

# ANÁLISIS DE LA INTERACCIÓN DE RESONADORES DE HELMHOLTZ EN METAMATERIALES ACÚSTICOS PERIÓDICOS EN FUNCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE INCIDENCIA DE LA FUENTE SONORA.

D. Ramírez Solana<sup>1</sup>, S. Castiñeira-Ibáñez<sup>2</sup>, J.M. Bravo-Plana-Sala<sup>2</sup>, M. P. Peiró-Torres<sup>3</sup>, M. Ferri<sup>2</sup>, J.V. Sánchez-Pérez<sup>2</sup>, J. Redondo<sup>4</sup>, R. Picó<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universitat Politècnica de València, Paraninf 1, Grao de Gandia, 46730 Gandia, Valencia, Spain, UE  
[daraso@teleco.upv.es](mailto:daraso@teleco.upv.es)

<sup>2</sup>Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica, Universitat Politècnica de València, Camí de Vera s/n, 46022 València, Spain, UE

[sercasib@upvnet.upv.es](mailto:sercasib@upvnet.upv.es), [jobrapla@fis.upv.es](mailto:jobrapla@fis.upv.es), [mferri@fis.upv.es](mailto:mferri@fis.upv.es), [jusanc@fis.upv.es](mailto:jusanc@fis.upv.es)

<sup>3</sup>BECSA, Ciudad del Transporte II, C/Grecia, 31, 12006 Castellón, Spain

[mppeiro@becsa.es](mailto:mppeiro@becsa.es)

<sup>4</sup>Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras, Universitat Politècnica de València, Paraninf 1, Grao de Gandia, 46730 Gandia, Valencia, Spain, UE

[fredondo@fis.upv.es](mailto:fredondo@fis.upv.es), [rpico@fis.upv.es](mailto:rpico@fis.upv.es)

## Resumen

Las barreras acústicas basadas en cristales de sonido constituyen una de las apuestas tecnológicas más prometedoras de los últimos años en el campo de la acústica ambiental. Los cristales de sonido se pueden definir como nuevos materiales formados por redes de dispersores acústicos embebidos en aire. Para el diseño de estas pantallas se emplean potentes modelos de simulación que aportan resultados fiables sin la necesidad de costosas pruebas experimentales.

Este trabajo aplica el Método de Elementos Finitos para analizar una barrera basada en cristales de sonido en la que se asocia un resonador (de Helmholtz) a sus dispersores y se estudia la interferencia propia del cristal de sonido con el efecto de resonador teniendo en cuenta la orientación de éste con respecto a la fuente sonora.

**Palabras clave:** Cristal de sonido, Resonador Helmholtz, Barrera acústica

**Abstract:** Acoustic screens based on sonic crystals constitute one of the most promising technological bets of recent years in the field of environmental acoustics. Sonic crystals are defined as new materials formed by arrays of acoustic scatterers embedded in air. The design of these screens is made using powerful simulation models that provide reliable results without the need of expensive experimental testing.

This project applies the finite elements method in order to analyse an acoustic barrier that includes (Helmholtz) resonators in its scatterers, and studies the interference of the sonic crystal with the effect of the Helmholtz resonator, depending on its orientation with the acoustic source.

**Keywords:** Sonic crystal, Helmholtz resonator, Acoustic barrier

**PACS:** 43.40. Tm, 43.50.Gf, 43.55. Ti

## 1 Introducción

Las barreras acústicas y los métodos de atenuación del ruido están ampliamente desarrollados desde hace tiempo; sin embargo, los cristales de sonido (CS) y su aplicación experimental en el campo de la acústica ambiental son mucho más recientes y surgen como una posible alternativa a las barreras acústicas tradicionales [1].

Los CS tienen una estructura propia de una red periódica, emulando a la estructura atómica de sólidos cristalinos y presentando elementos distribuidos de forma regular y repetitiva en el espacio denominados dispersores acústicos. En función del número de direcciones en las que se presente la repetición de dispersores, los CS pueden ser unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D) [2]. A lo largo de este trabajo se consideran únicamente CS bidimensionales para reducir los tiempos computacionales de las simulaciones.

Este trabajo se centra en CS bidimensionales con topología Cermet, donde los dispersores rígidos estarán embebidos en aire, siendo éste el material huésped a través del cual se transmite el sonido. Se ha demostrado que esta geometría es la que más favorece la atenuación en ondas acústicas, mientras que para ondas electromagnéticas es más conveniente utilizar la topología Network [3].

## 2 Modelo de simulación ideal

En este trabajo el modelo 2D se adapta para analizar redes con simetría cuadrada apoyándose en el uso de contornos horizontales con condición periódica, Figura 1. Acercándose así a una simulación más cercana a la realidad, sin suponer un alto coste computacional.

En la Figura 1 se observa los dispersores colocados en red donde los contornos horizontales (inferior y superior) tienen una condición periódica, haciendo que la red tenga unas características propias de una barrera de longitud semi-infinita, acercándose así a una simulación más cercana a los modelos de la realidad, pero reduciendo enormemente el tiempo de cálculo.

En los extremos laterales se insertan PMLs de absorción perfecta para evitar reflexiones indeseadas (condición de campo libre) [4].

Bajo las dos condiciones impuestas se inserta un sistema de tres dispersores con resonador, que constituye lo que se denominará como “modelo ideal”, situando el punto de medida a 1 m de distancia de la superficie del último dispersor.

