



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE **UPV** INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO EN UN DIFUSOR ACÚSTICO BASADO EN CRISTALES DE SONIDO

Josep Casanova Masjoan

Tutor: Jose Maria Bravo Plana-Sala

Cotutor: Francisco Javier Redondo Pastor

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2017-18

Valencia, 30 de noviembre de 2017

Resumen

Uno de los objetivos de estudio en el campo de la Acústica de Salas es conseguir que el sonido proveniente de una o múltiples fuentes sea irradiado homogéneamente en todas direcciones logrando un campo sonoro difuso ideal. Se conoce que los difusores de sonido son capaces de mejorar el rendimiento acústico de una sala, aumentando la difusión del campo sonoro, dando una mejor percepción subjetiva de espacialidad y eliminando ecos, focalizaciones, coloraciones y efectos de procedencia erróneos. Los difusores acústicos empleados habitualmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, generalmente en frecuencias medias y altas, ya que para la difusión en bajas frecuencias se necesitarían elementos de un grosor muy grande restando demasiada superficie útil a la sala.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un difusor acústico que permita superar las limitaciones de los difusores comerciales convencionales, actuando en un rango de frecuencias más grave con un espesor limitado. Para tratar de conseguirlo el difusor acústico estará basado en elementos en secuencia más o menos periódica denominados cristales de sonido.

Resum

Un dels objectius d'estudi en el camp de l'Acústica de Sales és aconseguir que el so provinent d'una o múltiples fonts siga irradiat homogèniament en totes direccions aconseguint un camp sonor difús ideal. Es coneix que els difusors de so són capaços de millorar el rendiment acústic d'una sala, augmentant la difusió del camp sonor, donant una millor percepció subjectiva d'espacialitat i eliminant ressons, focalitzacions, coloracions i efectes de procedència erronis. Els difusors acústics empleats habitualment treballen en un rang de freqüències limitat, generalment en freqüències mitjanes i altes, ja que per a la difusió en baixes freqüències es necessitarien elements d'un grossor molt alt restant massa superfície útil a la sala. L'objectiu d'aquest treball és desenvolupar un difusor acústic que permeti superar les limitacions dels difusors comercials convencionals, actuant en un rang de freqüències més greu. Per a tractar d'aconseguir-ho el difusor acústic estarà basat en elements en seqüència més o menys periòdica denominats cristalls de so.

Abstract

One of the aims of study in the field of Room Acoustics is to achieve that the sound coming from one or multiple sources is irradiated homogeneously in all directions achieving an ideal diffuse sound field. It is known that sound diffusers are capable of improving the acoustic performance of a room, increasing the diffusion of the sound field, giving a better subjective perception of spatiality and eliminating echoes, focalizations, colorations and erroneous effects of origin. The most commonly used acoustic diffusers work in a limited range of frequency, generally in medium and high frequencies, since elements of a very large thickness would be needed in order to achieve diffusion in low frequencies, subtracting too much useful surface from the room.

The main objective of the present work is to develop an acoustic diffuser that allows to overcome the limitations of conventional commercial diffusers, acting in a range of lower frequencies. In order to achieve this, the acoustic diffuser will be based on elements in more or less periodic sequence called sonic crystals

Índice

Capítulo 1. Objeto y antecedentes.....	2
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos	2
Capítulo 2. Marco Teórico	3
2.1 Difusores	3
2.2 Tipologías de los difusores.....	3
2.3 Difusores de estructura cristalina	7
2.4 Cuantificación de la calidad de un difusor	11
2.5 Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)	12
2.6 Optimización	15
Capítulo 3. Desarrollo del trabajo	18
3.1 Introducción	18
3.2 Diseño del prototipo.....	18
3.3 Sistema y equipo de medida.....	26
3.4 Tratamiento de los datos obtenidos experimentalmente	30
Capítulo 4. Resultados	32
Capítulo 5. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro	35
Capítulo 6. Bibliografía.....	36

Capítulo 1. Objeto y antecedentes

1.1 Introducción

Hace siglos que se estudia la acústica de salas, los primeros indicios del interés en la acústica vienen de los teatros griegos y romanos. Pero hasta el siglo XIX no se produce un gran desarrollo científico en esta rama, esto fue gracias a las aportaciones de Sabine o Rayleigh. Hasta la presentación de la famosa fórmula del físico W. C. Sabine, que relaciona el tiempo de reverberación de una sala con el volumen de esta y la absorción de sus materiales, las soluciones a las que se recurría para controlar la acústica procedían de conocimientos empíricos.

La principal finalidad de la acústica de salas es conseguir que el sonido sea irradiado homogéneamente consiguiendo un campo sonoro difuso ideal, eliminando las reflexiones especulares en ciertas zonas conflictivas de la sala. Para conseguir este acondicionamiento se utilizan materiales y sistemas acústicos, absorbentes o difusores, aplicados en suelos, paredes y techos.

Los difusores acústicos empleados habitualmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, generalmente, a frecuencias medias y altas, por estar relacionadas con las longitudes de onda de menor longitud. El tamaño del difusor debe tener un tamaño acorde a la longitud de onda, por lo que ocuparía grandes dimensiones en la difusión de las bajas frecuencias. El difusor a estudio pretende dar una solución a esta problemática actuando sobre un rango de frecuencias más bajo.

1.2 Objetivos

El primer objetivo de este trabajo es profundizar en el estudio de los difusores, haciendo una revisión de las diferentes opciones empleadas para conseguir una mejor difusión de la señal sonora, así como, sus limitaciones.

El segundo es el diseño y fabricación de un dispositivo de alto rendimiento fundamentado en una nueva tecnología basada en cristales de sonido. Para el diseño se hará un uso conjunto de un algoritmo de optimización multiobjetivo y el método de simulación numérica FDTD, los diferentes algoritmos estarán programados bajo el software matemático *Matlab* de Mathworks.

El tercero es la fabricación de un prototipo de dimensiones reales que permita medir la difusión del sistema dando una contrastación experimental a la experiencia. La medida se ha realizado en campo libre siguiendo la norma ISO 17497-2, atendiendo tanto en el procedimiento de medida como al posterior procesado de datos.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Difusores

Un difusor acústico es toda superficie capaz de difundir la energía acústica incidente redistribuyéndola en el espacio y en el tiempo. Cuando el sonido emitido por una fuente alcanza una superficie rígida y uniforme, este es reflejado con el mismo ángulo de incidencia siguiendo la ley de Snell. Los difusores consiguen dispersar la energía de la señal (*difusión espacial*), además de devolver el sonido de forma progresiva (*difusión temporal*).

Los difusores permiten controlar los siguientes fenómenos acústicos y psicoacústicos: uniformidad, ecos, coloración e impresión espacial. Parámetros que se describen a continuación de forma breve.

- La uniformidad informa de la variación de las condiciones sonoras de escucha en los diferentes puntos de la sala. Está relacionada con la distribución espacial del nivel sonoro y se asocia tanto a las reflexiones tempranas como al campo difuso.
- Los ecos son reflexiones con un nivel mayor al de la reverberación global y que son percibidos como sonidos independientes. En concreto se deben controlar las reflexiones molestas para la escucha.
- La coloración y la impresión espacial son efectos psicoacústicos. La coloración indica una alteración en el timbre debido a las primeras reflexiones, mientras que la impresión espacial informa de alteraciones debidas a las reflexiones laterales en la sala.

