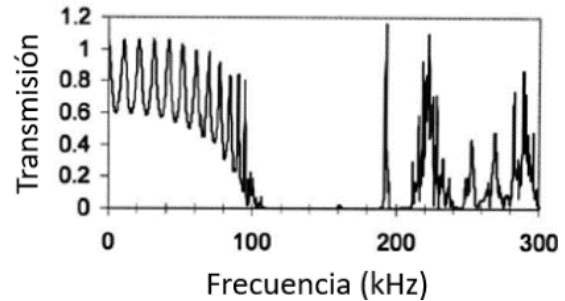
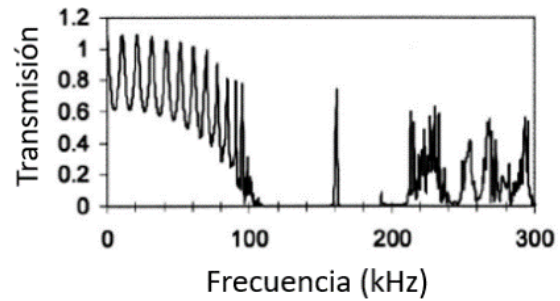


Fig. 1.15 Espectro de transmisión cuando el detector está en la salida.

1.5 Aplicaciones

Los cristales fonónicos han sido propuestos para diversos usos, por ejemplo, como aislantes, espejos acústicos perfectos, supresores de sonido o mediante la introducción de defectos, como resonadores, cavidades o guías de onda elástica. Los cristales fonónicos en el rango de megahertz (MHz) son útiles para aplicaciones de ultrasonido biomédico o microscopía acústica [21].

Se ha mostrado la posibilidad de seleccionar vibraciones u ondas con ciertas frecuencias para permitir su transmisión a través de un cristal fonónico; esto es que existe la posibilidad de atenuar, enfocar, colimar, filtrar y guiar ondas de frecuencia específica [22]. El guiado de ondas utilizando cristales fonónicos, por ejemplo, ha permitido la construcción de sistemas acústicos con alto factor de

calidad (Q-factor) [22], (el cual es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva almacenada y la disipada durante el ciclo completo de una señal. Un alto factor Q indica una tasa baja de pérdida de energía en relación con la almacenada), sistemas para el demultiplexado [23], entre otros.

Referencias.

- [1] C. Fenzl, T. Hirsch, O. S. Wolfbeis; Photonic Crystals for Chemical Sensing and Biosensing; *Angew. Chem. Int. Ed.* 53, (2014) 3318 – 3335.
- [2] M. H. Lu, L. Feng, Y. F. Chen; Phononic crystals and acoustic metamaterials; *Materials Today* 12, (2009) 34–42.
- [3] D. Torrent, J. Sánchez-Dehesa; Acoustic metamaterials for new two-dimensional sonic devices; *New Journal of Physics* 9 (2007) 323-
- [4] Taras Gorishnyy, Martin Maldovan, Chaitanya Ullal and Edwin Thomas; Sound ideas. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, US, e-mail elt@mit.edu
- [5] M. Sigalas, M. S. Kushwaha, E. N. Economou, M. Kafesaki, I. E. Psarobas, W. Steurer; Classical vibrational modes in phononic lattices: theory and experiment; *Z. Kristallogr.* 220 (2005) 765–809.
- [6] I.E. Psarobas, A. Modinos, R. Sainidou, N. Stefanou, Acoustic properties of colloidal crystals. *Phys. Rev. B* 65, 064307 (2002)
- [7] R. Sainidou, N. Stefanou, A. Modinos, Formation of absolute frequency gaps in threedimensional solid phononic crystals. *Phys. Rev. B* 66, 212301 (2002)
- [8] M.M. Sigalas, E.N. Economou, Band structure of elastic waves in two dimensional systems. *Solid State Commun.* 86, 141 (1993)
- [9] J.O. Vasseur, B. Djafari-Rouhani, L. Dobrzynski, M.S. Kushwaha, P. Halevi, Complete acoustic bandgaps in periodic fibre reinforced compositematerials: the carbon/epoxy and some metallic systems. *J. Phys.: Condens. Matter* 7, 8759–8770 (1994)
- [10] J.O. Vasseur, P.A. Deymier, G. Frantzikonis, G. Hong, B. Djafari Rouhani, L. Dobrzyński, Experimental evidence for the existence of absolute acoustic bandgaps in two-dimensional periodic composite media. *J. Phys.: Condens. Matter* 10, 6051 (1998)

- [11] F.R. Montero de Espinosa, E. Jimenez, M. Torres, Ultrasonic bandgap in a periodic twodimensional composite. *Phys. Rev. Lett.* 80, 1208 (1998)
- [12] M.M. Sigalas, E.N. Economou, Elastic and acoustic wave band structure. *J. Sound Vib.* 158, 377 (1992)
- [13] M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, Acoustic band structure of periodic elastic composites. *Phys. Rev. Lett.* 71, 2022 (1993)
- [14] M.M. Sigalas, E.N. Economou, Attenuation of multiple-scattered sound. *Europhys. Lett.* 36,241 (1996)
- [15] A. Khelif, B. Djafari-Rouhani, V. Laude, M. Solal, Coupling characteristics of localized phonons in photonic crystal fibers. *J. Appl. Phys.* 94, 7944–7946 (2003)
- [16] Y. Pennec, B. Djafari-Rouhani, J. Vasseur, P.A. Deymier, A. Khelif, Tunable filtering and demultiplexing in phononic crystals with hollow cylinders. *Phys. Rev. E* 69, 046608 (2004)
- [17] J.V. Sanchez-Pérez, D. Caballero, R. Martínez-Sala, C. Rubio, J. Sánchez-Dehesa, F. Meseguer, J. Llinares, F. Gálvez, Sound attenuation by a two-dimensional array of rigid cylinders. *Phys. Rev. Lett.* 80, 5325 (1998)
- [18] M.S. Kushwaha, B. Djafari-Rouhani, Giant sonic stop bands in two-dimensional periodic system of fluids. *J. Appl. Phys.* 84, 4677 (1998)
- [19] P. Lambin, A. Khelif, J.O. Vasseur, L. Dobrzynski, B. Djafari-Rouhani, Stopping of acoustic waves by sonic polymer-fluid composites. *Phys. Rev. E* 63, 066605 (2001)
- [20] A. Khelif, A. Choujaa, S. Benchabane, B. Djafari-Rouhani, V. Laude, Guiding and bending of acoustic waves in highly confined phononic crystal waveguides. *Appl. Phys. Lett.* 84, 4400 (2004)
- [21] R. H. Olsson and I. El-Kady, *Measurement Science and Technology* 20, 012002 (2009).
- [22] W. Kuang, Z. Hou, Y. Liu; The effects of shapes and symmetries of scatters on the phononic bandgap in 2D phononic crystals; *Physics Letters A* 332, (2004) 481-490.
- [23] O. Matar, J. F. Robillard, J. O. Vasseur, A. C. Hladky-Hennion, P. A. Deymier, P. Pernod, V. Preobrazhensky; Bandgap tunability of magneto-elastic phononic crystal; *J. of App. Phys. Lett.* 111, (201) 054901.

Capítulo 2:

COMSOL MULTIPHYSICS

En el presente capítulo se describen algunos detalles de la plataforma COMSOL Multiphysics, herramienta de cómputo que se utilizó para la simulación de las propiedades acústicas de cristales fonónicos de la presente tesis. Se hablará de sus características, interfaz gráfica, módulos y usos, así como la descripción de los pasos a seguir para simular cristales fonónicos.

2.1 ¿Qué es COMSOL Multiphysics?

COMSOL Multiphysics es una plataforma de software basado en métodos numéricos avanzados para el modelado y simulación de problemas fundados en la física [24]. COMSOL está conformado por una gran cantidad de funcionalidades para el modelado de la física, incluida la multifísica. Alguno de los módulos que contiene son:

- AC/DC Module
- Acoustics Module
- Batteries & Fuel Cells Module
- CAD Import Module
- CFD Module
- Chemical Reaction Engineering Module
- Corrosion Module
- ECAD Import Module
- Electrochemistry Module
- Electrodeposition Module
- Fatigue Module
- File Import for CATIA v5
- Geomechanics Module
- Heat Transfer Module
- LiveLink for AutoCAD
- LiveLink for Creo Parametric
- LiveLink for Excel
- LiveLink for Inventor
- LiveLink for MATLAB
- LiveLink for Pro/Engineer
- LiveLink for Solid Edge

- LiveLink for SolidWorks
- LiveLink for SpaceClaim
- Material Library
- MEMS Module
- Microfluidics Module
- Optimization Module
- Particle Tracing Module
- Pipe Flow Module
- Plasma Module
- RF Module
- Molecular Flow Module
- Multibody Dynamics Module
- Nonlinear Structural Materials Module
- Semiconductor Module
- Structural Mechanics Module
- Subsurface Flow Module
- Wave Optics Module

En las figuras 2.1 y 2.2 se muestran unos ejemplos de lo que es posible realizar con la plataforma COMSOL *Multiphysics* utilizando los módulos de Óptica (*Wave Optics Module*) Fig. 2.1 y *AC/DC Module* Fig. 2.2.

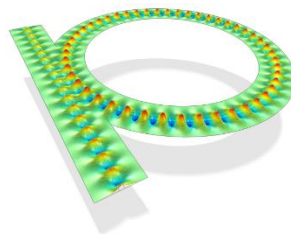


Fig. 2.1 Dispositivos ópticos. Guía de ondas ópticas, una onda se propaga alrededor de un anillo e interfiere con una onda que se propaga en una guía de onda recta. La condición de contorno de continuidad de campo se utiliza para hacer que el campo sea continuo en un límite con una fase discontinua.

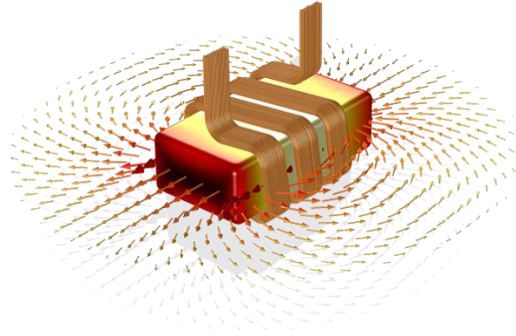


Fig. 2.2 MODELACIÓN DE UNA BOBINA: El modelo muestra una bobina de 50 Hz enrollando un núcleo ferromagnético. La geometría compleja del devanado de la bobina se puede modelar fácilmente usando una característica de la bobina del multitoro. La visualización muestra la densidad de flujo magnético (diagrama de flecha) y la norma de densidad de flujo magnético en el núcleo ferromagnético.

Para el desarrollo de la presente tesis el módulo que será utilizado es el *Acoustics Module*, por lo que se hará una descripción general al respecto. Este módulo está diseñado para la medición, producción y utilización de ondas acústicas; por ejemplo, en micrófonos, bocinas, audífonos, entre otros. Se proporciona una interfaz con herramientas para el modelado de la propagación de ondas de presión acústica en el aire, agua y otros líquidos; así como herramientas para modelar vibraciones y ondas elásticas en sólidos y otros. Las simulaciones en una, dos o tres dimensiones permiten comprender mejor los problemas difíciles de manipular experimentalmente y probar los diseños antes de construirlos [25]. La figura 2.3 muestra una simulación acústica, creada en COMSOL *Multiphysics*, utilizando el módulo de acústica (*Acoustics Module*)

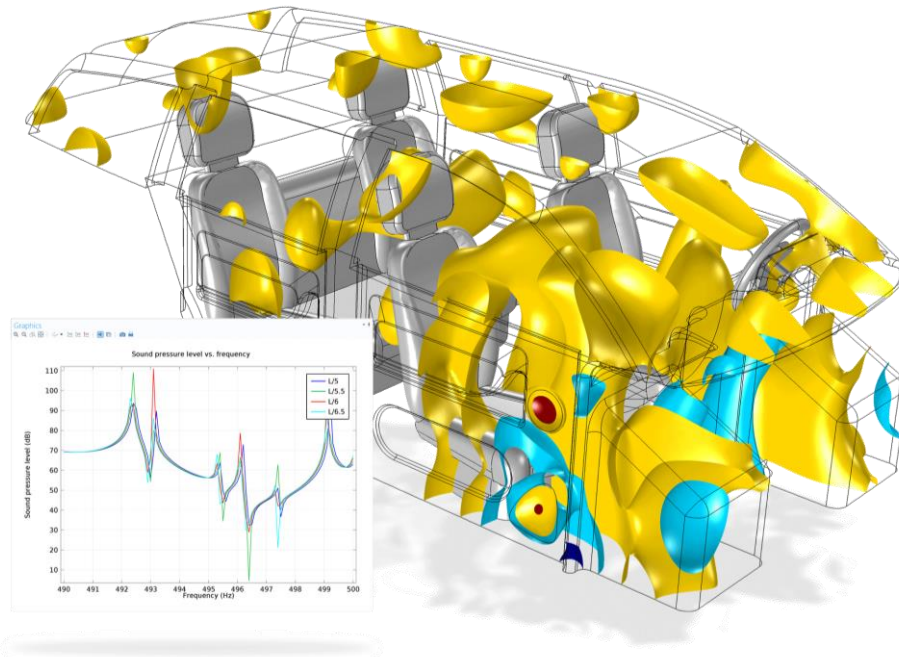


Fig. 2.3 Simulación de la acústica dentro de un Sedán, incluyendo fuentes de sonido en las ubicaciones del altavoz.

En la Figura 2.4 [26] se puede apreciar la interfaz gráfica de COMSOL *Multiphysics*. Se puede observar la barra de acceso rápido a herramientas (*Quick Access toolbar*) donde se encuentran los botones de acceso y funciones como abrir archivo, guardar archivo, deshacer, rehacer, copiar, pegar y borrar. La barra de herramientas para generar modelos (*Model Builder Toolbar*) junto con *Model Tree* da una visión general del modelo. *Model Tree*, nos da una visión de los modelos y todas las funciones y operaciones necesarias para la construcción y resolución del modelo, así como el procesamiento de los resultados. *Ribbon*, contiene botones y listas desplegables para controlar los pasos del proceso de modelado. *Graphics Window Toolbar*, aquí se hacen presentes gráficas interactivas para la geometría, el mallado y los resultados. Entre las acciones

disponibles en esta área se encuentran la rotación, paneo, el zoom y la selección. Además, es la ventana predeterminada para los resultados y demás visualizaciones. *Information Windows*, muestra información importante durante las simulaciones, así como el tiempo de solución, el progreso, estadísticas del mallado, solución de los registros y, cuando están disponibles, tablas y resultados. *Settings Window*, es la ventana principal y donde se introducirán todas las especificaciones del modelo a desarrollar, como lo son las dimensiones de la geometría, propiedades de los materiales, condiciones iniciales y límites y cualquier otra información necesaria para la solución del modelo.

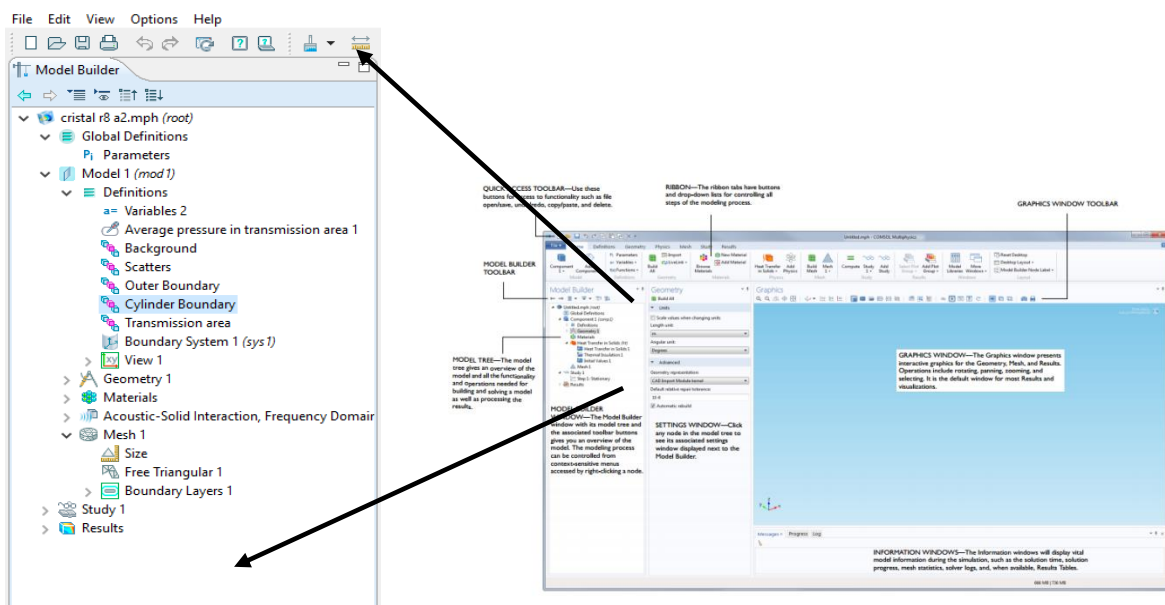


Fig. 2.4 COMSOL Multiphysics Desktop

La Figura 2.4 es lo que el usuario de COMSOL verá la primera vez que ejecute el programa, antes de comenzar a modelar. Cuenta con una interfaz completa para el modelado y simulación física. El usuario puede también configurarlo según sus propias necesidades.

2.2 Acoustic Module

Acoustics Module es una colección de interfaces físicas para COMSOL Multiphysics, adaptado a una amplia categoría de simulaciones acústicas en fluidos y sólidos [25]. El hecho de que permita acoplar una simulación acústica a una simulación arbitraria definida en cualquiera de las interfaces físicas de COMSOL, permite la formación de un poderoso modelo multi-físico capaz de resolver varias ecuaciones simultáneamente. Además de transformar cualquier modelo acústico en un modelo descrito por ecuaciones diferenciales subyacentes, ofreciendo una manera única de ver las leyes de la física subyacentes de una simulación.

Las interfaces que maneja este módulo son la acústica en sólidos y fluidos. En los fluidos, las interfaces soportan análisis transitorios, eigenfrecuencias, dominio de frecuencias, en modos y límites en acústica de presión y aeroacústica en campos de velocidad compresibles e irrotacionales. En los sólidos, las interfaces físicas soportan análisis de respuesta estática, transitoria, eigenfrecuencias y análisis de respuesta de frecuencia. Además, mediante el acoplamiento de fluidos e interfaces de física sólida, se puede resolver problemas relacionados con la interacción entre la estructura acústica.

