

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA POLITÈCNICA
SUPERIOR DE GANDIA

**“Estudio numérico de sistemas
para la mitigación sonora en la
base de lanzamiento de cohetes
espaciales durante la fase de
despegue”**

TRABAJO FINAL DE MASTER

Autor/a:

Maria Teresa Gilabert Ramón

Tutor/a:

Rubén Picó Vila

Víctor José Sánchez Morcillo

GANDIA, 2018

RESUMEN

Este trabajo fin de máster consiste en la realización de un estudio numérico mediante elementos finitos sobre sistemas de mitigación sonora del ruido producido por los cohetes espaciales durante la fase de despegue. Este trabajo se enmarca dentro de la investigación realizada por varios miembros de la Escuela Politécnica Superior de Gandia en la Universidad Politécnica de Valencia en colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA).

El ruido proviene del flujo de escape del motor del cohete espacial y alcanza unos niveles sonoros excesivos. El sonido se refleja en las instalaciones de la base de lanzamiento y alcanza a la carga del cohete dañando gravemente los equipos electrónicos internos.

Se estudia numéricamente la estrategia propuesta por el grupo de investigación que consiste en el uso de cristales de sonido y utilizar sus propiedades dispersoras del sonido para disminuir las reflexiones en la dirección de incidencia las cuales alcanzan al cohete. A continuación, se estudia la posibilidad de emplear los resonadores de Helmholtz en cristales de sonido para aplicar sus propiedades de absorción acústica al entorno aeroespacial, el cual es el objeto del estudio, y se obtiene una reducción del nivel de presión sonora alrededor de la frecuencia de resonancia.

PALABRAS CLAVE

Cristales de sonido, Resonador de Helmholtz, Base de lanzamiento, Lanzamiento de cohetes espaciales, Comsol

ABSTRACT

This master's thesis consists in the realization of a numerical study by finite elements method on the reduction systems of the noise produced by the space rockets during the takeoff phase. This work is a part of the research carried out by several members of the *Escuela Politécnica Superior de Gandia* in the *Universidad Politécnica de Valencia* and done in collaboration with the European Space Agency (ESA).

The noise comes from the exhaust flow of the space rocket engine with excessive sound pressure levels. The sound is reflected in the installations of the launch pad and reaches the load of the rocket, severely damaging the internal electronic equipment.

The strategy proposed by the research group is studied numerically, consisting of the use of the sonic crystals and their sound scattering properties to reduce reflections in the direction of incidence which reach the rocket. Next, the possibility of using Helmholtz resonators in the sonic crystals is studied to apply their acoustic absorption properties to the aerospace environment, which is the object of the study, and a reduction of the sound pressure level around the resonance frequency is obtained.

KEYWORDS

Sonic crystals, Helmholtz resonator, Launchpad, Space rocket launch, Comsol

Índice de contenido

1. Introducción	1
1.1 Presentación	1
1.2 Introducción teórica	3
1.2.1 Cristales de sonido	3
1.2.2 Resonadores de Helmholtz	6
1.3 Estrategias para la mitigación sonora en entornos aeroespaciales	9
1.4 Parámetros para la reducción del ruido	11
2. Objetivos	13
3. Método de simulación empleado	14
4. Estudio numérico sobre cristales de sonido	15
4.1. Estudio numérico sobre cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos	16
4.1.1. Diseño de las estructuras	16
4.1.2. Obtención de resultados	18
4.1.2.1 Formación de la banda prohibida	18
4.1.2.2. Resonancias de Fabry-Pérot	23
4.1.2.3. Coeficiente de difusión sonora	25
4.2. Estudio numérico sobre cristales de sonido formados por resonadores de Helmholtz	28
4.2.1. Diseño de las estructuras	28
4.2.2. Obtención de resultados	30
4.2.2.1 Formación de la banda prohibida	30
4.2.2.2. Coeficiente de difusión sonora	33
5. Aplicación de los cristales de sonido al entorno aeroespacial	35
5.1 Aplicación de las pérdidas termo-viscosas	35
5.2. Diseño geométrico: aproximación al entorno aeroespacial	37
5.3. Obtención de resultados	38
6. Conclusiones y líneas futuras	42
7. Bibliografía	44

Índice de figuras

Figura 1. Estado inicial del lanzamiento de Vega [2].	1
Figura 2. Espectro de las emisiones acústicas, extraído del manual Vega [2].	2
Figura 3. Escultura de Eusebio Sempere situada en la Fundación Juan March de Madrid [4].	4
Figura 4. Sistemas periódicos en 2D: (A) Tipos de red en 2D; (B) Red cuadrada; (C) Red triangular [5].	4
Figura 5. Dibujo demostrativo de la formación de la celda unidad en una estructura de cristales de sonido.	5
Figura 6. (a) Direcciones de propagación en la zona irreducible de Brillouin para estructuras 2D de red cuadrada: $r-X-M-r$. (b) Gráfico del vector de onda en función de la frecuencia de la zona irreducible de Brillouin. K varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en $r-X$, de 1 a 2 en $X-M$ y de 2 a 3 en $M-r$ [6].	6
Figura 7. Ejemplos de resonadores de Helmholtz [7].	7
Figura 8. (a) Estructura finita de cristales de sonidos compuesta por S filas de dispersores en forma de "C" con constante de red d en ambas direcciones horizontales. (b) Un dispersor en forma de "C" (resonador) de radio a y ángulo de apertura 2α [11].	8
Figura 9. Configuración de los cristales de sonido sobre una superficie reflectante [3].	11
Figura 10. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos con la misma constante de red a de 1m y diferentes diámetros d de: a) 1m; b) 0.7m; c) 0.5m; d) 0.3m.	16
Figura 11. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos con el mismo diámetro d de 1m y diferentes constantes de red a de: a) 1m; b) 1.25m; c) 1.5m; d) 1.75m.	17
Figura 12. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de la banda prohibida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 0.3m de diámetro y 1m de constante de red.	19
Figura 13. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de la banda prohibida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.75m de constante de red.	19
Figura 14. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de la banda prohibida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.	20
Figura 15. Gráfico de superficie del nivel de presión sonora [dB] a la frecuencia de Bragg de 170Hz para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.	21
Figura 16. Bandas de propagación obtenidas mediante la representación del número de onda k ($m-1$) en función de la frecuencia para la zona irreducible de Brillouin para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.25m de constante de red. El número de onda k varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en $r-X$, de 1 a 2 en $X-M$ y de 2 a 3 en $M-r$.	21
Figura 17. Bandas de propagación obtenidas mediante la representación del número de onda k ($m-1$) en función de la frecuencia para la zona irreducible de Brillouin para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.75m de constante de red. El número de onda k varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en $r-X$, de 1 a 2 en $X-M$ y de 2 a 3 en $M-r$.	22
Figura 18. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de las resonancias de Fabry-Pérot debidas al ancho de la estructura para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red.	23
Figura 19. Gráficos de superficie del nivel de presión sonora [dB] para las cuatro primeras resonancias de Fabry-Pérot respectivamente generadas por una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red a : (a) 15Hz; (b) 30Hz; (c) 50Hz; (d) 75Hz.	24
Figura 20. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de las resonancias de Fabry-Pérot entre el final de la estructura y una superficie	

reflectante para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.....	25
Figura 21. Para una superficie plana y reflectante: (a) coeficiente de difusión sonora; (b) coeficiente de difusión sonora normalizado	26
Figura 22. Coeficiente de difusión sonora de una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red normalizado con respecto a una superficie plana y reflectante.....	27
Figura 23. Nivel de presión sonora [dB] medido en campo lejano y representado en función del ángulo de situación del punto de medida para una superficie plana y reflectante a las frecuencias de: (a) 20Hz, (b) 100Hz, (c) 500Hz, (d) 800Hz.....	27
Figura 24. Nivel de presión sonora [dB] medido en campo lejano y representado en función del ángulo de situación del punto de medida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red a las frecuencias de: (a) 30Hz, (b) 170Hz, (c) 350Hz, (d) 560Hz, (e) 800Hz.	28
Figura 25. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores en forma de "C" con la misma constante de red (a) de 1m y diferentes diámetros (d): a) 1m; b) 0.7m; c) 0.5m; d)0.3m.	29
Figura 26. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores en forma de "C" con el mismo diámetro (d) de 1m y diferentes constantes de red (a): a) 1m; b) 1.25m; c) 1.5m; d)1.75m	29
Figura 27. Un dispersor en forma de C (resonador) de radio "a" y ángulo de abertura 2α [11].	30
Figura 28. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de las dos bandas prohibidas centradas a la frecuencia de resonancia de Helmholtz (azul) y a la frecuencia de Bragg (rojo) respectivamente para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C" de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red.	31
Figura 29. Gráficos de superficie del nivel de presión sonora a las frecuencias centrales de las dos bandas prohibidas generadas por una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C" de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red: (a) a la frecuencia de resonancia de Helmholtz; (b) a la frecuencia de Bragg.	32
Figura 30. Bandas de propagación obtenidas mediante la representación del número de onda k ($m - 1$) en función de la frecuencia para la zona irreducible de Brillouin para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C": (a) de 1m de diámetro y 1.25m de constante de red; (b) de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red. El número de K varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en $r - X$, de 1 a 2 en $X - M$ y de 2 a 3 en $M - r$.	32
Figura 31. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la influencia de variar el ángulo de abertura (10° , 20° , 30° y 45°) sobre la frecuencia de resonancia para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C".....	33
Figura 32. (a) Coeficiente de difusión sonora normalizado de una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C" de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red normalizado con respecto a una superficie plana y reflectante. (b) Comparación del coeficiente de difusión sonora normalizado de una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos con una de dispersores en forma de "C".	34
Figura 33. Nivel de presión sonora [dB] medido en campo lejano y representado en función del ángulo de situación del punto de medida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C" de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red a las frecuencias de: (a) 30Hz, (b) 100Hz, (c) 170Hz, (d) 560Hz, (e) 800Hz.....	34
Figura 34. Inserción del cuello a un resonador en forma de "C" para poder aplicar las pérdidas termo-viscosas en el modelo numérico.....	35
Figura 35. Coeficiente de absorción sonora para cuatro resonadores de Helmholtz de diferentes diámetros (1m, 0.7m, 0.5m y 0.3m): (a) sin aplicación las pérdidas termo-viscosas; (b) con aplicación de las pérdidas termo-viscosas.	36
Figura 36. Diseño del modelo geométrico aproximado al caso real de una base de lanzamiento de cohetes espaciales y utilizado para el cálculo numérico.	37
Figura 37. Nivel de presión sonora [dB] en función de la frecuencia [Hz] al usar una estructura de cristales de sonido formada por resonadores de Helmholtz con pérdidas termo-viscosas y	

sin pérdidas termo-viscosas: (a) en un gráfico lineal comparativo; (b) en un gráfico de barras que muestra la diferencia de niveles [dB].	39
Figura 38. Comparación del de presión sonora [dB] entre dos estructuras de cristales de sonido, pero una formada por dispersores cilíndricos y otra por resonadores de Helmholtz de 0.5m de diámetro y 1m de constante de red en ambos casos.	40
Figura 39. Pérdida por inserción (IL) [dB] de una estructura de cristales de sonido de 1m de constante de red formada por: (a) dispersores cilíndricos de 0.5m de diámetro; (b) resonadores de Helmholtz de 0.5m de diámetro de la cavidad con pérdidas termo-viscosas.	41

Índice de tablas

Tabla 1. Frecuencia de Bragg central a la banda prohibida y factor de llenado calculado de forma teórica para cada una de las estructuras de cristales de sonidos diseñadas y formadas por dispersores cilíndricos.	18
Tabla 2. Frecuencias de Bragg, teóricas y simuladas, centrales de las bandas prohibidas y generadas por varias estructuras de cristales de sonido con dispersores cilíndricos utilizadas más el cálculo del error relativo.	22
Tabla 3. Frecuencias teóricas y simuladas correspondientes a las resonancias de Fabry-Pérot debidas al ancho de la estructura para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red.	23
Tabla 4. Frecuencias teóricas y simuladas correspondientes a las resonancias de Fabry-Pérot debidas a la distancia de separación entre el final de la estructura y una pared reflectante para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.	25
Tabla 5. Frecuencia de Bragg central a la banda prohibida f_{BG} (Hz), frecuencia de resonancia de Helmholtz f_{HR} (Hz) y factor de llenado ff (%) calculado de forma teórica para cada una de las estructuras de cristales de sonidos diseñadas y formadas por dispersores en forma de "C".	30
Tabla 6. Frecuencias de resonancia de Helmholtz y de Bragg teóricas y simuladas centrales a las bandas prohibidas generadas en una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C" de $d=0.7m$ y $a=1m$	31
Tabla 7. Frecuencias teóricas y simuladas correspondientes a las frecuencias de resonancia de Helmholtz para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de "C" de 0.5m de diámetro y 1m de constante de red.	33

1. Introducción

1.1 Presentación

El lanzamiento de cohetes espaciales es un evento donde se genera un entorno acústico con niveles de ruido y vibracionales extremos. Los vehículos espaciales son considerados como los mayores emisores de ruido producido por el ser humano, y el estado excesivo de ruido puede afectar seriamente tanto a los vehículos espaciales a lanzar como a las instalaciones que forman la base de lanzamiento. Durante el tiempo en el que dura la fase de ascenso del cohete espacial (alrededor de dos minutos), éste puede llegar a emitir 180dB, perjudicando gravemente la estructura de la base de lanzamiento, la estructura exterior del cohete espacial, así como los equipos electrónicos, maquinarias y cargas situados en el interior del cohete [1].



Figura 1. Estado inicial del lanzamiento de Vega [2].

El sonido generado por el vehículo espacial durante el ascenso proviene del flujo de escape del motor y se puede separar entre componente directa y reflejada. La componente directa es el sonido que se radia directamente desde el cohete, mientras que la componente reflejada corresponde con el sonido directo que interactúa con las instalaciones de la base de lanzamiento y puede alcanzar, por reflexión, al cohete, dañándolo gravemente. Según medidas acústicas realizadas en el interior de la estructura del lanzador Vega (Kourou, La Guayana Francesa), los niveles de presión sonora dependen de la frecuencia, tal y como se muestra en la **Figura 2**, y alcanzan picos de nivel de 140dB a la frecuencia de 500Hz [2].

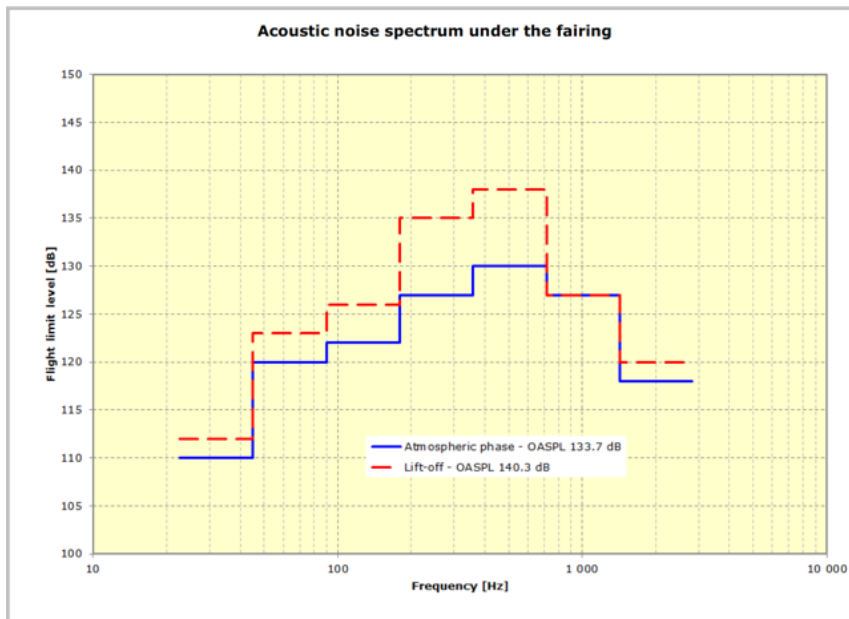


Figura 2. Espectro de las emisiones acústicas, extraído del manual Vega [2].

Hasta hace poco, la parte acústica no se había tomado en cuenta en el diseño de bases de lanzamiento. Su geometría y sus materiales siempre han sido implementados para solucionar otros problemas también importantes como la canalización de los gases de escape y la resistencia al calor extremo, pero las paredes y superficies que poseen son altamente reflectantes, lo cual no ayuda a solventar el problema acústico.

Debido a que cada vez las cargas a lanzar son más sensibles, y por tanto susceptibles de ser dañadas por las componentes sonoras de alto nivel, es cada vez más necesario tener en cuenta el entorno acústico, dado que se están poniendo en riesgo las misiones y grandes inversiones económicas [2]. Por este motivo, la Agencia Espacial Europea (ESA) ha centrado parte de su interés en la búsqueda de soluciones que permitan reducir el ruido durante el ascenso de cohetes espaciales en la base de lanzamiento. Para lograr este fin, la ESA firmó un contrato en 2014 junto con varios investigadores de la Escuela Politécnica Superior de Gandia en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y de otros laboratorios como el *Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine* (LAUM), de la *Universitat Politècnica de Catalunya* (UPC) y del AIRBUS D&S, con el propósito de estudiar posibles vías capaces de mejorar la mitigación sonora mediante el uso de estructuras pasivas [2].

El equipo de investigación formado para trabajar en este tema presentó varias estrategias para reducir la componente reflejada del sonido mediante estructuras basadas en cristales de sonido, las cuales formarían parte de la estructura de la base de lanzamiento [2]. Este Trabajo Fin de Máster (TFM) se enmarca en el contexto de este estudio.

El objetivo principal del presente proyecto es el de evaluar la posible aplicabilidad de los resonadores de Helmholtz en estructuras de cristales de sonido para intentar mejorar las prestaciones acústicas ya conseguidas hasta el momento en un entorno aeroespacial ante la necesidad de reducir el ruido en la base de lanzamiento. Para ello, se realizarán simulaciones mediante métodos numéricos para conocer el comportamiento de los cristales de sonido frente a un campo sonoro incidente.

En cuanto a la estructura del documento, se mostrará en primer lugar una introducción teórica sobre los cristales de sonido y sobre los resonadores de Helmholtz, para lograr un mayor entendimiento de la información presentada más adelante. Se continuará con una presentación de las estrategias propuestas para la mitigación sonora, así como la definición de los parámetros que se utilizarán para determinar la reducción del ruido. Después, se dará a conocer el método de simulación empleado para presentar a continuación la exposición y el análisis de los resultados obtenidos. Finalmente, una breve conclusión y presentación de posibles líneas futuras de investigación. Al final del documento se incluye la bibliografía utilizada.

1.2 Introducción teórica

Para un mayor entendimiento de las propiedades acústicas de los sistemas que se van a utilizar para conseguir la mitigación sonora durante el lanzamiento de cohetes espaciales, se dedicará el presente apartado a explicar los fundamentos teóricos más importantes que caracterizan a las estructuras de cristales de sonido y a los resonadores de Helmholtz.

1.2.1 Cristales de sonido

El grupo de investigación que colaboró con la ESA propuso el uso de cristales de sonido para mitigar la componente sonora reflejada en la dirección de incidencia, la cual alcanza y daña al cohete espacial. Dado que el presente trabajo se centra en utilizar los cristales de sonido para la mitigación sonora, se darán a conocer en primer lugar sus características más importantes.

Los cristales de sonido son distribuciones periódicas que repiten un mismo elemento en una o varias direcciones (1D, 2D, 3D), ordenados en forma de matriz, y que están inmersos en un medio fluido, como el aire o el agua. A cada uno de estos elementos se les llama dispersores, los cuales están constituidos por un material rígido y suelen presentar la misma forma geométrica como, por ejemplo, cilíndrica o cuadrada. Una de sus propiedades acústicas características es la dispersión sonora [3].

