



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

Evaluación de la dispersión sonora en metadifusores mediante simulación
en consol.

AUTOR

Cristian David Navarro Torres

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**EVALUACIÓN DE LA DISPERSIÓN SONORA EN METADIFUSORES
MEDIANTE SIMULACIÓN EN COMSOL**

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor guía

M.Sc. Daniel Alejandro Nuñez Solano

Autor

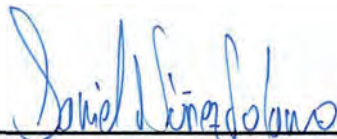
Cristian David Navarro Torres

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido el trabajo, evaluación de la dispersión sonora en metadifusores mediante simulación en Comsol, a través de reuniones periódicas con el estudiante Cristian David Navarro Torres, en el semestre 202020, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Daniel Alejandro Nuñez Solano

Máster en Ingeniería Acústica

CI: 1716430911

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

“Declaro haber revisado este trabajo, evaluación de la dispersión sonora en metadifusores mediante simulación en Comsol, del estudiante Cristian David Navarro Torres, en el semestre 202020, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación”.



Virginia Puyana Romero

Dottorato di Ricerca in Rappresentazione, Tutela e Sicurezza dell' Ambiente e
delle Strutture e Governo del Territorio

CC 1758988354

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'C' followed by several loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Cristian David Navarro Torres

CI: 1723845309

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la vida y la carrera que me permitió formarme académicamente mediante el apoyo de mis padres en todas las instancias, junto a mis hermanos quienes han contribuido de distintas maneras a lo largo de mi carrera. A Celeste mi novia por el apoyo en los momentos difíciles. Además, mi gratitud para los docentes que formaron parte de este trabajo. Y a cada uno de los docentes y compañeros que me acompañaron durante todo este tiempo.

RESUMEN

El siguiente trabajo se realizó en busca de los coeficientes de dispersión y absorción sonora en metamateriales basados en el modelo de residuo cuadrático y su posterior análisis ya que son empleados en la acústica de salas para generar difusión sonora en un recinto. Mediante el uso de la herramienta de simulación de fenómenos físicos COMSOL Multiphysics se pudo generar predicciones necesarias y se realizó una validación de los modelos de los metadifusores con los resultados del modelo de un panel sencillo como una pared plana. Además, se realizó una comparación entre los resultados del metadifusor con un difusor QRD ambos diseñados para trabajar en 500 Hz.

Para obtener los resultados se utilizó el método de elementos finitos FEM que define el campo sonoro al interior de la geometría de la PML. Los resultados se presentan gráficamente para cada modelo; entre ellos están la difusión, impedancia, el coeficiente de absorción, coeficiente de reflexión y coeficiente de dispersión sonora. A partir de los resultados se puede llegar a la conclusión de que utilizar un metadifusor QR es beneficioso, ya que refleja el sonido de manera dispersa evitando reflexiones especulares en frecuencias bajas mejor que un difusor QRD, que si presenta reflexiones especulares. Además, su estructura tiene un espesor inferior al de los difusores tradicionales otorgándole una razón para seleccionarlos en el uso de paneles en acústica de salas, ya que se puede destinar menos espacio al situarlo sobre una pared de cualquier recinto en el cual se busque un sonido disperso y difuso.

ABSTRACT

The following work was carried out in search of the sound dispersion and absorption coefficients in metamaterials based in the quadratic residue model and their subsequent analysis, since they are used in room acoustics to generate sound diffusion in a room. Using the COMSOL Multiphysics physical phenomena simulation tool, it was possible to generate the necessary predictions, and validation of the metadiffusers models was performed with the results of a simple panel model such as a flat wall. Also, a comparison was made between the results of the metadiffuser with a QRD diffuser, both designed to work at 500 Hz.

To obtain the results we use the FEM finite element method which defines the sound field inside the PML geometry. The results are presented graphically for each model, among them are the diffusion, impedance, absorption coefficient, reflection coefficient, and sound dispersion coefficient. With them, it can be identified that using a QR metadiffuser is beneficial, since it reflects the sound in a dispersed way avoiding specular reflections in low frequencies, better than a QRD diffuser, which presents specular reflections: Also, its structure has a thickness lower than that of the traditional diffusers giving you a reason to select them when selecting the type of panel in rooms acoustics, since you can allocate less space when placing it on a wall of any room where you want a dispersed and diffuse sound.

INDICE

1.	Introducción	1
1.1.	Antecedentes	1
1.2.	Marco referencial	4
1.3.	Hipótesis:	5
1.4.	Alcance:.....	5
1.5.	Justificación:.....	5
1.6.	Objetivos	6
1.6.1.	Objetivo general	6
1.6.2.	Objetivos específicos.....	6
2.	Marco teórico.....	6
2.1.	Propagación sonora.....	7
2.1.1.	Ecuación de onda	7
2.1.2.	Condiciones iniciales	8
2.1.3.	Condiciones de frontera.....	8
2.1.4.	Rígidas	8
2.1.5.	Capa perfectamente adaptada PML	8
2.1.6.	Solución de la ecuación onda	8
2.1.7.	Aceleración de partícula	11
2.1.8.	Impedancia (Z), factor reflexión (R) y absorción (α).....	11
2.2.	Acústica de salas	13
2.2.1.	Reflexión	13
2.2.2.	Especulares.....	14
2.2.3.	Dispersión	14
2.2.4.	Coefficiente de dispersión.....	14
2.2.5.	Coefficiente de difusión.	15
2.2.6.	Difusores	15
2.2.7.	Resonador de Helmholtz	18
2.2.8.	Metamateriales	20
2.2.9.	Metadifusores	20
2.3.	Acústica computacional	21
2.3.1.	Métodos numéricos	22

2.3.2.	FEM.....	22
2.3.3.	Discretización	22
2.3.4.	Geometría	22
2.3.5.	Física.....	23
2.3.6.	Mallado.....	23
2.3.7.	Estudio de convergencia	23
3.	Metodología.....	24
3.1.	Proceso para simulación	24
3.1.1.	Procesos globales de diseño y estudios	24
3.1.2.	Diseño de geometrías.....	25
3.1.3.	Cálculos físicos.....	25
3.1.4.	Presión acústica, dominio de la frecuencia	26
3.1.5.	Mallado.....	28
3.1.6.	Cálculo de los resultados.....	29
3.1.7.	Definición de los gráficos de los resultados	30
3.2.	Diseño de superficies reflectantes	30
3.2.1.	Pared reflectante (plana)	31
3.2.2.	Policilíndrico	32
3.2.3.	QRD unidimensional.....	33
3.2.4.	Metadifusor QR	34
3.2.5.	Metadifusor de gran ancho de banda	37
4.	Análisis de resultados	39
4.1.	Pared reflectante (plana)	39
4.1.1.	Patrón polar	42
4.1.2.	Impedancia.....	43
4.1.3.	Factor de reflexión	44
4.2.	Difusor policilíndrico.....	44
4.2.1.	Patrón polar	46
4.2.2.	Impedancia.....	47
4.2.3.	Factor de reflexión	47
4.3.	Difusor QRD unidimensional	48
4.3.1.	Patrón polar	50

4.3.2.	Impedancia.....	51
4.3.3.	Factor de absorción, reflexión y dispersión.....	52
4.4.	Metadifusor QR.....	53
4.4.1.	Patrón polar.....	54
4.4.2.	Impedancia.....	55
4.4.3.	Factor de absorción, reflexión y dispersión.....	56
4.5.	Metadifusor QR de gran ancho de banda.....	57
4.5.1.	Patrón polar.....	62
4.5.2.	Impedancia.....	63
4.5.3.	Factor de absorción, reflexión y dispersión.....	64
5.	Comparación de resultados.....	65
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	67
6.1.	Conclusiones.....	67
6.2.	Recomendaciones.....	69
	Referencias.....	71

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La difusión y absorción de ondas acústicas pueden mejorar el acondicionamiento de recintos destinados a la reproducción de música o grabación de sonido. Gracias a la implementación de metamateriales en el diseño, fabricación y acondicionamiento de salas que requieren un control de las ondas acústicas en su interior, se puede reducir el volumen que ocupan los dispositivos para la difusión y absorción del sonido. Día a día se aplican nuevos experimentos al estudio de fenómenos acústicos. Esto se evidencia a través de la descripción y revisión de la literatura académica en la que se presentan algunos de los trabajos realizados sobre las características acústicas de los metamateriales.

El fenómeno del eco flotante es uno de los problemas más comunes en recintos, donde se requiere que el sonido sea eficiente. Por ejemplo, salas de grabación, mezcla, teatros, auditorios, entre otros. Cox et al. (2009) mencionan que para el diseño de auditorios y su acondicionamiento, se puede utilizar la difusión acústica como solución para dicho problema. También se puede usar material absorbente en las paredes de conflicto, en caso de que la cantidad de energía acústica deba reducirse. Caso contrario, la mejor solución son los difusores que mantienen la energía acústica en la sala.

Los metamateriales acústicos son estructuras compuestas de materiales (resonadores, por ejemplo) en una distribución periódica. Dichas estructuras comprenden diferentes densidades de masa y rigidez en la estructura de sus elementos (Gan W. (2018)). Se debe tomar en cuenta que la absorción de las ondas incidentes que reciben en la superficie y las ranuras que forman parte del diseño de los metamateriales acústicos son las encargadas de condicionar la respuesta que tiene el panel y por ende su capacidad para disipar la energía.

Doutres et al. (2010) plantean la evaluación de las propiedades acústicas y no acústicas de materiales, a partir de la utilización de un tubo de impedancia, acondicionado de tal manera que pueda ser usado con tres micrófonos de alta sensibilidad y que tenga resultados iguales o aún más eficientes que con un

sistema de cuatro micrófonos. El principio de funcionamiento de este sistema se basa en la inserción de una onda sonora al interior del tubo. Con los micrófonos se obtienen los niveles de presión sonora. La función de transferencia permite caracterizar la absorción que poseen distintos materiales que son insertados en el tubo, ya sean porosos o no. El procedimiento utilizado por Doutres et al. (2010) no es de gran complejidad. Consiste en la medición directa de la porosidad abierta del material y en una medición en el tubo de impedancia donde la muestra se apoya en una terminación dura. Además, Doutres et al. (2010), comparan los resultados de simulaciones del coeficiente de absorción sonora en computadora con los resultados obtenidos de métodos directos e indirectos. Para realizar dicha comparación Doutres et al. seleccionaron materiales con características acústicas que son implementados en las industrias tanto de transporte, como de la construcción. El fin de esta investigación realizada por Doutres et al. es encontrar un material eficiente, que se adapte a las distintas aplicaciones de acondicionamiento de salas. Siguiendo esta misma línea investigativa se han realizado distintos estudios, como los realizados por Jiménez. et al. (2017a, 2017b, 2017c), Doutes et al. (2010), Groby et al (2009), Redondo et al. (2013), entre otros. Dichos trabajos describen el comportamiento acústico de varios elementos, utilizados en la acústica arquitectónica. Metamateriales es el nombre que toman los elementos creados por los autores mencionados, debido a que su estructura proviene del uso de varios elementos que forman un dispositivo que funciona como uno solo. Las investigaciones sobre este tipo de materiales persiguen encontrar un solo elemento en estado natural que posea características favorables para la difusión y/o absorción de las ondas sonoras en un recinto.

Jiménez et al. (2017a) han llevado a cabo un estudio sobre la fabricación de difusores mediante metamateriales para tratar de controlar el sonido en un rango de frecuencias específicas. El trabajo hace hincapié sobre todo en manejar adecuadamente bajas frecuencias que por su longitud de onda presentan inconvenientes en la mayoría de los casos. Como ya se manifestó, dependiendo de la frecuencia, los mecanismos para acabar con dicha problemática pueden llegar a ocupar un gran espacio en un recinto. Con el fin de hallar una solución

práctica, que optimice el espacio que requiere un difusor de esas características, optaron por el uso de metamateriales, en este caso puntual compuestos por resonadores con hendidura. Los resonadores son ubicados de tal manera que no atenúen directamente la señal, y manteniendo una superficie en la cual pueda reflejarse el sonido consiguiendo así que se comporte como difusor. Es conocido que entre los difusores están los de residuo cuadrático, raíz primitiva o policilíndrico. Jimenez et al. utilizan los dos primeros modelos para su investigación generando los metadifusores difusores de raíz primitiva y residuo cuadrático, los cuales presentan una reducción del valor de la superficie que se requiere en un recinto. Mediante un proceso de optimización, se realizaron los cálculos correspondientes, para dar paso al diseño de prototipos de los metadifusores. En dichos cálculos se definió la correcta distribución de cada una de las distancias que existe entre los elementos que lo componen. En concordancia con el prototipo, se evidencia que fueron situados de forma simétrica. Entre los resultados se muestra que se puede llegar a diseñar difusores de menor dimensión, otorgando así una optimización para cualquiera de los diferentes usos o aplicaciones.

En otra publicación Jiménez et al (2017c), plantean que se pueden desarrollar no solo difusores con metamateriales, sino a su vez paneles que permiten la absorción de frecuencias bajas. A diferencia de los paneles tradicionales que utilizan material poroso y fibras, estos paneles utilizan metamateriales fabricados mediante impresión 3D. En otra publicación del mismo autor Jiménez et al (2017b), condensan la información presentada anteriormente, y la sustenta con más ejemplos de materiales que son usados para formar metamateriales, entre ellos materiales metaporosos, membranas, placas, paneles compuestos. Todos estos ejemplos buscan tratar sobre todo con baja frecuencia, mientras optimizan el espacio.

Wang et al. (2012) utilizan un procedimiento similar al utilizado por Jiménez et al. (2017a) en torno al uso de resonadores de Hemholtz en cascada, abarcando un mayor rango de las frecuencias en las que se desea atenuar. Wang et al. desarrollaron el estudio de la propagación de la onda que existiría al interior de

los resonadores mediante el método de la Matriz de transferencia y la teoría de la onda de Bloch, Bradley (1991).

Lagarrigue et al. (2013) realizan un estudio donde diseñan un material poroso, capaz de atenuar mayor ancho de banda de frecuencias. Dicho material tiene un elevado del coeficiente de absorción. Para ello utilizaron resonadores incrustados y distribuidos periódicamente en la capa del material poroso, dando como resultado un material al que denominan “material compuesto”.

Groby et al. (2009) manejaron un método diferente, llamado multipolar. Con este método diseñaron una placa porosa de marco rígido, que tenía incrustaciones distribuidas periódicamente. Los resultados determinaron al realizar el análisis modal, que el sistema es inducido a la excitación de sus modos propios, incrementando así el coeficiente de absorción.

Redondo et al. (2016) plantean una solución al problema con el tratamiento acústico de bajas frecuencias. Dicha solución es denominada “cristales sonic” o “cristales sónicos”. Su trabajo intenta reducir el grosor de los difusores que contienen dispersores cilíndricos. Además, el documento detalla que sus resultados pueden servir para la toma de decisiones en cuanto al uso y optimización de estos dispositivos.

En el entorno del campo acústico se está intentando difundir el concepto de metamateriales acústicos, así como su funcionamiento, la importancia de su diseño y su correcta implementación. El presente trabajo, espera contribuir con información que derive a nuevas investigaciones, que con lleven a la implementación de metadifusores en acústica de salas.

1.2. Marco referencial

El Ecuador es un país que está en vías de desarrollo en muchas áreas de investigación. En torno al tema de acústica, aún se debe realizar un arduo trabajo que conlleve al incremento de información y difusión de la misma entre los ciudadanos. Cabe recalcar que el país cuenta con recursos naturales que podrían servir para la investigación y desarrollo de paneles acústicos, ya sea para absorción o difusión de ondas sonoras en distintos ámbitos, como teatros, salas de grabación, reproducción musical entre otros.

Por otro lado, debido a la falta de información muchas personas incumplen con leyes y estándares al momento de construir cualquier tipo de edificación, uso de espacio público y todo aquello que esté relacionado con el ruido en el ambiente que puede afectar a la salud de los ciudadanos.

1.3. Hipótesis:

La simulación de metadifusores diseñados por Jiménez et al. (2017a) en Comsol, permite expresar de forma gráfica los coeficientes de dispersión sonora, reflexión y absorción. Estos dispositivos pueden estar configurados para que la energía incidente sea difusa y actué en una frecuencia con resultados óptimos, al igual que en un rango superior a ellas. Además, se plantea el análisis del coeficiente de absorción debido a que en la estructura de dichos metadifusores se encuentran presentes resonadores de Helmholtz y pueden disipar parte de la energía.

1.4. Alcance:

El presente trabajo de investigación pretende obtener el coeficiente de dispersión de forma predictiva de metadifusores mediante el uso del software de simulaciones de fenómenos físicos Comsol, con el fin de identificar la viabilidad de producción de metamateriales para implementarlos en acústica de salas.

1.5. Justificación:

Para trabajar con ondas graves o baja frecuencia, se debe tomar en cuenta la longitud de onda. La investigación permitirá detallar de forma predictiva el comportamiento de los metadifusores en frecuencias bajas. Por ende, una de las formas de saber si el metadifusor actúa como difusor es determinar el coeficiente de dispersión junto con el análisis de los patrones de radiación en campo lejano.

Por otro lado, se busca constatar mediante simulación el comportamiento de la estructura de los metadifusores al evaluar su coeficiente de absorción. Para evitar errores en las simulaciones es prudente comparar un modelo base como

el de una pared plana para comparar sus resultados de difusión y dispersión sonora con el comportamiento teórico y así tener información válida.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Obtener los coeficientes de dispersión y absorción sonora de los metadifusores basados en el modelo de residuo cuadrático diseñados por Jiménez et al. (2017a) mediante predicciones en Comsol para realizar la valoración de los beneficios en acústica de salas.

1.6.2. Objetivos específicos

Recrear la geometría de los metadifusores basados en el modelo de residuo cuadrático creados por Jiménez et al. (2017a) mediante el software de simulación de fenómenos físicos Comsol, para someterlos a pruebas predictivas de las cuales se obtenga la impedancia de la superficie y dispersión de la energía sonora.

Realizar un modelo de simulación de una pared plana para contrastar los resultados de difusión y dispersión con información del comportamiento conocido mediante una comparación entre la predicción y la teoría.

Realizar una comparación entre los resultados del metadifusor QR y un difusor QRD unidimensional los cuales están diseñados para trabajar en 500 Hz, mediante un cuadro comparativo, para determinar ventajas y desventajas del uso de los metadifusores.

2. Marco teórico

2.1. Propagación sonora

2.1.1. Ecuación de onda

Las ondas acústicas son fluctuaciones sinusoidales que se generan por el cambio de presión. Dicho de otra manera, pueden entenderse como el movimiento de las partículas en un medio, provocando así cambios en la presión, temperatura y densidad. El movimiento genera fricción entre ellas produciendo compresión y expansión del medio. Consecuentemente, así es como las ondas sonoras propagan información que le resulta fácil al oído humano promedio escuchar. Por ejemplo, música, habla, sonidos emitidos por objetos o animales. Una fuente sinusoidal, al interior de un recinto, genera un campo sonoro con variaciones de la presión desde cualquier punto en el que se lo posicione. Jacobsen y Juhl (2013, pp. 4 – 48) en su publicación presenta el planteamiento y desarrollo de la solución de la ecuación de onda partiendo del análisis de la ecuación lineal de Helmholtz ec.(2.1), el cual se desarrolla a continuación. Representando el movimiento de la onda sonora se plantea

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \Delta(p) = 0 \quad (2.1)$$

Considerando que el operador $\partial^2/\partial t^2$ puede ser sustituido por $-\omega^2$ para plantear la ecuación lineal ec.(2.1), se puede ver a la ecuación como

$$\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} + k^2 \hat{p} = 0 \quad (2.2)$$

Si en el caso antes mencionado tomamos en cuenta una señal externa que existe el medio estudiado, no podría ser representado con la ecuación ec.(2.1), para ello se debería utilizar la ecuación de Euler ec. (2.3) que contempla el movimiento de la onda, su representación y solución de dicho problema. A demás permite relacionar la velocidad de partícula \mathbf{u} con la presión p para introducir condiciones de frontera en el sistema.

$$\nabla p + \rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = 0 \quad (2.3)$$

En torno a la variación de una onda en el campo sonoro $e^{j\omega t}$ es factible el remplazo del operador $\partial/\partial t$ por $j\omega$, para lo cual se puede escribir la ecuación (2.3) de la siguiente manera

$$j\omega\rho\hat{\mathbf{u}} + \nabla\hat{p} = 0 \quad (2.4)$$

2.1.2. Condiciones iniciales

Las ecuaciones diferenciales ec.(2.1) y ec.(2.2) se desarrollan teóricamente mediante el uso de valores que fijan el desplazamiento y la velocidad inicial, respectivamente, llegando así a su solución. Visto desde el tiempo se fija el estado inicial del problema en el instante inicial $t = 0$. (Ramírez, 2019)

2.1.3. Condiciones de frontera

Se utilizan para fijar la interacción que tiene el medio en el que se desenvuelven las ondas con un objeto, como una pared lisa, cuerdas, ductos, paneles absorbentes, difusores, entre otros. Jacobsen y Juhl (2013) manifiestan que las condiciones de fronteras a menudo se expresan en términos de la velocidad de la partícula de donde se obtienen las condiciones como en una pared rígida.

2.1.4. Rígidas

Si, en el recinto que se propaga una onda sonora tiene en su dirección normal frente una pared rígida, entonces se toma el valor de cero para la velocidad de partícula u . Este caso se representa mediante la ecuación del movimiento de Euler ec.(2.4), donde Jacobsen y Juhl (2013) manifiestan que se puede concluir que el gradiente normal de presión toma el valor de cero en dicha superficie.

2.1.5. Capa perfectamente adaptada PML

Tomando las iniciales del nombre en inglés *Perfectly Matched Layer* se denota como *PML* se puede definir como una condición de frontera que trata de simular una terminación anecoica para estudiar la propagación de las ondas en su interior. Esta condición es útil en simulaciones debido a que permite caracterizar el aumento o disminución de la impedancia dependiendo de la posición con respecto a la de la frontera. (González, 2012)

2.1.6. Solución de la ecuación onda

Mediante el uso de métodos numéricos se determina la solución de la ecuación general de la onda

$$p = f_1(ct - x) + f_2(ct + x) \quad (2.5)$$

En la cual, f_1 y f_2 son funciones arbitrarias, el primer término $f_1(ct - x)$ describe una onda propagándose sin distorsiones ni atenuaciones, en dirección positiva del eje x y con velocidad constante c . El segundo término $f_2(ct + x)$ es otra onda de similares características, pero que se dirige en la dirección negativa del eje x como se muestra en la figura 1. (Jacobsen y Juhl. 2013)

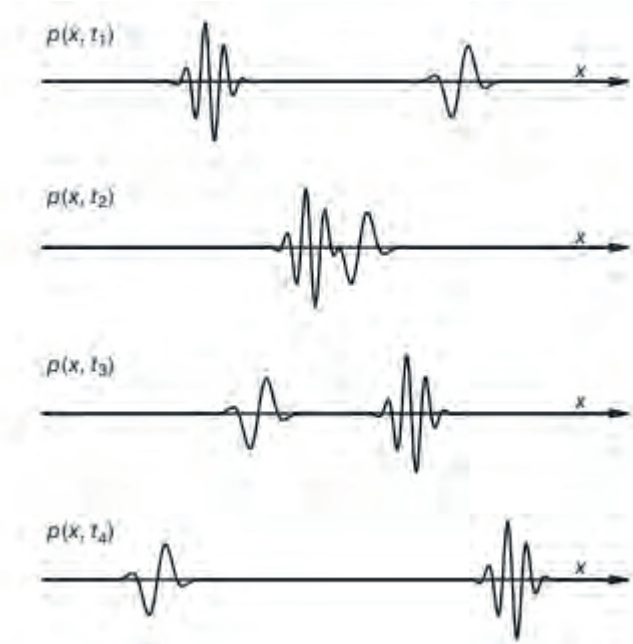


Figura 1. Representación gráfica en distintos instantes de tiempo de dos ondas planas que se mueven en dirección opuesta. Tomado de (Jacobsen y Juhl. 2013).

El movimiento generado de las partículas por ejemplo del aire en un medio por ondas sonoras, se lo conoce como presión sonora, representado en la figura 2. Se puede definir, como la diferencia de la cantidad de energía que posee el valor instantáneo de la presión total y la presión del sonido. Por lo general se realizan cálculos de presión sonora debido a que es más fácil medir las fluctuaciones de sonido, que las generadas en la densidad del medio, y en la temperatura.

