UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

TESIS

"Análisis de la transmisión unidireccional de ondas de ultrasonido en diodos acústicos basados en cristales fonónicos"

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

PRESENTA:

JUAN CARLOS ESQUIVEL SALAZAR

ASESOR:

DR. DELFINO REYES CONTRERAS

COASESOR:

DR. MIGUEL MAYORGA ROJAS

TOLUCA, MÉXICO

2026

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen 4

Introducción 5

Hipótesis 8

Objetivos 8

Objetivo general 8

Objetivos Específicos 8

CAPÍTULO 1 CRISTALES Y ESTRUCTURAS FONÓNICAS 9

1.1 Definición de un cristal fonónico 10

1.2 Bandgap acústico 11

1.3 Caracterización de las ondas mecánicas 12

1.4 Clasificación de cristales fonónicos atendiendo su frecuencia y tamaño. 16

1.4.1 Clasificación en el Rango audible 16

1.4.2 Clasificación en el rango de ultrasonidos 18

1.5 Clasificación según el mecanismo de generación de bandas prohibidas 18

1.5.1 Cristales fonónicos por dispersión de Bragg 18

1.5.2 Cristales fonónicos de resonancia local 19

1.6 Transmisión unidireccional 19

1.7 Diodos acústicos 21

CAPÍTULO 2 COMSOL-Multiphysics y DFT 24

2.1 COMSOL Multiphysics 25

2.2 Componentes principales de COMSOL Multiphysics 26

2.2.1 El entorno COMSOL 26

2.2.2 Definición de geometría 26

2.2.3 Mallado y discretización 27

2.2.4 Materiales y propiedades físicas 27

2.2.5 Interfaces físicas 28

2.2.6 Estudios y solucionadores 28

2.2.7 Visualización y análisis de resultados 28

2.3 La interfaz Pressure Acoustics en COMSOL Multiphysics 29

2.3.1 Fundamentos teóricos de la acústica de presión 29

2.3.2 Estudios típicos en la interfaz *Pressure Acoustics* 30

2.4 Método de Elementos Finitos (FEM) 31
2.4.1 Formulación matemática 31
2.4.2 Discretización del dominio 32
2.5 Transformada Discreta de Fourier (DFT) 33
2.5.1 Definición matemática de la Transformada Discreta de Fourier 34
2.5.2 Transformada rápida de Fourier (FFT) 34
CAPÍTULO 3 DETALLES DE SIMULACIÓN 36
3.1 Materiales empleados en la simulación 37
3.2 Descripción general de los cristales fonónicos diseñados 38
3.3 Geometría de los dispersores 39
3.4 Implementación en COMSOL Multiphysics 44
3.4.1 Definición de la geometría 44
3.4.2 Asignación de materiales y condiciones de frontera 45
3.4.3 Generación del mallado 46
3.4.4 Configuración del estudio y obtención de resultados 47
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS 49
4.1 Diodo acústico 1 50
4.2 Diodo acústico 2 55
4.3 Diodo acústico 3 61
4.4 Diodo acústico 4 64
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES 68
Referencias 72

Resumen

En el presente trabajo de tesis se plantea el diseño teórico de un diodo acústico basado en cristales fonónicos (CFNs), para analizar la transmisión unidireccional de ondas de ultrasonido. Para esto se diseñaron arreglos bidimensionales de 20×20 y 10×20 dispersores de acero con geometrías irregulares, los cuales variaron de un cristal a otro, inmersos en agua. El diseño y estudio numérico se llevó a cabo por medio de la plataforma COMSOL Multiphysics, a través de simulación computacional por medio del método de elementos finitos, utilizando el módulo de interacción acústico-sólido. A partir de las simulaciones se obtuvieron espectros de transmisión y mapas de presión de los cristales a diferentes frecuencias.

Para estudiar la transmisión no recíproca de las ondas de ultrasonido al interactuar con los cristales, se simuló su incidencia en una cara del cristal; la frecuencia de las ondas de ultrasonido analizadas cubrió el intervalo de 100 a los 1000 kHz. Posteriormente, se giró el cristal 180° sobre su centro para simular la incidencia de las ondas a través de la cara opuesta del cristal, analizando el mismo intervalo de frecuencias. El análisis permitió identificar, para cada cristal, la región de frecuencias de las bandas prohibidas (bandgaps), es decir, donde no existe transmisión de ondas a través del cristal, así como aquellos intervalos donde su atenuación es significativa. De ello, se identificaron frecuencias a las cuales las ondas se propagan en una dirección, pero se inhibe (o atenúa) su propagación, o se atenúan su potencia transmitida, en la dirección contraria; éste es el principio de operación de un diodo acústico.

Por último, se analizaron los espectros de transmisión y se determinaron las frecuencias a las que se observaba la transmisión no recíproca de las ondas de ultrasonido, logrando observar el efecto de un diodo fonónico.

Introducción

El desarrollo de nuevos materiales y estructuras que tengan características específicas y que permitan el control de diversos parámetros ha aumentado tanto teórica como experimentalmente. Estructuras de interés, capaces de controlar la propagación de ondas acústicas, conocidos como cristales fonónicos (CFNs), han atraído la atención debido a que permiten la manipulación de ondas mecánicas y/o elásticas para permitir, o inhibir su propagación **[1]**.

Un CF se define, en su forma más general, como un arreglo periódico de dispersores de sonido inmersos en una matriz de otro material. Dichas estructuras artificiales han mostrado tener la capacidad de controlar la propagación de ondas mecánicas en varias formas, induciendo diversos fenómenos, entre los que se encuentra la transmisión unidireccional, que ha sido alcanzada mediante diseños que reciben varios nombres: aislantes o rectificadores acústicos, medios no recíprocos o diodos acústicos **[2]**. Independientemente de la terminología, el fenómeno consiste en evitar la simetría en la transmisión de ondas mecánicas, sin embargo, aún no se han descrito por completo las características en cuanto a materiales o geometrías que debe cumplir una estructura para presentar el efecto deseado.

Aunque existen diversos reportes sobre la posibilidad de inducir la propagación unidireccional de ondas mecánicas mediante diodos acústicos diseñados a partir de CFNs, aún se requiere trabajo teórico y experimental que permita optimizar su diseño. Lo anterior se debe a que, la efectividad de un diodo fonónico está en función de los parámetros que lo componen, como el espesor del cristal, y las propiedades materiales y topológicas de sus componentes **[3]**.

En electrónica, un diodo es un dispositivo que permite el flujo unidireccional de electrones, formado por un cristal semiconductor. El cristal conduce una corriente de electrones del lado llamado cátodo, pero no en la dirección opuesta **[4]**. Con base en ello, se puede describir un diodo fonónico como un dispositivo capaz de controlar la transmisión no recíproca de ondas mecánicas, en este caso de ultrasonido, en una dirección específica y no en la opuesta.

Existen reportes sobre el trabajo con diodos acústicos, como el caso en aplicaciones médicas, donde se usa un diodo acústico como método no invasivo para tratar cálculos renales **[5];** o de particular interés para controlar la transmisión de energía acústica en aplicaciones de ultrasonido focalizado para evitar señales no deseadas **[6].** También se encuentran aplicaciones en comunicaciones, que incluyen la construcción de espejos acústicos unidireccionales para evitar que una fuente de ultrasonido sea perturbada por ondas de retroceso o una barrera sónica unidireccional para bloquear el ruido ambiental en una sola dirección **[7].**

Para desarrollar el presente trabajo de tesis, se propone el diseño de cuatro diodos fonónicos hechos a partir de CFNs en dos dimensiones conformados por dispersores de acero asimétricos, periódicamente incrustados en una matriz de agua. Los cristales se diseñaron en la plataforma COMSOL Multiphysics, a partir de donde se obtuvieron los espectros de transmisión acústica, así como los mapas de presión asociados a cada cristal.

En el Capítulo 1 del presente trabajo se introducen los conceptos fundamentales necesarios para contextualizar la investigación realizada. Se define el término cristal fonónico, así como las principales características que lo constituyen, y se presenta su clasificación de acuerdo con sus propiedades físicas, tales como el tamaño de sus componentes y los rangos de frecuencia en los que operan. Asimismo, se describen algunos de los fenómenos más relevantes observados en este tipo de estructuras, con énfasis en la consistencia del fenómeno de transmisión no recíproca de ondas mecánicas.

En el Capítulo 2 se describe la plataforma COMSOL Multiphysics, la cual constituye la herramienta principal donde se desarrolla la totalidad del trabajo numérico y de simulación de esta tesis. Se presentan de manera general los distintos módulos que conforman el software, así como los tipos de estudios numéricos empleados para la resolución de las ecuaciones físicas correspondientes a cada uno de los casos de análisis.

En el Capítulo 3 se detallan los parámetros y las características de las estructuras diseñadas. Se describen los diferentes casos estudiados de diodos acústicos, los cuales están inspirados

en la estructura típica de un cristal fonónico. Los dispersores se encuentran inmersos en una matriz de agua y se analizan distintas configuraciones con diferentes parámetros de red. Las geometrías de los dispersores varían desde polígonos irregulares hasta pentágonos irregulares y triángulos. Todas las estructuras fueron modeladas utilizando la plataforma COMSOL Multiphysics y diseñadas en acero SAE 4340.

Una vez realizados el diseño y los estudios numéricos, y obtenidos los resultados de las simulaciones, en el Capítulo 4 se presentan y discuten los resultados obtenidos. Se lleva a cabo un análisis detallado de los espectros de transmisión correspondientes a los datos registrados en la región de transmisión de la simulación, así como la comparación de los espectros, con el objetivo de evaluar las condiciones bajo las cuales se cumple el efecto de transmisión unidireccional de las ondas ultrasónicas.

Finalmente, en el Capítulo 5 se exponen las conclusiones del presente trabajo, en las cuales se analizan las condiciones necesarias para la obtención de manera satisfactoria de los efectos deseados, así como otros factores que influyen de forma significativa en el comportamiento de la transmisión no recíproca de las ondas acústicas.

Hipótesis

La elección adecuada de la disposición geométrica y las propiedades materiales de los componentes de un CFN conllevará al diseño de un diodo acústico, capaz de controlar la propagación unidireccional de ondas de ultrasonido.

Objetivos

Objetivo general

Analizar la propagación unidireccional de ondas sonoras a través de diodos acústicos diseñados a partir de CFNs con diferentes características geométricas, para establecer las frecuencias para las cuales se cumple dicho fenómeno.

Objetivos Específicos

- Examinar la propagación unidireccional de ondas sonoras en diodos acústicos diseñados a base de CFNs a partir de dos aproximaciones.

- Verificar la propagación unidireccional de ondas sonoras en un diodo conformado por un CFN diseñado con dispersores de sonido asimétricos.

- Interpretar los espectros de transmisión y mapas de presión de los sistemas diseñados, para establecer sus bandas de transmisión acústica y el bandgap asociado, así como la distribución de energía acústica.

- Identificar las frecuencias para las cuales se cumple la transmisión unidireccional en los diodos acústicos analizados.

CAPÍTULO 1 CRISTALES Y ESTRUCTURAS FONÓNICAS

1.1 Definición de un cristal fonónico

En términos generales, los sólidos se clasifican como amorfos y cristalinos. En los sólidos amorfos los átomos que los componen no tienen un orden definido; sin embargo, en los sólidos cristalinos existe un patrón regular, repetitivo y característico en su estructura. Según la Unión Internacional de Cristalografía (IUCr por sus siglas en inglés), un sólido es un cristal si sus átomos, iones y/o moléculas forman, en promedio, una disposición ordenada de largo alcance **[8].**

En otras palabras, podemos concluir que un sólido puede considerarse un cristal o un arreglo cristalino, si los componentes que lo constituyen se encuentran distribuidos y ordenados de forma regular y periódica.

Además, están caracterizados con las siguientes propiedades:

- Homogeneidad: Corresponde a que una propiedad física medida en una porción específica del cristal tiene los mismos valores en cualquier otra, es decir, son uniformes.

- Simetría: Por el hecho de ser periódica la materia cristalina es simétrica.

- Anisotropía: Las distancias entre los elementos constitutivos varía con la dirección, así una propiedad puede dar valores diferentes dependiendo de la dirección en que sea medida.

Esta última característica es de mayor relevancia para el caso que es objeto de estudio en el presente trabajo de tesis, ya que es clave para lograr la transmisión no recíproca de ondas mecánicas. Con ello, un segundo término de gran importancia es el de *fonón*. Este concepto puede describirse a través de la propuesta de Louis de Broglie en 1929, en donde menciona que a una partícula se le puede asociar una longitud de onda y, por lo tanto, propiedades ondulatorias, dando comienzo a la descripción de la dualidad corpuscular-ondulatoria en la mecánica cuántica.

Más adelante, en 1932 el físico ganador de un premio Nobel, Igor Tamm, con su interpretación del movimiento ondulatorio de un sistema de partículas acuñó el término por primera vez, haciendo referencia al trabajo de Broglie. Se eligió el nombre fonón, dado que las vibraciones periódicas con grandes longitudes de onda producen el sonido como lo conocemos, y el termino, que proviene del griego *phonos*, se traduce como "sonido" **[9]**.

Por lo tanto, un fonón es la forma corpuscular de ver la interacción de una cuantificación de energía en un modo normal de vibración. Así como un *fotón* es una partícula cuántica dentro de una onda de luz, un *fonón* es una partícula dentro de una onda de sonido. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que los fonones en realidad son cuasipartículas; la diferencia es que si bien una partícula, puede existir por sí misma, una cuasipartícula no, ya que en este caso necesita un medio de propagación y no es posible que exista en el vacío **[10]**.

De las definiciones anteriores, se puede describir un cristal fonónico como un medio donde los componentes que lo constituyen se encuentran distribuidos y ordenados de forma regular y periódica mediante los cuales se puede controlar la propagación de los fonones. Dicho lo anterior se puede entender el movimiento de un fonón como la vibración de manera específica de un arreglo de varias partículas dentro de un sistema.

1.2 Bandgap acústico

Para entender el comportamiento de los cristales fonónicos, es importante conceptualizar el concepto de *bandgap acústico* que caracteriza a dichas estructuras. Se le llama *bandgap* al rango de frecuencias donde la transmisión de los fonones se atenúa o se impide. Si se inhibe la propagación de ondas, en dicho intervalo de frecuencias, se asigna a ese rango como un bandgap fonónico completo, o incompleto en el caso de que se observe atenuación. Esto es causado por un fenómeno clásico de las ondas mecánicas, en el que, al hacer incidir ondas que se propagan en el medio, los dispersores generan reflexiones que interfieren con las ondas incidentes, fenómeno que ocurre en los primeros periodos del cristal. Según la frecuencia de las ondas incidentes y del espaciamiento entre los dispersores; estas interferencias pueden ser

constructivas o destructivas, al tener una interacción destructiva, se impide su transmisión, mientras que otras son reflejadas o simplemente absorbidas en el medio **[11]**.

Esta propiedad de los cristales fonónicos se puede inducir cambiando las características y los parámetros de las estructuras periódicas y puede ser aprovechada en la transmisión controlada de fonones, como enfocar, colimar, hacer guías de onda o simplemente atenuar frecuencias específicas que sean de interés **[12]**.

Como una característica propia de los cristales fonónicos, el intervalo del bandgap puede ser alterado mediante la modificación de la estructura del cristal, como el tamaño o número de dispersores que lo componen o su disposición.

1.3 Caracterización de las ondas mecánicas.

A continuación, se describen brevemente las características de una onda mecánica, mismas que se pueden observar en la *Figura 1* y se describen las magnitudes relacionadas con la operación de un CFN.

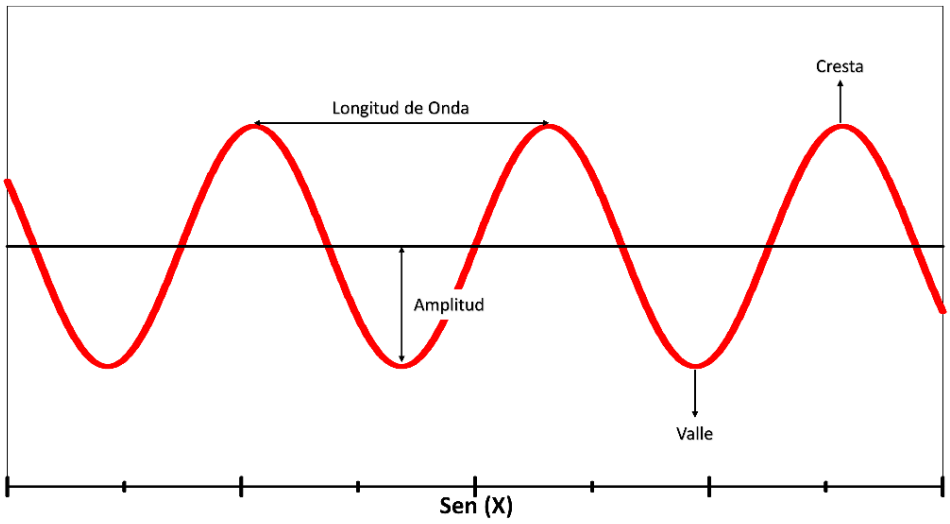


Figura 1 Esquema descriptivo de una onda.

La descripción de las características físicas de una onda implica el análisis de su amplitud, frecuencia y longitud de onda. En base a estas características, se puede describir una onda

con exactitud y estudiar su interacción con diferentes medios. Las ondas de sonido son ondas mecánicas que viajan a través de un medio elástico y debido a esa propiedad, se propagan con cierta libertad a través de este. Adicionalmente, son clasificadas de acuerdo con cómo se relaciona la dirección de movimiento del medio con respecto a su dirección de propagación y pueden ser del tipo transversales y longitudinales.

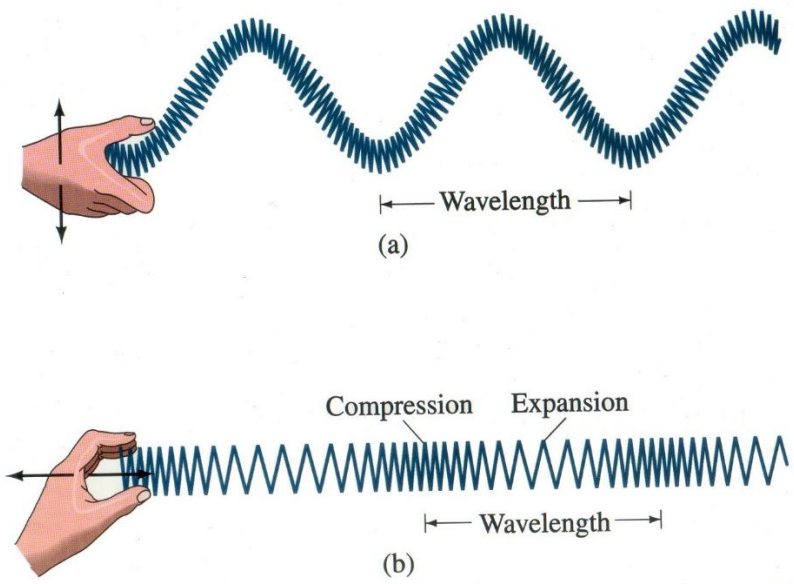


Figura 2 Diagramas ilustrativos de ondas transversales (a) y longitudinales (b)

Adaptado de D. C. Giancoli, Física: Principios con aplicaciones, 6.ª ed. Pearson Educación, 2006, p. 330.

Las ondas transversales son aquellas en las que el movimiento del medio de propagación es perpendicular a la dirección en la que la onda se propaga; es decir, las partículas del medio se desplazan en un ángulo recto a la dirección de propagación, como en el clásico ejemplo de una cuerda que es tensada en uno de sus extremos genera una vibración que viaja a lo largo de la cuerda transmitiendo una onda transversal, como se observa en la *Figura 2(a)*.

Las ondas longitudinales son en las que el movimiento de las partículas del medio es en un ir y venir en sentido de la dirección de propagación; el ejemplo más simple para este caso es un resorte al hacer su movimiento de compresión y expansión *Figura 2(b)*. Adicionalmente, las ondas pueden ser clasificadas como unidimensionales, bidimensionales o tridimensionales, de acuerdo con el número de direcciones en las que se propagan.

También se pueden caracterizar ondas por sus magnitudes como se observa en la *Figura 1*, como la magnitud del desplazamiento máximo desde el punto de referencia, llamada amplitud de la onda. El tiempo necesario para que realice un ciclo completo (una repetición completa del movimiento de la onda propagándose) se llama periodo, y el número de ciclos por unidad de tiempo recibe el nombre de frecuencia, que es el inverso del periodo. El periodo se mide en unidades de tiempo, mientras que la frecuencia se mide en Hertz (*Hz*).

Como se describió con anterioridad, el tamaño de cristal influye en las frecuencias a las que funciona o tiene efecto sobre estas, así que se pueden definir algunos parámetros con esas características.

La velocidad del sonido (***c***) propagándose en el aire a temperatura ambiente, es de *344 m/s*, entonces conociendo la frecuencia de una onda, podemos calcular su longitud de onda (λ), que es la distancia en la que la onda cumple un periodo completo. La longitud de onda cobra especial relevancia para el estudio de la propagación del sonido ya que para considerar un medio donde una onda no pueda propagarse, es necesario considerar este parámetro por el tamaño de la estructura.