El fenómeno dispersivo provocado por este tipo de estructuras fue observado por primera vez en 1995 en una escultura creada por Eusebio Sempere y situada en la Fundación Juan March de Madrid (ver **Figura 3**), la cual está formada por una distribución periódica de barras cilíndricas de acero inoxidable tal y como se explica en [4]. A partir de este hallazgo, han aparecido numerosas investigaciones acerca de estas estructuras periódicas y sus aplicaciones acústicas, como el diseño de barreras acústicas.

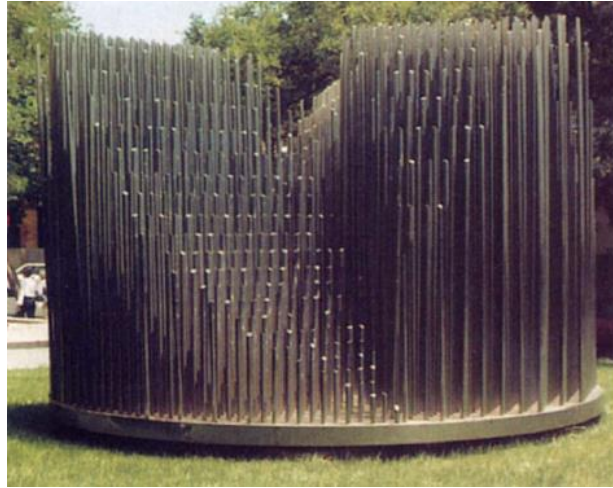


Figura 3. Escultura de Eusebio Sempere situada en la Fundación Juan March de Madrid [4].

Los elementos que forman la estructura periódica se pueden ordenar entre sí siguiendo diversos tipos de red como cuadrada, triangular, oblicua, rectangular, etc. En la **Figura 4** se pueden observar gráficamente estos tipos de red.

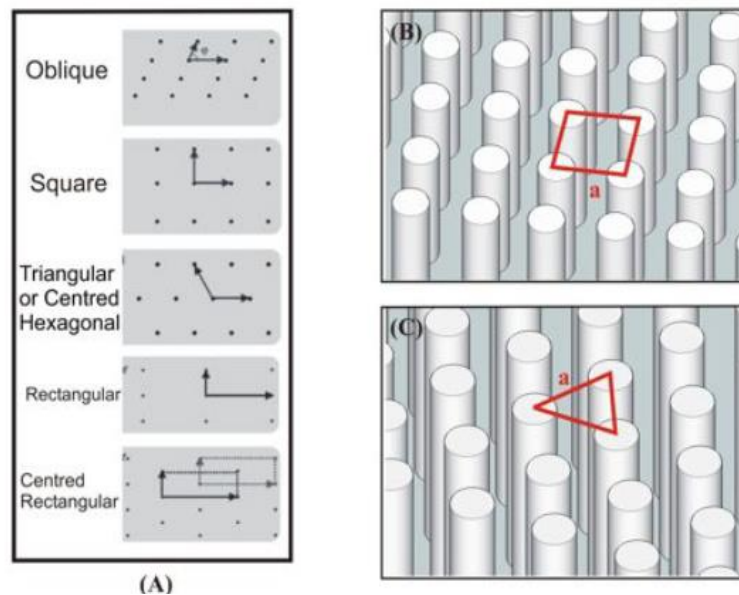


Figura 4. Sistemas periódicos en 2D: (A) Tipos de red en 2D; (B) Red cuadrada; (C) Red triangular [5].

La constante de red a es el parámetro que indica la distancia de separación entre cada elemento de una misma estructura, y forma la denominada celda unidad (ver **Figura 5**). Al mismo tiempo, la constante de red se puede considerar como un vector de módulo a orientado en las direcciones en las que la estructura presente periodicidad. En el caso de un sistema 2D, presentaría periodicidad en dos direcciones. Replicando este vector \vec{a} en cada una de las direcciones se obtendría la distribución periódica [5].

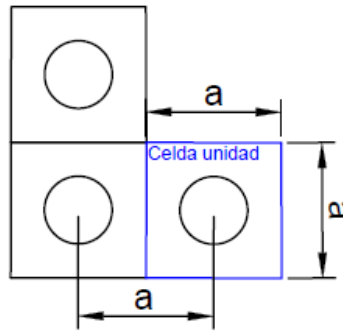


Figura 5. Dibujo demostrativo de la formación de la celda unidad en una estructura de cristales de sonido.

La relación de dispersión relaciona la longitud de onda de las señales con la frecuencia, y en el caso de los cristales de sonido, se distinguen entre varias zonas [2]:

- Régimen de homogenización. Se da a baja frecuencia, y por tanto cuando se tienen longitudes de onda muy grandes comparado con las dimensiones de la estructura. En este régimen, la estructura se comporta como un material homogéneo con parámetros de velocidad y presión efectivos.
- Régimen difractivo. Se da cuando la longitud de onda de la señal se aproxima al valor de la constante red (a) y domina por tanto el efecto dispersivo del sonido ya que las ondas pueden ser guiadas, focalizadas o desviadas en ciertas direcciones.

En el régimen difractivo aparece además la banda prohibida (*Band gap*, BG), rangos frecuenciales en los que no se permite la propagación del sonido a través de la estructura debido a las interferencias destructivas de *Bragg* entre los dispersores, y el sonido se refleja siguiendo un patrón singular. La frecuencia central de la banda prohibida (frecuencia de *Bragg*, f_{BG}) se puede conocer y calcular de forma teórica dado que aparece cuando media longitud de onda de la señal (λ) coincide con la constante de red (a):

$$f_{BG} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot a} \quad (1)$$

Siendo,

f_{BG} : frecuencia de Bragg central a la banda prohibida (Hz)

c : velocidad del sonido (m/s),

λ : longitud de onda (m),

a : constante de red (m).

Al considerarse los cristales de sonido como sistemas periódicos, es posible aplicar las condiciones de contorno periódicas de Bloch, las cuales permiten conocer el comportamiento de una estructura periódica completa mediante el análisis de una celda unidad únicamente. Del mismo modo, se define un espacio denominado “zona irreducible de *Brillouin*”, que relaciona el vector de onda en función del rango frecuencial. El estudio de la primera zona de *Brillouin* permite un mejor entendimiento de las propiedades de propagación de estos sistemas [5].

Una forma de visualizar la banda prohibida gráficamente es representando la primera zona de *Brillouin*. Para estructuras 2D de red cuadrada, la zona de *Brillouin* abarca de Γ a X , a M y vuelve a Γ . En la **Figura 6** se muestra un ejemplo de este tipo de representaciones, donde las líneas definen las frecuencias de propagación de las ondas en función de las direcciones $\Gamma - X$, $X - M$ y $M - \Gamma$. La banda prohibida se identifica en la región donde no existen barreras de propagación de las ondas.

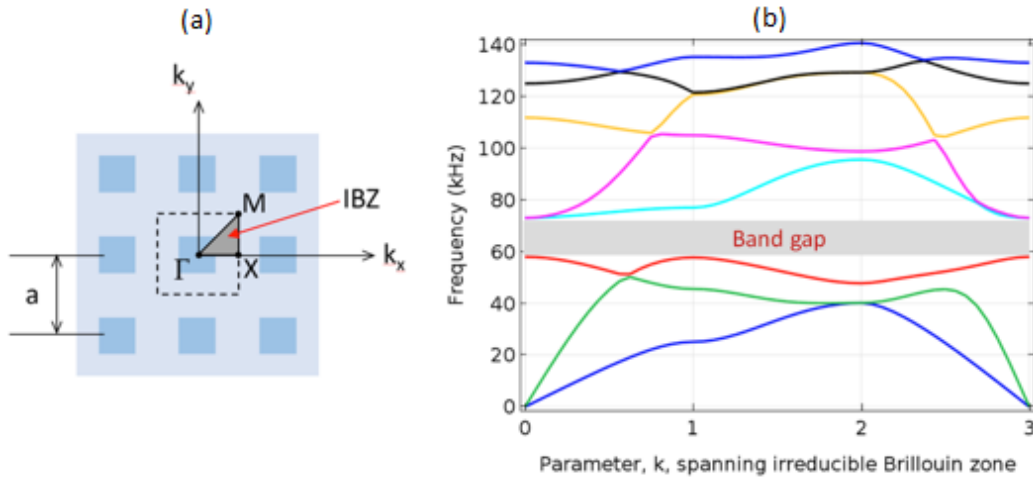


Figura 6. (a) Direcciones de propagación en la zona irreducible de Brillouin para estructuras 2D de red cuadrada: $\Gamma - X - M - \Gamma$. (b) Gráfico del vector de onda en función de la frecuencia de la zona irreducible de Brillouin. k varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en $\Gamma - X$, de 1 a 2 en $X - M$ y de 2 a 3 en $M - \Gamma$ [6].

Otro parámetro característico de los cristales de sonido es el factor de llenado (*filling fraction*, ff), el cual relaciona las propiedades físicas del sistema ya que se define como la relación entre el volumen ocupado por los dispersores y el volumen total ocupado por la celda unidad. Considerando dispersores cilíndricos y una red de ordenamiento de los dispersores en forma cuadrada, se calculará el factor de llenado siguiendo la expresión matemática 2 [5]:

$$ff_{red\ cuadrada} = \pi \left(\frac{r}{a}\right)^2 \quad (2)$$

Siendo,

ff : factor de llenado,

r : radio del dispersor cilíndrico (m),

a : constante de red (m).

Entre las ventajas que proporcionan los cristales de sonido destaca la escalabilidad de ciertos fenómenos ya que es posible escalar un diseño a unas dimensiones diferentes, quedando inalterada la dispersión, aunque no la absorción. También destacan su permeabilidad a la materia y flujo de gases, y su robustez estructural [2].

1.2.2 Resonadores de Helmholtz

El principal objetivo de este trabajo es el de utilizar resonadores de Helmholtz en estructuras de cristales de sonido para aplicar sus propiedades acústicas en la

mitigación sonora durante el lanzamiento de cohetes espaciales. En este apartado se explica en qué consisten y da a conocer sus características acústicas peculiares.

Un resonador de Helmholtz es un sistema acústico constituido por una cavidad de paredes rígidas encerrada en un cierto volumen V , que se encuentra unida a un cuello de área S y longitud L [7]. Puede presentar diversas formas geométricas, tal y como se observa en la **Figura 7**, pero normalmente siempre mantiene un aspecto similar al de una botella.

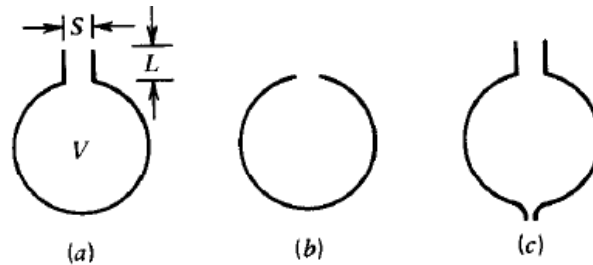


Figura 7. Ejemplos de resonadores de Helmholtz [7].

La base de su funcionamiento reside en que se trata de un sistema masa-muelle, donde el aire que se introduce en el cuello se comporta como una masa y la cavidad actúa como un muelle. El aire que entra por el cuello resuena a una cierta frecuencia llamada frecuencia de resonancia, la cual depende de las dimensiones del resonador tal y como se aprecia en la ecuación 3:

$$f_{HR} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot L'}} \quad (3)$$

Donde,

f_{HR} : frecuencia de resonancia de Helmholtz (Hz),

c : velocidad del sonido en el medio (m/s),

S : superficie del cuello (m^2),

L' : longitud efectiva del cuello (m),

V : Volumen de la cavidad (m^3).

Los resonadores de Helmholtz son comúnmente utilizados en acústica arquitectónica o acústica de salas para el diseño de paneles absorbentes [8], debido a la absorción selectiva introducida a la frecuencia de resonancia. Además, si se rellena la cavidad mediante algún tipo de fluido como el agua, es posible modificar ligeramente la frecuencia de resonancia, incluso si se le introduce material absorbente como lana mineral. Esto posibilita aumentar el rango frecuencial de absorción alrededor de la frecuencia de resonancia. Por otro lado, los resonadores son de aplicación también en conductos de ventilación y aire acondicionado de edificios, y en sistemas de conductos de automóviles y aerogeneradores, debido a sus características atenuantes del ruido [9].

En el presente proyecto se utilizan los resonadores de Helmholtz en estructuras basadas en cristales de sonido para aplicar sus propiedades de absorción acústica. En realidad, actualmente se pueden encontrar estudios sobre el uso de cristales de

sonido basados en resonadores de Helmholtz en diversos ámbitos de aplicación, como, por ejemplo, en barreras acústicas frente al ruido de tráfico para optimizar sus prestaciones acústicas [10].

Normalmente, una estructura de cristales de sonido formada por resonadores de Helmholtz suele implementarse variando la forma cilíndrica habitual de los cristales por dispersores en forma de "C", tal y como se observa en la **Figura 8**:

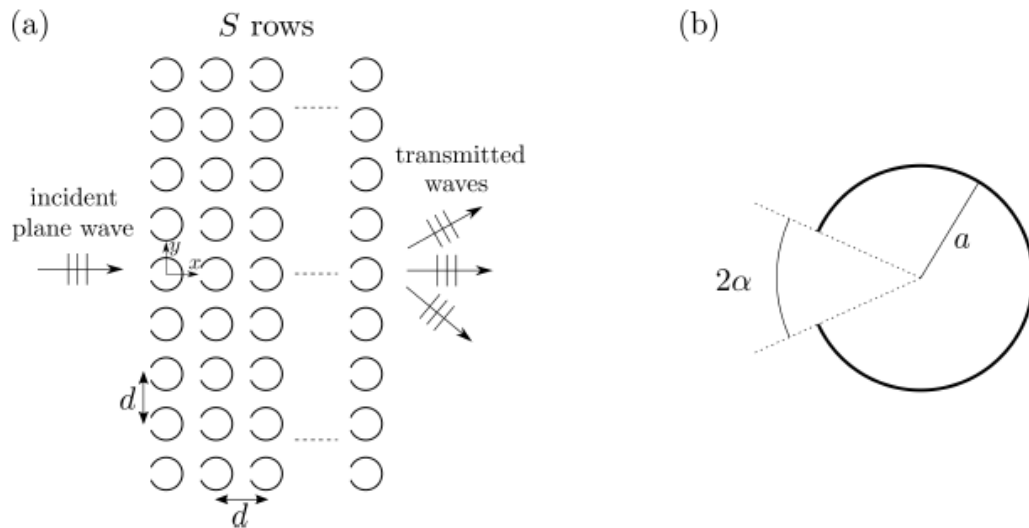


Figura 8. (a) Estructura finita de cristales de sonidos compuesta por S filas de dispersores en forma de "C" con constante de red d en ambas direcciones horizontales. (b) Un dispersor en forma de "C" (resonador) de radio a y ángulo de abertura 2α [11].

Este tipo de dispersor en forma de "C" equivale a un resonador de Helmholtz considerando el interior del cilindro como la cavidad y la abertura 2α como el cuello, siendo α un valor angular en grados.

El principal efecto introducido por los resonadores en una estructura de cristales de sonido es la pérdida de transmisión a la frecuencia de resonancia del resonador, lo cual puede considerarse como la aparición de una banda prohibida centrada en dicha frecuencia, además de la que se produce a la frecuencia de Bragg debido a la periodicidad del cristal. La frecuencia de resonancia para un resonador de Helmholtz en forma de "C" se calcula mediante la siguiente expresión [11]:

$$f_{HR} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{e}{l_{eq} \cdot \pi \cdot R^2}} \quad (4)$$

Donde,

f_{HR} : frecuencia de resonancia de Helmholtz (Hz)

c : velocidad del sonido (m/s)

e : longitud de apertura del cuello del resonador (m),

R : radio interno del dispersor (m),

$l_{eq} = t + 0.85e$: longitud equivalente siendo t el espesor del dispersor (m).

Por otra parte, para caracterizar de una forma más realista el comportamiento de los resonadores de Helmholtz en estructuras de cristales de sonido, se deben de tener

en cuenta las pérdidas termo-viscosas. En [12] se indican las expresiones matemáticas que se deben aplicar a un resonador teniendo en cuenta las dimensiones de la cavidad y el cuello, así como parámetros dependientes de la frecuencia y del medio. En concreto, se trata de definir la densidad (ρ_s) y el módulo de compresibilidad (k_s) para cada parte del resonador, es decir, para la cavidad y para el cuello, que se pueden calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$\rho_s = \rho_0 \left[1 - \frac{\tanh\left(\frac{h}{2}G_p\right)}{\frac{h}{2}G_p} \right]^{-1} \text{ con } G_p = \sqrt{i\omega\rho_0/\eta} \quad (5)$$

$$k_s = k_0 \left[1 - (\gamma - 1) \frac{\tanh\left(\frac{h}{2}G_k\right)}{\frac{h}{2}G_k} \right]^{-1} \text{ con } G_k = \sqrt{i\omega P_r \rho_0 / \eta} \quad (6)$$

Siendo,

ρ_s : densidad (kg/m^3),

k_s : módulo de compresibilidad (Pa)

ρ_0 : densidad del aire (kg/m^3),

h : radio de la cavidad/cuello (m),

ω : frecuencia angular (rad/s),

η : viscosidad dinámica ($Pa \cdot s$),

γ : relación de calor específico del aire,

$k_0 = \gamma P_0$: Módulo de *Bulk* (Pa),

P_0 : presión atmosférica (Pa),

P_r : número de *Pradntl*.

1.3 Estrategias para la mitigación sonora en entornos aeroespaciales

En este apartado se pretende contextualizar la problemática existente sobre la mitigación sonora en el lanzamiento de cohetes espaciales, así como exponer los resultados más relevantes del estudio realizado por el grupo de investigación de la UPV y los resultados obtenidos en [2] y [3], lo cual será el punto de partida de realización del presente proyecto.

Existen varias estrategias para la mitigación sonora en entornos aeroespaciales. Algunas de ellas, como el uso de cubiertas absorbentes, amortiguadores o materiales activos, son soluciones que se implementan directamente sobre la estructura del cohete para conseguir la reducción del ruido. Otras en cambio, actúan desde el entorno exterior a la fuente sonora, es decir, sobre los niveles de ruido producidos en la base de lanzamiento, considerándose la inyección de flujo de agua presurizado como la solución más destacada. Ésta consiste en inyectar grandes cantidades de agua mediante varios surtidores distribuidos alrededor de toda la base de lanzamiento durante la fase de ascenso del cohete, lo cual provoca un efecto de absorción sonora, sobre todo de las ondas sonoras que se reflejan en la dirección de incidencia, y

permite reducir los niveles de ruido al mismo tiempo que actúa como sistema de enfriamiento. Otra estrategia que actúa externamente sería la modificación o el remodelado de la geometría de la base de lanzamiento, de tal forma que la misma edificación sea capaz de actuar como un sistema dispersor del sonido, disminuyendo por tanto la componente sonora reflejada en la dirección de incidencia.

No obstante, pese a lograr una disminución del nivel de ruido mediante las soluciones propuestas, aparecen una serie de desventajas. Por ejemplo, el agua puede actuar como un agente degradador ya que es capaz de perjudicar y dañar los materiales y la estructura debido a la corrosión. Además, estas estrategias solo son aplicables en estructuras de nueva construcción, y hasta el momento el problema acústico no se había tenido en cuenta en la fase de diseño.