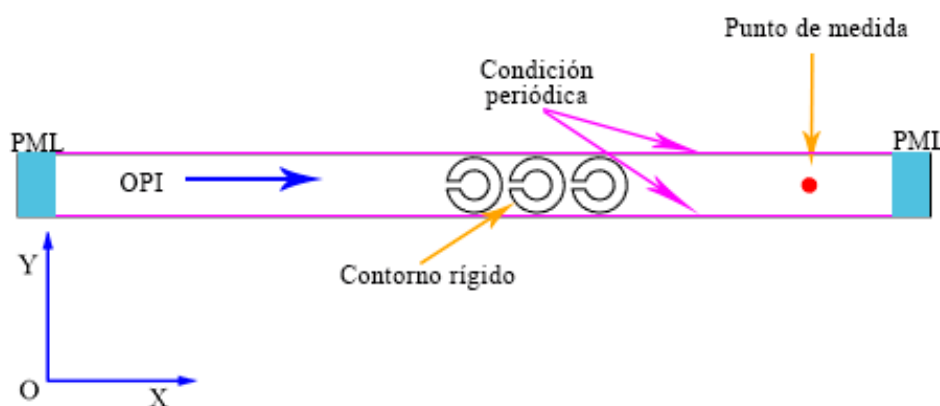


Figura 1 - Modelo de simulación de CS Ideal de 3 filas con onda plana incidente (OPI)

### 3 Parámetros generales de diseño

El principal reto de diseño para una barrera basada en CS es hacerlos competitivos con respecto a las barreras acústicas tradicionales en cuanto a los niveles de atenuación que producen. Actualmente existen modelos bidimensionales que aportan unos resultados con un rendimiento y fiabilidad equiparables a las pruebas experimentales, y sirven de punto de partida para los diseños de este trabajo. Para el diseño de las barreras, se busca obtener la mayor atenuación posible para los intervalos de frecuencias objetivo, y este trabajo se centra en las bajas frecuencias, que son las más difíciles de atenuar. El uso de resonadores de Helmholtz (HR), permite obtener elevados niveles de atenuación a bajas frecuencias sin necesitar grandes espesores de barrera, ya que, si únicamente actuase la dispersión múltiple del CS, los parámetros de red serían de gran tamaño para atenuar a bajas frecuencias.

A continuación, se describen las principales características de los modelos empleados:

- La **forma de los dispersores** determina en gran medida las prestaciones del diseño final del CS; por ello, y debido a la facilidad de cálculo que aporta la simetría de la forma circular, los dispersores utilizados en este trabajo son circulares y en el caso de la utilización de resonadores de Helmholtz, el cuello rectangular conecta con una cavidad circular también, por lo que en estos casos se habla de radio externo e interno.
- En las simulaciones realizadas, las dimensiones físicas de los modelos se diseñan en función de las frecuencias de interés. El parámetro de red cuadrada del CS vendrá dado por la frecuencia del primer Band Gap (BG) de Bragg [5]:

$$a = \frac{c}{2 * f_{Bragg}} \quad (1)$$

- En los CS de este trabajo, los elementos dispersores están siempre inmersos en aire, cuya velocidad de propagación del sonido y densidad son, respectivamente,  $c=343$  m/s y densidad  $\rho=1,25$  kg/m<sup>3</sup>.

En este trabajo el análisis en frecuencia se realiza por debajo de 1000 Hz. Otros trabajos han conseguido resultados de atenuación excelente para frecuencias superiores, por ejemplo, mediante la combinación de cavidades resonantes con material absorbente y disposición de los dispersores en geometrías fractales [6].

Para el análisis de los diferentes diseños de barreras se utilizan espectros de frecuencia como representación de los datos acústicos [7].

Concretamente la representación del *Insertion Loss* (IL) frente a la frecuencia en banda fina. También se representará la variación de la fase en el mismo rango frecuencial del espectro de IL.

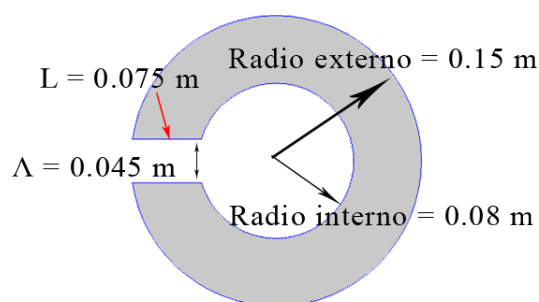
### 4 Especificaciones de los diseños

Este apartado se indican las características geométricas de los resonadores de Helmholtz empleados, teniendo en cuenta que el parámetro de red escogido para el diseño del CS se encuentra centrado sobre la frecuencia de 500 Hz.

Se plantea el objetivo de ampliar la atenuación del sistema CS+Resonador diseñando los resonadores para que interaccionen por encima y por debajo de esta frecuencia.

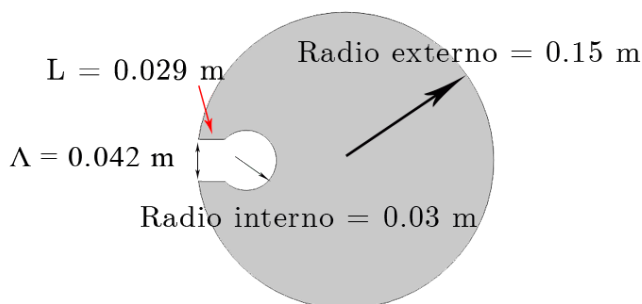
#### Diseño de resonadores

- Esta interacción se analiza para dos diseños de CS muy diferenciados:
  - Por un lado, un diseño en el cual la frecuencia de resonancia de Helmholtz se sintoniza a 210 Hz siguiendo los parámetros geométricos de la Figura 2.



