

Diseño de una barrera acústica en guadua

PACS: 43.50.-x; 43.50.Rq.

Ladino Velásquez, Anderson¹; Montes Piedrahita, Andrés Felipe¹; Ramírez Alarca, Miguel¹; Dumeth Muñoz, Amed¹; Gómez Cadavid, Luis Esteban¹; Franco Ponzzone, Urabá Del Sol²

¹Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia.

{anderson.ladino@tau.usbmed.edu.co, andres.piedrahita17@tau.usbmed.edu.co, miguel.ramirez17@tau.usbmed.edu.co, amed.dumeth17@tau.usbmed.edu.co, sonido@usbmed.edu.co.}

²Biohabitat Tacuara, Medellín, Colombia.

{biohabittat.tacuara@gmail.com}

Palabras Clave: Barrera acústica, FEM, Guadua, Pérdida por inserción, Respuesta en frecuencia.

ABSTRACT.

In recent years, research in acoustics has delved into the tranquility and acoustic comfort in buildings, developing different methods of noise control, one of them is acoustic barriers, which have been designed to reduce noise pollution commonly found on roads, railways or in some specific cases to reduce the noise of machinery. In order to strengthen the investigation of acoustic metamaterials in Colombia, in this work, the design of an acoustic barrier in guadua based on the theory of sound crystals is presented. For the design, numerical simulation models have been made using the finite element method (FEM), using two types of scatterer distribution (triangular and square) with the implementation of different Helmholtz resonators in its structure. The interference of the barrier itself, the effect of the design of the resonators and the insertion losses (IL) of the different configurations are determined.

RESUMEN.

En los últimos años las investigaciones en acústica han profundizado en la tranquilidad y el confort acústico en las edificaciones, desarrollado distintos métodos de control de ruido, uno de ellos son las barreras acústicas, que han sido diseñadas para reducir la contaminación acústica comúnmente en carreteras, vías férreas o en algunos casos específicos para reducir el ruido de maquinaria. Con la finalidad de fortalecer la investigación de los metamateriales acústicos en Colombia, en este trabajo, se presenta el diseño de una barrera acústica en guadua basada en la teoría de cristales de sonido. Para el diseño se han realizado modelos de simulación numérica utilizando el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés), usando dos tipos de distribución de dispersores (triangular y cuadrada) con la implementación de diferentes resonadores de Helmholtz en su estructura. Se estudia la interferencia propia de la barrera, el efecto del diseño de los resonadores y se determina las pérdidas por inserción (IL, por sus siglas en inglés) de las diferentes configuraciones. A partir de los resultados optimizados de las simulaciones acústicas.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido es una de las problemáticas ambientales más importantes de los últimos años. La urbanización en las ciudades ha implicado un aumento de los niveles de ruido a los que se exponen las comunidades y que afecta las actividades cotidianas. Son muchas las estrategias propuestas para minimizar los niveles de presión sonora en las zonas urbanas, una de ellas es el uso de barreras acústicas, que consisten en particiones continuas de grandes tamaños que funcionan como obstáculo para la propagación de la onda sonora [1]. Estas barreras acústicas también hacen uso de materiales porosos y geometrías específicas que ayudan a disminuir los

niveles de ruido [2], sin embargo, suelen tener ciertas limitaciones. Las barreras acústicas presentan la imposibilidad de tener un flujo de aire a través de ellas. Además, se presentan reflexiones en dirección perpendicular a la propagación de onda. Por último, otro inconveniente se refiere a que las estrategias de barreras acústicas no pueden diseñarse a cierto rango frecuencial en específico, generando problemas de comunicación o un amplio margen de optimización [3].

En la última década se ha incrementado la investigación en cristales sónicos (CS), que permiten disminuir el nivel de presión sonora en *band gaps* (*brechas de bandas*) muy marcados, aprovechándose de sus propiedades geométricas, y configurándose como una alternativa válida a las barreras convencionales. Estos CS son un arreglo periódico de dispersores que están situados a cierta distancia, conocida como parámetro de red. Una de las ventajas más interesantes de esta estrategia es que los CS pueden estar en fluidos, como el aire o el agua. Además, los CS se sintonizan a bandas frecuenciales en específico, y se pueden diseñar de forma que el ancho de banda sea mayor o menor [4].