En base a este análisis, el grupo de investigación que ha colaborado con la ESA, propuso otra estrategia que actuaría externamente sobre el nivel de ruido generado en la base de lanzamiento durante la fase de despegue. Consiste en utilizar estructuras basadas en cristales de sonido con el fin de reducir el sonido reflejado en las direcciones especulares gracias al comportamiento dispersivo que introducen este tipo de materiales.

El experimento realizado en [2] y [3] se resume en la construcción de un prototipo aproximado de la base de lanzamiento, y de varias estructuras de cristales de sonido fabricadas en titanio debido a su rigidez acústica. Todo el modelo fue confeccionado a escala: las dimensiones y el rango frecuencial de medida (de 20Hz a 500Hz) que fue trasladado al régimen ultrasónico. Para ello, el modelo se insertó en el interior de un tanque de agua, para que las pérdidas termo-viscosas que se producen en el agua en el régimen ultrasónico se equiparen a las que se producen en el aire en el rango frecuencial real, teniendo en cuenta que cuanto mayor es la frecuencia, mayor es la atenuación del sonido, y en el agua las pérdidas termo-viscosas son menores que en el aire.

El objetivo principal del estudio realizado fue el de llevar a cabo una prueba de concepto con aproximación a la geometría de la base de lanzamiento. Las estructuras de cristales que se construyeron fueron en concreto cuatro, las cuales presentan diferencias geométricas:

- Red cuadrada y factor de llenado bajo ($ff=9.6\%$).
- Red cuadrada y factor de llenado alto ($ff=39\%$)
- Red triangular y factor de llenado bajo ($ff=11.1\%$)
- Red triangular y factor de llenado alto ($ff=35.1\%$)

Estas estructuras se situaron sobre el modelo prototipado que simula el comportamiento reflexivo de las instalaciones en la base de lanzamiento, tal y como se observa en la **Figura 9**, donde la zona pintada en azul indica el espacio ocupado por la estructura.

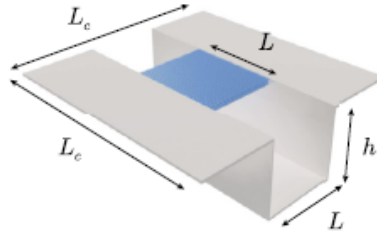


Figura 9. Configuración de los cristales de sonido sobre una superficie reflectante [3]

Se analiza el comportamiento dispersivo en campo lejano y en campo cercano de cada una de las configuraciones comparando siempre los resultados con los que se obtendrían si en vez de una estructura de cristales de sonido se situara una superficie totalmente reflectante. Se obtiene que la tercera opción (red triangular y factor de llenado bajo) proporciona el coeficiente de difusión sonora más alto y mejor comportamiento dispersivo en todo el rango frecuencial considerado en el estudio (de 20Hz a 500Hz), lo cual significa que envía el sonido en múltiples direcciones y se reduce por tanto la componente sonora en la dirección de incidencia. Además, es el que aporta un mayor decrecimiento de la energía sonora llegando al 37%, lo que se traduce en una reducción de 2dB en la banda frecuencial estudiada. Teniendo en cuenta que en el entorno aeroespacial se producen unos niveles sonoros excesivos, una reducción de 2dB se considera como un valor significativo.

Se obtienen resultados positivos, sin embargo, se recalca que se han asumido ciertas simplificaciones para reducir el problema y por tanto los mismos autores constatan la conveniencia de realizar más pruebas en un entorno real y a escala real.

Finalmente, se concluye en base a los resultados obtenidos, que los cristales de sonido pueden resultar beneficiosos ante el problema de reducción sonora ya que permite que el sonido no se refleje en la dirección especular, apoyando además el planteamiento de usar los cristales de sonido en conjunción con otras estrategias de mitigación sonora para mejorar la reducción de ruido.

1.4 Parámetros para la reducción del ruido

Para poder caracterizar la reducción del ruido emitido por el cohete espacial durante la fase de despegue utilizando estructuras de cristales de sonido, se utilizarán los dos parámetros de medida presentados en [3]. Uno de ellos es el coeficiente de difusión sonora el cual permite caracterizar la dispersión sonora que introducen los cristales, y ver si el sonido se refleja en una sola dirección, que podría ser la de incidencia y por tanto la que se quiere disminuir, o en cambio se reparte en múltiples direcciones. El otro parámetro es el de pérdidas por inserción, el cual resulta útil para evaluar si la estructura de cristales de sonido disminuye el nivel de presión sonora en la dirección de incidencia o, dicho de otra forma, si mejora el resultado el hecho de situar una estructura o no.

- **Coeficiente de difusión sonora**

El cálculo del coeficiente de difusión sonora está basado en la Norma ISO 17497-2 [13]:

“Measurement of sound scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the diffusion coefficient in a free field”

Para obtener el valor del coeficiente, primero se deben de realizar medidas de intensidad sonora sobre un conjunto de puntos situados sobre una semicircunferencia alrededor de la muestra a la cual se le pretende calcular dicho parámetro, y bajo condiciones de campo lejano. Mediante la ecuación 7 se puede llegar al resultado buscado [3].

$$d = \frac{(\sum_{i=1}^n I_i)^2 - \sum_{i=1}^n (I_i)^2}{(n-1) \cdot \sum_{i=1}^n (I_i)^2} \quad (7)$$

Siendo,

d : coeficiente de difusión sonora,

I_i : Intensidad sonora (W/m^2) del sonido reflejado en la posición de medida i ,

n : número de posiciones de medida.

El coeficiente de difusión sonora puede expresar valores comprendidos entre 0 y 1, y se obtiene un valor del coeficiente para cada valor frecuencial considerado. Si alcanza el mínimo valor significa que la muestra dispersa toda la energía acústica en una sola dirección. Si en cambio se obtiene el máximo valor, querrá decir que las ondas son dispersadas con la misma amplitud en todas las direcciones (dispersor perfecto).

Por otra parte, se puede obtener también el coeficiente de difusión sonora normalizado, es decir, expresar el coeficiente de difusión sonora de la muestra en cuestión con respecto al que se obtiene si se usa una superficie plana y reflectante. De esta forma, es posible presentar las diferencias del comportamiento dispersivo de la muestra con respecto al de una superficie plana. Mediante la ecuación 8, se puede obtener el coeficiente de difusión sonora normalizado.

$$d_n = \frac{d - d_{ref}}{1 - d_{ref}} \quad (8)$$

Donde,

d_n : coeficiente de difusión sonora normalizado,

d : coeficiente de difusión sonora de la muestra calculado mediante la ecuación 7,

d_{ref} , coeficiente de difusión sonora de una superficie plana y reflectante calculado mediante la ecuación 7,

Cuando d_n es mínimo o nulo, la muestra se comporta en su conjunto de la misma forma en que lo haría una superficie plana y reflectante, y conforme el coeficiente va aumentando de valor, el comportamiento dispersivo de la muestra mejora en comparación a la superficie plana.

- **Pérdidas por inserción**

Originalmente, el parámetro de pérdidas por inserción (*Insertion Loss*, IL) se define como la atenuación obtenida al situar una estructura entre la fuente y el receptor, obteniéndose por tanto una estimación de la reducción de la energía acústica transmitida [3]. Pero en este caso, se pretende evaluar cuanto reduce una

estructura de cristales el sonido reflejado y no el transmitido. Por tanto, se modificará la definición original, y se entenderá como la disminución de la componente reflejada por la inserción de diferentes muestras. Para ello, se realizará una comparativa del nivel de presión sonora con y sin la muestra de cristales. La ecuación 9 expresa matemáticamente cómo calcular IL:

$$IL = 10 \log_{10} \frac{|P_{ref}|^2}{|P_{SC}|^2} = L_{ref} - L_{SC} \quad (9)$$

Siendo,

IL: Pérdidas por inserción (*dB*)

P_{ref}: Presión sonora total medido en una situación de referencia (*Pa*),

P_{SC}: Presión sonora total medido cuando se inserta una muestra de cristales de sonido (*Pa*),

L_{ref}: Nivel de presión sonora en la situación de referencia (*dB*),

L_{SC}: Nivel de presión sonora con la estructura de cristales de sonido (*dB*).

Se asume que el campo incidente emitido por la fuente es idéntico en las dos situaciones, con o sin cristales.

Cuanto mayor sea el valor de este parámetro, mayor será la diferencia entre usar o no una estructura de cristales de sonido, y por tanto mayor será la reducción sonora conseguida respecto a la situación de referencia, que se equipara con una superficie plana y reflectante, correspondiente a las instalaciones de la base de lanzamiento.

2. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster, tal y como se ha comentado en apartados anteriores, es el de realizar un estudio numérico sobre la aplicación de cristales de sonido formados por resonadores de Helmholtz en el entorno aeroespacial. En concreto, analizar su aplicación en la mitigación sonora del ruido producido por cohetes espaciales durante la fase de despegue.

Para lograr el objetivo general, se deben de seguir una serie de objetivos secundarios:

1. Entendimiento de la necesidad de conseguir la reducción sonora durante la fase de despegue de cohetes espaciales.
2. Estudio de las estrategias existentes para la mitigación sonora en el contexto aeroespacial.
3. Estudio bibliográfico sobre el trabajo realizado por el grupo de investigación colaborador con la ESA para conseguir la mitigación sonora en el contexto aeroespacial.
4. Estudio numérico sobre estructuras de cristales de sonido convencionales y con resonadores de Helmholtz, para analizar y entender su comportamiento acústico, así como las características entre ambos tipos de estructuras.
5. Estudio numérico sobre estructuras de cristales de sonido formadas con resonadores de Helmholtz aplicado a la geometría del contexto aeroespacial.

6. Análisis de los resultados obtenidos y valoración de la eficacia de los sistemas implementados.

3. Método de simulación empleado

El problema a tratar en el presente proyecto se ha solucionado numéricamente mediante el método de elementos finitos (*Finite Element Method*, FEM) [14]. Se trata de un conjunto de técnicas que aproxima soluciones de ecuaciones diferenciales parciales complejas sobre el dominio a estudiar. Para ello, discretiza el dominio dividiéndolo en múltiples subdominios denominados “elementos finitos”, y en cada elemento finito se distinguen una serie de puntos, denominados “nodos”. El conjunto de nodos forma la denominada “malla” sobre la cual se realizan los cálculos. Cuanto más refinado sea el mallado del modelo numérico, más precisos serán los resultados obtenidos.

Este método resulta útil para casos en los que se tienen problemas dependientes del espacio y del tiempo los cuales suelen ser expresados mediante ecuaciones diferenciales parciales, y debido a la complejidad de la geometría resulta imposible resolver el problema mediante métodos analíticos [14].

Para realizar la simulación mediante FEM se ha utilizado el *software* comercial COMSOL *Multiphysics*, el cual se define como una plataforma de propósito general para el modelado de aplicaciones de ingeniería [15]. Ofrece varios módulos de diferentes ámbitos de la física (electromagnetismo, mecánica estructural, acústica, flujo de fluidos, etc.) lo cual permite la simulación de diseños y procesado en diversos ámbitos ingenieriles. Obviamente, para el presente estudio se utilizará el módulo de acústica.

El modelado de simulaciones en COMSOL engloba desde la fase de pre-procesado y procesado, mediante la definición de la geometría, las propiedades de los materiales y las condiciones físicas descriptivas, así como las condiciones de resolución del cálculo de un caso en concreto, hasta la fase de post-procesado para el tratamiento de los datos y obtención de los resultados. De esta forma, será posible estudiar y validar mediante simulaciones el diseño de los modelos sin ser necesaria la construcción de prototipos.

Este software es de aplicación en problemas de tipo aero-acústico, y ofrece diferentes tipos de análisis como por ejemplo estudios dependientes del tiempo o de la frecuencia, estudios estacionarios y de frecuencia propia. Es de aplicación también en problemas de diferentes dimensiones como 1D, 2D o 3D.

Los modelos numéricos desarrollados en el presente proyecto comparten las siguientes características:

- **Módulo acústico: estudios en frecuencia y frecuencia propia.** Dado que el ruido emitido por el cohete espacial es dependiente de la frecuencia, se han realizado estos tipos de estudio para analizar el comportamiento de los cristales de sonido en función de la frecuencia. El modelo de propagación acústica en COMSOL resuelve las ecuaciones de Helmholtz en el dominio frecuencial [16]:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m \quad (10)$$

$$p_t = p + p_b$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2 - k_z^2$$

Siendo,

p_t : presión sonora total [Pa], suma de la presión acústica ambiental (p) y presión acústica de fondo (p_b),

k_{eq} : Número de onda [1/m], el cual contiene el número de onda habitual (k) y el número de onda fuera del plano (k_z),

ρ_c : densidad [kg/m^3],

c_c : velocidad del sonido [m/s],

q_d : fuente dipolo [N/m^3],

Q_m : fuente monopolo [$1/s^2$],

$\omega = 2\pi f$: frecuencial angular [rad/s] siendo f la frecuencia [Hz].

- **Modelo geométrico en 2D.** Se han diseñado los modelos geométricos en 2D para reducir el coste computacional en la medida de lo posible, aunque sin permitir que dicha modificación altere en gran medida los resultados. En cuanto a las dimensiones del modelo, se han considerado en escala real.
- **Mallado.** Se ha dividido el mallado en elementos triangulares, siendo el tamaño máximo del elemento función de la frecuencia máxima a la que se quiera simular el modelo en cuestión, que se calculará como la octava parte de la longitud de onda más pequeña correspondiente a la frecuencia máxima a simular:

$$\Delta x = \frac{\lambda_{min}}{8} = \frac{c}{8 \cdot f_{max}} \quad (11)$$

Siendo,

Δx : Tamaño máximo del elemento de la malla (m),

c : velocidad del sonido (m/s),

λ_{min} : longitud de onda más pequeña (m),

f_{max} : frecuencia más alta (Hz).

4. Estudio numérico sobre cristales de sonido

Antes de proceder al análisis de la mitigación sonora en entornos aeroespaciales mediante el uso de cristales de sonido, se presentará el análisis de los cristales de sonido en entornos y distribuciones sencillas para caracterizar previamente su comportamiento acústico en configuraciones canónicas y, así entender cómo habría

que diseñarlos para conseguir un modelo óptimo que se adecue a las necesidades acústicas aeroespaciales.

4.1. Estudio numérico sobre cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos

La primera parte de la simulación consistirá en un estudio previo sobre el comportamiento acústico de los cristales de sonido formados con dispersores de forma cilíndrica.

4.1.1. Diseño de las estructuras

Se han definido un total de siete estructuras, todas formadas por una red cuadrada de 10 filas y 8 columnas, pero con dispersores cilíndricos de diferente diámetro (d) y constante de red (a). En concreto, se tendrán cuatro estructuras con el mismo a de 1m y diferentes d de 1m, 0.7m, 0.5m y 0.3m respectivamente (ver **Figura 10**), y cuatro estructuras más, pero con el mismo d de 1m y diferentes a de 1m, 1.25m, 1.5m y 1.75m (ver **Figura 11**). El rectángulo en el que están insertados los cristales se considera como el área de radiación del campo sonoro.

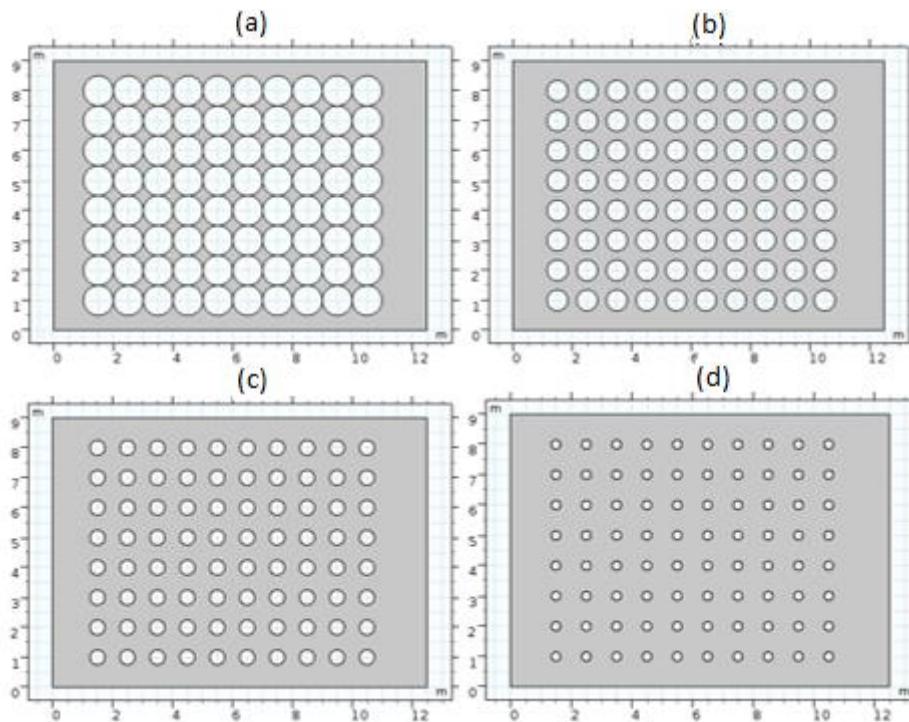


Figura 10. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos con la misma constante de red a de 1m y diferentes diámetros d de: a) 1m; b) 0.7m; c) 0.5m; d) 0.3m.

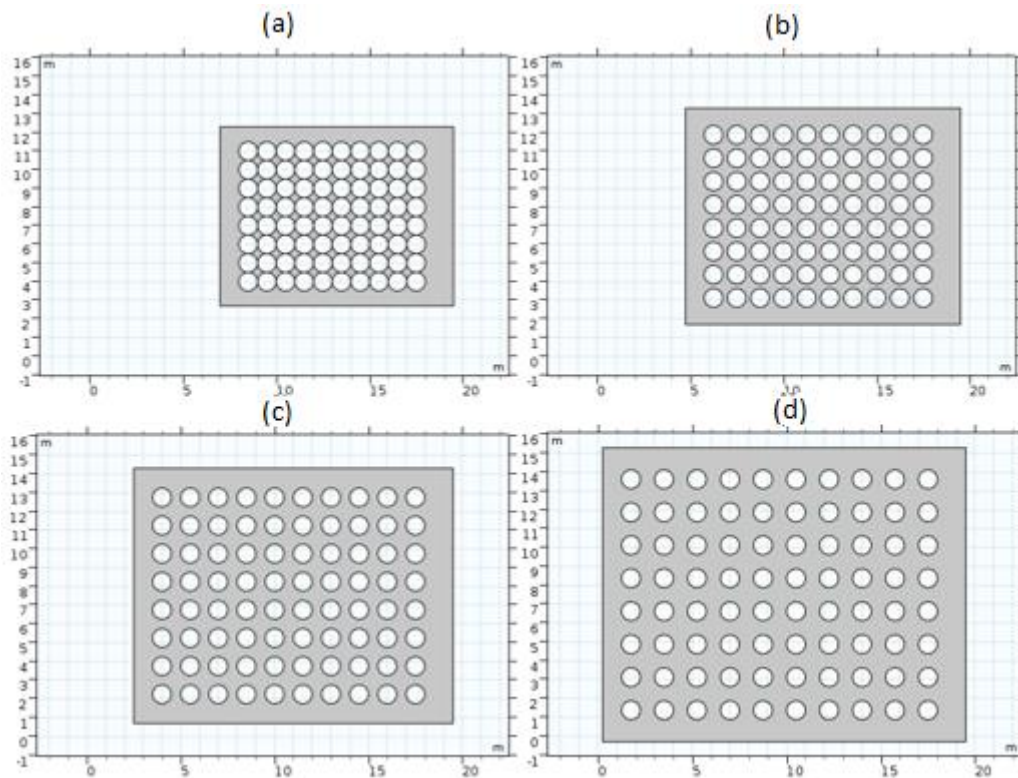


Figura 11. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos con el mismo diámetro d de 1m y diferentes constantes de red a de: a) 1m; b) 1.25m; c) 1.5m; d) 1.75m.