Todas estas categorías están disponibles en 2 y 3 dimensiones. Para dos dimensiones, el módulo acústico ofrece interfaces físicas en el plano para problemas con una simetría plana, así como problemas con simetría cilíndrica. Además, se puede utilizar las interfaces físicas de acústica fluida con una dimensión y geometrías axisimétricas unidimensionales.

La acústica es el área de la Física encargada de analizar todas las propiedades del sonido y su interacción con otros medios; el sonido, es la sensación de cambios pequeños en la presión del aire que se detectan por medio del oído. El valor de la presión atmosférica es aproximadamente 100,000 Pa. Se dice que una onda sonora es flujo de energía, por lo que, físicamente el sonido en el aire es una onda longitudinal, moviéndose en dirección de propagación de la energía. Las crestas en las ondas representan los puntos máximos de presión, mientras que las depresiones representan la presión mínima.

El sonido es originado cuando la presión del aire se ve perturbada por alguna fuente, por ejemplo, con la vibración de algún objeto, la bocina de algún sistema de audio, por ejemplo.

En COMSOL Multiphysics, el módulo de acústica proporciona interfaces físicas con condiciones de contorno y ejemplos de modelos adjuntos para diferentes tipos de análisis; por ejemplo, dependiendo de la variable dependiente básica utilizada para el modelado del campo acústico, las interfaces se dividen en dos categorías principales:

Presión acústica: La variable dependiente es la presión acústica.

Aeroacústica: La variable dependiente es el potencial, ϕ , la velocidad de la partícula para el campo acústico, $\mathbf{v} = \nabla\phi$. En una situación típica, el fluido se mueve con una velocidad de $\mathbf{v}_{tot} = \mathbf{V} + \mathbf{v}$ donde la velocidad estacionaria de flujo de fondo es \mathbf{V} y \mathbf{v} la velocidad de la partícula asociada a las ondas acústicas.

Un análisis acústico puede también ser categorizado por uno de los siguientes escenarios o problemas principales:

Problemas de radiación: Una estructura vibratoria, un altavoz, por ejemplo, radia sonido a su alrededor. Es necesaria una condición de límite de campo lejano o PML (*Perfect Matched Layer*), para modelar el dominio sin límites.

Problemas de dispersión: Una onda incide un cuerpo y crea una onda de dispersión. Es necesaria una condición de límite de radiación de campo lejano.

Un campo de sonido en un ambiente interior, (una habitación, por ejemplo): Las ondas acústicas permanecen en un volumen finito, no es necesaria ninguna condición de radiación.

El acoplamiento de la interacción de una estructura fluido-elástica (una estructura acústica): Si la estructura de radiación o dispersión consiste en un material elástico, se debe considerar la interacción entre el cuerpo y el fluido que lo rodea.

El problema de la transmisión: Una onda de sonido incidente se propaga en un cuerpo, el cual puede tener diferentes propiedades acústicas. La presión y la aceleración son continuas en los límites.

Problemas de aeroacústica: El sonido es generado por el movimiento de un fluido turbulento o por la interacción de un fluido y una superficie.

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.

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 λ en el espacio, cuyo valor depende de la frecuencia y la velocidad del sonido c en algún medio, de acuerdo con la siguiente ecuación: $\lambda = \frac{c}{f}$. Esta ecuación se resuelve en el mallado.

Para que la solución en la rejilla discreta tenga algún significado tiene que haber 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.

Antes de iniciar un nuevo modelo se debería de calcular el número de grados de libertad utilizando estas reglas. El número máximo de DOFs que puede ser resuelto difiere en los sistemas informáticos. Un sistema de 32 bits puede usualmente resolver desde unos pocos de cientos de miles hasta un millón de DOFs. Incluso para sistemas de 64 bits es difícil de manejar unos cuantos millones de DOFs.

Amortiguación

Los fluidos con viscosidad en masa, en el mismo rango que el aire o el agua, prácticamente no presentan amortiguación interna sobre el número de longitudes de onda que se puedan resolver en computadoras actuales. En su lugar el amortiguamiento toma lugar a través de la interacción con sólidos, ya sea debido a la fricción entre el fluido y un material poroso que llena el dominio o porque la energía acústica se transfiere a un sólido circundante, donde se absorbe.

Límites artificiales

En la mayoría de los casos, el patrón de ondas acústicas que se va a simular 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.

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.

Regiones de campo cercano y 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 desfasan. Esto significa que el campo acústico contiene energía que no viaja hacia afuera o irradia.

Referencias

[24] COMSOL (2016) by COMSOL Inc. COMSOL Multiphysics® The Platform for Physics-Based Modeling and Simulation. Recuperado de: <https://www.COMSOL.com/COMSOL-multiphysics>

[25] COMSOL (2016) by COMSOL Inc. COMSOL Multiphysics® Acoustics Module Software for Acoustics and Vibration Analysis. Recuperado de: <https://www.COMSOL.com/acoustics-module>

[26] COMSOL; Introduction to COMSOL Multiphysics, Version 4.4 © 1998-2014 COMSOL. Pags; 6, 7.

[27] Acoustic Module. User Guide, Version 4.1 © 1998–2010 COMSOL AB.

Capítulo 3:

Detalles de simulación

En el presente capítulo se describen los cristales fonónicos simulados, incluyendo diagramas de éstos para una mejor descripción.

3.1 Detalles de la simulación

Como se definió en el Capítulo 1 de la presente tesis, un cristal fonónico es un arreglo periódico de materiales con diferentes propiedades elásticas que da origen a la formación de bandgaps. Estos dependen de varias características, entre otras, la geometría (radio de los cilindros) y el parámetro de red, que es la distancia que existe entre el centro de los cilindros.

Los modelos de cristales fonónicos diseñados tienen las siguientes características generales: cilindros de acero inmersos en agua, formando así una matriz. Se modificó el radio de los cilindros y su parámetro de red. Para crear las guías de onda se extrajeron uno o varios de estos cilindros en diferentes posiciones, dependiendo de la estructura de interés.

Material	Módulo de Young (N/m ²)	Densidad (kg/m ³)	Velocidad del sonido
Acero	200x10 ⁹	7780	5100 m/s
Agua	2.2x10 ⁹	1000	1480 m/s

Tabla 4 Densidad y constantes elásticas del acero y agua

El primer cristal fonónico modelado estuvo conformado por un arreglo de 20 x 20 cilindros dispuestos cuadráticamente, inmersos en agua. Los cilindros tuvieron un radio de 0.8 mm y un parámetro de red de 2 mm como se muestra en la Figura 3.1.

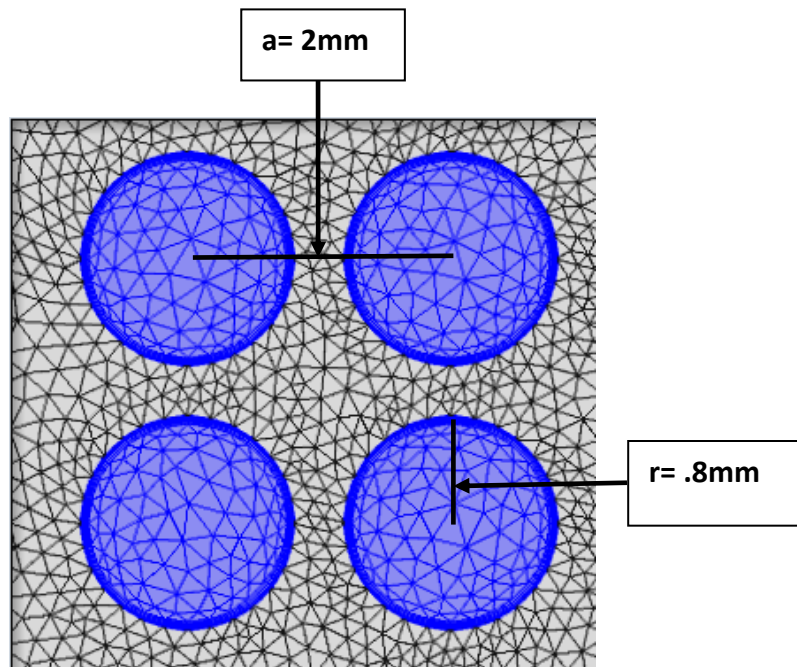


Fig. 3. 1 Arreglo de cilindros (20x20) cuyo radio es $r=.8\text{mm}$ y parámetro de red $a=2.5\text{mm}$

En la subcarpeta *Definitions*, mostrada en la Figura. 3.2, se agregaron las variables utilizadas para la visualización y el análisis de la solución. Se agregaron las constantes físicas y las variables geométricas de los materiales y el cristal. En la subcarpeta *Explicit*, perteneciente a la lista de opciones llamada “Selecciones definidas por el usuario” se delimitan las configuraciones en las geometrías. Es decir, con en esta función se diseñó el arreglo de 20X20 cilindros y se definieron los límites, tanto de los dispersores como de la caja de simulación, como se muestra en la figura 3.3.

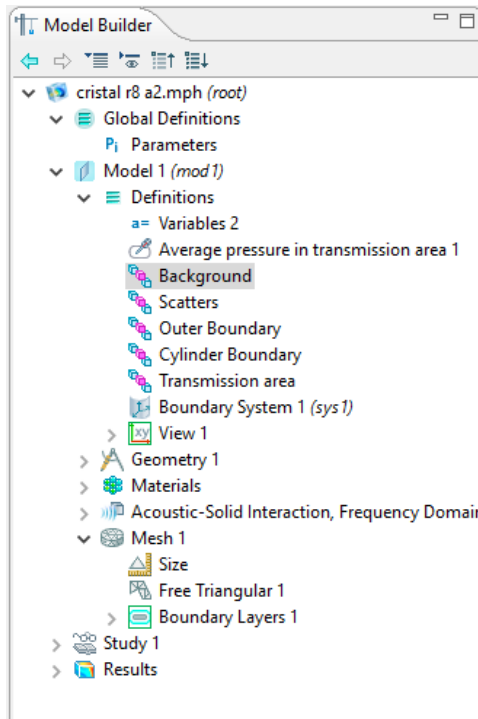


Fig. 3.2 Subcarpeta Definiciones.

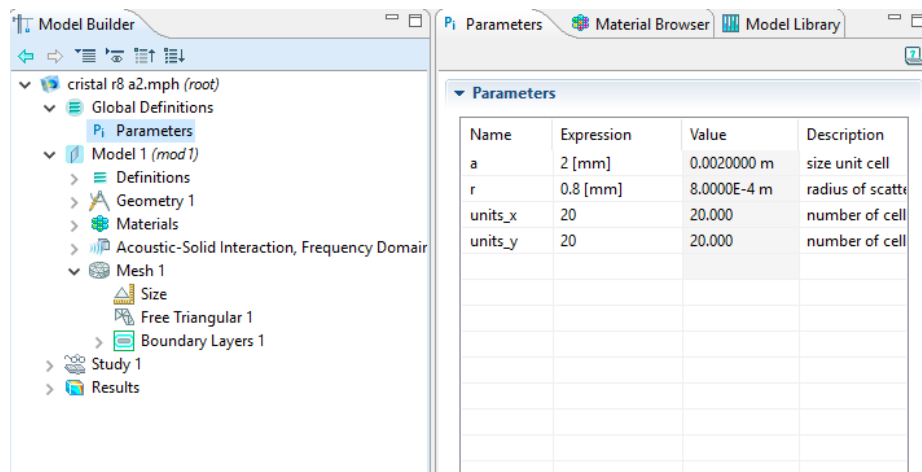


Fig. 3.3 Se dan los parámetros y se definen los límites para el arreglo. La letra a la definimos como el parámetro de red, en este caso se le dio una distancia de 2 mm, mientras que r , el radio de los cilindros es de 0.8 mm. El arreglo consta de 20 x 20 cilindros en x, y .

El apartado *Input Entities* sirve para identificar las partes que serán aisladas dentro de la geometría con la ayuda de los siguientes segmentos. La función *Geometric entity level*, permite elegir la forma en que se dividirá la figura y muestra las opciones *Domain*, *Boundary*, *Edge* y *Point*.

En el navegador de materiales (*Material Browser*), que contiene una lista de materiales que se encuentran distribuidos en los diferentes módulos de COMSOL se agregaron los materiales utilizados en el modelo, agua y acero. En la sección *Material*, que muestra una serie de apartados que permiten realizar ajustes en el material, se definieron los dominios de los cilindros y el material utilizado, como se muestra en la figura 3.4

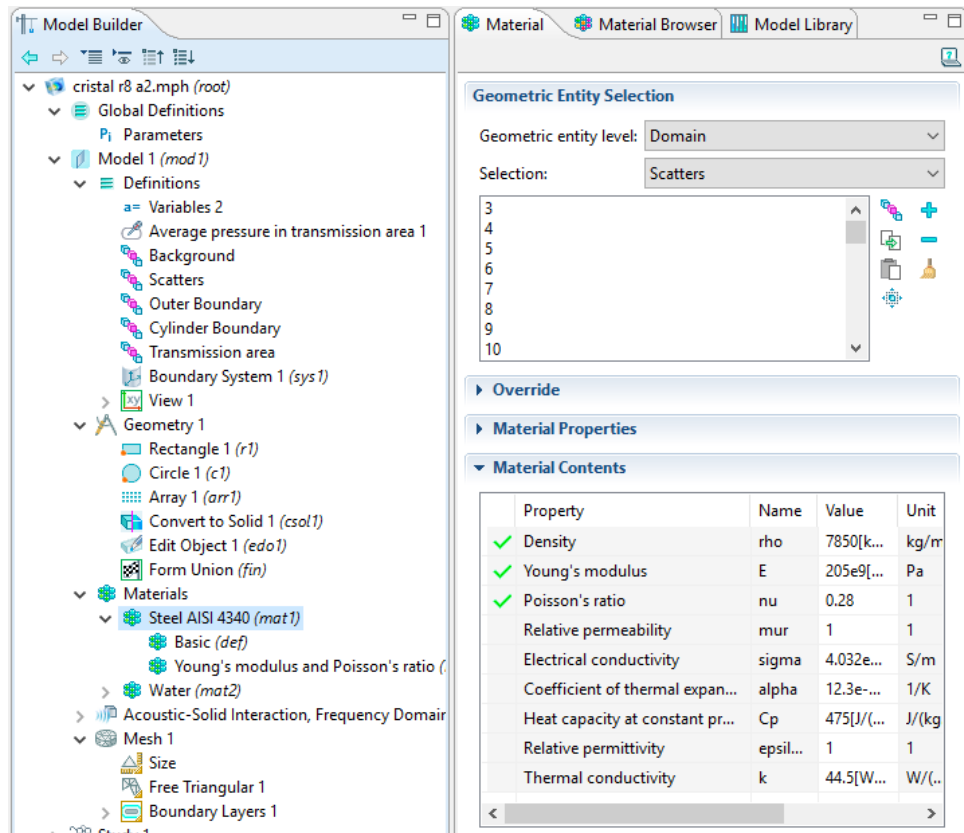


Fig. 3. 4 Pestaña “Material” donde se definen las características geométricas del modelo.

3.2 Mallado

Una vez teniendo definida la geometría y los materiales, se creó una malla en la carpeta *Mesh*; esta carpeta contiene una lista de opciones para seleccionar una técnica de mallado necesario.

El análisis de los elementos finitos proporciona una técnica numérica para analizar el diseño. El método de elementos finitos predice el comportamiento del modelo analizándolo mediante la combinación de la información obtenida a partir de todos los elementos que conforman el modelo. El proceso consiste básicamente en lo siguiente; 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. Este proceso de subdividir el modelo se llama mallado. El mallado genera elementos sólidos tetraédricos para modelos en 3 dimensiones, triangulares para los de dos dimensiones y elementos de viga para modelos en una dimensión. El modelo finalmente quedó como se muestra en la figura 3.5

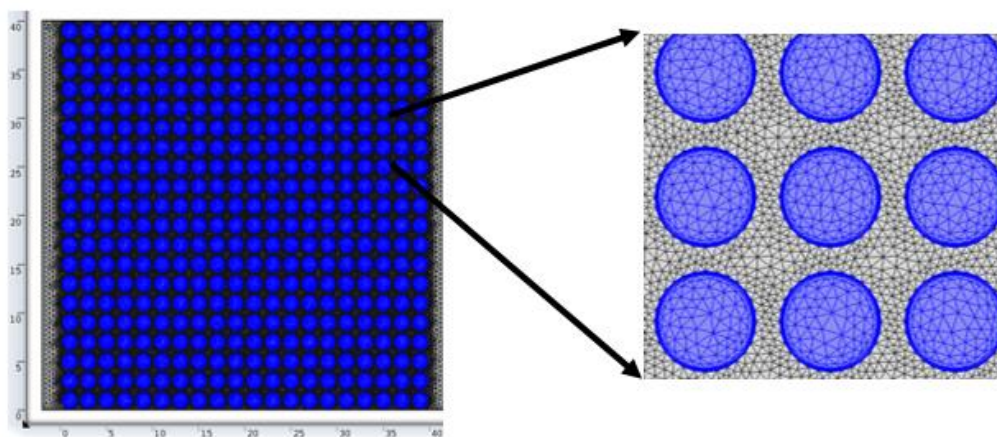


Fig. 3.5 Mallado del arreglo de 20 x 20 cilindros de acero inmersos en agua.

Una vez que se han definido las características del modelo pasamos a la parte final del proceso de simulación, *Study* (Figura 3.6). Esta sección adiciona los cambios realizados y realiza el análisis. Se elige el rango de frecuencias en que quiere analizar la estructura, seleccionando en, características, la opción para que genere una gráfica o gráficas correspondientes a los resultados. Finalmente, si los estudios ya se encuentran definidos se da clic en el icono *Compute*, el cual generará los pasos del estudio correspondientes para generar la solución.

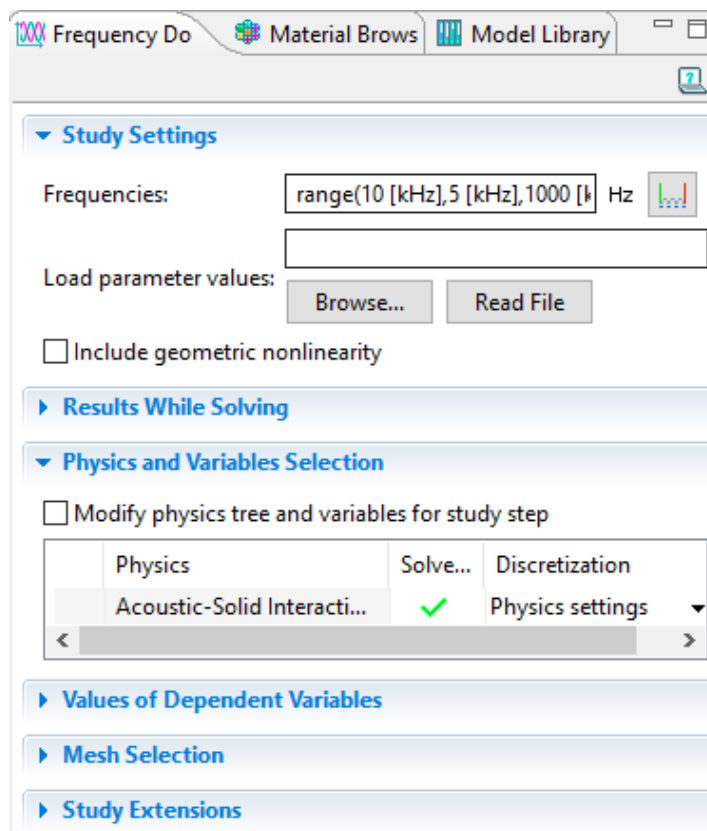


Fig. 3.6 Study. En esta sección se adicionan los cambios realizados y se puede elegir el rango de frecuencias en el que se hará el análisis.