Ahora bien, sabiendo que la velocidad está dada por la distancia que recorre la onda en cierta cantidad de tiempo, se puede calcular sabiendo la frecuencia (*f*) de esta. Por lo que se obtiene que la velocidad está dada por:

$$c = \lambda * f \tag{1}$$

Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, la velocidad del sonido es una constante, por lo que para obtener la longitud de onda de una onda cuya frecuencia es conocida, queda la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{2}$$

Así entonces, para ejemplificar, una onda con una frecuencia de *2,000 Hz* transmitiéndose en el aire a temperatura ambiente, la longitud de onda es la siguiente:

$$\lambda = \frac{344m/s}{2{,}000Hz} = 0.172m$$

Así, la longitud de onda de una onda de sonido con una frecuencia de 2,000 *Hz* es de 0.172 *m*.

Entonces, es bien sabido que el rango de frecuencia audible para el oído humano se encuentra en el intervalo de *20* a *20,000 Hz,* pero más cómodamente de los *2,000* a los *5,000 Hz*. Además, que el infrasonido se encuentra por debajo de los *20 Hz* y el conocido como ultrasonido está por encima de los *20,000 Hz*. Entonces, sabiendo la relación para conocer la longitud de onda del sonido propagándose en el aire se tiene que la longitud de onda del espectro audible va de los *17 mm* a los *17 m;* y como dicha relación corresponde a un cociente, se observa que mientras más alta es la frecuencia, menor es la longitud de onda, haciendo que los sonidos en las frecuencias graves son más difíciles de aislar como se observa en la *Figura 3*.

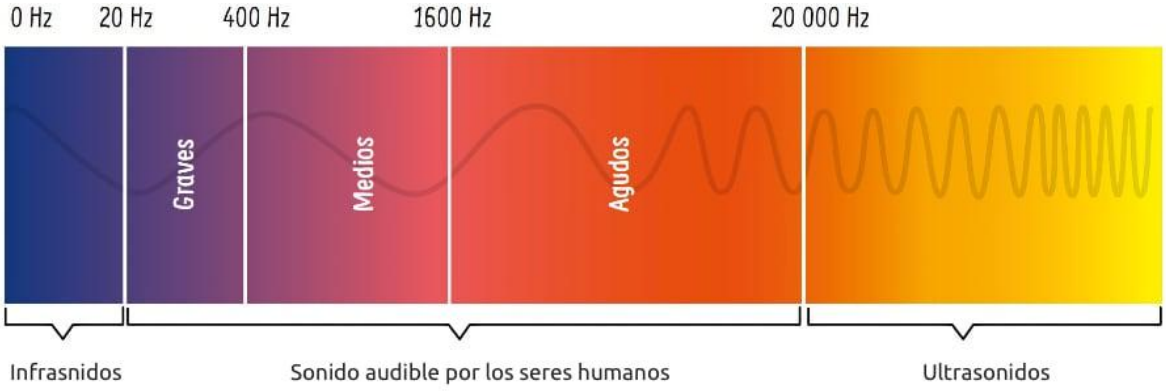


Figura 3 Diagrama ilustrativo del espectro audible y el tamaño de su longitud de onda. Adaptado de "El sonido y sus propiedades," Física Net. Disponible en: fisicanet.com.ar

Con base en lo anterior, se concluye que en esta ocasión el tamaño si importa, hablando de ondas y su transmisión; ya que, si se pretende trabajar con el aislamiento de frecuencias que

van entre los *20* y los *400 Hz*, necesitaríamos dispositivos que interfirieran en su transmisión en ese mismo orden de magnitud, que va desde pocos centímetros, hasta los *17* metros.

1.4 Clasificación de cristales fonónicos atendiendo su frecuencia y tamaño.

Los CFN pueden variar sus propiedades y características con base a su composición, diseño, materiales o tamaño; y eso determina las frecuencias de las ondas que pueden manejar.

Una de las limitaciones de operación de los cristales fonónicos son los rangos de frecuencia de operación, ya que la longitud de onda que incida en el cristal es determinante para sus características, lo que depende de su tamaño, así como de sus componentes internos.

Desde el punto de vista espectral, los cristales fonónicos pueden clasificarse de manera general en dos grandes categorías: cristales fonónicos para el espectro audible y cristales fonónicos para el régimen ultrasónico.

1.4.1 Clasificación en el Rango audible

Los CFN en el rango audible se utilizan principalmente en aplicaciones de aislamiento acústico, control de ruido y absorción selectiva, como barreras acústicas avanzadas, paneles de cancelación pasiva y superficies arquitectónicas inteligentes **[13,14]**. En estos sistemas, las bandas prohibidas se generan principalmente por dispersión de Bragg, donde la condición de interferencia destructiva se cumple cuando la periodicidad del cristal es del mismo orden que la mitad de la longitud de onda incidente **[15]**.

Ejemplos típicos incluyen arreglos periódicos de cilindros sólidos en aire o inclusiones huecas en matrices poliméricas, los cuales pueden programarse para atenuar frecuencias específicas del ruido ambiental, como el tráfico o maquinaria industrial **[14,16]**.

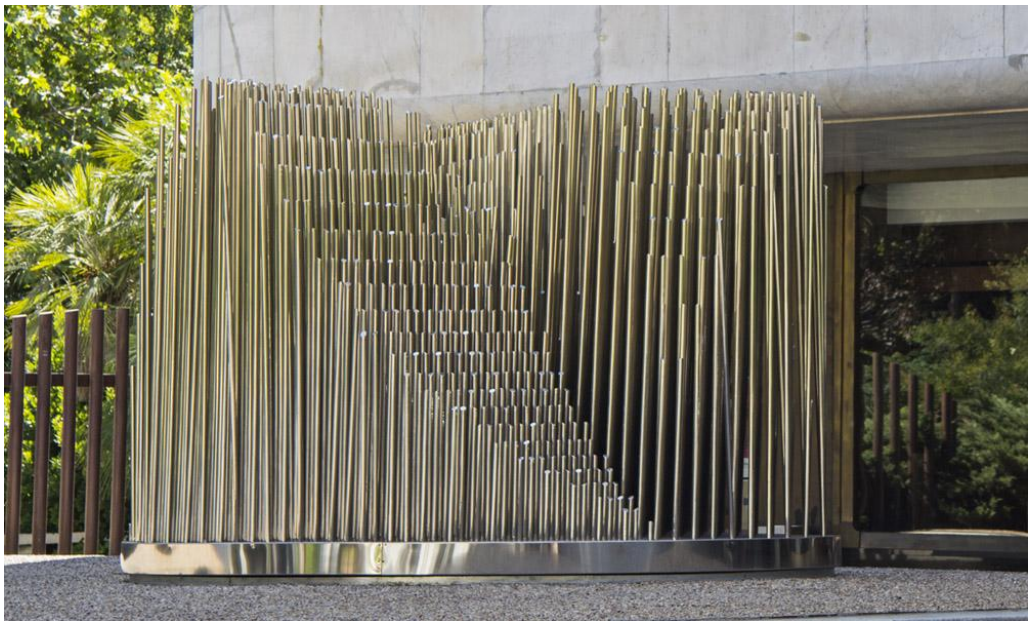


Figura 4 "El Órgano", escultura de Eusebio Sempere en la que se muestran efectos de un cristal fonónico. Obtenido de Referencia [17]

La *Figura 4* corresponde a una escultura, que actualmente se encuentra en la fundación Juan March; es una estructura que consiste en una distribución periódica de cilindros huecos de acero con un diámetro de *2.9 cm* y una celda unitaria de *10 cm*, colocados en una plataforma circular de *4 m* de diámetro. En esta estructura fue medida la atenuación del sonido, observándose que, dentro de un rango de frecuencias entre *1,500* y *4,500 Hz,* existían altas y bajas en la potencia de transmisión. Dada la periodicidad de la disposición de los cilindros, fue posible obtener el bandgap que le caracteriza, el cual se identificó en un rango de *2,500* a *3,000 Hz*, y el valor máximo de atenuación fue determinado a una frecuencia de 1,670 Hz, que corresponde a interferencias destructivas generadas por la estructura **[17]**.

Como se puede observar en la descripción anterior, para operar en el rango de frecuencias audibles, es necesario contar con estructuras de gran tamaño, que correspondan al tamaño de la longitud de onda de las frecuencias a analizar. Se ha logrado identificar como un fenómeno general que cuando la longitud de onda es del mismo orden que el tamaño del cristal fonónico, es cuando se observan los fenómenos de *bandgap* de una forma más marcada. Esa observación se debe también a la diferencia de la velocidad de las ondas acústicas por el cambio de densidad entre los dispersores y el medio de propagación.

1.4.2 Clasificación en el rango de ultrasonidos

En el régimen ultrasónico, correspondiente a frecuencias mayores a 20 kHz, los cristales fonónicos presentan dimensiones mucho más reducidas, con periodicidades del orden de milímetros a micrómetros, dependiendo de la frecuencia de operación. Estos sistemas han cobrado especial importancia en áreas como la instrumentación médica, la caracterización de materiales y el desarrollo de dispositivos no recíprocos **[18,19]**. Por ejemplo, se ha reportado ampliamente que un cristal fonónico con la posibilidad de modular ondas de ultrasonido con frecuencias entre 300 – 600 kHz, debe estar conformado por dispersores de sonido de acero, de 1.6 mm de diámetro, dispuestos en un arreglo cuadrado, con un parámetro de red de 2 mm, mientras se encuentran inmersos en agua. En este cristal, por ejemplo, el *bandgap* fonónico se encuentra en una región de frecuencias que va de 380 – 475 kHz **[20-23].**

A diferencia del régimen audible, en el ultrasonido no solo domina la dispersión de Bragg, sino también los efectos de resonancia local, donde inclusiones resonantes (por ejemplo, núcleos metálicos recubiertos por polímeros) generan bandas prohibidas a longitudes de onda mucho mayores que la periodicidad estructural **[23].** Esta característica permite diseñar CFN compactos y altamente eficientes en rangos de frecuencia específicos.

En el contexto de los diodos acústicos, los cristales fonónicos ultrasónicos son especialmente relevantes, ya que pueden combinarse con materiales no lineales, gradientes estructurales o campos externos para inducir transmisión asimétrica o unidireccional **[24,25].**

1.5 Clasificación según el mecanismo de generación de bandas prohibidas

Otra forma fundamental de clasificar los cristales fonónicos, aplicable tanto al espectro audible como al ultrasónico, se basa en el mecanismo físico responsable de las bandas prohibidas.

1.5.1 Cristales fonónicos por dispersión de Bragg

Estos cristales dependen de la interferencia múltiple de ondas dispersadas por la periodicidad del medio. Para que el efecto sea dominante, la constante o parámetro de red del cristal debe

ser comparable a la longitud de onda de la señal acústica **[15, 26].** Este tipo de CFN es común en aplicaciones audibles y en ultrasonido de baja frecuencia.

1.5.2 Cristales fonónicos de resonancia local

Los CFN de resonancia local emplean inclusiones que actúan como resonadores mecánicos, permitiendo la apertura de bandas prohibidas incluso cuando la longitud de onda es mucho mayor que la celda unitaria **[23].** Estos sistemas son particularmente atractivos para aplicaciones ultrasónicas compactas y para el diseño de elementos no recíprocos.

La correcta clasificación de los cristales fonónicos en función de su régimen espectral y mecanismo físico que origina el *bandgap* que lo caracteriza, es un paso clave para el diseño de diodos acústicos con la intención de controlar la transmisión unidireccional. Así, la comprensión detallada de estas categorías proporciona la teoría necesaria para los análisis presentados en los capítulos posteriores de esta tesis.

1.6 Transmisión unidireccional

Uno de los objetivos más relevantes en el estudio de los cristales fonónicos es la obtención de transmisión unidireccional de ondas mecánicas, es decir, la capacidad de permitir el paso de energía ondulatoria preferentemente en una sola dirección mientras se atenúa o bloquea su propagación en la dirección opuesta. Este comportamiento rompe con el principio de reciprocidad presente en la mayoría de los medios elásticos convencionales y abre la posibilidad de desarrollar dispositivos análogos a los diodos electrónicos, pero aplicados a ondas acústicas, vibracionales o térmicas **[24, 27].**

En medios recíprocos, la transmisión de una onda entre dos puntos es independiente del sentido de propagación; sin embargo, para lograr transmisión unidireccional es necesario introducir mecanismos que rompan dicha simetría. En cristales fonónicos, esta ruptura puede alcanzarse mediante la anisotropía estructural, la incorporación de asimetría geométrica, el

uso de elementos resonantes o la aplicación de perturbaciones externas que modifiquen dinámicamente las condiciones de propagación **[28].**

Desde un punto de vista físico, la transmisión unidireccional se basa en el control del patrón de interferencia generado dentro del cristal. Al diseñar una estructura fonónica con distinta respuesta interferencial dependiendo de la dirección de incidencia, es posible inducir una superposición constructiva para una dirección específica, mientras que en la dirección opuesta predomina una interferencia destructiva. En este caso, la energía de la onda incidente se disipa dentro del cristal o se refleja, dando lugar a una transmisión altamente direccional (*Figura 5*) **[29,30].**

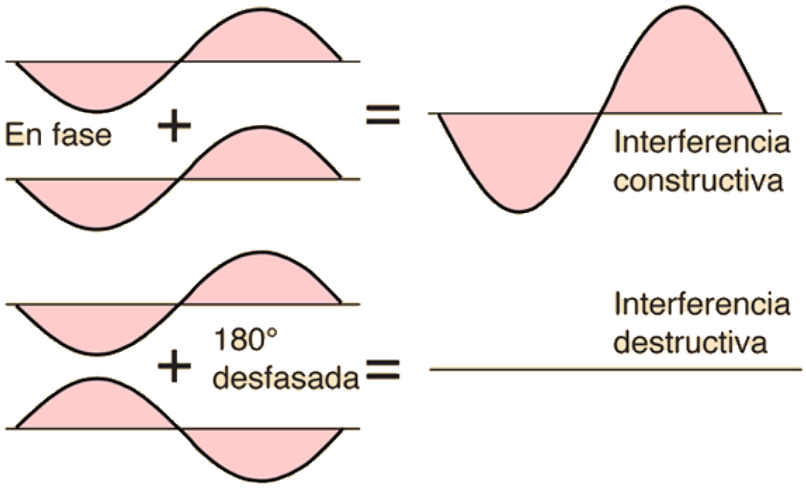


Figura 5 Esquema ilustrativo de interferencias constructivas y destructivas en ondas.
Adaptado de C. R. Nave, "Interferencia del Sonido," HyperPhysics. Disponible en: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Sound/interf.html.

La anisotropía juega un papel fundamental en este fenómeno, ya que permite que la relación de dispersión dependa fuertemente de la dirección de propagación. En cristales fonónicos anisotrópicos, una misma frecuencia puede encontrarse dentro de una banda permitida para una dirección cristalográfica y, simultáneamente, dentro de una banda prohibida para la dirección contraria. Esta propiedad hace posible el diseño de bandas prohibidas direccionales, que constituyen la base teórica de la transmisión unidireccional pasiva, sin necesidad de fuentes externas de energía **[31,32].**

La transmisión unidireccional también puede interpretarse desde el punto de vista de la dinámica no lineal de ondas. En sistemas fonónicos no lineales, el principio de superposición deja de ser válido, y la respuesta del medio depende de la amplitud y la dirección de la excitación. Este comportamiento permite la aparición de estados de transmisión preferencial, en los cuales una onda de determinada intensidad puede atravesar el cristal en una dirección, mientras que una excitación equivalente en sentido contrario es reflejada o absorbida **[33].**

El impacto tecnológico de la transmisión unidireccional en cristales fonónicos es significativo. Entre sus principales aplicaciones potenciales se encuentran el aislamiento de vibraciones mecánicas, el diseño de filtros acústicos direccionales, la protección de dispositivos sensibles ante retroalimentación vibracional y el control del flujo de calor mediante fonones en sistemas micro y nanoestructurados **[28,34,35].** Estas aplicaciones posicionan a los cristales fonónicos como materiales estratégicos en el desarrollo de metamateriales acústicos de nueva generación.

1.7 Diodos acústicos.

El término diodo tiene su origen en la electrónica y se utiliza para describir un dispositivo que permite la conducción de corriente eléctrica predominantemente en un solo sentido, bloqueando su transmisión en la dirección opuesta. Este comportamiento unidireccional se obtiene tradicionalmente mediante el uso de materiales semiconductores, cuya estructura cristalina introduce una asimetría en el transporte de portadores de carga. Los primeros antecedentes experimentales de este fenómeno se remontan a 1873, cuando Frederick Guthrie observó que un metal caliente descargaba su carga eléctrica únicamente cuando esta era negativa, mientras que no se producía descarga apreciable para cargas positivas. Este experimento evidenció por primera vez la posibilidad de inducir un flujo de corriente eléctrica direccional mediante efectos físicos asociados a la emisión termoiónica **[36].**

Posteriormente, en 1883, Thomas A. Edison reportó un efecto similar durante sus investigaciones sobre lámparas incandescentes de vacío. Edison observó que los electrones emitidos por el filamento caliente podían desplazarse hacia una placa metálica únicamente

cuando esta se encontraba polarizada positivamente, dando lugar a un fenómeno de conducción asimétrica hoy conocido como efecto Edison. Este descubrimiento fue crucial para el desarrollo del diodo de vacío y, en general, para la consolidación del principio de rectificación eléctrica en dispositivos electrónicos tempranos **[37,38].**

El comportamiento del diodo electrónico ha servido como referencia conceptual para definir dispositivos en otros dominios físicos que reproducen el fenómeno de flujo unidireccional. En este sentido, el término diodo acústico se emplea para describir un dispositivo capaz de permitir la propagación de ondas acústicas en una dirección preferencial, mientras atenúa o suprime significativamente su transmisión en el sentido opuesto. Desde un punto de vista microscópico, este proceso puede interpretarse como un flujo direccional de fonones, los cuantos de energía asociados a las vibraciones mecánicas del medio **[39].**

La implementación de diodos acústicos representa un desafío particular, ya que la propagación del sonido en medios acústicos lineales, pasivos y estacionarios es inherentemente recíproca. Por ello, el diseño de estos dispositivos requiere la introducción de mecanismos que rompan dicha reciprocidad, ya sea mediante no linealidades, asimetrías geométricas o variaciones espaciales en las propiedades físicas del medio **[40].**

Un diodo acústico es un dispositivo que presenta coeficientes de transmisión diferentes dependiendo del sentido de propagación de una onda sonora. En su forma más simple, está compuesto por tres elementos fundamentales:

- Un medio no lineal, responsable de la generación de armónicos y la dependencia de la transmisión con la amplitud.
- Un elemento filtrante, que permite o bloquea frecuencias específicas.
- Una estructura asimétrica, que favorece la ruptura de la reciprocidad.

Cuando una onda acústica incide en el sistema desde la dirección directa, la señal es transmitida eficientemente. En sentido inverso, la interacción con el medio no lineal y el filtro

provoca atenuación, conversión de frecuencia o reflexión parcial, reduciendo significativamente la transmisión total **[41].**

Uno de los primeros diseños funcionales de un diodo acústico fue propuesto por Liang, Yuan y Cheng, quienes demostraron teórica y experimentalmente la transmisión unidireccional del sonido utilizando materiales no lineales combinados con filtros acústicos **[39].** Posteriormente, se desarrollaron estructuras basadas en metamateriales acústicos, los cuales permitieron un mayor control de la dispersión y la impedancia acústica **[42].**

Estos avances marcaron el inicio de un campo emergente dedicado a la acústica no recíproca, con aplicaciones que van desde el guiado direccional del sonido hasta el diseño de aisladores acústicos avanzados.

CAPÍTULO 2 COMSOL-Multiphysics y DFT

El trabajo numérico de esta tesis se apoya en dos herramientas: la plataforma COMSOL Multiphysics, con la que se diseñaron y simularon los diodos acústicos, y la Transformada Discreta de Fourier (DFT), cuyo fundamento matemático sustenta el análisis espectral que hace posible interpretar los resultados de las simulaciones. En este capítulo se describe cada una de ellas con el nivel de detalle necesario para comprender cómo se utilizaron a lo largo del trabajo.

2.1 COMSOL Multiphysics

Una forma sencilla de describir COMSOL Multiphysics sería que es como un laboratorio virtual: en lugar de construir una muestra física y medir sus variables, se define la geometría del sistema, se asignan las propiedades de los materiales y se establecen las condiciones bajo las que se quiere estudiar el fenómeno. El programa se encarga de resolver numéricamente las ecuaciones físicas correspondientes y de entregar los resultados en forma de gráficas, mapas de campo y tablas de datos.

Detrás de esa interfaz, COMSOL aplica el Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés), que consiste en dividir el dominio de simulación en pequeñas regiones llamadas elementos, resolver las ecuaciones físicas en cada una de ellas y ensamblar la solución global. Esta estrategia permite tratar geometrías complejas y materiales con propiedades heterogéneas, condiciones que serían muy difíciles de manejar analíticamente.

La plataforma está organizada en módulos especializados según el área de física que se quiere estudiar. Para el presente trabajo se utilizó el módulo de *Pressure Acoustics* (Acústica de Presión), que modela la propagación de ondas acústicas en fluidos en el régimen lineal, tomando como variable dependiente la presión acústica p.