El diámetro de los dispersores y la constante de red se ha elegido tomando como referencia el diseño expuesto en [2] donde se usaba una estructura formada por $d=0.7\text{m}$ y $a=1\text{m}$. El número de filas y columnas se ha determinado con la finalidad de que las dimensiones de las estructuras sean lo suficientemente grandes como para que los efectos introducidos por ésta sobre el campo sonoro sean relevantes, y, por tanto, totalmente analizables. En cuanto al tipo de red implementado, a pesar de que en [2] se deducía que con un tipo de red triangular se obtenían mejores resultados para la mitigación sonora en aplicaciones aeroespaciales, se ha decidido usar el tipo de red cuadrada para simplificar la implementación de la geometría.

El estudio de varias estructuras con diferentes características geométricas permitirá analizar la dependencia del factor de llenado sobre la anchura de la banda prohibida tal y como se verá más adelante. En la **Tabla 1** se muestra la frecuencia de Bragg (f_{BG}) y el factor de llenado (ff), ambos calculados de forma teórica según las ecuaciones 1 y 2 respectivamente, para cada una de las estructuras diseñadas.

Estructura		f_{BG} (Hz)	ff (%)
a (m)	d (m)		
1	1	171.5	79
1	0.7	171.5	38
1	0.5	171.5	20
1	0.3	171.5	7
1.25	1	137.2	50
1.5	1	114.3	35
1.75	1	98.0	26

Tabla 1. Frecuencia de Bragg central a la banda prohibida y factor de llenado calculado de forma teórica para cada una de las estructuras de cristales de sonidos diseñadas y formadas por dispersores cilíndricos.

Aunque se hayan implementado varios casos de cristales de sonido con diferentes valores de diámetro y constante de red, cabe destacar que no se mostrarán todos los resultados obtenidos en cada una de ellas, sino que se expondrán solo los ejemplos que expliquen o representen mejor el fenómeno que se esté analizando en un momento dado. Por ejemplo, para mostrar la formación de la banda prohibida, se presentarán uno o varios ejemplos con unos ciertos valores de diámetro, constante de red y factor de llenado que revelen claramente dicho fenómeno, y así facilitar su comprensión sin cargar al lector con multitud de ejemplos.

En cuanto a la configuración del campo acústico, está formado por ondas planas las cuales viajan en una sola dirección, incidente a los cristales de sonido. En cuanto a las condiciones de contorno del problema, las paredes de los dispersores se definen como elementos rígidos al sonido. Y en cuanto al área de radiación, los bordes del dominio se configuran de forma que se comporten como una continuación del campo sonoro, para minimizar las reflexiones. El medio en el cual se propaga la onda es el aire, el cual se asume como homogéneo y sin pérdidas, y la energía de la onda se redistribuye espacialmente.

4.1.2. Obtención de resultados

4.1.2.1 Formación de la banda prohibida

En primer lugar, se estudiará la formación de la banda prohibida debido a la difracción de Bragg en estructuras periódicas y sus características ondulatorias. Este fenómeno depende directamente de la periodicidad de la estructura estudiada.

En el caso en que $a=1\text{m}$, la frecuencia central de la banda prohibida se situará en 171.5Hz sea cual sea su diámetro. En la **Figura 12** se muestra el nivel de presión sonora en función de la frecuencia medido a 1m del final de la estructura siendo ésta de $d=0.3\text{m}$ y $a=1\text{m}$.

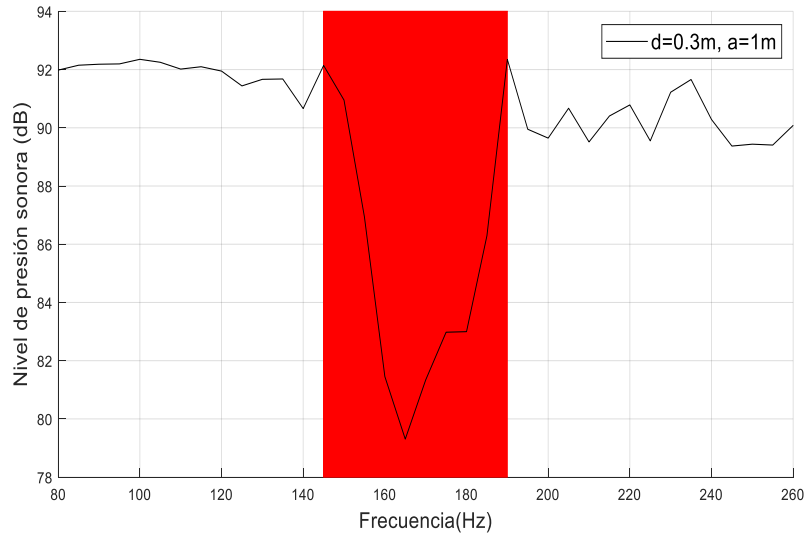


Figura 12. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de la banda prohibida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 0.3m de diámetro y 1m de constante de red.

Si en cambio se visualiza la banda prohibida formada por una estructura de $d=1m$ y $a=1.75$ (**Figura 13**), la frecuencia central de la banda será diferente con respecto al caso anterior dado que se ha modificado la constante de red.

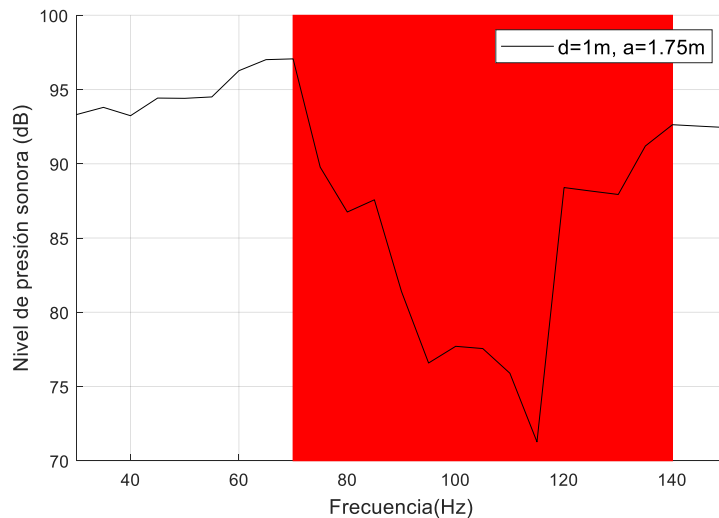


Figura 13. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de la banda prohibida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.75m de constante de red.

No obstante, entre los dos casos mostrados, destaca la influencia que tiene el factor de llenado en la anchura de la banda prohibida, a medida que éste aumenta, la banda se ensancha. En el primer caso de $d=0.3m$ y $a=1m$ (**Figura 12**), el factor de llenado es muy bajo, del 7%. En el segundo caso de $d=1m$ y $a=1.75m$ (**Figura 13**), es del 26% ya que los cilindros ocupan mayor espacio dentro de la celda unidad, de esta manera la condición de Bragg (interferencia destructiva entre ondas) se produce en un rango mayor de frecuencias y, como consecuencia, la banda prohibida se ensancha más con respecto al caso de menor factor de llenado.

Cuando el factor de llenado alcanza su valor máximo, que ocurre cuando las paredes de los cilindros llegan a tocarse, estrictamente el campo debería de ser cero o prácticamente nulo en todas las frecuencias, y la anchura de la banda eliminada sería máxima. En la **Figura 14**, se muestra este caso cuando $d=a=1\text{m}$, y por tanto $ff=79\%$, pero se aprecia que realmente no es así, sino que se obtienen en general valores más bajos de nivel de presión sonora que en los casos anteriores para todo el rango frecuencial, situándose su valor mínimo en 170Hz aproximadamente, que corresponde con la frecuencia teórica central de la banda prohibida (171.5Hz).

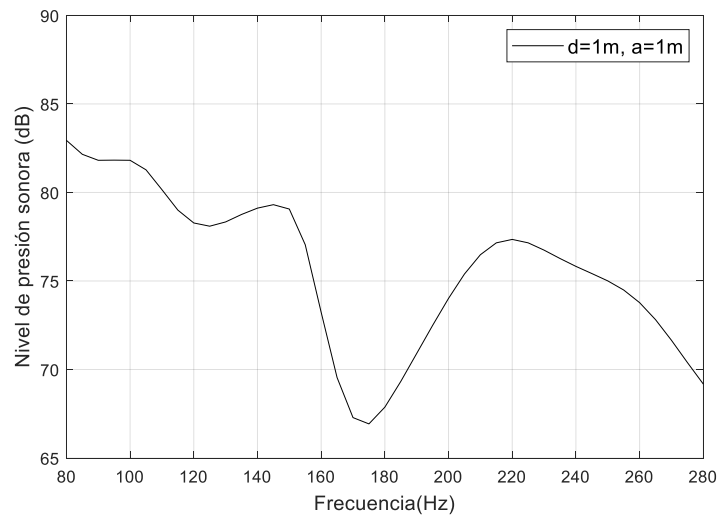


Figura 14. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de la banda prohibida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.

Dado que el caso anterior $d=a=1\text{m}$ corresponde con el de mayor factor de llenado y por tanto el que presenta una banda prohibida más ancha, puede resultar interesante visualizar cómo se comporta el campo sonoro al incidir sobre la estructura a la frecuencia Bragg mediante un gráfico de superficie, tal y como se observa en la **Figura 15**, donde se representa el nivel de presión sonora según una escala de colores que oscila desde el valor más bajo (azul, 0dB) al más alto (rojo, 100dB). En concreto, se puede ver que existe mayor nivel de presión sonora en el espacio entre el borde vertical izquierdo de la figura y la primera fila de la estructura, ya que se mezclan el sonido incidente y el reflejado. En cambio, en el interior de la estructura justo en la zona central se encuentra el menor nivel de presión sonora, ya que el sonido no consigue penetrar en la estructura debido a las interferencias destructivas de Bragg.

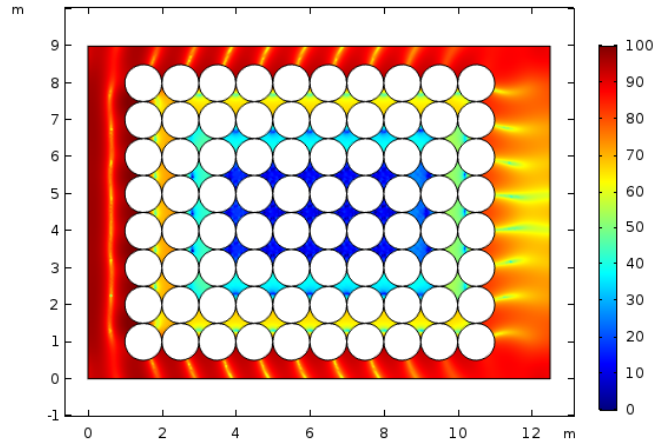


Figura 15. Gráfico de superficie del nivel de presión sonora [dB] a la frecuencia de Bragg de 170Hz para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.

Mediante la representación del nivel de presión sonora en función de la frecuencia, ha sido posible visualizar la banda prohibida en diversos casos, pero existe otra forma de hacerlo y que además aporta mayor exactitud. Se trata de la representación del número de onda en función de la frecuencia, es decir, la zona irreducible de Brillouin. Para el caso de una estructura de cristales de $d=1\text{m}$ y $a=1.25\text{m}$, se obtendría la gráfica de la **Figura 16** donde se aprecia claramente el rango frecuencial en el que no se produce propagación de ondas en ninguna de las direcciones consideradas y coincide por tanto con el de la banda prohibida.

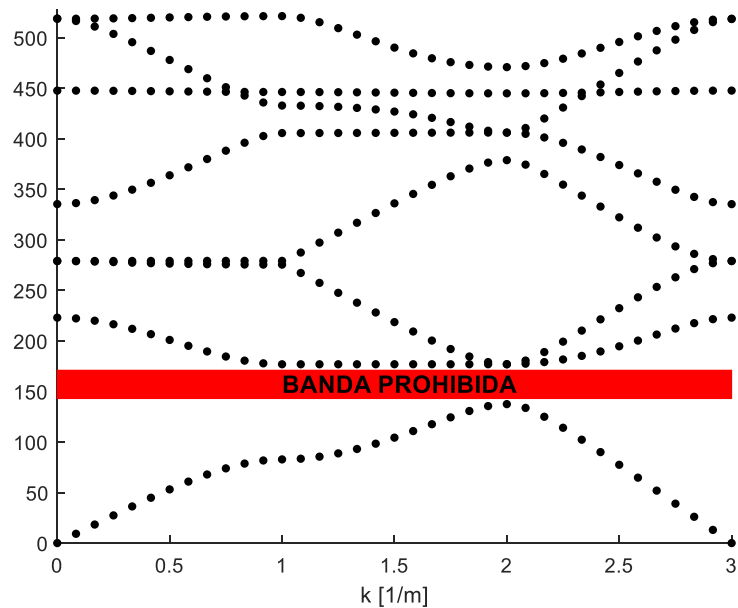


Figura 16. Bandas de propagación obtenidas mediante la representación del número de onda k (m^{-1}) en función de la frecuencia para la zona irreducible de Brillouin para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.25m de constante de red. El número de onda k varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en Γ -X, de 1 a 2 en X-M y de 2 a 3 en M- Γ .

En la figura anterior se observa que la banda prohibida resulta bastante estrecha, ya que solo se encuentra entre 150Hz y 180Hz aproximadamente. Sin embargo, si se disminuye el factor de llenado, la banda prohibida se estrechará aún más. Por ejemplo, si se trata de una estructura de cristales de $d=1\text{m}$ y $a=1.5\text{m}$, con un factor de llenado

del 35% y por tanto menor a la estructura anterior ($d=1\text{m}$ y $a=1.25\text{m}$) que es del 50%, se aprecia claramente en la **Figura 17** cómo se reduce la anchura frecuencial de la banda prohibida.

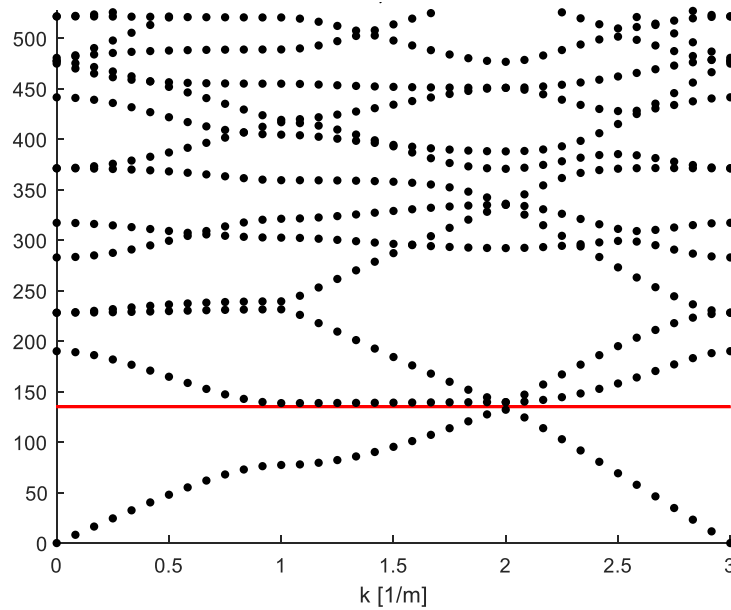


Figura 17. Bandas de propagación obtenidas mediante la representación del número de onda k (m^{-1}) en función de la frecuencia para la zona irreducible de Brillouin para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.75m de constante de red. El número de onda k varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en Γ -X, de 1 a 2 en X-M y de 2 a 3 en M- Γ .

No obstante, un efecto común a los dos casos presentados es el incremento de las bandas de propagación a medida que aumenta la frecuencia, para todas las direcciones consideradas (Γ -X, X-M, M- Γ).

Por último, en la **Tabla 2** se comparan los valores teóricos de la frecuencia de Bragg con los obtenidos en la simulación para los casos representados anteriormente, así como el cálculo del error relativo, donde se aprecia la poca correlación entre los datos teóricos y simulados. No obstante, el distanciamiento entre los valores teóricos y simulados puede variar según dónde se sitúe el punto de medida, y el error relativo obtenido puede deberse a que el rango frecuencial del estudio numérico está formado por valores discretos que en este caso se separan cada 5Hz.

Figura representada	Estructura		Frecuencia [Hz]		Error relativo $\frac{ f_t - f_s }{f_t}$ [%]
	a (m)	d (m)	Teórica (f_t)	Simulada (f_s)	
Figura 12	0.3	1	171.5	175	8.16
Figura 13	1	1.75	98	100	8.16
Figura 14	1	1	171.5	175	2.04
Figura 16	1	1.25	137.2	165	20.26
Figura 17	1	1.75	137.2	135	18.08

Tabla 2. Frecuencias de Bragg, teóricas y simuladas, centrales de las bandas prohibidas y generadas por varias estructuras de cristales de sonido con dispersores cilíndricos utilizadas más el cálculo del error relativo.

4.1.2.2. Resonancias de Fabry-Pérot

Por otra parte, además de la formación de la banda prohibida, suceden otros fenómenos como las resonancias de *Fabry-Pérot*. Por ejemplo, si se considera la estructura formada por $d=1.5\text{m}$ y $a=1\text{m}$ y se visualiza el rango frecuencial más bajo, se pueden apreciar las resonancias que se forman debido a las reflexiones múltiples en ambas interfaces cristal-aire. EL patrón de frecuencias está, por tanto, relacionado con el ancho de la estructura. En la **Figura 18** se muestra el nivel de presión sonora en función de la frecuencia medido en un punto situado en el centro de la estructura.

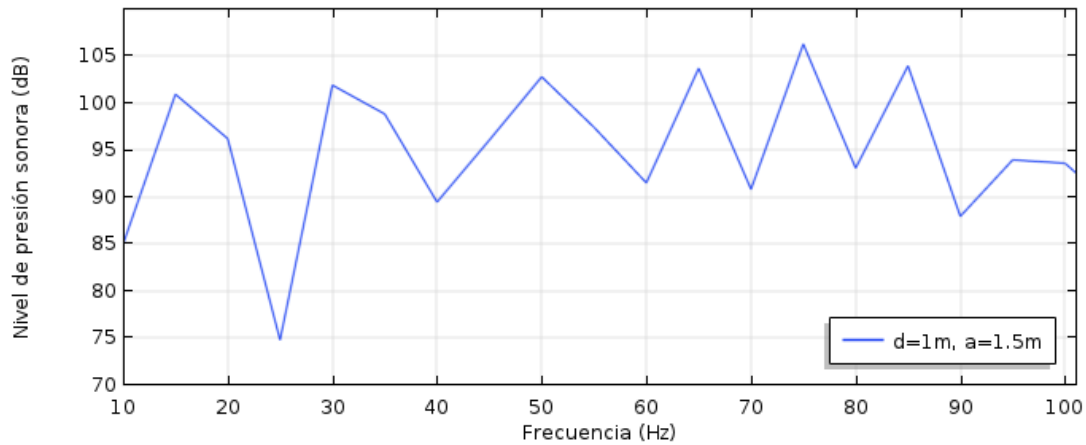


Figura 18. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de las resonancias de Fabry-Pérot debidas al ancho de la estructura para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red.