Además del cristal fonónico ya mencionado, se simularon varios cristales más con diferentes características. Principalmente con el fin de crear guías de onda. Los detalles principales se presentan en la Figura 3.7.

Parámetro de red	Radio	Radio	Parámetro de red
2 mm.	.8 mm	0.8 mm.	3 mm.
2.5 mm.	.8 mm	1.2 mm.	3 mm.
3.5 mm.	.8 mm	1.4 mm.	3 mm.
4 mm.	.8 mm	Arreglo de 20 x 20 cilindros de acero inmersos en una matriz de agua.	
Arreglo de 20 x 20 cilindros de acero inmersos en una matriz de agua.			

Fig 3.7. Características de los primeros cristales simulados, donde se modificó el parámetro de red y posteriormente el radio de los cilindros con el fin de observar la posición del bandgap.

Las guías de onda se diseñaron con el cristal con radios de 0.8 mm de radio y 2 mm de parámetro de red. El primer análisis al respecto fue el siguiente. Para mantener una simetría en el cristal, se modificó el número de cilindros, teniendo así una configuración de 19 por 19 cilindros. Las demás características se mantuvieron. El primer cristal con defectos, se diseñó a partir de la eliminación del cilindro central tal como se muestra en la figura 3.8.

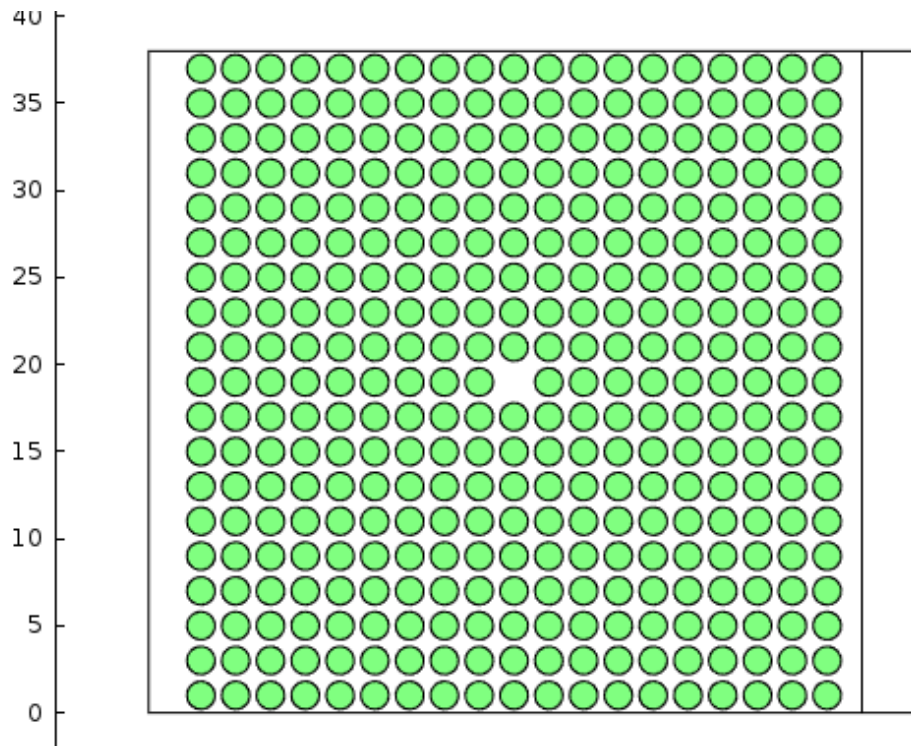


Fig. 3.8 Cristal fonónico de 19 por 19 cilindros de acero inmersos en agua. Con el fin de crear un defecto en el cristal se eliminó el cilindro central.

Posterior a esto, y siguiendo el mismo algoritmo de simulación que para el primer cristal, se diseñaron y simularon 16 cristales más creando diferentes defectos sobre la misma línea tal como se muestra en la figura 3.9. Dicho análisis se llevó a cabo con el objetivo de analizar la posible distribución de energía en el cristal, ante la presencia de un defecto en distintas posiciones.

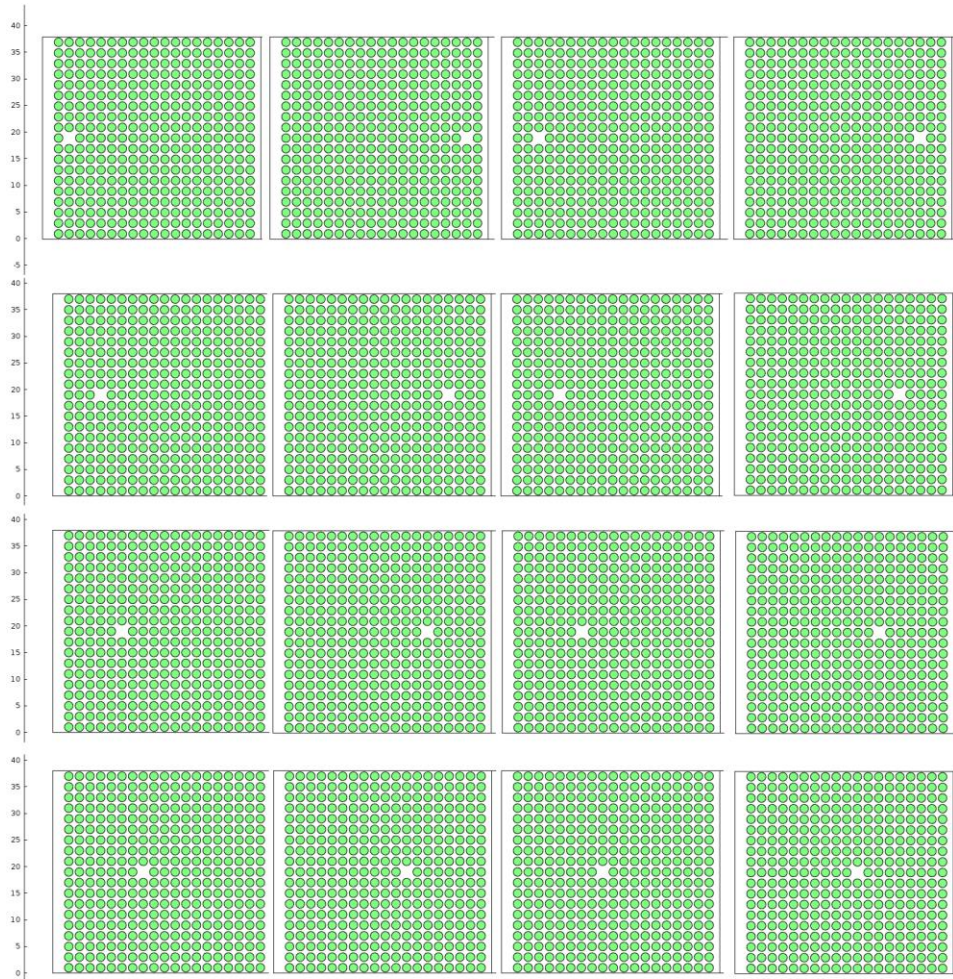


Fig. 3.9 Cristales fonónicos con defectos en diferentes puntos de una misma línea.

Por otra parte, se crearon guías de onda, esto se logró eliminando más de un cilindro en el cristal; la eliminación se hizo de forma consecutiva, hecho que da lugar a la formación de la guía de onda. Geométricamente el cristal se constituyó por un arreglo de 19 por 19 cilindros e intercaladamente se eliminaron cilindros, como se muestra en la figura 3.10.

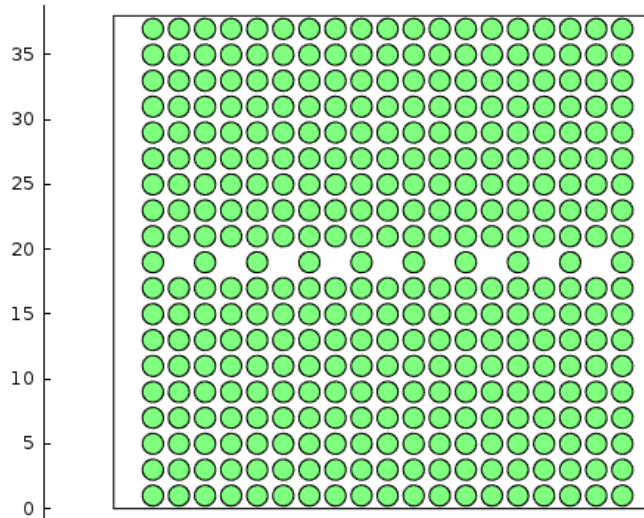


Fig. 3.10 Cristal fonónico con defectos de línea (guías de onda)

De manera similar a lo que se realizó con los defectos, se simularon varios cristales con guías de onda de diferentes características y disposiciones, como las mostradas en las Figuras 3.11, 3.12 y 3.13.

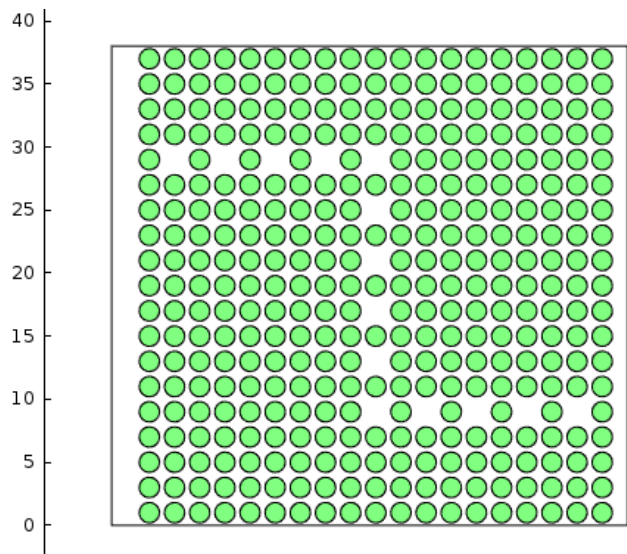


Fig. 3.11 Guía de onda creada por medio de defectos de línea. En este caso la guía ya no es una línea recta, si no que la onda tiene que cambiar de dirección lo que supondrá un cambio notable a la guía anterior.

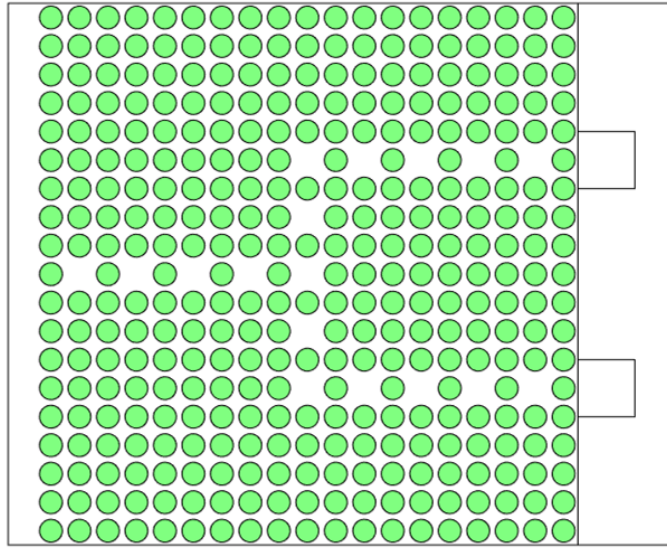


Fig. 3.12. Demultiplexado simétrico.

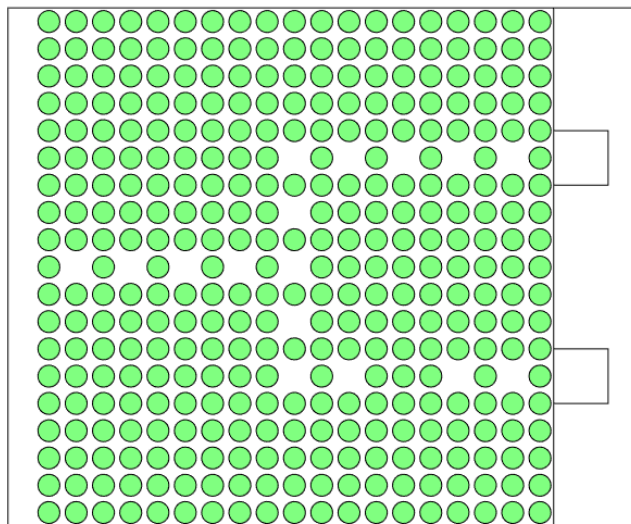


Fig. 3.13. Demultiplexado asimétrico.

La Figura 3.11 representa una guía de onda con ángulos de 90° y fue diseñada con el objetivo de analizar cómo se conducen las ondas de ultrasonido bajo dicha condición. Las Figuras 3.12 y 3.13, muestran un demultiplexor, es una estructura que tiene una entrada y dos salidas, con la característica de que en un

caso, las dos salidas son simétricas, mientras que la otra es asimétrica, hecho que se logra al no extraer un cristal en una de las salidas.

En el siguiente capítulo, se presentan los resultados obtenidos al simular los cristales y guías de onda, descritos en el presente capítulo.

Capítulo 4:

Resultados y Discusión

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados de los cristales y guías de onda diseñados.

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, el objetivo de la presente tesis fue la simulación, el análisis y la discusión de diversos cristales fonónicos y su implementación en el diseño de guías de onda. Los resultados se organizaron de la siguiente manera. Las secciones 4.1 y 4.2 contienen los resultados en los que se analiza el efecto del parámetro de red y el radio de los dispersores, respectivamente, sobre el espectro de transmisión del cristal diseñado. La sección 4.3 contiene los resultados obtenidos en relación del guiado de ondas.

4.1 Efecto del parámetro de red en el espectro de transmisión

Como se mencionó en el capítulo anterior, el efecto del parámetro de red en la transmisión acústica de cristales fonónicos, se analizó al mantener constante el radio de los dispersores, $r=0.8$ mm, variando el parámetro de red: 2 mm, 2.5 mm, 3.5 y 4 mm. Todos los cristales estuvieron conformados por un arreglo de 20 x 20 cilindros de acero, inmersos en una matriz de agua. La Figura 4.1 muestra el arreglo típico del cristal simulado.

De acuerdo con la expresión para la fracción de llenado $f = \pi(r^2 \cdot a^{-2})$, donde r y a son el radio de los dispersores y el parámetro de red, respectivamente [1]; al usar los datos de simulación, para el primer cristal, en el que r y a son 0.8 mm y 2 mm, respectivamente, la fracción de llenado es $f = 0.502$. En los casos en que los parámetros de red fueron $a = 2.5$ mm, $a = 3.5$ mm o $a = 4.0$ mm, las

fracciones de llenado obtenidas son, respectivamente, $f = 0.321$, $f = 0.164$ y $f = 0.125$. Cabe destacar que una de las formas de controlar el bandgap en un cristal fonónico, es modificar la fracción de llenado, efecto puede lograrse, entre otros, mediante el análisis realizado aquí.

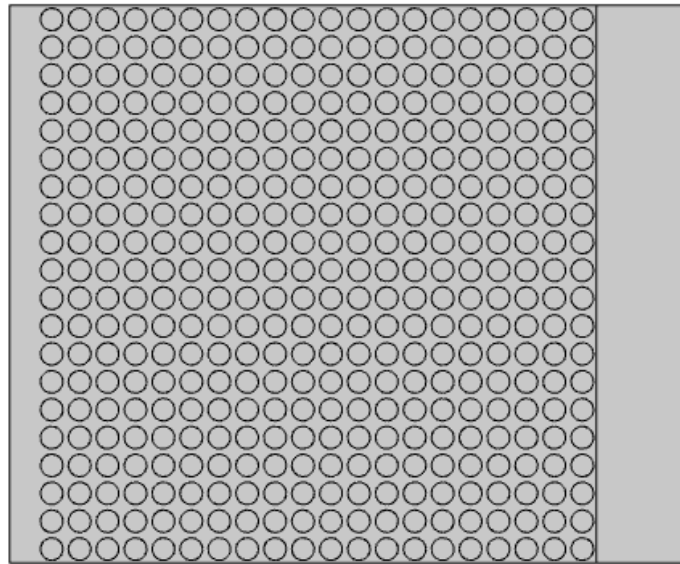


Fig. 4.1 Diseño de un Cristal fonónico constituido por un arreglo de 20 x 20 cilindros de acero de 0.8 mm de radio y un parámetro de red (distancia de separación entre dos centros de las circunferencias) $a= 2$ mm.

La Figura 4.2 muestra la gráfica correspondiente al espectro de transmisión del cristal fonónico con un parámetro de red de 2 mm, el cual fue obtenido entre 20 y 600 kHz. Puede observarse, por un lado, que el cristal presenta transmisión máxima en dos intervalos de frecuencia, el primero, se localiza entre 20 y 220 kHz, mientras que el segundo se ubica entre 480 y 600 kHz; en la literatura, dichas regiones se conocen como bandas de transmisión propias del cristal [2]. Por otro lado, puede observarse que la potencia transmitida disminuye paulatinamente de

120 decibeles a 20 decibeles entre 220 y 380 kHz e, interesantemente, que la transmisión entre 380 y 480 kHz, se reduce considerablemente, siendo 0 (incluso negativo) entre 385 y 460 kHz, región que puede identificarse como el bandgap completo del cristal, mientras que la región entre 220 y 380/5 kHz, hace alusión a lo que en la literatura se conoce como bandgap incompleto.