La difusión de una superficie se caracteriza mediante diagramas polares, existe una curva polar para cada banda de frecuencia, ángulo de incidencia y distancias tanto de la fuente como del receptor. En la mayoría de situaciones prácticas no es necesario tanto detalle por lo que es interesante disponer de un parámetro que englobe los datos de cada diagrama polar permitiendo evaluar rápidamente la calidad de un difusor. Actualmente se utilizan dos índices: *coeficiente de difusión* y *coeficiente de scattering*. Cada uno, con sus ventajas e inconvenientes, pero son complementarios, por lo que generalmente es aconsejable hacer uso de ambos coeficientes. La determinación y medición de estos coeficientes será explicada más adelante (aptdo. 2.4)

2.2 Tipologías de los difusores

Existen diferentes tipos de difusores construidos con irregularidades y relieves en la superficie de los paneles, de acuerdo con secuencias matemáticas previamente definidas. Hay que tener presente que las dimensiones del difusor limitarán la banda de frecuencias de difusión.

Como ya se ha comentado, las dimensiones de las irregularidades tienen que tener el mismo orden de magnitud que la longitud de onda asociada para que el difusor sea efectivo. En caso contrario las reflexiones generadas serán especulares, es decir, si el orden de magnitud de la longitud de onda es mayor al de las irregularidades del difusor, a efectos de la onda sonora incidente es como si las irregularidades no existiesen.

2.2.1 Difusores Policilíndricos

Consisten en paneles lisos de forma convexa dispuestos secuencialmente y con un radio de curvatura menor a los 5 m. Si el radio de curvatura del panel fuera mayor a los 5 m, el panel actuaría como un reflector. Para su construcción se suele utilizar madera.



Figura 1. Modelo comercial difusor policilíndrico

2.2.2 Difusores acústicos de fase (o de Schroeder)

Tienen su origen en la denominada teoría de los números, desarrollada por el investigador alemán Manfred R. Schroeder. Se apoyan en secuencias matemáticas previamente diseñadas para un margen de frecuencia determinado, están basados en las redes de difracción ópticas. Consisten en una serie de hendiduras de diferentes profundidades, donde cada hendidura modifica la fase del frente de ondas por la diferencia de camino recorrido por cada porción del mismo. El sonido reflejado es el resultado de la interferencia entre las diferentes porciones del frente de ondas, facilitando así, una dispersión controlada para un amplio rango frecuencial. Los difusores de este tipo también se pueden denominar RPG (Reflection Phase Grating).

2.2.2.1 Difusor MLS

Los difusores MLS (Maximum Length Sequence) están basados en secuencias pseudoaleatorias periódicas binarias, denominadas de longitud máxima.

El elemento se forma a partir de una superficie lisa reflectora, subdividiéndola con tramos de la misma longitud. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia siguiendo el siguiente procedimiento:

- Si el valor es -1, el tramo no se modifica.
- Si el valor es 1, se crea una ranura en el tramo.

La anchura W y la profundidad d siguen las siguientes ecuaciones:

$$W = \lambda/2 \quad (2.1)$$

$$d = \lambda/4 \quad (2.2)$$

Donde λ es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

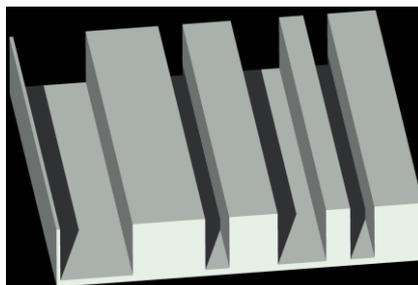


Figura 2. Perfil difusor MLS

A nivel práctico no son muy utilizados ya que fuera del margen frecuencial de diseño se comportan igual que una superficie plana y lisa.

2.2.2.2 Difusor QRD

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadráticos QRD (Quadratic-Residue Diffuser) explicados a continuación.

2.2.2.2.1 Difusor QRD unidimensional

Formados por una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y diferente profundidad. A nivel práctico son los más utilizados, tanto en salas de conciertos como en estudios de grabación. La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de la siguiente secuencia matemática:

$$S_n = n^2 \bmod(p) \quad (2.3)$$

Donde:

p : número primo

$n: \mathbb{Z} \in \{0, p - 1\}$

mod : operación matemática modulo, residuo del cociente entre n^2 y p .

También es conocido como difusor de residuos cuadráticos.



Figura 3. Modelo comercial difusor QRD unidimensional

N	0	1	2	3	4	5	6
N²	0	1	4	9	16	25	36
$S_n = n^2 \bmod(7)$	0	1	4	2	2	4	1

Tabla 1. Secuencia unidimensional de residuos cuadráticos S_n para $P = 7$

2.2.2.2.2 Difusor QRD bidimensional

Surgen de la necesidad de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio. Las ranuras de este tipo de difusores, son sustituidas por pozos, dispuestos en paralelo, de profundidad variable y de forma habitualmente cuadrada. La secuencia de profundidades se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$S_{m,n} = (m^2 + n^2) \bmod(p) \quad (2.4)$$

Donde:

p : número primo

$m, n: \mathbb{Z} \in \{0, p - 1\}$

mod : operación matemática modulo, residuo del cociente entre n^2 y p .



Figura 4: Modelo comercial difusor QRD bidimensional

2.2.2.3 Difusor PRD

Los difusores de raíces primitivas PRD (Primitive-Root Diffuser) son similares a los QRD unidimensionales, la diferencia radica en la secuencia matemática para la obtención de la profundidad de las ranuras. La expresión es la siguiente:

$$S_n = g^n \text{mod}(p) \quad (2.5)$$

Donde:

p : número primo

g : raíz primitiva de p

$n: \mathbb{Z} \in \{1, p - 1\}$

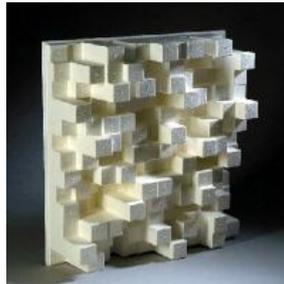


Figura 5: Modelo comercial difusor PRD

2.2.3 Parámetros de diseño

El primer parámetro a seleccionar a la hora de diseñar un difusor es la serie numérica en la que estará basado, además el difusor debe seguir las siguientes ecuaciones:

$$d_n = \frac{S_n c}{2Nf_0}; f_0 = \frac{cm_{max}}{NW}; f_{max} = \frac{c}{2W} \quad (2.6)$$

Donde:

W : anchura de cada hendidura

m_{max} : orden de difracción máximo

N : número de hendiduras

f_0 : frecuencia de diseño

f_{max} : frecuencia máxima de dispersión

Se necesitan tres cualesquiera de estos parámetros, el resto se obtienen a partir de sus relaciones. En caso de haber separadores se debe añadir la anchura de estos a la de cada hendidura en las fórmulas anteriores.