**Figura 2 - Diseño de Resonador de Helmholtz con  $f_H = 210$  Hz**

- Un segundo diseño sintonizado a 735 Hz como muestra la siguiente Figura 3.

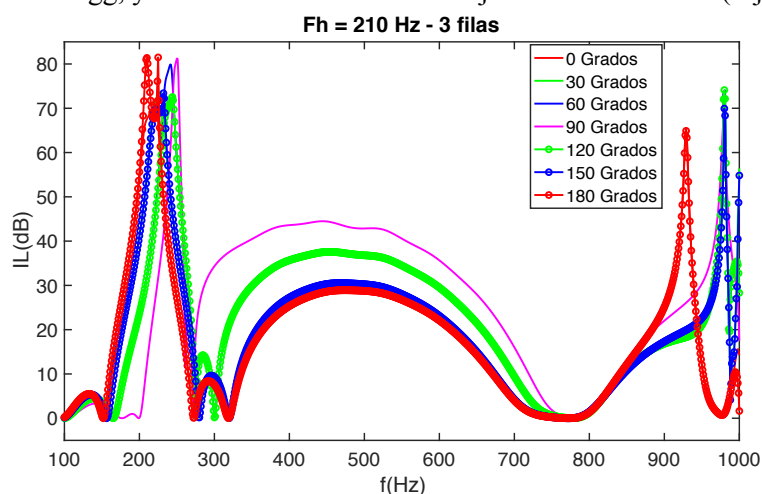


**Figura 3 - Diseño de Resonador de Helmholtz con  $f_H = 735$  Hz**

Quedando en ambos casos la frecuencia de resonancia cercana a la  $f_{\text{Bragg}}$  de 500 Hz y en el rango de interés de bajas frecuencias, por debajo de 1000 Hz.

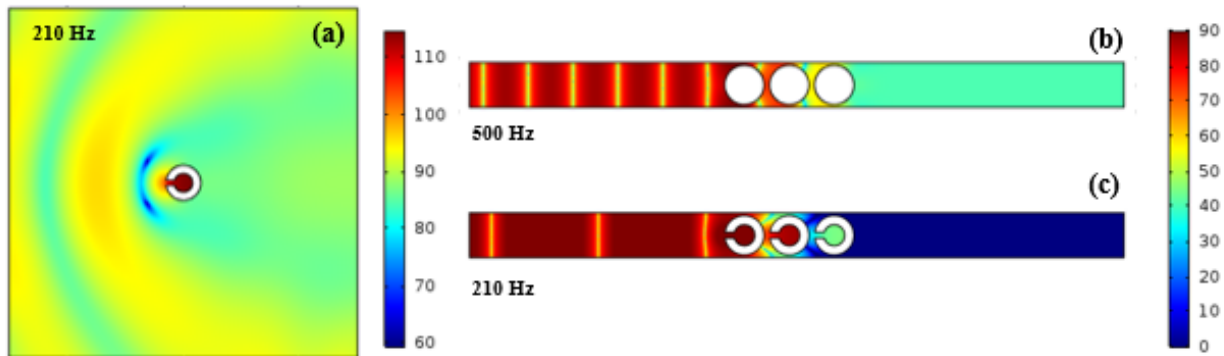
### Orientación de los resonadores

- Para estudiar la variación de incidencia de la onda sonora, se modificará la orientación de la boca del resonador con respecto a la dirección de la onda incidente, para ello, de las 3 filas de dispersores rotarán a la vez. Los giros se realizarán en sentido (horario) y el rango de variación del ángulo de rotación queda delimitado de 0 a 90°. Esta reducción del ángulo se debe al eje de simetría encontrado a 90°, y la repetición de los resultados al sobrepasar este ángulo como muestra la Figura 4. Se observa también en la Figura 4 el pico de resonancia de la  $f_{\text{Helmholtz}}$  y el primer BG de Bragg, y los ILs coincidentes se dibujan del mismo color (rojo, 0° y 180°).



**Figura 4 - Espectros del IL en función de la variación del ángulo de rotación del CS ideal. Rango 0-180°**

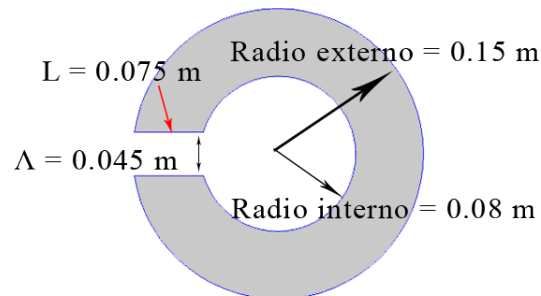
- Como referencia con la que comparar los espectros de IL en todos los casos se considera el CS que no incorpora resonadores, solo dispersores macizos rígidos (D), por lo que sólo tiene en cuenta el fenómeno de dispersión múltiple como mecanismo de control de ruido (Figura 5 b). En las barreras de tres filas tiene la denominación **DDD**. En la Figura 5 a observamos también un dispersor con resonador aislado a su frecuencia de resonancia y el mismo diseño de dispersor en el modelo de simulación ideal (Figura 5 c).