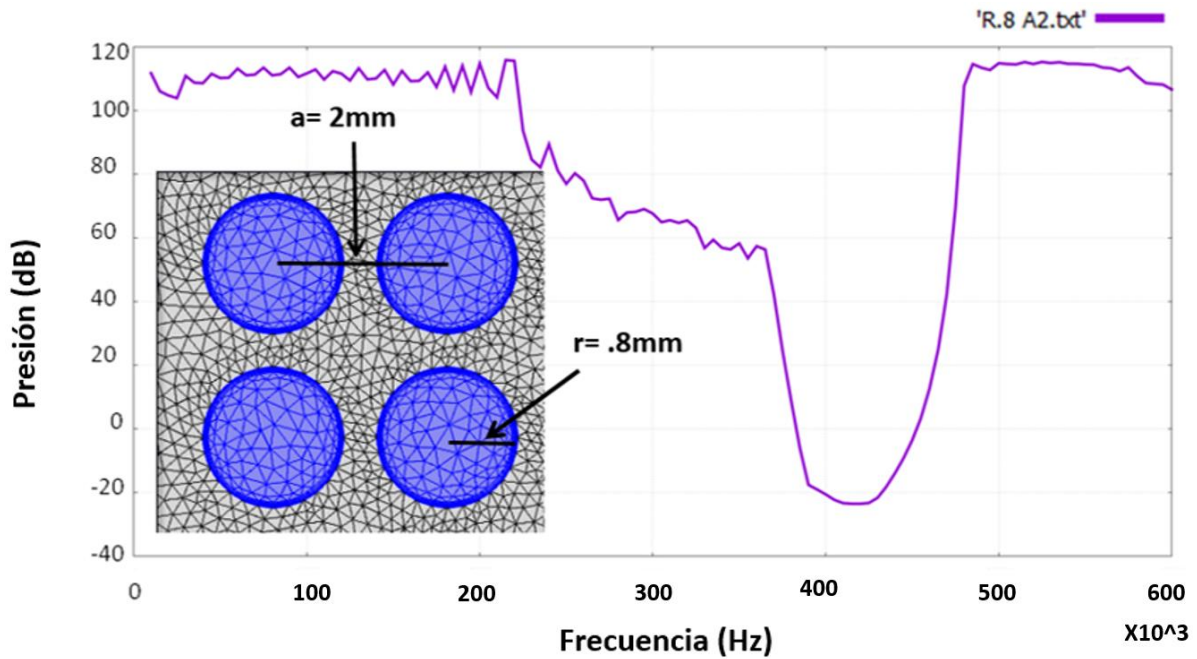


Figura 4.2 Espectro de transmisión para un arreglo de 20 x 20 cilindros de acero inmersos en una matriz de agua. El radio de los cilindros es de 0.8 mm y dispuestos periódicamente a 2 mm de transmisión.

En la figura 4.3 se muestra la gráfica que corresponde al espectro de transmisión de un cristal cuyo parámetro de red es 2.5 mm. Para su análisis se obtuvo la gráfica dentro del rango de 20 kHz a 400 kHz. De manera similar al caso anterior, se observa que el cristal presenta bandas de transmisión en dos regiones; la primera, en este caso se encuentra entre las frecuencias 20 kHz y 200

kHz, mientras que la segunda entre 360 kHz y 600 kHz y por tanto, la presencia de la banda prohibida en las frecuencias de 200 kHz a 360 kHz.

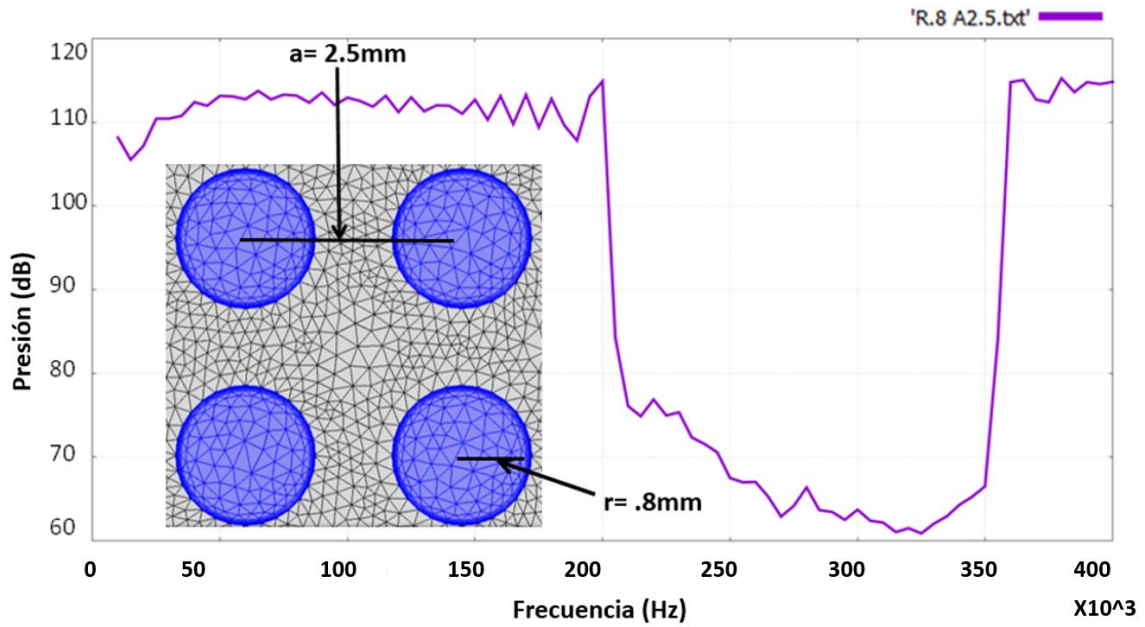


Fig. 4.3 Espectro de transmisión para un cristal fonónico constituido por un arreglo de 20 x 20 cilindros de acero inmersos en agua. Radio de los cilindros: 0.8 mm. Parámetro de red: 2.5 mm.

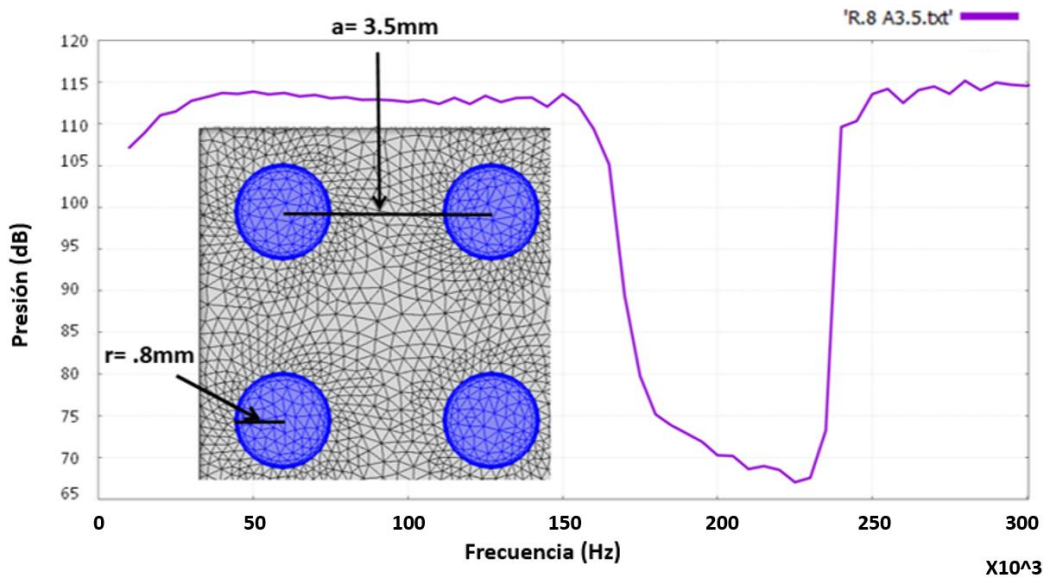


Figura 4.4 Espectro de transmisión de un cristal fonónico, radio de los cilindros: 0.8 mm, parámetro de red: 3.5 mm.

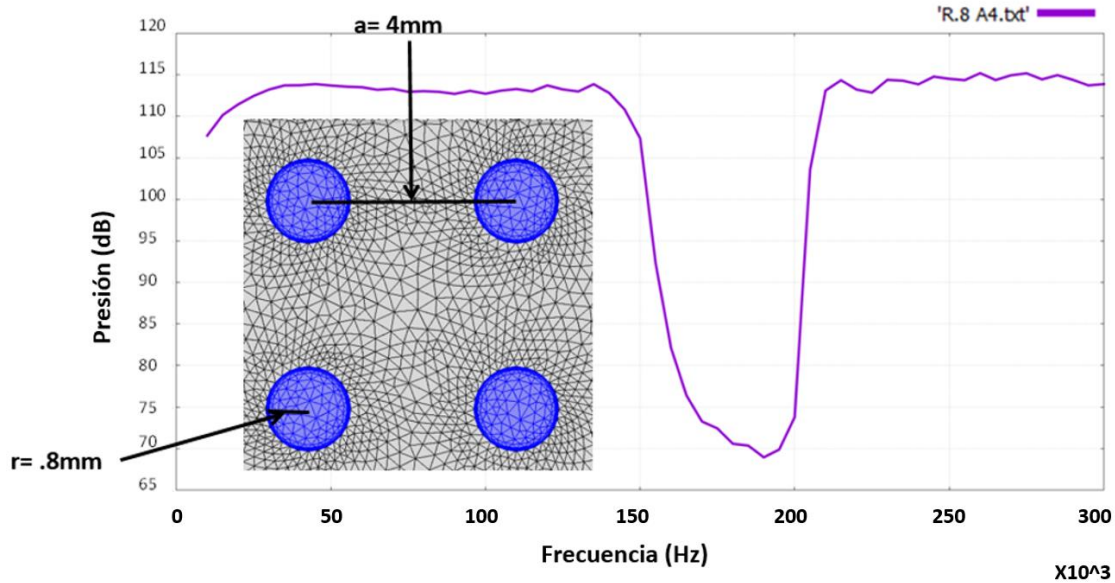


Figura 4.5 Espectro de transmisión de un cristal fonónico. Radio de los cilindros: 0.8 mm, parámetro de red: 4 mm.

Las figuras 4.4 y 4.5 muestran los espectros de transmisión de los cristales cuyo parámetro de red es 3.5 mm y 4 mm, respectivamente. En ambos casos el análisis se hizo 20 a 300 kHz. Como puede observarse en la Figura 4.4, la banda prohibida se localiza entre 160 kHz y 240 kHz, mientras que la transmisión máxima se divide de igual forma en dos regiones de frecuencias, la primera entre 20 y 150 kHz y la segunda va de 240 a 300 kHz. El espectro de transmisión del cristal mostrado en la Figura 4.5, cuyo parámetro de red corresponde a 4 mm puede apreciarse que el rango de frecuencias en las que se ubica la banda prohibida va de 150 kHz a 205 (206) kHz y las zonas de máxima transmisión se ubican entre 20 y 150 kHz y entre 215 y 300 kHz.

En base a los resultados mostrados, ha sido posible corroborar que, para el cristal diseñado, la modificación del parámetro de red repercute en las

propiedades de transmisión acústica del cristal y que cuanto menor es el parámetro de red la banda prohibida se corre hacia la región de alta frecuencia o longitudes de onda corta; en otras palabras, entre más separados estén los cilindros uno de otro, mayor será la transmisión del sonido. En la Figura 4.6 se sobreponen los espectros de transmisión de los 4 cristales, la cual que muestra gráficamente lo que se ha concluido; la flecha negra indica la dirección en que el bandgap se desplaza al incrementar el parámetro de red.

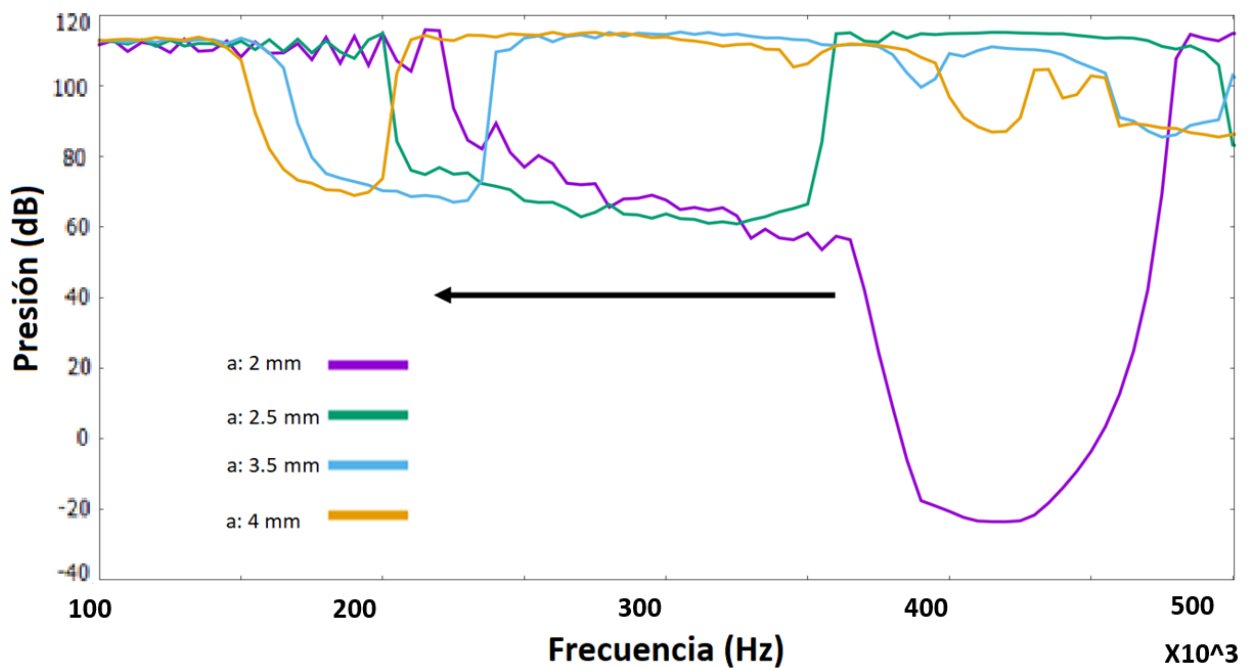


Figura 4.6 Espectros de transmisión para cuatro cristales fonónicos con diferentes parámetros de red.

4.2 Efecto del radio de los dispersores en el espectro de transmisión

Para el caso de los cristales con diferente radio, y para efectos de poder realizar un análisis sobre el efecto del radio de los dispersores en las propiedades acústicas del cristal, se simularon cristales, conservando el parámetro de red: 3 mm, mientras que los radios fueron: 0.8, 1.2 y 1.4 mm. Los cristales mantuvieron la geometría al ser arreglos de 20 x 20 cilindros embebidos en agua.

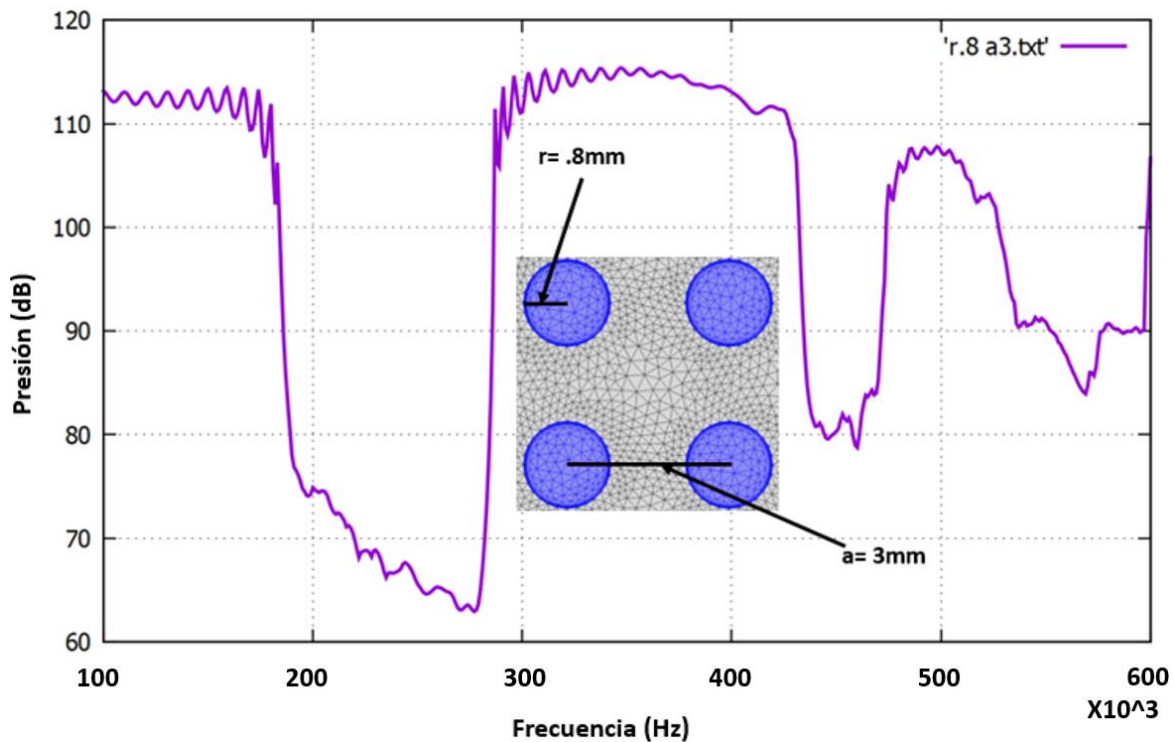


Figura 4.7 Espectro de transmisión para el cristal fonónico cuyo radio es 0.8 mm y parámetro de red 3mm.

La figura 4.7 muestra el espectro de transmisión para el arreglo cuyo radio se simuló de 0.8 mm. Puede observarse que la banda prohibida se sitúa entre 190

y 290 kHz de frecuencia. En este caso, el radio es el mismo que el del cristal de la sección anterior, sin embargo, al modificar el parámetro de red de 2 a 3 mm, cambian completamente sus propiedades acústicas; en éste caso, las bandas de transmisión principales, se ubican entre 100 y 190 kHz y 185 y 435 kHz, aproximadamente. Al ser diferente la distancia de separación entre los dispersores, conlleva que ondas con diferente frecuencia puedan viajar a través del cristal, puede apreciarse en este caso que la segunda banda de transmisión coincide con la región de frecuencias en la que se extiende la banda prohibida del cristal con el mismo radio de la sección anterior.

Las Figuras 4.8 y 4.9 muestran los espectros de transmisión para los cristales cuyos dispersores tuvieron un radio de 1.2 y 1.4 mm, respectivamente. En la figura 4.8, por un lado, podemos ver que la banda prohibida completa, abarca la región de frecuencias que va de 240(245) a 320 kHz, sin embargo, se observa una disminución de potencia desde 140 kHz. Por otro lado, en la Figura 4.9, que contiene la información acústica del cristal con 1.4 mm de radio, la banda prohibida se recorre y se sitúa entre 250 y 380 kHz.