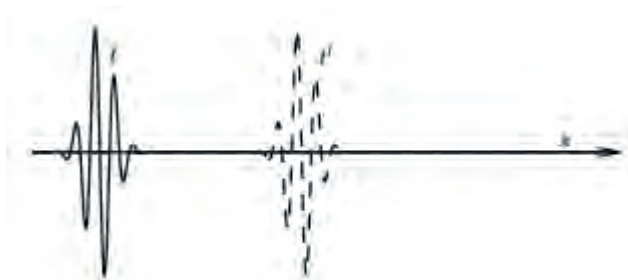


Figura 2. Ilustración de una onda plana moviéndose en el tiempo de t a t' .

$$\hat{p} = Ae^{j\omega t} = |A|e^{j\phi}e^{j\omega t} = |A|e^{j(\omega t + \phi)}j\omega\rho\hat{\mathbf{u}} + \nabla\hat{p} = 0. \text{ Tomado de (Jacobsen y Juhl. 2013)}$$

En consecuencia, siguiendo el ejemplo donde una onda plana se propaga en el medio por el eje de las x , figura 2, se puede obtener la presión resultante efectuada por la onda mediante la resolución de la siguiente ecuación.

$$p(x, t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \phi\right) = A \sin(\omega t - kx + \phi) \quad (2.6)$$

Donde $T = \lambda/c$ es el período, $\lambda = Tf = cT$ es la longitud de onda, $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ es la frecuencia angular, t es el tiempo, ϕ es la fase, c la velocidad de la onda y A el módulo de la presión sonora. (Jacobsen y Juhl. 2013)

Debido al uso de ondas sinusoidales la presión sonora ec.(2.6), está puede ser representada mediante la forma exponencial compleja

$$\hat{p} = Ae^{j\omega t} = |A|e^{j\phi}e^{j\omega t} = |A|e^{j(\omega t + \phi)} \quad (2.7)$$

Entonces, relacionando las ecuaciones ec.(2.2) y ec.(2.4) se puede representar la propagación de la ecuación de onda plana ec.(2.7) mediante notación compleja en dirección de las x da como resultado

$$\hat{p} = p_i e^{j(\omega t - kx)} \quad (2.8)$$

Tomando en cuenta la ecuación de movimiento de Euler ec (2.4) se evidencia que la velocidad de partícula es proporcional al gradiente de presión. Lo cual permite expresar a la velocidad de partícula de la propagación de una onda plana ec. (2.8) como

$$\hat{\mathbf{u}}_x = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} = \frac{k}{\omega\rho} p_i e^{j(\omega t - kx)} = \frac{p_i}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} = \frac{\hat{p}}{\rho c} \quad (2.9)$$

Tanto la presión sonora como la velocidad de partícula se encuentran en fase al referirse a la propagación de ondas planas en un medio. La relación que existe entre las dos genera la impedancia característica del medio. (Jacobsen y Juhl. 2013)

$$\hat{p} = p_i e^{j(\omega t - kx)} + p_r e^{j(\omega t + kx)} \quad (2.10)$$

Donde p_i es la onda sonora incidente que golpea en la frontera $x = 0$ y p_r es la presión de la onda reflejada.

2.1.7. Aceleración de partícula

Partiendo de la fórmula de la velocidad de la partícula se puede obtener la rapidez con que cambia de posición la partícula dando como resultado la aceleración. De forma matemática se obtiene la expresión para calcular dicho valor realizando la derivada de la velocidad. (Khan Academy, s.f)

2.1.8. Impedancia (Z), factor reflexión (R) y absorción (α)

Partiendo del concepto de la absorción sonora se puede definir a la reflexión como la energía que no es absorbida por un elemento en la propagación de la onda. El factor de reflexión denota la relación que existe entre la energía de la onda incidente y la energía que se refleja. Consecuentemente, a partir de la ec.(2.10), el campo sonoro se define como

$$\hat{p} = p_i(e^{j(\omega t - kx)} + R e^{j(\omega t + kx)}) \quad (2.11)$$

Así, la velocidad de partícula queda como

$$\hat{u}_x = \frac{p_i e^{j\omega t}}{\rho c} (-e^{jkx} + R e^{jkx}) \quad (2.12)$$

Aplicando la condición de frontera ($x = 0$), obtenemos

$$\frac{\hat{p}(0)}{-\hat{u}_x(0)} = \rho c \frac{1+R}{1-R} = Z_s \quad (2.13)$$

Donde Z_s es la impedancia de una superficie. El factor de reflexión es puede ser obtenido despejándolo de la ec. (2.13) y denotándolo como

$$R(\theta) = \frac{\frac{Z_s}{\rho c} \cos \theta - 1}{\frac{Z_s}{\rho c} \cos \theta + 1} \quad (2.14)$$

para incidencia oblicua. Y para incidencia normal

$$R = \frac{\frac{Z_s}{\rho c} - 1}{\frac{Z_s}{\rho c} + 1} \quad (2.15)$$

Marcos et al. (s.f) define al coeficiente de reflexión que también se lo conoce como factor de reflexión al cociente entre la presión sonora reflejada e incidente sobre una superficie. Möser & Barros (2009). Señalan que la impedancia es la oposición de un sistema al paso de un flujo. De forma más resumida, la

impedancia acústica es la oposición generada al flujo o movimiento de partículas de una señal a través de un medio. (Jacobsen y Juhl. 2013)

La impedancia es un parámetro muy útil para describir el amortiguamiento de un material acústico. También, algunas condiciones de frontera son más fáciles interpretar desde el punto de vista de la impedancia. La figura 3 muestra un frente de onda golpeando cierta superficie de forma oblicua, es decir, con un ángulo de incidencia θ . La onda incidente se reflejará en esta superficie con un ángulo θ y con menor energía debido a la impedancia Z de esta superficie.

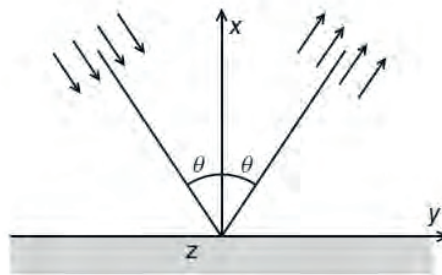


Figura 3. Representación de una onda plana incidente reflejada sobre una superficie plana. Tomado de (Jacobsen y Juhl. 2013)

La impedancia de una superficie (Z_s) permite que cierta energía que incide en la superficie se transforme en calor, mientras que el resto de la energía es reflejada. (Azcárate et al. 2000) A este proceso también se lo puede caracterizar mediante el coeficiente de absorción. En otras palabras, lo opuesto a la reflexión. El coeficiente de absorción se relaciona con el factor de reflexión mediante

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.16)$$

tal y como se puede ver en la publicación de Ortí (2015) donde menciona que si la energía reflejada es pequeña en comparación a la absorbida se la representas así. A demás Sintec. (s.f.). manifiesta que el coeficiente de absorción es la relación entre la energía absorbida con la energía incidente como se representa en la ec.(2.17) y por ende toma valores comprendidos entre uno y cero. Es decir, cuando el coeficiente de absorción tiene un valor de cero no absorbe nada. Y cuando toma el valor de uno se considerará que existe una absorción ideal.

$$\alpha = \frac{E_{Abs}}{E_{Inc}} = [0, 1] \quad (2.17)$$

2.2. Acústica de salas

Esta rama de la acústica permite generar espacios óptimos para la reproducción de música, palabra y todo lo referente al sonido. Por lo general se busca generar recintos que cumplan funciones específicas. Para salas de oratoria donde se busca llevar un mensaje claro, se debe tener en cuenta las frecuencias pertenecientes a la inteligibilidad de la voz humana. Para salas destinadas a la grabación y ejecución de música, se toman en cuenta parámetros como la reverberación, claridad y tiempo de decaimiento de la onda sonora. Otro parámetro que es esencial conocer para tomar decisiones en cuanto al acondicionamiento de un recinto, es el tiempo de reverberación. El cual es calculado basado en el campo difuso.

Acondicionar un lugar puede deberse a varios aspectos, como mitigar ciertos problemas que tienen un recinto, desde su construcción, debido a que no en todos los casos está pensado en ser usado para determinada actividad. Entre los problemas más comunes están las frecuencias de resonancia, modos propios de la sala, tiempo de reverberación incorrecto, entre otras.

Comprender el fenómeno de difusión permite caracterizar un espacio destinado a la escucha. Un campo difuso es aquel espacio donde las reflexiones de las ondas sonoras emitidas por una fuente aportan la misma intensidad sonora. Por lo tanto, en un recinto acondicionado se busca evitar las reflexiones especulares, ecos y focalizaciones mediante el uso de dispositivos llamados difusores. Estos dispositivos tienen un valor numérico que denota la cantidad de dispersión generada, en relación con la onda que incide sobre su estructura. (INASEL, s.f)

2.2.1. Reflexión

En un campo sonoro donde una onda viaja y golpea con una superficie genera reflexiones de la energía que se divide en dos segmentos mostrados en la figura 4. La onda que se propaga en el medio toma el nombre de incidente, al chocar con una superficie puede generar ondas dispersas y especulares tal y como se muestra en la figura 1. (Marcos et al. s.f)

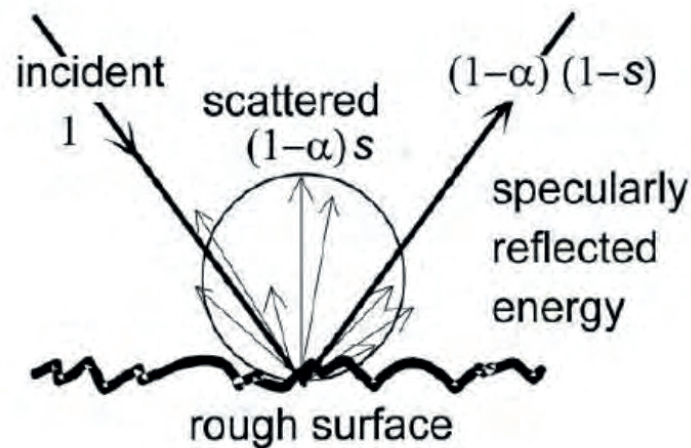


Figura 4. Representación gráfica de reflexiones difusas y especulares. Tomado de (Cox et al. 2006).

2.2.2. Especulares

Este tipo de reflexiones se dan cuando una onda incide en una superficie plana y se mueve con el mismo sentido, pero en diferente dirección. Además se caracterizan por tener menor cantidad de energía reflejada debido a que existen pérdidas por disipación que se dan en al golpear un chocar con un objeto.

2.2.3. Dispersión

2.2.4. Coeficiente de dispersión.

Se obtiene de separar la energía del sonido reflejado en reflexiones especulares y difusas. Las reflexiones especulares son aquellas que mantienen el sentido de la onda incidente y al reflejarse cambia de dirección como en una pared plana. Y las reflexiones difusas son aquellas que se distribuyen de forma dispersa o mejor distribuida a lo largo del difusor, y pueden ser caracterizadas por el coeficiente de difusión. En consecuencia, el coeficiente de dispersión se lo puede obtener de la relación entre la energía sonora reflejada no especular, es decir dispersa, y la energía total reflejada. (Cox et al. 2006; Arenas, J. 2013; Marcos et al. s.f).

$$s = \frac{E_{rs}}{E_r} = \frac{E_{rs}}{E_t - E_a} \quad (2.18)$$

También se lo puede ver como

$$s = 1 + \frac{Ers}{1-\alpha} \quad (2.19)$$

Para obtenerlo de forma práctica se necesita hacer un ensayo de la norma ISO17497-1 que determina el coeficiente de dispersión.

2.2.5. Coeficiente de difusión.

Se basa en la medición de la uniformidad que tiene la energía reflejada por una superficie no absorbente sobre la cual actúa una onda sonora incidente. Su implementación radica en modelos de predicción para contrastar la calidad de un difusor acústico al momento de distribuir la energía en todas las direcciones posibles y además se determina su funcionamiento respecto a rango de frecuencias en el cual puede trabar. Esto se lo puede ver de forma clara mediante la realización de gráficos de patrones polares en simulaciones y de forma experimental utilizando la ISO 17497-2. (Cox et al. 2006)

2.2.6. Difusores

Son dispositivos acústicos que se clasifican tradicionalmente en dos clases, policilíndricos figura 5 y de Schroeder figuras 6, 7 y 8. Los primeros son conjuntos de superficies lisas de forma convexa. El segundo tipo de difusores llamados de Schroeder se caracterizan por basar su geometría en secuencias matemáticas sacadas de la serie de Schroeder. Esta clase difusores a su vez se divide en tres tipos de diseño que trabajan en determinado rango de frecuencias que se establece dependiendo de los parámetros de diseño. (INASEL, s.f)



Figura 5. Difusor Policilíndrico. Recuperado de

<https://es.slideshare.net/inasel/acstica-bsica-difusores-8650234>

Los difusores que basan su funcionamiento en el uso de secuencias periódicas pseudoaleatorias, también conocidos en español como difusores de secuencia de longitud máxima como lo muestra en su publicación Schroeder (1975), sus siglas (MLS) corresponden a su nombre en inglés, un ejemplo de este tipo de difusores está en la figura 6. Su función se basa en que la difusión generada en su estructura es óptima para un determinado rango de frecuencias, o banda de octava. Su estructura por lo general es de materiales reflectantes como madera. Su implementación estará en función de los requerimientos de la sala que se quiere adecuar. (INASEL, s.f)



Figura 6. Difusor MSL. Recuperado de <https://es.slideshare.net/inasel/acstica-bsica-difusores-8650234>

Los difusores de residuo cuadrático, por sus siglas en inglés *Quadratic residue diffuser* (QRD), pueden ser unidimensionales y bidimensionales figuras 7 y 8. Los unidimensionales tiene por lo general una geometría rectangular, en la que se distribuyen ranuras que se encuentran extendidas de forma paralela entre sí. El ancho de las ranuras es el mismo y lo que genera la difusión es la profundidad que varía. El funcionamiento de los bidireccionales tiene como principio la optimización de la difusión de la onda incidente que llega hasta su estructura. La distribución de la energía genera una concentración máxima representada como una semiesfera y se logra con el uso de una rejilla o cuadrícula de cavidades con diferente profundidad. (INASEL, s.f)

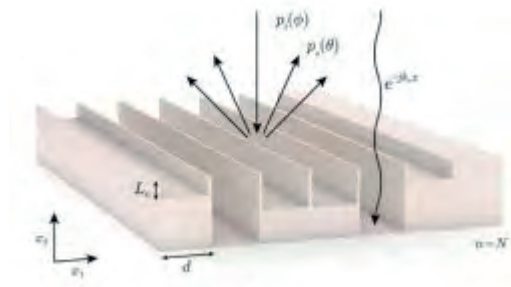


Figura 7. Difusor QRD unidimensional. (Tomado de Jiménez et al. 2017a)



Figura 8. Difusor QRD bidimensional. Tomado de (<http://castor.det.uvigo.es:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/219/TFG%20Miguel%20Rodr%C3%ADguez%20Mart%C3%ADnez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>)

Por último, están los difusores de raíz primitiva o (PRD) denominado así así por su nombre en inglés *Primitive Root Diffusor* (Figura 9). En principio su funcionamiento es similar a los difusores QRD, pero la obtención de la profundidad de cada ranura es diferente, ya que utiliza una secuencia generadora que no es simétrica en cada periodo. Además este tipo de difusores genera una reflexión especular que puede evidenciarse si se grafica el patrón polar de la radiación de energía. (INASEL, s.f)

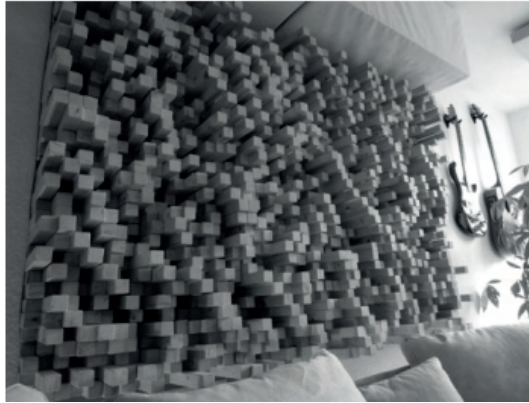


Figura 9. Difusor PRD. Recuperado de

https://www.arauacustica.com/files/publicaciones_relacionados/pdf_esp_340.pdf

f

2.2.7. Resonador de Helmholtz

Los resonadores de cavidad o de Helmholtz (figura 11) son dispositivos de absorción acústica selectiva. Estos resonadores son utilizados para remplazar paneles de fibras absorbentes en baja frecuencia, que necesitarían ocupar demasiado espacio para tener un buen rendimiento. Acústica Fácil (s.f) menciona que es común encontrar resonadores diseñados esencialmente para trabajar en frecuencias menores a 500 Hertz, como muestra la figura 10, donde puede apreciarse una gran cantidad de energía absorbida de forma selectiva en 160 Hz. Su estructura puede ser conformada por una cavidad simple o compuesta.

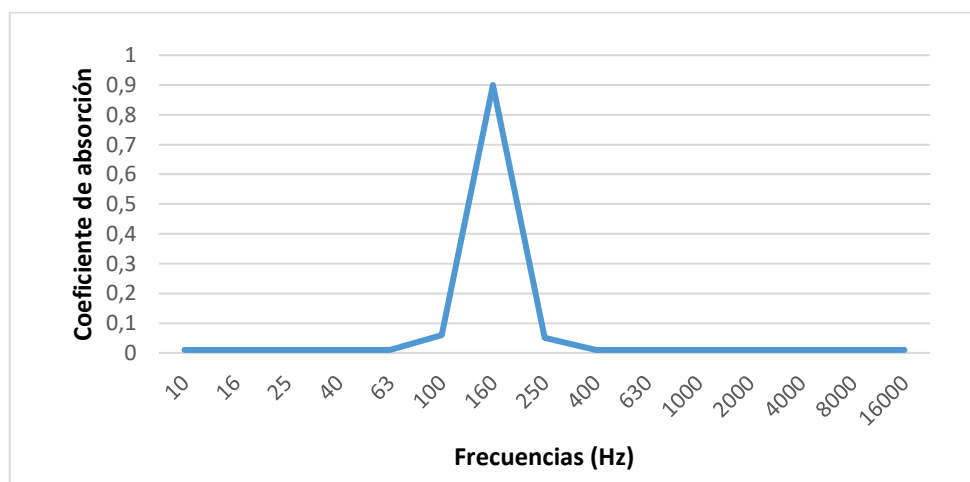


Figura 10. Coeficiente de absorción vs. frecuencia Resonador de Helmholtz diseñado para 160 Hz. Fuente (archivo del autor).

Los resonadores de cavidad simple son más eficientes y selectivos respecto a la frecuencia y cantidad de energía que se absorbe. Y se calculan sus parámetros de diseño mediante las siguientes ecuaciones.

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL'}} \quad (2.20)$$

$$L' = L + 1,6R_{eq} \quad (2.21)$$

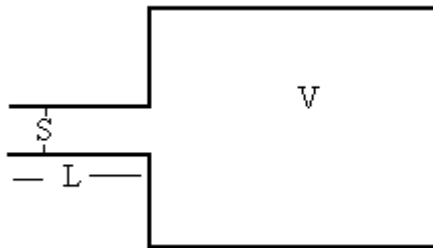


Figura 11. Estructura de un resonador de cavidad simple. Recuperado de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/resonador/resonador.htm>

El resonador de Helmholtz. (s.f.) en su publicación web presenta la figura 11, en la que se establece a S como la superficie de la sección de abertura, V el volumen del dispositivo, L la longitud del cuello de la abertura, R_{eq} radio equivalente y c la velocidad del sonido en el aire.

Los resonadores de cavidad múltiple como su nombre lo indica consisten en un panel rígido que va al frente del sistema y posee múltiples perforaciones circulares, o a su vez ranuras. Se lo puede ver también como un conjunto de resonadores simples. Para calcular sus parámetros de diseño se utiliza las siguientes ecuaciones.

$$P = \frac{S_o}{S_T} \quad (2.22)$$

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{dL'}} \quad (2.23)$$

P corresponde al porcentaje de perforación, d espesor del interior del resonador, pertenece a la capa de aire, L' profundidad de los orificios y c la velocidad del sonido en el aire.

2.2.8. Metamateriales

Gan W. (2018) define los metamateriales acústicos como estructuras compuestas de materiales (resonadores, por ejemplo) en una distribución periódica. Dichas estructuras poseen diferente densidad, masa y rigidez. Los metamateriales acústicos tendrán un coeficiente de absorción distinto en comparación a paneles tradicionales frente la incidencia de una onda sonora. Será caracterizado gracias a la combinación del número de materiales con los que se fabrique el metamaterial. Estos a su vez no presentan restricción de la cantidad de elementos utilizados.

2.2.9. Metadifusores

Son dispositivos que combinan los diseños y modelos básicos de los difusores tradicionales, con las características de los metamateriales para obtener estructuras que manejen absorción, difusión y dispersión acústica. Dichas estructuras llegan a ser sumamente delgadas en comparación con los dispositivos tradicionales que trabajan con frecuencias bajas, debido a que pueden tener grandes hendiduras generadas por las dimensiones que tienen la longitud de onda en esas frecuencias. Se logra obtener absorción y difusión simultáneamente mediante la combinación de resonadores de Helmholtz y superficies reflectantes que provocan ambos efectos. Jiménez et al. (2017a) define cuatro tipos: el primero optimizado para mejorar la dispersión en el campo difuso mediante la aplicación del diseño de un difusor de residuo cuadrática (figura 12 (a)); el segundo tipo está configurado para actuar como un difusor de raíz primitiva (figura 12 (b)); el tercer tipo basa su diseño en la absorción perfecta (figura 12(c)), y el último es el metadifusor de gran ancho de banda (figura 12 (d)). Este último prototipo tiene como objetivo ampliar el rango de frecuencias para las cuales puede trabajar el metadifusor logrando que el coeficiente de difusión sea bueno en frecuencias entre 250 y 2000 Hz.

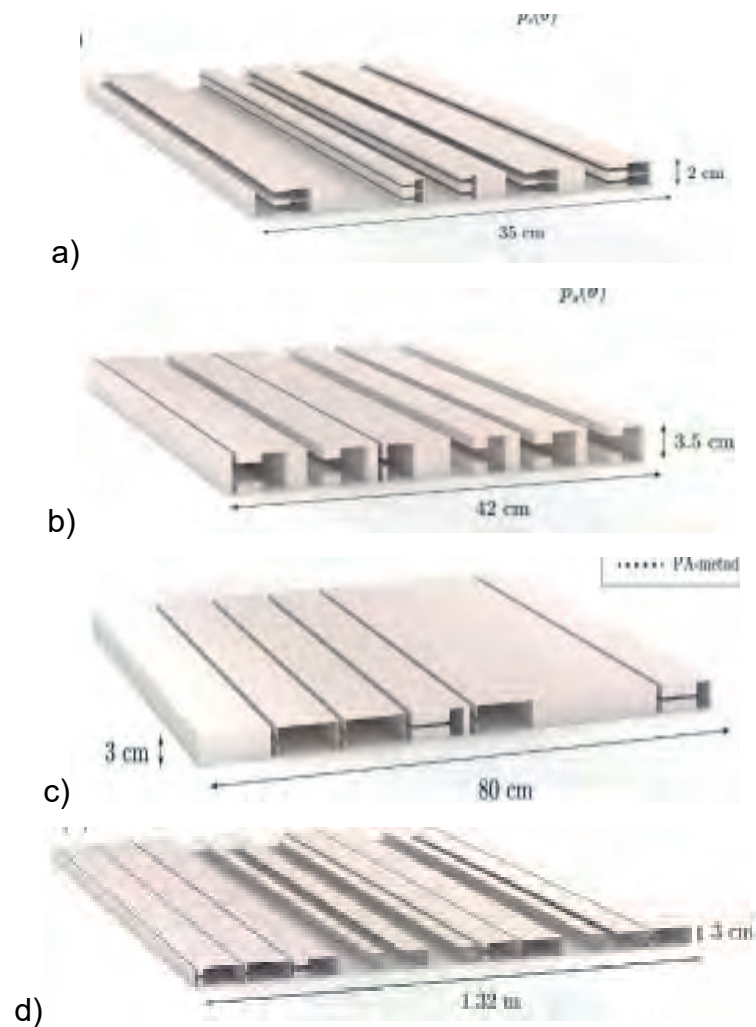


Figura 12. a) metadifusor tipo QR, b) metadifusor de tipo PR, c) metadifusor basado en absorción perfecta y d) un metadifusor QR de gran ancho de banda.

Tomado de (Jiménez et al. 2017a)

2.3. Acústica computacional

Recrear diferentes escenarios de posibles fenómenos acústicos es posible mediante el uso de recursos computacionales como softwares de modelamiento y cálculo físico. Estos sistemas realizan predicciones de forma teórica mediante el uso de métodos numéricos que simulan la realidad, debido a que toman en cuenta los factores que intervienen en la evaluación. Como ejemplos, consideran las atenuaciones generadas en la acústica, termodinámica, entre otras, lo que permite generar resultados fiables.

2.3.1. Métodos numéricos

2.3.2. FEM

En una simulación matemática de una geometría regular o irregular, se puede dividir el dominio en elementos. Dichos elementos permiten generar una solución aproximada por funciones, que a su vez desarrollarán un sistema lineal de ecuaciones. En otras palabras, este método numérico resuelve la ecuación de onda en cada uno de los elementos que conforman la geometría. Resolver la ecuación de onda implica encontrar el campo sonoro en dicha geometría.

2.3.3. Discretización

Hurtado (2001) subdivide el dominio de una geometría irregular en 2D en triángulos (figura 13), lo que permitirá generar una función continua para realizar cálculos matemáticos en simulaciones. Para las geometrías en 3D se utiliza tetraedros para cubrir el dominio del objeto. Este proceso se realiza para obtener resultados similares a la realidad, por ejemplo, mediante el método de elementos finitos (FEM), que asume que cada subdivisión del elemento se aproximará por una función lineal.