Estas resonancias se pueden calcular de forma teórica si se conoce el ancho de la estructura, y compararlas por tanto con las obtenidas en la simulación. Sabiendo que la anchura de la estructura es de 10.5m, la primera resonancia aparecerá cuando media longitud de onda de la señal sea comparable con esa distancia, es decir, cuando $f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{2 \cdot 10.5} = 16.7\text{Hz}$. En la **Tabla 3** se reúnen los múltiplos de la primera frecuencia (armónicos), donde se aprecia claramente el poco distanciamiento entre los valores teóricos y simulados. También sucede lo mismo que en el caso de la banda prohibida (**Tabla 3**), y es que el rango frecuencial del método numérico es discreto y cada valor cambia cada 5Hz.

Figura representada	Armónico (n)	Frecuencia [Hz]		Error relativo $ f_t - f_s /f_t$ [%]
		Teórica (f_t)	Simulada (f_s)	
Figura 18	1	16.3	15	8.16
	2	32.7	30	8.16
	3	49.0	50	2.04
	4	65.3	65	0.51
	5	81.7	75	8.16

Tabla 3. Frecuencias teóricas y simuladas correspondientes a las resonancias de Fabry-Pérot debidas al ancho de la estructura para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red.

El efecto resonante debido a la anchura de la estructura se puede entender mejor si se visualizan los gráficos de superficie del nivel de presión sonora a las frecuencias donde se obtenían los picos de presión sonora según la **Figura 18**. En la siguiente **Figura 19**, se muestra este tipo de gráfico para las primeras cuatro resonancias que

corresponden con las frecuencias de 15, 30, 50 y 65Hz donde el nivel de presión sonora varía desde 50dB a 110dB. Se observa cómo cambia el nivel de presión sonora a medida que avanza a través de la estructura, y que conforme mayor es la frecuencia de la resonancia, mayor número de oscilaciones aparecen en el interior de la estructura.

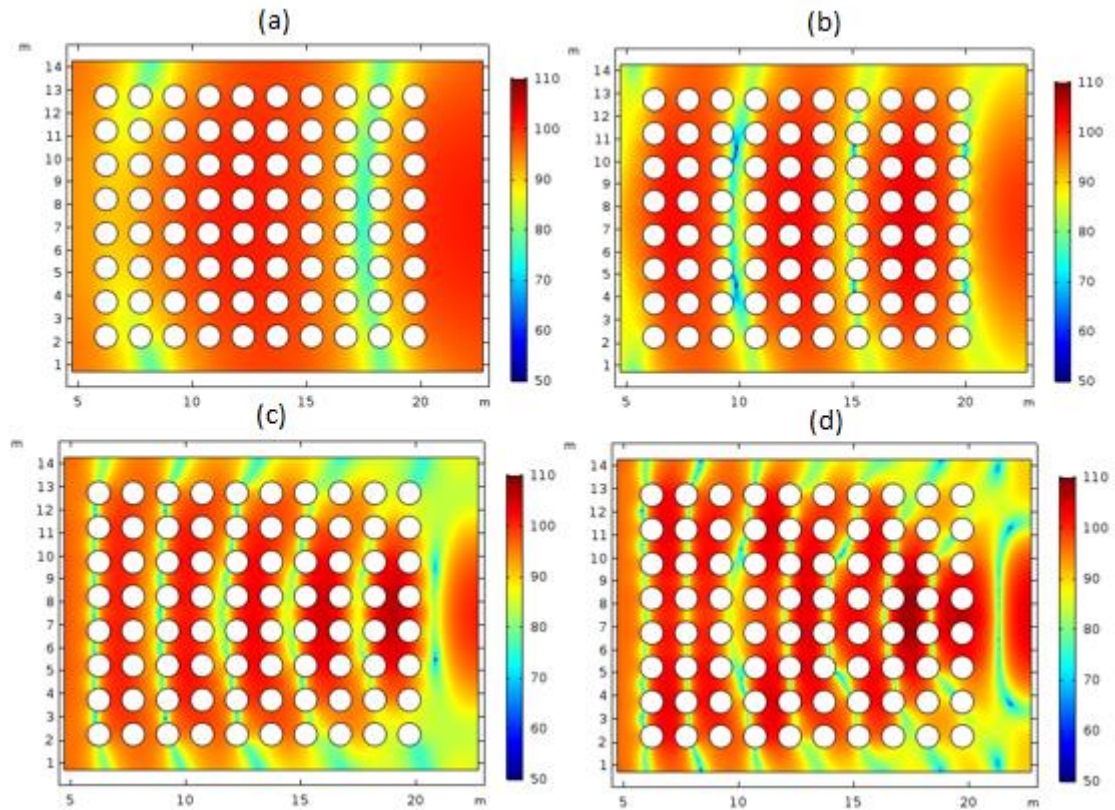


Figura 19. Gráficos de superficie del nivel de presión sonora [dB] para las cuatro primeras resonancias de Fabry-Pérot respectivamente generadas por una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red a : (a) 15Hz; (b) 30Hz; (c) 50Hz; (d) 75Hz.

Otro efecto de resonancia puede aparecer entre la última fila de la estructura y una pared reflectante situada a una cierta distancia. Este efecto puede aparecer en el caso real si se tiene en cuenta que los cristales de sonido se colocarán justo delante de las instalaciones de la base de lanzamiento y éstos se pueden comportar de forma similar a una superficie plana y reflectante. En la **Figura 20** se muestra el nivel de presión sonora en función de la frecuencia, medido muy cerca de la última columna en un punto central a la estructura para el caso de $d=1\text{m}$ y $a=1\text{m}$, dado que cuanto mayor sea el factor de llenado, más notable será el efecto resonante.

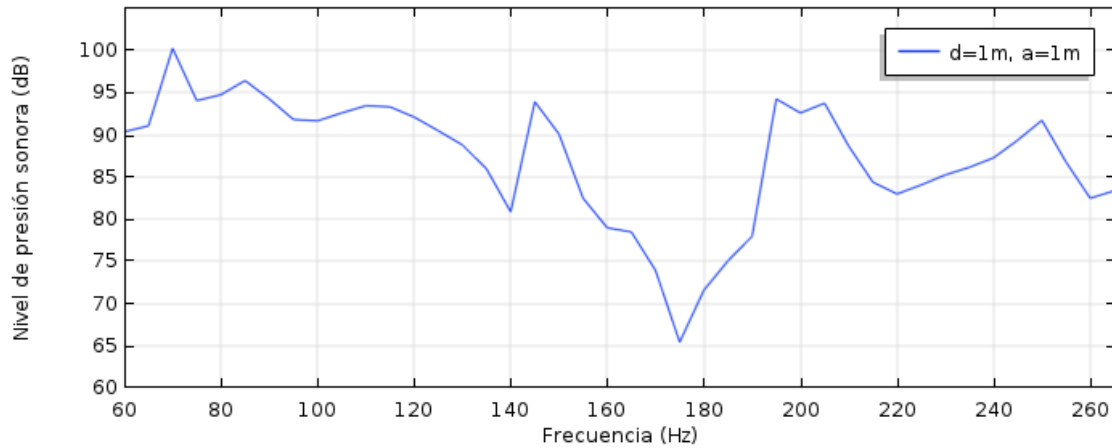


Figura 20. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de las resonancias de Fabry-Pérot entre el final de la estructura y una superficie reflectante para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.

Conociendo la distancia de separación entre la última columna de la estructura y la pared reflectante, se puede calcular a partir de qué frecuencia se producirá, ya que será cuando media longitud de onda de la señal sea comparable con dicha distancia. En este caso la distancia de separación es de 2.5m, y para este valor la primera resonancia se encontrará en $f_1 = \frac{c}{\lambda} = \frac{343}{2 \cdot 2.5} = 68.6\text{Hz}$. En la **Tabla 4** se muestran los armónicos y su comparación con los valores simulados, los cuales son bastante aproximados. Cabe destacar que solo han aparecido tres armónicos.

Figura representada	Armónico (n)	Frecuencia (Hz)		Error relativo $ f_t - f_s /f_t$ [%]
		Teórica (f_t)	Simulada (f_s)	
Figura 20	1	68.6	70	12.45
	2	137.2	145	12.45
	3	205.8	200	4.47

Tabla 4. Frecuencias teóricas y simuladas correspondientes a las resonancias de Fabry-Pérot debidas a la distancia de separación entre el final de la estructura y una pared reflectante para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 1m de diámetro y 1m de constante de red.

4.1.2.3. Coeficiente de difusión sonora

Una forma de evaluar la dispersión sonora que puede aportar una estructura de cristales de sonido es mediante la medida del coeficiente de difusión sonora [13]. De esta forma, se puede conocer si una muestra aplica el efecto de dispersión sobre el sonido en mayor o menor medida a lo largo de la frecuencia, ya que si presenta un valor nulo ($d = 0$), significará que el sonido se intensifica en una sola dirección, mientras que si es máximo ($d = 1$), el sonido se reparte con la misma cantidad en todas las direcciones. Además, se puede normalizar con respecto a una superficie plana y perfectamente reflectante de modo que si se obtiene un valor nulo ($d_n = 0$) la muestra se comportará del mismo modo que lo hace la superficie plana, y si es máximo ($d_n = 1$), se comportará de forma contraria a dicha superficie.

En primer lugar, si se examina el comportamiento dispersivo de una superficie plana y reflectante, a excepción del pico de difusión sonora que se obtiene a muy baja frecuencia, en el resto del rango frecuencial considerado (desde 1Hz hasta 1000Hz) se

obtienen valores bajos, cercanos a cero, tal y como se observa en la **Figura 21 (a)**. El pico obtenido a baja frecuencia tiene sentido si se tiene en cuenta que la frecuencia es inversamente proporcional a la longitud de onda. Por tanto, a bajas frecuencias se tienen longitudes de onda muy grandes y pueden ser comparables con las dimensiones de la superficie, y la superficie actúa como un reflector que envía el sonido en múltiples direcciones. A medida que aumenta la frecuencia, la longitud de onda se va haciendo más pequeña con respecto a las dimensiones de la superficie, lo que provoca que las ondas se puedan sumar y/o restar dependiendo de la fase, y obtener máximos o mínimos de presión según el punto geométrico en el que se sitúe el punto de medida.

Si se normaliza el coeficiente de difusión sonora se obtiene un valor nulo para todo el rango frecuencial considerado, debido a que se está comparando el comportamiento de la superficie plana con ella misma y, por tanto, no existe diferencia alguna (**Figura 21 (b)**).

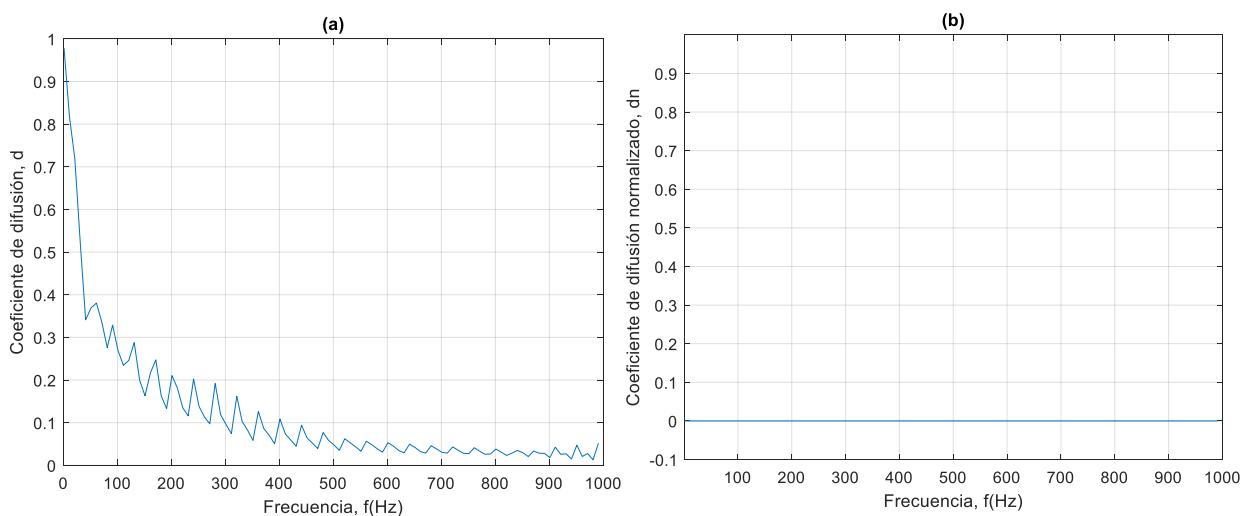


Figura 21. Para una superficie plana y reflectante: (a) coeficiente de difusión sonora; (b) coeficiente de difusión sonora normalizado

Si en cambio se normaliza el coeficiente de difusión sonora de una de las estructuras de cristales de sonido utilizada en apartados anteriores, como por ejemplo la de $d=0.7\text{m}$ y $a=1\text{m}$, se puede percibir en la **Figura 22** como cambia d_n con respecto al de la figura anterior (**Figura 21 (b)**). A baja frecuencia, en este caso de 1 a 180Hz aproximadamente, se encuentran mínimos del coeficiente, entre ellos a la frecuencia de Bragg de 170Hz, dado que en este rango los cristales se comportan de forma similar a la superficie plana. Además, corresponde con el régimen de homogenización donde tienen lugar las resonancias de Fabry-Pérot. A continuación, de 200Hz a 400Hz, existen picos de valores máximos del coeficiente porque la estructura aporta mayor dispersión con respecto a la superficie plana. Por último, a medida que aumenta la frecuencia, el coeficiente de dispersión se estabiliza alrededor de un valor, en este caso de 0.1.

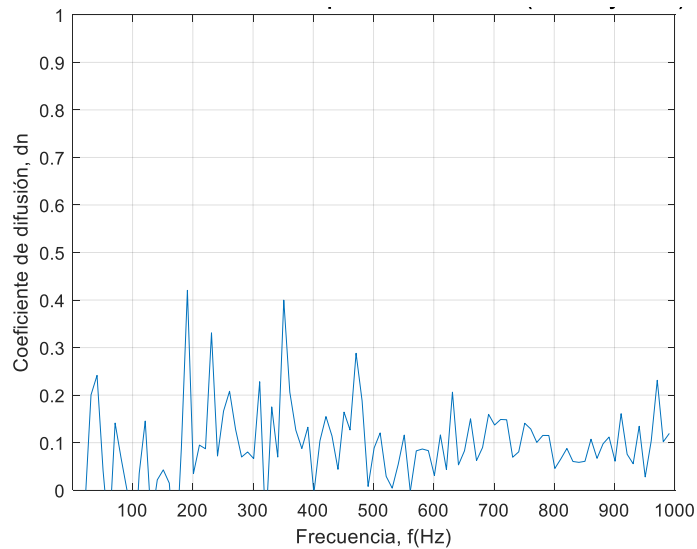


Figura 22. Coeficiente de difusión sonora de una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red normalizado con respecto a una superficie plana y reflectante.

No obstante, aunque el coeficiente de difusión sonora muestre si un material dispersa el sonido en mayor o menor medida, no indica en qué dirección en particular se concentra la energía. Por tanto, podría resultar interesante visualizar el nivel de presión sonora, medido en campo lejano, situando los puntos de medida en diversos ángulos alrededor del centro de la estructura y a ciertas frecuencias.

En el caso de una superficie plana y reflectante, se observa según la **Figura 23**, que a baja frecuencia (20Hz) el campo sonoro se dispersa prácticamente con la misma cantidad en todas las direcciones. Pero a medida que aumenta la frecuencia, el campo sonoro se hace más directivo ya que se intensifica más en la dirección especular lo cual concuerda con lo que ya se ha visto, la dispersión sonora introducida por una superficie plana va disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia. El máximo nivel de presión sonora se mantiene siempre en la dirección especular.

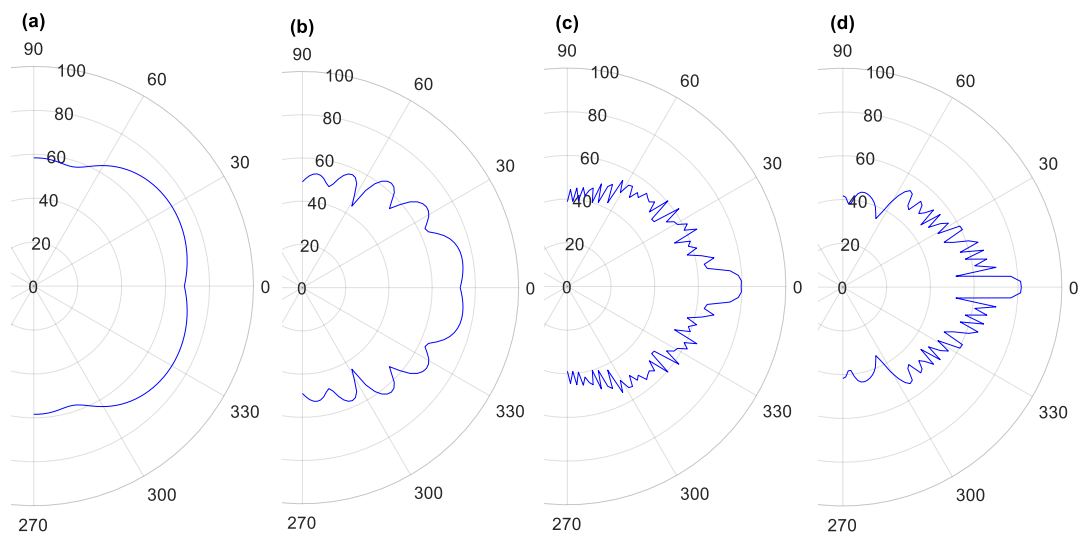


Figura 23. Nivel de presión sonora [dB] medido en campo lejano y representado en función del ángulo de situación del punto de medida para una superficie plana y reflectante a las frecuencias de: (a) 20Hz, (b) 100Hz, (c) 500Hz, (d) 800Hz.

Para la estructura de cristales de sonido de $d=0.7$ y $a=1\text{m}$, tal y como se observa en la **Figura 24**, a baja frecuencia (30Hz) la estructura se comporta de forma similar a una superficie plana y reflectante (**Figura 23 (a)**). Pero en general, para el resto del rango frecuencial, el campo sonoro ya no se intensifica en la dirección de incidencia, excepto a la frecuencia de Bragg de 170Hz donde el comportamiento acústico se asemeja al de la superficie plana.

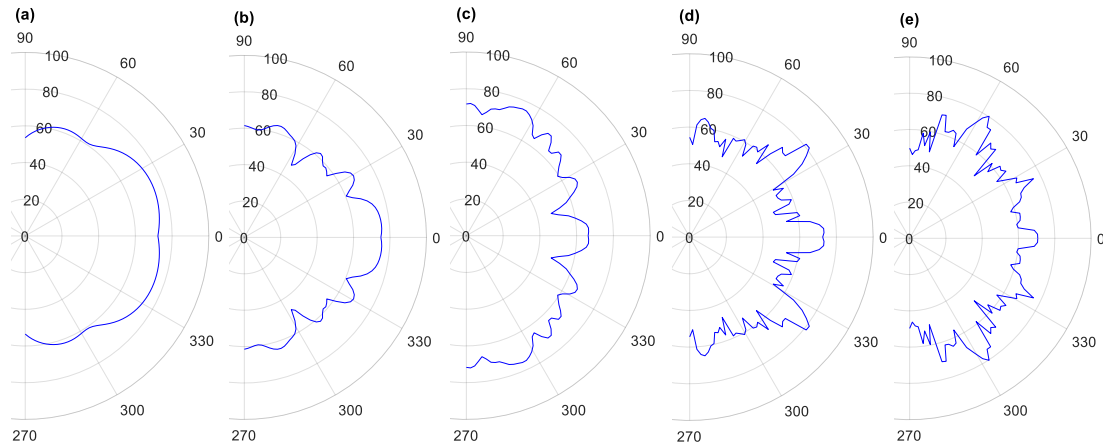


Figura 24. Nivel de presión sonora [dB] medido en campo lejano y representado en función del ángulo de situación del punto de medida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red a las frecuencias de: (a) 30Hz, (b) 170Hz, (c) 350Hz, (d) 560Hz, (e) 800Hz.