Aprovechando las características geométricas de los CS, se pueden acoplar otras estrategias que permitan aumentar la efectividad del control de ruido para ciertas frecuencias. Por ejemplo, *Ramírez Solana et al* [5] realizan el análisis de la implementación de resonadores de Helmholtz en el arreglo de CS, logrando aumentar la pérdida por inserción (IL) en un rango frecuencial amplio. Por otro lado, *Gupta y Galia* estudian el efecto de combinar las propiedades de los CS con paneles acústicos hechos de material absorbente en la pérdida de transmisión sonora (STL). Encontraron que, para cada uno de los casos de estudio propuestos, implementar las CS con material absorbente mejora la pérdida de transmisión sonora [6].

Por último, en [7] determinan de forma numérica y experimental el coeficiente de transmisión acústica de un CS hecho de bambú a través de la expansión de ondas planas y teoría de dispersión múltiple, logrando el diseño de un CS económico y sostenible con el medio ambiente.

En este trabajo de investigación se presenta el estudio de la influencia en la pérdida por inserción (IL, por sus siglas en inglés) de los diferentes parámetros de diseño, como el parámetro de red, radio de los dispersores y factor de llenado, con el objetivo de establecer una barrera acústica basada en un arreglo periódico de dispersores haciendo uso de guadua para aplicaciones de control de ruido. Uno de los objetivos del trabajo, es fortalecer la investigación y el desarrollo investigativo y académico de un colectivo interdisciplinario de jóvenes rurales denominado Biohabitat Tacuara, que busca potencia y revalorar el uso del bambú y los materiales naturales como una alternativa sustentable que puede transformar las necesidades y problemáticas actuales (Ver Figura 2).

2. METODOLOGÍA

Se propone el diseño de una estrategia de control de ruido haciendo uso de la guadua como componente principal, en donde sus características físicas permitan disminuir el aporte de ciertos componentes frecuenciales establecidos, configurándose como una estrategia de control de ruido ambiental eco-amigable [7]. En esta sección se detalla la metodología propuesta para el diseño y caracterización de una estrategia de control de ruido (Ver Figura 1).