**Figura 5 - Mapas de nivel de presión sonora: (a) Resonador sintonizado a 210 Hz, (b) CS sin resonadores, DDD a la  $f_{\text{Bragg}}$  de 500 Hz, (c) CS Ideal de 3 filas con resonadores a la frecuencia de resonancia 210 Hz**

## 5 Análisis de resultados

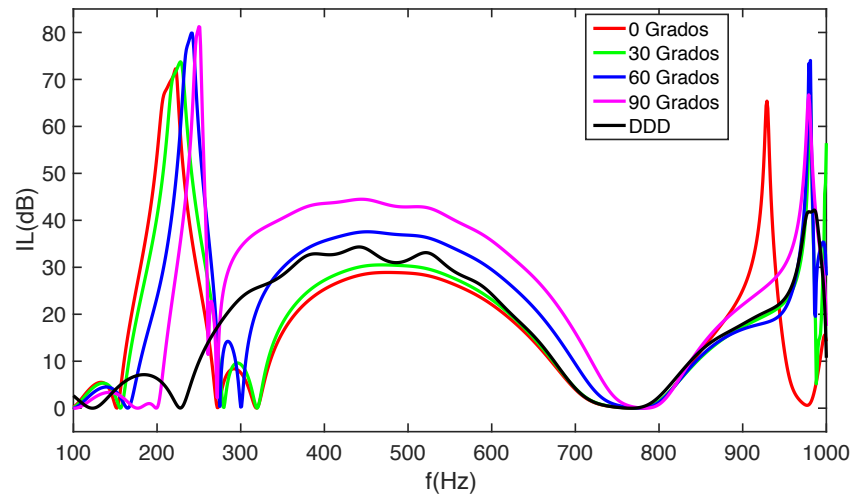
### 5.1 Estudio con $f_{\text{Helmholtz}}$ menor a $f_{\text{Bragg}}$



**Figura 6 - Diseño de Resonador de Helmholtz con  $f_{\text{H}} = 210$  Hz**

En un primer estudio se analiza un CS ideal de 3 filas, en el que los resonadores se han sintonizado a 210 Hz, según los parámetros físicos que muestra la Figura 6 y los dispersores se han dispuesto con un parámetro de red  $a=0,343\text{m}$  para conseguir que la  $f_{\text{Bragg}} = 500$  Hz y observar la interacción entre estos dos fenómenos que se encuentran relativamente cercanos en la zona de baja frecuencia.

Se toma la decisión de utilizar un paso entre ángulos de  $30^\circ$ , siempre en sentido horario y hasta alcanzar los  $90^\circ$ , siendo este un paso de rotación representativo en el que las modificaciones se aprecian con claridad sin necesidad de tomar más valores.



**Figura 7 - Variación del IL en función del ángulo de rotación de un CS Ideal de 3 filas**

En la Figura 7, se aprecian cambios importantes relacionados con los valores de IL. Para un estudio más detallado, se analizan por separado el efecto del cambio de orientación de los resonadores atendiendo, por un lado, al **pico de resonancia** (que atiende a sus características geométricas, volumen, longitud del cuello y superficie de entrada) del resonador y por otro al BG relacionado con la interacción entre la onda sonora y los dispersores, **primer BG de Bragg**

#### **Pico de resonancia**

*Desplazamiento del pico de resonancia.* Se observa que al modificar la orientación el pico de resonancia se desplaza hacia altas frecuencias. Los valores límites observados son a  $0^\circ$ , 223 Hz y a  $90^\circ$ , 251 Hz

*Valor del pico de resonancia.* Se observa que el valor del pico de resonancia crece con el cambio de orientación de la boca del resonador. El valor mínimo del pico de resonancia es de 72 dB a  $0^\circ$  y el máximo corresponde a 81 dB para  $90^\circ$ .

*Anchura de la resonancia.* Otro efecto observado es que la anchura de la resonancia se ve reducida conforme aumenta el ángulo de rotación.

#### **Primer BG de Bragg**

Para analizar las variaciones en el BG, se parte de la referencia comentada de 3 dispersores rígidos cerrados sin resonadores (DDD en la Figura 7).

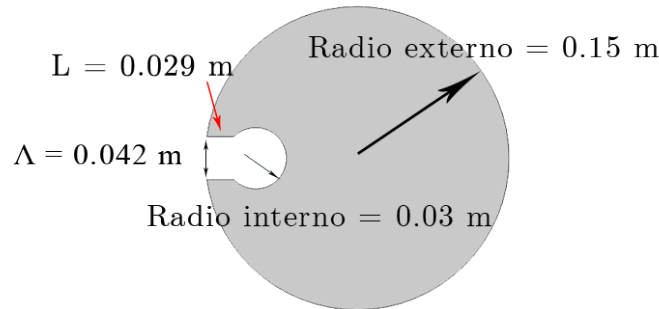
*Desplazamiento del BG.:* Se observa, como para ángulos pequeños el inicio del BG se desplaza del de referencia a 230 Hz, hasta 320 Hz, sin embargo, la frecuencia final se mantiene intacta. Conforme va aumentando el ángulo de rotación este desplazamiento se corrige ligeramente.

*Valor del BG.* Con el aumento del ángulo de rotación se aprecia una mejora en el valor del BG, de 29 dBs a  $0^\circ$ , hasta 44 dBs a  $90^\circ$ . Pero siendo a  $0^\circ$  y  $30^\circ$  menor a la referencia DDD.

*Anchura del BG.* Dado que la frecuencia final del BG no se ve modificada y se mantiene a 760 Hz, pero la frecuencia inicial si que se desplaza, la anchura aumenta conforme aumenta el ángulo de rotación, hasta obtener un ancho de trabajo similar al de la referencia para  $90^\circ$ .