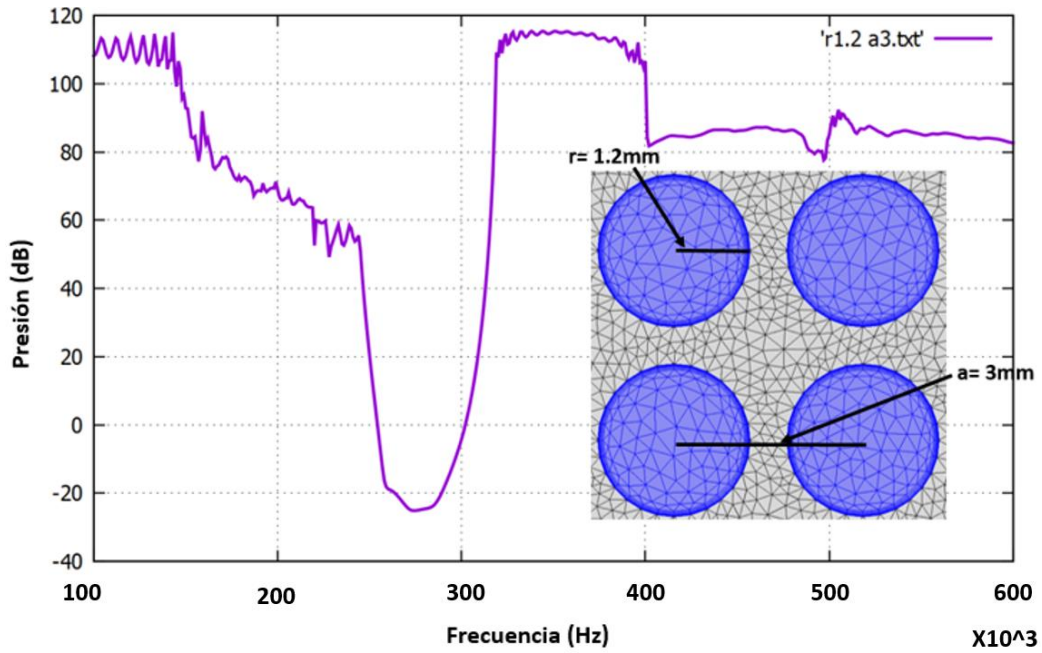


Figura 4.8 Espectro de transmisión para el cristal fonónico cuyo radio es 1.2 mm y parámetro de red 3mm.

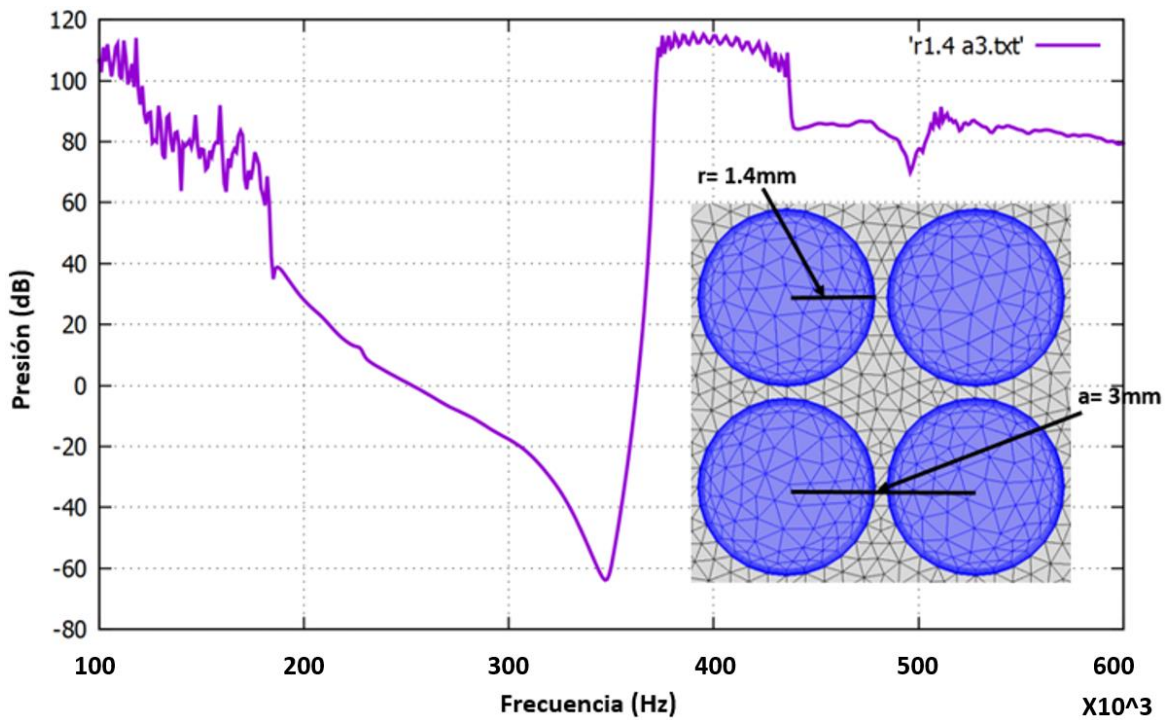


Figura 4.9 Espectro de transmisión para el cristal fonónico cuyo radio es 1.4 mm y parámetro de red 3mm.

Los resultados obtenidos muestran que, similar a lo ocurrido en el subcapítulo 4.1, se puede concluir que, a mayor separación de los cilindros, menor será la banda prohibida o mayor será la transmisión del sonido (Fig. 4.10). Esto ocurre dado que el radio de los cilindros varía provocando que la distancia entre ellos también cambie.

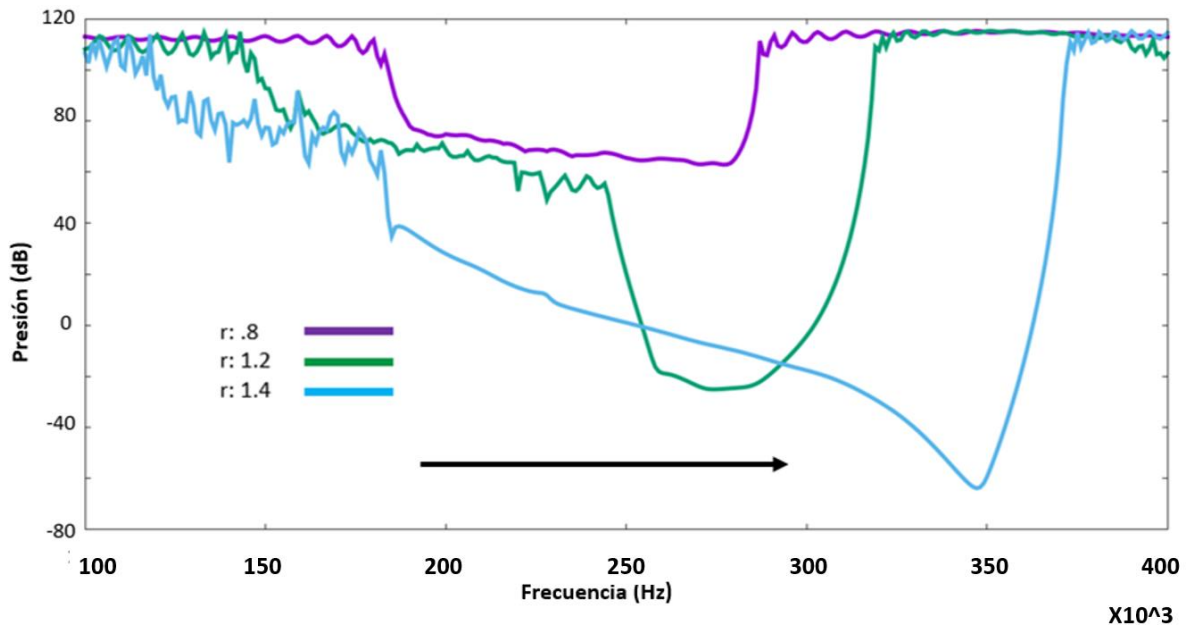


Figura 4.10 Espectros de transmisión para tres cristales fonónicos, los cilindros de dichos cristales varían en su radio el parámetro de red se conserva.

4.3 Guías de onda

Como se describió en el capítulo anterior, tras la obtención de los espectros de transmisión de los de los diferentes cristales diseñados, se construyeron guías de onda a partir de la extracción de dispersores de sonido en posiciones específicas. Al extraer un dispersor, se induce un defecto en el cristal, que está

asociado con un estado de defecto dentro de su *bandgap*. Lo anterior implica que, las guías de onda propuestas, están conformadas por arreglos sucesivos de defectos. Es preciso recordar que, las guías de onda que se presentan fueron obtenidas en el cristal conformado por cilindros de acero de 0.8 mm de diámetro y 2 mm de parámetro de red.

Para verificar que, en efecto, la extracción de cilindros en el cristal diseñado, posibilita la propagación de ondas con una frecuencia específica, y por lo tanto el poder guiarla, se diseñaron los siguientes cristales.

Al cristal conformado por 19X19 cilindros, se le extrajo un dispersor justo en la mitad, como se observa en la Figura 4.11-izquierda lo que significa que existen 9 dispersores entre la fuente de ondas de ultrasonido y el defecto inducido, e igual número entre el defecto y el área de transmisión (receptor). La Figura 4.11-derecha contiene el espectro de transmisión del cristal descrito, de donde puede observarse la aparición de un pico delgado y no muy intenso a una frecuencia de 427 kHz, frecuencia completamente localizada en el *bandgap*, como puede verse en la Figura 4.2 y que corresponde a una longitud de onda de 3.46 mm, es decir, $1.73a$, a siendo el parámetro de red. El pico observado corresponde a un modo vibracional localizado, inducido por el defecto el que, como es de esperarse, se encuentra dentro del *bandgap*. El modo vibracional permite que la energía acústica asociada a dicha frecuencia viaje a través del cristal, sin embargo, debido a que debe propagarse aún por 9 cilindros de antes de alcanzar el área de transmisión, su intensidad es muy pequeña.

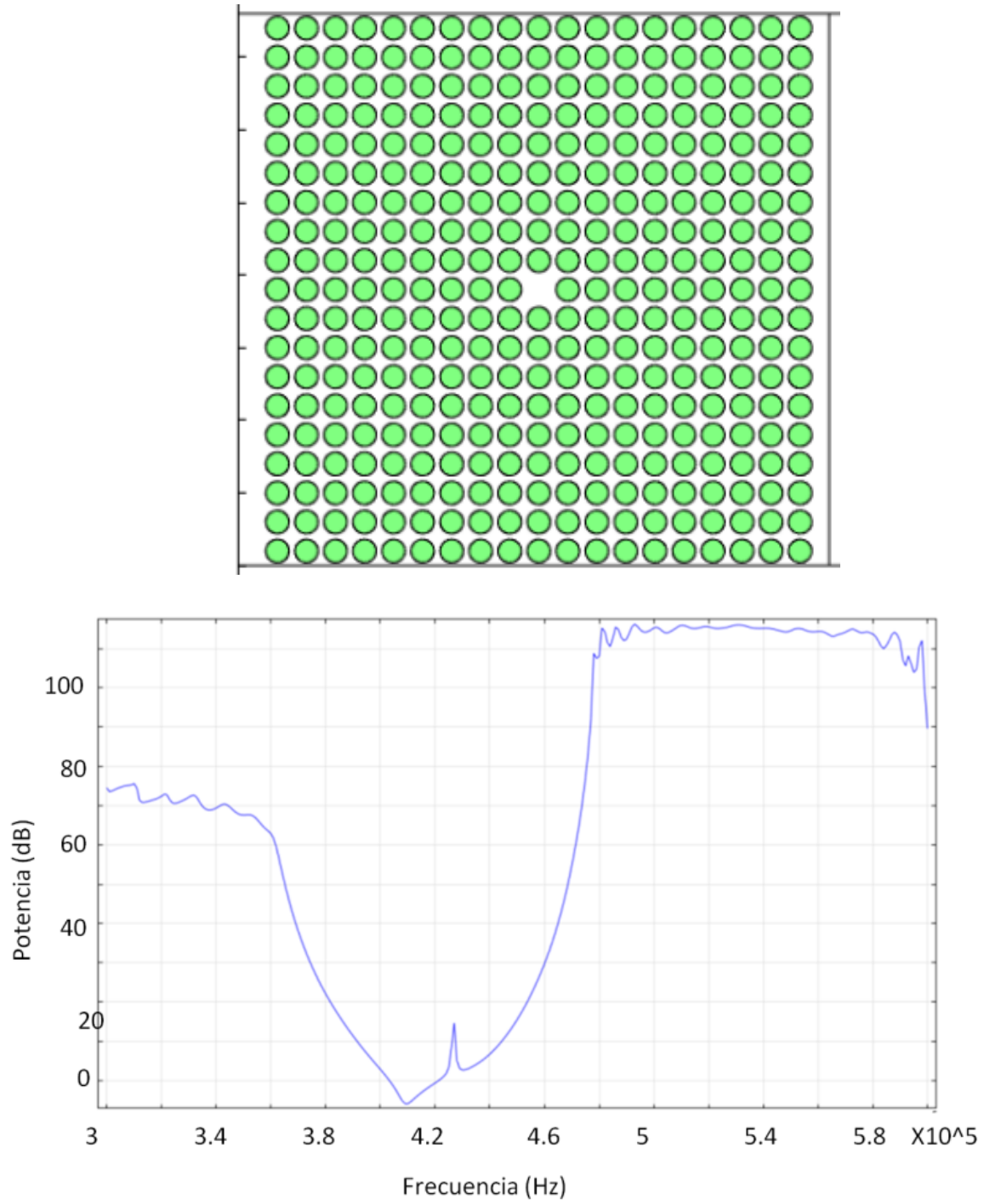


Fig. 4.11 Cristal fonónico con un defecto inducido justo en el centro.

Como se indicó en el capítulo anterior, también se analizó el efecto de inducir el defecto extrayendo el dispersor en cualquier posición a lo largo de la línea central del cristal. En la figura 4.12-a se presentan tres cristales induciendo un defecto en diferentes posiciones de la línea central. Se extrajo el segundo dispersor, el penúltimo dispersor y el dispersor que ocupa la onceava posición sobre la línea (2 dispersores a la derecha del mostrado en la Figura 4.11-izquierda). En la figura también se muestran los respectivos espectros de transmisión de los cristales. El cristal que señala con una flecha azul muestra un pico en el espectro de transmisión, inducido por el defecto, sin embargo su intensidad es muy pequeña debido a que aún debe de pasar por 8 cilindros antes de llegar al área de transmisión. El cristal señalado con la flecha morada muestra la aparición de un hombro en el bandgap, con menor intensidad que en el caso anterior, debido a que tiene que pasar por los 17 dispersores restantes y sólo atravesó uno antes de llegar al defecto. Finalmente, en el espectro que es señalado con la flecha verde, prácticamente no muestra un modo vibracional dado que la energía acústica se disipa al viajar por los 17 cilindros previos al defecto, lo que no permite transmisión alguna.

En la figura 4.12-b se muestran los mapas de presión para la frecuencia 427 kHz, en donde puede observarse como la energía acústica es confinada en la región más cercana al cristal. Debe destacarse el hecho de que cuando el cristal está más cerca de la fuente, la energía se propaga perfectamente al menos 4 cilindros más allá del defecto, hecho que será clave en la formación de las guías de onda.

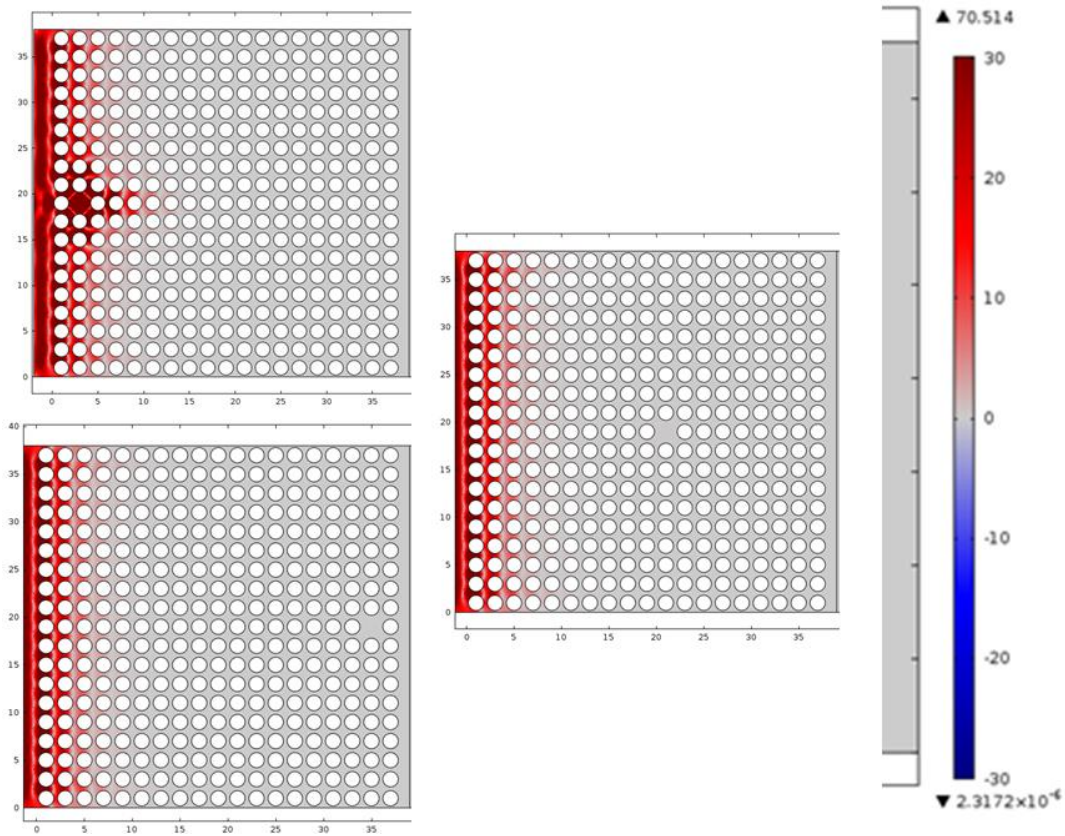
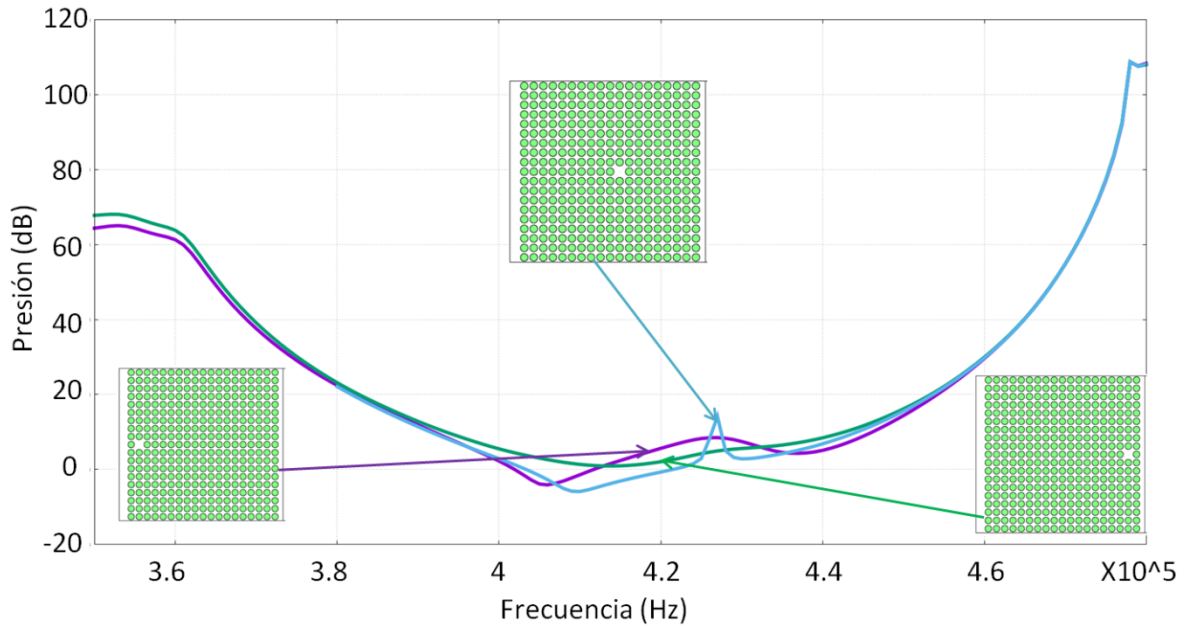


Fig. 4.12-a Espectros de transmisión. Se puede observar en la frecuencia 427 kHz un pico vibracional inducido por el defecto del cristal (línea azul). -b Mapas de presión a 427 kHz

Debido a la simetría del cristal y, con el objetivo de analizar el efecto de extraer más de un cilindro en él, a lo largo de la línea central, se analizaron cristales con 3, 5, 7 y 9 defectos consecutivos, separados por un dispersor, como los esquematizados en la Figura 4.13. El caso de 9 defectos se discute más adelante.