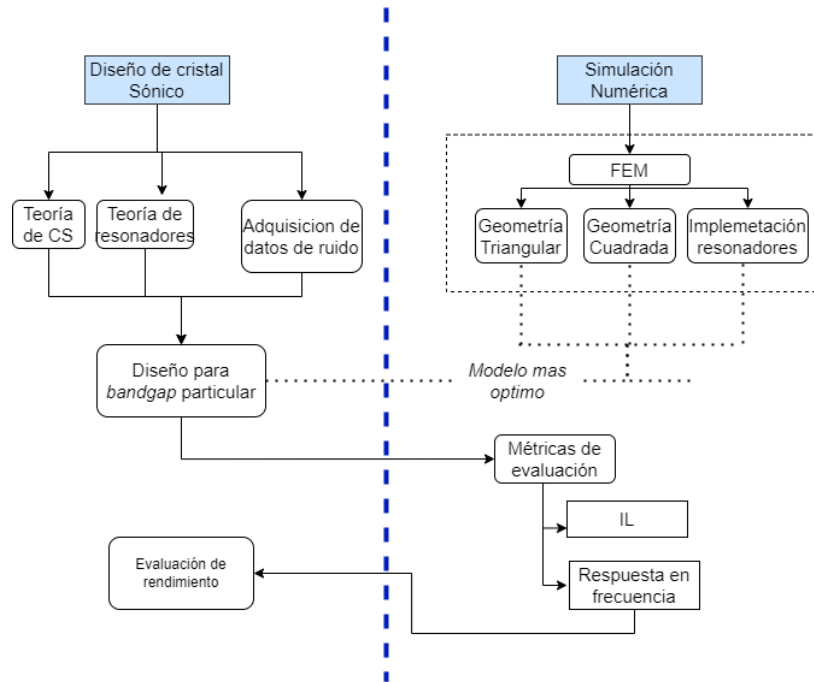


Figura 1 – Metodología para el desarrollo de la investigación

El trabajo se ha dividido en dos etapas, en la primera etapa, se parte de la apropiación y estudio de la teoría concerniente a cristales sónicos y su aplicación con la estrategia de resonadores de Helmholtz en diferentes ámbitos de la ingeniería, de forma que se puedan usar como una estrategia de control de ruido. A su vez, se plantea el diseño inicial de un cristal sónico para cierto rango frecuencial en específico, para su posterior estudio en la siguiente etapa.

La segunda etapa consiste en el análisis de la interacción diferentes modelos de cristales sónicos con la propagación de ondas sonoras, variando tamaños de cada celda y la separación entre planos, así como la influencia de implementar resonadores de Helmholtz. Para esta etapa, se hizo uso del método de simulación FEM por su capacidad computacional para resolver problemas de propagación acústica en geometrías complejas. Cabe aclarar que, para cada uno de los casos de estudio, se evaluaron ciertas métricas de evaluación en donde se determina la viabilidad de estos para su propósito.



Figura 2 –Biohabitat Tacuara en Medellín Colombia.

2.2. Teoría de CS

Los parámetros de diseño de una barrera acústica basada en CS son los siguientes:

- **Frecuencia de Bragg:** es la frecuencia a la cual esta sintonizada el arreglo de dispersores y a su vez, define el ancho de banda funcional. La ley de Bragg estipula que las ondas incidentes en una estructura periódica presentan interferencias constructivas y destructivas dependiendo del ángulo de incidencia y para longitudes de onda $\lambda \leq 2d$, en donde d es el parámetro de red.

$$F_{bragg} = \frac{c}{2d} \quad (1)$$

En donde c es la velocidad de sonido en el aire. Cabe aclarar que esta ecuación se toma para incidencias perpendiculares de la onda de presión sonora sobre la barrera acústica.

- **Factor de llenado:** el factor de llenado, o filling factor, corresponde a la relación entre área ocupada por el arreglo y el área desocupada, estrategias como aumentar el diámetro de los dispersores, o colocarlos más cerca uno del otro ayudan a aumentar el factor de llenado.

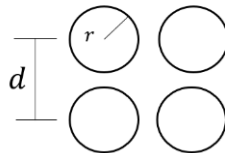


Figura 3 – Factor de llenado red cuadrada.

$$ff_{\square} = \frac{\pi r^2}{d^2} \quad (2)$$

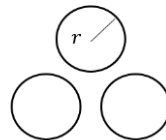
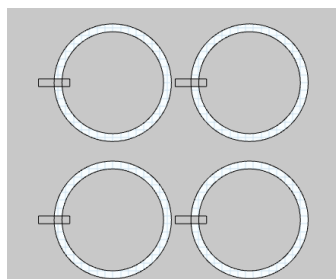


Figura 4 – Factor de llenado red triangular.

$$ff_{\Delta} = \frac{2\pi r^2}{d^2\sqrt{3}} \quad (3)$$

- **Resonadores de Helmholtz:** otra de las estrategias utilizadas para reforzar la atenuación de ciertas frecuencias específicas, ha sido la implementación de resonadores de Helmholtz en los cilindros.



- Figura 5 – Resonadores de Helmholtz realizado en FEM.

Para ello, se hace uso de la ecuación de Helmholtz.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_0 L_e}} \quad (4)$$

En donde S corresponde al área de abertura $S = \pi r^2$, V_0 es el volumen de la cavidad y L_e es el largo efectivo del cuello, el cual presenta un factor de corrección de 1.4 veces el radio, de forma que $L = L + 1.4r$.

2.3. Modelado en CAD

Se ha realizado el diseño de una estrategia de control de ruido basada en geometrías periódicas como se muestra en la Figura 6.