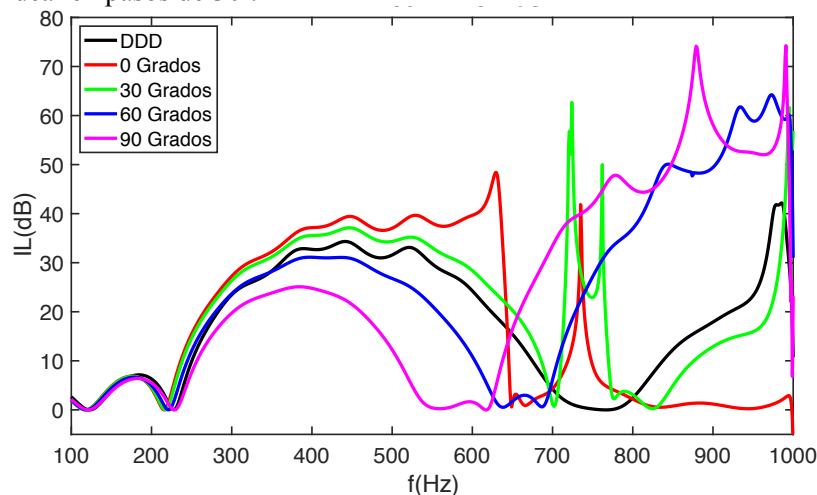
## 5.2 Estudio con $f_{\text{Helmholtz}}$ mayor que $f_{\text{Bragg}}$

En una búsqueda por ampliar el análisis de la interacción entre el **pico de resonancia** de Helmholtz y el **primer BG de Bragg** se estudia a continuación un diseño en el que se sintoniza la frecuencia de los resonadores a 735 Hz, por encima de la frecuencia de Bragg de 500 Hz y cuyos parámetros físicos se muestran en la Figura 8.



**Figura 8 - Diseño de Resonador de Helmholtz con  $f_H = 735$  Hz**

De forma análoga al estudio anterior, se analiza el efecto de la rotación de los resonadores del CS de 3 filas del modelo ideal en pasos de 30°.



**Figura 9 - Variación del IL en función del ángulo de rotación de un CS Ideal de 3 filas**

### Pico de resonancia

*Desplazamiento del pico de resonancia.* De nuevo, al aumentar el ángulo de rotación, el pico de resonancia se desplaza hacia frecuencias más elevadas. Los valores límites observados en la Figura 9 son a 0°, 735 Hz y a 90°, 880 Hz.

*Valor del pico de resonancia.* Se observa un aumento en el valor del pico conforme va aumentando el ángulo, de 41 dBs a 0° hasta 73 dBs a 90° interactuando con el segundo BG de Bragg.

*Anchura de la resonancia.* De forma contraria al estudio anterior, la anchura del pico va aumentando conforme aumenta el ángulo de rotación.

### Primer BG de Bragg

*Desplazamiento del BG.* Se observa ahora, a diferencia del estudio anterior, cómo para ángulos grandes el final del BG que en la referencia se encontraba a 720 Hz, se desplaza desde 650 Hz a 0°, hasta 541 Hz a 90°. Sin embargo, la frecuencia inicial se mantiene intacta a 230 Hz.

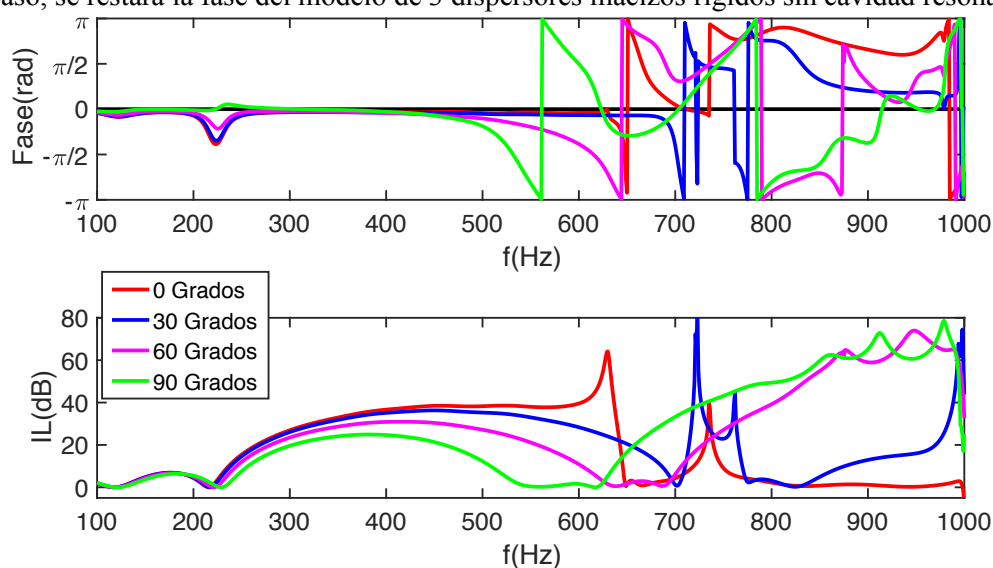
*Valor del BG.* Con el aumento del ángulo de rotación se produce una reducción en el valor del BG, de 39 dBs a 0°, hasta 25 dBs a 90°. Siendo a 0° y 30° mayor a la referencia DDD.

*Anchura del BG.* Dado que la frecuencia inicial en este caso del BG no se ve modificada y se mantiene a 226 Hz, es la frecuencia final la que si se desplaza, y la anchura se reduce conforme aumenta el ángulo de rotación, pero teniendo un ancho de trabajo similar al de la referencia para 0°.

## 6 Estudio de la variación de fase

A continuación, se estudia la variación de fase del sistema con la esperanza de poder dar una explicación a los efectos observados relacionados con los desplazamientos y modificaciones encontradas en los espectros, ya que, estudios recientes confirman que la interacción entre el **pico de resonancia** y el **primer BG de Bragg** es debida a cambios en la fase [8]. Por ello, en el siguiente apartado se estudiará la variación de la fase para los casos analizados anteriormente.