La información presentada en este capítulo se basa principalmente en *COMSOL Multiphysics Reference Manual* versión 5.3A y la guía de usuario del módulo de acústica **[43,44],** así como en literatura estándar sobre métodos numéricos y acústica lineal.

2.2 Componentes principales de COMSOL Multiphysics

2.2.1 El entorno COMSOL

COMSOL proporciona un entorno unificado en el que el usuario puede acceder a todas las etapas del modelado. La interfaz se organiza en varias ventanas principales, entre las que destacan el *Constructor de Modelos*, la ventana de Configuración, la ventana Gráficos y las ventanas de resultados y mensajes.

El constructor de modelos presenta el modelo como una estructura jerárquica en forma de árbol. Cada nodo del árbol representa un elemento del modelo, como la geometría, la malla, una interfaz física o un estudio (*Figura 6*). Esta estructura facilita la comprensión del modelo y permite modificar de forma local cualquier componente sin afectar innecesariamente a los demás.

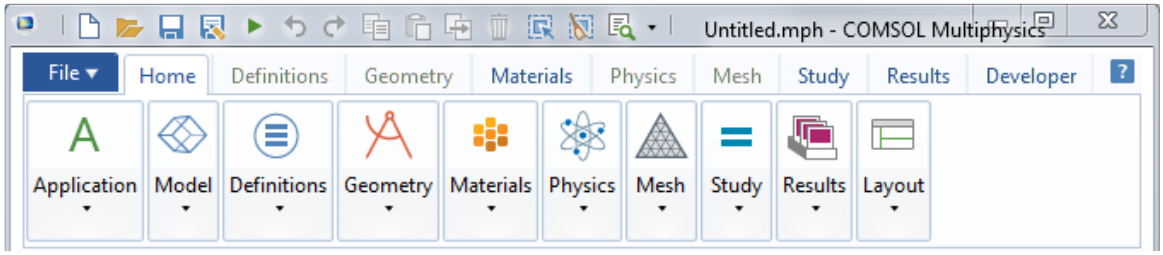


Figura 6 Interfaz principal de COMSOL Multiphysics.

2.2.2 Definición de geometría

La geometría es uno de los elementos fundamentales de cualquier modelo numérico. COMSOL permite trabajar en una, dos o tres dimensiones espaciales. La geometría puede construirse directamente en el entorno del software mediante primitivas como bloques, cilindros, esferas y polígonos, o bien importarse desde programas de diseño asistido por computadora.

El software utiliza un enfoque de geometría constructiva sólida (*Constructive Solid Geometry*, CSG), en el que las formas complejas se generan mediante combinaciones de

operaciones booleanas como unión, intersección y diferencia. Además, COMSOL permite definir planos de trabajo (*work planes*) para facilitar la construcción de geometrías bidimensionales dentro de modelos tridimensionales.

2.2.3 Mallado y discretización

Una vez definida la geometría, el dominio debe discretizarse en elementos finitos. COMSOL ofrece herramientas avanzadas para la generación de mallas estructuradas y no estructuradas, adaptadas a problemas en 1D, 2D y 3D. Los tipos de elementos incluyen triángulos, cuadriláteros, tetraedros, hexaedros y prismas.

La calidad de la malla es crucial para la precisión y estabilidad de la solución numérica. COMSOL proporciona indicadores de calidad de malla y opciones de refinamiento local, así como técnicas de refinamiento adaptativo basadas en estimaciones del error numérico. En problemas de propagación de ondas, como los acústicos, es especialmente importante que el tamaño de los elementos sea suficientemente pequeño en relación con la longitud de onda del fenómeno estudiado.

2.2.4 Materiales y propiedades físicas

El nodo de “Materiales” permite asignar propiedades físicas a cada dominio del modelo. COMSOL incluye extensas bibliotecas de materiales con propiedades dependientes de la temperatura, presión u otras variables. El usuario también puede definir materiales personalizados introduciendo directamente las expresiones matemáticas correspondientes.

En modelos multifísicos, las propiedades de los materiales suelen desempeñar un papel central en el acoplamiento entre distintas interfaces físicas. Por ejemplo, la densidad y la velocidad del sonido son parámetros clave tanto en acústica como en dinámica de fluidos.

2.2.5 Interfaces físicas

Las interfaces físicas constituyen el núcleo conceptual de COMSOL. Cada interfaz representa un conjunto de ecuaciones gobernantes, variables dependientes y condiciones de frontera asociadas a un fenómeno físico específico. Las interfaces se agrupan por áreas temáticas, como electromagnetismo, mecánica de sólidos, transferencia de calor y acústica.

Una ventaja fundamental de COMSOL es la posibilidad de acoplar múltiples interfaces físicas dentro de un mismo modelo, permitiendo estudiar interacciones complejas como la termoacústica o la vibroacústica. Estos acoplamientos pueden definirse de manera explícita mediante nodos multifísicos o de forma implícita a través de variables compartidas.

2.2.6 Estudios y solucionadores

El nodo de "Estudio" define el tipo de análisis numérico a realizar. COMSOL ofrece una amplia gama de estudios, entre los que se incluyen análisis estacionarios, dependientes del tiempo, en el dominio de la frecuencia y de autovalores. Cada estudio se asocia a un conjunto de solucionadores numéricos que se encargan de resolver el sistema algebraico resultante de la discretización.

El software incorpora tanto solucionadores directos como iterativos, así como técnicas de precondicionamiento y métodos multimalla. Además, COMSOL permite realizar barridos paramétricos y cálculos en paralelo, lo que resulta especialmente útil en estudios de optimización o análisis de sensibilidad.

2.2.7 Visualización y análisis de resultados

Una vez obtenida la solución, COMSOL proporciona herramientas avanzadas de visualización para analizar los resultados. Estas incluyen gráficos en 1D, 2D y 3D, mapas de contorno, cortes y animaciones. Asimismo, es posible calcular magnitudes derivadas como promedios, integrales y valores máximos o mínimos sobre regiones específicas del dominio.

Los resultados pueden exportarse en diversos formatos para su análisis posterior o para la elaboración de informes. COMSOL también incluye un generador de reportes que permite documentar automáticamente el modelo y sus resultados.

2.3 La interfaz Pressure Acoustics en COMSOL Multiphysics

La interfaz *Pressure Acoustics* forma parte del módulo de Acústica de COMSOL y está diseñada para modelar la propagación de ondas acústicas en fluidos en el régimen lineal. Esta interfaz utiliza como variable dependiente principal la presión acústica y resuelve la ecuación de Helmholtz o su versión dependiente del tiempo, según el tipo de estudio seleccionado.

La interfaz está disponible en formulaciones 1D, 2D, 3D y axisimétrica, lo que permite adaptarla a una amplia variedad de problemas físicos. Es especialmente adecuada para el análisis de campos acústicos en aire o agua, como los generados por altavoces, cavidades resonantes o fuentes puntuales.

2.3.1 Fundamentos teóricos de la acústica de presión

La acústica lineal estudia la propagación de pequeñas perturbaciones de presión en un medio continuo, generalmente un fluido. Estas perturbaciones se describen a partir de las ecuaciones de conservación de la masa y del momento, linealizadas alrededor de un estado de equilibrio. Bajo ciertas hipótesis, como pequeñas amplitudes y ausencia de efectos no lineales, se obtiene la ecuación de ondas acústicas.

En un fluido homogéneo y sin pérdidas, la ecuación de onda para la presión acústica p puede escribirse como:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \qquad (3)$$

Donde c es la velocidad del sonido en el medio.

En el dominio de la frecuencia, suponiendo una dependencia temporal armónica de la forma $e^{i\omega t}$, esta ecuación se transforma en la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \tag{4}$$

donde $k = \frac{\omega}{c}$ es el número de onda.

Estas ecuaciones constituyen la base teórica de la interfaz *Pressure Acoustics* en COMSOL.

Adicionalmente, COMSOL permite incluir efectos de pérdidas mediante términos adicionales que modelan la atenuación viscosa y térmica, así como la absorción en medios porosos. Estas extensiones son fundamentales para describir de manera realista muchos sistemas acústicos.

2.3.2 Estudios típicos en la interfaz *Pressure Acoustics*

Los estudios más comunes asociados a la interfaz *Pressure Acoustics* son:

- ***Frequency Domain***: Se utiliza para analizar la respuesta del sistema a excitaciones armónicas.

- ***Eigenfrequency***: Permite calcular las frecuencias propias y los modos resonantes de cavidades acústicas.

Estos estudios son fundamentales en el diseño y análisis de dispositivos acústicos, como resonadores y silenciadores. Además, el software ofrece herramientas para calcular campos lejanos, niveles de presión sonora, directividad y patrones de radiación, lo cual es de gran importancia en aplicaciones de ingeniería acústica.

2.4 Método de Elementos Finitos (FEM)

El Método de Elementos Finitos (*Finite Element Method, FEM*) es una de las herramientas numéricas más empleadas para resolver ecuaciones diferenciales parciales en geometrías complejas. Su origen moderno se remonta a los trabajos seminales de Courant (1943) y a los desarrollos en ingeniería aeroespacial durante las décadas de 1950 y 1960, que culminaron en las formulaciones sistemáticas de Zienkiewicz y Cheung **[45,46].** Desde entonces, el método ha sido adoptado en disciplinas que incluyen campos estructurales, acústicos, térmicos, electromagnéticos, sísmicos y fluidodinámicos.

El FEM destaca por su versatilidad, estabilidad y robustez numérica, permitiendo tratar dominios irregulares, materiales heterogéneos e interfaces complejas. Su formulación variacional le proporciona ventajas respecto a otros métodos como diferencias finitas (FDM) o volúmenes finitos (FVM), especialmente en problemas con derivadas espaciales de orden elevado o condiciones de frontera sofisticadas. Esta formulación permite aproximar el dominio continuo mediante una discretización en elementos pequeños, normalmente triangulares o cuadrilaterales en 2D, y tetraédricos o hexaédricos en 3D **[47].**

2.4.1 Formulación matemática

El punto de partida del FEM es una ecuación diferencial parcial definida sobre un dominio (Ω) con condiciones de frontera adecuadas. De manera general, una EDP lineal elíptica puede expresarse como:

$$\mathcal{L}(u) = f \quad \text{en } \Omega \tag{5}$$

En donde:

- (u) es la incógnita (temperatura, presión, desplazamiento, potencial, etc.),
- $(\mathcal{L})$ es un operador diferencial,
- (f) representa una fuente o término de carga.

Con condiciones de Dirichlet y/o Neumann en la frontera $(\partial\Omega)$.

El paso clave es convertir la ecuación en su formulación débil, equivalente a multiplicarla por una función de prueba (v) y luego integrar sobre (Ω):

$$\int_{\Omega} v\,,\mathcal{L}(u),d\Omega = \int_{\Omega} v\,,f\,,d\Omega \tag{6}$$

La formulación débil reduce el orden de las derivadas, permitiendo usar funciones base más simples. Además, proporciona estabilidad numérica y permite manejar condiciones de frontera naturales. Esto conduce a la forma bilineal:

$$a(u,v) = l(v) \tag{7}$$

Que deberá satisfacer la solución aproximada.

2.4.2 Discretización del dominio

El dominio (Ω) se divide en **elementos finitos**, típicamente:

- Triangular / cuadrilateral (2D),
- Tetraédrico / hexaédrico (3D).

Cada elemento posee nodos donde se evalúan las incógnitas, y las funciones de forma interpolan los valores entre nodos.

La discretización permite transformar el problema continuo en un sistema algebraico:

$$Ku = F \tag{8}$$

donde:

- (K) es la matriz de rigidez,

- (u) es el vector de incógnitas nodales,
- (F) es el vector de cargas o fuentes.

El ensamblaje global se realiza sumando las contribuciones de todos los elementos según su conectividad espacial **[45]**.

En cada elemento se definen nodos en los cuales se evalúa la solución aproximada. La calidad de esta discretización es fundamental para la precisión del método; mallas finas mejoran la resolución, pero aumentan el costo computacional **[48].**

2.5 Transformada Discreta de Fourier (DFT)

La Transformada Discreta de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés) es una herramienta fundamental en el análisis de señales y sistemas discretos. Su importancia radica en permitir la transición entre los dominios temporal y frecuencial, posibilitando el estudio espectral de señales digitalizadas. En física, la DFT tiene aplicaciones que abarcan desde la espectroscopía digital hasta el análisis numérico de ecuaciones diferenciales y la simulación de sistemas dinámicos **[49,50].**

En el estudio de la propagación de ondas de ultrasonido a través de estructuras periódicas como los cristales fonónicos, resulta fundamental analizar la señal tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. La caracterización de fenómenos como bandas prohibidas y efectos de rectificación acústica requiere herramientas matemáticas capaces de descomponer una señal temporal en sus componentes espectrales **[49,51].**

La Transformada de Fourier continua describe la relación entre una señal en el dominio del tiempo y su representación en el dominio de la frecuencia. Esta relación es fundamental en sistemas físicos donde la respuesta depende de la excitación frecuencial, como ocurre en materiales periódicos y metamateriales acústicos **[52,53].**

Sin embargo, en aplicaciones prácticas las señales son muestreadas y almacenadas de forma discreta y durante intervalos de tiempo finitos. Este proceso de muestreo conduce al uso de

transformadas discretas, siendo la DFT la herramienta más utilizada para el análisis frecuencial de señales digitales **[49].**

2.5.1 Definición matemática de la Transformada Discreta de Fourier

La DFT puede interpretarse como la proyección de una señal discreta sobre una base ortogonal de funciones complejas sinusoidales **[54].**

Dada una señal discreta ($x[n]$) de longitud (N), la DFT está definida como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi nk/N}, \qquad k = 0,1, \dots, N-1 \tag{9}$$

donde ($X[k]$) representa la contribución compleja de la componente frecuencial correspondiente al índice (k).

La expresión inversa, conocida como Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT), permite recuperar la señal original en el dominio del tiempo:

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi nk/N} \tag{10}$$

Estas expresiones demuestran que la DFT permite una representación completa de la señal, conservando tanto información de amplitud como de fase.

2.5.2 Transformada rápida de Fourier (FFT)

El cálculo directo de la DFT presenta una complejidad computacional del orden de $O(N^2)$, lo cual limita su aplicación en señales extensas, además de ser costoso computacionalmente. El desarrollo del algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) por Cooley y Tukey en 1965 **[55]** revolucionó el análisis numérico al reducir la complejidad a $O(N \log N)$.

El método consiste en dividir la DFT original en dos DFT de tamaño ($N/2$), una para índices pares y otra para índices impares. La recombinación de estos índices se realiza empleando los llamados *twiddle factors* (factores de giro):

$$W_N^k = e^{\left\{-j\frac{2\pi k}{N}\right\}} \tag{11}$$

Debido a su eficiencia, la FFT constituye la implementación práctica de la DFT en el procesamiento numérico de las señales.

Por consiguiente, se puede decir que la Transformada Discreta de Fourier es una herramienta fundamental para el análisis frecuencial de ondas ultrasónicas en cristales fonónicos. Su aplicación permite detectar bandas prohibidas y analizar fenómenos no lineales **[39,53].**

Por lo que el manejo adecuado de la DFT y la FFT resulta esencial para sustentar cuantitativamente los resultados presentados en los capítulos siguientes de esta tesis.

CAPÍTULO 3 DETALLES DE SIMULACIÓN

En el presente capítulo se describen detalladamente las características de los dispersores diseñados para el estudio de la transmisión unidireccional de ondas de ultrasonido. Se especifican los materiales empleados, las geometrías de los dispersores que conforman cada diodo acústico, los parámetros de red utilizados y el procedimiento general seguido en la plataforma COMSOL Multiphysics para llevar a cabo las simulaciones numéricas.

3.1 Materiales empleados en la simulación

Los cristales fonónicos diseñados en el presente trabajo están conformados por dispersores de acero SAE 4340, cuadráticamente distribuidos en una matriz de agua. La elección de estos materiales responde a la marcada diferencia en sus impedancias acústicas, lo que favorece la generación de reflexiones en las interfaces entre ambos medios y, por lo tanto, la formación de bandgaps en el espectro de transmisión acústica.

Las propiedades físicas relevantes de ambos materiales, utilizadas como parámetros de entrada en COMSOL Multiphysics, se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1 Propiedades físicas de los materiales empleados en las simulaciones.

Material	**Densidad** $(\boldsymbol{kg/m^3})$	**Velocidad del sonido** $(\boldsymbol{m/s})$	**Módulo de Young** $(\boldsymbol{GPa})$
Acero SAE 4340	7850	5760	205
Agua	1000	1481	–

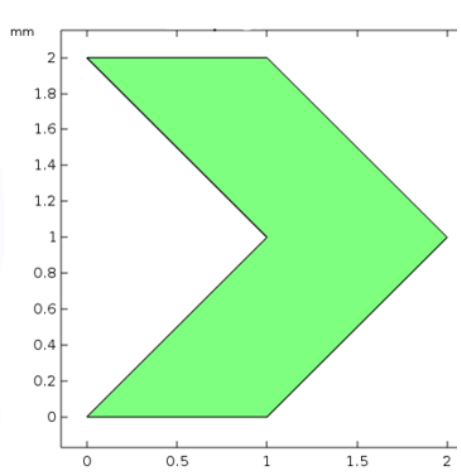
El acero SAE 4340 fue seleccionado como material de los dispersores debido a su elevada densidad y rigidez mecánica en comparación con el agua, propiedades que favorecen la dispersión de las ondas acústicas incidentes. El agua, por su parte, constituye el medio de propagación o matriz del cristal fonónico, y sus propiedades acústicas a temperatura ambiente $(20\ °C)$ corresponden a los valores reportados en la literatura. Estos materiales, y sus propiedades, están predefinidos en la plataforma COMSOL.

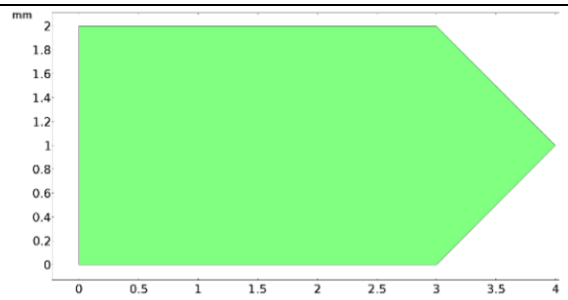
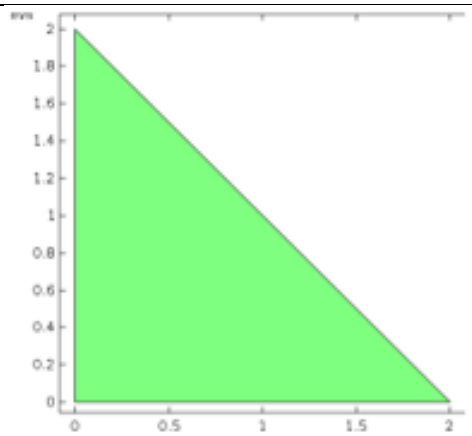
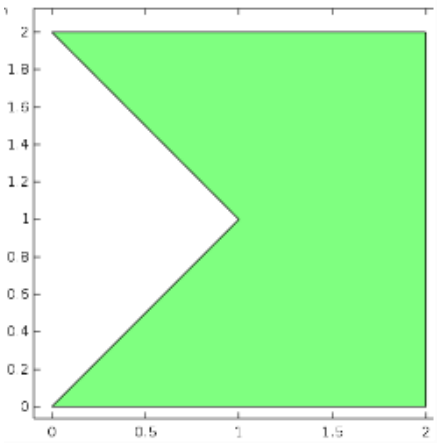
3.2 Descripción general de los cristales fonónicos diseñados

Se diseñaron cuatro diodos acústicos con diferentes geometrías de dispersores, todos ellos basados en arreglos bidimensionales de 20×20 o 10×20 dispersores, todos con un parámetro de red de $2.4\,mm$. La Tabla 2 resume las características principales de cada estructura.

En todos los casos, los dispersores están inmersos en una caja de simulación de agua, cuyas dimensiones corresponden al tamaño total del arreglo más una región de propagación libre en los extremos de incidencia y transmisión. La onda incidente se introduce por una de las caras del cristal fonónico, mientras que la transmisión se registra en la cara opuesta.

Tabla 2 Características generales de los dispersores diseñados.

Diodo	**Geometría del dispersor**	**Parámetro de red (mm)**		**Arreglo**	**Esquema del dispersor**
		X	Y		
Diodo 1	Polígono irregular asimétrico (2×2 mm)	2.4	2.4	20×20	 **Figura 7** Esquema del dispersor 1

Diodo 2	Polígono pentagonal irregular (2×4 mm)	5	2.4	10×20	 **Figura 8** Esquema del dispersor 2.
Diodo 3	Triángulo rectángulo de 2mm	2.4	2.4	20×20	 **Figura 9** Esquema del dispersor 3.
Diodo 4	Variación del dispersor 1, con la cara incidente totalmente plana	2.4	2.4	20×20	 **Figura 10** Esquema del dispersor 4.