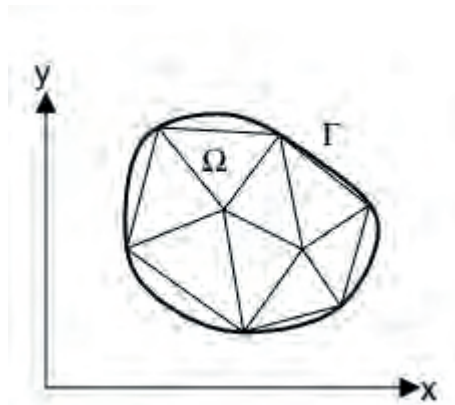


Figura 13. Subdivisión de un objeto mediante triángulos. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/1345/3_-_M%C3%A9todos_num%C3%A9ricos.pdf?sequence=6&isAllowed=y

2.3.4. Geometría

La forma que presente cualquier objeto que se quiera estudiar mediante predicciones toma el nombre de geometría, las estructuras de dichos objetos pueden ser regulares o irregulares como ejemplo está la figura 13. En la acústica

computacional se puede manejar varias geometrías a la vez. Cada una de ellas cumplen una función diferente, como en el caso de las PML en el cuales se va a propagar una onda sonora emitida por una fuente que a su vez puede estar diseñada si el modelo así lo requiere.

2.3.5. Física

Tomando el ejemplo anterior, la geometría que se desea simular puede ser objeto de estudio de diferentes fenómenos físicos, para el caso particular de la acústica se presenta la propagación de las ondas y ciertos factores o coeficientes que se pueden analizar partiendo de ello. Por lo tanto, en acústica computacional se puede definir como física a los cálculos matemáticos realizados en la una simulación, permitiendo mostrar de forma gráfica los resultados de los fenómenos físicos. Además, el programa permite configurar determinados aspectos en la simulación como las fuentes sonoras, las condiciones de frontera para el correcto cálculo y la visualización de los resultados.

2.3.6. Mallado

La densidad de mallado de un objeto hace referencia a la cantidad de subdivisiones que tendrá en su geometría al genera una malla, como se muestra en la figura 13. A mayor densidad de mallado se generan mejores resultados de análisis, pero esto requiere mayor cantidad de tiempo para generar el análisis completo. Según Papadakis y Stavroulakis (2018) lo recomendable generar una malla de tamaño entre cinco y seis elementos por longitud de onda. Debido al análisis frecuencial, la longitud de onda corresponde a la mayor frecuencia en la simulación. Así Jiménez et al (2017a) utiliza en sus modelos un mallado de veinte elementos por longitud de onda, esto para evitar errores e incrementar la precisión de los resultados.

2.3.7. Estudio de convergencia

Como ya se mencionó antes, los procesos de análisis que se generan a partir del mallado permiten presentar resultados precisos para las simulaciones, pero con ciertas limitaciones en el tiempo que toma procesar la información. Para

obtener la menor cantidad de elementos en el mallado y tener los resultados más próximos a la realidad en el modelado FEM, es recomendable probar con diferentes densidades de malla. A esto se lo conoce como estudio de convergencia. Autodesk Knowledge Network. (s.f.). y COMSOL (2019) en sus publicaciones explican cómo realizar el estudio de convergencia para obtener distintos panoramas de simulación. De esta forma se podrá seleccionar adecuadamente el número de elementos que debe tener la malla en función del tiempo de procesado del modelo y la precisión de resultados obtenida. Adicionalmente se lo puede ver de forma gráfica mediante una representación de la presión sonora en función de la frecuencia.

3. Metodología

La metodología que se utiliza en el presente trabajo de investigación es del tipo cuantitativa. Es decir que se analizan datos numéricos de los factores de dispersión y absorción de cada uno de los metadifusores seleccionados mediante predicciones realizadas en Comsol.

3.1. Proceso para simulación

COMSOL Multiphysics permiten desarrollar predicciones de fenómenos físicos acústicos entregando resultados aproximados a la realidad. A demás, cuenta con su propia librería de ejemplos prácticos que permite el desarrollo de eventos similares basados en distintos documentos.

Para la obtención de los parámetros de dispersión, absorción e impedancia acústica se revisó la información de los documentos *Comsol (2019a)*, *Comsol (2019b)* y *Comsol (2019c)*, y se aplicaron una serie de procesos de forma genérica en cada uno de los dispositivos evaluados.

3.1.1. Procesos globales de diseño y estudios

Mediante el uso de parámetros globales se pueden definir valores de las constantes y variables que se utilizarán en los diferentes procesos de implementación de geometrías, cálculo físico y mallado para obtener los resultados gráficos deseados.

3.1.2. Diseño de geometrías

Para realizar los cálculos físicos es necesario establecer el tipo de campo sonoro que se va a utilizar, ya sea un campo abierto o cerrado. En este caso puntual se desarrolla al interior de una media esfera de diámetro 4 m diseñada con el fin de generar un campo sonoro que permitirá la evaluación de los distintos parámetros tal como se ve en la figura 14. Comsol permite el modelamiento y su respectivo estudio de objetos regulares e irregulares. Además, la geometría se puede importar o generar mediante archivo que contenga las dimensiones de los distintos elementos.

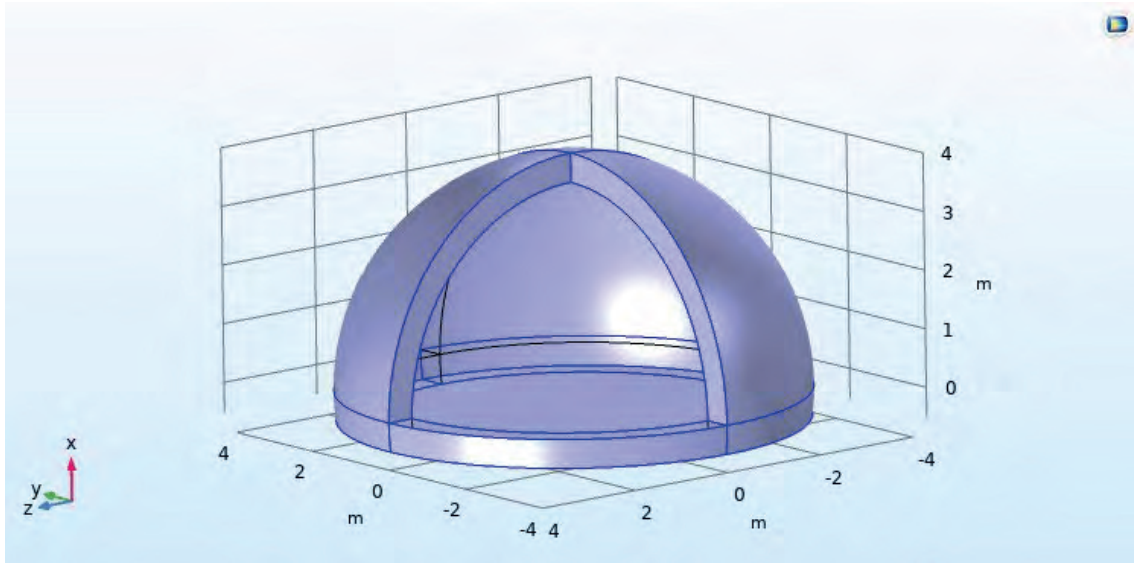


Figura 14. Semiesfera utilizada para determinar los límites de borde mediante la PML.

3.1.3. Cálculos físicos

Los cálculos se realizan con el método de elementos finitos (FEM), con el fin de generar predicciones cercanas a la realidad. En la sección de definiciones se puede determinar las constantes que se van a utilizar en el modelo, y también es factible agregar funciones matemáticas. De esta manera se establece la integración que permite obtener la impedancia acústica de una superficie ya que posteriormente será de gran utilidad. Con el fin de mantener orden en la simulación se establecen secciones que agrupan límites, dominios y líneas, tal y

como se muestra en la figura 15. A demás, se establece la capa perfectamente adaptada (*PML*) *Perfect matched layer*, con dimensiones de 4m de radio exterior y un grosor de 0.5m tal y como se representa en la figura 14.

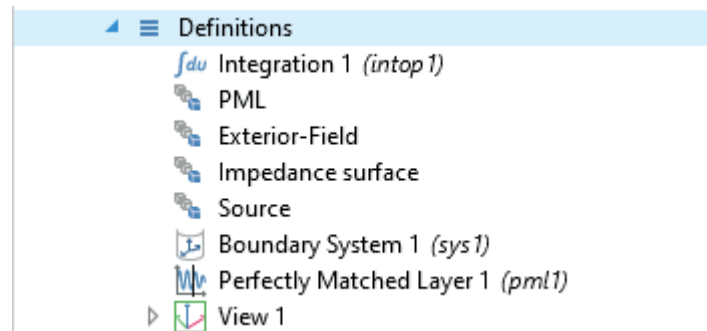


Figura 15. Definiciones del modelo.

Para calcular la presión sonora en un medio de propagación, es importante añadir un material como el aire cuya velocidad de propagación de la onda es de 343 m/s.

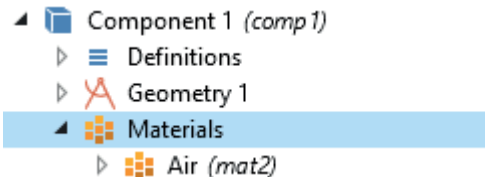


Figura 16. El aire como material utilizado para el modelo.

3.1.4. Presión acústica, dominio de la frecuencia

El campo sonoro se genera mediante una fuente de sonido que excita el medio, en este caso aire. La fuente empleada en Comsol es del tipo *background pressure*, es decir, el campo de presión incidente de segundo plano. Dicha presión incide desde el eje de las x y el eje de las y con las siguientes configuraciones de la tabla 1, y representada de forma gráfica en las figuras 17 y 18. De esta manera el frente de onda incide con una angulación sobre la geometría del panel situado en el interior de la PML.

Tabla 1. *Coordenadas para establecer la presión incidente.*

Incidencia Normal	
Eje x	Eje y
3	0
Angulación 20°	
3	-1

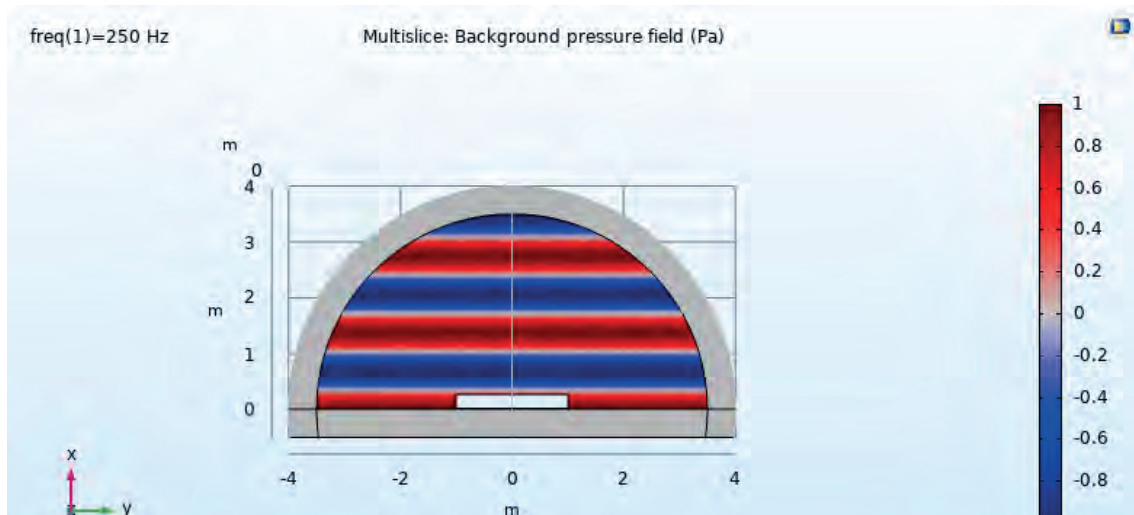


Figura 17. Incidencia del frente de onda sobre la pared reflectante.

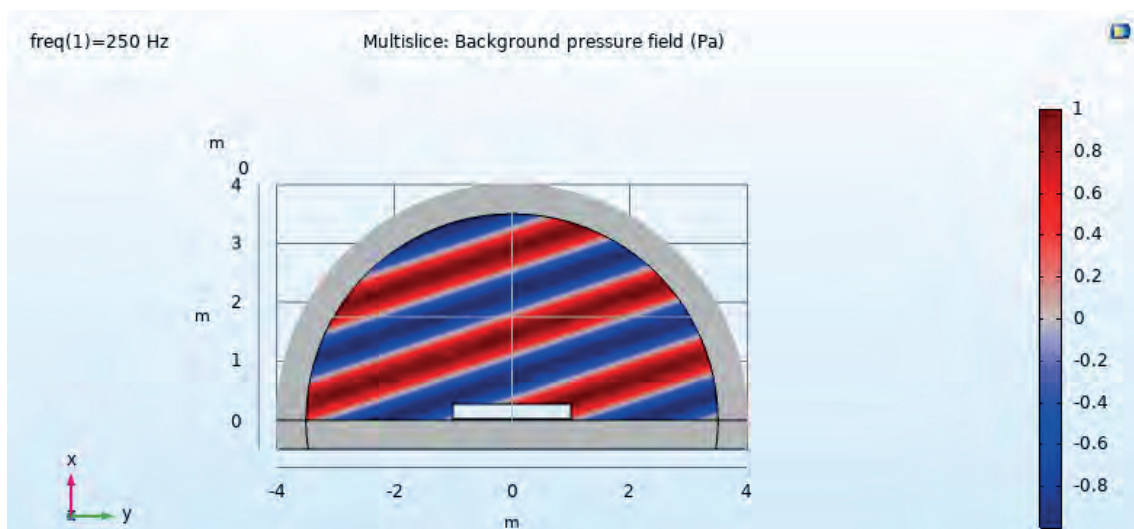


Figura 18. Incidencia del frente de onda con una angulación de 20° sobre la pared reflectante.

3.1.5. Mallado

Según Comsol (2019) para generar la malla es necesario definir los valores en la configuración del mallado, uno de ellos es el tamaño especificando como máximo de los elementos globales. En apartado 2.3.1.6 se realizó un estudio de convergencia en el que se determina el tamaño de los elementos y, por tanto, la densidad adecuada de la malla. Se utilizaron los valores de $\lambda_{min}/5$, $\lambda_{min}/6$, $\lambda_{min}/8$, $\lambda_{min}/6$ y $\lambda_{min}/16$ como se puede observar en la figura 19. Se procedió a definir como el valor óptimo $\lambda_{min}/10$, debido a que la densidad de malla es alta, y el tiempo de procesamiento es aceptable a efectos de la simulación. Cabe recalcar que el estudio tuvo lugar para la geometría menos compleja en diseño. El resto de paneles que se procesaron aumentó la complejidad de la geometría y, por ende, el tiempo de simulación.

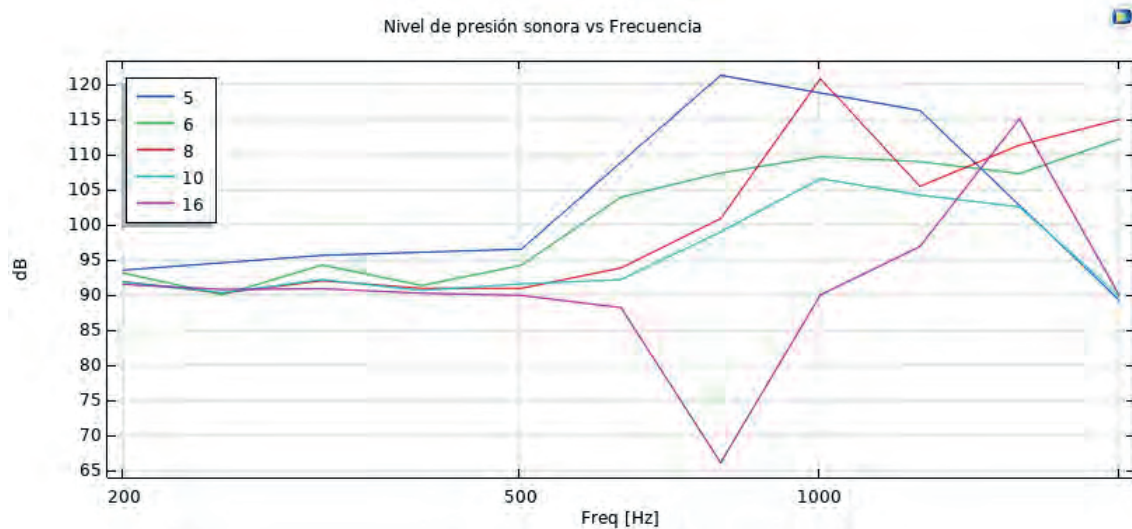


Figura 19. Nivel de presión sonora vs Frecuencia entre 200 y 2000 Hz subdividido en 10 muestras para valores de 5, 6, 8, 10 y 16 elementos de malla.

Para *PML* se debe se generó una malla con tetraedros para que las ondas salientes sean amortiguadas de manera óptima. Además, se debe generar una capa delgada con un tamaño de los tetraedros utilizados de $\lambda_{min}/60$, esta es situada de forma adyacente a la *PML* y sirve para generar una buena evaluación del gradiente normal. Al completar de definir los parámetros necesarios para el

mallado del modelo, se corre el proceso y se muestra una representación visual del mallado tal como se aprecia en la figura 20 donde aparece la geometría de la PML subdividida en cada uno de los tetraedros.

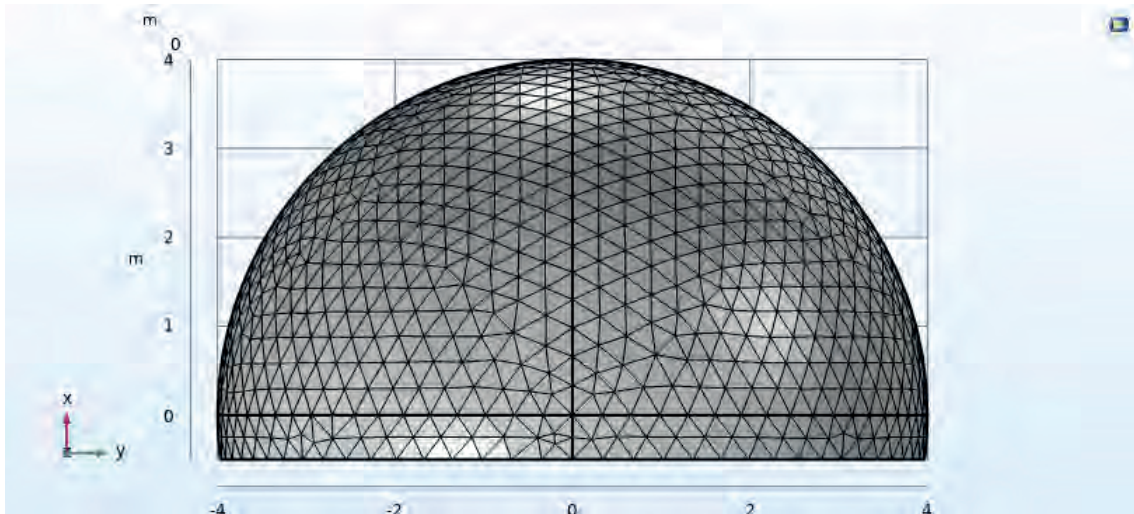


Figura 20. Representación gráfica del mallado de la PML.

3.1.6. Cálculo de los resultados

La figura 21 muestra la configuración de los resultados de predicción del modelo que se encuentra en dominio de la frecuencia. En este menú se modifica el rango de frecuencias o la frecuencia de interés en la que se busca mostrar los respectivos cálculos para posteriormente graficar.

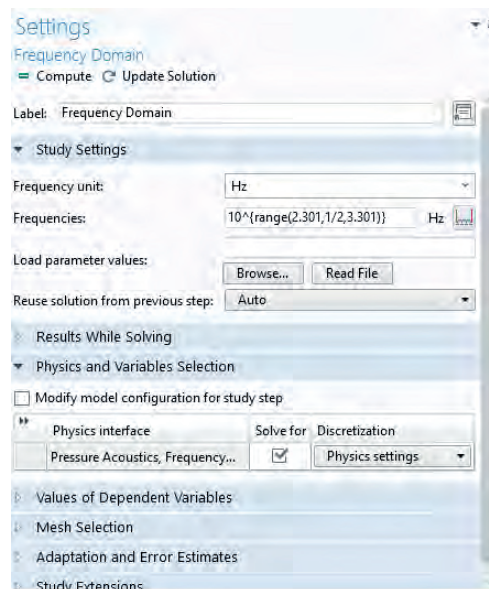


Figura 21. Ventana de configuración de los cálculos del modelo.

3.1.7. Definición de los gráficos de los resultados

Comsol permite generar gráficos de dos, tres dimensiones, en coordenadas polares y cartesianas, dependiendo de lo que se quiere mostrar. Los resultados se configuran para mostrar la solución del modelo mediante la ventana de configuración (figura 22), tanto para los gráficos en 3D que mostrarán el campo total sonoro, y dispersión acústica, como para los resultados en 2D que pertenecen a la impedancia acústica, la respuesta en frecuencia, el coeficiente de reflexión y los patrones de radiación representados en el sistema polar.

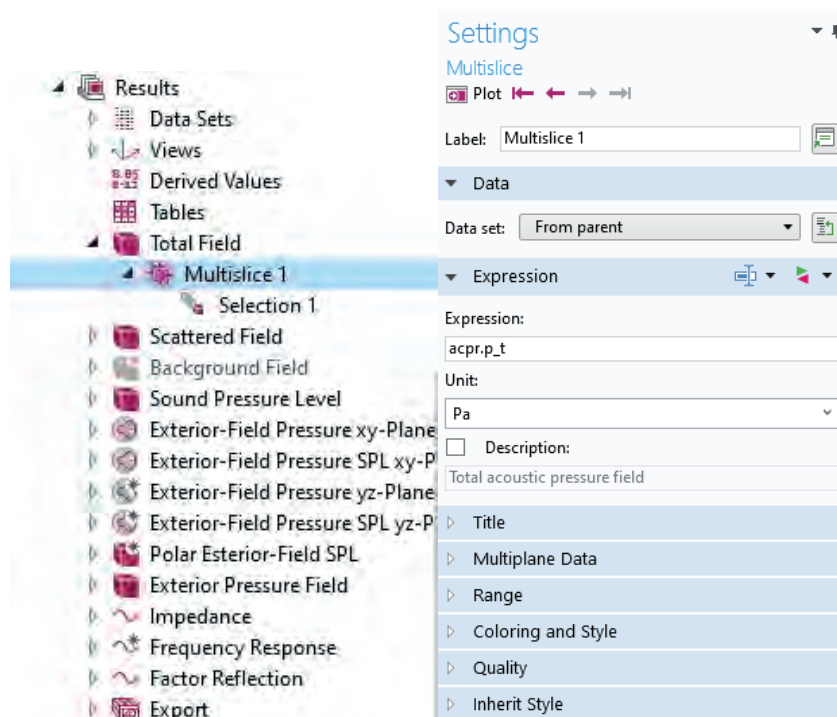


Figura 22. Sección de Resultados del modelo de Comsol y su respectiva ventana de configuración.

3.2. Diseño de superficies reflectantes

Las ondas sonoras que se reflejan en una superficie tienen distintos comportamientos según la geometría que tenga dicha superficie. Por lo tanto, se ha optado por usar cuatro paneles acústicos: una pared reflectante, un difusor policilíndrico, un difusor QRD y un metadifusor con los que se puede diferenciar

el comportamiento de la propagación de las ondas al incidir sobre cada dispositivo. La primera simulación es la de una pared plana, que tiene una estructura similar al difusor policilíndrico, es decir, un cuerpo rígido, y liso, aunque el difusor es policilíndrico es curvo. El tercer caso es un difusor QRD que está diseñado para trabajar en los 500 Hz. Este difusor está diseñado para trabajar en baja frecuencia y posee una estructura irregular. Por último, está el metadifusor que también está diseñado para trabajar en 500 Hz para evaluar su respuesta a baja frecuencia. El metadifusor mantiene una estructura irregular y tiene menor espesor que el resto de dispositivos mencionados.

3.2.1. Pared reflectante (plana)

Siguiendo el proceso descrito en el apartado 2.4.2 se estudia una pared plana reflectante, debido a que su comportamiento es predecible con respecto a la reflexión de las ondas incidentes. Por tanto, al obtener resultados se puede comprobar que funciona la simulación y validar el modelo para los siguientes dispositivos. Para el diseño se utilizó como geometría un bloque con las dimensiones mostradas en la tabla 2, generando así la pared plana dentro de la PML como se ve en la figura 23.