2.3 Difusores de estructura cristalina

2.3.1 Estructuras cristalinas

Se sabe que un gran número de sólidos en la naturaleza poseen estructuras repetitivas y regulares (a nivel microscópico), a tales materiales se les denomina cristales. El trabajo que consiguió confirmar que los cristales estaban formados por una repetición regular de estructuras idénticas (átomos o grupos de átomos) fue presentado en 1912 por Laue, Friedrich y Knipping. Consiguieron demostrar su teoría (1) por medio de estudios realizados en el campo de la difracción de rayos-X.

Debido a la distribución de los átomos, las fuerzas netas de atracción intermolecular son máximas dentro de un sólido cristalino. Estas fuerzas que mantienen la estabilidad del cristal pueden ser iónicas, covalentes, de van der Waals, de enlaces de hidrogeno o una combinación de todas las anteriores.

Un concepto de interés dentro de los cristales es la celda unidad (2). Es la unidad estructural básica que se repite en un sólido cristalino. Si la celda unidad se compone del mínimo volumen posible, se denomina celda primitiva.

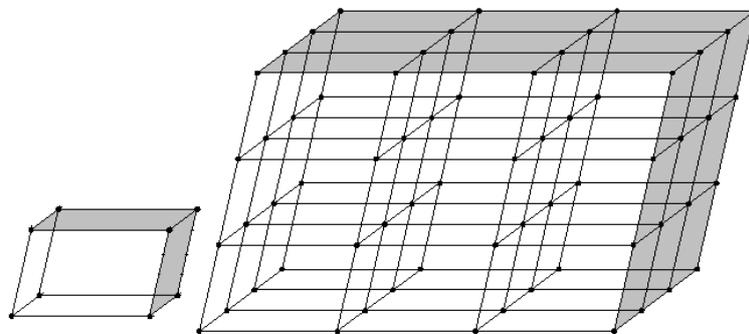


Figura 6: Celda unidad y extensión a tres dimensiones

Un sistema periódico está formado por la repetición de una unidad elemental en una red periódica de puntos. Estas unidades elementales se denominan “bases” y la red periódica de puntos se denomina red de Bravais (1). Se define como: “Una disposición infinita de puntos discretos que presentan una estructura y orientación invariable independientemente del punto de orientación”. De esta forma, la totalidad de una estructura cristalina se puede definir con una red de Bravais y una base.

Los vectores que desarrollan la red de Bravais se denominan vectores primitivos, de forma que el volumen y el área que encierran es el mínimo. También se denominan vectores fundamentales de translación.

A continuación, se muestran los tipos de red de Bravais más comunes, según los ángulos y la distancia entre nodos.

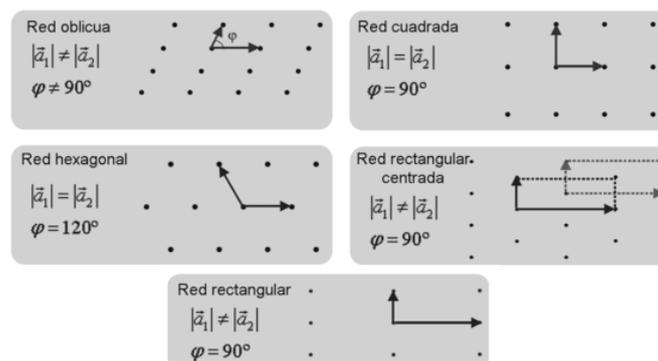


Figura 7: Redes de Bravais más comunes en dos dimensiones

Otro tipo de celda unitaria es la celda de Wigner-Seitz. Esta se forma tomando un punto central de la red y trazando una línea hacia los puntos exteriores, éstos luego se dividen a la mitad y se traza una línea transversal en la bisección de cada tramo.

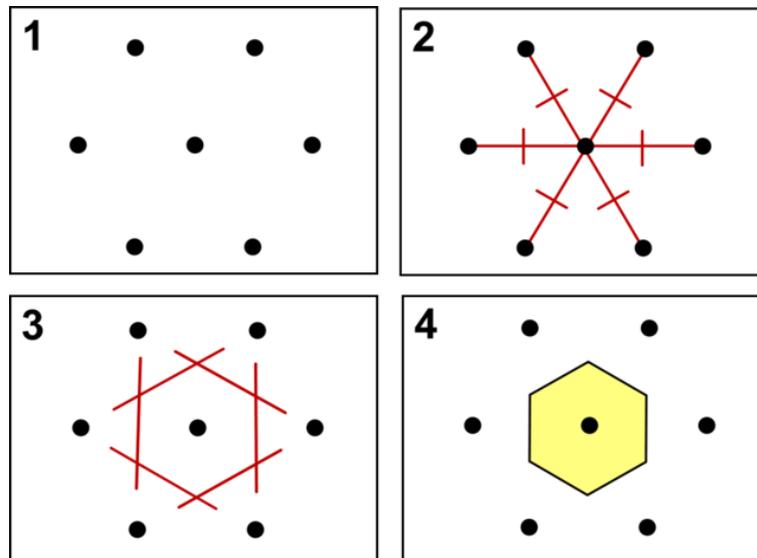


Figura 8: Construcción de una celda Wigner-Seitz

La fracción de espacio ocupada por los átomos, moléculas o iones de una celda unitaria, suponiendo que se trata de esferas sólidas, se denomina factor de llenado. Se define con la siguiente fórmula:

$$f = \frac{nv}{V_c} \quad (2.7)$$

Donde:

f : Factor de llenado o fracción de volumen ocupado

n : Número de átomos por celda

V_c : Volumen de la celda

2.3.2 Difracción de ondas en redes cristalinas

La difracción, en física, es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de estas al encontrar un obstáculo. La difracción puede ser entendida usando el principio de Huygens, según el cual un frente de onda se puede visualizar como una sucesión de emisores puntuales que reemiten la onda al oscilar y contribuyen así a su propagación. Este fenómeno es de tipo interferencial, y como tal, requiere la superposición de ondas coherentes entre sí.

Cuando un conjunto de ondas se propaga a través de un medio que contiene muchos elementos dispersores se establece un proceso repetitivo basado en un patrón recursivo infinito de redispersión entre los diferentes elementos.

Adicionalmente, si los elementos dispersores están colocados de forma periódica, como en las estructuras cristalinas, la dispersión múltiple conduce a un fenómeno conocido como estructura en bandas. Este fenómeno produce que la propagación solo sea posible en un rango de frecuencias, mientras que en el resto la propagación es reflejada. Las primeras se conocen como bandas permitidas, y las últimas, como bandas prohibidas (*band gap*).

Este patrón de interferencia se repite para cualquier tipo de onda, siempre que se encuentre con una serie de propiedades físicas a las que el campo ondulatorio sea sensible. En el caso de campo acústico, si las ondas se encuentran con un sistema con una distribución periódica de la

densidad, ordenado según las dimensiones de la longitud de onda acústica del frente incidente, de forma que existan fenómenos de interferencia, el sistema es conocido como *crystal de sonido*.