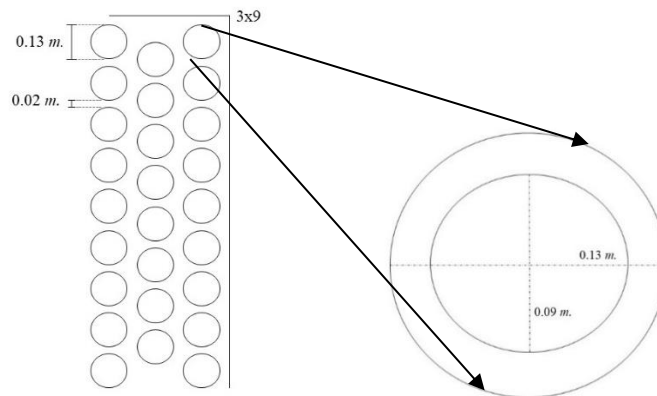


Figura 6 –Medidas del diseño de barrera acústica vista de planta con 0.13 m de diámetro exterior y 0.09 m de diámetro interior.

Cada una de estas medidas corresponde a las medidas usuales de la guadua *agustifolia*, en la que se basa el estudio de esta estrategia de control de ruido.

2.4. Simulaciones en FEM

Las características que se han empleado para el procesado en FEM son:

- ✓ Dimensión espacial y simetría del problema: 2D.
- ✓ Tipo de problema físico: presión acústica, dominio de la frecuencia: en este módulo se analiza el comportamiento de la presión acústica. Problema de radiación.
- ✓ Tipo de estudio acústico: dominio de la frecuencia.
- ✓ Condiciones iniciales: fuente monopolar con presión acústica de 1 [Pa] en la fuente de excitación.
- ✓ Condiciones de contorno. Dominio: condición de radiación de onda plana. Estructura de la barrera acústica: condición de superficie rígida.

FEM resuelve la ecuación de onda dependiente del tiempo conocida como la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (5)$$

donde $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ para el caso de un problema 3D, $[Pa]$ es la presión acústica, $k = \frac{w}{c}$ el número de onda, $w = 2\pi f$ la frecuencia angular, $f[Hz]$ la frecuencia y c [m/s] la velocidad de propagación acústica del medio.

✓ Tamaño de malla:

$$f_{max} = \frac{c}{8 \Delta x} \rightarrow \Delta x = \frac{344}{8(500)} \quad (6)$$

En la Figura 7, se puede observar un ejemplo de la simulación acústica del nivel de presión para una frecuencia de 500 Hz en FEM, en una primera parte se observa la presión incidente y un cambio en el campo acústico debido a la interferencia de la estructura, logrando una atenuación en el nivel de presión sonora resultante. Las simulaciones realizadas correspondieron a redes cuadradas y triangulares, de diferentes niveles de profundidad, de forma que se pudiera elegir la barrera acústica óptima para la aplicación.

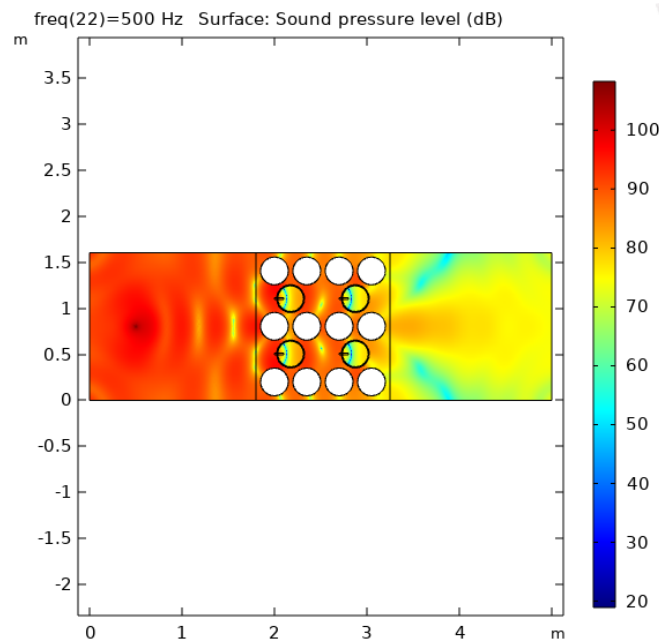


Figura 7 – Ejemplo de simulación de nivel de presión sonora usando FEM para 500 Hz