Tabla 2. *Valores utilizados para el diseño de la pared.*

Nombre de la Variable	Valor (m)
Espesor	0.25
Alto	2
Ancho	2

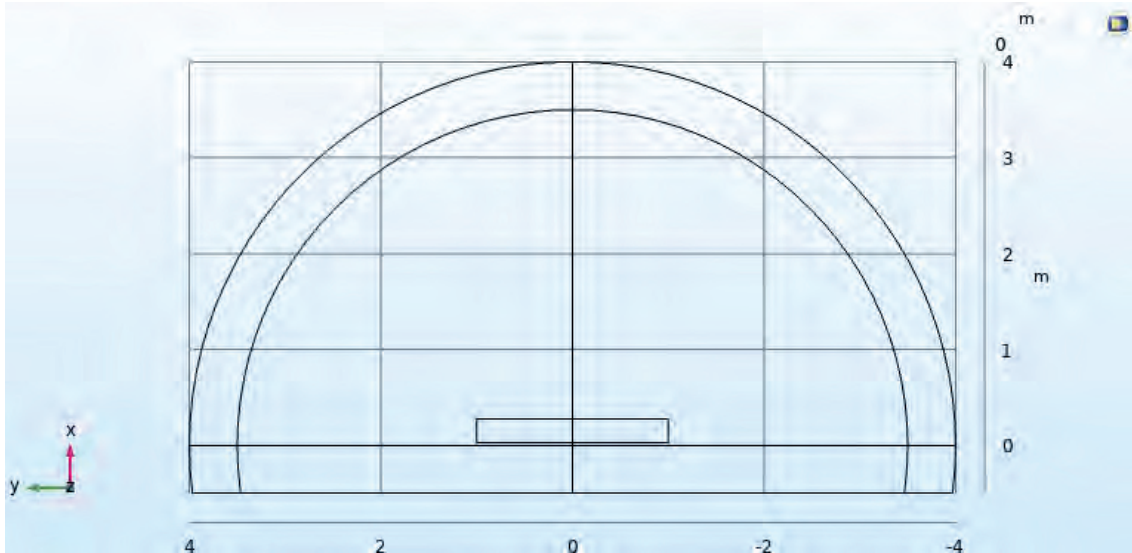


Figura 23. Estructuras de la semiesfera (PML) y la pared reflectante situada en el centro.

3.2.2. Policilíndrico

La geometría del difusor policilíndrico, permite identificar el comportamiento de la energía incidente y reflejada en el campo sonoro. La figura 24 muestra al difusor situado en el centro de la PML. Su diseño se basó en tomar la sección correspondiente al 40% de la estructura de un cilindro con las dimensiones mostradas en la tabla 3.

Tabla 3. Valores utilizados para el diseño del difusor policilíndrico.

Nombre de la Variable	Valor (m)
Radio	0.4
Alto	1.2

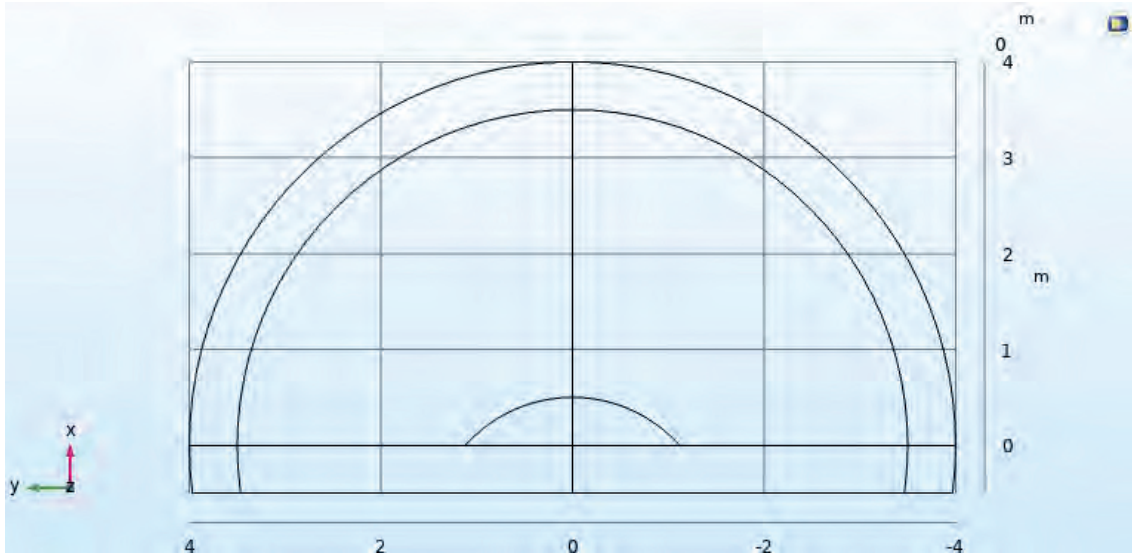


Figura 24. Estructuras de la semiesfera (PML) y el difusor policilíndrico situado el el centro.

3.2.3. QRD uidimensional

El difusor QRD se basa en el residuo cuadrático, para simular esta geometría se utilizó los parámetros de diseño expuestos en la tabla 4 y la figura 25. Uno de los parámetros es la profundidad que existe en cada una de sus ranuras. En el modelo se utilizaron nueve bloques para conformar la geometría completa, que se evaluó dentro de la PML como se muestra en la figura 26.

Tabla 4. Valores utilizados para el diseño del difusor QRD.

Nombre de la Variable	Valor
W	0.33 (m)
p	5
N (p-1)	4
Sn	[0,1,4,4,1]
f_0	500 (Hz)
Profundidad de ranura dn_0	0 (m)
Profundidad de ranura dn_1	0.07 (m)
Profundidad de ranura dn_4	0.27 (m)
Alto	0.30 (m)

Profundidad	1.69 (m)
Largo	1.69 (m)

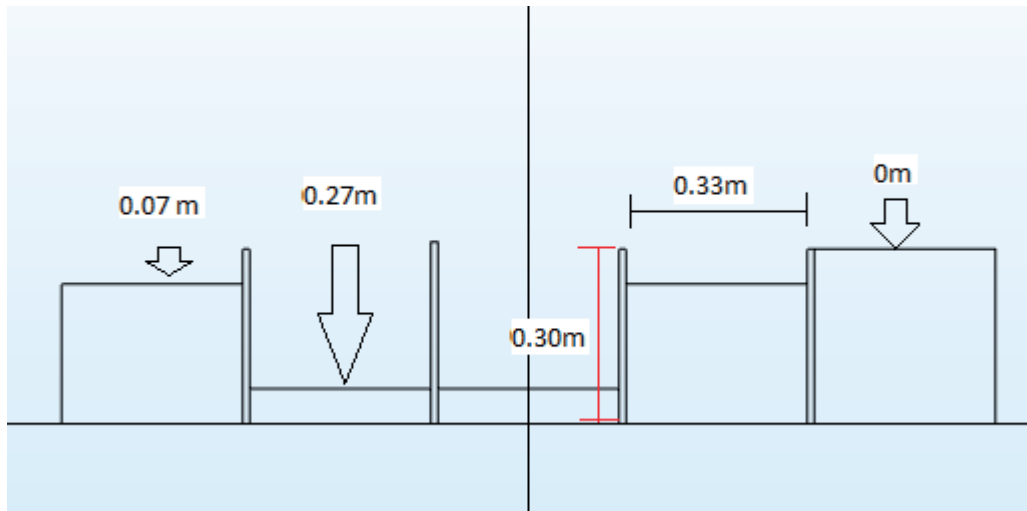


Figura 25. Diseño del Difusor QRD.

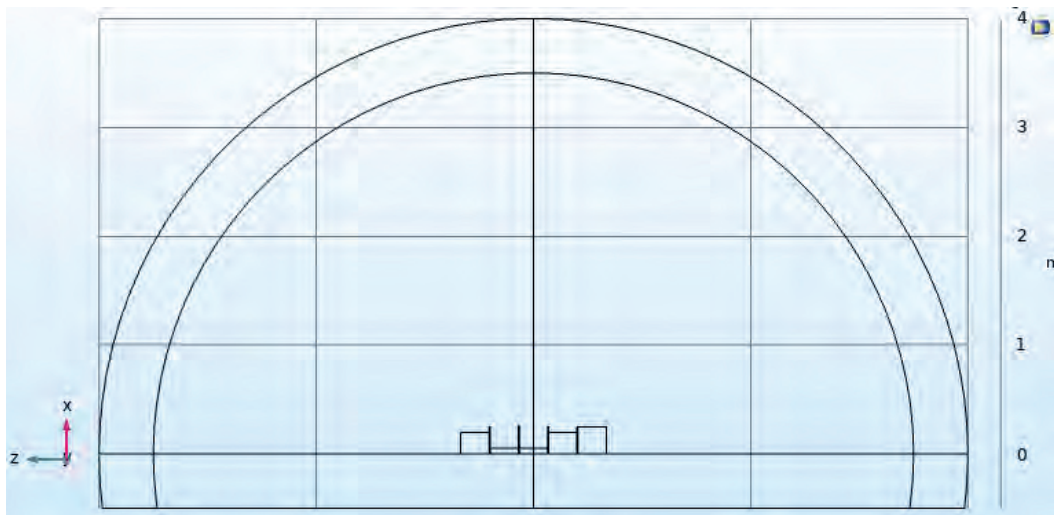


Figura 26. Estructuras de la semiesfera (PML) y el QRD situado el el centro.

3.2.4. Metadifusor QR

Los parámetros de diseño se tomaron del modelo del metadifusor planteado por Jiménez (2017a) mencionados en las tablas 5 y 6. Para graficar la geometría se partió de la creación de un hexaedro sólido y se sustrajeron pequeños bloques para generar los resonadores de Helmholtz, manteniendo así un solo objeto.

Tabla 5. Valores utilizados para el diseño exterior del Metadifusor QRM.

Nombre de la Variable	Valor
f_0	500 (Hz)
Alto	0.02 (m)
Profundidad	0.35 (m)
Largo	0.35 (m)

Tabla 6. Valores utilizados para el diseño de las ranuras del Metadifusor QRM.

Tomada de (<https://www.nature.com/articles/s41598-017-05710-5/tables/1>)

n	s_n	h (mm)	l_n (mm)	l_c (mm)	w_n (mm)	w_c (mm)
1	1.0	14.7	13.0	16.4	6.2	9.0
2	4.0	30.9	9.1	4.3	3.5	9.0
3	4.0	30.9	9.1	4.3	3.5	9.0
4	1.0	15.7	13.3	17.0	6.3	9.0
5	0.0	20.3	18.0	20.7	3.2	9.0

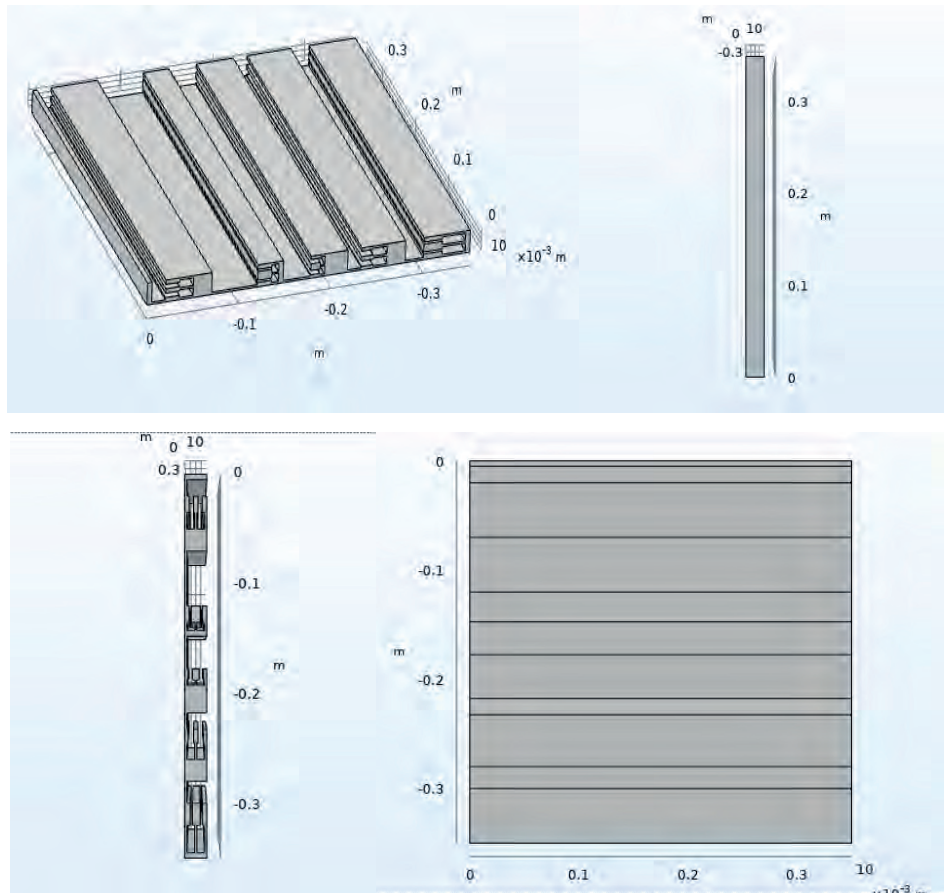


Figura 27. Estructura del metadifusor visto desde distintas proyecciones.

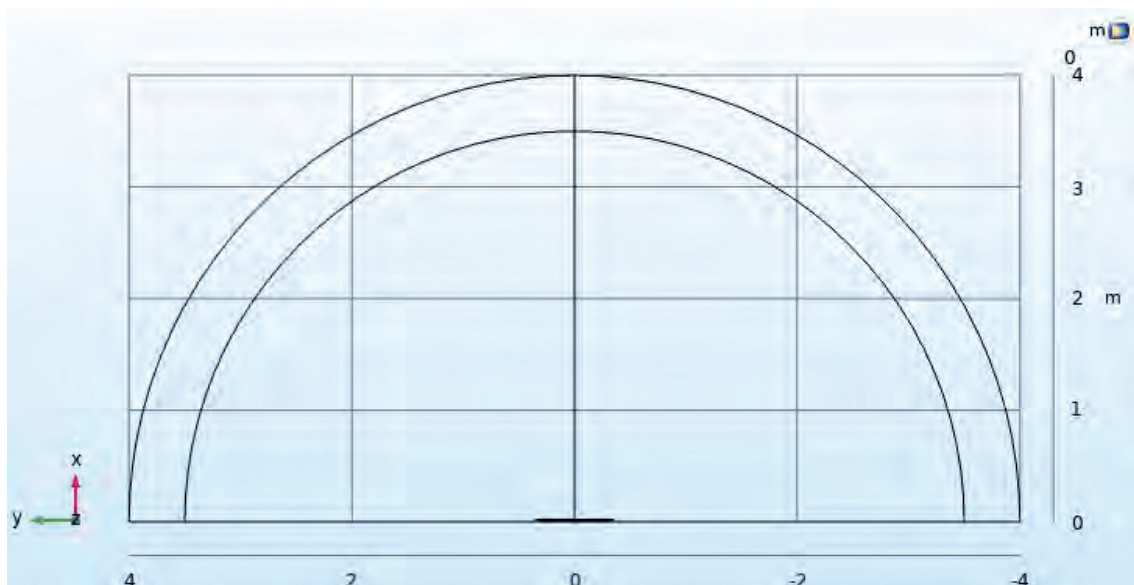


Figura 28. Estructuras de la semiesfera (PML) y el metadifusor situado el el centro.

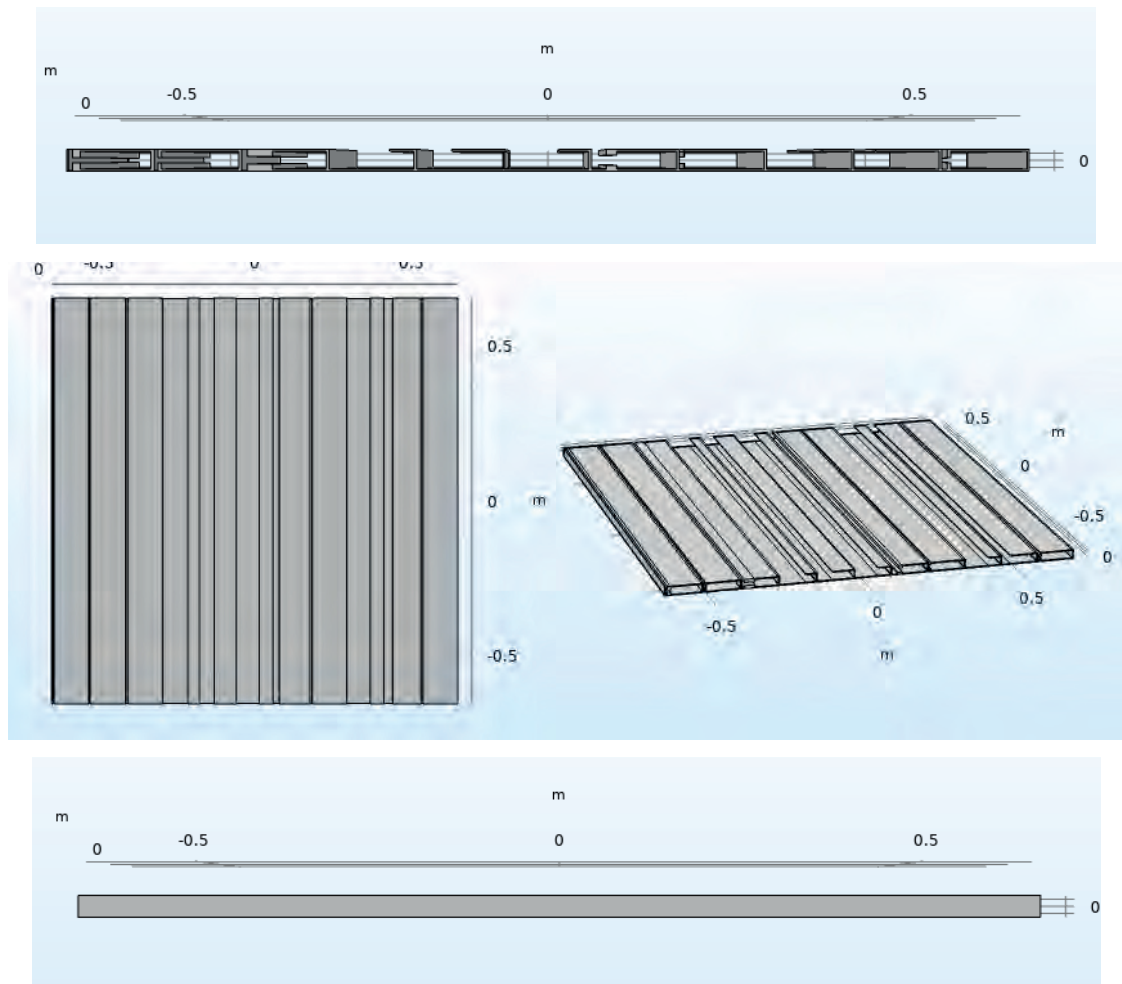


Figura 29. Estructura del metadifusor de gran ancho de banda visto desde distintas proyecciones.

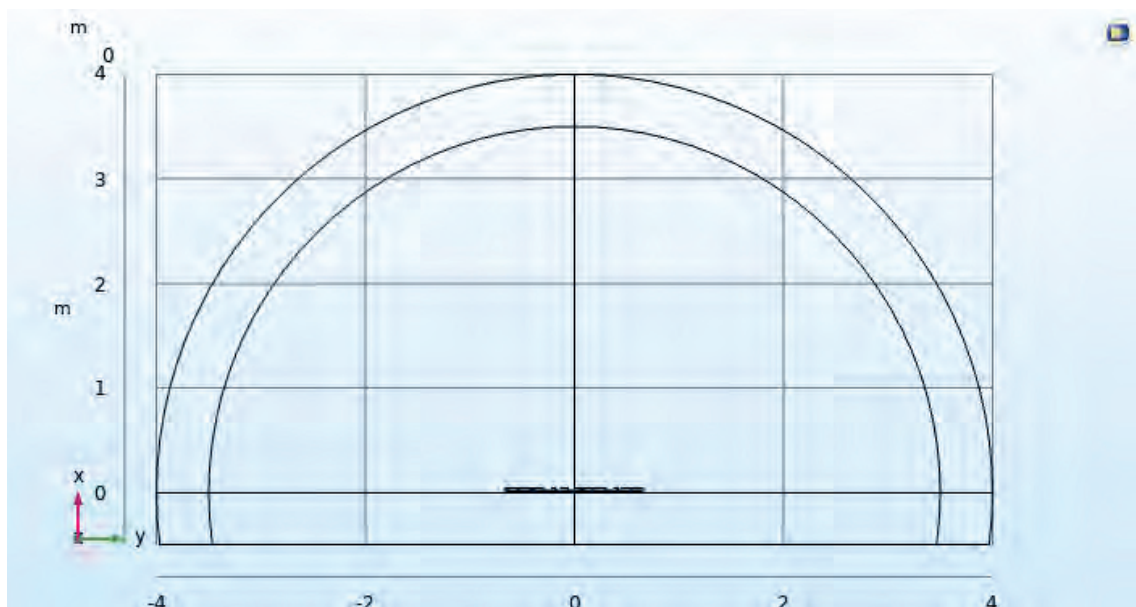


Figura 30. Estructuras de la semiesfera (PML) y el metadifusor de gran ancho de banda situado el el centro.

4. Análisis de resultados

Con el fin de verificar el análisis realizado de las propiedades acústicas de los paneles planteados en el apartado 3 se muestran resultados del campo de dispersión, impedancia, factor de reflexión y patrón polar. Estos resultados se muestran en un rango de frecuencias entre 200 y 2000 Hz, ya que se busca identificar el comportamiento de los paneles para baja frecuencia al interactuar con una onda incidente. Los parámetros acústicos mencionados se obtienen en todos los modelos de los paneles estudiados al identificar como se propagan las reflexiones en el panel, y por ende, la oposición a la transmisión de la onda por el material, y por lo tanto, la impedancia acústica. Esta impedancia permite encontrar el factor de reflexión mediante el cálculo de la ec.(2.15). Los patrones polares permiten identificar la radiación de las ondas reflejadas, es decir, la difusión que presentan los distintos paneles en una o más frecuencias simultáneamente.

4.1. Pared reflectante (plana)

Según la figura 31, la onda plana incidente con una angulación sobre una pared plana se reflejará de forma simétrica respecto a la normal a la superficie. Por lo tanto, los resultados de la dispersión sonora de este panel en la simulación permiten validar el modelo y sus respectivos cálculos. Las figuras 32, 33, 34 y 35 muestran la incidencia de las ondas acústicas de forma normal es decir 0° y diagonal con 20° en torno al eje x respectivamente.

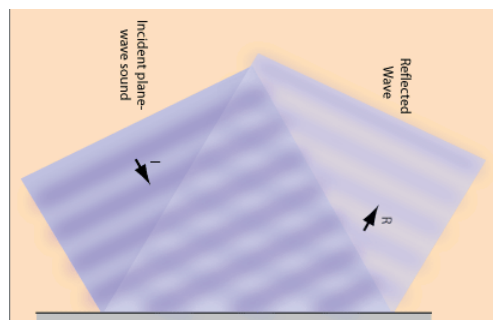


Figura 31. Onda sonora propagándose en dirección a una pared plana.

Recuperado de (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Sound/reflec2.html>)

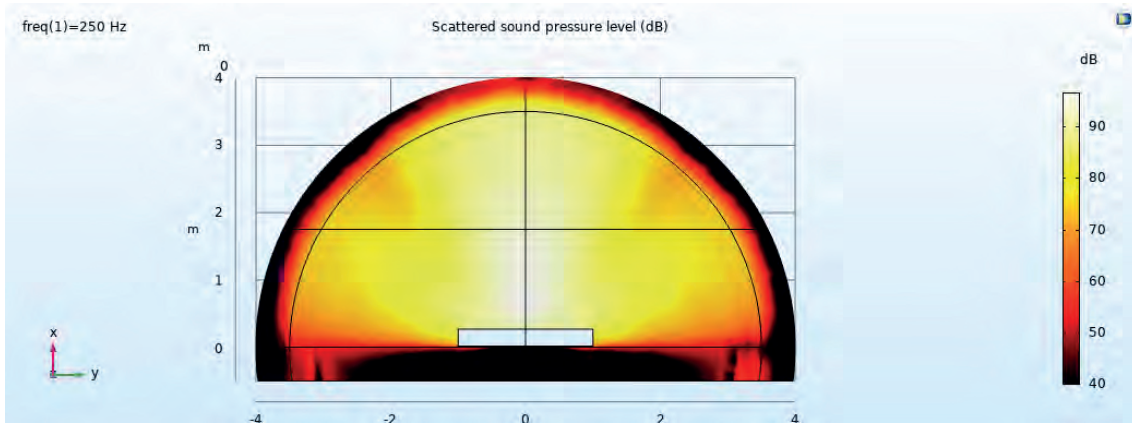


Figura 32. Dispersión sonora para 250 Hz con incidencia normal

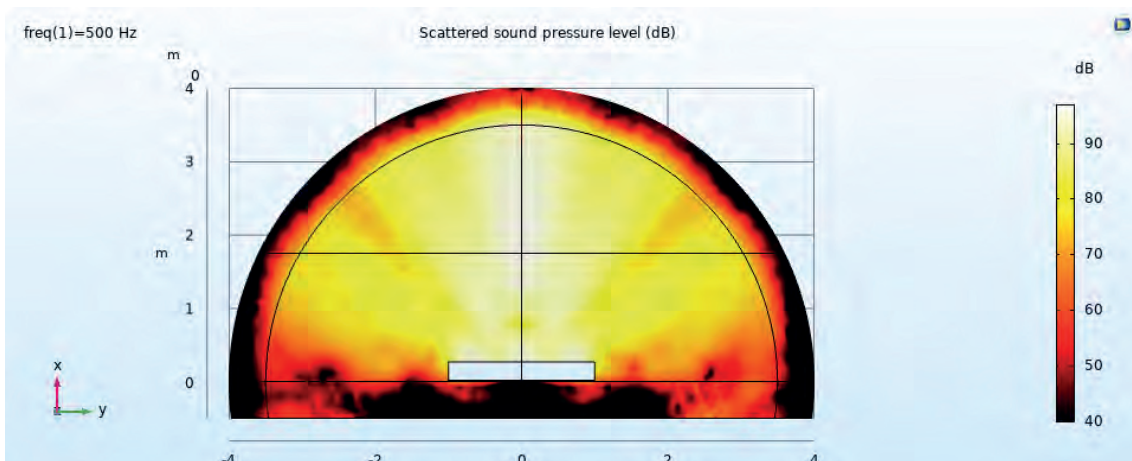


Figura 33. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia normal en el eje x .