Por tanto, se demuestra que efectivamente los cristales de sonido difractan el campo sonoro incidente, y además reducen el nivel de presión sonora en la dirección especular con respecto a una superficie plana y reflectante, lo cual resulta beneficioso en aplicaciones aeroespaciales donde se busca disminuir la componente directa del sonido. Sin embargo, a la frecuencia de *Bragg*, central a la banda prohibida, no se consigue disminuir la componente directa. También se demuestra que los cristales de sonido mejoran su comportamiento difractivo a medida que aumenta la frecuencia, cuando la longitud de onda de las señales sonoras deja de ser comparable con las dimensiones de la estructura.

4.2. Estudio numérico sobre cristales de sonido formados por resonadores de Helmholtz

Una vez terminada la primera parte de la simulación, se procederá a realizar un estudio previo del comportamiento de los cristales de sonido, pero sustituyendo los dispersores cilíndricos por dispersores en forma de "C", para evaluar cómo influirán los resonadores de Helmholtz en la mitigación sonora durante la fase de despegue de los cohetes espaciales.

4.2.1. Diseño de las estructuras

Se han definido un total de siete estructuras del mismo modo que se ha hecho en el caso de usar dispersores cilíndricos, es decir, con los mismos valores de diámetro (d) y de constante de red (a), y, por tanto, con los mismos valores de factor de llenado (ff), tal y como se observa en **Figura 25** y **Figura 26**:

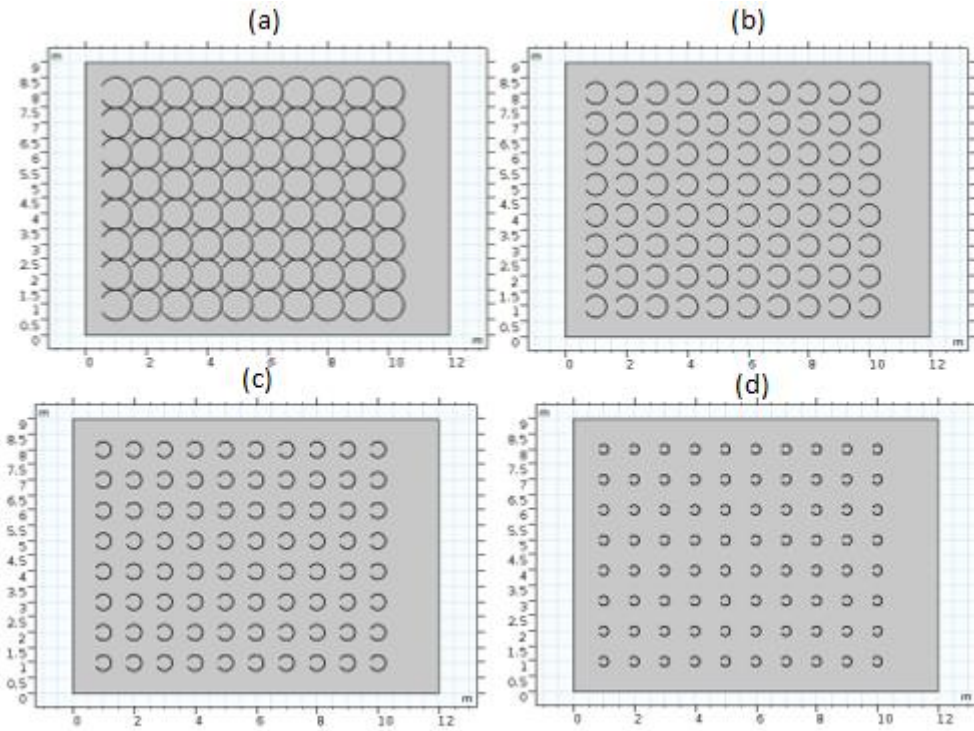


Figura 25. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores en forma de “C” con la misma constante de red (a) de 1m y diferentes diámetros (d): a) 1m; b) 0.7m; c) 0.5m; d)0.3m.

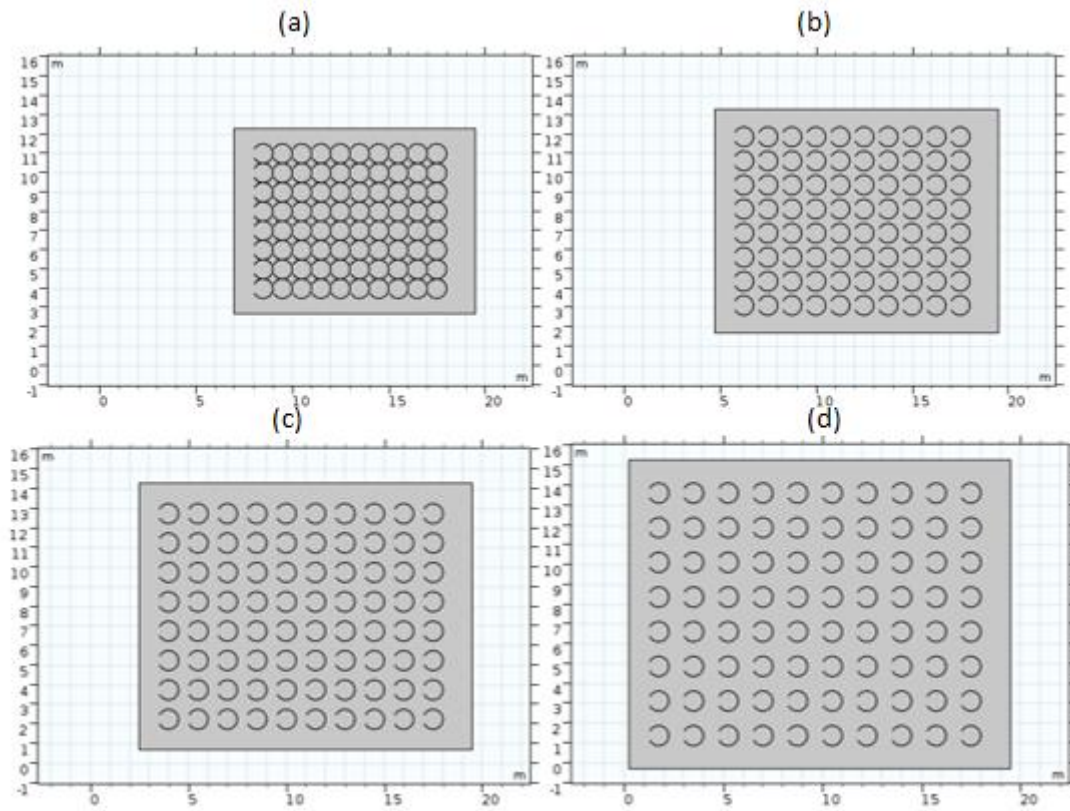


Figura 26. Geometría diseñada para el estudio previo sobre el comportamiento de cristales de sonido formados por dispersores en forma de “C” con el mismo diámetro (d) de 1m y diferentes constantes de red (a): a) 1m; b) 1.25m; c) 1.5m; d)1.75m

La diferencia de estas estructuras con las diseñadas en el caso anterior, es que los dispersores cilíndricos forman una abertura para presentar la forma de “C”, que para todos los casos es de $\alpha = 30^\circ$ siendo 2α la abertura completa tal y como se indica en la **Figura 27**.

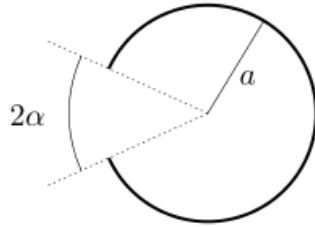


Figura 27. Un dispersor en forma de C (resonador) de radio “a” y ángulo de abertura 2α [11].

Además, considerando que el espesor de las paredes de los dispersores es de 1cm, se puede obtener la frecuencia de resonancia de Helmholtz a partir de la ecuación 4 para cada una de las estructuras diseñadas. En la **Tabla 5** se indican las frecuencias de Helmholtz, así como la de Bragg y el factor de llenado, los cuales coinciden con el caso anterior en el que se usaban dispersores cilíndricos.

Estructura SC		f_{BG} (Hz)	f_{HR} (Hz)	ff (%)
a (m)	d (m)			
1	1	171.5	66.1	79
1	0.7	171.5	94.0	38
1	0.5	171.5	130.7	20
1	0.3	171.5	214.8	7
1.25	1	137.2	66.1	50
1.5	1	114.3	66.1	35
1.75	1	98	66.1	26

Tabla 5. Frecuencia de Bragg central a la banda prohibida f_{BG} (Hz), frecuencia de resonancia de Helmholtz f_{HR} (Hz) y factor de llenado ff (%) calculado de forma teórica para cada una de las estructuras de cristales de sonidos diseñadas y formadas por dispersores en forma de “C”.

La configuración del campo acústico y las condiciones de contorno son las mismas que en el caso de usar cristales de sonido con dispersores cilíndricos.

4.2.2. Obtención de resultados

4.2.2.1 Formación de la banda prohibida

La principal novedad reside en la aparición de una banda prohibida centrada a la frecuencia de resonancia del resonador empleado. En el caso de $d=0.7\text{m}$ y $a=1\text{m}$, se obtiene la **Figura 28** donde se diferencia entre la zona azul que corresponde a la banda prohibida situada a la frecuencia de resonancia de Helmholtz (94.0Hz), y la zona roja correspondiente a la banda prohibida situada la frecuencia de Bragg (171.5Hz).

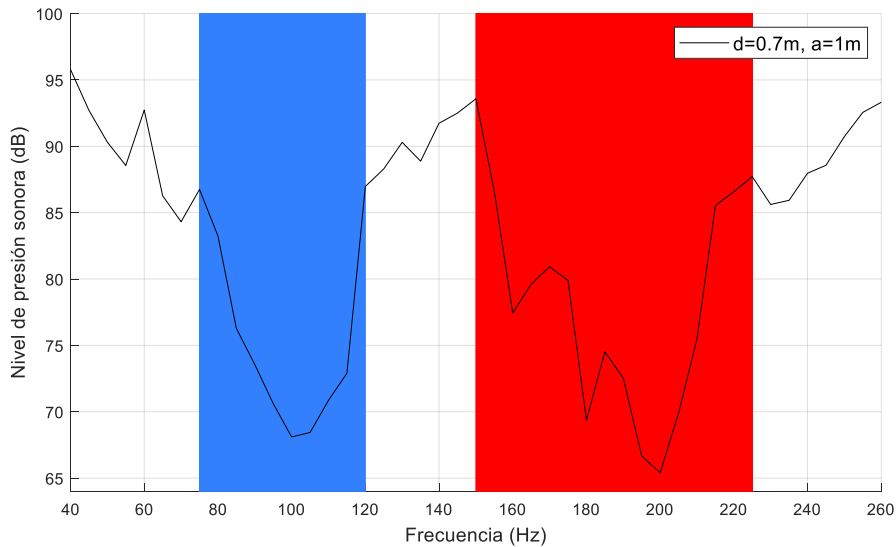


Figura 28. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la formación de las dos bandas prohibidas centradas a la frecuencia de resonancia de Helmholtz (azul) y a la frecuencia de Bragg (rojo) respectivamente para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C” de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red.

Las frecuencias centrales a las bandas prohibidas obtenidas en la simulación se acercan bastante a los valores calculados teóricamente teniendo en cuenta las mismas limitaciones del modelo numérico que en el caso anterior donde se usaban dispersores cilíndricos, tal y como se observa en la **Tabla 6**.

Figura representada	Estructura		Frecuencia [Hz]			Error relativo $ f_t - f_s /f_t$ [%]
	d [m]	a [m]		Teórica (f_t)	Simulada (f_s)	
Figura 28	0.7	1	Frecuencia Helmholtz	94	100	6.64
			Frecuencia de Bragg	171.5	200	16.62

Tabla 6. Frecuencias de resonancia de Helmholtz y de Bragg teóricas y simuladas centrales a las bandas prohibidas generadas en una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C” de $d=0.7m$ y $a=1m$.

Aunque aparezcan dos bandas prohibidas, no son debidas al mismo fenómeno físico. Es decir, la banda prohibida a la frecuencia de Bragg se crea porque el sonido no es capaz de propagarse a través de la estructura debido a su periodicidad, y por tanto se crea un efecto de reflexión. En cambio, la banda prohibida centrada a la frecuencia de resonancia de Helmholtz aparece debido a que el sonido al incidir sobre la estructura resuena en el interior de los dispersores, es decir, se crea un efecto de concentración del sonido en el resonador lo cual impide su propagación a través de la estructura. En la **Figura 29** se aprecia claramente esta diferencia ya que se muestra en la **Figura 29 (a)** como se concentra mayor nivel de presión sonora en la primera fila de cristales a la frecuencia de Helmholtz, y en la **Figura 29 (b)** se visualiza cómo las interferencias destructivas de Bragg atenúan el paso del sonido a través de la estructura.

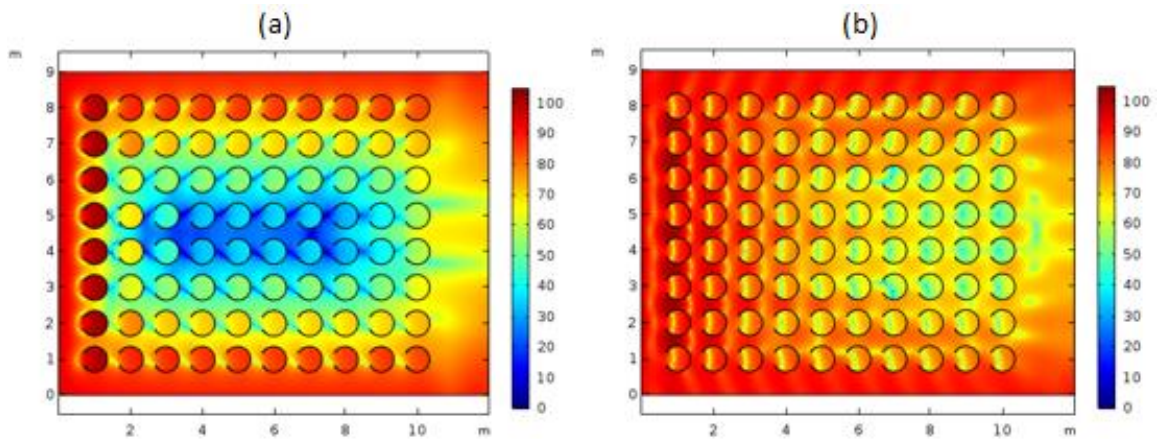


Figura 29. Gráficos de superficie del nivel de presión sonora a las frecuencias centrales de las dos bandas prohibidas generadas por una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C” de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red: (a) a la frecuencia de resonancia de Helmholtz; (b) a la frecuencia de Bragg.

Además, si se representa el número de onda en función de la frecuencia, se puede apreciar claramente cómo aparecen las dos bandas prohibidas. En la **Figura 30 (a)** se muestra el caso de $d=1\text{m}$ y $a=1.25$ ($ff=50\%$), y en la **Figura 30 (b)** el de $d=1\text{m}$ y $a=1.5\text{m}$ ($ff=35\%$). Además, del factor de llenado también afecta a la anchura de la banda prohibida centrada a la frecuencia de resonancia de Helmholtz, ya que cuanto menor es su valor, más estrecha se vuelve.

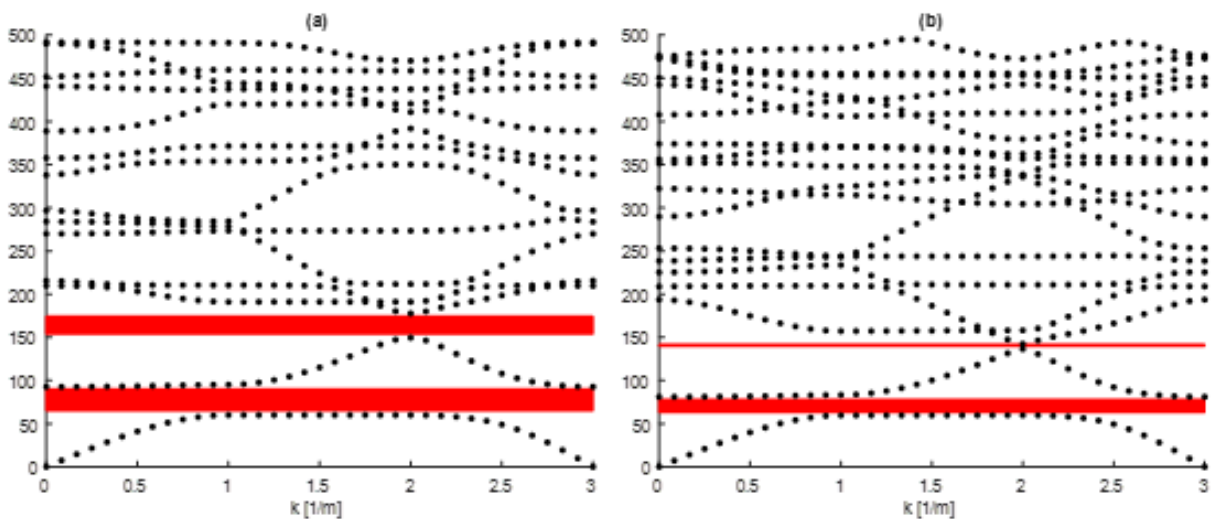


Figura 30. Bandas de propagación obtenidas mediante la representación del número de onda k (m^{-1}) en función de la frecuencia para la zona irreducible de Brillouin para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C”: (a) de 1m de diámetro y 1.25m de constante de red; (b) de 1m de diámetro y 1.5m de constante de red. El número de K varía de 0 a 3 considerándose de 0 a 1 la propagación en Γ -X, de 1 a 2 en X-M y de 2 a 3 en M- Γ

Por otra parte, la frecuencia de resonancia de Helmholtz puede cambiar en función del ángulo de abertura (α) que presente el resonador. Para demostrarlo, se muestra en la **Figura 31** el caso de $d=0.5\text{m}$ y $a=1\text{m}$, donde aparece el nivel de presión sonora en función de la frecuencia para varios ángulos de abertura α , medido a 1m del final de la estructura en un punto central a ella.

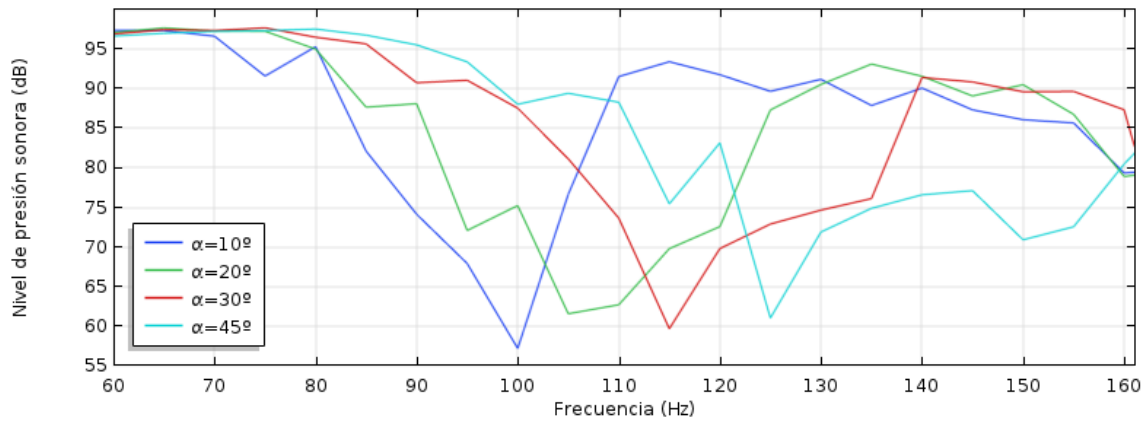


Figura 31. Nivel de presión sonora (dB) en función de la frecuencia (Hz) que muestra la influencia de variar el ángulo de abertura (10°, 20°, 30° y 45°) sobre la frecuencia de resonancia para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C”.