Como sucedía con los espectros de IL, la referencia para el espectro de variación de la fase será DDD. En este caso, se restará la fase del modelo de 3 dispersores macizos rígidos sin cavidad resonante.



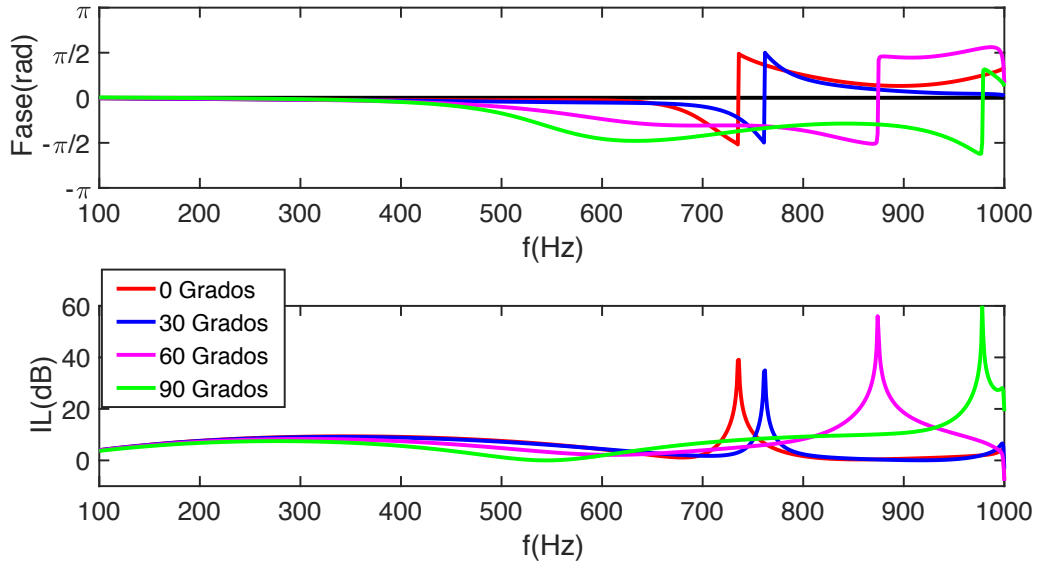
**Figura 10 - Variación de la fase (arriba) y de ILs (abajo) en función del ángulo de rotación para una única fila con radio externo de 15 cm.**

En la Figura 10 se observan cambios de fase que coinciden con los picos de resonancia del espectro de IL. Para simplificar el estudio y distinguir con mayor claridad los efectos relacionados con la orientación del resonador en la fase del sistema se opta por simplificar el modelo a un CS ideal en el cual habrá una única fila de resonadores, eliminando así uno de los mecanismos de control de ruido de la barrera (la dispersión múltiple) y quedando únicamente el **pico de resonancia**.



## 7 Análisis de fase de una fila con resonadores de radio 0.15m y $f_H = 735$ Hz.

En este nuevo estudio, la referencia será una única fila de dispersores macizos, es decir, el equivalente de una fila del modelo DDD.



**Figura 11 - Variación de la fase (arriba) y de ILs (abajo) en función del ángulo de rotación para una única fila con radio externo de 15 cm.**

*Coincidencia picos y cambio de fase.* En la gráfica superior de la Figura 11, el aumento del ángulo de rotación crea un retardo en la fase hasta la frecuencia en que se produce el cambio de fase, que coincide exactamente con el **pico de resonancia** observado en el espectro de ILs.

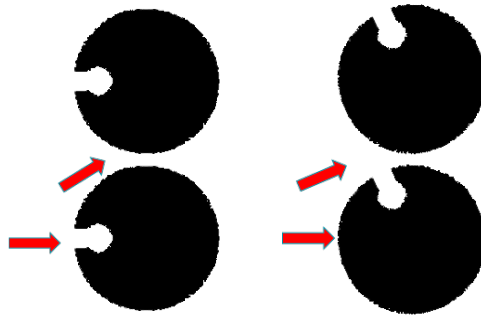
*Retardo de fase.* Este retardo afecta a un mayor rango del espectro conforme aumenta el ángulo de rotación, siendo casi inexistente para  $0^\circ$ , poco acusado a  $30^\circ$ , notablemente grande para  $60^\circ$  y comenzando en 500 Hz para el caso de  $90^\circ$ .

*Desplazamiento del pico de resonancia.* En la gráfica inferior de la Figura 11 se observa claramente el desplazamiento del pico de resonancia de los resonadores de Helmholtz en función del ángulo de rotación, aumentando desde un valor de 735 Hz (rojo,  $0^\circ$ ), hasta 978 Hz (verde,  $90^\circ$ ).

*Rango vertical.* El cambio de fase que para el caso de incidencia normal ( $0^\circ$ ) se produce en el rango vertical entre  $-\pi/2$  y  $\pi/2$ , va modificándose con el aumento del ángulo de rotación, hasta un intervalo de igual valor, pero desplazado negativamente, llegando a alcanzar un rango comprendido entre  $-3\pi/4$  y  $\pi/4$ .

Tras el análisis de los resultados, se plantea la siguiente hipótesis acerca del retardo que se encuentra al modificar la dirección de incidencia en el resonador:

La masa de aire del cuello, que resuena, encuentra un espacio diferente en función del ángulo de rotación, como se puede observar en la Figura 12. En los casos en que el ángulo es pequeño tiene mucho espacio delante de la boca del resonador frente a los casos en que, debido a ángulos de giro mayores, la abertura del resonador se encuentra encarada hacia un espacio de aire menor, por la presencia de otro resonador adyacente de la misma fila.