2.3.3 Bandas prohibidas de energía

La difracción producida por una estructura cristalina verifica la *ley de Bragg* (1). Esta determina una correlación entre la distancia que separa los átomos de un cristal y los ángulos bajo los cuales está el campo transmitido por el cristal.

Si se considera que los cristales se pueden comportar como redes de difracción y que las ondas incidentes se reflejan especularmente sobre planos paralelos del cristal, el haz difractado solo será visible cuando exista una interferencia constructiva entre los rayos reflejados. Dicha reflexión es la causante de la aparición de las bandas prohibidas de energía.

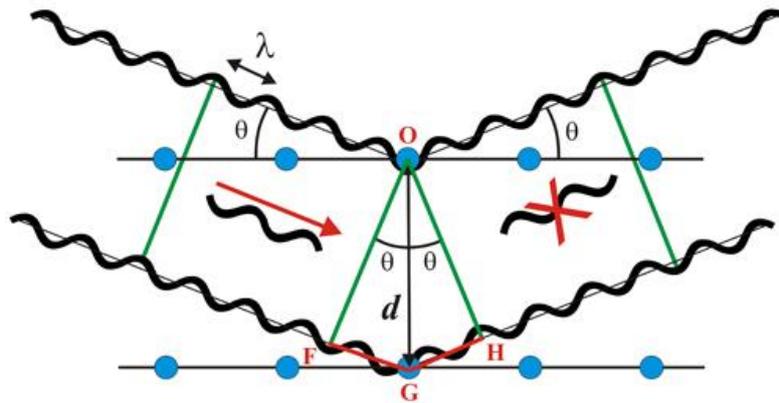


Figura 9. Reflexión de Bragg

Para que las ondas dispersadas entren en fase nuevamente, la distancia adicional que recorre la onda inferior debe ser múltiplo entero de la longitud de onda λ , es decir:

$$FG + GH = 2d \sin(\theta) = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.8)$$

Donde:

θ : es el ángulo entre los rayos y el plano del cristal

d : es la distancia entre planos adyacentes

λ : es la longitud de onda del frente incidente

La primera banda de energía está asociada a la primera reflexión de Bragg, que corresponde con el límite de la *zona de Brillouin* (3). Para $n = 1$ e incidencia normal:

$$\lambda = 2d = \frac{c}{f} \quad (2.9)$$

Si despejamos f :

$$f = \frac{c}{2d} \quad (2.10)$$

El número de onda k se define como:

$$\mathbf{k} = \frac{w}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi(\frac{c}{2d})}{c} = \frac{\pi}{d} \quad (2.11)$$

La construcción de una red recíproca señala qué vectores de onda pueden experimentar difracción de Bragg. Si la red se construye a partir de vectores de traslación, la red recíproca es periódica al igual que la directa. En esta situación existe una cierta repetición de los vectores que sufren difracción.

Las zonas de Brillouin son regiones limitadas en energía. En la primera zona, la onda tendrá una energía limitada por los vectores de onda que sufren difracción de Bragg. Aplicando las condiciones de difracción y sustituyendo las expresiones para los vectores de traslación, se obtiene que las reflexiones de Bragg ocurren para:

$$\mathbf{k} = \pm n \frac{\pi}{d} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (2.12)$$

La primera reflexión de Bragg ocurre para $\mathbf{k} = \pm \frac{\pi}{d}$, es decir, para el vector que coincide con el que queda dentro del límite de la primera zona de Brillouin y que cumple por lo tanto las condiciones de reflexión. La primera zona de Brillouin corresponde a la celda Wigner-Seitz.

Se puede demostrar que, para estos valores de k , las soluciones están formadas por ondas estacionarias producidas por reflexiones sucesivas, formando así las bandas prohibidas.

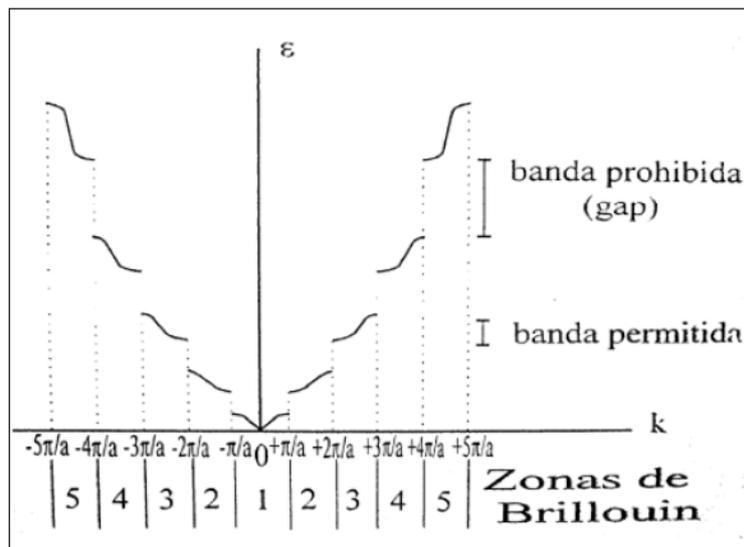


Figura 10. Zonas de Brillouin

2.3.4 Parámetros estructurales

La aparición de las bandas prohibidas está controlada por los siguientes parámetros:

1. Simetría de la estructura. Cuanto más redonda sea la celda de Wigner-Seitz de la red recíproca, más posibilidades hay de que aparezca una banda prohibida.
2. Contraste de velocidad. El producido entre la onda propagada por el material "huésped" y por el elemento dispersor.
3. Cociente entre las densidades de los elementos que forman el cristal. Según algunos autores (4) es el factor determinante para la aparición de la banda prohibida en cristales de sonido. El aumento del cociente produce un aumento del tamaño de la banda prohibida.
4. Factor de llenado. Ratio entre el volumen ocupado por cada dispersor respecto al volumen total de la celda unitaria.
5. Topología. La dispersión se consigue a partir del uso de dos materiales con diferentes velocidades de propagación. En cristales de sonido, el material dispersor es el que presenta mayor densidad. Existen dos topologías básicas:

- a. Topología Cermet. El material dispersor consiste en inclusiones aisladas, cada una de las cuales está completamente rodeada por el material huésped.
- b. Topología Network. El material dispersor está conectado y forma una continua “red de trabajo” a lo largo de toda la estructura.

Estudios teóricos han demostrado que la topología Cermet favorece la aparición de bandas prohibidas en ondas acústicas.

2.4 Cuantificación de la calidad de un difusor

Existen dos métodos para cuantificar la calidad del difusor, ambos estandarizados por la Organización Internacional de Estandarización, ISO 17497-1 (5) y ISO 17497-2 (6).

El primer estándar (ISO 17497-1) (5) permite obtener de forma directa el **coeficiente de scattering (s)**. Este coeficiente mide la energía sonora reflejada en direcciones distintas a la especular. Es un indicador de la cantidad de difusión de un sistema u objeto, consiste en un único índice por banda de frecuencia.