En las figuras 32 y 33 se puede evidenciar la presencia de reflexión especular debido a la incidencia normal del frente de onda. La diferencia entre ambas figuras consiste en la variación de la frecuencia con la que se aprecian las reflexiones dispersas y, por tanto, de la longitud de onda de cada una.

Al variar la inclinación de la dirección de la onda sonora se obtienen resultados distintos a la incidencia normal, pero se mantiene el principio de la propagación y reflexión del frente de onda incidente, es decir, se produce una reflexión

simétrica respecto a la perpendicular al panel pero con menor nivel de presión sonora tal y como se aprecia en las figuras 34 y 35.

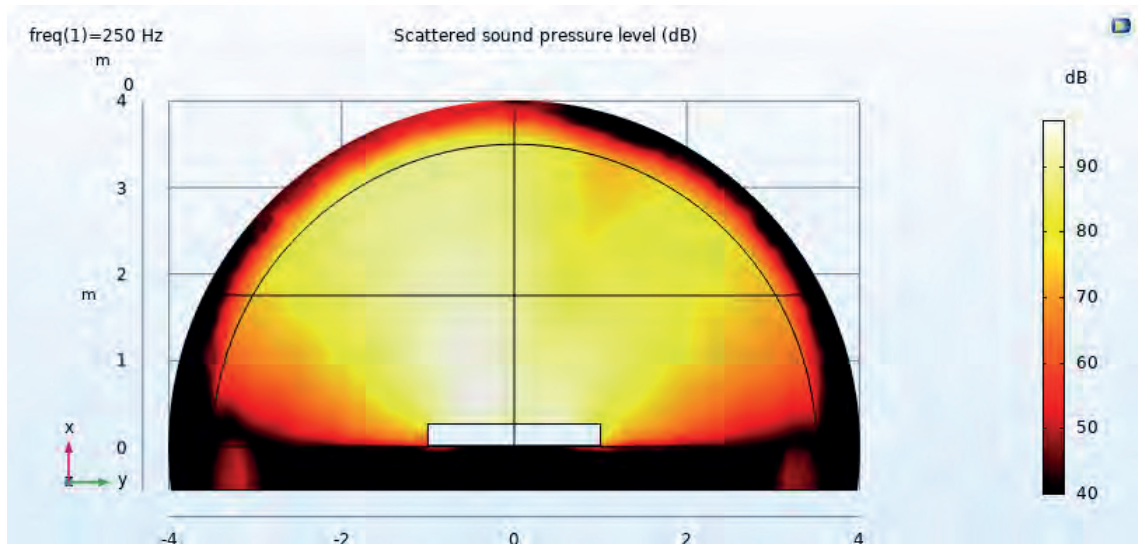


Figura 34. Dispersión sonora para 250 Hz con incidencia de la onda con 20° respecto a la pared plana en el eje x .

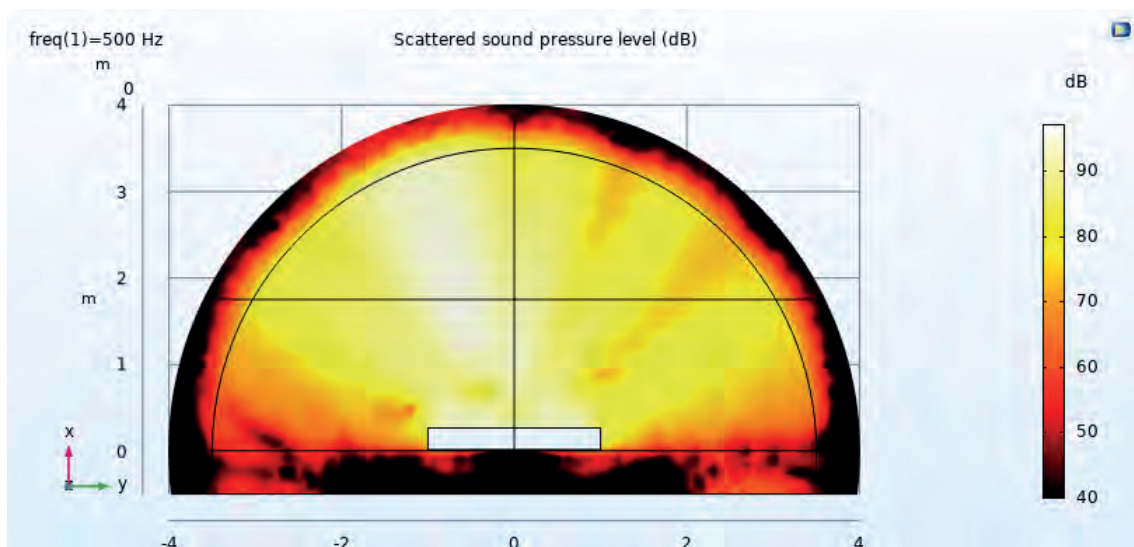


Figura 35. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia de la onda con 20° respecto a la pared plana en el eje x .

4.1.1. Patrón polar

La presión acústica incidente sobre la pared plana depende de la angulación con la que se propaga el frente de onda. Dicho frente de onda genera un patrón polar de radiación en campo lejano distinto para cada inclinación utilizada. En la figura 36 se representa el caso ideal de una pared plana y su patrón de radiación con incidencia frontal de la onda acústica. Se generan tres lóbulos marcados siendo el central el más grande debido a que es donde se concentra la mayor parte de energía. La figura 37, correspondiente a una incidencia de la onda de 20° respecto a la normal, muestra una diferencia notoria debido a que posee dos lóbulos, el primero más grande conteniendo mayor energía y el segundo representando la onda reflejada. En ambos casos se pueden asumir reflexiones especulares.

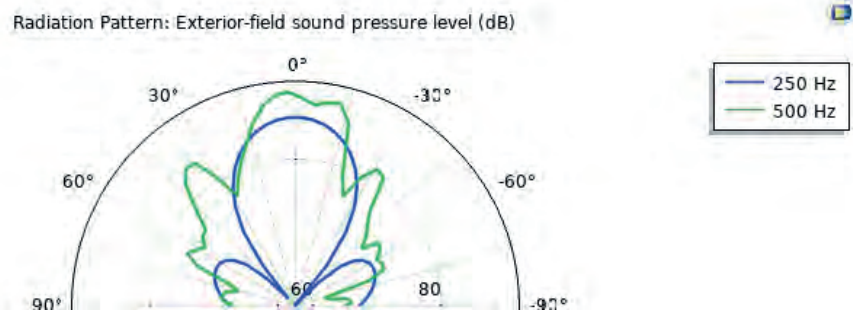


Figura 36. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 250 y 500 Hz con incidencia normal del frente de onda respecto a la pared plana en el eje x .

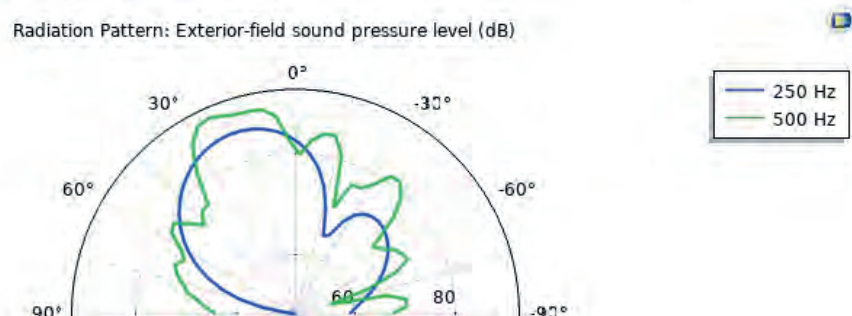


Figura 37. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 250 y 500 Hz con incidencia del frente de onda con 20° respecto a la pared plana en el eje x .

4.1.2. Impedancia

La relación entre la presión sonora y la velocidad de la partícula ec.(2.13) representa la impedancia acústica de una superficie. Azcaráte et al. (2000) recalca que la impedancia tiene dos componentes, una real o resistencia acústica, que se asocia a los procesos de disipación de energía, y otra la imaginaria o reactancia acústica. Esta última, según free online library(s.f.) representa la inercia y elasticidad del medio. Para 3 Acoustics. (s.f.). estas dos se agrupan debido a que son distintas a la resistencia. Además, aclara que cuando una señal es colocada en un sistema reactivo se conserva a diferencia de cuando es puesto en un sistema resistivo donde la energía se pierde. Considerando aquello se generó una gráfica que muestre las curvas tanto de la parte real como la imaginaria que la conforman, en un rango de frecuencias que va desde 200 hasta los 2000 Hz donde se ve cómo se comporta la curva de impedancia de la pared reflectante representada en la figura 38. La parte real a partir de 200 Hz presenta un valor inferior y cercano a cero en lo cual no habrá disipación de la energía incidente, desde los 1000Hz el valor es positivo y se puede hablar de que empieza a existir disipación de energía, aunque sea muy bajo. La parte imaginaria presenta en todo el espectro de frecuencias información relacionada a la conservación de energía de la onda incidente.

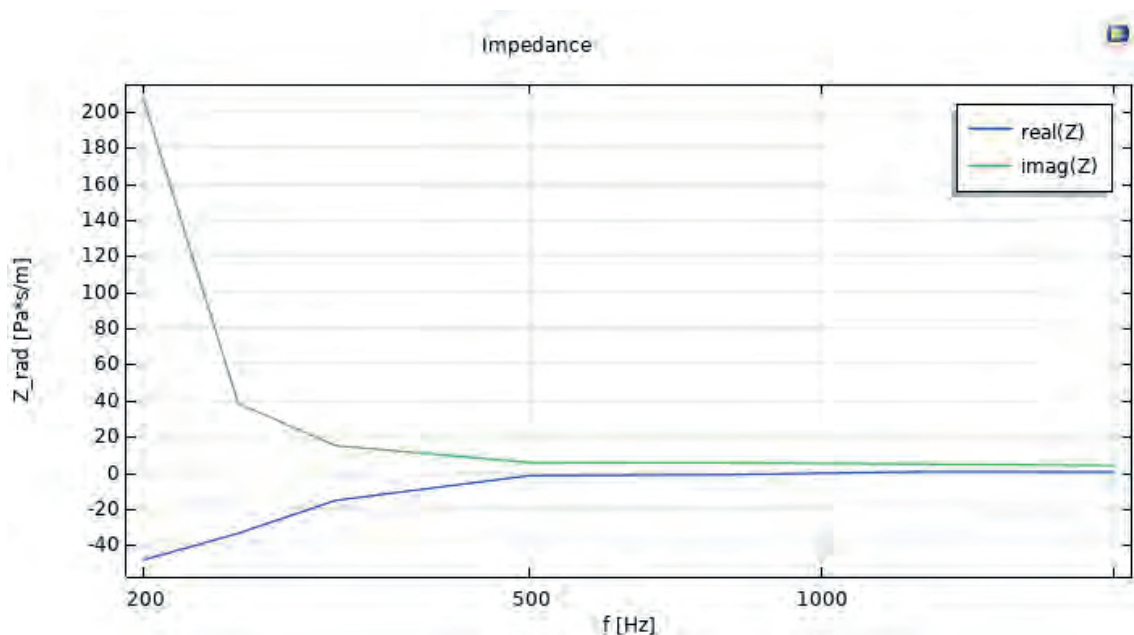


Figura 38. Impedancia acústica de una pared plana en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

4.1.3. Factor de reflexión

El factor de reflexión, también llamado coeficiente de reflexión, se calcula mediante la ec.(2.15). Sus valores se pueden observar en la figura 39. En bajas frecuencias el valor es más alto y va disminuyendo paulatinamente de acuerdo con el incremento de las frecuencias. Es decir, las frecuencias bajas son reflejadas con facilidad y esto se debe a la longitud de onda que las caracteriza.

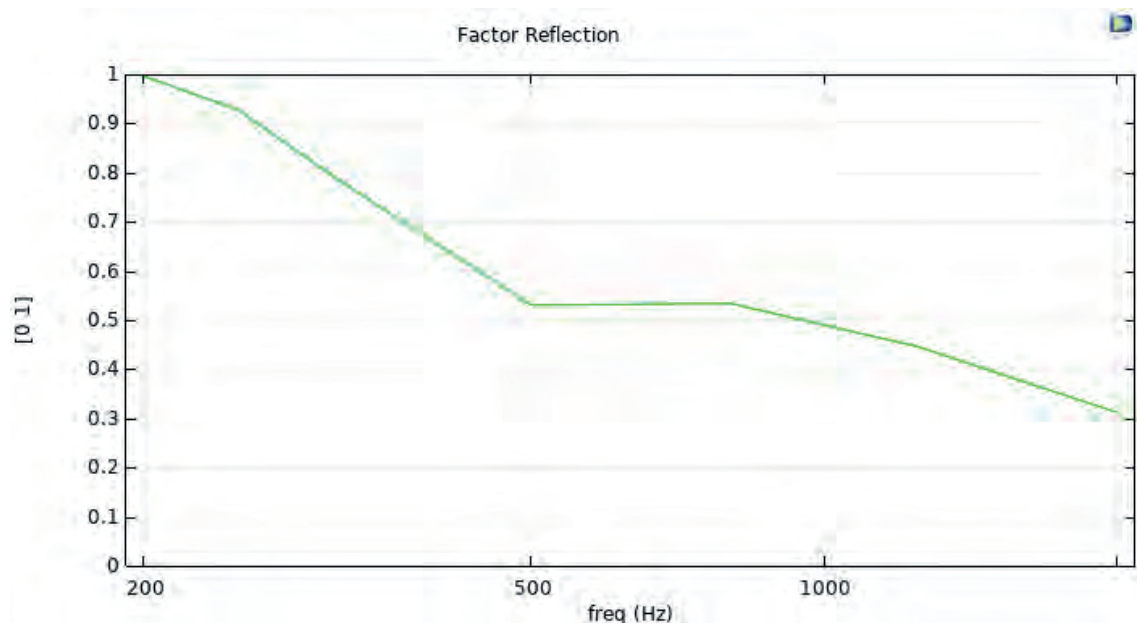


Figura 39. Factor de reflexión (R) de una pared plana en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

4.2. Difusor policilíndrico

Siguiendo el mismo proceso que se utilizó en la pared reflectante se busca representar la dispersión acústica generada por la incidencia normal y oblicua del frente de onda sobre un panel difusor policilíndrico, es decir, 0° y 20° en el eje x respectivamente para 250 Hz.

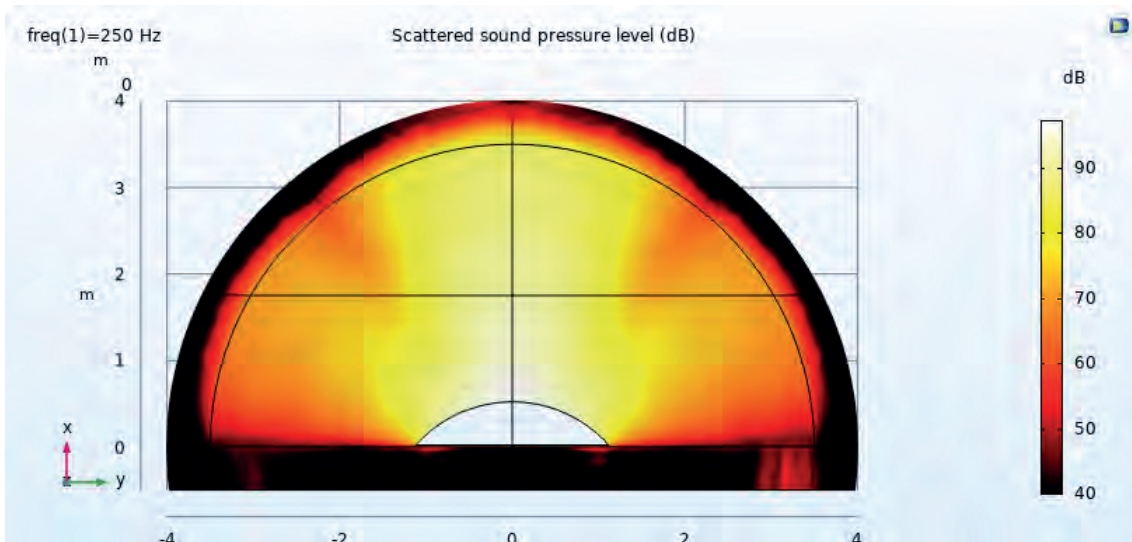


Figura 40. Dispersión sonora para 250 Hz con incidencia del frente de onda con 0° respecto al difusor policilíndrico en el eje x .

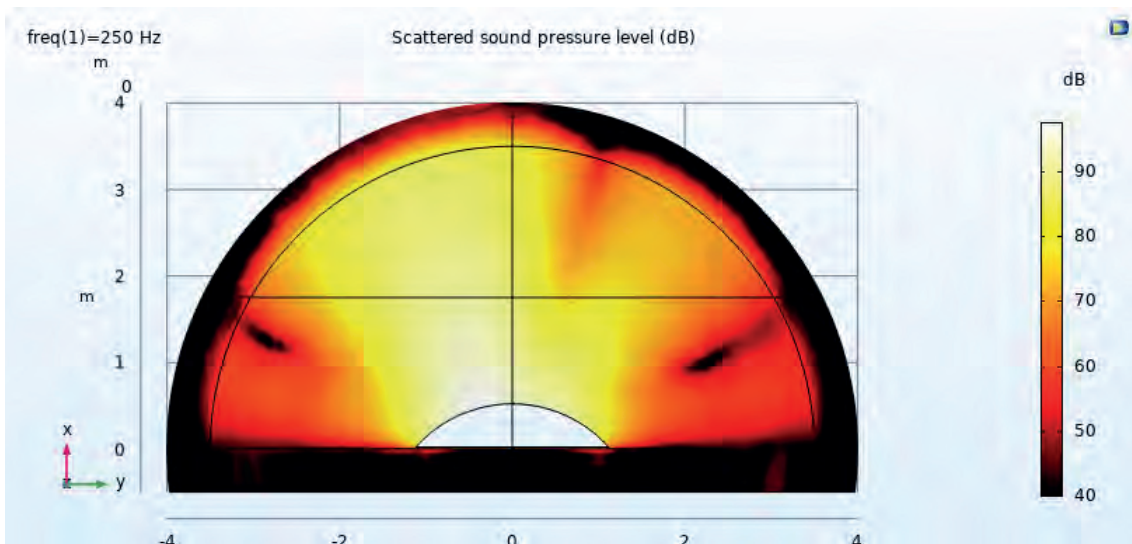


Figura 41. Dispersión sonora para 250 Hz con incidencia oblicua del frente de onda con 20° respecto al difusor policilíndrico en el eje x .

Las figuras 40 y 41 muestran que los resultados de dispersión sonora en baja frecuencia a 250 Hz son similares a los obtenidos con la pared plana reflectante. Debido a su forma y a la incidencia normal en la figura 40 se aprecian ciertas

reflexiones especulares, pero a su vez la energía está más dispersa en todas las direcciones. La incidencia oblicua representada en la figura 41 muestra mayor dispersión que en el caso de incidencia normal.

4.2.1. Patrón polar

La figura 42 muestra el campo lejano donde la energía se refleja en el difusor policilíndrico dependiendo de la angulación de incidencia. En el primer caso se mantiene la generación de reflexión especular en baja frecuencia, y a medida que la frecuencia se incrementa empieza a dispersar la energía en distintas direcciones.

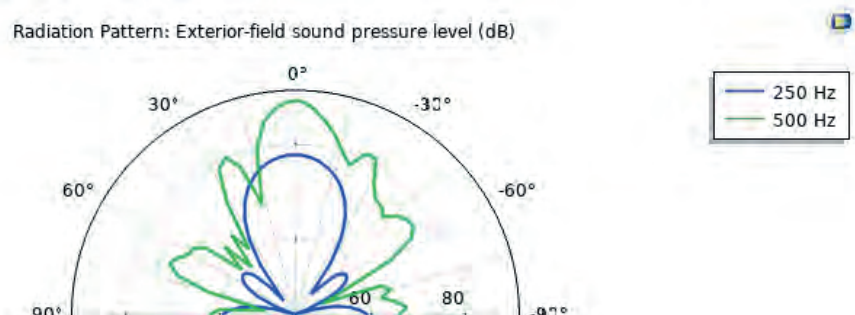


Figura 42. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 250 y 500 Hz con incidencia normal respecto al difusor policilíndrico en el eje x .

En el segundo caso, figura 43, en el que la onda tiene una angulación de 20° la energía se dispersa en dos lóbulos el primero con mayor cantidad de energía en baja frecuencia tal y como se esperaba debido al diseño. En 500 Hz la cantidad de lóbulos se incrementa y se evidencia que la energía se distribuye de forma amplia, pero no igual en todas las direcciones posibles, ya que conserva la mayor cantidad de energía en el lado incidente.

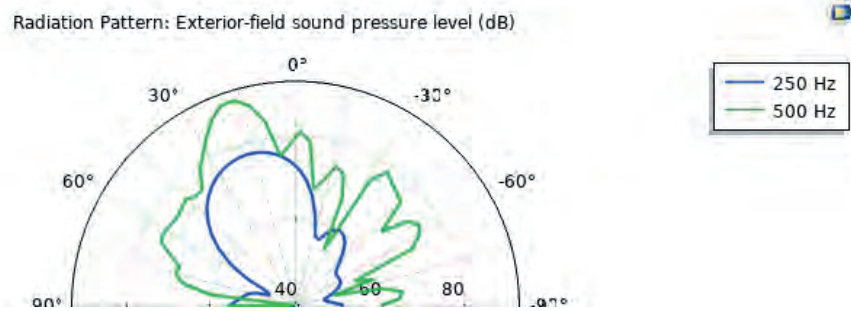


Figura 43. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 250 y 500 Hz con incidencia oblicua 20° respecto al difusor policilíndrico en el eje x .

4.2.2. Impedancia

La parte real de la impedancia mostrada en la figura 44 denota que existe una ligera disipación de energía incidente a partir de los 450 Hz, en cuanto a la curva de la parte imaginaria sugiere que el difusor policilíndrico tendrá en todo el espectro de frecuencia analizado energía reflejada.

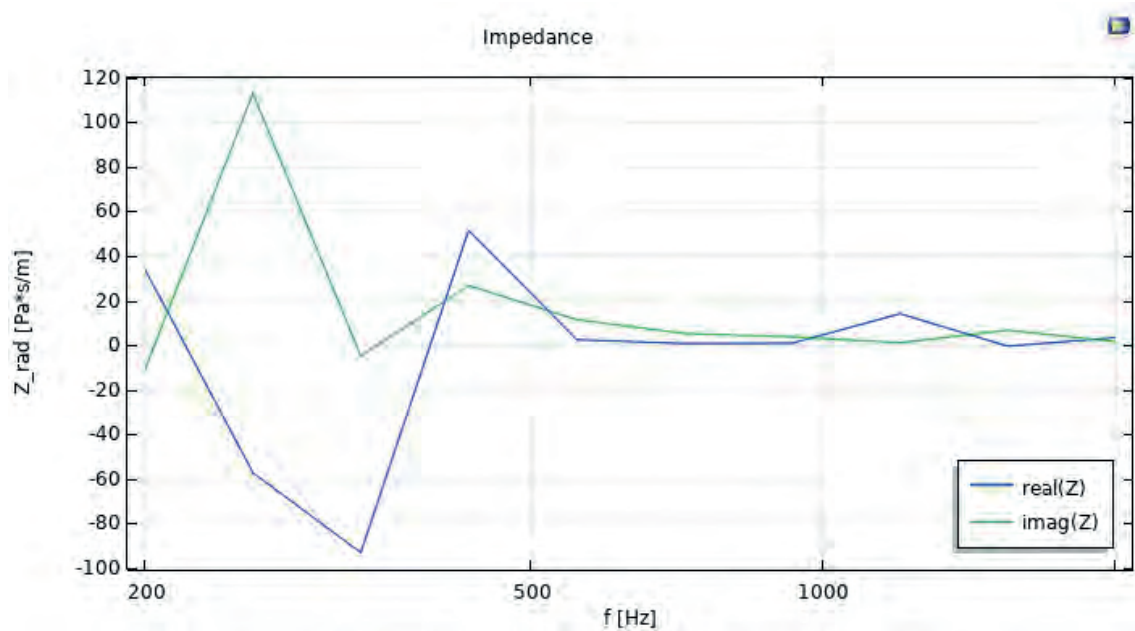


Figura 44. Impedancia acústica de un difusor policilíndrico en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

4.2.3. Factor de reflexión

Según la figura 45 el factor de reflexión en bajas frecuencias es considerablemente alto hasta cerca de los 1000 Hz donde existe una caída en la

curva teniendo su valor más bajo en 1200 Hz y vuelve a tomar valores cercanos al 0.9 en 1600 Hz.