**Figura 12 - Incidencia de onda normal (izq.) frente a una incidencia oblicua con un ángulo de 60°(dcha.) en los resonadores**

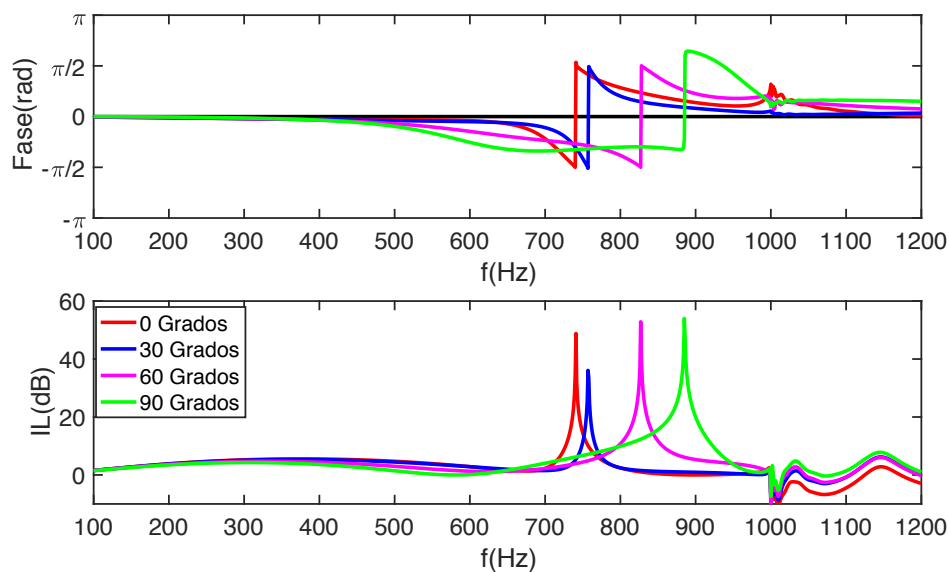
## 8 Comprobación de hipótesis

Para comprobar la hipótesis expuesta en el apartado anterior, se estudia ahora el mismo modelo de CS de una fila, en este caso modificando únicamente el radio externo de los resonadores, pero manteniendo el resto de sus parámetros para no modificar su frecuencia de resonancia y que sigan sintonizados a 735 Hz. El nuevo radio externo escogido es de 13 cm.

Se busca de esta forma reducir la interacción que se encuentra un resonador con el adyacente de su misma fila, y también, al tener un radio menor, el camino recorrido hasta la boca del resonador será menor.

En este nuevo estudio, se ampliará el espectro a analizar hasta 1200 Hz, para observar si el rango en que afecta esta interacción es simétrico por encima de la frecuencia en que cambia de fase.

## 9 Análisis de fase para una fila con resonadores de radio = 0.13 m y $f_H = 735$ Hz.



**Figura 13 - Variación de la fase (arriba) y de ILs (abajo) en función del ángulo de rotación para una única fila con radio externo de 13 cm.**

En una primera visión general, se observa en la Figura 13 una clara asimetría de la fenomenología, ya que para todos los ángulos representados el retardo se produce únicamente por debajo de la frecuencia **pico de resonancia** y al superarla, solo modifica la fase hasta 1000 Hz.

*Coincidencia picos y cambio de fase.* En la Figura 13 de nuevo, existe una clara coincidencia entre la frecuencia de resonancia y el cambio observado en la fase.

Para un análisis que aporte una mejor visión de la comprobación que se buscaba, se muestran ambos estudios de fase en una misma Figura 14, para los diferentes radios externos de los resonadores del CS.

*Retardo de fase.* Cabe destacar, que el retardo previo al cambio de fase que se produce en el pico de resonancia se reduce enormemente con el nuevo radio propuesto, para los casos de 60 y 90°, tanto en valor de radianes como en la anchura que ocupa en el espectro en comparación con el radio inicial

*Desplazamiento del pico de resonancia.* En la Figura 14 se observa una reducción del desplazamiento del pico de resonancia para el nuevo radio de 13 cm, desde 741 Hz (rojo, 0°) hasta 885 Hz (verde, 90°) que para el caso anterior del radio de 15 cm era de 735 Hz a 978 Hz.

*Rango vertical.* En la Figura 14 el rango de variación vertical de fase que para el caso de radio de 15 cm se desplaza negativamente hasta casi  $-3\pi/4$ , en este nuevo caso con un radio menor, de 13 cm, se desplaza en sentido opuesto hacia valores cercanos a  $3\pi/4$ .