Asumiendo que el sonido dispersado es incoherente, se introduce una muestra en una cámara reverberante y se instala en una mesa giratoria. Se procede a obtener la respuesta al impulso en N posiciones durante un giro completo (7). Del ensayo se obtienen cuatro tiempos de reverberación (con/sin muestra, con/sin rotación) con los que se calcula el coeficiente de absorción α y el coeficiente de absorción especular aparente α_{espec} . Para obtener el valor del coeficiente de dispersión s, se sustituyen los coeficientes obtenidos en las siguientes ecuaciones:

$$I_{tot} = I_i(1 - \alpha) \quad (2.13)$$

$$I_{espec} = I_i(1 - \alpha_{espec}) \quad (2.14)$$

$$s = 1 - \frac{I_{espec}}{I_{tot}} \quad (2.15)$$

Donde:

I_{tot} : es la intensidad reflejada total

I_{espec} : es la intensidad reflejada en dirección especular

I_i : es la intensidad incidente

El segundo estándar (ISO 17497-2) (6) obtiene el **coeficiente de difusión (d)**, este coeficiente mide la uniformidad de la distribución espacial del sonido reflejado. Consiste en un índice dependiente de la frecuencia, obtenido a partir de cada una de las curvas polares de difusión. Existen varios métodos estadísticos propuestos para su cálculo: desviación estándar, directividad, niveles de la zona especular y armónicos esféricos, percentiles y autocorrelación espacial. De todos estos métodos, el que más ventajas presenta es el de autocorrelación espacial (8 pág. 130)).

La función de autocorrelación se utiliza para medir el parecido entre una señal y una versión retardada de sí misma. Una superficie que disemina uniformemente hacia todos los receptores tendrá un valor alto en la función de autocorrelación espacial, mientras que una superficie que concentre la energía tendrá valores bajos.

El estándar (ISO 17497-2) (6) se basa en la medida del sonido reflejado sobre un rango de ángulos predeterminado, el proceso es similar al cálculo de la directividad de altavoces. Es necesario obtener la respuesta al impulso del sistema; para conseguirlo, un micrófono se mueve alrededor de una semicircunferencia con la muestra de prueba en el punto medio. Para una completa caracterización del elemento difusor, el ángulo de incidencia varía de -90° a 90° . Así

mismo, se debe inventanar el sonido directo y tener un espacio anecoico amplio para asegurar que trabajamos en campo lejano.

El coeficiente de difusión direccional d'_{θ} se calcula para cada ángulo de la fuente y banda de tercio de octava. Se define como:

$$d'_{\theta} = \frac{(\sum_{i=1}^N 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^N (10^{L_i/10})^2}{(N-1) \sum_{i=1}^N (10^{L_i/10})^2} \quad (2.16)$$

Al tener un número limitado de muestras el sistema difunde el sonido tanto por su superficie como por los bordes. Esto provoca que, a baja frecuencia, la muestra se comporte como una fuente puntual, proyectando el sonido en todas direcciones. Para descartar el efecto de contorno y ser capaces de evaluar la difusión real de la muestra, el coeficiente de difusión debe ser normalizado. Se define como:

$$d_{\theta} = \frac{d'_{\theta} - d'_{\theta_ref}}{1 - d'_{\theta_ref}} \quad (2.17)$$

Ambos métodos pueden ser simulados con algoritmos basados el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD) en dos dimensiones, aunque las simulaciones para el segundo método son mucho más rápidas. Este es el motivo de la elección del segundo estándar (6) para la simulación del difusor.

2.5 Método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD)

La técnica de Diferencias Finitas en el Dominio Temporal (FDTD) fue introducido por Yee en 1966 (9) es posiblemente el método numérico más popular para la resolución de problemas en electromagnetismo. Paralelamente se ha adaptado el método para la acústica de salas a través de la discretización de la ecuación de onda.

A continuación, se describe la implantación del método FDTD para el modelo de acústica de fluidos en sistema de coordenadas cartesiano en 2D (10).

2.5.1 Fundamentos

El método consiste en discretizar tanto en tiempo como en espacio la presión y la velocidad para conseguir un mallado. El primer paso es reemplazar las derivadas parciales por una ecuación definida como diferencias finitas aproximada. Las fórmulas de diferencias finitas son obtenidas por medio de la expansión de las series de Taylor.

Para discretizar el espacio hay que escoger un paso espacial Δx con un valor muy pequeño y creamos la malla en espacio: $x = 0: \Delta x: L$

Lo mismo para el tiempo, Δt es un valor finito y obtenemos la malla temporal: $t = 0: \Delta t: T$

Haciendo esto la función $F(x, t)$ ya no es una función continua, ahora es discreta.

$$F(x, t) = F(i\Delta x, n\Delta t) = F_i^n \quad (2.18)$$

Formalizando lo descrito anteriormente para el mallado temporal:

$$F\left(x, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x, t) + F'(x, t)\frac{\Delta t}{2} + F''(x, t)\frac{\Delta t^2}{4}\frac{1}{2!} + F'''(x, t)\frac{\Delta t^3}{8}\frac{1}{3!} + \dots \quad (2.19)$$

$$F\left(x, t - \frac{1}{2}\Delta t\right) = F(x, t) - F'(x, t)\frac{\Delta t}{2} - F''(x, t)\frac{\Delta t^2}{4}\frac{1}{2!} - F'''(x, t)\frac{\Delta t^3}{8}\frac{1}{3!} - \dots \quad (2.20)$$

Si consideramos que el incremento de tiempo (Δt) es una cantidad muy pequeña, se consideran despreciables los términos a partir de las derivadas de segundo orden de las ecuaciones anteriores. Con esta aproximación obtenemos:

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}, t) = \frac{\mathbf{F}\left(\mathbf{x}, t + \frac{1}{2}\Delta t\right) - \left(\mathbf{x}, t - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{\Delta t} \quad (2.21)$$

Esta ecuación se define como diferencia finita de segundo orden centrada en el tiempo para la función $F(x, t)$, se puede expresar como:

$$\left.\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t}\right|_i^n = \frac{\mathbf{F}|_i^{n+1} - \mathbf{F}|_i^{n-1}}{\Delta t} \quad (2.22)$$

Donde n e i son números enteros que representan un punto discreto en el tiempo n y espacio i .

Análogamente para el mallado espacial obtenemos:

$$\left.\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}}\right|_i^n = \frac{\mathbf{F}|_{i+1/2}^n - \mathbf{F}|_{i-1/2}^n}{\Delta \mathbf{x}} \quad (2.23)$$

2.5.2 Aplicación del método FDTD al modelo de acústica de fluidos

Las ecuaciones de conservación del momento y conservación de la masa para un medio isotrópico y sin pérdidas se describen como,

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \mathbf{k}(\vec{\nabla} \vec{\mathbf{u}}) = \mathbf{0} \quad (2.24)$$

$$\vec{\nabla} \mathbf{p} + \rho \frac{\partial \vec{\mathbf{u}}}{\partial t} = \mathbf{0} \quad (2.25)$$

Consideraremos la presión acústica p , la velocidad de partícula $\vec{\mathbf{u}}(x, y, t)$, la densidad del medio ρ y $k = (\rho c^2)$ es la compresibilidad del medio.