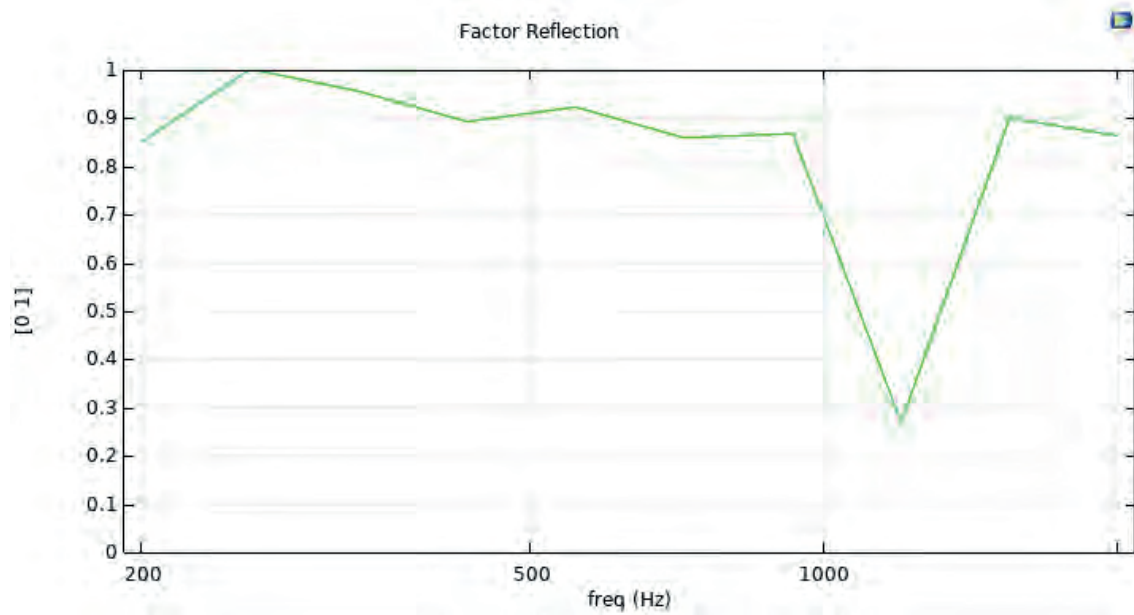


Figura 45. Factor de reflexión (R) de un difusor policilíndrico en el espectro de frecuencias.

4.3. Difusor QRD unidimensional

En la figura 46 se representa el comportamiento de la presión sonora incidente normal para 500 Hz en un difusor QRD. En ella se aprecia la dispersión de la energía de forma especular para 500 Hz, debido a la cantidad que se acumula en el frente del difusor. Sin embargo, llega a distribuir la energía de mejor manera en comparación al difusor policilíndrico o a la pared plana.

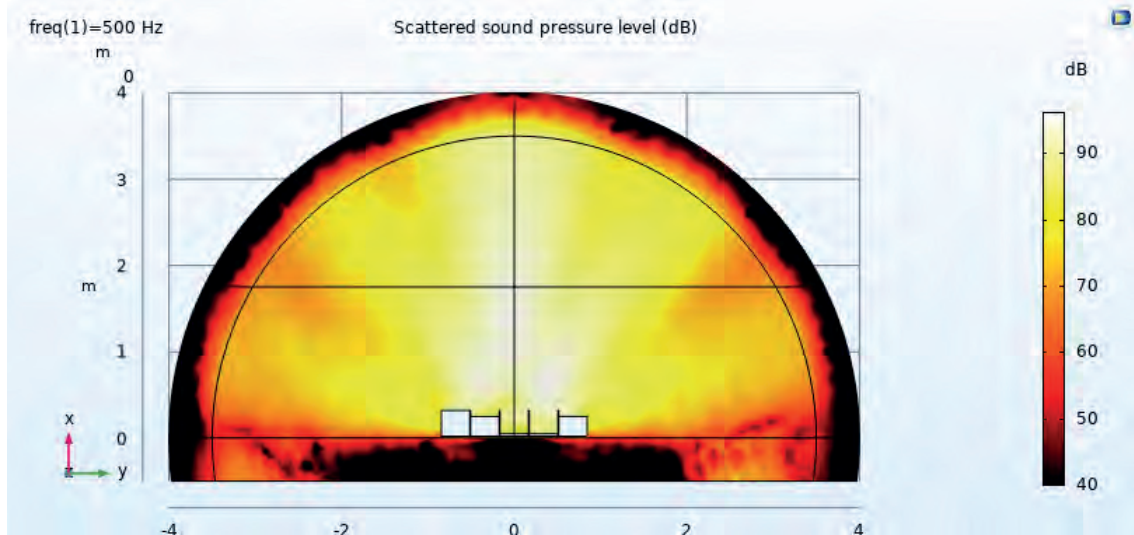


Figura 46. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un difusor QRD unidimensional en el eje x .

Al incidir la onda de forma angulada 20° se puede apreciar la función del difusor el cual dispersa la energía de forma difusa. Mediante la figura 47 se evidencia que la energía se distribuye de mejor manera en el espacio, pero sigue manteniendo la mayor cantidad concentrada en el lado por el cual incide la onda.

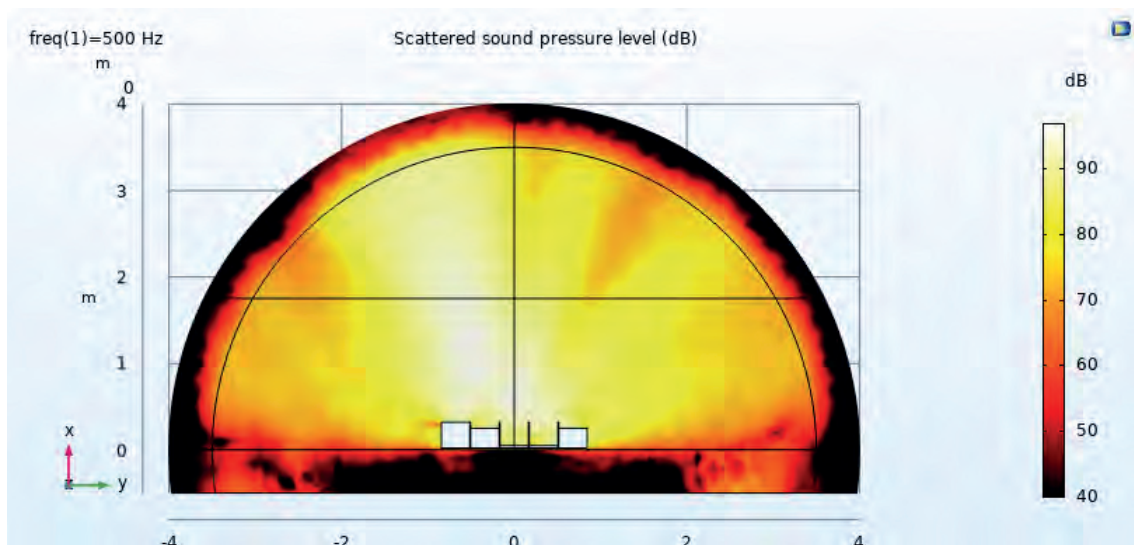


Figura 47. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia oblicua 20° respecto a un difusor QRD unidimensional en el eje x .

4.3.1. Patrón polar

El patrón polar de la figura 48 recrea el campo lejano de la energía incidente, en 500 Hz muestra una dispersión de la energía de forma difusa, conservando la mayor energía en el lóbulo central y en cuanto a 250 Hz se comporta como un panel plano.

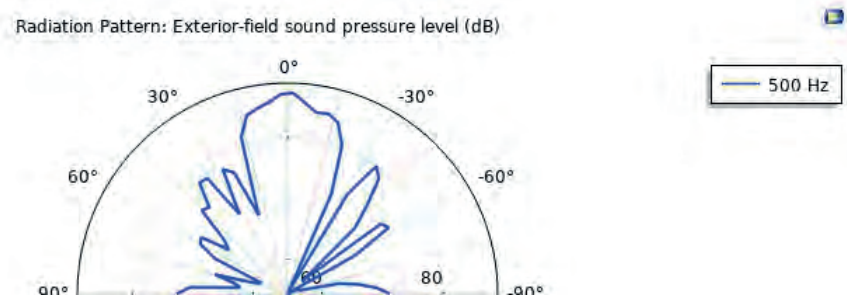


Figura 48. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 500 Hz con incidencia normal de la onda con 0° respecto a un difusor QRD unidimensional en el eje x .

La difusión del QRD respecto a la incidencia oblicua en el campo lejano, figura 49, difiere en el comportamiento a la incidencia normal, debido a que la mayor cantidad de energía se preserva en el frente del panel y no lo distribuye hacia los lados.

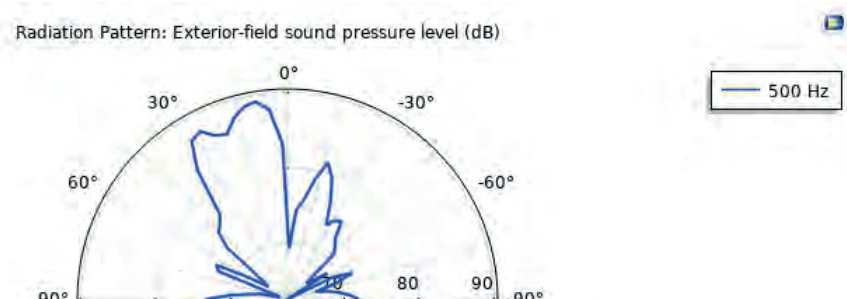


Figura 49. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 500 Hz con incidencia oblicua de la onda con 20° respecto a un difusor QRD unidimensional en el eje x .

Tech Topic (s.f.) en su publicación establece una diferencia entre los resultados de la dispersión y la difusión sonora mediante los patrones polares de cada uno de los paneles evaluados. Si la energía incidente se reparte forma difusa o especular en el medio de propagación puede determinar qué tan bueno o malo es un difusor cumpliendo su función. Hasta este punto las figuras 36, 37, 42, 43, 48 y 49 pertenecientes a los patrones polares de la pared plana, difusor policilíndrico y difusor QRD respectivamente, muestran una mala distribución de las reflexiones de la onda incidente tanto de forma normal como oblicua ya que esta no se reparte uniformemente en todas las direcciones en las frecuencias evaluadas de 250 y 500 Hz en cada uno de los paneles.

4.3.2. Impedancia

En la figura 50 se puede apreciar que la curva de impedancia en su parte real tiene cierta disipación de energía en frecuencias medias, en cuanto a la parte imaginaria demuestra que en las bajas frecuencias existe mayor cantidad de reflexión de la energía incidente sobre el difusor y tiene a disminuir conforme se incrementa el valor de la frecuencia.

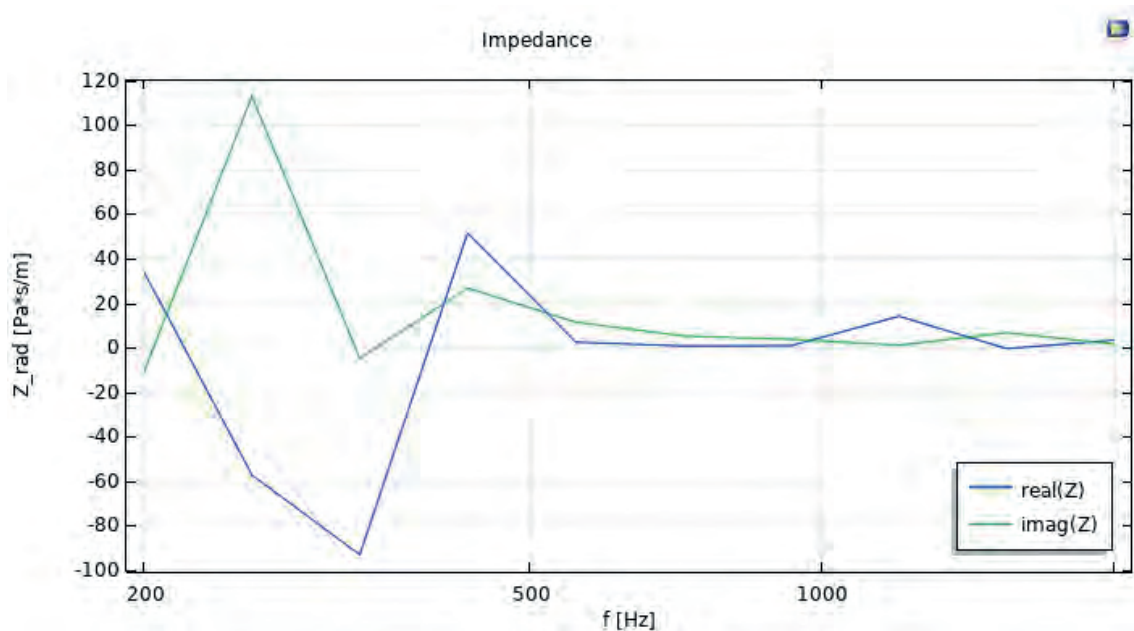


Figura 50. Impedancia acústica de un difusor QRD unidimensional en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

4.3.3. Factor de absorción, reflexión y dispersión.

El factor de absorción, también conocido como coeficiente de absorción, se obtiene de la resolución de la ec. (2.15) permitiendo encontrar el porcentaje de energía incidente que es atenuada por el uso de ciertos dispositivos como porosos o resonadores. En algunas superficies en las cuales incide una onda sonora existe disipación de energía acústica que se transforma en calor, por ello se muestra el comportamiento del difusor QRD en la figura 51 en donde se indica el factor de absorción de la energía incidente. La curva del factor de absorción tiene un crecimiento a partir de 350 Hz hasta los 2000 Hz, es decir que las frecuencias bajas no se verán afectadas en la disipación de energía debido a la longitud de onda que manejan y a la frecuencia de diseño del difusor QRD.

Además la figura 51 presenta el factor de reflexión que indica la cantidad de energía que es reflejada al interactuar con el difusor del tipo QRD unidimensional en el campo sonoro, el estudio muestra los valores para las frecuencias entre 200 y 2000 Hz, obteniendo valores altos en bajas frecuencias hasta 400 Hz, es decir 1 o cercano a 1, a partir de 500 registra valores menores a 0.9 y un ligero decrecimiento al elevarse las frecuencias demostrando que existe alta reflexión para todas las frecuencias analizadas.

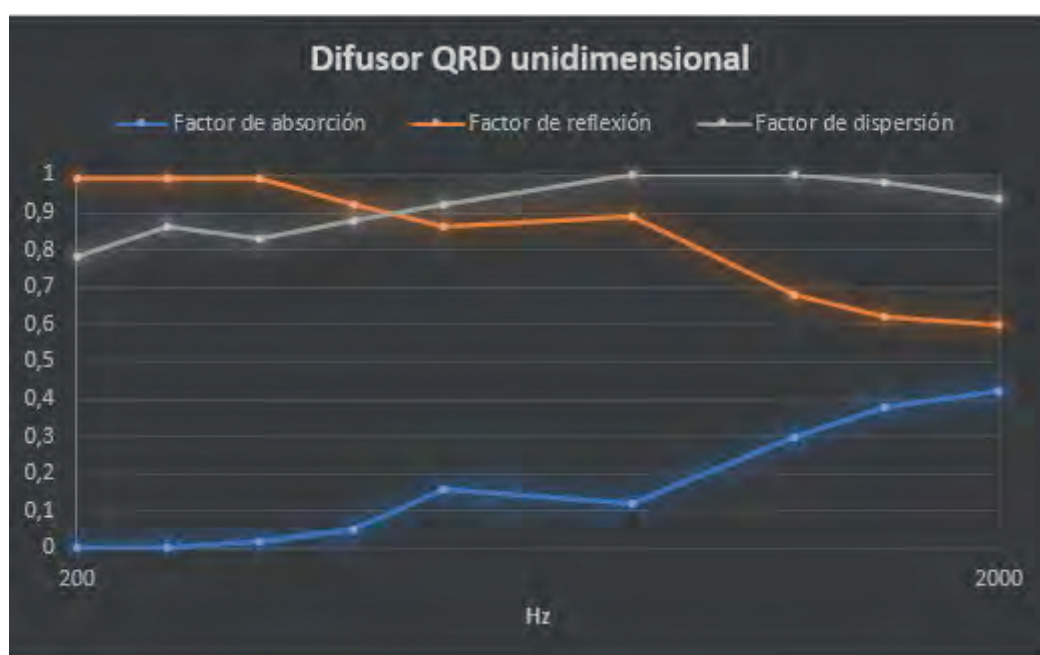


Figura 51. Factor de reflexión (R), factor de absorción (α) y factor de dispersión (s) de un difusor QRD unidimensional en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

Mediante la ec.(2.18) se calcula el factor de dispersión, mismo que ayudará a corroborar el comportamiento de este difusor con los modelos de los metamateriales análogos. Tomando en consideración que de la relación entre energía reflejada de forma oblicua y la energía total refleja se obtiene la curva del factor de dispersión se presenta la figura 51 que muestra el comportamiento que tiene el difusor QRD unidimensional entre las frecuencias de 200 y 2000 Hz. En la cual se aprecia en general el difusor tiene buena dispersión ya que sus valores están por encima de la media y a partir de los 900 Hz se alcanza el valor máximo.

4.4. Metadifusor QR

La figura 52 presenta el campo de dispersión acústica generado por la propagación normal de una onda en dirección del metadifusor basado en el residuo cuadrática QRM en el eje x para 500 Hz. La energía se ve dispersa en el frente del panel.

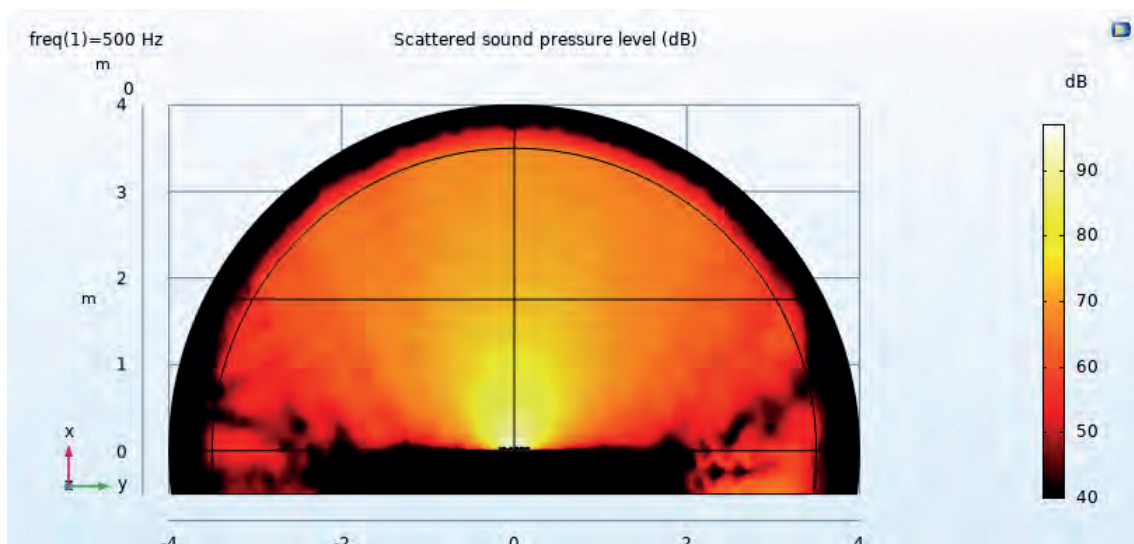


Figura 52. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un metadifusor QR en el eje x .

La figura 53 representa la dispersión de la presión en el QRM, pero con una angulación de 20° respecto al eje x , es decir incidencia oblicua. La figura 53 mantiene la característica de que la energía se concentra al frente del panel. La dispersión es mayor en vista de que la energía se reparte en todas direcciones pese a variar el ángulo de incidencia de la onda.

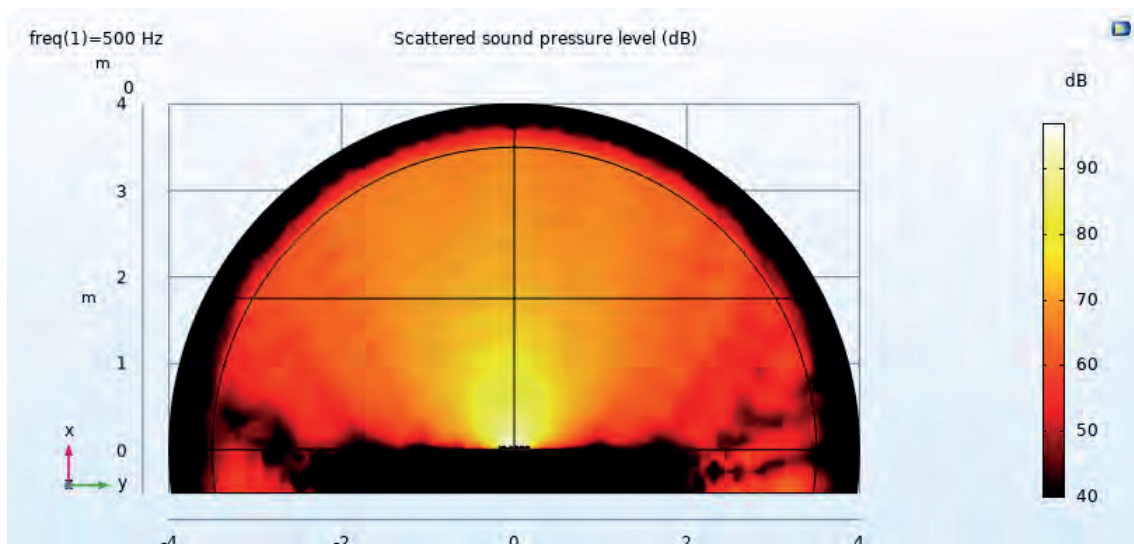


Figura 53. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia oblicua de la onda con 20° respecto a un metadifusor QR en el eje x .

4.4.1. Patrón polar

El QRM presenta un patrón polar en campo lejano en la figura 54, el cual se evidencia el patrón muestra una mayor difusión de la energía en todas las direcciones. Al implementar la incidencia oblicua de 20° la figura 55 registra un incremento leve en la difusión, es ligeramente mayor al lado izquierdo por el cual incide la onda.

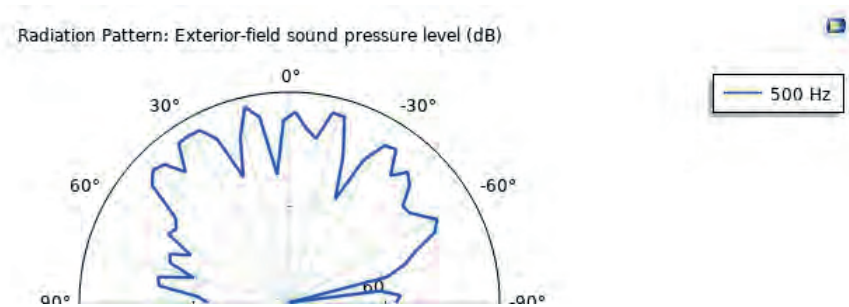


Figura 54. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 500 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un QRM en el eje x .

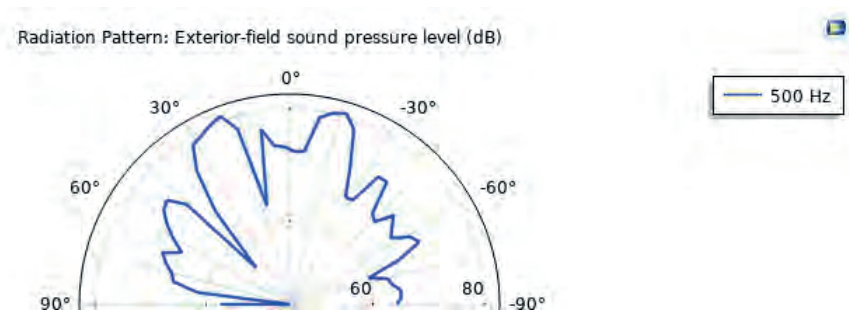


Figura 55. Patrón polar de la radiación del campo sonoro para 500 Hz con incidencia oblicua de una onda con 20° respecto a un QRM en el eje x .