3.3 Geometría de los dispersores

Todas las geometrías diseñadas son asimétricas, condición necesaria para que el comportamiento del cristal fonónico dependa de la dirección de incidencia de la onda acústica. A continuación, se describe brevemente la geometría característica de cada diodo acústico.

Diodo acústico 1: Está conformado por dispersores cuya sección transversal corresponde a un polígono irregular, inscrito en un cuadrado de 2×2 mm, con al menos un eje de asimetría (Figura 11). Esta geometría genera una diferencia notable en los espectros de transmisión al invertir el cristal, permitiendo identificar frecuencias de operación del diodo acústico.

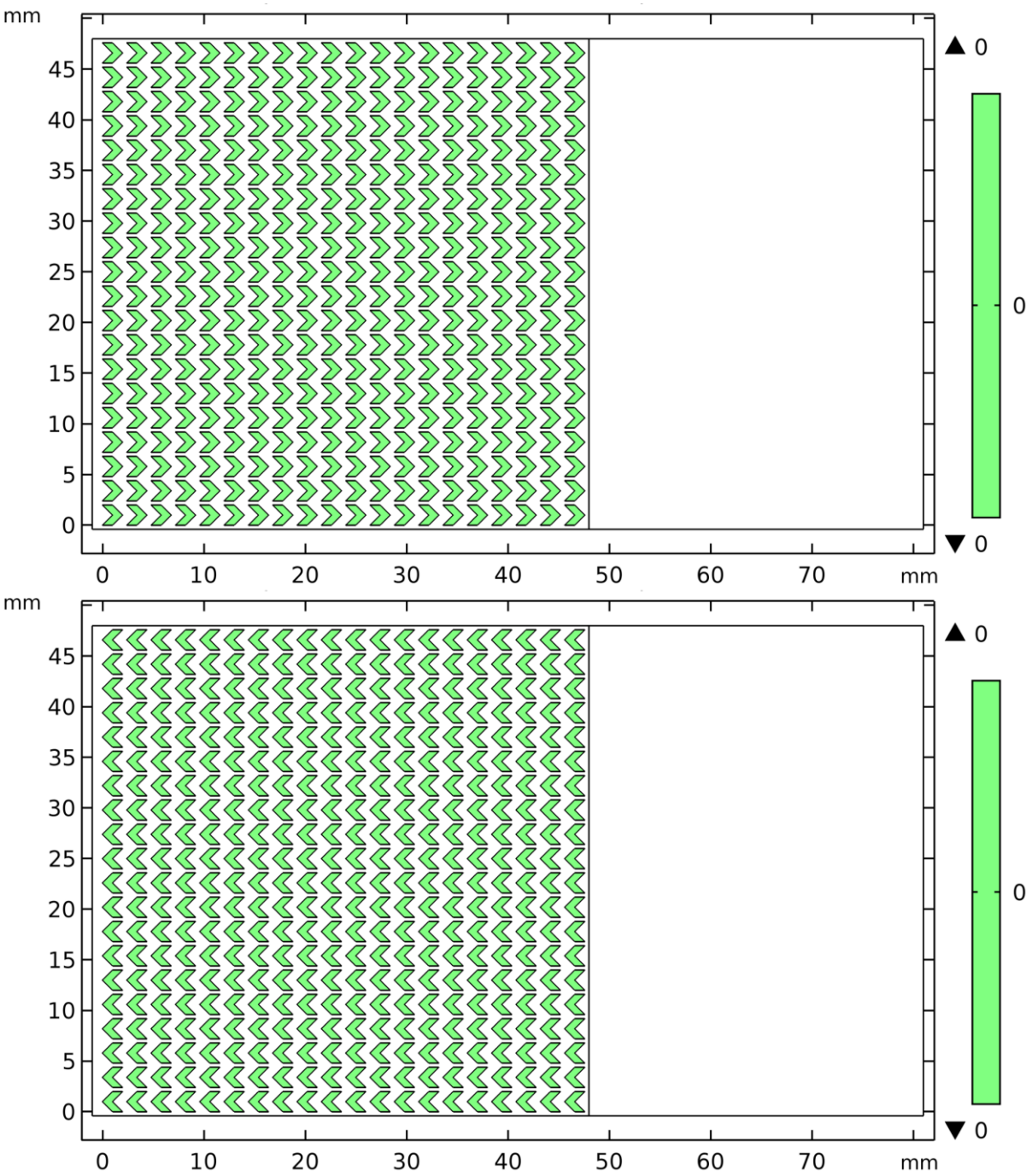


Figura 11 Esquema del Diodo 1-A arriba y Diodo 1-B abajo.

Diodo acústico 2: Corresponde a una variante geométrica del Diodo 1, en la que se modificó la forma del polígono irregular con el objetivo de explorar cómo los cambios en la geometría del dispersor afectan las bandas de transmisión y la magnitud de la diferencia entre los espectros de transmisión directa e inversa. En este caso, los dispersores son de 4 mm en la dirección X (dirección de propagación) y 2 mm en la dirección Y, con un parámetro de red de 5 mm y 2.4 mm en ambas direcciones, respectivamente.

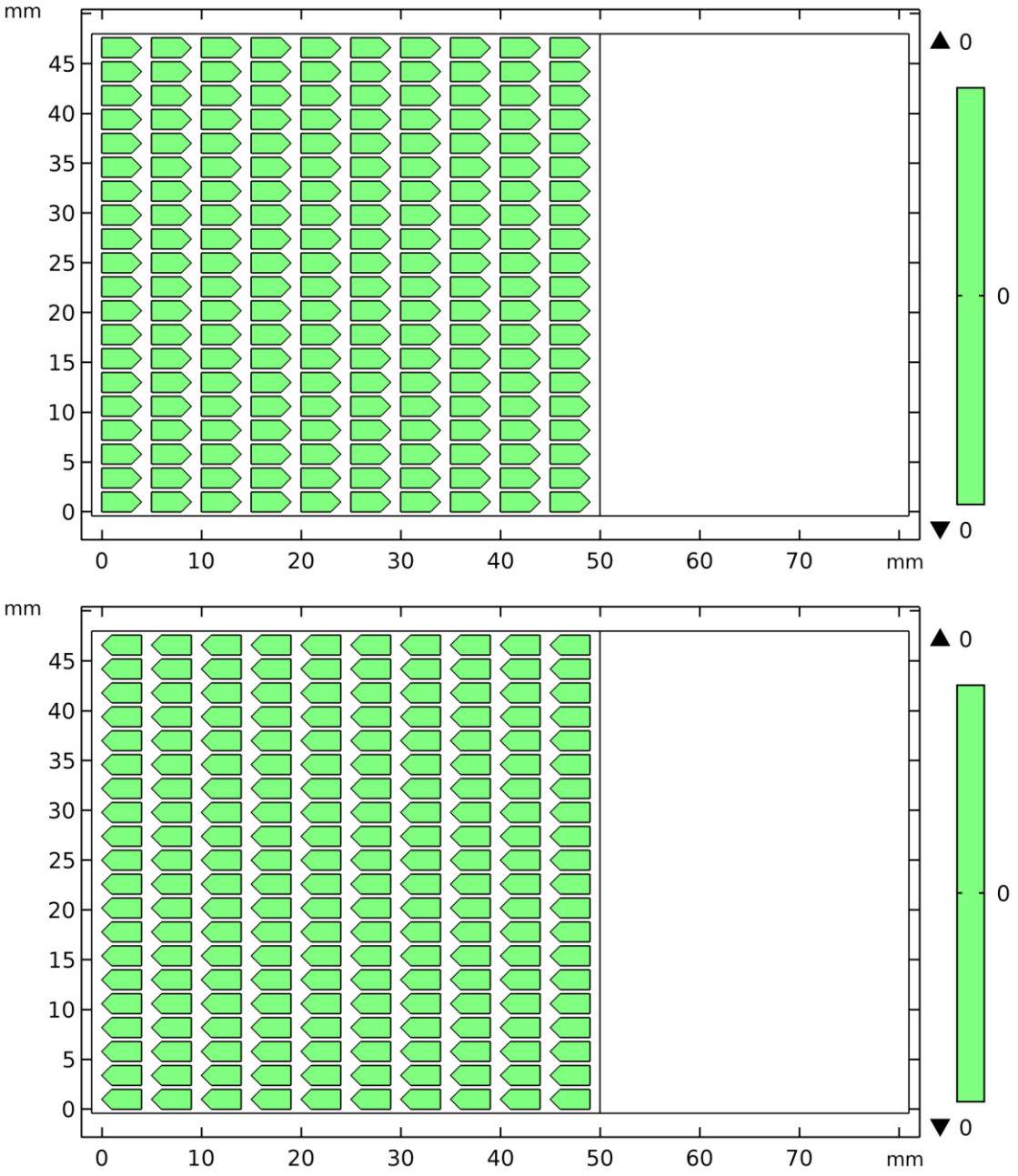


Figura 12 Esquema del Diodo 2-A arriba y Diodo 2-B abajo.

Diodo acústico 3: Emplea dispersores basados en triángulos rectángulos que fueron posicionados en dos grupos de 10 cada uno, en el que se encuentran rotados en modo espejo sobre el eje *X* haciendo una estructura más irregular probando como esto afecta la transmisión de las ondas de ultrasonido.

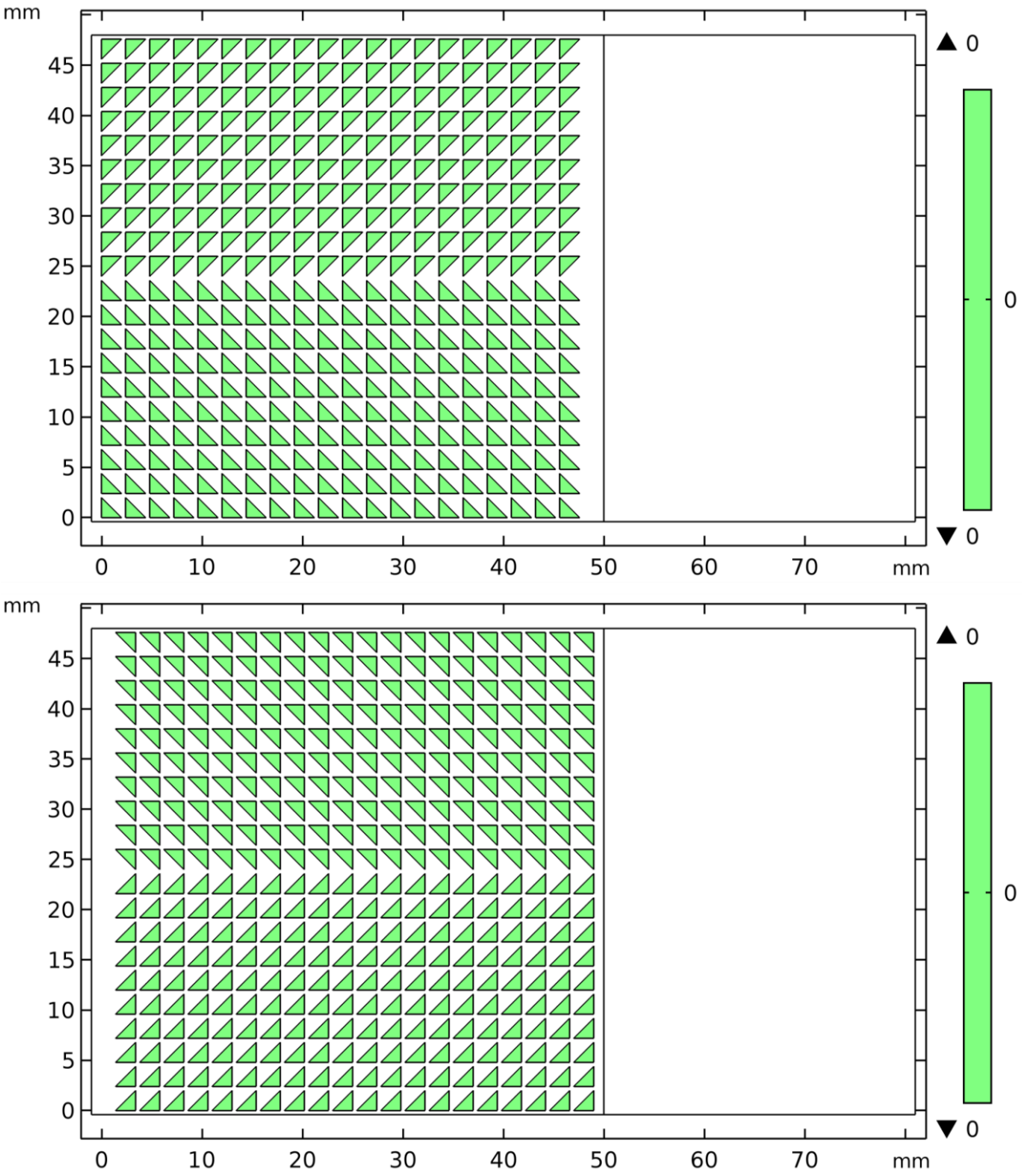


Figura 13 Esquema del Diodo 3-A arriba y Diodo 3-B abajo.

Diodo acústico 4: Está formado por dispersores de geometría irregular con características que introducen una geometría plana en la dirección donde se desea atenuar la transmisión de ondas de ultrasonido, con el objetivo de analizar si esto contribuye al efecto de transmisión acústica en el intervalo de frecuencias de interés.

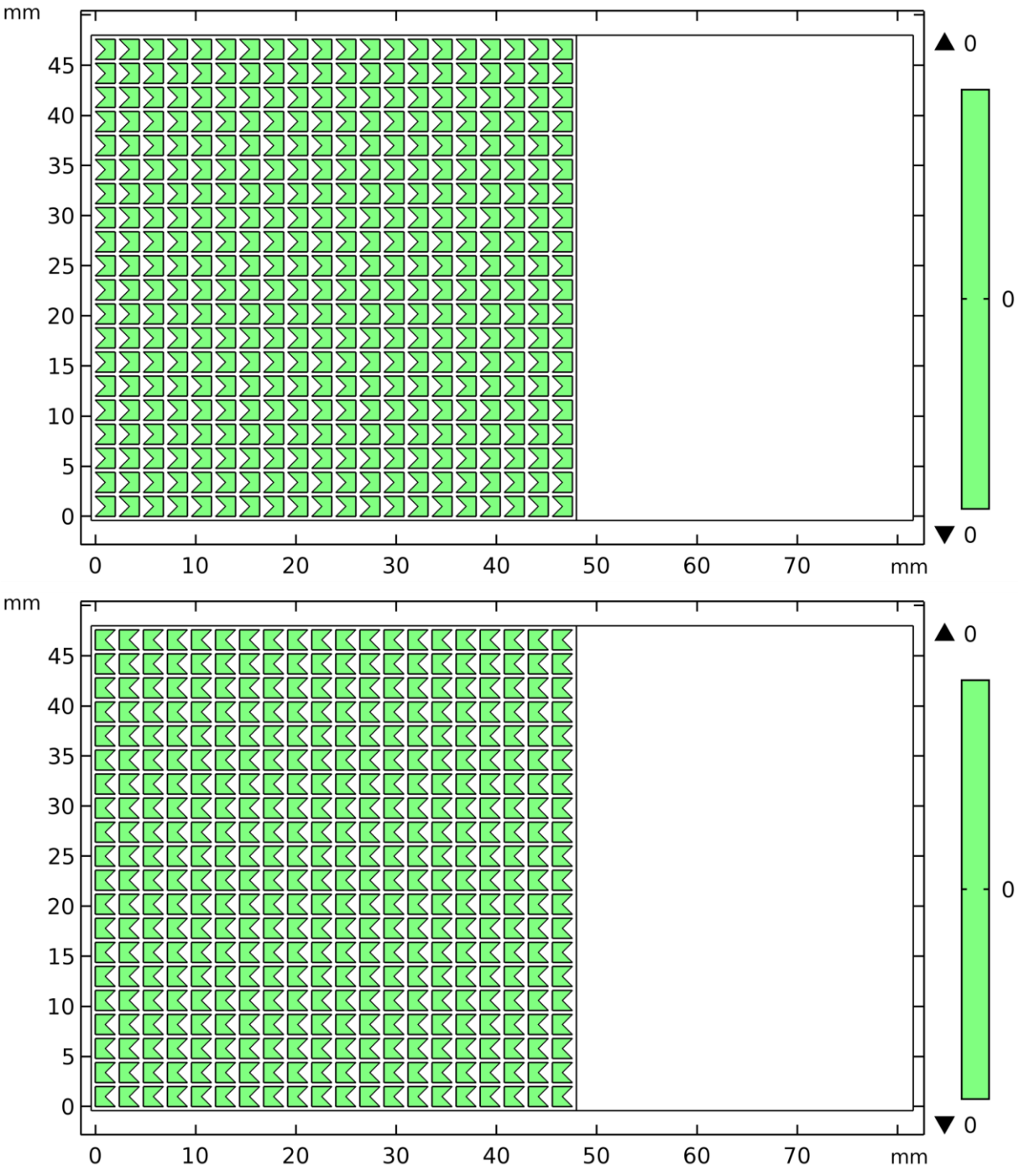


Figura 14 Esquema del Diodo 4-A arriba y Diodo 4-B abajo

Para cada diodo acústico, se construyó su contraparte invertida girando la estructura 180° sobre su centro geométrico, manteniendo constantes todos los demás parámetros de simulación. Esta configuración girada se denominará posición B del diodo, mientras que la configuración original se denomina posición A.

3.4 Implementación en COMSOL Multiphysics

El diseño y la simulación numérica de los diodos acústicos se realizaron utilizando la plataforma COMSOL Multiphysics, empleando el módulo de interacción acústico-sólido. Este módulo permite modelar de manera acoplada la propagación de ondas acústicas en el fluido (agua) y las vibraciones elásticas en los sólidos (dispersores de acero), lo que resulta esencial para una descripción física realista del sistema.

El flujo de trabajo seguido en COMSOL para cada diodo acústico constó de las siguientes etapas: definición de la geometría, asignación de materiales, configuración de las condiciones de frontera, generación del mallado y configuración del estudio de dominio de frecuencia.

3.4.1 Definición de la geometría

La geometría del modelo se construyó en el entorno bidimensional de COMSOL, aprovechando la naturaleza periódica de las estructuras y la simetría del problema. La caja de simulación fue definida como un rectángulo que encierra el arreglo completo de dispersores, con un margen adicional en los extremos de incidencia y transmisión para permitir la propagación libre de las ondas antes y después de interactuar con el cristal fonónico.

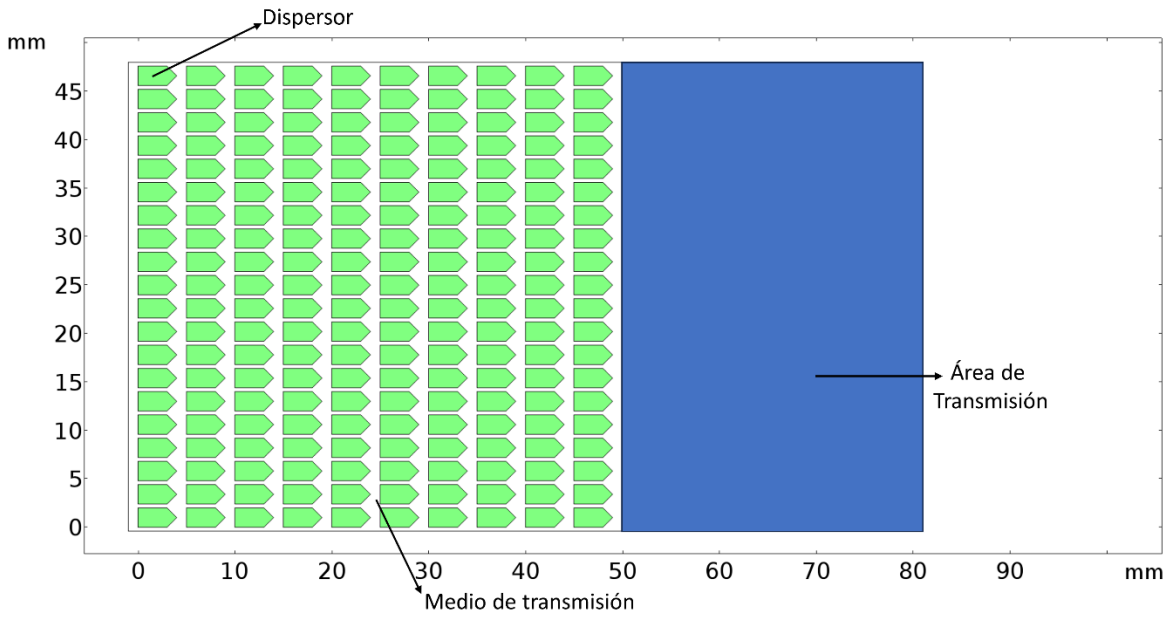


Figura 15 Esquema del diseño de un Diodo Acústico.

Cada dispersor fue diseñado como una geometría independiente dentro de la caja de simulación. Para los dispersores poligonales, la geometría se construyó mediante la definición de las coordenadas de sus vértices utilizando la herramienta de polígonos disponible en la subcarpeta *Geometry* de COMSOL.