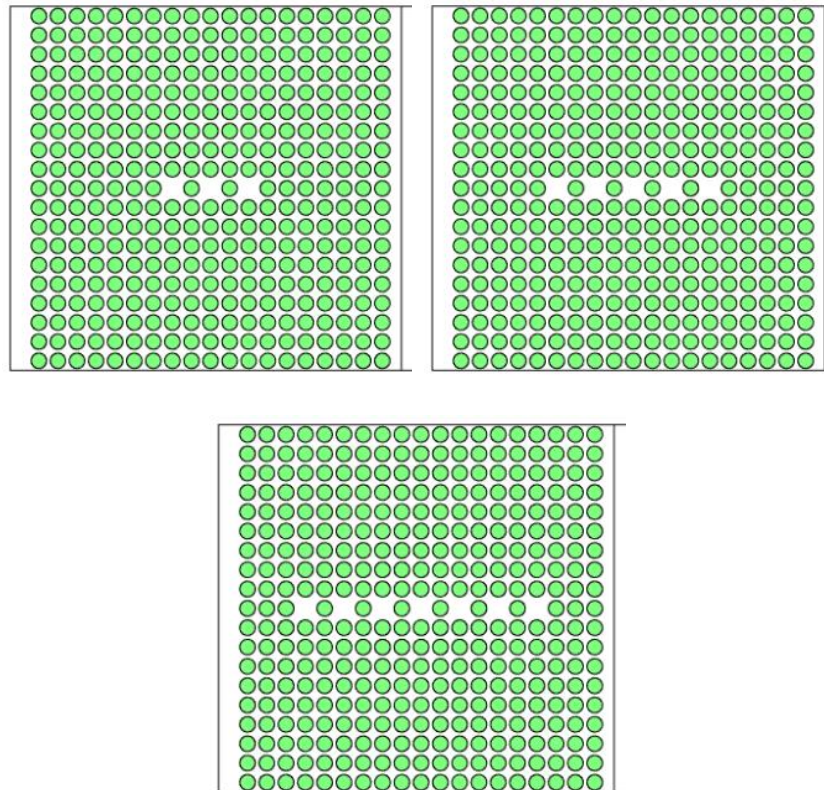


Fig. 4.13 a, b y c. (De izquierda a derecha y de arriba para abajo.) Cristales fonónicos, arreglos de 19 por 19 cilindros de acero a los cuales se les eliminó 3, 5 y 7 cilindros con el fin de crear la guía por la cual se transmitirá la onda.

En la Figura 4.14, se muestra el espectro de transmisión del cristal conteniendo 3 defectos, en donde puede observarse la aparición de 3 picos dentro del bandgap, localizados en 413, 430 y 444 kHz. Dichos picos, resonancias colectivas de los defectos individuales.

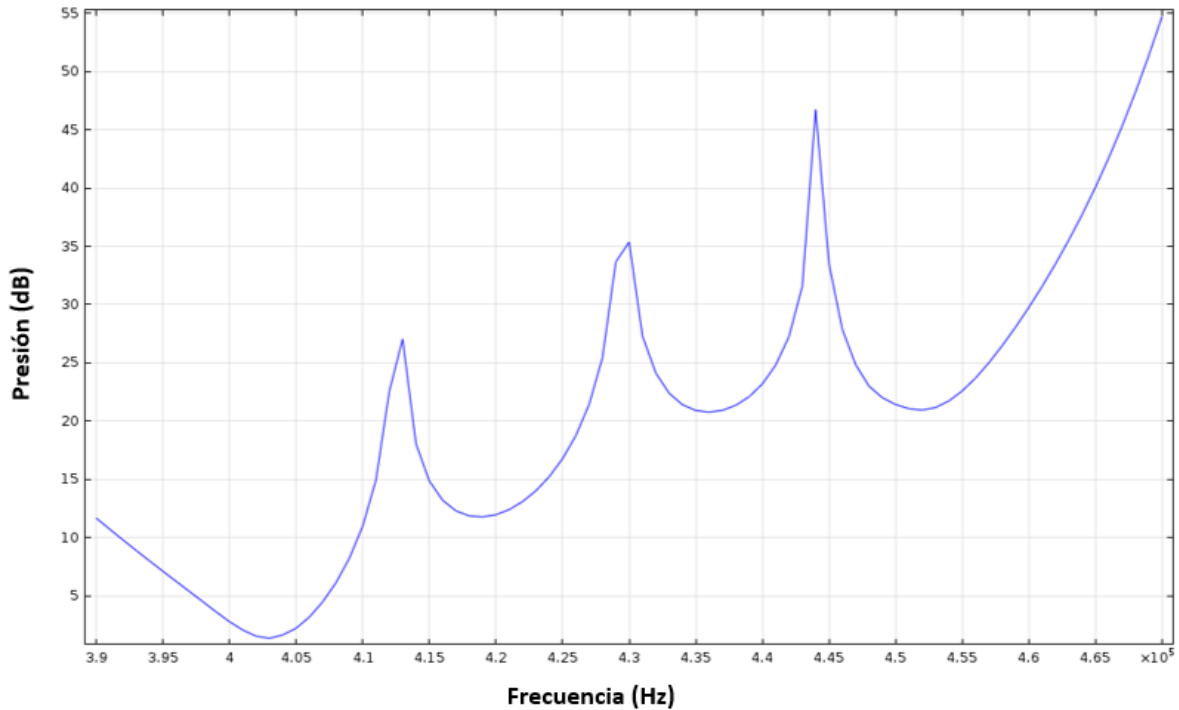


Fig. 4.14 Espectro de transmisión para el cristal fonónico con tres defectos

Los casos en que se eliminan 5 y 7 cilindros, los espectros de transmisión se muestran en las Figuras 4.15 y 4.16, en donde puede apreciarse la aparición de cinco y siete picos dentro de la región del *bandgap*. Lo que quiere decir que esa supresión de cilindros origina modos vibracionales colectivos dentro de la banda prohibida. Para una mejor resolución, se muestra la transmisión solo en la región de frecuencias que comprende el *bandgap*. Algunos autores establecen que los picos que aparecen, son modos resonantes acoplados, cuya energía acústica transmitida, se intensifica al aumentar el número de defectos.

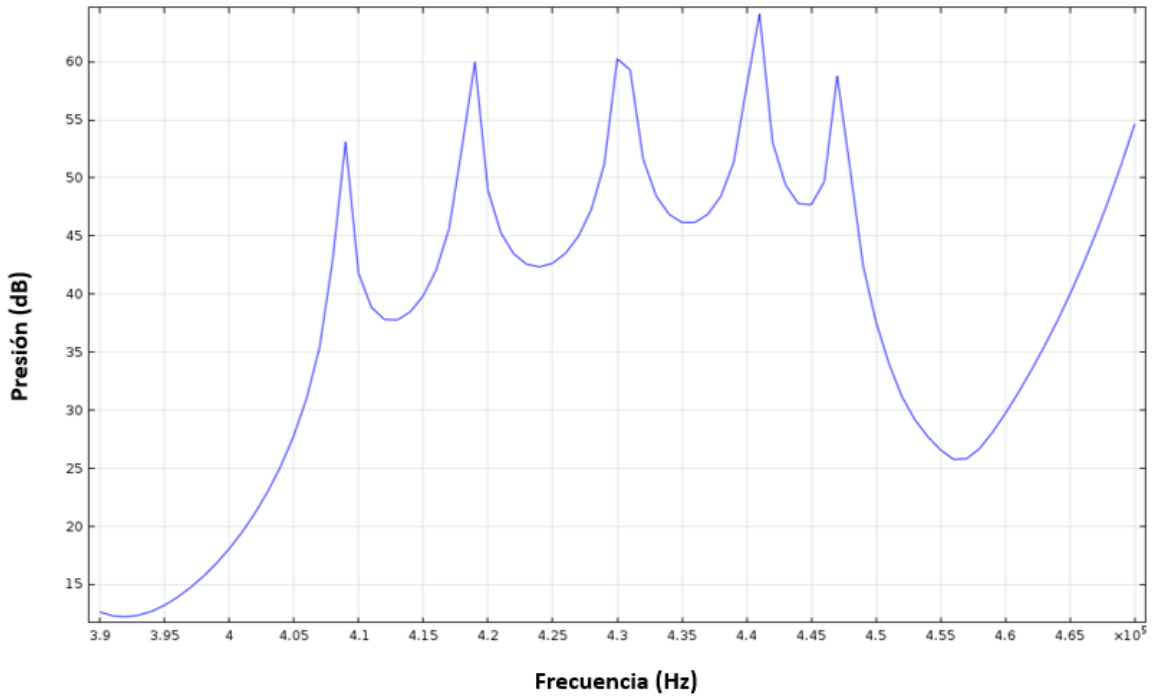


Fig. 4.15 Espectro de transmisión para un cristal fonónico con cinco defectos de línea.

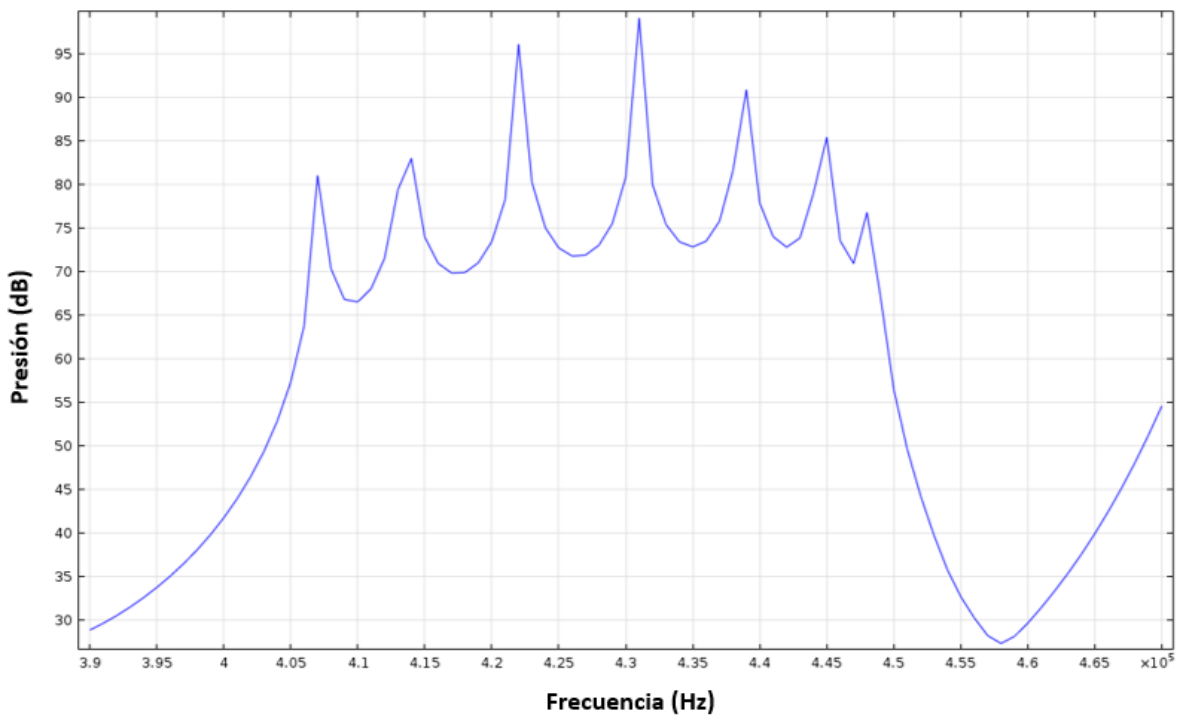


Fig. 4.16 Espectro de transmisión para un cristal fonónico con siete defectos de línea.

4.3.1 Guía de onda lineal

Ya se ha discutido el cómo generar un defecto en el cristal y sus consecuencias en el bandgap. También se ejemplificó cuando se extrae uno, tres, cinco o siete cilindros. Debido a las características geométricas del cristal que se analiza, se indujo una línea de defectos en la parte central del cristal, en la dirección paralela a la dirección de propagación de la onda, conformada por 9 defectos consecutivos, separados por un dispersor, como se muestra en la Figura 4.17.

En la Figura, fig.4.18, se presenta el espectro de transmisión el cristal con 9 defectos, es decir para el caso de la guía de onda lineal. Dicho espectro muestra una nueva y bien definida banda de transmisión en la región del *bandgap*, estrictamente entre las frecuencias de 4.06×10^5 y 4.49×10^5 Hz. La nueva banda de transmisión está conformada por 9 picos definidos, que corresponden a los 9 modos vibracionales acoplados.

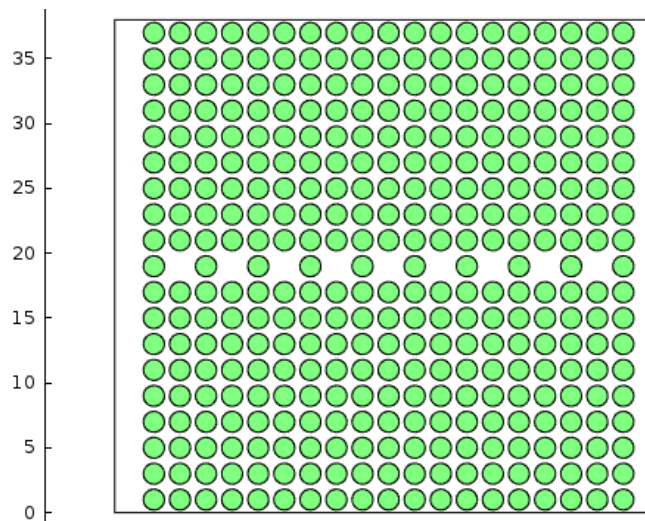


Fig. 4.17 Línea de 9 defectos en un cristal de 19 x 19 cilindros.

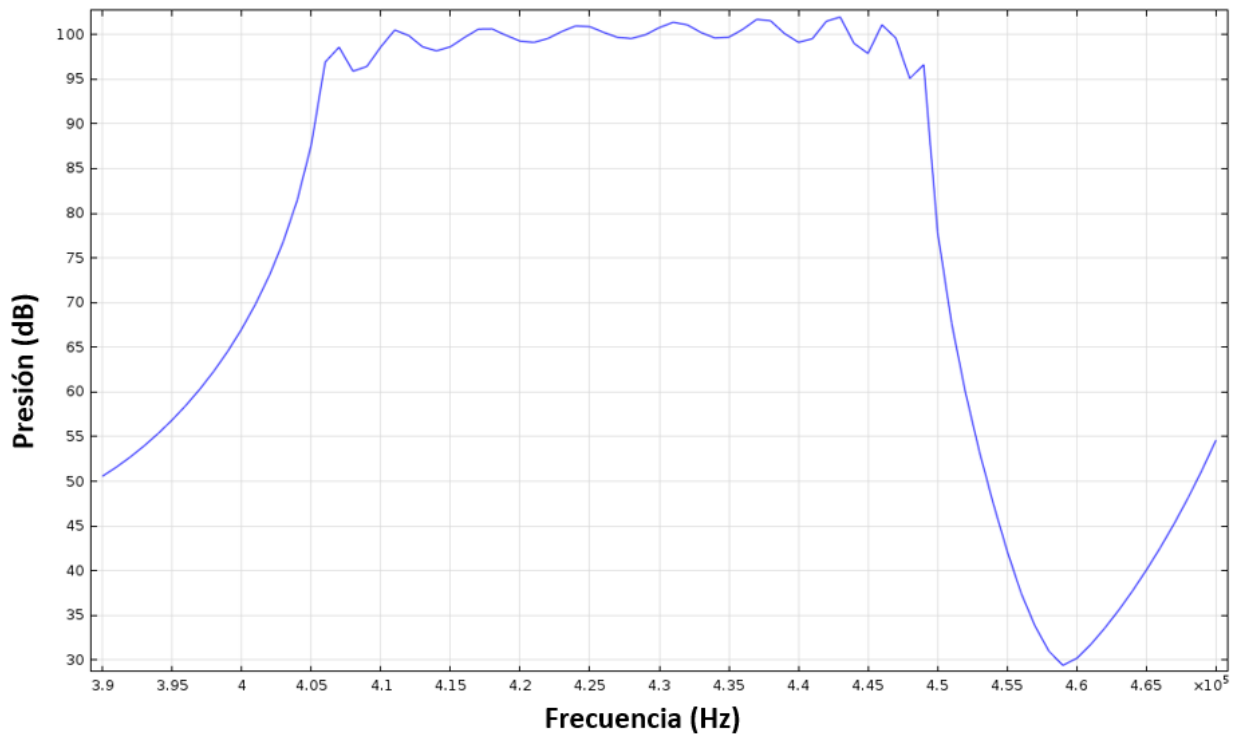


Fig. 4.18 Espectro de transmisión para una guía de ondas en un cristal fonónico con 9 defectos. El cristal está constituido periódicamente por 19 unidades.