3. ANALISIS DE RESULTADOS

Para efectos comparativos, se plantea el diseño de diferentes barreras acústicas sintonizadas a la misma frecuencia (80 a 500 Hz) y sin alterar el parámetro de red. Se ha alternado la distribución geométrica de los dispersores, así como el factor de llenado en cada caso y se ha evaluado los efectos de estos parámetros en la pérdida por inserción. Finalmente, se ha propuesto un diseño de barrera acústica en geometría triangular que permita atenuar de manera efectiva el rango frecuencial cercano a 500 Hz, utilizando las medidas usuales de la guadua.

3.1. Geometría Cuadrada

Se partió del análisis de las métricas de evaluación al diseñar un arreglo de dispersores cuya distribución obedeciera a una geometría cuadrada, como se puede ver en la Figura 8.

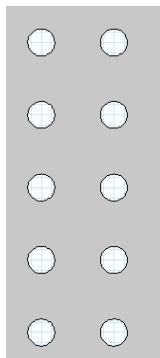


Figura 8 – Red de dispersores con geometría cuadrada vista de planta.

Para este diseño se han usado los parámetros de diseño mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2 – valores de Parámetros de diseño del CS red cuadrada.

Parámetro	Valor
Diámetro	13 cm
Parámetro de red	34.3 cm
Factor de llenado	0.11
Frecuencia de Bragg	500 Hz

Se ha realizado la simulación con el doble del radio para los dispersores, obteniendo un factor de llenado de 0.45 y los resultados que se muestran en la Figura 9.

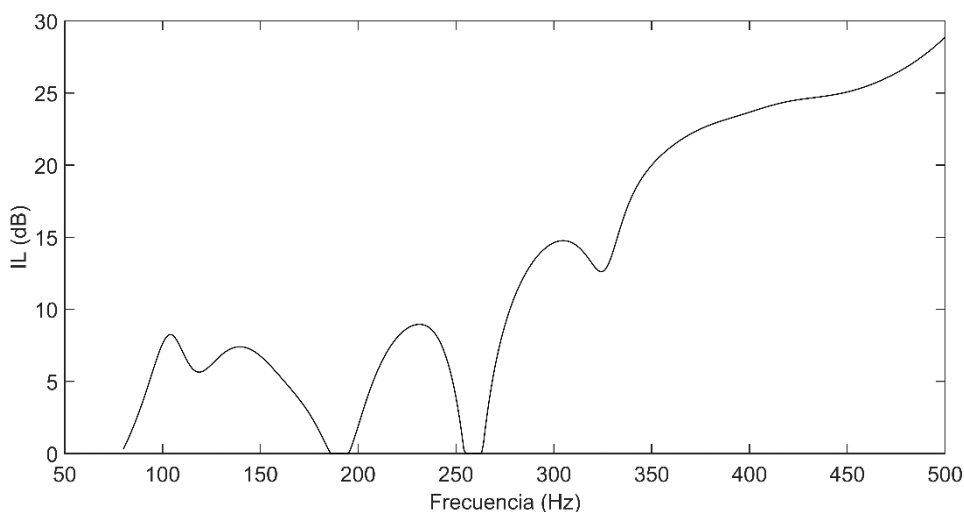


Figura 9 – Pérdida por inserción para barrera acústica geometría cuadrada.

3.2. Geometría Triangular

Luego, se ha planteado el estudio de la barrera acústica con dispersores situados siguiendo una geometría triangular y verificar si constituye una mejora a los anteriores resultados obtenidos. A continuación, se muestran los resultados de evaluar la pérdida por inserción del arreglo de dispersores con geometría triangular.

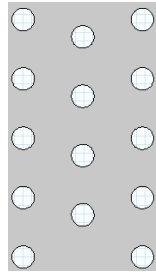


Figura 10 – Red de dispersores con geometría triangular vista de planta.

Para este diseño se han usado los parámetros de diseño mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3 – Parámetros de diseño del CS red triangular.