Una vez definido el dispersor unitario, el arreglo completo de 20×20 o 10×20 dispersores se generó mediante la función de duplicación periódica disponible en COMSOL, especificando el parámetro de red tanto en la dirección horizontal como en la vertical. Las selecciones explícitas (*Explicit*) de la subcarpeta *Definitions* se utilizaron para delimitar los dominios de los dispersores y de la matriz de agua por separado, facilitando la posterior asignación de materiales y condiciones de frontera.

3.4.2 Asignación de materiales y condiciones de frontera

Los materiales se asignaron a través del navegador de materiales (Material Browser) de COMSOL. Al dominio correspondiente a la matriz fluida se le asignaron las propiedades del

agua, mientras que a los dominios de los dispersores se les asignaron las propiedades del acero SAE 4340, conforme a los valores indicados en la **Tabla 1.**

Las condiciones de frontera empleadas en las simulaciones son las siguientes. En la frontera de incidencia (cara izquierda de la caja de simulación) se definió una fuente de onda plana con una presión acústica unitaria normalizada, lo que permite obtener directamente el espectro de transmisión relativo al valor de entrada. Las fronteras superior e inferior de la caja de simulación se configuraron con la condición de pared rígida (*Sound Hard Boundary*), que impone velocidad normal nula del fluido en dicha frontera, simulando así una guía de onda plana. En la frontera de transmisión (cara derecha de la caja de simulación) se definió una condición de radiación que permite la salida libre de las ondas, evitando reflexiones numéricas no físicas en esa frontera. Las interfases entre los dispersores de acero y el agua están gobernadas por las condiciones de continuidad de presión y velocidad normal implementadas automáticamente por el módulo de interacción acústico-sólido.

3.4.3 Generación del mallado

El mallado de los modelos se generó utilizando la herramienta automática de COMSOL, con el criterio de que el tamaño máximo del elemento de la malla fuera al menos cinco veces menor que la longitud de onda mínima del intervalo de frecuencias analizado. Esta condición asegura que el método de elementos finitos represente adecuadamente la variación espacial de los campos de presión acústica en todo el dominio de simulación.

Dado que el intervalo de frecuencias analizado abarca de 100 a 1000 kHz, y considerando que la velocidad del sonido en agua es de 1481 m/s, la longitud de onda mínima en el fluido es de aproximadamente 1.48 mm. Por lo tanto, el tamaño máximo de elemento utilizado en el mallado fue de 0.3 mm en las regiones del fluido, y se aplicó un refinamiento adicional en las interfases entre el fluido y los dispersores sólidos para capturar con precisión los efectos de dispersión local. El mallado resultante para el arreglo de 20×20 dispersores es de tipo triangular no estructurado, generado automáticamente por el algoritmo de COMSOL.

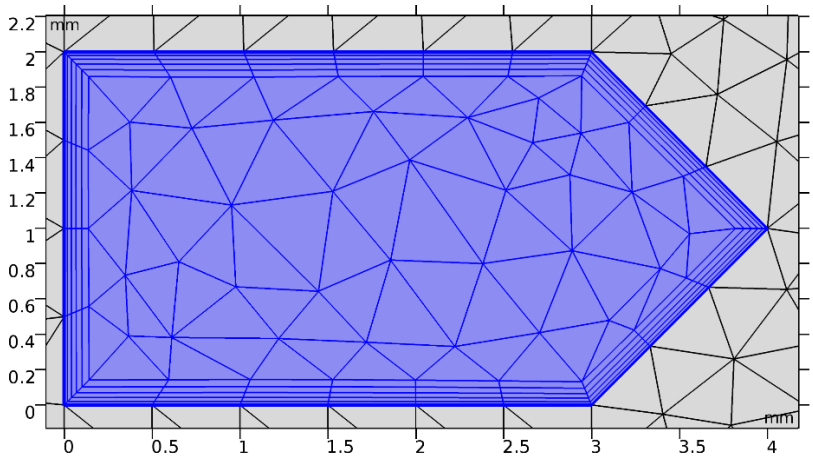


Figura 16 Mallado de un dispersor en Comsol.

3.4.4 Configuración del estudio y obtención de resultados

El tipo de estudio seleccionado en todos los casos fue el análisis en el dominio de la frecuencia (*Frequency Domain*), el cual resuelve la ecuación de Helmholtz para la presión acústica en cada frecuencia del intervalo definido. El intervalo de frecuencias analizado en todos los diodos acústicos fue de 100 a 1000 kHz, con pasos de 1 kHz en el barrido inicial de identificación de bandgaps y regiones de interés.

Una vez identificadas las regiones de interés mediante el barrido inicial, se realizaron simulaciones con mayor resolución en esos intervalos, reduciendo el paso de frecuencia a 0.1 kHz, para determinar con precisión las frecuencias a las que se observa la mayor diferencia en potencia transmitida entre las configuraciones A y B de cada diodo acústico.

Los resultados obtenidos de las simulaciones incluyen los espectros de transmisión acústica, expresados en decibeles (dB) como función de la frecuencia, así como los mapas de presión acústica en el dominio del modelo para frecuencias específicas de interés. Estos últimos permiten visualizar la distribución espacial de la energía acústica dentro del cristal fonónico y verificar cualitativamente el efecto de transmisión unidireccional observado en los espectros. La diferencia de potencia transmitida entre ambas configuraciones del diodo, $\Delta P = P(A) - P(B)$, se calculó en cada frecuencia del intervalo analizado para cuantificar el grado de rectificación acústica alcanzado por cada diseño.

En el siguiente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos a partir de las simulaciones descritas en el presente capítulo, para cada uno de los cuatro diodos acústicos diseñados.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se describen los detalles de la simulación y los resultados obtenidos. Además, se detallan los casos de los diferentes efectos observados en los resultados.

4.1 Diodo acústico 1

El primer diodo acústico está conformado por dispersores de acero SAE 4340, con la geometría descrita anteriormente, que está encerrado en un cuadrado de $2x2\ mm$. El cristal fonónico asociado está conformado por un arreglo de $20x20$ dispersores, con un parámetro de red de $2.4\ mm$. Debido a las características de un diodo acústico, su contraparte fue construida al girar los dispersores 180° sobre su centro con el objetivo de estudiar el reingreso de las ondas de ultrasonido.

Como se indicó en el capítulo anterior, las propiedades del diodo acústico se analizaron en el intervalo de frecuencias ubicado entre $100\ y\ 1000\ kHz$. A partir de la plataforma COMSOL, se obtuvieron los espectros de transmisión en dicho intervalo, así como los mapas de presión para frecuencias específicas.

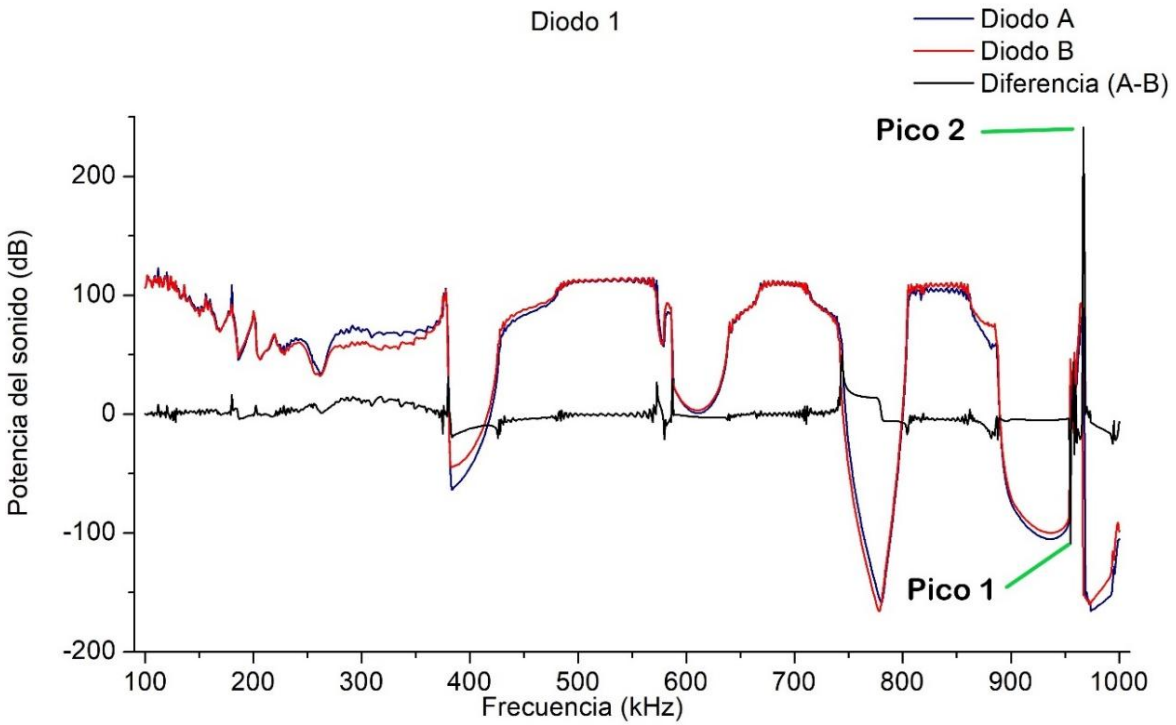


Figura 17 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del Diodo 1

En la *Figura 17*, se pueden observar el espectro de transmisión de ambas estructuras fonónicas en el intervalo de frecuencias mencionado. Se puede observar que los espectros de transmisión en ambos casos, línea azul para el diodo en su posición normal y roja al ser girado 180°, son muy similares en casi todo el intervalo de frecuencias analizado. Para mayor claridad, el diodo en posición normal, se denomina Diodo 1-A y al ser girado 180°, se denomina Diodo 1-B. La línea negra corresponde a la diferencia entre la potencia transmitida por el Diodo en su posición A con respecto a la posición B, $\Delta P = P(A) - P(B)$.

A partir del análisis de la diferencia en la potencia transmitida, se observa un pico en las diferencias de potencia transmitida, alrededor de $950kHz$. Una ampliación de los espectros entre 950 y 970 kHz, lleva a identificar dos frecuencias en donde la potencia transmitida es considerablemente diferente, específicamente se identificaron diferencias significativas en las frecuencias de 955 y 967 kHz, identificados como Pico 1 y Pico 2, respectivamente, en la Figura 17 La amplificación se llevó a cabo al obtener el espectro de transmisión en intervalos de 0.1 kHz, entre 950 y 960 kHz para el Pico 1 y entre 962 y 972 kHz para el Pico 2, con el fin de identificar la frecuencia precisa en la que se observan las diferencias.

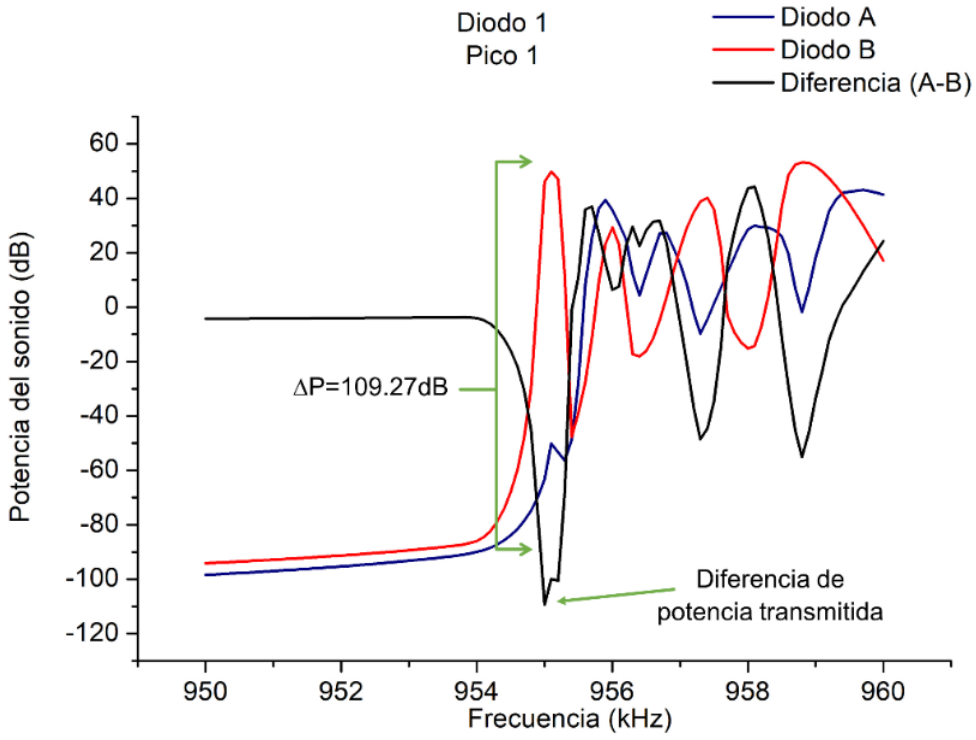


Figura 18 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del pico 1 del Diodo 1

La *Figura 18* contiene la ampliación que permite ubicar la diferencia de potencia transmitida (ΔP) que es de $109.27\ dB$ para la frecuencia de $955\ kHz$. Por otro lado, en la *Figura 19*, se muestra la correspondiente para la frecuencia de $967\ kHz$, cuya variación es de $241.05\ dB$.

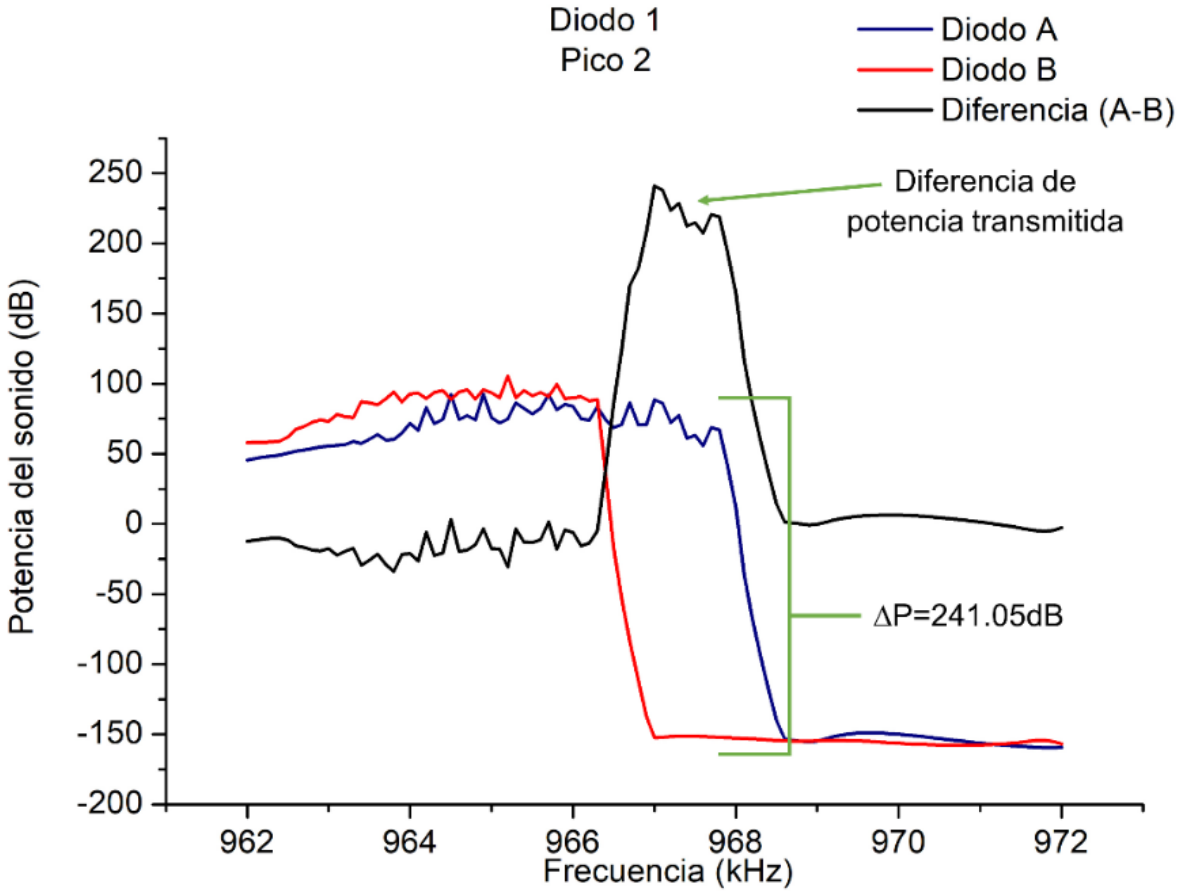


Figura 19 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del pico 2 del Diodo 1

La diferencia de potencia transmitida al invertir las estructuras fonónicas, permite la observación de un diodo acústico basado en cristales fonónicos, debido a que permite la propagación de una frecuencia en una dirección, pero la inhibe en la dirección opuesta, lo que permite construir estructuras para controlar la propagación unidireccional de ondas acústicas.

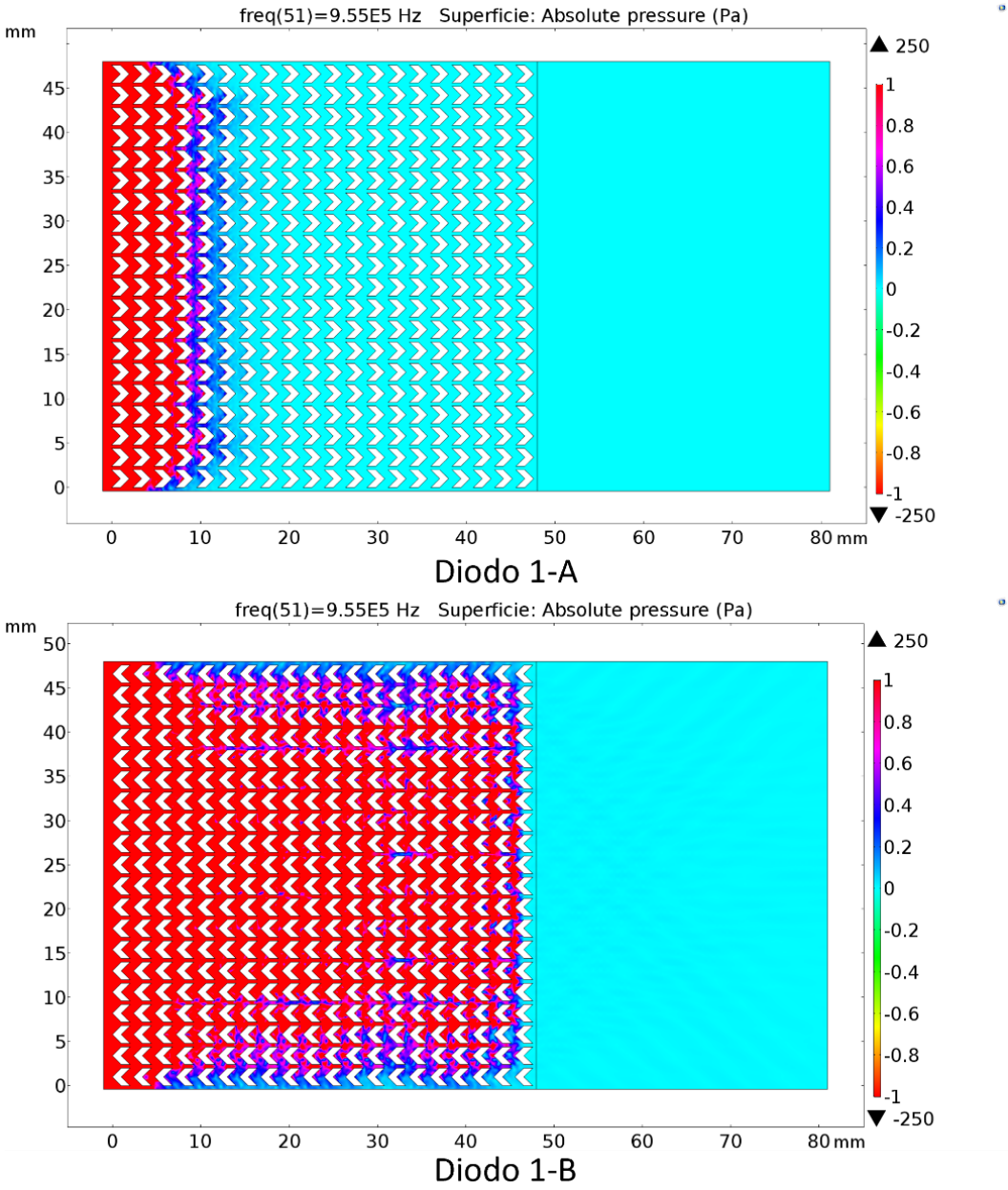


Figura 20 Comparación gráficos de presión para el pico 1 del Diodo 1

Se analizó la distribución de la energía acústica en el interior y exterior de los diodos basados en cristales fonónicos, para las frecuencias mencionadas en donde se observa el fenómeno de transmisión unidireccional característico de un diodo acústico. En la *Figura 20* se muestran los mapas de presión para el diodo en ambas configuraciones, para la frecuencia de 955 kHz (Pico 1). Puede observarse que cuando el cristal fonónico está en su posición original, la propagación en el cristal fonónico está limitada a los primeros 4 periodos del cristal, mientras que al ser girada 180° se observa transmisión hasta el final del cristal (color rojo, de acuerdo con la barra de colores). Lo anterior corrobora que el cristal fonónico está

funcionando como un diodo acústico para la frecuencia de $955\ kHz$, debido a que permite la transmisión de ondas acústicas en una dirección, pero inhibiéndola en la dirección opuesta.