El efecto que introduce la variación del ángulo de abertura es que a medida que se aumenta, la frecuencia de resonancia de Helmholtz lo hace también. No obstante, cabe destacar que la variabilidad del valor de la frecuencia de resonancia no es muy predominante, sino que varía unos pocos Hercios.

En la **Tabla 7** se comparan las frecuencias teóricas con las obtenidas en la simulación para cada ángulo de abertura considerado. Las frecuencias teóricas no coinciden con las simuladas, no obstante, sí se aprecia el efecto de proporcionalidad directa entre el valor del ángulo de abertura y la frecuencia de resonancia.

Figura representada	Ángulo de abertura (°)	Frecuencia (Hz)		Error relativo $ f_t - f_s /f_t$ [%]
		Teórica (f_t)	Simulada (f_s)	
Figura 31	10	125.44	100	20.28
	20	129.34	105	18.82
	30	130.72	115	12.03
	45	131.67	125	5.06

Tabla 7. Frecuencias teóricas y simuladas correspondientes a las frecuencias de resonancia de Helmholtz para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C” de 0.5m de diámetro y 1m de constante de red.

4.2.2.2. Coeficiente de difusión sonora

El comportamiento dispersivo de una estructura de cristales de sonido con resonadores de Helmholtz no difiere demasiado del de una con dispersores cilíndricos, tal y como se observa en la **Figura 32**, donde se representa el coeficiente de difusión normalizado para una estructura de $d=0.7m$ y $a=1m$.

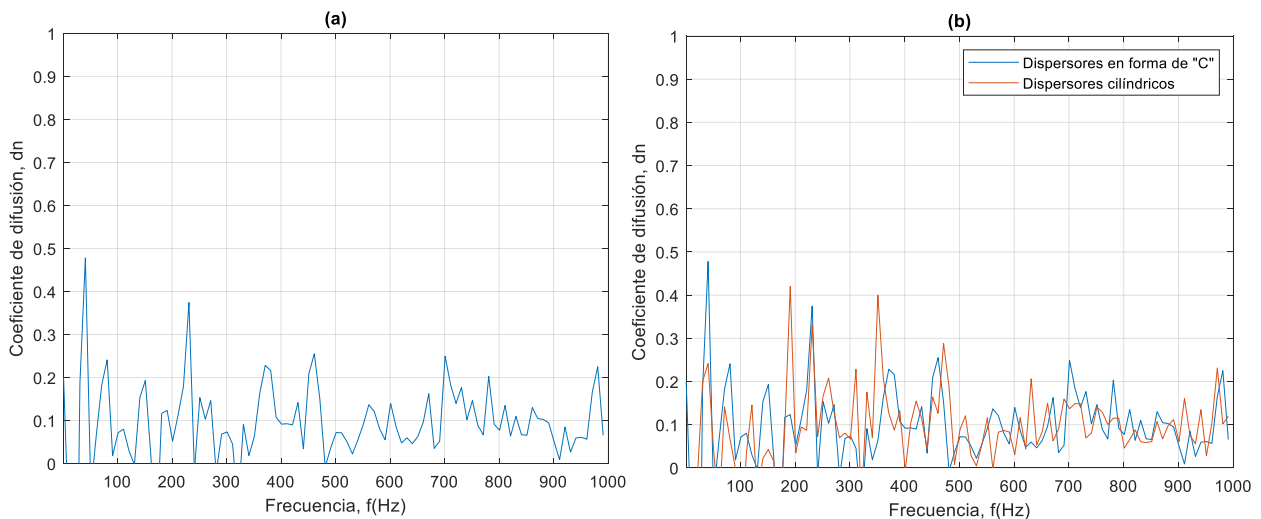


Figura 32. (a) Coeficiente de difusión sonora normalizado de una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C” de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red normalizado con respecto a una superficie plana y reflectante. (b) Comparación del coeficiente de difusión sonora normalizado de una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos con una de dispersores en forma de “C”.

Del mismo modo que ocurría con los cristales formados por dispersores cilíndricos, a baja frecuencia el comportamiento de la estructura es similar al de un reflector plano (**Figura 33 (a)**), y a medida que aumenta la frecuencia, el campo sonoro ya no se intensifica en la dirección de incidencia (**Figura 33 (d)** y **Figura 33 (e)**), a excepción de las frecuencias centrales a las dos bandas prohibidas, es decir, a la frecuencia de resonancia de Helmholtz (**Figura 33 (b)**) y a la frecuencia de Bragg (**Figura 33 (c)**), las cuales presentan un comportamiento más directivo.

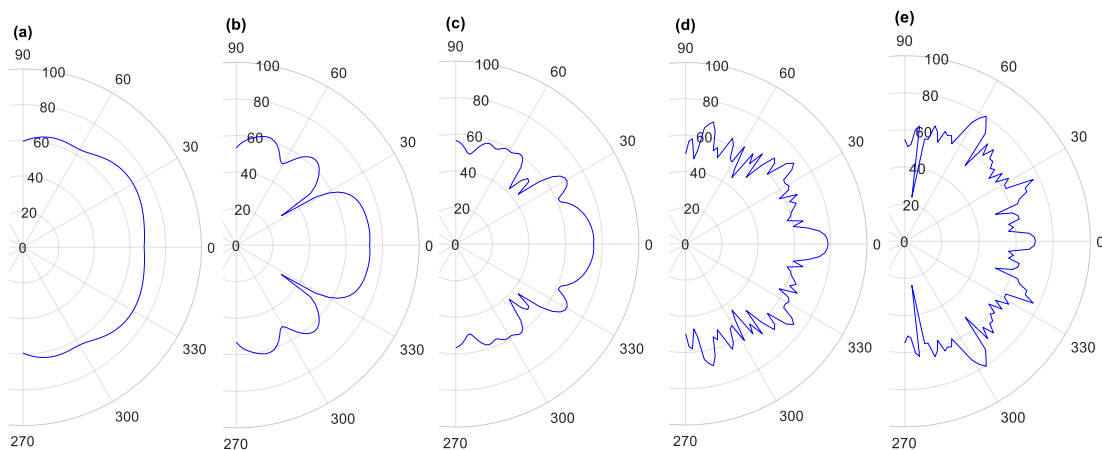


Figura 33. Nivel de presión sonora [dB] medido en campo lejano y representado en función del ángulo de situación del punto de medida para una estructura de cristales de sonido formada por dispersores en forma de “C” de 0.7m de diámetro y 1m de constante de red a las frecuencias de: (a) 30Hz, (b) 100Hz, (c) 170Hz, (d) 560Hz, (e) 800Hz.

Por tanto, aparentemente una estructura de cristales de sonido formada por resonadores de Helmholtz no parece mejorar el comportamiento dispersivo de una formada por dispersores cilíndricos, ya que añade una banda prohibida además de la generada a la frecuencia de Bragg, con la consecuencia de propiciar que el sonido se intensifique en la dirección de incidencia en un mayor número de secciones del rango frecuencial. No obstante, cabe destacar que la simulación realizada con resonadores de Helmholtz no ha considerado el efecto de pérdidas termo-viscosas que introducen

estos sistemas acústicos, por lo que, si se consideran estas pérdidas, a la frecuencia de resonancia de Helmholtz se absorbería una porción del sonido tal y como se demuestra en el siguiente apartado.

5. Aplicación de los cristales de sonido al entorno aeroespacial

Los estudios numéricos realizados en los apartados anteriores, es decir, sobre cristales de sonido formados por dispersores cilíndricos y por resonadores de Helmholtz, corresponden a una validación del comportamiento acústico que los caracteriza.

En este apartado, se pretende conseguir el objetivo principal del TFM, que consiste en aplicar los cristales de sonido formados por resonadores de Helmholtz en la mitigación sonora durante la fase de lanzamiento de cohetes espaciales, en un entorno geométrico sencillo y aproximado al entorno real, teniendo en cuenta los conocimientos adquiridos en los estudios numéricos desarrollados. Además, se le aplicarán a los resonadores de Helmholtz las pérdidas termo-viscosas que éstos introducen.

5.1 Aplicación de las pérdidas termo-viscosas

Para definir adecuadamente las pérdidas termo-viscosas en el modelo numérico, es necesario modificar la geometría de los resonadores de Helmholtz implementados hasta el momento, los cuales se trataban de cilindros en forma de "C", e insertarles un cuello, tal y como se observa en la **Figura 34**, de forma que se pueda distinguir claramente entre el espacio encerrado por la cavidad y el encerrado por el cuello, y así aplicar el módulo de compresibilidad y la densidad correspondiente a cada zona.

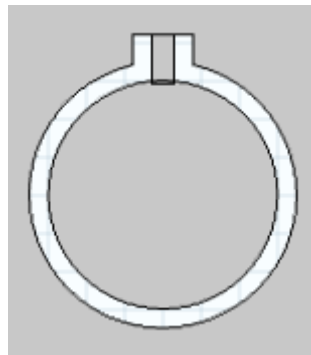


Figura 34. Inserción del cuello a un resonador en forma de "C" para poder aplicar las pérdidas termo-viscosas en el modelo numérico.

En la **Figura 35** se muestra el coeficiente de absorción sonora obtenido para cuatro resonadores con cavidades de diferente anchura, pero con la misma forma de cuello, y en dos situaciones diferentes: con y sin aplicación de las pérdidas termo-viscosas. El coeficiente de absorción es prácticamente nulo si no se consideran las pérdidas (**Figura 35 (a)**) y por tanto no absorbe el sonido sea cual sea la frecuencia. Pero en cambio, cuando se aplican las pérdidas (**Figura 35 (b)**), presenta picos de absorción

sonora a las frecuencias de resonancia. Otro efecto apreciable es el aumento de la absorción a medida que se estrecha la cavidad.

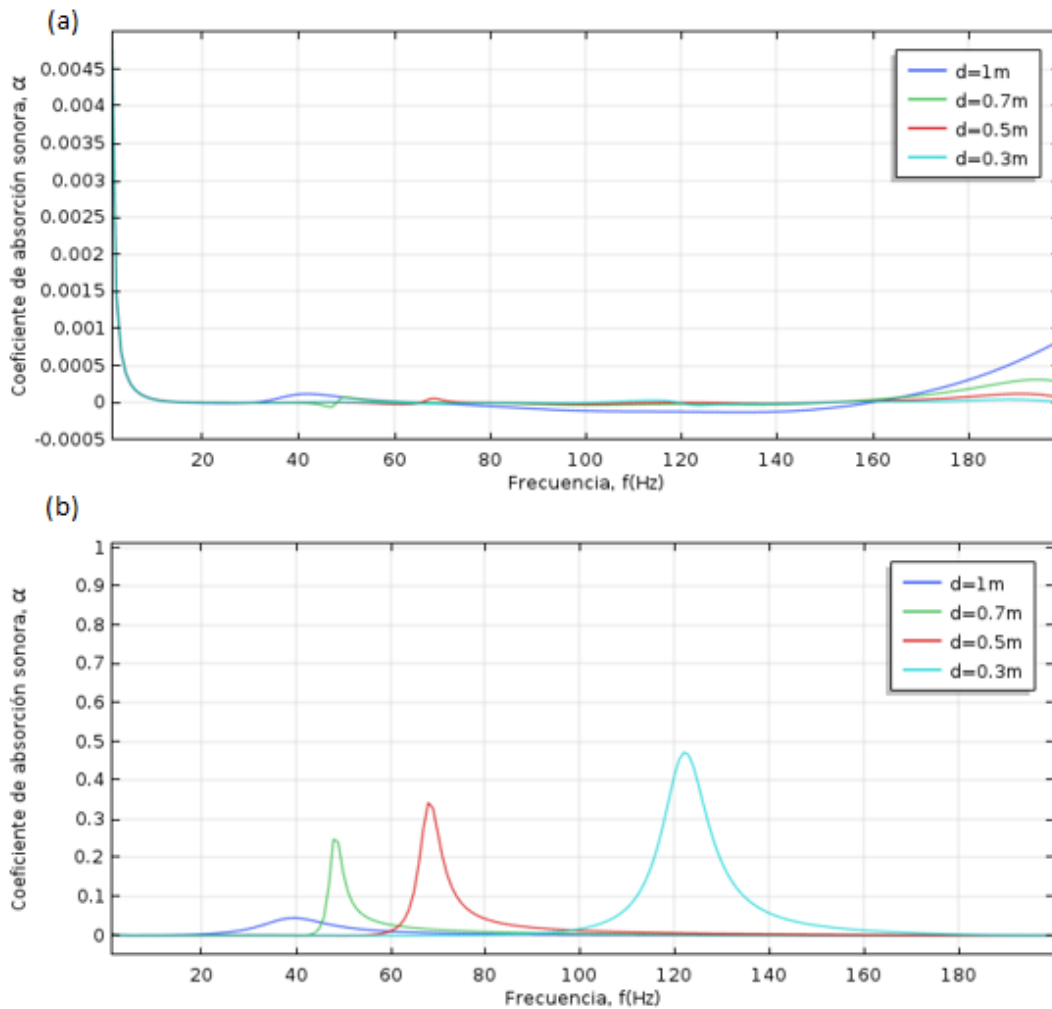


Figura 35. Coeficiente de absorción sonora para cuatro resonadores de Helmholtz de diferentes diámetros (1m, 0.7m, 0.5m y 0.3m): (a) sin aplicación las pérdidas termo-viscosas; (b) con aplicación de las pérdidas termo-viscosas.

Debido a la inserción del cuello en los dispersores, se afecta a la frecuencia de resonancia de los resonadores ya que resultan más bajas con respecto a las calculadas teóricamente para resonadores en forma de “C”. No obstante, en la práctica este cambio no resulta crítico siempre y cuando la frecuencia de resonancia resultante se encuentre dentro del rango frecuencial del ruido emitido por el cohete espacial, tal y como se verá más adelante.

Por tanto, se consigue disminuir parte del sonido a las frecuencias de resonancia de los resonadores, lo cual puede resultar beneficioso en aplicaciones aeroespaciales, ya que además de las propiedades de dispersión del sonido que introducen las estructuras periódicas, es posible disminuir el sonido en ciertas frecuencias debido a la absorción selectiva que presentan los resonadores de Helmholtz.

5.2. Diseño geométrico: aproximación al entorno aeroespacial

Para estudiar el efecto de los cristales de sonido formados por resonadores de Helmholtz en el lanzamiento de cohetes espaciales, se ha diseñado un modelo geométrico aproximado a la base de lanzamiento, donde se inserta una estructura de cristales y se estudia cómo se comporta el campo sonoro, el cual es emitido por el cohete espacial, reflejado por las paredes que forman la base de lanzamiento o, en este caso, dispersado por los cristales de sonido.

El modelo geométrico diseñado se muestra en la **Figura 36**, donde se especifican las dimensiones de los elementos que lo forman, así como las condiciones de contorno aplicadas.

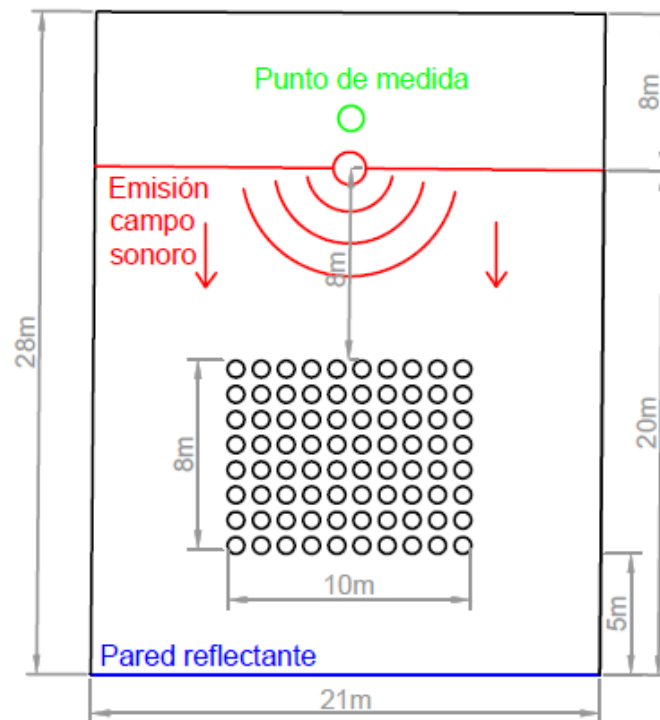


Figura 36. Diseño del modelo geométrico aproximado al caso real de una base de lanzamiento de cohetes espaciales y utilizado para el cálculo numérico.

En cuanto a las medidas geométricas consideradas en el modelo numérico se han basado en el estudio realizado por el grupo de investigación de la UPV, sobre el uso de cristales de sonido en la mitigación sonora de cohetes espaciales durante la fase de lanzamiento [3].

Por una parte, la estructura de cristales se encuentra centrada y en línea recta a la fuente sonora, y aproximadamente a 5m separada de lo que sería una pared rígida de la base de lanzamiento y por tanto totalmente reflectante. Dicha pared se ha considerado de una longitud cercana a 20m, aunque cabe destacar que en el caso real esta pared es más larga y además puede presentar irregularidades, aunque por motivos de simplificación se ha considerado totalmente lisa.

Para simular la fuente sonora, ésta se situaría a 8m de la estructura (a 20m de la pared reflectante), aunque en este caso no se ha insertado una fuente sonora como tal, sino que se ha definido una línea a partir de la cual empieza la emisión del campo sonoro, supuestamente producido por el cohete espacial tal y como se observa en la

Figura 36, y se indica el sentido en el que viaja, es decir, hacia la pared reflectante. El campo sonoro del ruido emitido por el cohete espacial se sitúa en mayor medida entre 20Hz y 2000Hz (ver **Figura 2**). No obstante, el equipo utilizado para ejecutar el cálculo numérico no posee suficientes recursos para un rango frecuencial tan ancho, ya que necesitaría un mallado extremadamente fino y un elevado tiempo de ejecución, por lo que se ha considerado un menor rango frecuencial situado entre 20Hz y 500Hz, teniendo en cuenta que generalmente la baja frecuencia es el régimen que mayores problemas acarrea y el más difícil de insonorizar.

Por otra parte, se ha situado una zona de medición donde no se radia el campo sonoro incidente, que servirá para la obtención de medidas de nivel de presión sonora del sonido reflejado. Si no se inserta esta zona y se midiera en la zona de radiación, no se obtendrían resultados coherentes ya que se captaría mayor cantidad del campo sonoro incidente que del reflejado, y no se notaría diferencia alguna entre usar la estructura de cristales de sonido o no. Además, hay que tener en cuenta que a la carga del cohete, que se encuentra en la parte superior, no le afecta el campo sonoro incidente, el cual se emite en la parte inferior (flujo de escape), sino más bien las componentes reflejadas. El punto de medida situado en esta zona de medición se localiza justo detrás del borde de emisión sonora y centrado a la fuente sonora y a la estructura de cristales de sonido. Este punto de medida servirá para captar el nivel de presión sonora y calcular posteriormente el parámetro de pérdidas por inserción (IL), para de esta forma, realizar comparaciones entre varios casos diferentes tal y como se verá en el siguiente apartado de obtención de resultados.