Para dilucidar como se guía la energía acústica debido al arreglo diseñado, en la figura 4.19-a y b se muestran los mapas de presión para dos diferentes frecuencias: 427 y 440 kHz, las cuales se encuentran en la banda de transmisión que se origina.

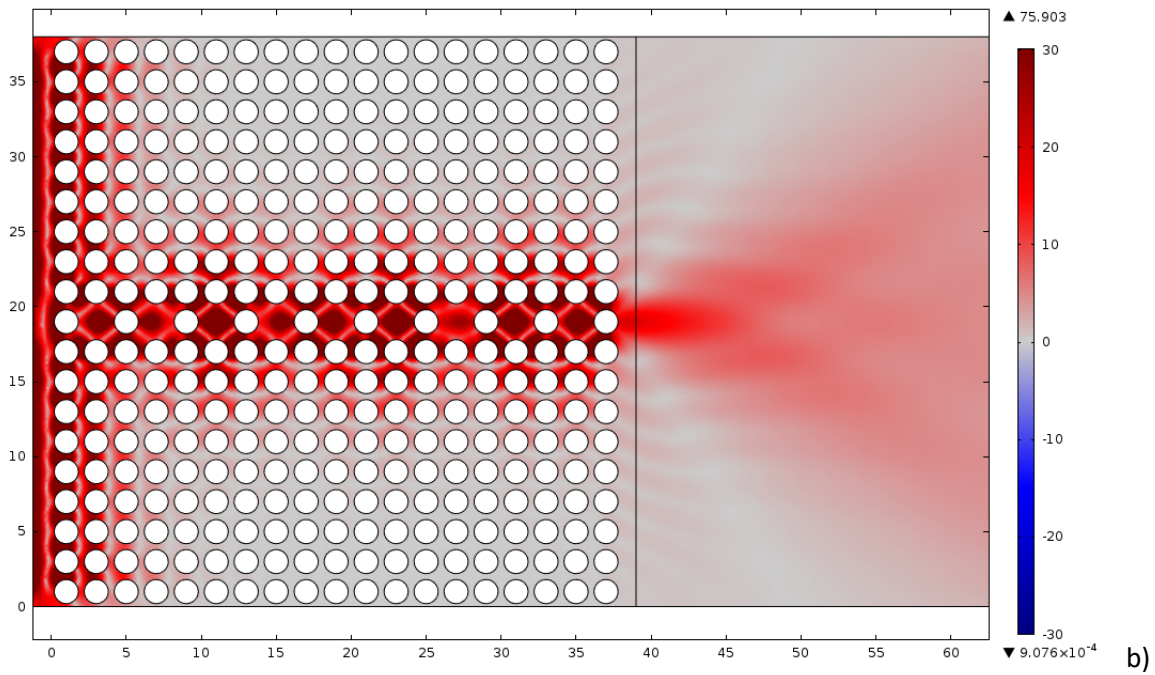
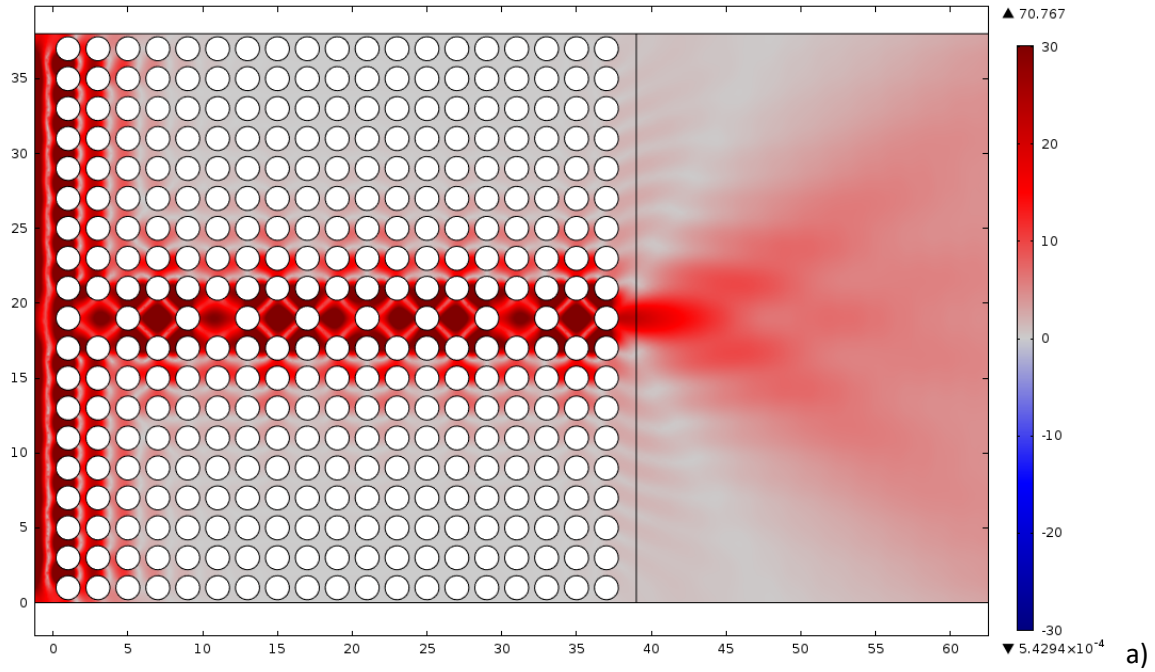


Fig. 4.19 Mapas de presión para la frecuencia a) 427 y b) 440 kHz en un cristal con una línea de 9 defectos.

De acuerdo con el espectro de transmisión, las frecuencias seleccionadas, se encuentran completamente dentro de la banda inducida. Puede observarse claramente, como la energía acústica se distribuye a lo largo de la línea de defectos y es liberada con en una región local fuera del cristal, con una intensidad cercana a los 100 dB, comparada con la intensidad cero que se transmite sin defectos (Figura 4.2). Cabe señalar que en el mapa de presiones, y en base a la escala de energía que se indica, es posible observar que al interior de los defectos, la energía acústica es maximizada, sin embargo no es atrapada y se propaga a lo largo de la guía de ondas.

4.3.2 Guía de onda con ángulos de 90°

Con el fin de comprobar que la onda puede también guiarse a través de una guía angular, simulamos un cristal cuyos defectos fueron periódicamente dispuestos en forma de Z con ángulos de 90°, tal como se muestra en la Figura 4.20. En esta figura se muestra al cristal con dos ángulos rectos.

En la figura 4.21 se muestra el espectro de transmisión y se señalan la transmisión para las frecuencias 4.27×10^5 y 4.40×10^5 kHz, mismas que se analizaron en los mapas de presión de la sección anterior. Es conveniente destacar que, en éste caso, la guía de ondas está conformada por 14 defectos, sin embargo, no es posible identificar los 14 picos asociados en el espectro de transmisión.

En las Figuras 4.22, que contiene los mapas de presión para las frecuencias mencionadas en el párrafo anterior, puede observarse nuevamente, como la distribución de energía acústica es mayor en los puntos donde existen los defectos, es decir, las ondas de ultrasonido viajan a través de la guía de onda diseñada. Cabe mencionar que la distribución de energía a lo largo de la línea de defectos, no es completamente simétrica, comportamiento que se atribuye al hecho de que, como se mostró en la Figura 4.12, las ondas pueden alcanzar los defectos centrales, es decir, en éste caso, pueden existir acoplamientos entre modos de defectos sucesivos y aquellas resonancias que se generen entre él y la onda viajando desde el inicio del cristal.

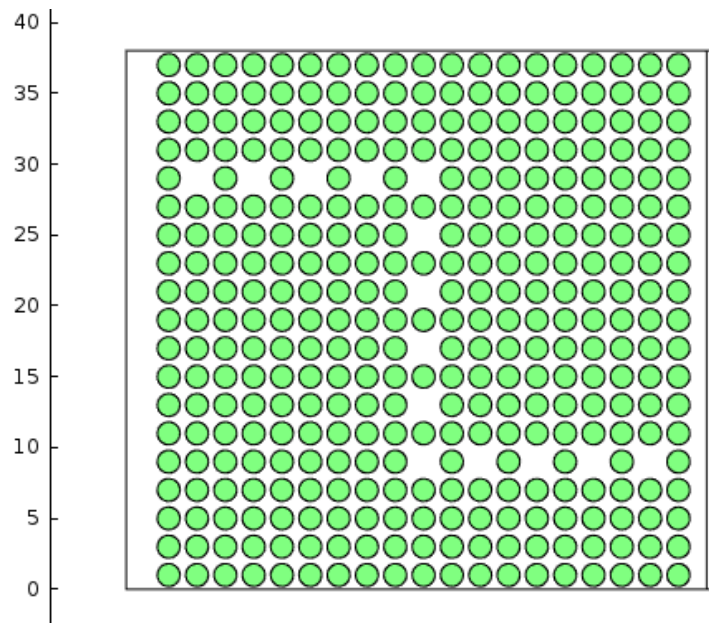


Fig. 4.20 Guía de onda en forma de Z, con ángulos de 90°, en un cristal fonónico.

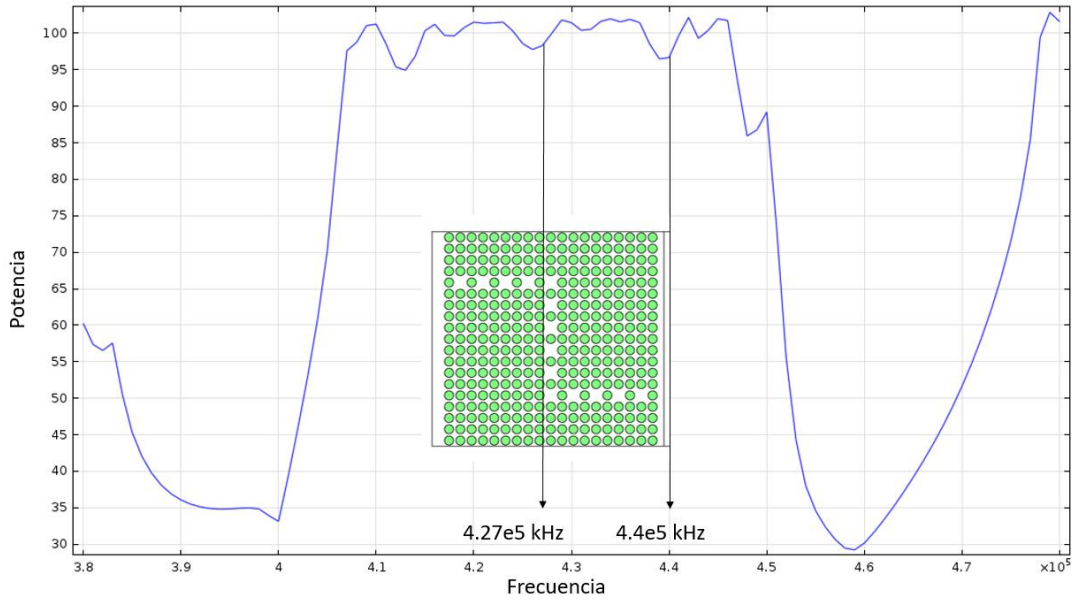
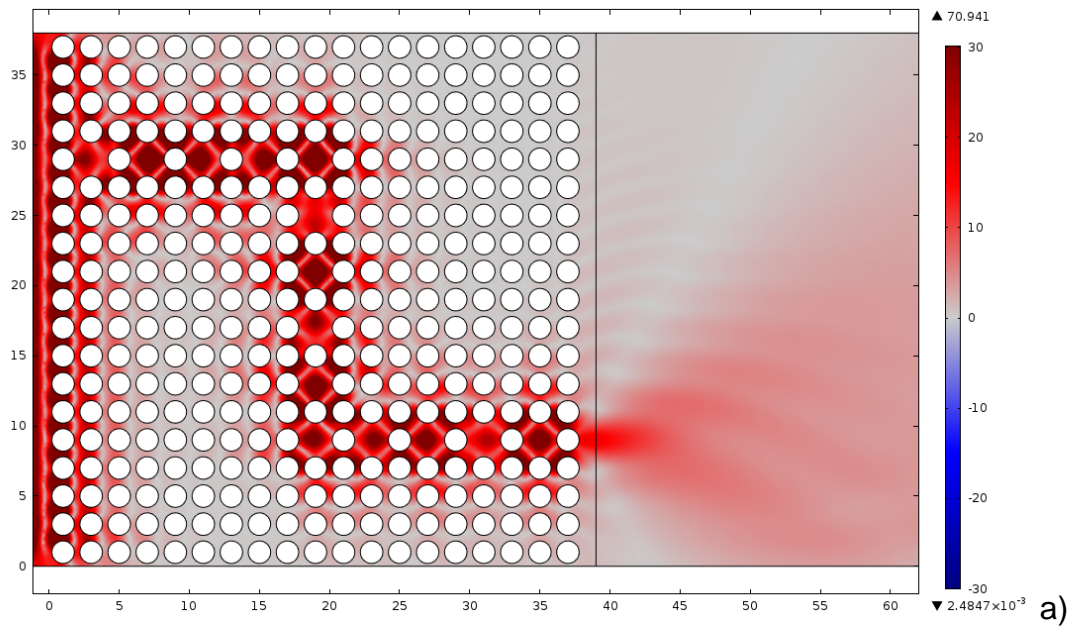


Fig. 4.21 Espectro de transmisión para una guía de ondas en forma de Z, con dos ángulos de 90°



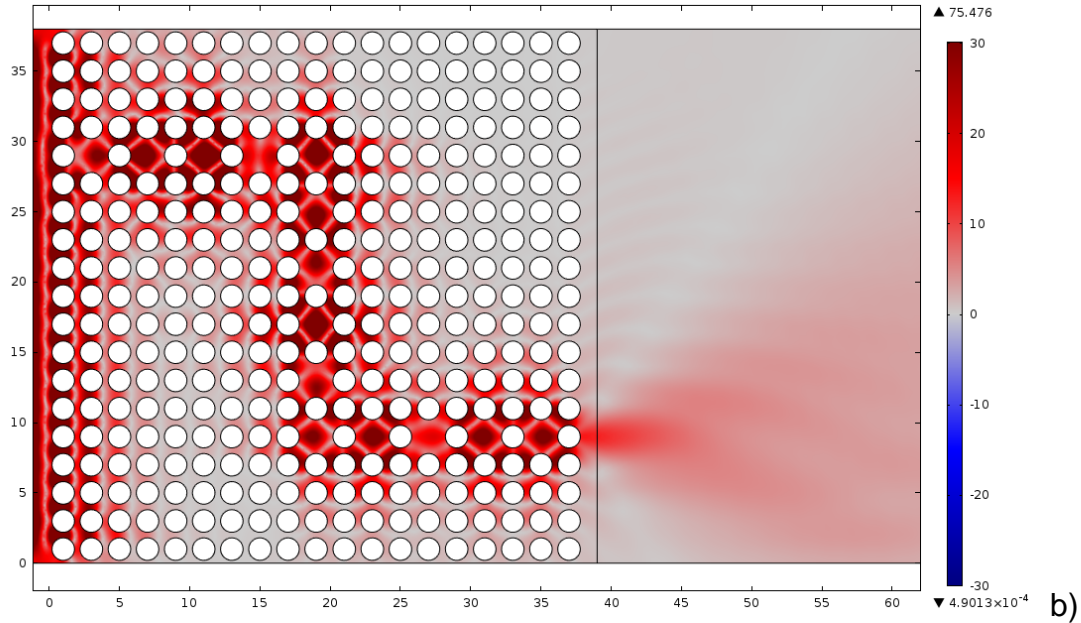


Fig. 4.22 Mapas de presión para un cristal fonónico, cuya guía de ondas presenta dos ángulos de 90° .

En base a las Figuras 4.22, a y b, y la Figura 4.21, se puede concluir que el cristal diseñado, funciona como una guía de ondas, similar al caso mostrado en la sección anterior. Así mismo, al comparar las Figuras 4.19 y 4.22, puede observarse que la intensidad transmitida, es aproximadamente la misma, salvo variaciones en ciertas frecuencias, sin embargo, el beneficio de ésta última radica en el hecho de que, la energía acústica es liberada en una región local diferente y no en la misma línea por donde se permite su acceso.

4.3. Demultiplexor

Un demultiplexor es, de manera general, un sistema conformado por una entrada de información que tiene la propiedad de seleccionar la información de

entrada para dirigirla a un puerto de salida específico. Como se mencionó en el capítulo anterior, a partir del cristal diseñado, se construyeron guías de onda con una entrada y 2 salidas, es decir, un demultiplexor. Se analizaron al menos 2 casos, uno en el que las 2 salidas son simétricas y la otra asimétrica, como se muestran en las Figuras 3.12 y 3.13 del Capítulo anterior.

La Figura 4.23 muestra un arreglo de 19 x 19 cilindros de acero embebidos en agua, en donde se creó una entrada (guía de ondas) que a la mitad del cristal se ramifica en 2 salidas (demultiplexado) asimétricas. La asimetría se alcanzó al no remover un cilindro en el brazo inferior, cuya área de transmisión es la señalada como Área 2.

Puede apreciarse en la figura 4.24 que la energía acústica se transmite a través de la guía principal para después bifurcarse. Para el caso de la frecuencia de 429 kHz, la mayor parte de la energía se dirige hacia la guía inferior, siendo detenida justo donde están los tres cilindros juntos, es decir, donde no se indujo el defecto. Sin embargo, de acuerdo con la figura, la energía que alcanza en el área 2 es mayor (2.8 Pa aprox.) al área 1 (1.85 Pa aprox.) La diferencia es muy pequeña y podemos observarlo fácilmente con la línea de colores a la derecha del mapa.