En la *Figura 21* se observan los mapas de presión, para la frecuencia de $967\ kHz$, donde es más evidente la diferencia de potencia de ultrasonido transmitida entre la posición A y B del Diodo 1. Se observa que el rango donde se aprecia el fenómeno a estudiar se ubica en un intervalo entre $966.4\ y\ 968.4\ kHz$, encontrando el punto máximo de ΔP en los $967\ kHz$, con una magnitud de $241.05\ dB$.

Analizando los mapas de presión que se muestran, se observa que la totalidad del área de la estructura del cristal se encuentra en color rojo, que indica que se está transmitiendo a través de este, gran cantidad de energía y en el área de transmisión se muestra como se hace la distribución de esta, con zonas de menor transmisión a los lados (color azul) y un color rojo más intenso al centro. En un caso totalmente opuesto, se observa como en el Diodo 1-B, la transmisión de las ondas de ultrasonido es obstaculizada gracias a la geometría de los dispersores y únicamente consigue transmitirse considerablemente hasta el cuarto periodo del cristal, observando así el efecto deseado.

Lo anterior corrobora que el cristal fonónico funciona como un diodo acústico en un intervalo de 2kHz, debido a que permite la transmisión no recíproca de ondas acústicas en una dirección, y se opone en la dirección contraria. Este tipo de comportamiento no recíproco en estructuras periódicas fue validado experimentalmente por Li et al. **[56]**, al demostrar que los cristales sónicos pueden configurarse para actuar como rectificadores de ondas acústicas, un principio fundamental que se replica en las frecuencias evaluadas en esta investigación.

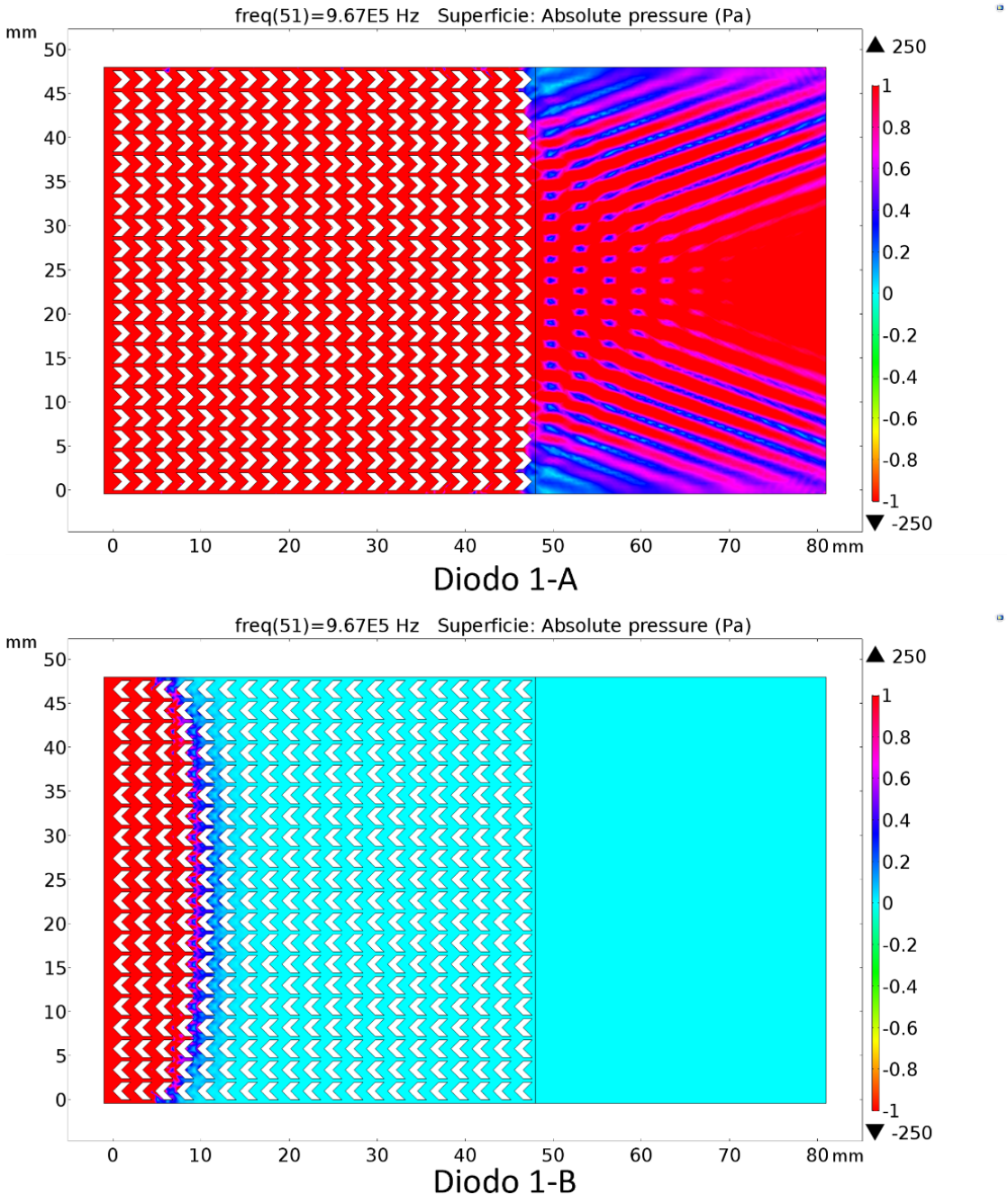


Figura 21 Comparación gráfico de presión para el pico 2 del Diodo 1.

4.2 Diodo acústico 2

Repitiendo el ejercicio llevado a cabo con el diodo 1, se diseñó del diodo acústico 2 y se realizó la simulación en COMSOL. Los resultados obtenidos para el diodo acústico 2 que se observan en la *Figura 22,* muestran la presencia de dos modos resonantes principales

ubicados en 290 kHz y 935 kHz, identificados como Pico 1 y Pico 2, respectivamente. Al comparar la transmisión acústica en ambos sentidos de propagación, se observa una diferencia en el nivel de potencia sonora transmitida; sin embargo, dicha diferencia no es suficiente para considerar que exista un comportamiento de aislamiento acústico unidireccional ideal.

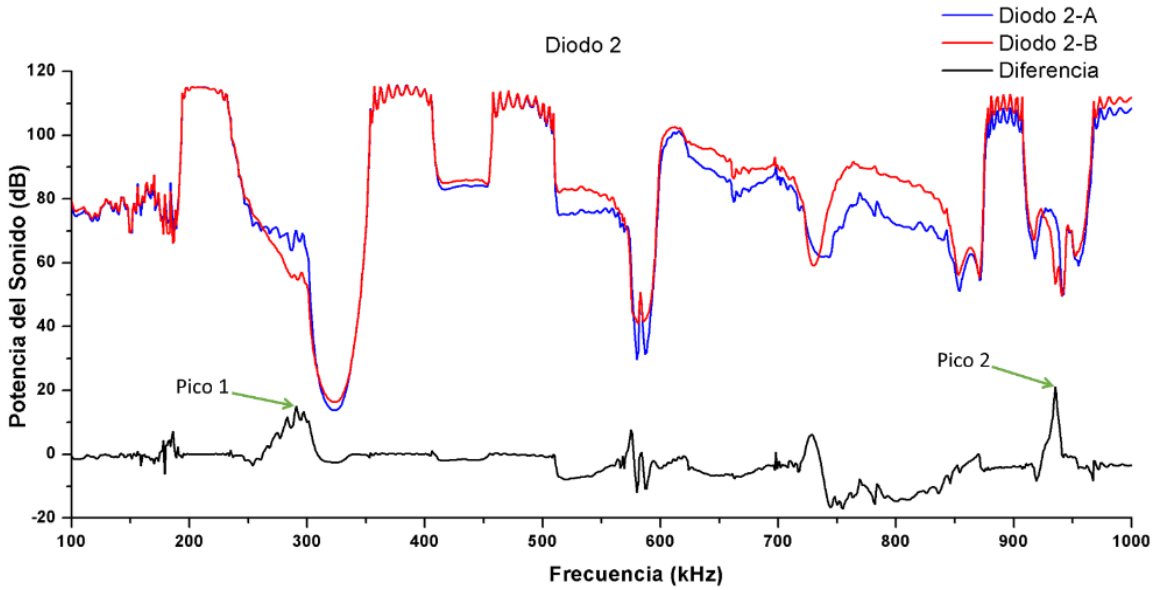


Figura 22 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del Diodo 2

En el caso del Pico 1 que se muestra en la *Figura 23*, el análisis realizado entre 263 y 308 kHz con incrementos de 0.1 kHz permitió identificar una diferencia máxima de 15.077 dB entre las curvas de transmisión. Este resultado indica que la geometría propuesta genera una respuesta asimétrica ante la propagación de la onda acústica, favoreciendo una dirección de transmisión respecto a la otra. No obstante, la magnitud de esta diferencia sugiere únicamente una reducción parcial de la energía acústica transmitida y no una supresión significativa de la señal.

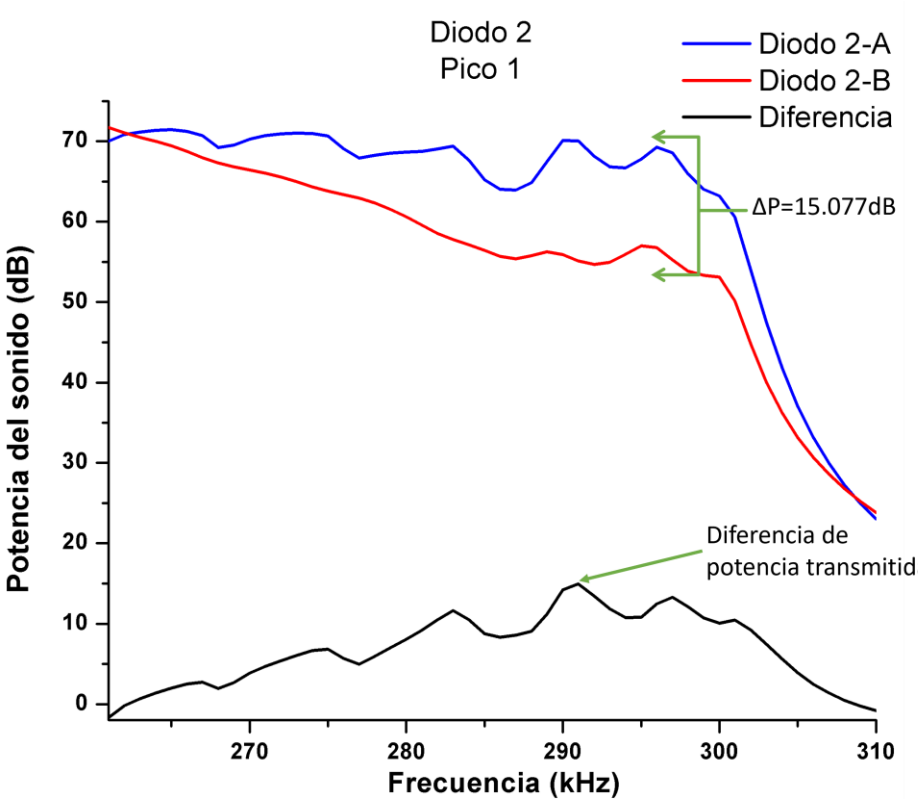


Figura 23 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del pico 1 del diodo 2

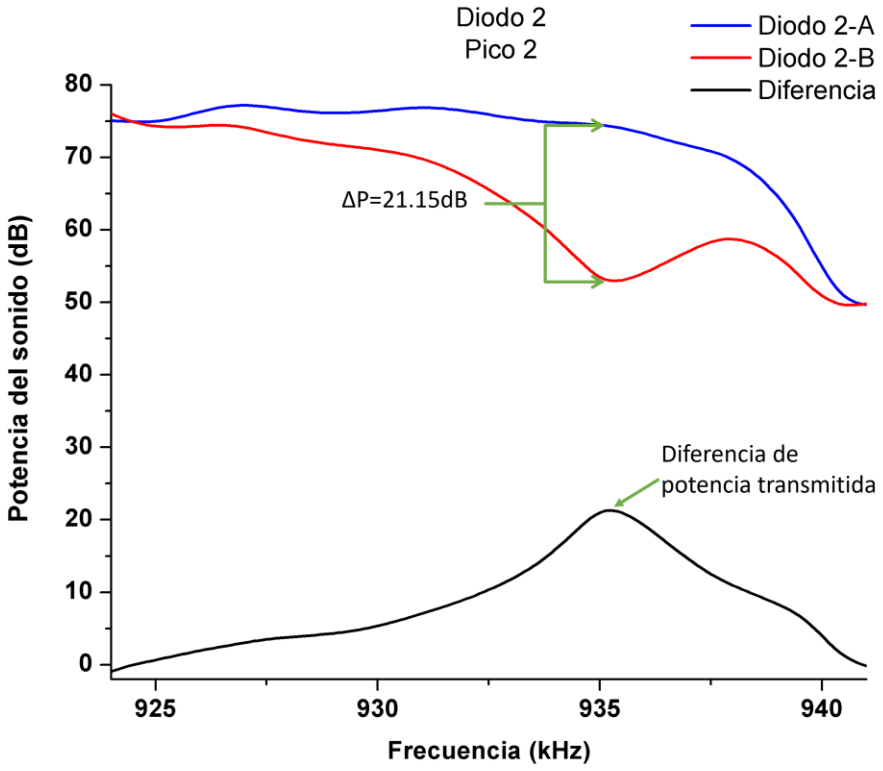


Figura 24 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del pico 2 del diodo 2

Por otra parte, para el Pico 2, evaluado entre $924\ y\ 941\ kHz$, se observó un comportamiento similar, con una diferencia de $21.15dB$ (*Figura 24*). Aunque la diferencia entre las transmisiones directa e inversa es evidente, las simulaciones de presión acústica muestran que la onda continúa propagándose en ambos sentidos. Esto confirma que la estructura modifica la eficiencia de transmisión dependiendo de la dirección de incidencia, pero no alcanza una condición de bloqueo completo del ultrasonido.

La similitud observada en ambos picos sugiere que la respuesta del sistema está dominada por fenómenos resonantes que incrementan o disminuyen la transmisión sonora en determinadas frecuencias. Sin embargo, la diferencia obtenida puede atribuirse principalmente a efectos de atenuación asociados a la geometría del dispositivo y a su distribución espacial, más que a un comportamiento de no reciprocidad acústica, lo que puede evidenciarse en los mapas de presión.

Aunque estos resultados evidencian un comportamiento direccional y una capacidad de atenuación acústica, la energía sonora continúa transmitiéndose en ambos sentidos, por lo que no puede considerarse que el dispositivo funcione como un diodo acústico ideal.

Por lo tanto, el diseño del diodo acústico 2 permite generar una atenuación diferencial de la señal acústica, pero no logra un aislamiento acústico completo, como se observa en los mapas de presión de las *Figuras 25 y 26*. Estos resultados indican que sería necesario optimizar parámetros geométricos, materiales o mecanismos de interacción acústica para incrementar la diferencia de transmisión y acercar el comportamiento del dispositivo al de un diodo acústico con mayor eficiencia y capacidad de bloqueo unidireccional.

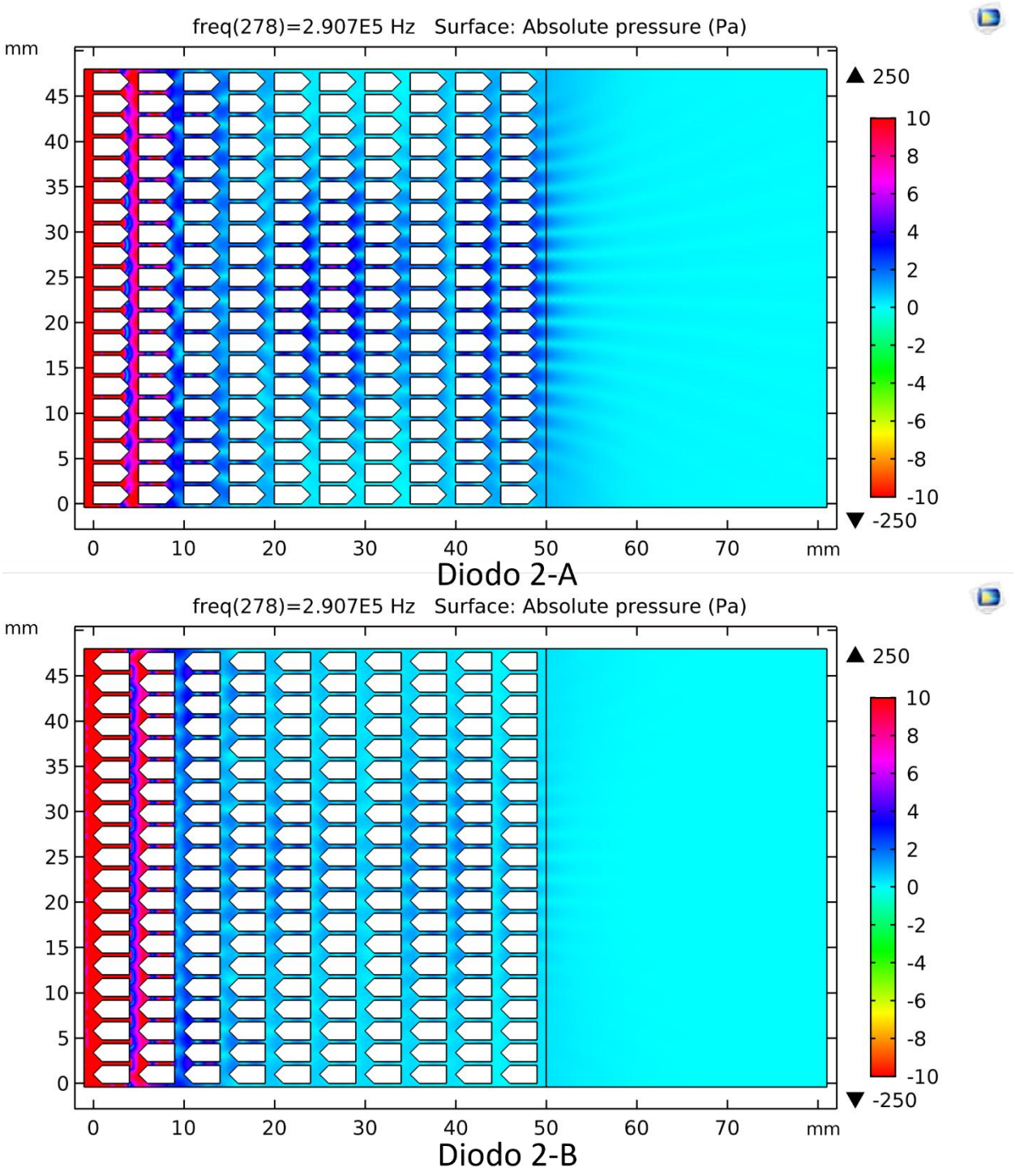


Figura 25 Comparación gráfico de presión para el pico 1 del Diodo 2

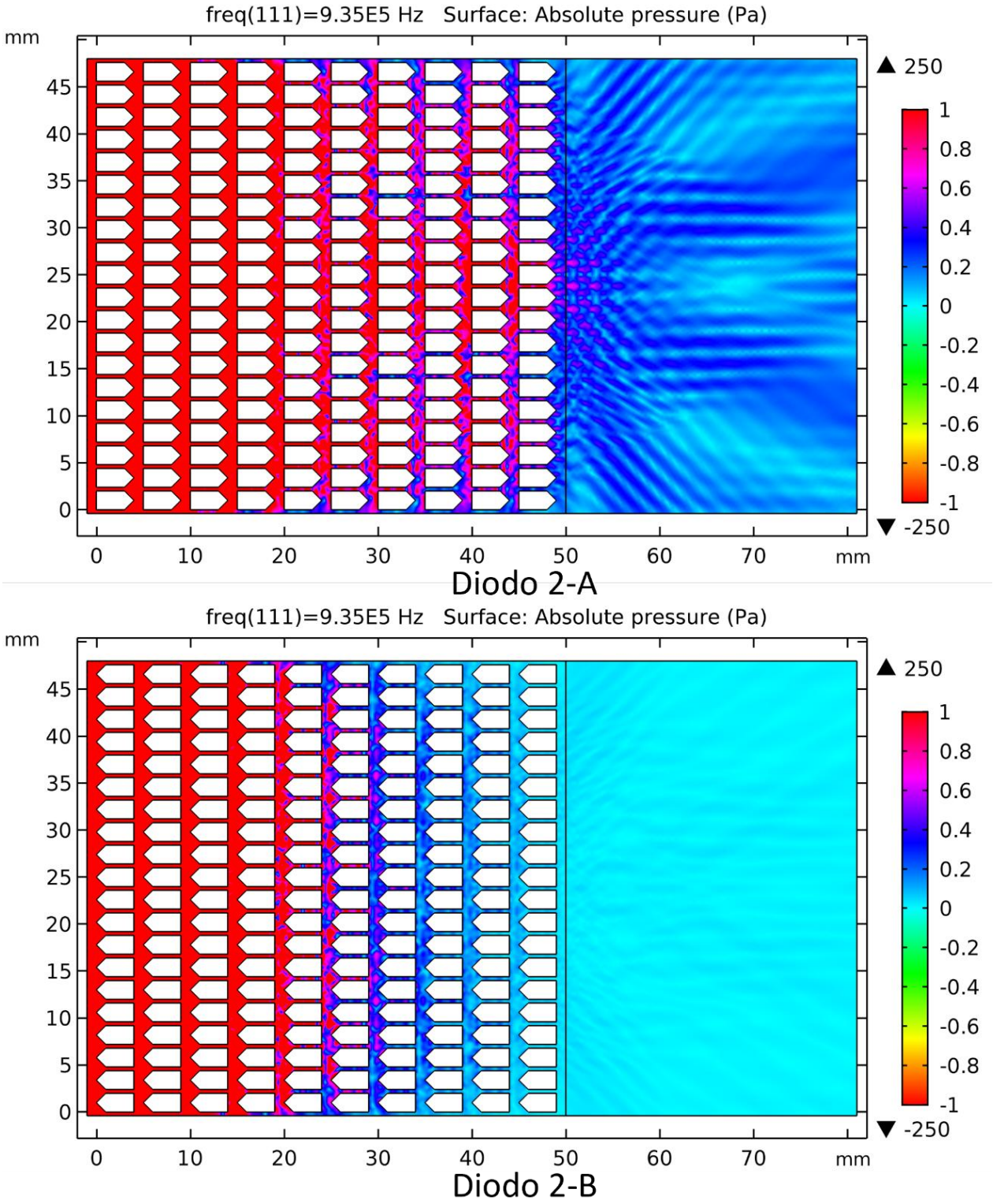


Figura 26 Comparación gráfico de presión para el pico 2 del Diodo 2

4.3 Diodo acústico 3

El análisis del Diodo 3 permitió identificar un bandgap principal localizado alrededor de 684 kHz, frecuencia que corresponde al Pico 1 observado en la respuesta espectral del cristal, que se muestra en la *Figura 27*.