Aplicando el gradiente y la divergencia podemos reescribir en coordenadas cartesianas 2D las ecuaciones constitutivas (2.18) y (2.19) como:

$$\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} + \mathbf{k} \left(\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{u}_y}{\partial \mathbf{y}} \right) = \mathbf{0} \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{x}} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_y}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \mathbf{y}} \quad (2.28)$$

Siguiendo el flujo de trabajo descrito, se discretizan los campos de presión y velocidad en intervalos temporales Δt y espaciales $\Delta \mathbf{x}$, y $\Delta \mathbf{y}$.

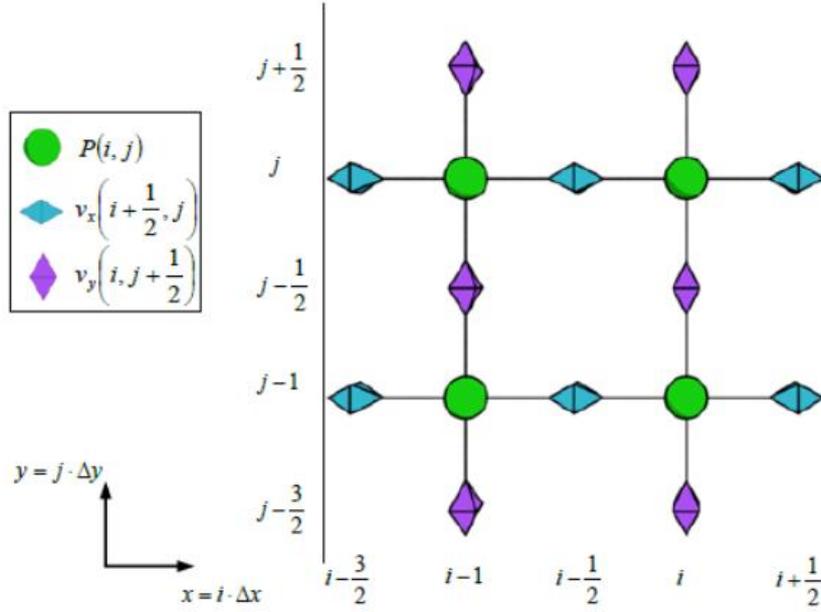


Figura 11. Mallado del espacio 2D del modelo de fluidos

(Fuente: Noé Jiménez (10))

Así las ecuaciones (2.20-2.22) quedan como:

$$\frac{P^{n+1}(i, j) - P^n(i, j)}{\Delta t} + k \left[\frac{u_x^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - u_x^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j)}{\Delta x} + \frac{u_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - u_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2})}{\Delta y} \right] = 0 \quad (2.29)$$

$$\frac{u_x^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - u_x^{n-\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j)}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{P^n(i + 1, j) - P^n(i, j)}{\Delta x} \quad (2.30)$$

$$\frac{u_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - u_y^{n-\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2})}{\Delta t} = -\frac{1}{\rho} \frac{P^n(i, j + 1) - P^n(i, j)}{\Delta y} \quad (2.31)$$

Las variables desconocidas (futuro) las ponemos en función de las variables conocidas (presente y pasado), conocidas por las condiciones de contorno.

$$P^{n+1}(i, j) = P^n(i, j) - k \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[u_x^{n+\frac{1}{2}}(i + \frac{1}{2}, j) - u_x^{n+\frac{1}{2}}(i - \frac{1}{2}, j) \right] - k \frac{\Delta t}{\Delta y} \left[u_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j + \frac{1}{2}) - u_y^{n+\frac{1}{2}}(i, j - \frac{1}{2}) \right] \quad (2.32)$$

$$\mathbf{u}_x^{n+\frac{1}{2}}\left(\mathbf{i} + \frac{1}{2}, \mathbf{j}\right) = \mathbf{u}_x^{n-\frac{1}{2}}\left(\mathbf{i} + \frac{1}{2}, \mathbf{j}\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta x} \mathbf{P}^n(\mathbf{i} + 1, \mathbf{j}) - \mathbf{P}^n(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \quad (2.33)$$

$$\mathbf{u}_y^{n+\frac{1}{2}}\left(\mathbf{i}, \mathbf{j} + \frac{1}{2}\right) = \mathbf{u}_y^{n-\frac{1}{2}}\left(\mathbf{i}, \mathbf{j} + \frac{1}{2}\right) - \frac{\Delta t}{\rho \Delta y} \mathbf{P}^n(\mathbf{i}, \mathbf{j} + 1) - \mathbf{P}^n(\mathbf{i}, \mathbf{j}) \quad (2.34)$$

Resolvemos $P^{n+1}(i, j)$ para todo el espacio y avanzamos un paso temporal en tiempo Δt , repitiendo esto hasta el tiempo deseado obtenemos la solución numérica al problema.

2.5.3 Estabilidad

El modelo propuesto es condicionalmente estable, por lo que debe cumplir en todo el dominio la condición de estabilidad o condición de Courant-Friedrichs-Levy.

$$S \equiv \frac{c_{max} \Delta t}{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}} \quad (2.35)$$

Donde:

- c_{max} : Velocidad de propagación máxima en cualquier punto del dominio
- Δt : Equiespaciado temporal
- Δx y Δy : Equiespaciados espaciales
- S: Número de Courant

2.5.4 Near Field to Far Field (NF2FF)

NF2ff es esencialmente un problema de condiciones de contorno donde hay que muestrear la propagación del frente de ondas con suficiente resolución para exceder los requerimientos de Nyquist. El método permite calcular las condiciones de campo lejano a partir de las condiciones de campo cercano iniciales, es decir, no hay que introducir el mallado dedicado a campo lejano.

2.6 Optimización

Los algoritmos evolutivos son métodos de optimización y búsqueda de soluciones basadas en los postulados darwinianos de evolución biológica y su base genético-molecular (11). Las principales características de los algoritmos evolutivos están basadas en la adaptación al medio y supervivencia de los individuos mejor adaptados.

El punto de partida es una población de individuos generada aleatoriamente, cuyas variables de diseño son codificadas siguiendo las leyes de la genética. Cada una de estas variables representa un gen o genotipo, codificados generalmente de forma binaria, esta representación binaria es conocida como fenotipo. El conjunto de genes o fenotipos que constituyen un individuo se denomina cromosoma.

La población inicial evoluciona someténdola a acciones aleatorias, que tratan de emular mutaciones y recombinaciones genéticas, así como también a una selección de acuerdo con un criterio. En función de este se decide cuáles individuos se han adaptado, sobreviven, y cuáles no lo han conseguido, se descartan.

Funcionamiento de un algoritmo evolutivo básico:

1. Inicialización: Generación aleatoria de la población inicial, está formada por un conjunto de cromosomas los cuales representan las posibles soluciones del problema.
2. Evaluación: Se aplica una función de aptitud, "fitness", a cada uno de los cromosomas para conocer la calidad de la solución que se está codificando.
3. Condición de parada: El AE se detiene cuando se obtiene la solución óptima, como generalmente se desconoce se aplican dos posibles criterios de parada, número máximo

de iteraciones o detenerlo cuando no haya cambios en la población. Mientras no se cumpla ninguna de las condiciones:

- Selección: Elección de los cromosomas que serán cruzados en la siguiente generación. Se suele emplear un mecanismo de selección estocástico, los cromosomas con mejor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionados.
- Cruce: Representa la reproducción sexual, genera dos descendientes con las características combinadas de los cromosomas padres.
- Mutación: Modifica al azar parte del cromosoma, esto permite obtener soluciones que no eran alcanzables por la población actual.
- Reemplazo: Selección de los individuos más aptos para conformar la población de la siguiente generación.