4.4.2. Impedancia

La parte real de la impedancia se genera un pico en 800 Hz como se ve en la figura 56 permitiendo la mayor cantidad de disipación de energía incidente para esa frecuencia, además la parte imaginaria tiene dos picos considerables, el primero en la frecuencia de diseño y el segundo en 1200 Hz y se puede denotar que la energía es reflejada en todo el espectro de frecuencias graficado.

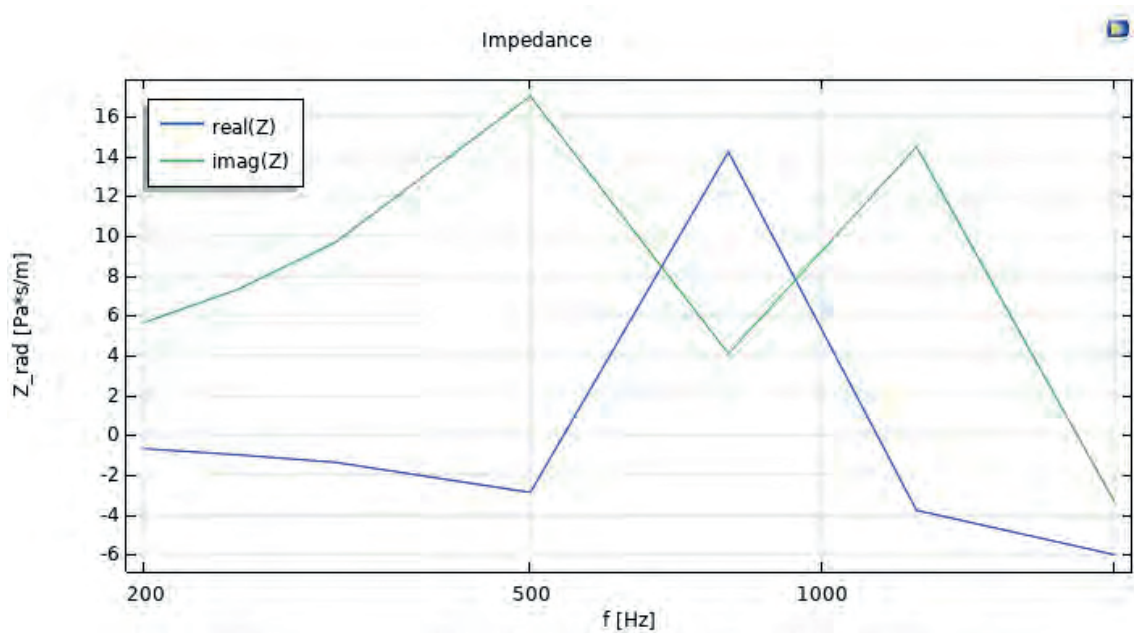


Figura 56. Impedancia acústica de un metadifusor QR en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

4.4.3. Factor de absorción, reflexión y dispersión.

El factor de reflexión para bajas frecuencias va creciendo desde el 0.55 hasta llegar a 500 Hz donde se produce el máximo de reflexión llegando a 0.91. A partir de 500 Hz, decrece el valor estableciéndose un aproximado de 0.58 en los 800 Hz. Hacia frecuencias más altas la reflexión aumenta hasta llegar a los 1200 Hz (con un valor del coeficiente de reflexión de 0.88), frecuencia a partir de la que comienza a decrecer hasta los 2000 Hz (con un coeficiente de reflexión de 0.25) tal como se observa en la figura 57.

En el caso de la figura 57 el factor de absorción va decreciendo a partir de 200 Hz hasta llegar a los 500 Hz donde se evidencia un valor mínimo de 0.16. A partir de allí la curva vuelve a crecer llegando a los 800 Hz donde se alcanza un valor de 0.4. A los 1000 Hz se registran 0.18 de coeficiente de absorción y va creciendo hasta los 2000 Hz donde el valor es de 0.78.

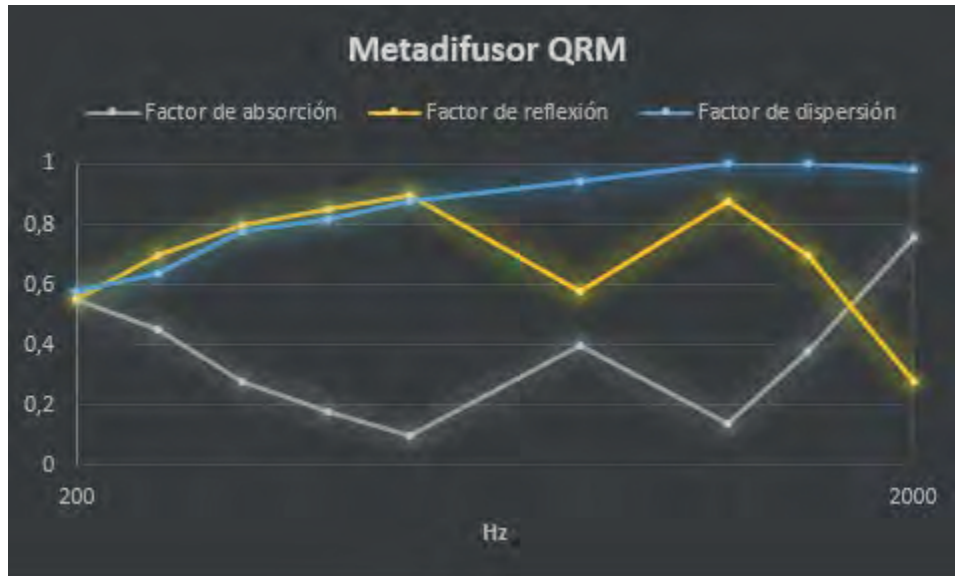


Figura 57. Factor de reflexión (R), factor de absorción (α) y factor de dispersión (s) de un QRM en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

La figura 57 muestra el comportamiento que tiene la curva de dispersión del metadifusor entre las frecuencias de 200 y 2000 Hz. En toda la curva se observa un comportamiento creciente de principio a fin, cabe recalcar que es a partir de 1000 Hz que se alcanza el valor máximo.

4.5. Metadifusor QR de gran ancho de banda

Las figuras 58, 59, 60 y 61 representa gráficamente la dispersión de la energía sonora que incide de forma normal, es decir en el eje x , para las frecuencias de 250, 500, 1000 y 2000 Hz respectivamente.

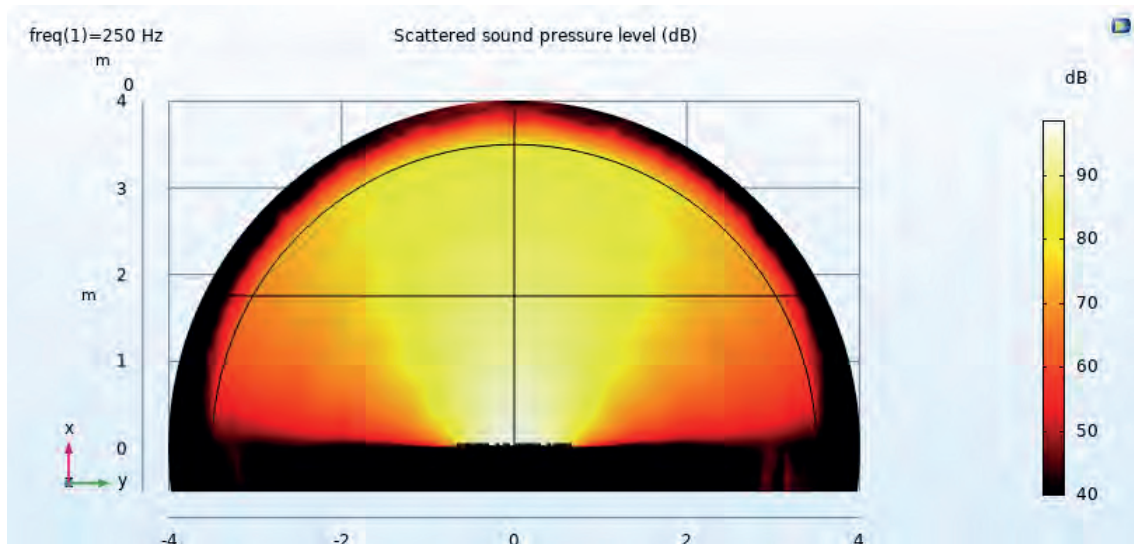


Figura 58. Dispersión sonora para 250 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

Se puede apreciar en baja frecuencia (figuras 58 y 59) que la mayor cantidad de energía se concentra en el centro y se refleja un tanto hacia los lados, pero aun así se puede evidenciar que se tratan de reflexiones especulares.

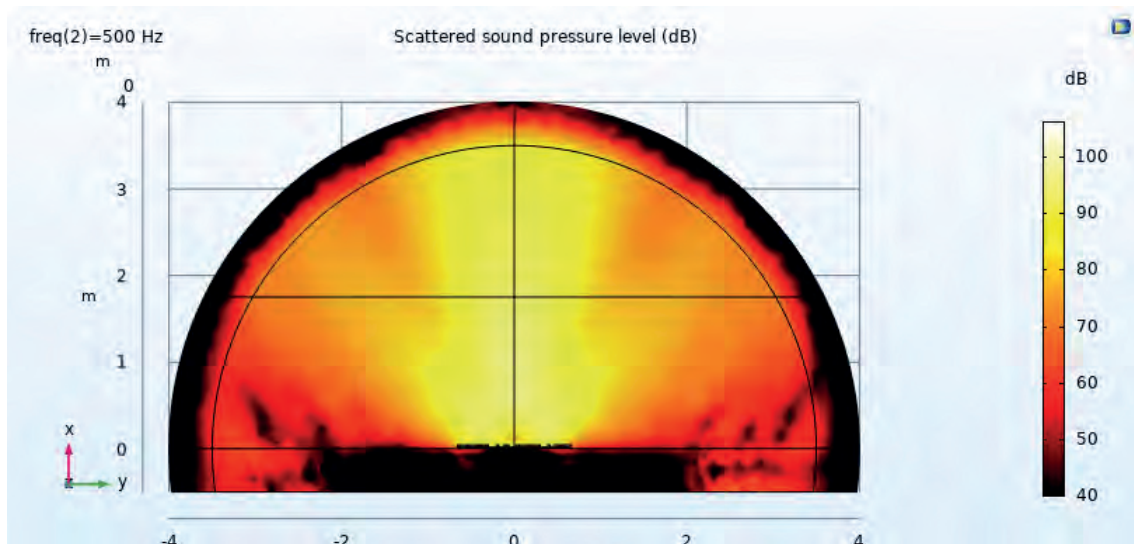


Figura 59. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

Para las frecuencias más altas se aprecia un campo mucho más difuso en todas las direcciones, es decir se reduce la specularidad de la onda incidente, tanto para la figura 60 como para la 61.

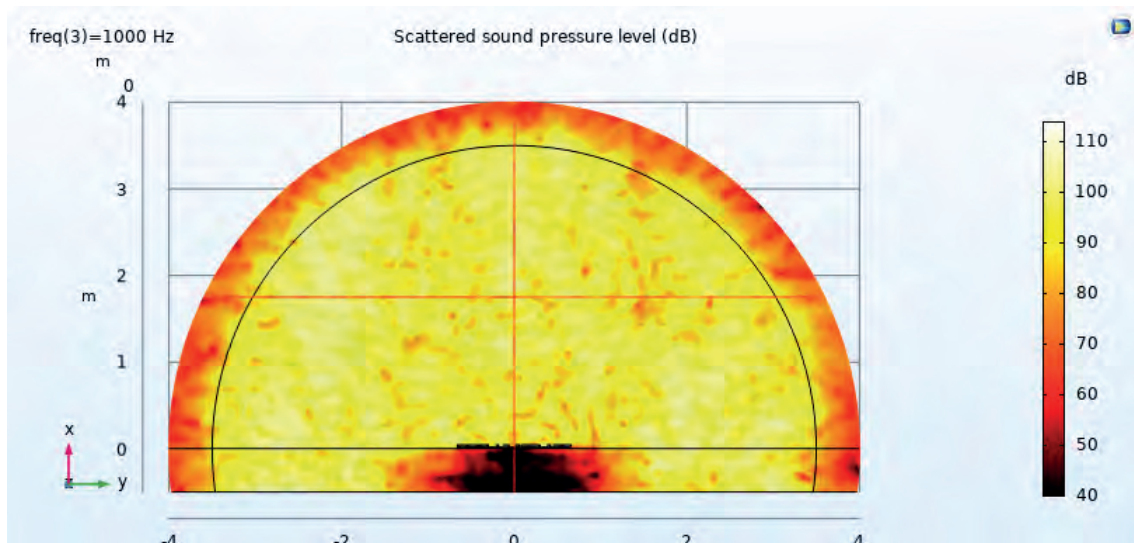


Figura 60. Dispersión sonora para 1000 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

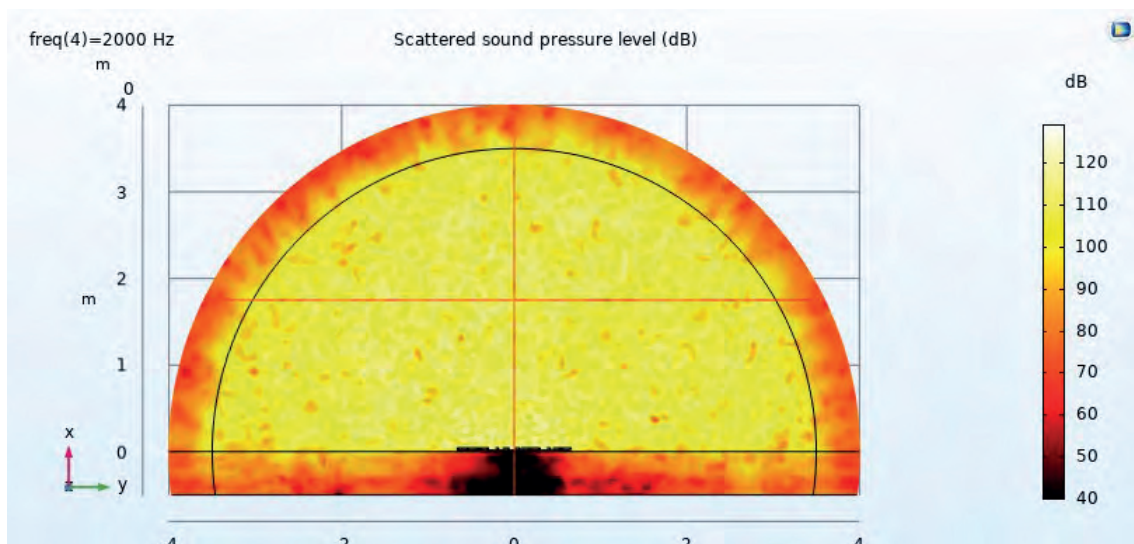


Figura 61. Dispersión sonora para 2000 Hz con incidencia normal de la onda respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

Al generar un cambio en la angulación de 20° en la onda incidente se puede tener una perspectiva diferente en la cual el metadifusor actúa en función del crecimiento de las frecuencias evaluadas tal como se muestra en las figuras 62, 63, 64 y 65. Para baja frecuencia es evidente que la energía está concentrada en su mayoría en el lado incidente de la energía como en la figura 62 y en la figura 63 llega a abrirse más la dispersión pero mantiene el patrón mencionado.

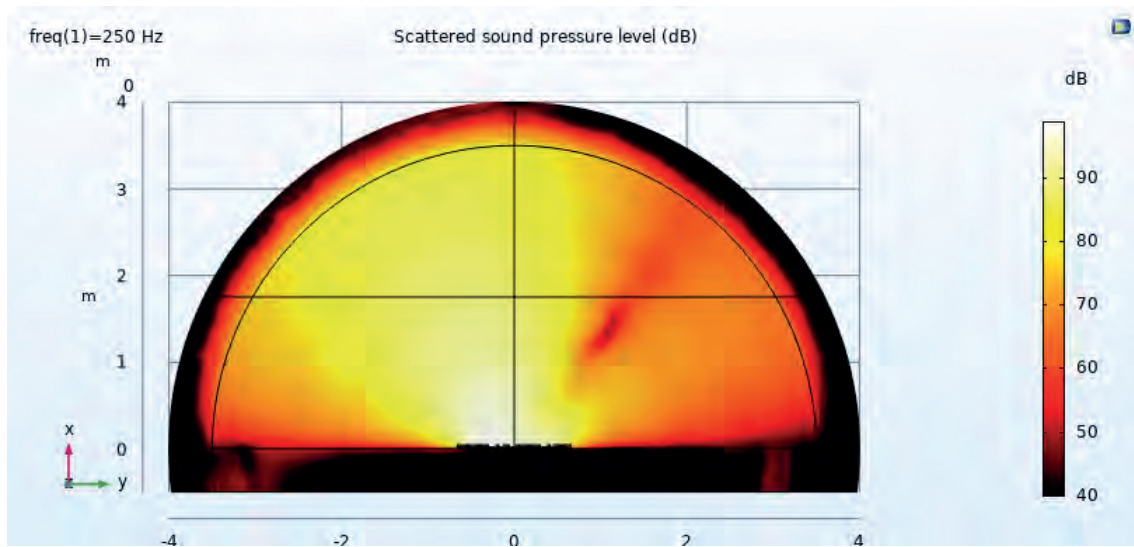


Figura 62. Dispersión sonora para 250 Hz con incidencia oblicua de la onda con 20° respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

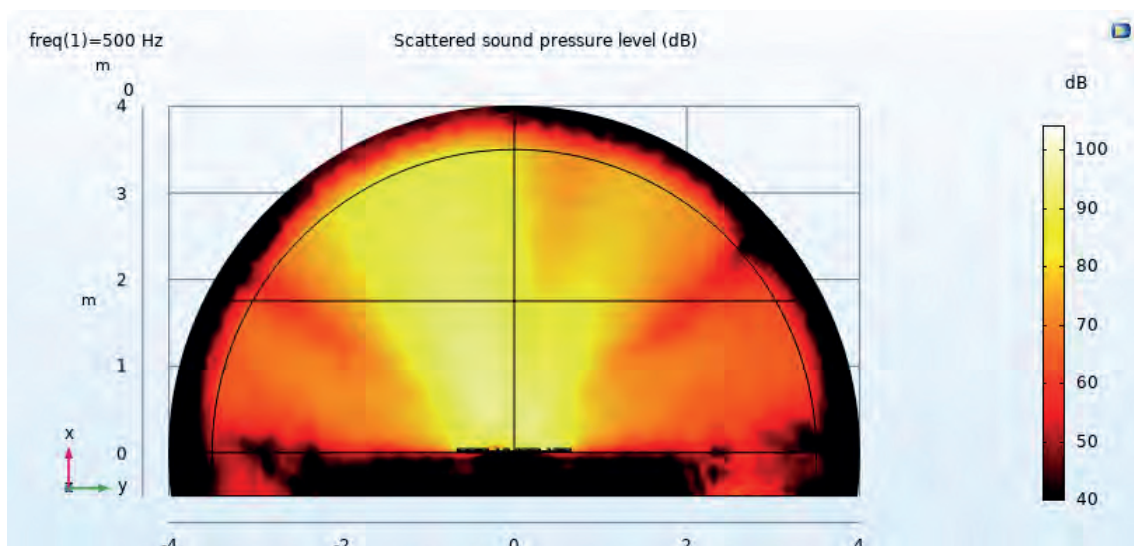


Figura 63. Dispersión sonora para 500 Hz con incidencia oblicua de la onda con 20° respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

Los campos sonoros en las frecuencias más altas se evidencia una dispersión mayor de la energía, evitando la especularidad. En la figura 63 la energía prácticamente es igual en todo el espacio evaluado, a diferencia de la figura 64 que presenta variaciones del nivel de presión sonora, lo cual puede deberse a la longitud de onda y el entorno en el que es evaluado (PML).

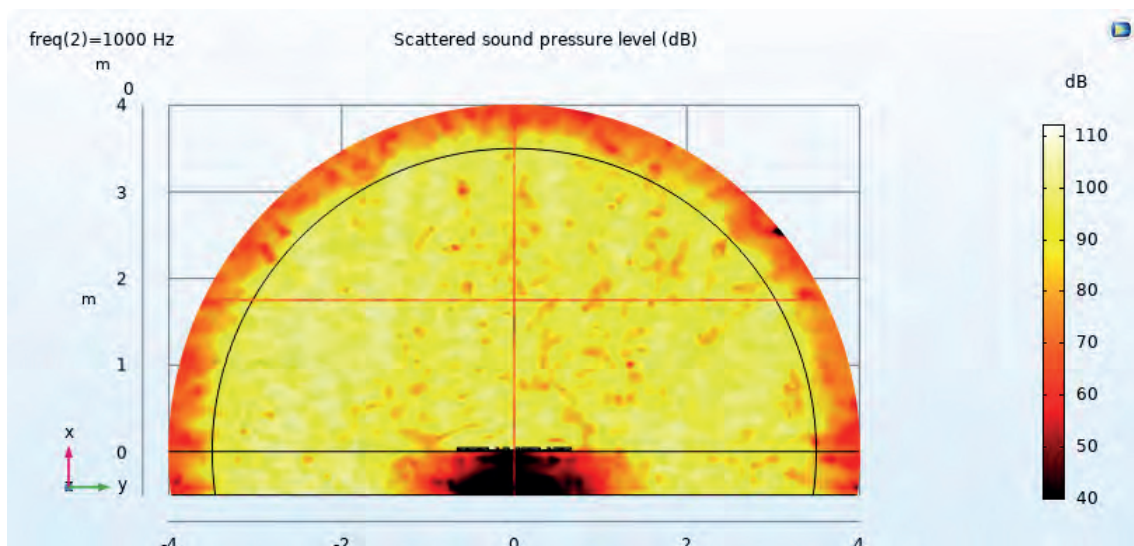


Figura 64. Dispersión sonora para 1000 Hz con incidencia oblicua de la onda con 20° respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

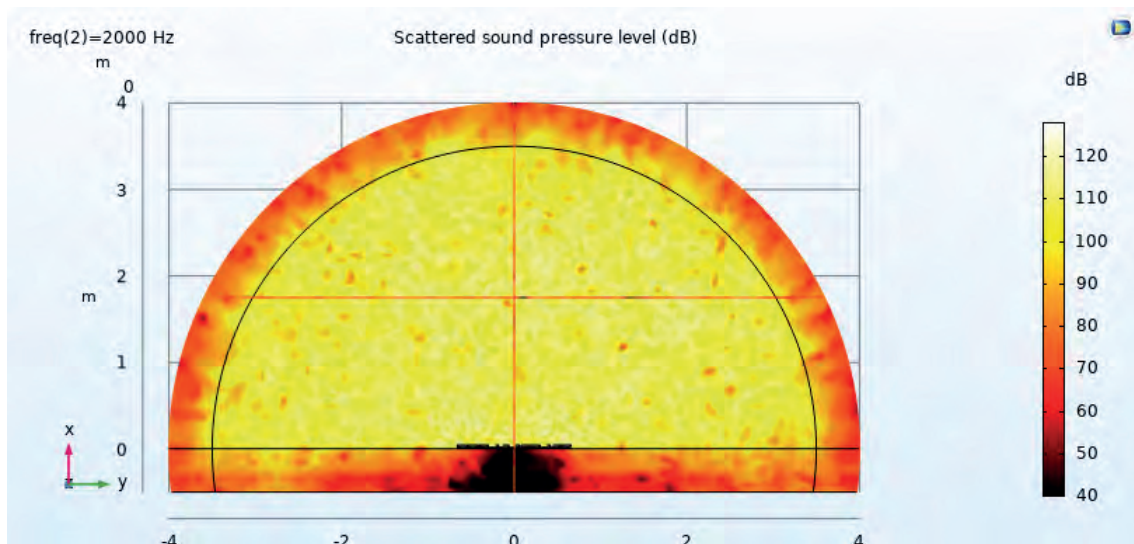


Figura 65. Dispersión sonora para 2000 Hz con incidencia oblicua de la onda con 20° respecto a un metadifusor de gran ancho de banda en el eje x .

4.5.1. Patrón polar

La figura 66 muestra el patrón polar generado por el metadifusor de gran ancho de banda de reflexión en el campo lejano. A 250 Hz se evidencia un solo lóbulo de difusión. A los 500 Hz el patrón cambia y muestra una mayor difusión de la energía en todas las direcciones, pero con mayor concentración en el centro. En 1000 Hz se presenta una gran cantidad de energía radiada en todas las direcciones al igual que en los 2000 Hz, pero en este último tiene un menor alcance.

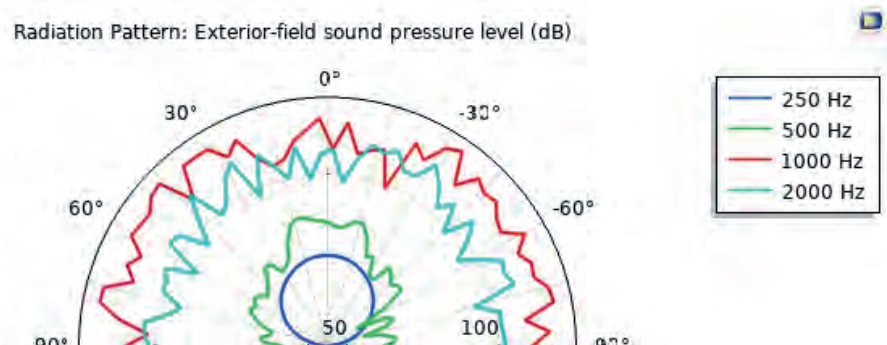


Figura 66. Patrón polar de la radiación del campo lejano con incidencia normal de la onda.