Parámetro	Valor
Diámetro	0.13 m
Parámetro de red	0.343 m
Factor de llenado	0.13
Frecuencia de Bragg	500 Hz

Para efectos comparativos, se ha planteado realizar de nuevo la simulación con el doble del radio, aumentando el factor de llenado a 0.52 y verificar los resultados obtenidos (ver Figura 11).

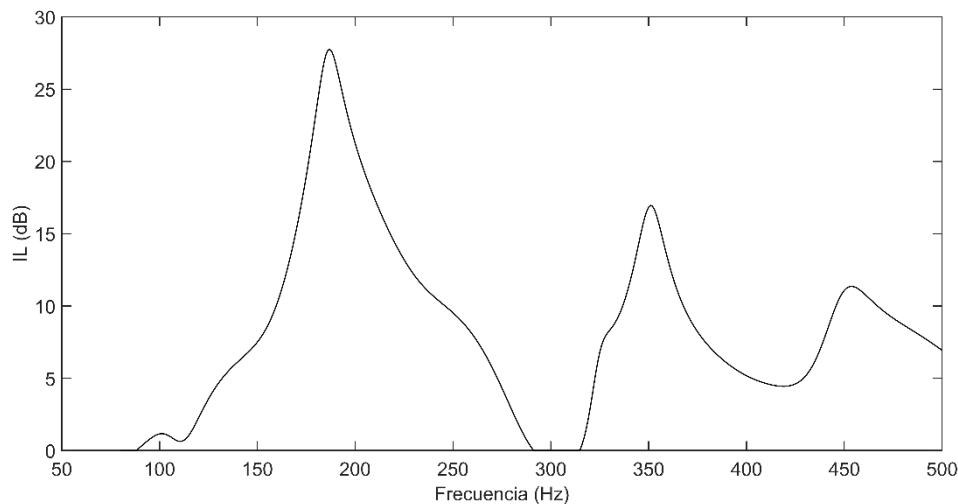


Figura 11 – Pérdida por inserción para barrera acústica geometría triangular.

Para este caso, se tienen atenuaciones de por lo menos 8 dB en ciertas frecuencias específicas, sin embargo, en general los niveles de atenuación son considerablemente altos. Para 200 Hz, se tienen atenuaciones de hasta 24 dB. Se puede concluir que aumentar el factor de llenado influye directamente los niveles de atenuación y aumenta el ancho de banda funcional de la barrera acústica.

3.3. Implementación resonadores

De acuerdo a las configuraciones anteriores se han realizado distintas configuraciones con resonadores para la geometría triangular, se implementaron dos resonadores con los siguientes parámetros:

- Resonador 1
 - Frecuencia: 200 Hz
 - Diámetro abertura: 0.02 m
 - Cuello: 0.02 m
 - Radio: 0.12 m

- Resonador 2
 - Frecuencia: 150 Hz
 - Diámetro abertura: 0.01m
 - Cuello: 0.02m
 - Radio: 0.12 m

Los resultados expuestos en la siguiente Figura muestran todas las configuraciones que se le han realizado a la geometría triangular.