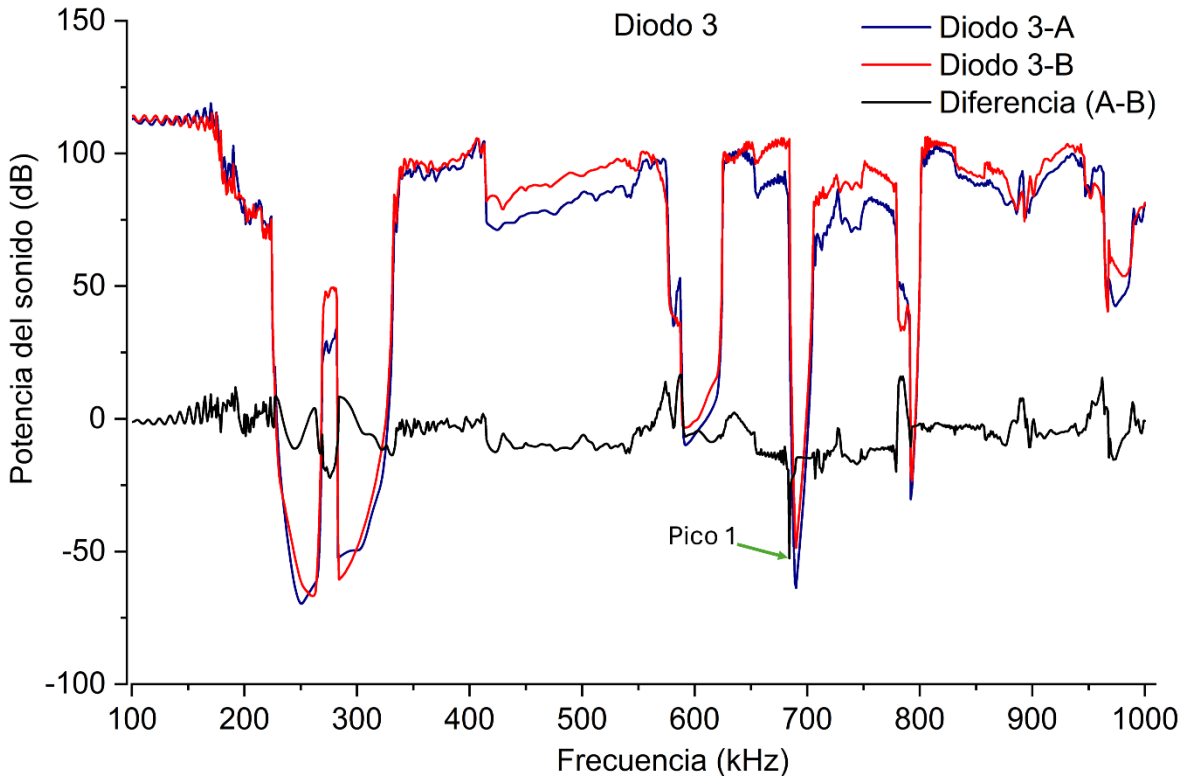


Figura 27 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del Diodo 3

Para estudiar con mayor detalle este comportamiento, se realizó una simulación en el intervalo comprendido entre 630 y 728 kHz, como se muestra en la *Figura 28*, lo que permitió evaluar la variación de la transmisión acústica alrededor de la frecuencia de resonancia, identificando una diferencia de $52.553dB$.

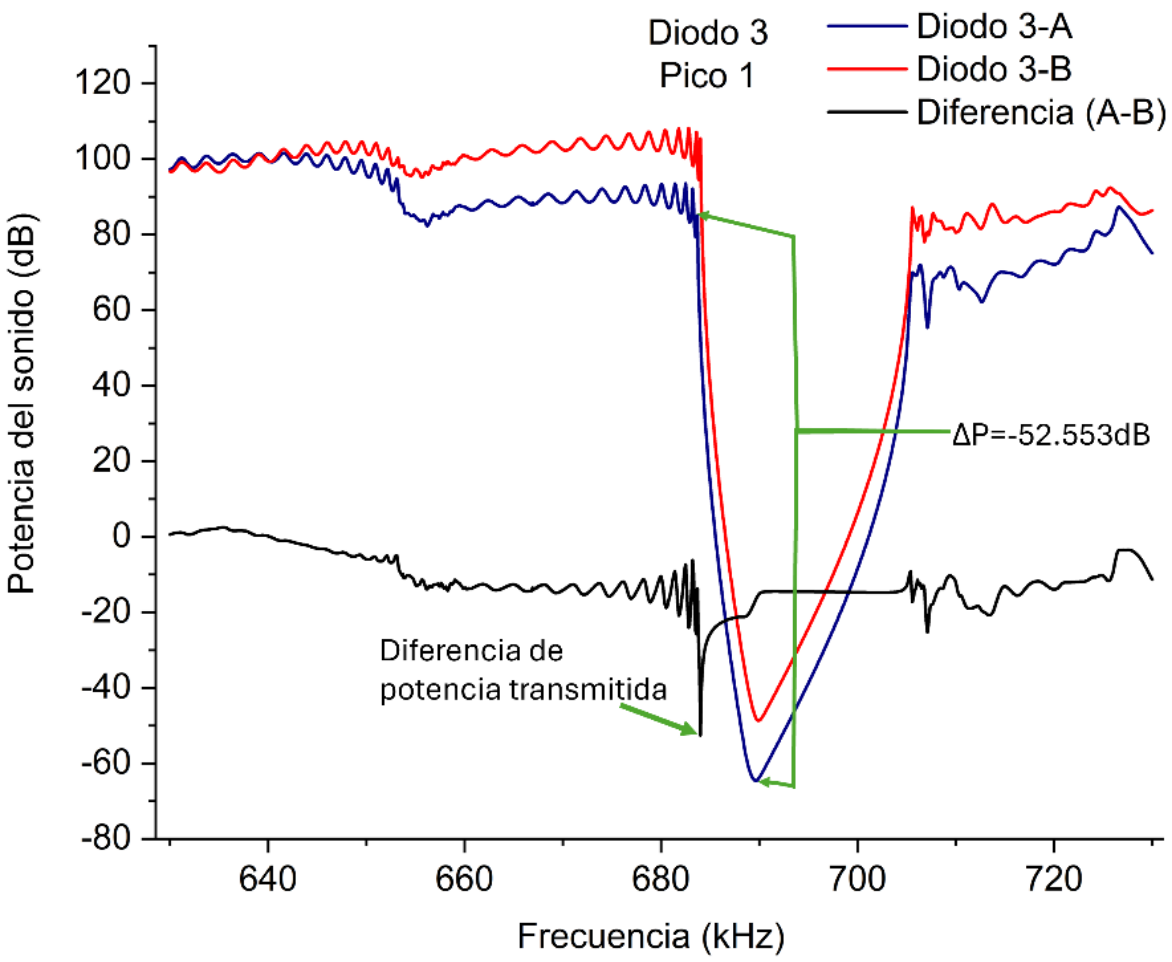


Figura 28 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del pico 1 del diodo 3

A partir de los resultados obtenidos, puede observarse que el cristal presenta una modificación en la propagación de la onda acústica en la región cercana al pico. Sin embargo, el efecto esperado no se manifiesta de forma completa, ya que la transmisión acústica no presenta una caída suficientemente pronunciada que indique un bloqueo efectivo de la energía sonora. En lugar de ello, se observa una reducción parcial de la transmisión, característica de un proceso de atenuación, como se observa en el mapa de presión de la *Figura 29*.

Este comportamiento sugiere que la geometría del cristal genera fenómenos de dispersión e interferencia capaces de alterar la propagación de la onda, pero sin producir una banda prohibida o una región de aislamiento claramente definida entre las diferentes direcciones de la estructura cristalina.

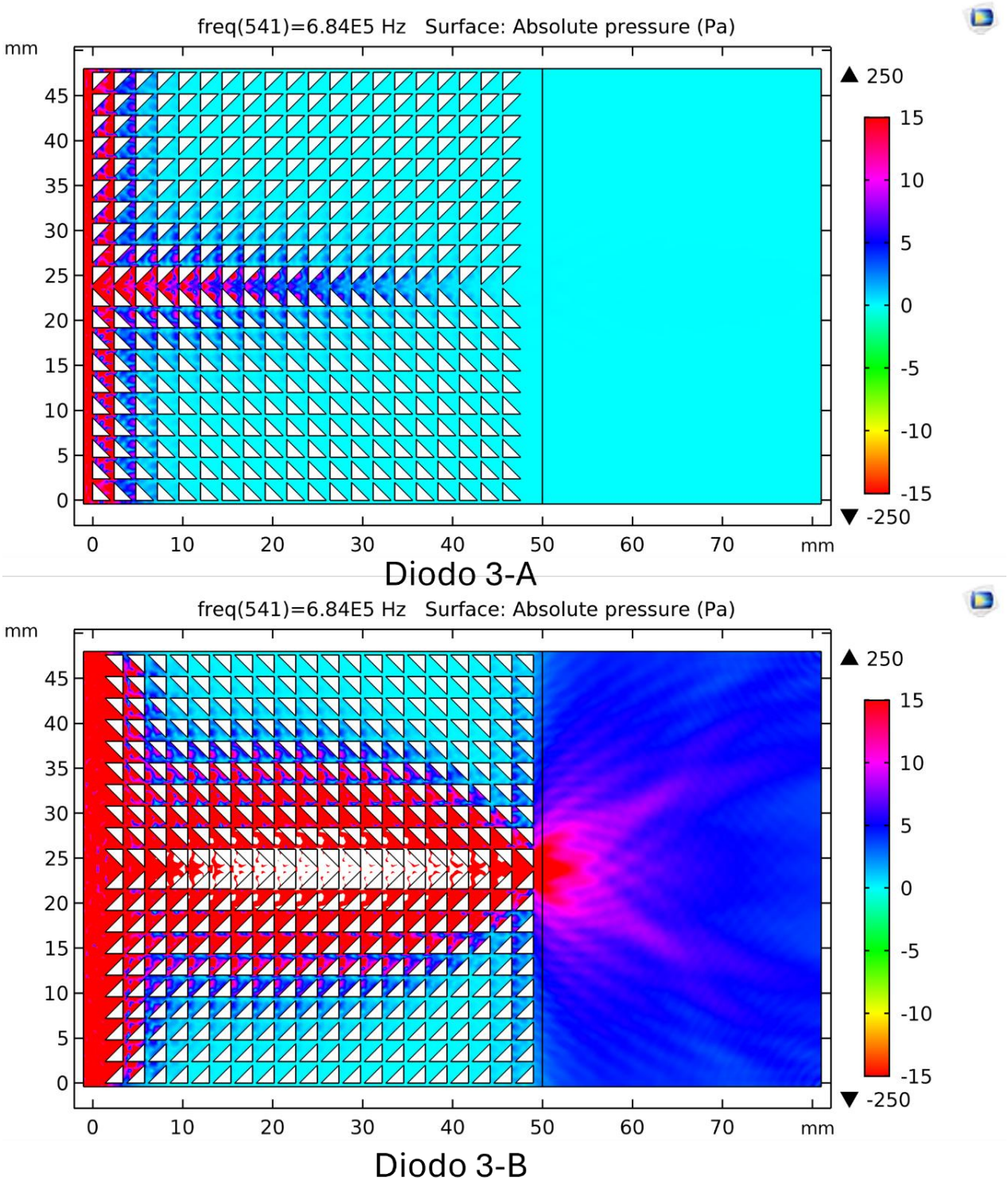


Figura 29 Comparación gráfico de presión para el pico 1 del Diodo 3

Por lo tanto, el Diodo 3 puede considerarse una estructura que presenta una influencia sobre la transmisión del sonido, pero cuya capacidad de disipación o bloqueo resulta limitada en comparación con otros diseños que generan resonancias más marcadas o bandgaps más amplios.

4.4 Diodo acústico 4

El Diodo Acústico 4 presenta un comportamiento particularmente interesante debido a que su respuesta espectral muestra la formación de un bandgap amplio y claramente definido como se muestra en la *Figura 30*, evidenciando que la geometría del cristal tiene una fuerte influencia sobre la propagación de las ondas acústicas. Sin embargo, a pesar de esta característica favorable, la estructura no logra desarrollar el efecto principal esperado para un diodo acústico, que es la transmisión no recíproca.

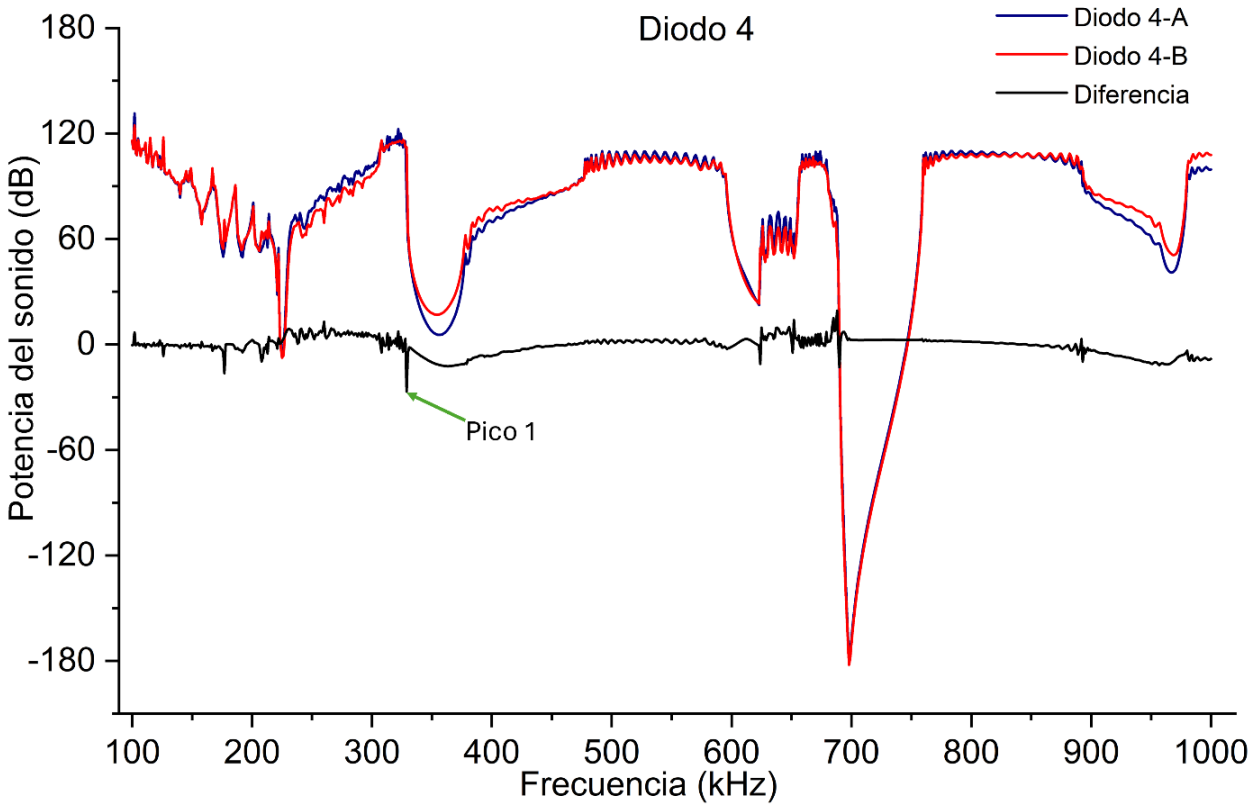


Figura 30 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del Diodo 4

En el análisis de transmisión se identificó un Pico 1 localizado en $329\ kHz$, para el cual se realizó una simulación detallada en el intervalo comprendido entre $319\ y\ 339\ kHz$, identificando una diferencia en el nivel de potencia sonora dispersa de $26.781\ dB$, como se muestra en la *Figura 31*.

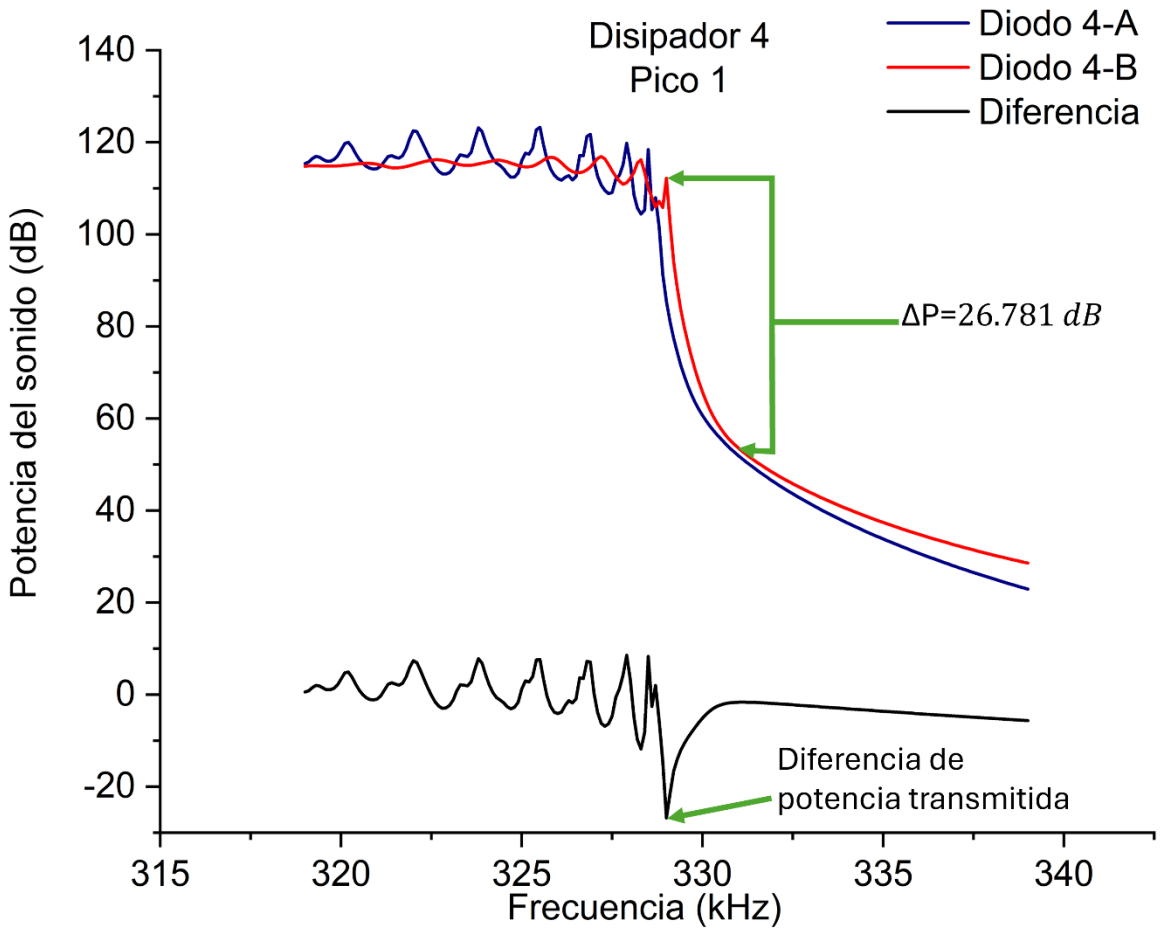


Figura 31 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del pico 1 del diodo 4

Los resultados muestran que la energía acústica puede propagarse a través de la estructura en ambas direcciones sin presentar diferencias significativas en los niveles de transmisión, como se observa en la *Figura 32*.