La principal ventaja del uso de algoritmos evolutivos frente a métodos de optimización tradicionales reside en el hecho de que se explora de forma simultánea todo el espacio de soluciones, asegurando así la convergencia hacia un máximo o mínimo. Este no tiene por qué ser absoluto, puede ser local, pero tiene mayor probabilidad de encontrar un máximo o mínimo absoluto que los criterios tradicionales basados en el gradiente. Esto se debe al operador de mutación, ya que permite que algunos individuos de la población efectúen saltos en la búsqueda del óptimo.

2.6.1 Algoritmo evolutivo multiobjetivo

Resolver problemas de optimización con múltiples objetivos, a menudo conflictivos entre sí, es una meta complicada. Utilizaremos el método de la eficiencia de Pareto para encontrar una solución al conflicto entre objetivos.

Para cada problema de optimización multiobjetivo no trivial no existe ninguna solución que optimice simultáneamente cada objetivo. Por lo tanto, existe un número, posiblemente infinito, de soluciones óptimas de Pareto. Se dice, entonces, que una solución S_1 es Pareto-óptima cuando no existe otra solución S_2 que mejore en un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros.

Conceptos aplicados a un problema de minimización:

1. Dominancia de Pareto: Dado un vector $u = (u_1, \dots, u_k)$, se dice que domina a otro vector $v = (v_1, \dots, v_k)$ si y sólo si:

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i \text{ y } \exists i_0 \in \{1, \dots, k\} | u_{i_0} < v_{i_0} \quad (2.36)$$

2. Optimidad de Pareto: Una solución x^* se dice que es Pareto-óptima si y sólo si no existe otro vector x tal que $v = f(x) = (v_1, \dots, v_k)$ domine a $u = f(x^*) = (u_1, \dots, u_k)$.

En general, la solución estará formada por el conjunto de todos los vectores no dominados, conocidos como frente de Pareto.

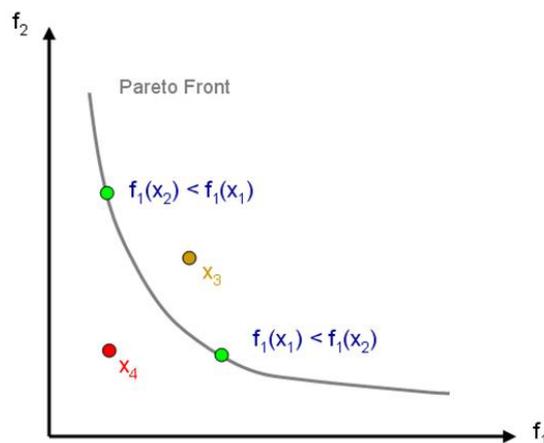


Figura 12: Frente de Pareto de una función con dos objetivos

2.6.2 Ev-MOGA

Ev-MOGA (12 págs. 203-215) es un algoritmo evolutivo elitista multiobjetivo basado en el concepto de dominancia de ϵ , el algoritmo trata de obtener una buena aproximación al frente de Pareto con recursos de memoria limitados, también ajusta los límites del frente dinámicamente.

```
1.  $t := 0$ ;  
2.  $A_t := \emptyset$ ;  
3.  $P_t := ini_{random}(D)$ ;  
4.  $eval(P_t)$ ;  
5.  $A_t := store(P_t, A_t)$ ;  
6. while  $t < t_{max}$  do  
7.    $G_t := create(P_t, A_t)$ ;  
8.    $eval(G_t)$ ;  
9.    $A_{t+1} := store(G_t, A_t)$ ;  
10.   $P_{t+1} := update(G_t, P_t)$ ;  
11.   $t := t + 1$ ;  
12. end
```

Algoritmo 1: Pseudocódigo de ev-MOGA

Capítulo 3. Desarrollo del trabajo

3.1 Introducción

El presente trabajo tiene dos vertientes claramente diferenciadas, por un lado, la evaluación de un difusor optimizado para su funcionamiento a baja frecuencia usando el software de cálculo matemático MATLAB, aplicando el método de diferencias finitas en el dominio del tiempo (FDTD), y por otro lado la construcción y evaluación del prototipo obtenido teóricamente.

3.2 Diseño del prototipo

3.2.1 Condiciones previas

En la primera parte se evalúa la contribución de los algoritmos multiobjetivo a la mejora de los difusores tradicionales.

El estudio se realiza siguiendo la norma (6), donde se indica que el rango de frecuencias a estudiar debe ser de 100 a 5000 Hz, en las siguientes bandas de tercios de octava: [100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000]. En las futuras referencias serán numeradas de uno a dieciocho.

Se ha buscado la optimización del difusor cumpliendo los siguientes objetivos:

- El primero de ellos busca un coeficiente de difusión alto en la banda de 250 Hz.
- El segundo de los objetivos busca una respuesta lo más plana posible en las bandas de tercio de octava superiores a estudio.

Con esto se busca mejorar los difusores comerciales actuales que tienen una buena difusión en frecuencias medias y altas, pero precisan de un gran tamaño para trabajar correctamente a más bajas frecuencias.

3.2.2 Optimización

Para la realización del proceso de optimización se han de definir los objetivos (J1, J2) como parámetros de entrada del algoritmo ev-Moga.

Se obtienen siguiendo el diagrama de flujo siguiente:

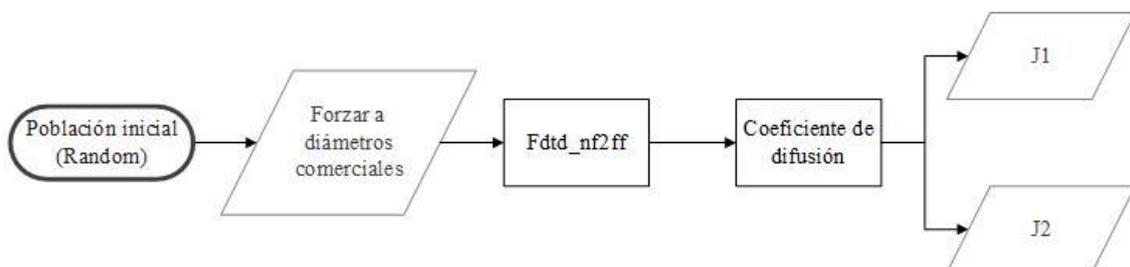


Figura 13: Diagrama flujo calculadorfuncionescosto.m

El proceso comienza generando una población inicial aleatoria en una matriz de 1000 x 60, las dimensiones corresponden a 1000 individuos y el diámetro de cada elemento en las 60 posibles posiciones dentro del difusor. Se continúa aproximando cada diámetro al equivalente comercial más próximo. Se obtiene el coeficiente de difusión de cada individuo de la generación utilizando el método FDTD y se normaliza el coeficiente respecto a una superficie plana. Finalmente se actualizan los objetivos para la siguiente iteración como:

$$J_1 = 1 - \min(d_j) \rightarrow j = [4: 6] \quad (3.1)$$

$$J_2 = 1 - \min(d_j) \rightarrow j = [7: 18] \quad (3.2)$$

Donde:

J_1 : Objetivo 1. Coeficiente de difusión alto en la banda de 250 Hz.