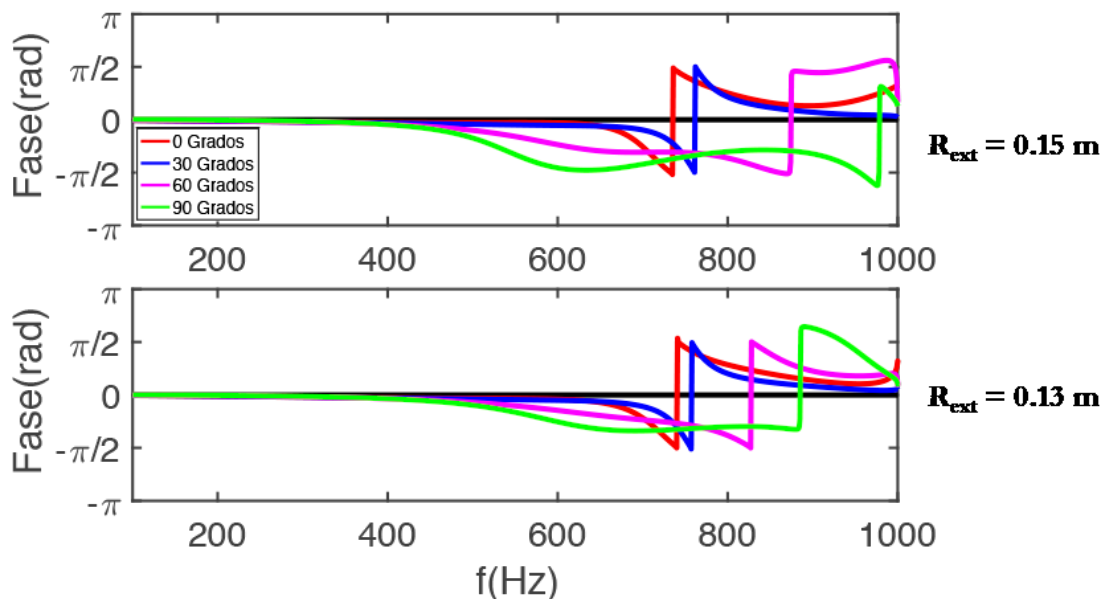


Figura 14 - Comparación de estudios de fase para un CS con resonadores de radio de 15 cm (arriba) y resonadores de radio 13 cm (abajo)

## 10 Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado la interacción entre los dos fenómenos de control de ruido asociados a estos metamateriales acústicos como son la dispersión múltiple de los BG de Bragg y los picos de la frecuencia de resonancia de los resonadores de Helmholtz ( $f_{\text{Helmholtz}}$ ).

Esta interacción entre fenómenos se analiza en función de la dirección de incidencia de la onda sonora, y permite extrapolar conclusiones a casos en el que la fuente se encuentre en movimiento. La abertura del resonador pasará de encontrar la onda sonora con una incidencia normal, a una incidencia oblicua.

El análisis se realiza para dos diseños bien diferenciados como son:

- Cuando la  $f_{\text{Helmholtz}}$  es inferior a la  $f_{\text{Bragg}}$ .
- Cuando la  $f_{\text{Helmholtz}}$  es superior a la  $f_{\text{Bragg}}$ .

Siempre en el rango de 100 a 1000 Hz y a una distancia cercana en el espectro que permita visualizar la interacción.

Para el caso en  $f_{\text{Helmholtz}} < f_{\text{Bragg}}$  la incidencia normal sobre los resonadores, favorece un rango mayor de atenuación, pero es en el caso de un ángulo de  $90^\circ$  en el que tanto el pico de resonancia como el BG aumentan su valor en dBs, pese a verse reducido el rango frecuencial.

En el caso  $f_{\text{Helmholtz}} > f_{\text{Bragg}}$  se observa que la interacción más favorable para la atenuación a bajas frecuencias, se obtiene colocando los resonadores con un ángulo de  $0^\circ$  respecto a la onda incidente.

El propósito principal de este trabajo, el análisis de la interacción que modifica el espectro de IL, encuentra su justificación en las variaciones de fase que sufre la onda incidente dentro de los resonadores del CS.

Para una visión más clara, se ha analizado un modelo simplificado del CS de 3 filas, colocando únicamente una fila de resonadores y modificando posteriormente el radio externo de estos. Con ello, se confirma la hipótesis barajada acerca de las modificaciones sufridas en el cambio de fase (causante de la interacción).

La interacción de los resonadores con las filas adyacentes a ángulos en los que la abertura del resonador se encuentra encarada parcial o totalmente al resonador de la fila contigua, provoca retardos y variaciones en los espectros de cambio de fase.

Como línea de trabajo futuro se propone la profundización en el estudio de esta interacción, para CS de más de una fila, pudiendo encontrar así una justificación coincidente con las variaciones encontradas en los diseños iniciales del CS de 3 filas. También la validación de los resultados de las simulaciones con modelos experimentales en condiciones similares a las simuladas.

## Bibliografía

- [1] Martínez-Sala R., Sancho J., Sánchez-Perez J.V., Gómez V., Llinares J., Meseguer F., «Sound attenuation by sculpture,» *Nature*, vol. 378, p. 241, 1995.

- [2] Romero García V., «On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques,» *Tesis -Universitat Politècnica de València*, 2010.
- [3] Economu E.N. and Sigalas M.M., *Physical review*, vol. 48, p. 134, 1993.
- [4] Berenguer JP., «A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves,» *J. Comput. Phys.*, vol. 114, pp. 185-200, 1994.
- [5] Kittel. C., *Introduction to Solid State Physics*, 8a Ed., 2004.
- [6] Castiñeira-Ibáñez S., Rubio C., Romero-García V., Sánchez-Pérez J. V. and Garcia-Raffi L. M., «Design, Manufacture and Characterization of an Acoustic Barrier Made of Multi-Phenomena Cylindrical Scatterers Arranged in a Fractal-Based Geometry,» *Archives of Acoustics*, vol. 37, nº 4, pp. 455-462, 2012.
- [7] Castiñeira-Ibáñez,S.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez, J.V.; Garcia-Raffi, L.M., «Periodic systems as road traffic noise reducing devices; prototype and standarization,» *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 14, nº 12, pp. 2759-2769, 2015.
- [8] Peiró-Torres, M.P.; Redondo, J.; Castiñeira-Ibáñez, S.; Romero-García, V.; Sánchez-Pérez J.V., «Interferences in locally resonant sonic metamaterials formed from Helmholtz resonators,» *Appl. Phys.*, vol. 114, 2019.