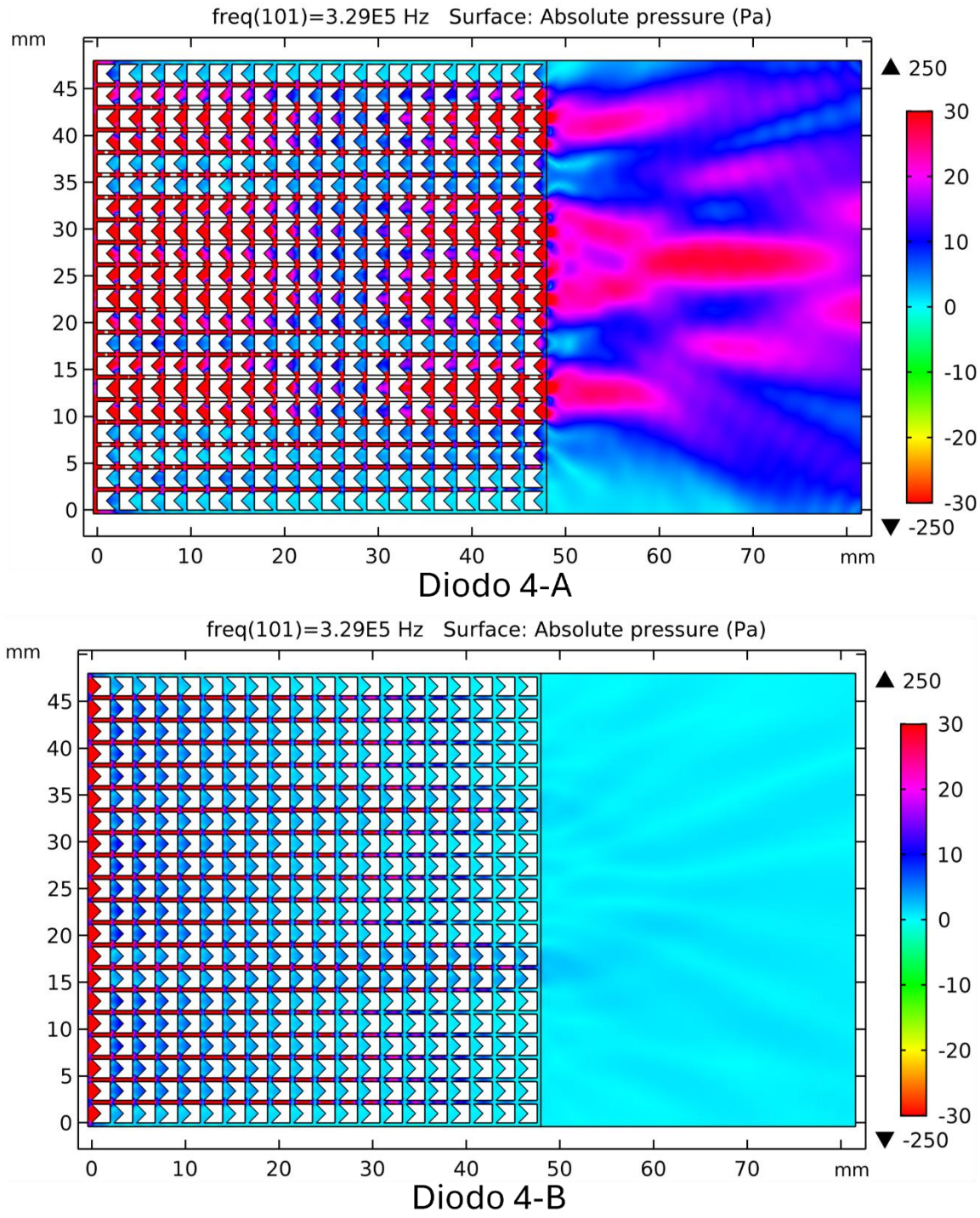


Figura 32 Comparación gráfico de presión para el pico 1 del Diodo 4

Asimismo, la respuesta global del cristal evidencia la presencia de una región de rechazo muy marcada alrededor de los 700 kHz, característica típica de los cristales fonónicos. Esta región confirma que la geometría diseñada es capaz de restringir eficazmente la propagación

de determinadas frecuencias acústicas. Sin embargo, la existencia de un bandgap pronunciado no implica necesariamente la obtención de un comportamiento tipo diodo.

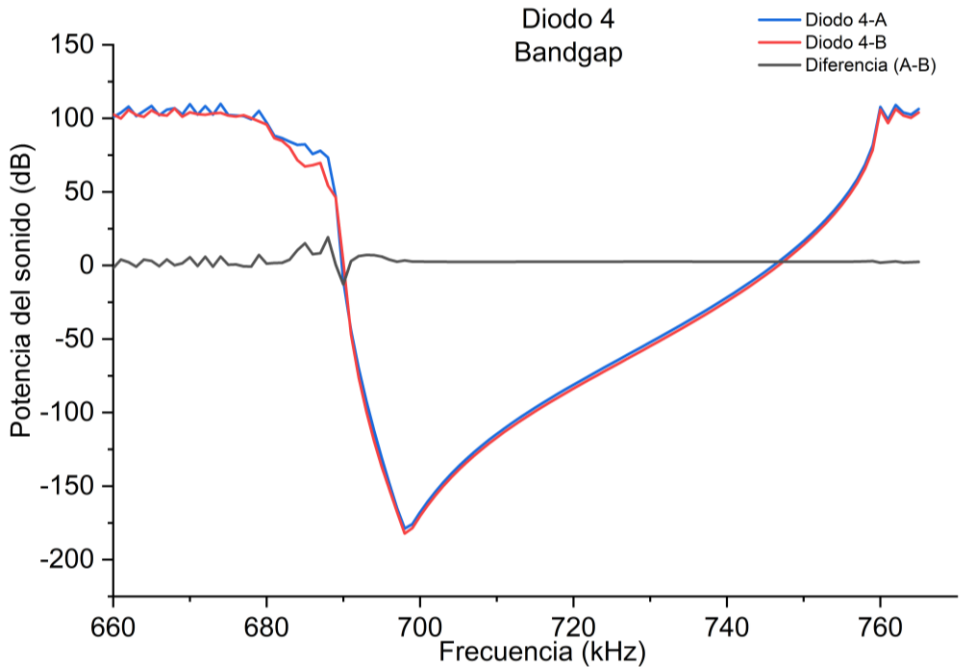


Figura 33 Espectros de transmisión y comparación de frecuencias del bandgap del Diodo 4

Al comparar la transmisión en ambas direcciones de propagación, se observa que las curvas prácticamente coinciden, lo que indica que el sistema conserva un comportamiento esencialmente recíproco. Por esta razón, no se identifica una diferencia suficientemente grande que permita afirmar la existencia de una transmisión preferencial o un efecto de rectificación acústica como se muestra en la *Figura 33*.

El análisis llevado a cabo en los 4 diseños propuestos, permitió observar que sólo el Diodo 1 presenta la característica de transmisión requerida de un diodo acústico, mostrando transmisión no recíproca en al menos dos frecuencias. Así mismo, se observa que aunque en los 3 diseños restantes se observa una disminución de la potencia transmitida en algunas frecuencias, no son suficientes para establecer que dichas estructuras funcionarían como diodos acústicos.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se diseñaron, simularon y analizaron distintos diodos acústicos construidos a partir de cristales fonónicos bidimensionales, buscando entender cómo se puede lograr la transmisión unidireccional de ondas ultrasónicas usando dispersores asimétricos de acero sumergidos en agua. Todo el estudio se apoyó en simulaciones numéricas hechas en COMSOL Multiphysics, con el método de elementos finitos, evaluando cada estructura en un rango de frecuencias de 100 a 1000 kHz.

Los resultados dejaron claro que la geometría del dispersor es uno de los factores más importantes a la hora de generar transmisión diferencial y no recíproca. Si bien los cuatro cristales fonónicos analizados mostraron cambios en sus espectros de transmisión, así como zonas de atenuación ligadas a bandas prohibidas acústicas, solo uno de los diseños llegó a comportarse realmente como un diodo acústico.

El Diodo Acústico 1 demostró ser el diseño más eficiente entre los casos estudiados. Los espectros de transmisión obtenidos para las configuraciones A y B mostraron diferencias significativas alrededor de las frecuencias de 955 kHz y 967 kHz, donde se registraron diferencias máximas de transmisión de 109.27 dB y 241.05 dB, respectivamente. Los mapas de presión obtenidos para dichas frecuencias confirmaron que la onda acústica es capaz de propagarse a través del cristal en una dirección mientras que, al invertir la orientación de la estructura, la energía acústica es fuertemente atenuada en los primeros periodos del cristal. Este resultado constituye una evidencia clara de transmisión unidireccional y demuestra que es posible inducir un efecto de rectificación acústica mediante el uso exclusivo de asimetrías geométricas en cristales fonónicos.

En cambio, los diodos 2, 3 y 4 mostraron que no basta con tener una estructura asimétrica o una banda prohibida para que aparezca el efecto de diodo. En el caso del Diodo 2, aunque se observaron diferencias de transmisión entre ambas direcciones de propagación, éstas fueron relativamente pequeñas y no produjeron un aislamiento significativo de la energía acústica. Los mapas de presión confirmaron que el ultrasonido continuó propagándose en ambos sentidos, por lo que el comportamiento observado corresponde más bien a atenuación direccional parcial.

El Diodo 3, presentó variaciones importantes alrededor de los 684 kHz, alcanzando diferencias cercanas a los 52 dB; sin embargo, el análisis espacial de la presión acústica mostró que la energía sonora continuó atravesando la estructura, lo que confirma que la geometría triangular favorece la dispersión e interferencia dentro del cristal; sin embargo, no fue suficiente para generar las condiciones de interferencia necesarias para producir una transmisión no recíproca eficiente.

El caso del Diodo 4 por su parte, resultó particularmente llamativo porque generó una banda prohibida amplia y bien definida. Sin embargo, las curvas de transmisión en ambas orientaciones fueron prácticamente idénticas, es decir, el sistema siguió siendo recíproco. Este hallazgo demuestra que la presencia de un bandgap acústico no implica necesariamente la existencia de transmisión unidireccional, ya que ambos fenómenos dependen de mecanismos físicos distintos. Esto sugiere que la modificación geométrica realizada, consistente en incorporar una cara plana en el dispersor fue deficiente debido a que no se alcanzaron las condiciones de interferencia óptimas.

En conjunto, estos resultados indican que la transmisión unidireccional lograda en el Diodo 1 está directamente ligada a la anisotropía efectiva que introduce la geometría asimétrica de sus dispersores. La orientación de las caras que reciben la onda cambia por completo la forma en que esta interactúa con la estructura periódica, modificando las condiciones de interferencia y la manera en que se redistribuye la energía dentro del cristal. Como consecuencia, determinadas frecuencias encuentran un canal eficaz de propagación en una dirección, mientras que en la dirección opuesta experimentan fenómenos de dispersión y reflexión que reducen la transmisión.

Este trabajo también deja ver el valor de la simulación numérica como herramienta de diseño y evaluación de dispositivos acústicos. Poder obtener espectros de transmisión y mapas de presión permitió ubicar con precisión las zonas de interés y entender los mecanismos detrás

del comportamiento de cada cristal, lo que en la práctica ahorra tiempo y costos que implicaría fabricar y probar prototipos reales.

En resumen, la hipótesis de partida pudo ser confirmada. Quedó demostrado que eligiendo bien la geometría y los materiales de un cristal fonónico sí es posible controlar la propagación unidireccional del ultrasonido, pero también quedó claro que no cualquier asimetría produce este efecto, por lo que la optimización geométrica es un punto crítico del diseño y no algo a lo que se le deba de dar poca importancia.

Como trabajo futuro, queda la propuesta de explorar otras geometrías de dispersores, distintos parámetros de red y contrastes de impedancia acústica mayores. También sería valioso validar estos resultados de forma experimental, fabricando prototipos físicos y midiendo sus espectros de transmisión ultrasónica; abriendo camino a aplicaciones en control de vibraciones, comunicaciones y aislamiento acústico.

Referencias

[1] F.T. Ibiza, Estudio numérico de la focalización de ondas evanescentes con una estructura periódica, Tesis, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2013.

[2] M. S. Kushwaha, P. Halevi, G. Martínez, L. Dobrzynski y B. Djafari-Rouhani, "Theory of acoustic band structure of periodic elastic composites," Physical Review B, vol. 49, no. 4, pp. 2313-2322, 1994.

[3] E. Alonso-Redondo, M. R. Bockstaller, M. Schmitt, Z. Urbach, C. M. Hui, R. Sainidou, P. Rembert, K. Matyjaszewski y G. Fytas, "A new class of tunable hypersonic phononic crystals based on polymer-tethered colloids," Nature Communications, vol. 6, Art. no. 8309, 2015.

[4] E. Sanchis y J. B. Ejea, Caracterización del diodo, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universitat de València, Valencia, España, 2008.

[5] J. A. Vargas y J. Arriaga, "Anisotropía en la propagación del sonido de un cristal fonónico desordenado," Superficies y Vacío, vol. 22, no. 2, pp. 1-5, 2009.

[6] D. Torrent, Hacia el control total del sonido con cristales sónicos y metamateriales acústicos, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2008.

[7] B. Manzanares-Martínez, M. E. Zayas y L. E. Gálvez, "Ondas longitudinales en cristales fonónicos de periodicidad unidimensional," Universidad de Sonora, Sonora, México, 2014.

[8] International Union of Crystallography, "Online Dictionary of Crystallography." [En línea]. Disponible: https://dictionary.iucr.org/Crystal

[9] G. Martínez Avilés, "Fonones: Cuasipartículas de calor y sonido," Cienciorama, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

[10] MIT News Office, "Explained: Phonons," Jul. 2010. [En línea]. Disponible: https://news.mit.edu/2010/explained-phonons-0706

[11] M. S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski y B. Djafari-Rouhani, "Acoustic band structure of periodic elastic composites," Physical Review Letters, vol. 71, no. 13, pp. 2022-2025, 1993.

[12] N. D. Lanzillotti-Kimura, Dinámica de fonones acústicos en multicapas nanométricas, Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España, 2009.

[13] Y. Pennec et al., "Phonon transport and manipulation in phononic crystals," Surface Science Reports, vol. 65, no. 8, pp. 229-291, 2010.

[14] F. Cervera et al., "Refractive acoustic devices for airborne sound," Physical Review Letters, vol. 88, no. 2, Art. no. 023902, 2002.

[15] Z. Liu et al., "Locally resonant sonic materials," Science, vol. 289, no. 5485, pp. 1734-1736, 2000.

[16] A. Khelif and A. Adibi, Eds., Phononic Crystals: Fundamentals and Applications. Berlin, Germany: Springer, 2016.

[17] R. Martínez-Sala, J. Sancho, J. Sánchez et al., "Sound attenuation by sculpture," Nature, vol. 378, pp. 241, 1995.

[18] M. Maldovan, "Sound and heat revolutions in phononics," Nature, vol. 503, pp. 209-217, 2013.

[19] S. A. Cummer et al., "Controlling sound with acoustic metamaterials," Nature Reviews Materials, vol. 1, Art. no. 16001, 2016.

[20] D. Reyes, E. Walker, Y. Zubov, H. Heo, A. Krokhin y A. Neogi, "All-acoustic signal modulation and logic operation via defect induced cavity effects in phononic crystal coupled-resonator acoustic waveguides," New Journal of Physics, vol. 21, no. 11, Art. no. 113012, 2019.

[21] E. Walker, Y. Jin, D. Reyes y A. Neogi, "Sub-wavelength lateral detection of tissue-approximating masses using an ultrasonic metamaterial lens," Nature Communications, vol. 11, Art. no. 5967, 2020.

[22] G. A. Medel-Méndez, D. Martínez-Esquivel, A. R. Vilchis-Néstor, E. Vigueras-Santiago, A. Neogi y D. Reyes-Contreras, "Real-Time Acoustic Spectroscopy of Nanoparticle Sedimentation in Microfluidic Systems Using Phononic Crystal-Based Ultrasonic Interferometry," Analytical Chemistry, vol. 98, no. 10, 2026.

[23] N. Fang et al., "Ultrasonic metamaterials with negative modulus," Nature Materials, vol. 5, pp. 452-456, 2006.

[24] B. Liang, X. S. Guo, J. Tu, D. Zhang y J. C. Cheng, "An acoustic rectifier," Nature Materials, vol. 9, pp. 989-992, 2010.

[25] N. Boechler, G. Theocharis y C. Daraio, "Bifurcation-based acoustic switching and rectification," Nature Materials, vol. 10, pp. 665-668, 2011.

[26] V. Laude, Phononic Crystals: Artificial Crystals for Sonic, Acoustic, and Elastic Waves. Berlin, Germany: De Gruyter, 2015.

[27] R. Fleury, D. Sounas y A. Alù, "Subwavelength ultrasonic circulator based on spatiotemporal modulation," Physical Review B, vol. 91, no. 17, Art. no. 174306, 2015.

[28] M. A. Nassar et al., "Nonreciprocal wave propagation in mechanical metamaterials," Reviews of Modern Physics, vol. 92, no. 4, 2020.

[29] M. S. Kushwaha, "Phononic crystals and acoustic band gaps," Physics Today, vol. 49, no. 12, pp. 24-30, 1996.

[30] A. Khelif, D. Torrent y J. Sánchez-Dehesa, "Directional acoustic band gaps and one-way sound propagation," New Journal of Physics, vol. 15, 2013.

[31] M. V. Golub et al., "Elastic wave propagation in anisotropic layered phononic crystals," Springer Proceedings in Physics, vol. 193, pp. 183-190, 2017.

[32] Z. G. Chen et al., "Anisotropic topological phononic crystals and directional band gaps," Physical Review Letters, vol. 119, Art. no. 114301, 2017.

[33] P. V. Zakharov et al., "Influence of crystal anisotropy on nonlinear supratransmission," Computation, vol. 11, no. 10, 2023.

[34] P. A. Deymier y L. Dobrzynski, Acoustic Metamaterials and Phononic Crystals. Springer Series in Solid-State Sciences, vol. 173. Berlin, Germany: Springer, 2013.

[35] P. Desmarchelier et al., "Phonon diffraction and interference using nanometric features," Journal of Applied Physics, vol. 135, 2024.

[36] F. Guthrie, "On a relation between heat and electricity," The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, vol. 46, pp. 257-266, 1873.

[37] T. A. Edison, "Electrical indicator," U.S. Patent 307031, Nov. 4, 1884.

[38] J. A. Fleming, "On the conversion of electric oscillations into continuous currents by means of a vacuum valve," Proceedings of the Royal Society of London, vol. 74, pp. 476-487, 1904.

[39] B. Liang, B. Yuan y J. C. Cheng, "Acoustic diode: Rectification of acoustic energy flux in one-dimensional systems," Physical Review Letters, vol. 103, no. 10, Art. no. 104301, 2009.

[40] R. Fleury, D. Sounas y A. Alù, "Nonreciprocal acoustics," Acoustics Today, vol. 11, no. 3, pp. 14-21, 2015.

[41] R. Fleury, D. Sounas y A. Alù, "An invisible acoustic sensor based on parity-time symmetry," Nature Communications, vol. 6, Art. no. 5905, 2015.

[42] Z. Yang et al., "Acoustic diode based on losses," Physical Review Letters, vol. 101, no. 20, Art. no. 204301, 2008.

[43] COMSOL AB, COMSOL Multiphysics Reference Manual, ver. 5.3a. Stockholm, Sweden: COMSOL AB, 2017.

[44] COMSOL AB, Acoustics Module User's Guide, ver. 5.3a. Stockholm, Sweden: COMSOL AB, 2017.

[45] O. C. Zienkiewicz y Y. K. Cheung, The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1967.

[46] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor y J. Z. Zhu, The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, 7th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2013.

[47] J. N. Reddy, An Introduction to the Finite Element Method, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2019.

[48] S. S. Rao, The Finite Element Method in Engineering, 5th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2011.

[49] A. V. Oppenheim y R. W. Schafer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.

[50] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2006.

[51] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 1997.

[52] J. W. Goodman, Introduction to Fourier Optics, 3rd ed. Greenwood Village, CO, USA: Roberts & Company, 2005.

[53] M. S. Kushwaha, "Phononic crystals," Applied Physics Letters, vol. 70, no. 24, pp. 3218-3220, 1997.

[54] R. N. Bracewell, The Fourier Transform and Its Applications, 3rd ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2000.

[55] J. W. Cooley y J. W. Tukey, "An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series," Mathematics of Computation, vol. 19, no. 90, pp. 297-301, 1965.

[56] X. F. Li, X. Ni, L. Feng, M. H. Lu, C. He y Y. F. Chen, "Tunable Unidirectional Sound Propagation through a Sonic-Crystal-Based Acoustic Diode," Physical Review Letters, vol. 106, no. 8, Art. no. 084301, 2011.