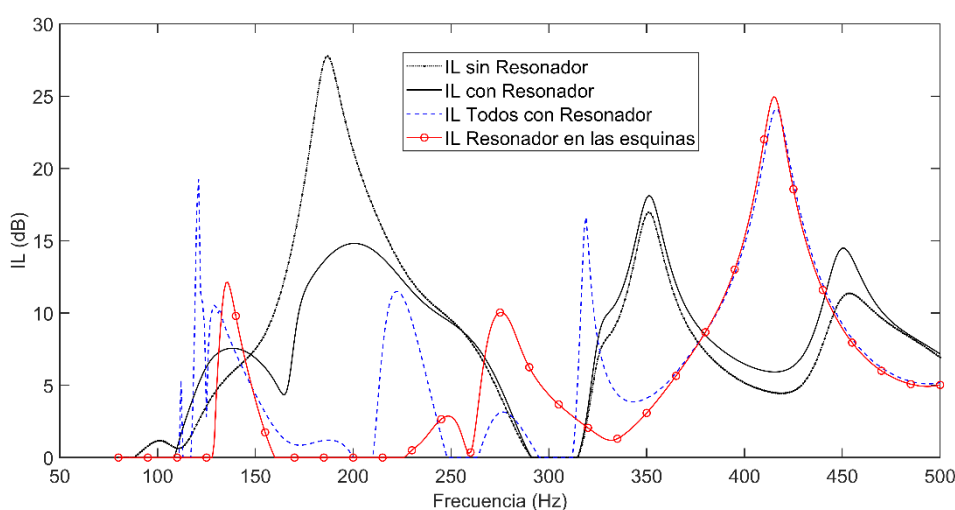


Figura 12 – Pérdida por inserción simulados para las diferentes configuraciones de las barreras acústicas.

En la Figura 12 se puede observar que el comportamiento de la configuración triangular sin resonadores tiene mayor atenuación en las frecuencias de interés, motivo por el cual se utilizará para la construcción del prototipo en guadua. Se puede observar que la configuración con resonadores en las esquinas presenta una mayor atenuación en frecuencias medias-bajas.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el estudio comparativo, mediante la pérdida por inserción, de varias configuraciones para una barrera acústica basada en dispersores ubicados en una red periódica, así como el refuerzo de la barrera usando resonadores de Helmholtz mediante el uso del método de elementos finitos. En general, los resultados obtenidos denotan que la estrategia de control de ruido funciona de manera correcta, presentando niveles de atenuación de hasta 25 dB en el rango frecuencial para el que fue diseñado. Existe una relación directa entre la distribución de la red de dispersores y los niveles de atenuación presentados, siendo la geometría triangular la que permite niveles más altos de pérdida por inserción logrando homogeneidad en la respuesta en frecuencia a lo largo de la barrera acústica.

A partir de los resultados obtenidos de este estudio, los datos numéricos se utilizarán para la futura construcción de una barrera acústica en guadua.

Se puede concluir que la implementación de resonadores de Helmholtz ayuda a aumentar el nivel de pérdida por inserción en frecuencias puntuales, sin embargo, estos niveles de atenuación

pueden llegar a ser mucho mayores que la pérdida debido a la interacción con el CS, por lo que se tiene una respuesta más irregular, como la que se observa en la Figura 12.

Por otra parte, las simulaciones numéricas son una buena herramienta para predecir el comportamiento del IL de las barreras acústicas, facilitando el diseño preliminar de la futura construcción.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo en el proceso de investigación a la Universidad de San Buenaventura sede Medellín, la empresa Biohabitat Tacuara, Colombia y la colaboración en métodos numéricos de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

REFERENCIAS

- [1] Degan, G.A. Acoustic Barriers: Performance and experimental measurements. 34 *Tecnia Acústica*, Bilbao 2003..
- [2] Cancino, E. D. O.; *Evaluación de la pérdida de inserción de una barrera acústica aplicada a un proyecto lineal*, Universidad austral de Chile, Valdivia, 2002.
- [3] Sergio Castiñeira-Ibañez, Constanza Rubio, Juan Vicente Sánchez-Pérez.; *Environmental noise control during its transmission phase to protect buildings. Design model for acoustic barriers based on arrays of isolated scatterers*, *Building and Environment*, Volume 93, Part 2, 2015, Pages 179-185.
- [4] Fredianelli, L.; Del Pizzo, L.G.; Licitra, G. Recent Developments in Sonic Crystals as Barriers for Road Traffic Noise Mitigation. *Environments* **2019**, 6, 14.
- [5] David Ramirez Solana.; Analysis of the interaction of helmholtz resonators in periodic acoustic metamaterials depending on its orientation with the acoustic source, *Internoise* , 2021.
- [6] Gulia P, Gupta A. Enhancing the sound transmission loss through acoustic double panel using sonic crystal and porous material. *J Acoust Soc Am*. 2018 Sep;144(3):1435. doi: 10.1121/1.5054296.
- [7] Lagarrigue C, Groby JP, Tournat V. Sustainable sonic crystal made of resonating bamboo rods. *J Acoust Soc Am*. 2013 Jan;133(1):247-54.