La figura 67 la cual presenta la incidencia de la onda angulada 20° en el eje x registra en 200 Hz difusión de la energía de forma amplia, pero con mayor presencia en la parte izquierda. En 500 Hz es más evidente dicha difusión de energía puesto que presenta 2 lóbulos principales en el centro. En comparación con la figura 66 en las frecuencias de 1000 y 2000 Hz la diferencia es pequeña, ya que los patrones son similares salvo que la energía reflejada al frente del metadifusor en el eje x tiene un alcance reducido.

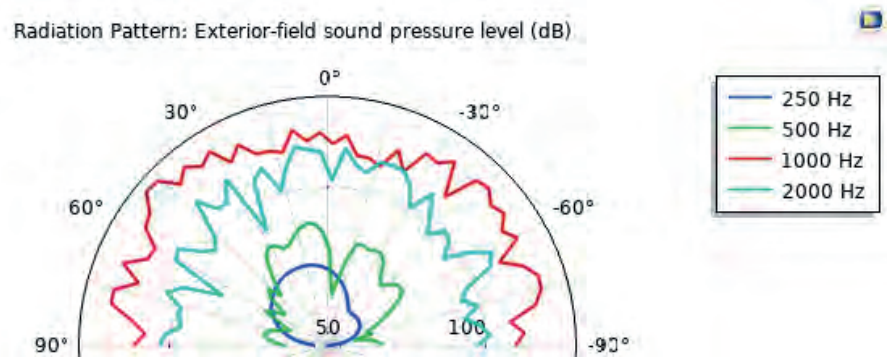


Figura 67. Patrón polar de la radiación del campo lejano con incidencia oblicua de la onda.

4.5.2. Impedancia

La figura 68 muestra información del metadifusor QR de rango ampliado respecto a las curvas real e imaginaria de impedancia. La curva imaginaria muestra gran cantidad reflejada en baja frecuencia y va decayendo conforme la frecuencia incrementa su valor.

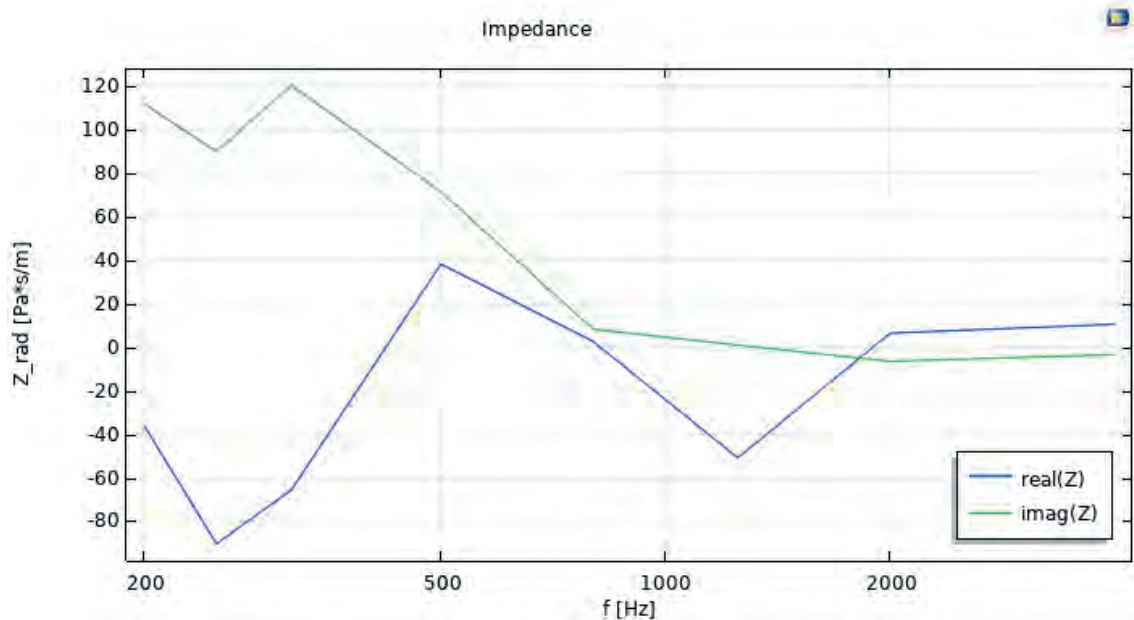


Figura 68. Impedancia acústica de un metadifusor de gran ancho de banda en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

4.5.3. Factor de absorción, reflexión y dispersión

Según la representación de la curva del factor de absorción se evidencia que existe disipación de energía representativa del panel a partir de 500 Hz tal y como se puede observar en la figura 69. Debido a su diseño es importante considerar que no va a disipar tanta energía ya que lo que se pretende es que la distribuya en el espacio.

El factor de reflexión para bajas frecuencias se muestra estable en un valor de 1 hasta llegar a 500 Hz donde se comienza a evidenciar un ligero decaimiento hasta los 800 Hz donde se reporta un valor de 0.7 dando paso a un incremento hasta los 0.85 en 1200 Hz y de ahí baja la curva hasta el 0.5 en la frecuencia de 2000 Hz, como se puede evidenciar en la figura 69 en todo el espectro de frecuencias existe reflexión.

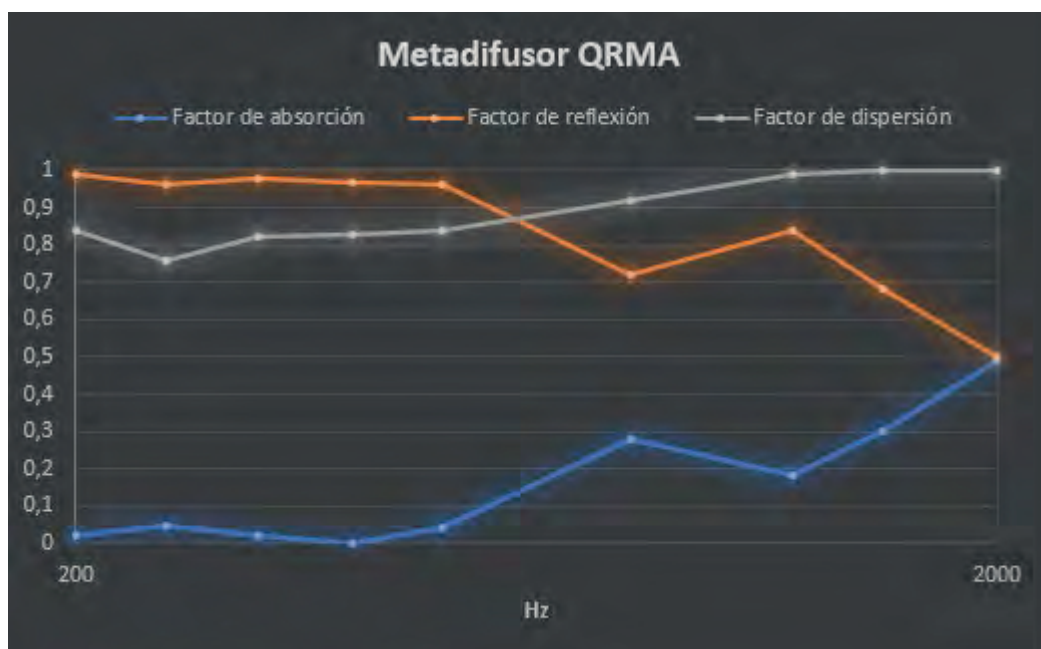


Figura 69. Factor de reflexión (R), factor de absorción (α) y factor de dispersión (s) de un metadifusor de rango ampliado QR en el espectro de frecuencias de 200 a 2000 Hz.

Por último, el factor de dispersión también representado en la figura 69 muestra a lo largo del espectro en frecuencias que va de 200 a 2000 Hz valores cercanos

al máximo tanto en baja frecuencia como en las más altas, por lo que se puede constatar con los resultados gráficos obtenidos en las figuras 61, 62, 63 y 64.

5. Comparación de resultados

Los resultados de dispersión sonora del difusor QRD unidimensional diseñado para 500 Hz mostrados en las figuras 46 y 47 son comparables tanto en incidencia normal del sonido como en incidencia oblicua con los resultados del metadifusor QR diseñado para trabajar en 500 Hz de las figuras 52 y 53. Ambos campos sonoros generados son difusos en todas las direcciones, pero en el difusor se genera mayor nivel de presión sonora que en el metadifusor. Esa diferencia puede deberse a las dimensiones del metadifusor y a que está siendo evaluado el interior de la PML la cual tiene adaptada de forma adyacente una capa absorbente la cual disipa parte de la energía.

El metadifusor QR de gran ancho de banda el cual está optimizado por Jiménez et al. (2017a) para trabajar en un rango de 250 a 2000 Hz presenta similitudes con los resultados de la dispersión sonora del difusor y metadifusor en 500 Hz.

Los patrones polares de los metadifusores presentados en las figuras 54 y 66 presentan una buena difusión de la energía incidente de forma normal en 500 Hz, cabe recalcar que se los puede comparar así ya que ambos metadifusores han sido evaluados en la misma frecuencia. Analizando los resultados se puede ver que de forma oblicua el QRM presenta mejor difusión, figura 54, que la presentada por el metadifusor de rango ampliado, figura 65.

El factor de dispersión presenta información diferente a la obtenida según los resultados de la difusión sonora, ambas se complementan y permiten una caracterización de un difusor de forma acertada, por ende, en las figuras 51, 57 y 69 que pertenecen al QRD, al QRM y al metadifusor de gran ancho de banda respectivamente, se puede apreciar una característica muy similar en todos ellos ya que para las frecuencia más altas evaluadas presentan un valor de 1 el cual es considerablemente alto, es decir, mantiene una buena dispersión de la

energía incidente fuera de la zona especular. En bajas frecuencias el QRD y el metadifusor de gran ancho de banda presentan en el factor de dispersión un resultado que están entre el 0.75 y 0.9 el cual no está mal y que de igual manera denota que la energía incidente se encuentra lejos de la zona especular al ser reflejada. En cuanto al QRM se evidencia valores desde 0.6 en 200 Hz y va incrementándose conforme va creciendo la frecuencia, en este caso la dispersión presentaría ciertas reflexiones de la energía situadas en la zona especular.

En el caso del metadifusor QRM se presenta un valor bajo del factor de absorción en casi todas las frecuencias estudiadas, se puede inferir que dicha absorción se debe por su estructura que posee al interior resonadores de Helmholtz y disminuye la velocidad de propagación en el interior, generando disipación de energía. En comparación con la curva del factor de absorción del QRM con la del QRD se evidencia mayor energía disipada por parte de la estructura del QRM.

En la tabla 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos en simulación que caracterizan tanto al difusor QRD como del metedifusor QRM. De allí se puede evaluar que tan conveniente es proceder con una posible implementación para acústica de salas.

Tabla 9. *Resumen de los resultados obtenidos para el difusor QRD y el metadifusor QR.*

Cuadro Comparativo		
Difusor	QRD	QRM
Factor de absorción	Presenta absorción de energía incidente a partir de los 300 Hz. Ver figura 50.	La energía incidente es absorbida en todo el espectro de frecuencias evaluado. Ver figura 59.

Factor de dispersión	La energía incidente en su gran mayoría es dispersada alejada de la zona especular debido a que su valor es superior a 0.9 en todo el espectro de frecuencias.	Para los 200 Hz el valor es de 0.6 y crece hasta 500 Hz donde se registra valores superiores a 0.9.
Difusión sonora	La energía oblicua en bajas frecuencias no es reflejada en todas las direcciones de forma uniforme.	En baja frecuencia refleja de forma uniforme en todas las direcciones posibles a la energía oblicua.
Espesor	0.30 m.	0.02 m

Considerando la tabla 9 se puede decir que el metadifusor tiene un espesor menor que el difusor, sus resultados en cuanto a dispersión sonora son relativamente buenos y su difusión de energía sonora oblicua tanto en baja frecuencia como en alta es aceptable es posible su uso para corregir problemas de ecos flotantes, reflexiones especulares y podría contribuir con la modificación del tiempo de reverberación.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Se lograron obtener los coeficientes de dispersión y absorción acústica de ambos metadifusores basados en el modelo de residuo cuadrático. El QRM presenta resultados diferentes a los de un difusor QRD diseñado para trabajar en 500 Hz al igual que el metadifusor, pero utilizarlo para controlar problemas de ecos o reflexiones especulares en baja frecuencia es posible tras analizar adicionalmente la difusión de cada uno mediante el patrón de radiación polar. En

dicho patrón se identifica buena respuesta desde 250 Hz. Además, el espacio que requiere es mucho menor que un difusor tradicional.

El metadifusor de gran ancho de banda, que también basa su diseño en el modelo de residuo cuadrático al igual que el metadifusor que está diseñado para trabajar efectivamente en 500 Hz. Ambos presentan resultados distintos en el factor de reflexión, dispersión y esto es debido a que está previamente elaborado el diseño del metadifusor de gran ancho de banda para que se amplíe el rango de frecuencias efectivas en cuanto a difusión sonora. Además de tener una buena difusión en las frecuencias evaluadas también, se evidencian altos valores en el coeficiente de dispersión y del coeficiente de absorción, que son notorios a partir de los 500 Hz.

Comsol es una herramienta práctica y útil para realizar predicciones de los distintos fenómenos físicos. En el caso de los modelos de difusores se logró obtener la impedancia de una superficie mediante el uso de la ecuación ec.(2.13) ya que el programa no realiza un cálculo automático, a diferencia de la dispersión acústica, que si la calcula y grafica. Estos dos cálculos permiten obtener el resto de resultados asociados.

Los resultados de los metadifusores, pese a que son obtenidos relacionando la información presentada en el marco teórico con los modelos de predicción, pueden presentar ciertos errores al momento de calcular en comparación con resultados experimentales. Por ello se contrasta la información obtenida como el caso de la dispersión y difusión de la energía sonora mediante la realización de modelos con paneles que tienen un comportamiento conocido como el de la pared plana reflectante. Así se pudo comprobar que los modelos entregan información válida.

Utilizar un metadifusor QR genera buenos resultados en acústica de salas, ya que refleja el sonido de manera dispersa, evitando reflexiones especulares en frecuencias bajas. Los resultados son mejores que los de un difusor QRD, que

si presenta reflexiones especulares: Además su estructura tiene un espesor inferior al de los difusores tradicionales otorgándole una razón para seleccionarlos al momento de tomar una decisión en el uso de paneles en acústica de salas.

Cabe recalcar que los resultados obtenidos pueden variar considerando diversos factores como el tamaño y el tipo de mallado que se utiliza para la simulación, es decir que si se incrementa el tamaño mínimo de mallado no será contraproducente ya que se tendrá imágenes de resultados con mayor precisión, pero con ciertas limitantes dependiendo el tipo de ordenador en el que se simule. Al añadir pérdidas termoviscosas se puede alcanzar a determinar la proyección de la energía reflejada con mayor precisión. Adicionalmente, otra manera de modificarlos es utilizando distintos materiales de diseño en las estructuras de los paneles, ya que se proporcionará una velocidad de propagación del sonido y la densidad distintos.

El método de elementos finitos (FEM) presenta resultados fiables en torno al campo lejano, pero para representar el campo cercano puede ser preferible añadir otros métodos de cálculos.

Finalmente, el uso de metamateriales está siendo investigado para determinar todos sus pros y contras al momento de determinar soluciones de acondicionamiento acústico. Por lo que estos pueden tomar distintas formas y dimensiones, como el caso de los mismos difusores, paneles absorbentes o elementos nuevos que combinen ambas propiedades optimizando recursos.

6.2. Recomendaciones

Al construir las geometrías en Comsol es preferible evitar construir varios elementos que se unen para conformar una estructura compleja, ya que al generar el mallado el tiempo de procesamiento puede llegar a ser excesivamente alto. Además, si los datos de la simulación no son los correctos, y se debe volver

a calcular se perderá mucho tiempo. Por ello, en el caso del diseño de los metamateriales, se tomó un bloque sólido y se eliminaron las ranuras, obteniendo así una estructura simple que permite un buen mallado y por ende un procesado en un tiempo aceptable.

Es posible introducir ecuaciones en Comsol y realizar cálculos en base a ellas. Los resultados que se obtienen a través de las ecuaciones se pueden graficar. Para facilitar la introducción de ecuaciones es preferible crear variables mediante las que se definan de forma concreta valores, y permitan un cálculo más eficiente.

Para evitar incurrir en pérdidas de tiempo al momento de simular es factible realizar un estudio de convergencia del modelo, que determine el tipo de mallado que se debe utilizar en función del tiempo que emplea en realizar la predicción.

Presentar información únicamente del factor de reflexión o la difusión generada para cualquier superficie no absorbente no es útil, ya que ambos parámetros se complementan. Por lo tanto, es importante que se brinde esta información de forma conjunta.

Para la simulación se puede utilizar cualquier tipo de geometría en el diseño de la PML, pero hay que considerar el tipo de resultados que se esperan obtener. A partir de ellos, hay que analizar los distintos escenarios que se pueden presentar siendo cuidadosos al momento de seleccionar el elemento a utilizar. Y al igual que en el diseño de la geometría de los metadifusores, es preferible que dicha estructura sea correspondiente a un solo objeto para evitar las intersecciones ya que al generar la malla puede presentar problemas y tardar mucho en construir el mallado, además tomará más tiempo simular los fenómenos físicos deseados.

Referencias

- Acústica Fácil (s.f.). ABSORBENTES ACÚSTICOS: RESONADORES. Recuperado el 5 de julio de 2020 de <http://www.ingeneriaacusticafacil.com/ingenieria-acustica-los-resonadores-como-absorbentes-acusticos/>
- Arenas, J. (2013). MARCO ANTONIO GAETE URIBE VALDIVIA–CHILE 2013 (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE).
- Autodesk Knowledge Network. (s.f.). Cómo realizar un estudio de convergencia de malla. Simulation Mechanical Recuperado el 5 de julio de 2020 de <https://knowledge.autodesk.com/es/support/simulation-mechanical/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/How-to-Perform-a-Mesh-Convergence-Study.html> Ayuela
- Azcárate, J. M., López, J.M, Fiol, M. Ecocardiografía en el paciente crítico - Google Libros. (2000.). Recuperado el 4 de julio de 2020 de https://books.google.com.ec/books?id=LBI9oNqKfUQC&pg=PA5&lpg=PA5&dq=reactancia+acustica&source=bl&ots=4Re09tV_Z1&sig=ACfU3U2AKGs3c2WzbWrIFUyKtixYng68WA&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwiD2ta1jq3qAhXuct8KHccaCP0Q6AEwCnoECAkQAQ#v=onepage&q=reactancia+acustica&f=true
- COMSOL, Test bench car interior. Version 5.5, COMSOL, 2019.
- COMSOL, Open pipe. Version 5.5, COMSOL, 2019.
- COMSOL, Acoustic scattering. Version 5.5, COMSOL, 2019.
- Cox, T. J., Dalenback, B. I., D'Antonio, P., Embrechts, J. J., Jeon, J. Y., Mommertz, E., & Vorländer, M. (2006). A tutorial on scattering and diffusion coefficients for room acoustic surfaces. *Acta Acustica united with ACUSTICA*, 92(1), 1-15.
- Cox, T. J., & D'antonio, P. (2009). *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. Crc Press.
- Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N., & Panneton, R. (2010). Evaluation of the acoustic and non-acoustic properties of sound absorbing materials using a three-microphone impedance tube. *Applied Acoustics*, 71(6), 506-509.

El resonador de Helmholtz. (s.f.). Recuperado el 5 de julio de 2020 de <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/acustica/resonador/resonador.htm>

The Effect of Geometrical Parameters on Resonance Characteristics of Acoustic Metamaterials with Negative Effective Modulus. - Free Online Library. (n.d.). Recuperado el 11 de Agosto de 2020 de <https://www.thefreelibrary.com/The+Effect+of+Geometrical+Parameters+on+Resonance+Characteristics+of...-a0575197412>

Gan, W. S. (2018). *Seismic Metamaterials*. In *New Acoustics Based on Metamaterials* (pp. 277-288). Springer, Singapore.

González Salido, N. (2012). Análisis numérico mediante elementos finitos de la dispersión acústica producida por cuerpos elásticos de dimensiones finitas.

Groby, J. P., Wirgin, A., De Ryck, L., Lauriks, W., Gilbert, R. P., & Xu, Y. S. (2009). *Acoustic response of a rigid-frame porous medium plate with a periodic set of inclusions*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2), 685-693.

Hurtado, M. (2001). Electromagnetismo computacional aplicado al diseño de antenas de microtira (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

INASEL (s.f.). Acústica básica difusores. Recuperado el 4 de julio de 2020 de <https://es.slideshare.net/inasel/acstica-bsica-difusores-8650234>

ISO 17497-1: 2012. (2012). Acoustics — Sound-scattering properties of surfaces — Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room

ISO 17497-2: 2012. (2012). Acoustics—Sound-Scattering Properties of Surfaces—Part 2: Measurement of the Directional Diffusion Coefficient in a Free Field.

Jacobsen, F., & Juhl, P. M. (2013). Fundamentals of general linear acoustics.

Jiménez, N., Cox, T. J., Romero-García, V., Groby, J. P., & Messiaen, A. O. (2017a). Metadifusores: difusores acústicos ultrafinos basados en

- metamateriales. In *Tecniaústica 2017: 48º Congreso Español de Acústica; Encuentro Ibérico de Acústica; European Symposium on Underwater Acoustics Applications; European Symposium on Sustainable Building Acoustics: A Coruña 3-6 Octubre 2017* (pp. 757-765). Sociedad Española de Acústica.
- Jiménez, N., Romero-García, V., Pagneux, V., & Groby, J. P. (2017b). Rainbow-trapping absorbers: Broadband, perfect and asymmetric sound absorption by subwavelength panels with ventilation. *arXiv preprint arXiv:1708.03343*.
- Jiménez, N., Romero-García, V., Pagneux, V., Groby, J. P., & Messiaen, A. O. (2017c). Absorción Perfecta de baja frecuencia por paneles acústicos ultrafinos basados en metamateriales. In *48º Congreso español de acústica, Encuentro ibérico de acústica, Tecniaústica A Coruña*.
- John Wiley & Sons. Bradley, C. E. (1991). *Acoustic Bloch wave propagation in a periodic waveguide* (No. ARL-TR-91-19). TEXAS UNIV AT AUSTIN APPLIED RESEARCH LABS.
- Khan Academy. (s.f.). ¿Qué es la aceleración? (artículo) Recuperado el 4 de julio de 2020 de <https://es.khanacademy.org/science/physics/one-dimensional-motion/acceleration-tutorial/a/acceleration-article>
- Lagarrigue, C., Groby, J. P., Tournat, V., Dazel, O., & Umnova, O. (2013). *Absorption of sound by porous layers with embedded periodic arrays of resonant inclusions. The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6), 4670-4680.
- Marcos, L. B., Delgado, A., Editora, P., & Delgado Portela, A. (s.f.). Glosario de Términos Acústicos. Recuperado de www.discript.net
- Möser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería acústica: teoría y aplicaciones*. Springer Science & Business Media.
- Ortí Inglés, C. (2015). *Medida del coeficiente de absorción acústica en agua* (Doctoral dissertation).
- Papadakis, N. M., & Stavroulakis, G. E. (2018). Effect of Mesh Size for Modeling Impulse Responses of Acoustic Spaces via Finite Element Method in the Time Domain. *Euronoise 2018*. Ramírez, R. (2019). Ecuaciones en

- derivadas parciales. Recuperado el 4 de julio de 2020 de https://web.mat.upc.edu/rafael.ramirez/slidesEDs_EDPs.pdf
- Redondo, J., Sánchez-Pérez, J. V., Blasco, X., Herrero, J. M., & Vorländer, M. (2016). *Optimized sound diffusers based on sonic crystals using a multiobjective evolutionary algorithm*. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(5), 2807-2814.
- Salcedo, D. (2019). "Análisis de resonadores de Helmholtz a partir de la implementación del método de elementos finitos". Trabajo de grado Ingeniería de Sonido, Universidad de San Buenaventura Medellín, Facultad de Ingenierías.
- Sintec. (s.f.). Conceptos fundamentales del sonido. Recuperado el 4 de julio de 2020 de <http://www.acdacustics.com/files/conceptos.pdf>
- Schroeder, M. R. (1975). "Diffuse sound reflection by maximum-length sequences," *J. Acoust. Soc. Am.*, 57(1), 149-50.
- Tech Topic. (s.f.). Recuperado el 5 de julio de 2020 de <https://www.rpgacoustic.com/documents/2016/09/scattering-vs-diffusion.pdf/>
- Wang, X., & Mak, C. M. (2012). Wave propagation in a duct with a periodic Helmholtz resonators array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2), 1172-1182.
- 3 Acoustics. (s.f.). Recuperado el 8 de agosto de 2020 de http://www.tonmeister.ca/main/textbook/intro_to_sound_recordingch4.html