La estructura de cristales de sonido utilizada para la mitigación sonora corresponde con una de las utilizadas en apartados anteriores. En concreto se trata de una estructura de red cuadrada de 10 filas por 8 columnas de dispersores modelados en forma de resonadores de Helmholtz, con aplicación de las pérdidas termo-viscosas, de 0.5m de diámetro de la cavidad y 1m de constante de red. Se ha elegido esta estructura en particular debido a que posee un factor de llenado del 20% el cual es lo suficientemente bajo como para proporcionar una banda prohibida estrecha manteniendo las propiedades de dispersión de las estructuras periódicas. Otro motivo por el que se ha escogido esta estructura de cristales es porque ofrece un coeficiente de absorción relativamente alto (ver **Figura 35**), y se produce aproximadamente a la frecuencia de 70Hz, la cual se sitúa dentro del rango frecuencial del ruido emitido por el cohete espacial.

5.3. Obtención de resultados

En esta parte se comparará el caso de usar resonadores de Helmholtz con aplicación de las pérdidas termo-viscosas con lo siguiente: usar resonadores de Helmholtz sin aplicación de pérdidas termo-viscosas, usar cristales de sonido con dispersores cilíndricos, y no usar ninguna de las estructuras. De esta forma se podrán evaluar las ventajas y/o desventajas que ofrecen los resonadores de Helmholtz en aplicaciones aeroespaciales durante el lanzamiento de cohetes espaciales, respecto a usar cristales de sonido convencionales o no usar ninguna de las estructuras.

En primer lugar, se considera importante conocer si realmente la aplicación de las pérdidas termo-viscosas a los resonadores de Helmholtz en el modelo numérico suponen una mejora en cuanto al nivel de presión sonora medido en la dirección de incidencia. En la **Figura 37** se demuestra que efectivamente sí mejoran el resultado, a

la frecuencia de resonancia del resonador, 80Hz aproximadamente, se consigue una disminución máxima de 2dB tal y como se aprecia la **Figura 37 (b)**, lo cual es un valor significativo si se tiene en cuenta que en el entorno aeroespacial se producen unos niveles sonoros extremos y por tanto difíciles de mitigar.

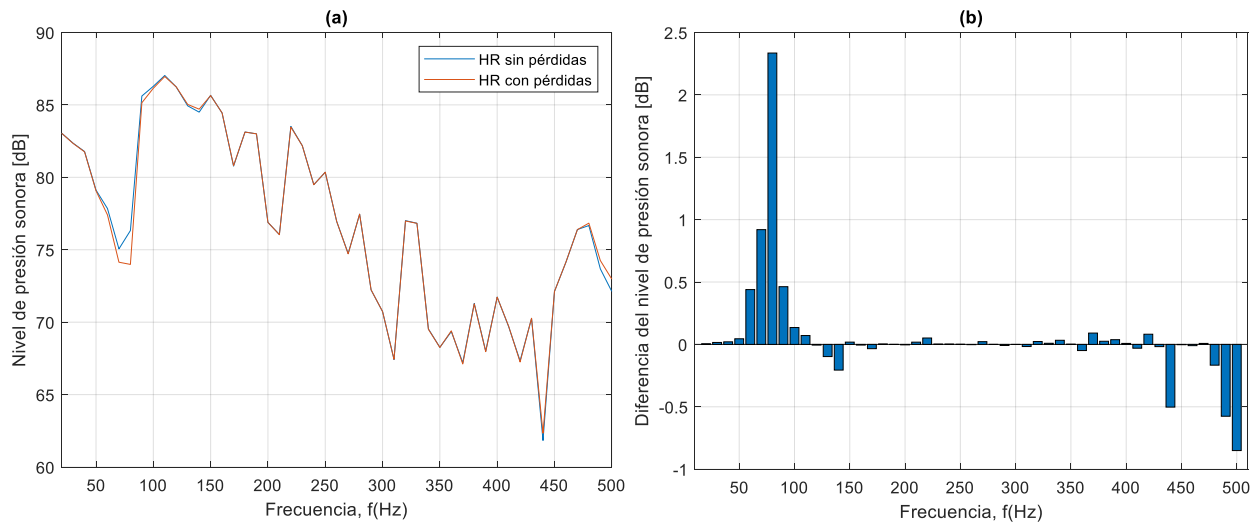


Figura 37. Nivel de presión sonora [dB] en función de la frecuencia [Hz] al usar una estructura de cristales de sonido formada por resonadores de Helmholtz con pérdidas termo-viscosas y sin pérdidas termo-viscosas: (a) en un gráfico lineal comparativo; (b) en un gráfico de barras que muestra la diferencia de niveles [dB].

Por otra parte, también resulta interesante conocer la diferencia entre usar una estructura de cristales de sonido formada por resonadores de Helmholtz, y usar otra formada con dispersores cilíndricos, para determinar las posibles mejoras o desmejoras que se producen. En la **Figura 38** se compara el nivel de presión sonora obtenido en ambos casos. Se observa un comportamiento similar con la excepción de que los resonadores de Helmholtz disminuyen nivel de presión sonora a la frecuencia de resonancia lo cual es esperable. En cambio, se obtiene mayor nivel en el régimen frecuencial comprendido entre 300Hz y 450Hz, debido a que probablemente se dispersa menos el sonido. No obstante, antes de considerarlo como una desmejora, habría que visualizar un mayor rango frecuencial para comprobar si la disminución de la dispersión se manifiesta en otros intervalos.

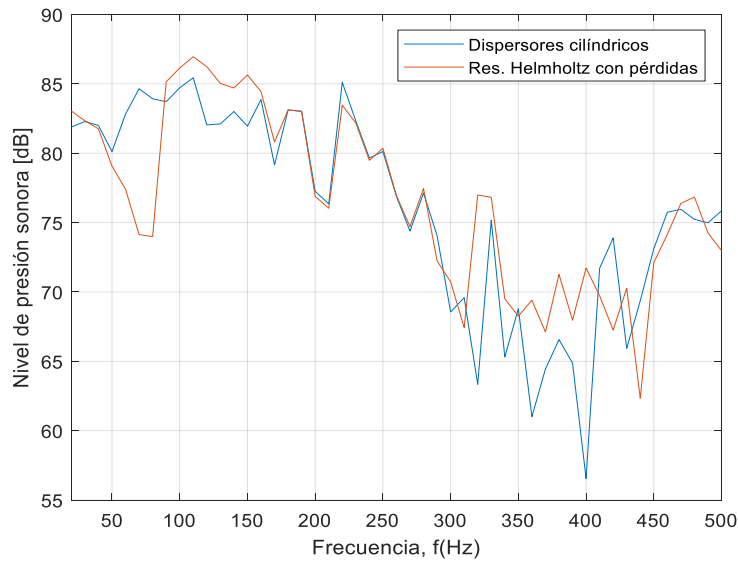


Figura 38. Comparación del de presión sonora [dB] entre dos estructuras de cristales de sonido, pero una formada por dispersores cilíndricos y otra por resonadores de Helmholtz de 0.5m de diámetro y 1m de constante de red en ambos casos.

Por último, se procede al cálculo de las pérdidas por inserción (IL) en el rango frecuencial considerado. En el caso de que IL sea mayor de cero, significará que la estructura de cristales de sonido disminuye el nivel de presión sonora en la dirección de incidencia en comparación a una superficie plana y perfectamente reflectante. Si por el contrario IL es menor de cero, querrá decir que la estructura empeora la situación ya que incrementa el nivel de presión sonora en la dirección de incidencia.

El cálculo de IL se ha realizado en dos situaciones diferentes, primero usando una estructura formada por dispersores cilíndricos y después con una formada por resonadores de Helmholtz. De esta forma, se pretenden hallar las diferencias entre usar una estructura u otra. En la **Figura 39** se muestra el IL obtenido para cada frecuencia (barras azules) y el IL global integrado a lo largo de la frecuencia (barra negra) en los dos casos considerados.

Tal y como se observa en la **Figura 39**, el uso de resonadores de Helmholtz permite atenuar el nivel de presión sonora alrededor de la frecuencia de resonancia (80Hz). No obstante, no presenta mejor comportamiento global con respecto a los dispersores cilíndricos ya que éstos consiguen un valor de IL global más alto, debido a que disminuyen más el nivel de presión sonora en la dirección de incidencia en frecuencias no cercanas a la resonancia de Helmholtz.

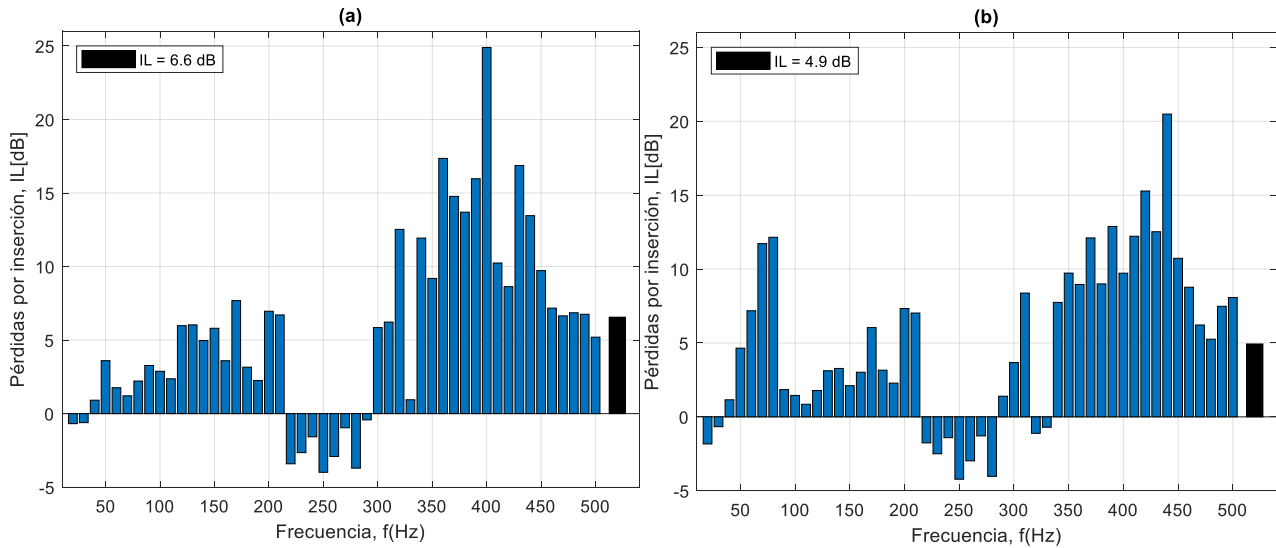


Figura 39. Pérdida por inserción (IL) [dB] de una estructura de cristales de sonido de 1m de constante de red formada por: (a) dispersores cilíndricos de 0.5m de diámetro; (b) resonadores de Helmholtz de 0.5m de diámetro de la cavidad con pérdidas termo-viscosas.

Según los resultados obtenidos, la principal ventaja de usar resonadores de Helmholtz en cristales de sonido para la mitigación sonora en el contexto aeroespacial reside en la disminución del nivel de presión sonora en la dirección de incidencia alrededor de la frecuencia de resonancia de los resonadores utilizados.

6. Conclusiones y líneas futuras

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster ha consistido en estudiar la aplicación de estructuras basadas en cristales de sonido, formados por una distribución periódica de resonadores de Helmholtz, para la reducción del ruido generado por los cohetes espaciales durante la fase de despegue en la base de lanzamiento.

Para lograr el objetivo principal se han seguido una serie de objetivos secundarios. En primer lugar, se ha presentado la problemática existente, es decir, cómo afecta el ruido generado por el cohete espacial así mismo, ya que el sonido se refleja en las instalaciones de la base de lanzamiento y alcanza la carga dañando su circuitería y maquinaria interna. Se han mostrado las posibles vías existentes para proteger al cohete del ruido los cuales abarcan desde sistemas que actúan internamente en el cohete hasta estrategias implementadas en las instalaciones de la base de lanzamiento. También, se ha explicado en qué ha consistido la investigación realizada por el grupo de la universidad que ha colaborado con la ESA, los cuales propusieron el uso de cristales de sonido para aplicar sus propiedades acústicas dispersoras i disminuir la componente sonora reflejada en la dirección de incidencia la cual alcanza al cohete espacial.

A continuación, mediante el uso métodos numéricos, en este caso FEM, y mediante el software COMSOL, se ha realizado un estudio numérico para analizar el comportamiento de las estructuras basadas en cristales de sonido formadas con dispersores cilíndricos y con resonadores de Helmholtz, para entender así cómo actúan frente al sonido y analizar las diferencias de usar los resonadores de Helmholtz frente a otro tipo de dispersor. En general, se ha visto que conviene que las estructuras presenten un bajo factor de llenado para reducir la anchura de la banda prohibida y no permitir que la estructura se comporte de forma similar a una superficie totalmente plana y reflectante.

Este análisis ha servido para realizar posteriormente un estudio numérico sobre los cristales de sonido formados con resonadores de Helmholtz en un entorno aproximado de la base de lanzamiento, donde se ha analizado la funcionalidad de los resonadores en la mitigación del ruido de los cohetes espaciales.

En base a los resultados obtenidos, se obtiene que la principal ventaja que aportan los resonadores de Helmholtz en estructuras periódicas en un entorno aeroespacial, reside en la disminución del nivel de presión sonora de la componente reflejada en la dirección de incidencia, alrededor de la frecuencia de resonancia del resonador empleado. Es decir, permite disminuir parte del sonido reflejado, pero solo en una banda frecuencial estrecha que además coincide con la frecuencia de resonancia del resonador. En el rango frecuencial restante, el comportamiento es similar al de una estructura de cristales de sonido convencional (en este caso con dispersores cilíndricos). También se ha visto que la aplicación de las pérdidas termo-viscosas a los resonadores de Helmholtz en el modelo numérico ha supuesto una aproximación más realista de la absorción sonora. Sin embargo, el resultado del IL global es mayor en el caso de utilizar una estructura de cristales de sonido formada por dispersores cilíndricos, lo cual indica que éstos aplican mayor dispersión sonora con respecto a las estructuras formadas con resonadores de Helmholtz.

Por tanto, se ha cumplido con el objetivo principal de estudiar la posible aplicación de los resonadores de Helmholtz en el entorno aeroespacial siguiendo los objetivos

secundarios, y se ha demostrado que pueden ser beneficiosos para la reducción del ruido generado por cohetes espaciales durante la fase de despegue, debido a sus propiedades de absorción sonora alrededor de la frecuencia de resonancia.

No obstante, cabe destacar que se han asumido ciertas simplificaciones para reducir la complejidad del problema tales como: modelado geométrico en 2D, diseño de estructuras de cristales de sonido sencillas y modelo geométrico de la base de lanzamiento aproximado. Otras simplificaciones se han asumido debido a limitaciones del equipo computacional de trabajo, como el estudio en un rango frecuencial reducido del ruido emitido por el cohete espacial, de 20Hz a 500Hz en vez de llegar hasta los 2000Hz, centrándose en la banda de más baja frecuencia, considerada como la más problemática. También, al tratarse en todo momento de un estudio numérico, no se puede afirmar la totalidad de los resultados ya que no han sido probados experimentalmente.

Por lo tanto, sería conveniente la realización de más pruebas numéricas, aproximándose más a la geometría real de la base de lanzamiento, y a las características del campo sonoro emitido por el cohete espacial. También sería interesante evaluar si es posible lograr la atenuación sonora en un rango frecuencial más amplio combinando el uso de resonadores de Helmholtz de diferentes tamaños y, como consecuencia, con diferentes frecuencias de resonancia.

Por otra parte, se podría plantear el diseño de un prototipo a escala para comparar los resultados experimentales con los numéricos. Y por supuesto, para lograr una investigación completa, se podría contemplar la realización de pruebas en un entorno real mediante el uso de estructuras fabricada a escala real y optimizadas según los resultados obtenidos en las pruebas numéricas y experimentales.

Por último, se quiere recalcar que el uso de cristales de sonido en la mitigación sonora en el contexto aeroespacial es totalmente compatible con el uso de otras estrategias de mitigación sonora existentes, como la inyección de flujo de agua presurizada.

7. Bibliografía

- [1] Arenas, J.P.; Margasahayam, R.N. (2006). "Noise and vibration of spacecraft structures" en *Ingeniare. Revista chilena de Ingeniera*, vol. 14, nº3, p. 251-264.
- [2] Final Report of the ESA – ITI type A contract "Sonic Crystal for Noise reduction at Launch Pad" (2016). Contract N. 4000110685/14/NL/SC.
- [3] García Raffi, L. M.; Salmerón Contreras, L.J; Herrero Durá, I.; Picó, R.; Redondo, J.; Sánchez-Morcillo, V.J.; Stailunas, K.; Adins, N.J.E.; Cebrecos, A.; Jiménez, N. (2018). "Broadband reduction of the specular reflections by using Sonic crystals: A proof of concept for noise mitigation in aerospace applications" en *Aerospace Science and Technology*, vol. 73, p. 300-308.
- [4] Martínez-Sala, R.; Sancho, J.; Sánchez-Pérez, J.V.; Gomez, V.; Llinares, J.; Meseguer, F. (1995). "Sound attenuation by sculpture" en *Nature*, vol. 378, p. 241.
- [5] Romero García, V. (2010). *On the control of propagating acoustic waves in sonic crystals: analytical, numerical and optimization techniques*. Dir.: Sánchez Pérez, J.V.; García Raffi, L.M. Tesis. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- [6] Elabbasi, N. (2016) "Modeling Phononic Band Gap Materials and Structures" en *Comsol Blog*, 10 de febrero. <<https://www.comsol.com/blogs/modeling-phononic-band-gap-materials-and-structures/>> [Consulta: 18 de agosto de 2018]
- [7] Kinsler, L. E.; Frey, R. A; Coppens, A. B.; Sanders, J. V. (2000). *Fundamentals of Acoustics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] Jiménez, N.; Romero-García, V.; Pagneux, V.; Groby J.P (2017). "Absorción Perfecta de baja frecuencia por paneles acústicos ultrafinos basados en metamateriales" en *48º Congreso español de acústica, Encuentro ibérico de acústica, Tecniaústica A Coruña*.
- [9] Cai, C.; Maing Mak, C. (2018) "Acoustic performance of different Helmholtz resonator array configurations" en *Applied Acoustics*, Vol. 130, p. 204-209.
- [10] Kessissoglou, N.; Fard, S. M. B (2016). "Sonic crystal noise barrier using locally resonant scatterers" en *22nd International Congress on Acoustics*.
- [11] Montiel, F.; Chung, H.; Karimi, M.; Kessissoglou, N. (2017). "An analytical and numerical investigation by a finite sonic crystal" en *WaveMotion*, vol. 70, p. 135-151.
- [12] Jiménez, N.; Huang, W.; Romero-García, V.; Pagneux, V.; Groby, J.-P.; (2016) "Supplementary material to: Ultra-thin metamaterial for perfect and quasi-omnidirectional sound absorption" en *Applied Physics Letters*, vol. 109, 121902.
- [13] ISO (2012). *Acoustics – Sound-scattering properties of surfaces – Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field. ISO 17497-2*. Suiza: ISO.
- [14] Demésy, G.; Zolla, F.; Nicolet, A.; Vial, B. (2012). "Finite Element Method" en *Theory and Numeric Applications*. Francia: Institut Fresnel.
- [15] COMSOL Inc. *Understand, Predict, and Optimize Engineering Designs with the COMSOL Multiphysics software*. <<https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>> [Consulta: 23 de agosto de 2018]
- [16] COMSOL Inc. *Acoustic Module User's Guide*. <https://lost-contact.mit.edu/afs/pdc.kth.se/roots/ilse/v0.7/pdc/vol/comsol/4.4.248/doc/pdf/Acoustics_Module/AcousticsModuleUsersGuide.pdf> [Consulta: 25 de agosto de 2018]