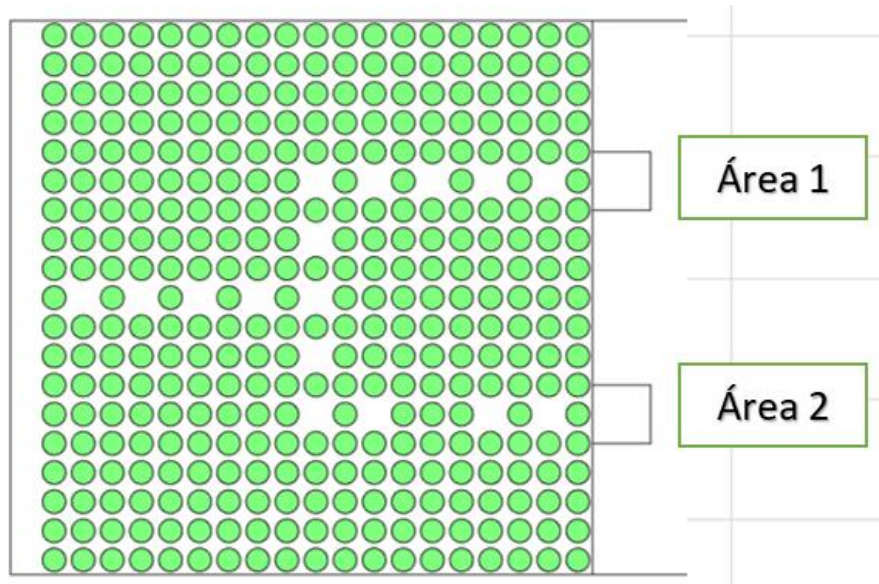


Fig. 4.23 Cristal fonónico constituido por un arreglo de 19x19 cilindros, se ha creado un demultiplexado.

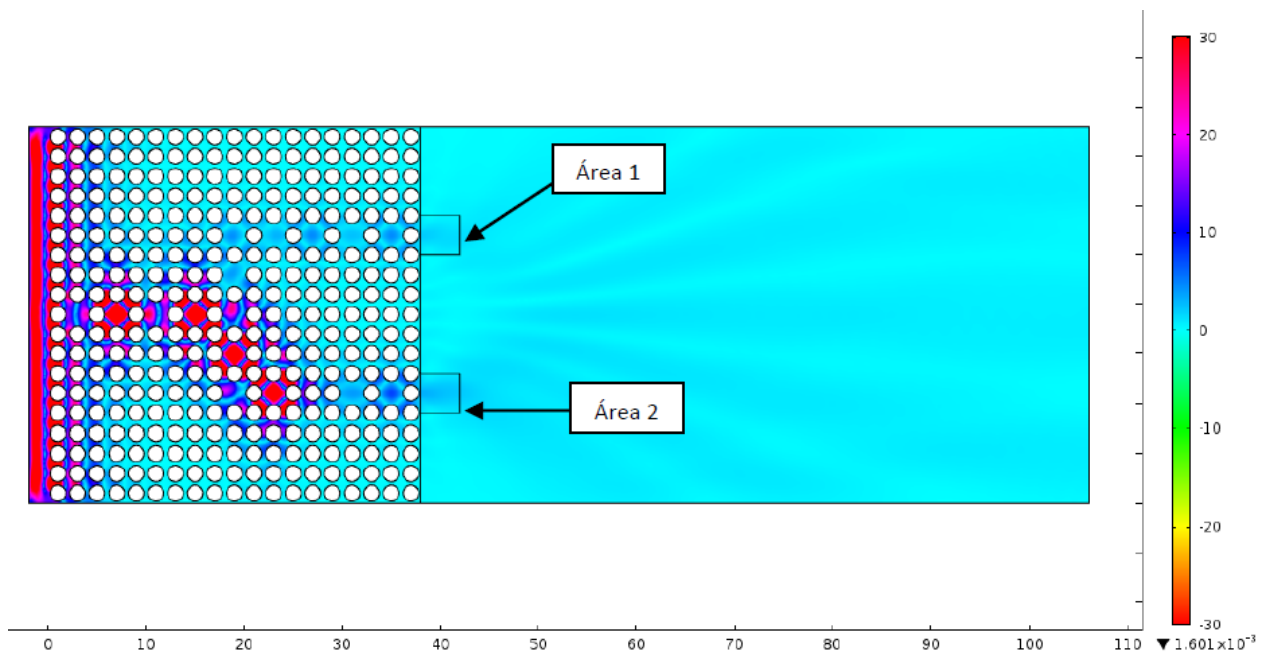


Fig. 4.24 Se muestra el mapa de presiones para la frecuencia 4.29×10^5 .

En la gráfica Fig. 4.25 podemos observar que efectivamente en la frecuencia 4.29×10^5 kHz existe una pequeña diferencia en las presiones de ambas áreas.

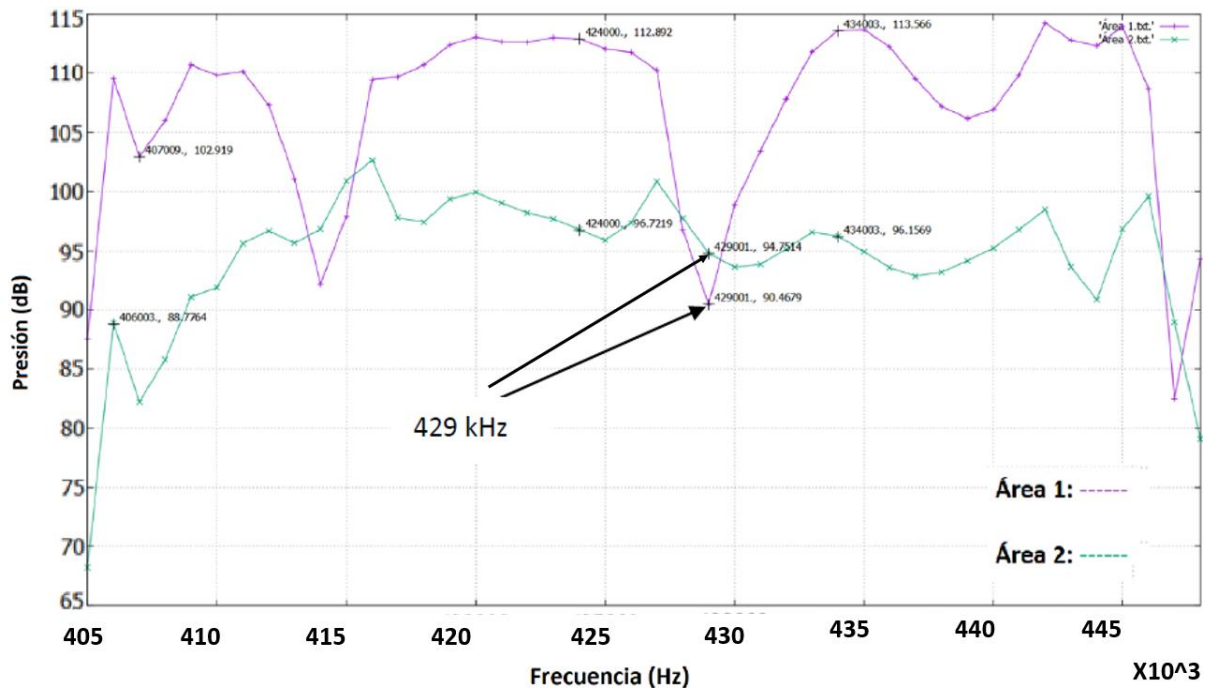


Fig. 4.25 Espectro de transmisión para el cristal mostrado en la figura 4.23. La línea morada muestra el espectro para el área 1, la línea verde para el área 2.

A continuación, se muestran tres ejemplos más a diferentes frecuencias. En la figura 4.26 utilizamos la frecuencia 4.06×10^5 kHz. Se puede observar que existe una diferencia mayor en la presión de las áreas 1 y 2. Área 1: 17.7Pa, área 2: .64Pa. Esto se puede corroborar con el espectro de transmisión de la Figura 4.22, donde a esta frecuencia se muestra una diferencia mayor en la presión.

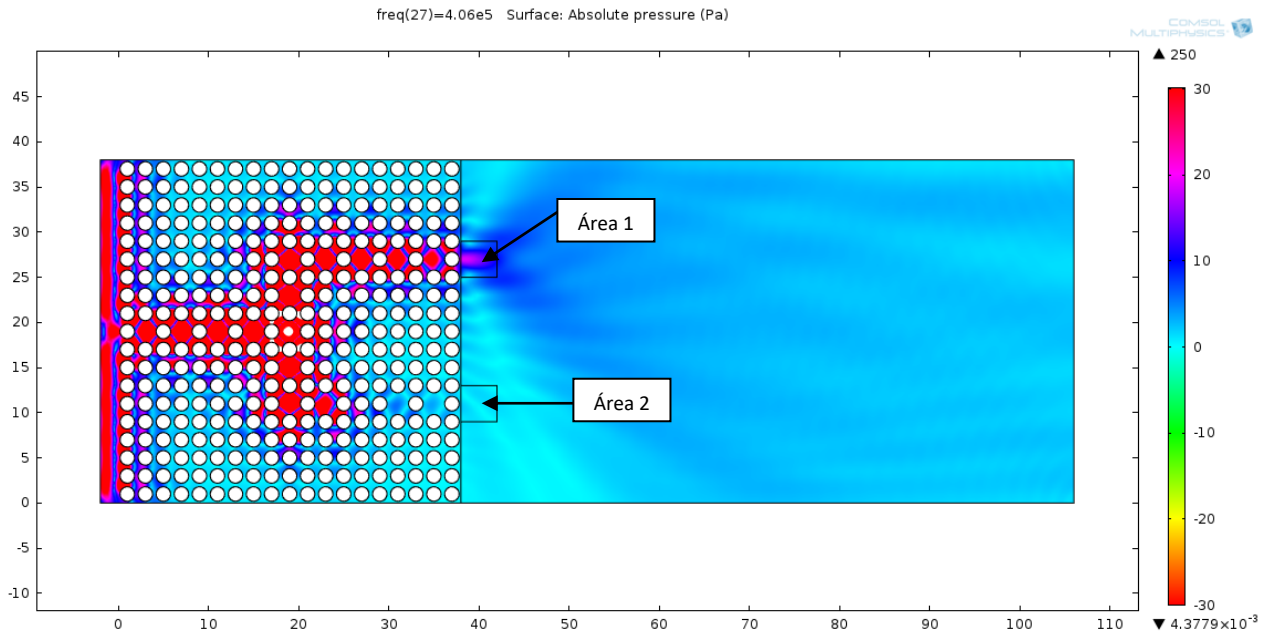


Fig. 4.26 Mapa de presiones para la frecuencia 4.06×10^5

Las Figuras 4.27 y 4.28 muestra los mapas de presiones para las frecuencias 4.24×10^5 kHz y 4.34×10^5 kHz. Para 4.24×10^5 kHz la presión en el área 1 es: 23.08 Pa y para el área 2 3.73 Pa. Cuando para la frecuencia 4.34×10^5 kHz la presión en área 1 es 25.09 Pa y en el área 2 la presión es 4.22 Pa. Lo anterior conlleva a concluir que a diferentes frecuencias la energía se transmitirá con intensidad diferente en ambas guías debido a que los brazos del demultiplexor no son simétricos.

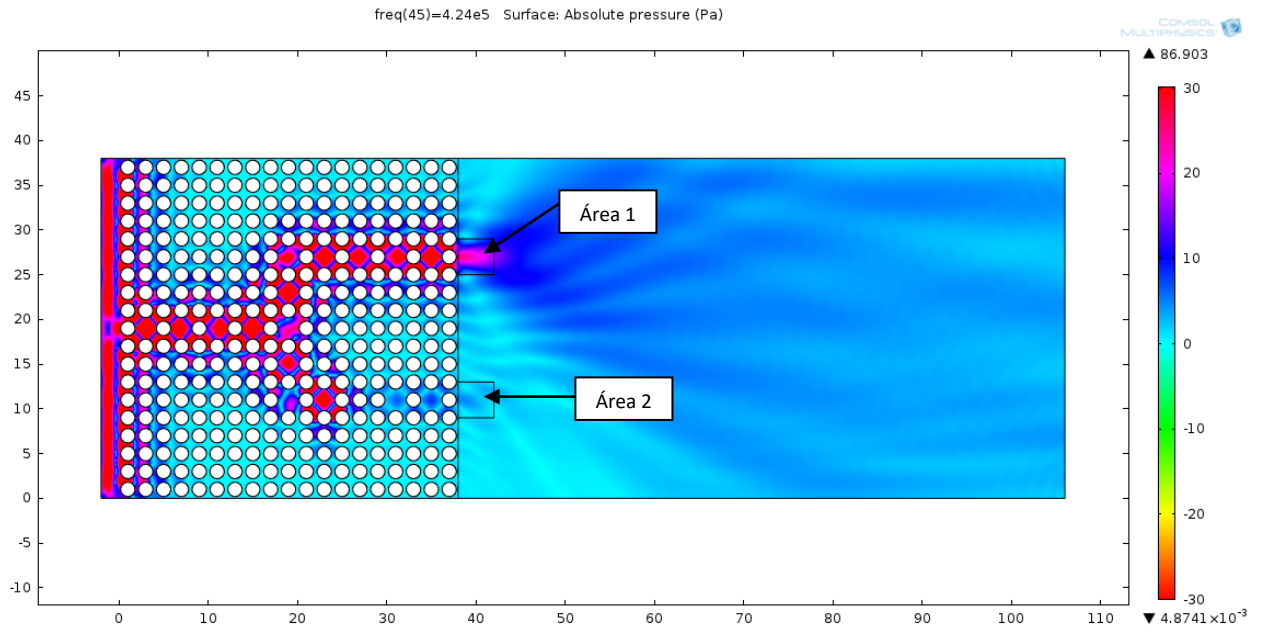


Fig. 4.27 Mapa de presiones para la frecuencia 4.24×10^5

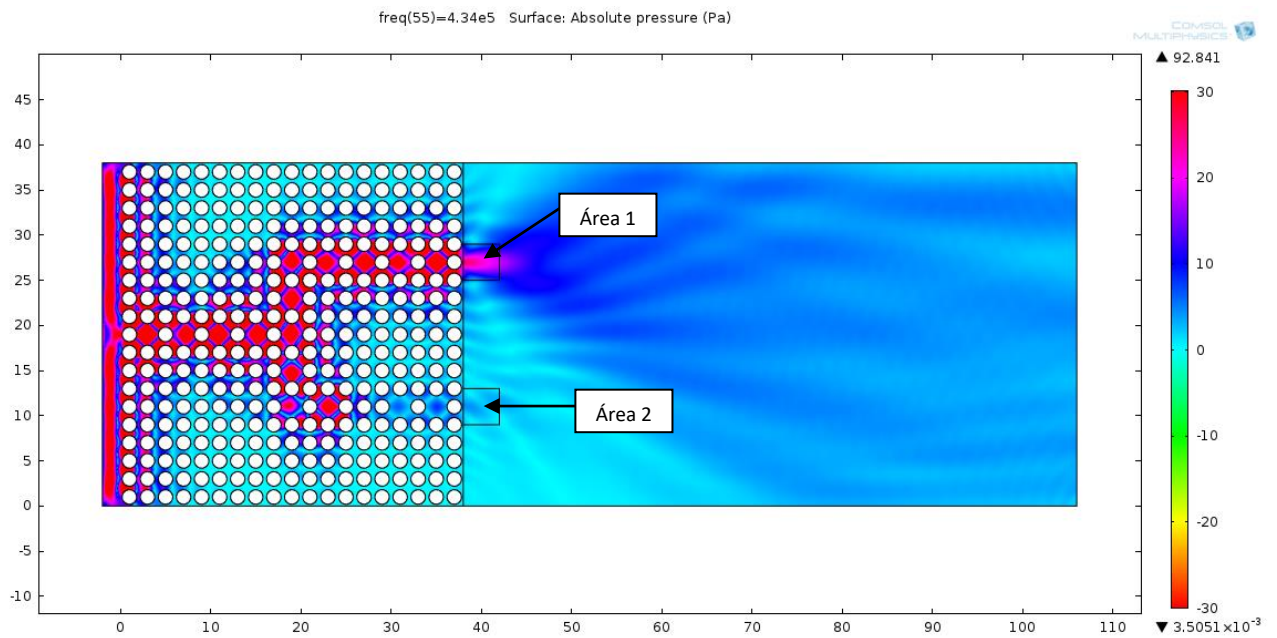


Fig. 4.28 Mapa de presiones para la frecuencia 4.34×10^5

Referencias.

[1] Fernando Tomàs Ibiz, Estudio numérico de la focalización de ondas evanescentes con una estructura periódica. Gandia 2013

[2] Taras Gorishnyy, Martin Maldovan, Chaitanya Ullal and Edwin Thomas; Sound ideas. Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

Capítulo 5

Conclusiones

Se ha demostrado que es posible controlar la posición y el ancho de la banda prohibida en un cristal fonónico modificando las características de este. Tanto el parámetro de red como el radio de los cilindros, en un cristal fonónico bidimensional, supondrán un cambio en la fracción de llenado; y como se mencionó en el primer capítulo, una de las formas de controlar la posición del bandgap es modificando dicha fracción de llenado.

Por otra parte, también se logró el guiado de ondas acústicas a través de cristales fonónicos. Esto es posible eliminando varios cilindros del modelo. Se analizó el efecto de un número diferente de defectos, inducidos consecutivamente, concluyendo que al aumentar el número de defectos, se forma una nueva banda de transmisión en la región del *bandgap*. Además se mostró que es posible guiar ondas a través de una guía angular, esto con el fin de poder controlar el punto de interés donde se desea liberar la energía. Esto se logró creando guías con ángulos de 90°.

Finalmente se logró mostrar el demultiplexado de las ondas a través de un cristal con guías de onda de dos salidas. Estas guías fueron construidas eliminando algunos cilindros de tal manera que se contara con una entrada y posteriormente se ramificara en dos salidas, formando ángulos de 90°. En uno de estos cristales construidos no se les indujo un defecto justo en una de las ramas de salida, por lo que la energía de salida en esta rama fue diferente a la de la rama en donde si se indujo el defecto. Demostrando así de lo que es capaz la falta o presencia de un dispersor de sonido.

Agradecimientos

Deseo agradecer:

A mis padres por su invaluable apoyo.

A mi asesor y director de esta tesis, el Doctor Delfino Reyes Contreras y a mi co-asesor el Doctor Miguel Mayorga Rojas.

A mis revisores, el doctor Porfirio Domingo Rosendo Francisco y al Doctor Juan Carlos Arteaga Arcos.

A mi amiga y ex-profesora Alejandra Inés Pantoja Castro (Ale) por su enorme paciencia y afortunadas palabras de aliento.

Gracias.

Un agradecimiento al proyecto "Síntesis de nanomateriales utilizando ablación laser de sólidos en líquidos para aplicaciones biotecnológicas y optoelectrónicas" con número de convenio: DSA/103.5/16/10569.