J_2 : Objetivo 2. Respuesta plana en el resto de bandas superiores.

d_j : Coeficiente de difusión normalizado para la j -ésima banda de tercio de octava

Se trabaja con el valor mínimo de difusión porque será la componente más restrictiva de cara a la optimización.

La combinación del algoritmo evolutivo ev-Moga y el método FDTD nos permite obtener dispositivos con un alto rendimiento, a cambio de una alta carga a nivel computacional. El número de cálculos en un proceso de optimización se puede estimar como el número de generaciones multiplicado por el número de individuos de cada generación más el número de individuos de la población inicial.

Después del primer proceso de optimización el frente de Pareto obtenido se usa como parte de la población inicial del siguiente proceso. El proceso iterativo se para cuando no se detectan cambios en el frente de Pareto aproximado. Después de tres iteraciones completas se realiza una última donde la población inicial es el frente de Pareto óptimo de los procesos anteriores. El tiempo computacional del proceso completo es de unos nueve días.

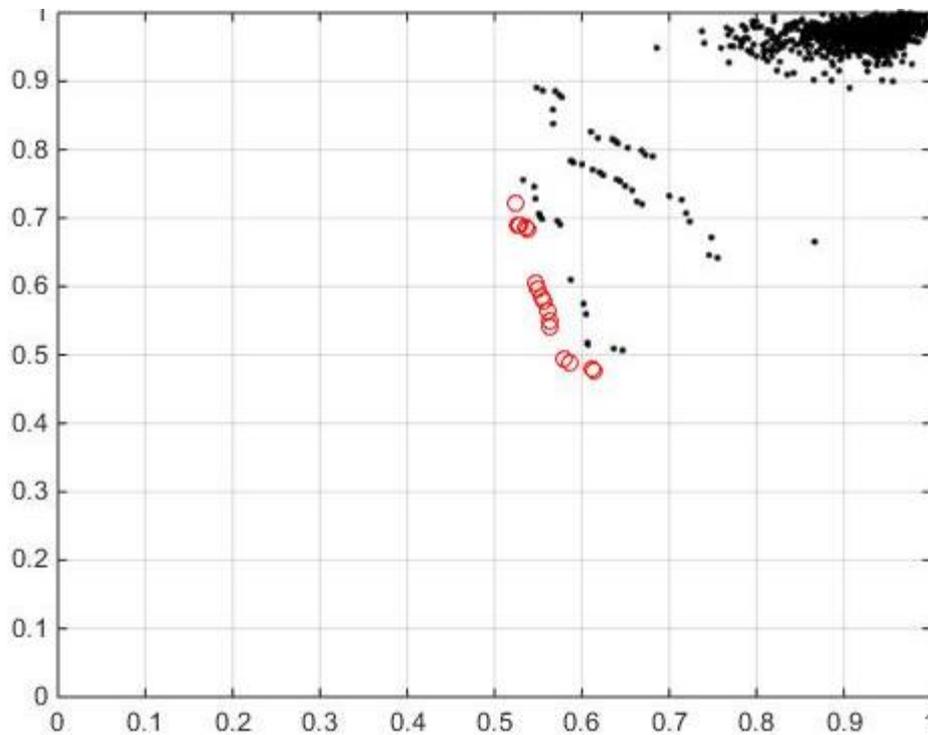


Figura 14: Frente de Pareto última iteración

En la gráfica anterior se observa la evolución del frente de Pareto junto a la población inicial a lo largo de las diferentes iteraciones de la última optimización.

Una vez obtenida la población final se debe seleccionar el individuo con un mayor grado de 'fitness' o aptitud. La población final fue de dieciséis individuos obteniendo los siguientes coeficientes de difusión normalizados respecto al de una superficie plana:

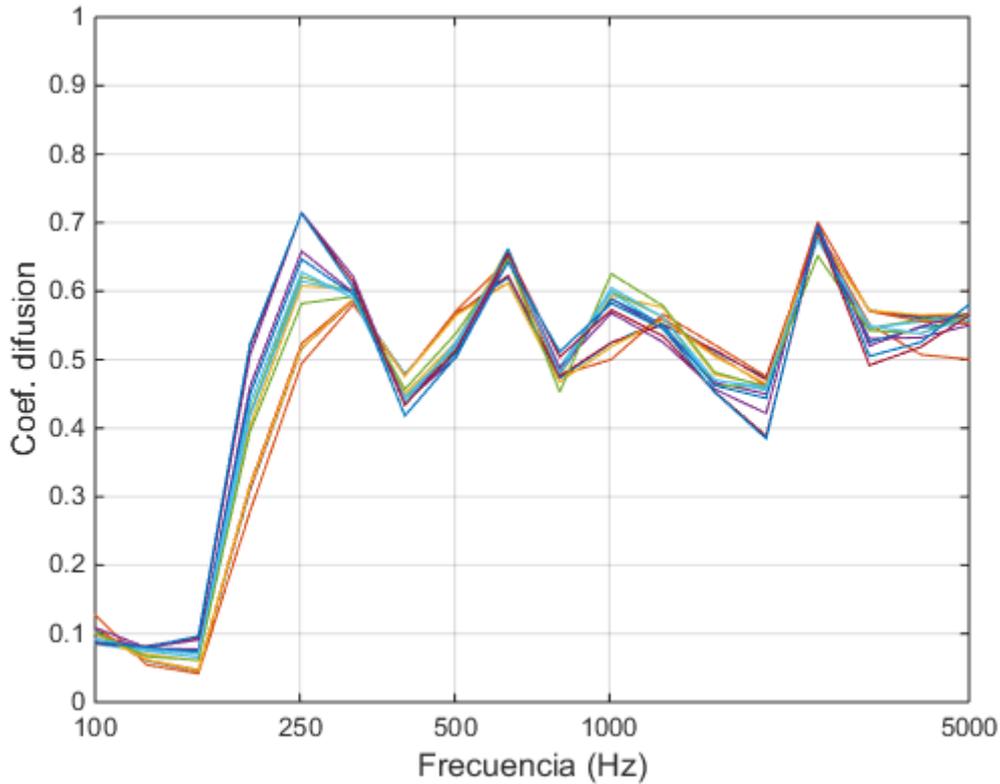


Figura 15: Coeficientes de difusión normalizados de la última generación

Para decidir cuál es el individuo más apto se utilizó un algoritmo que elimina aquellos individuos con un coeficiente de difusión menor a 0.65 en la banda de 250 Hz a estudio. El resultado de este proceso fue de cinco individuos que cumplían el requisito.

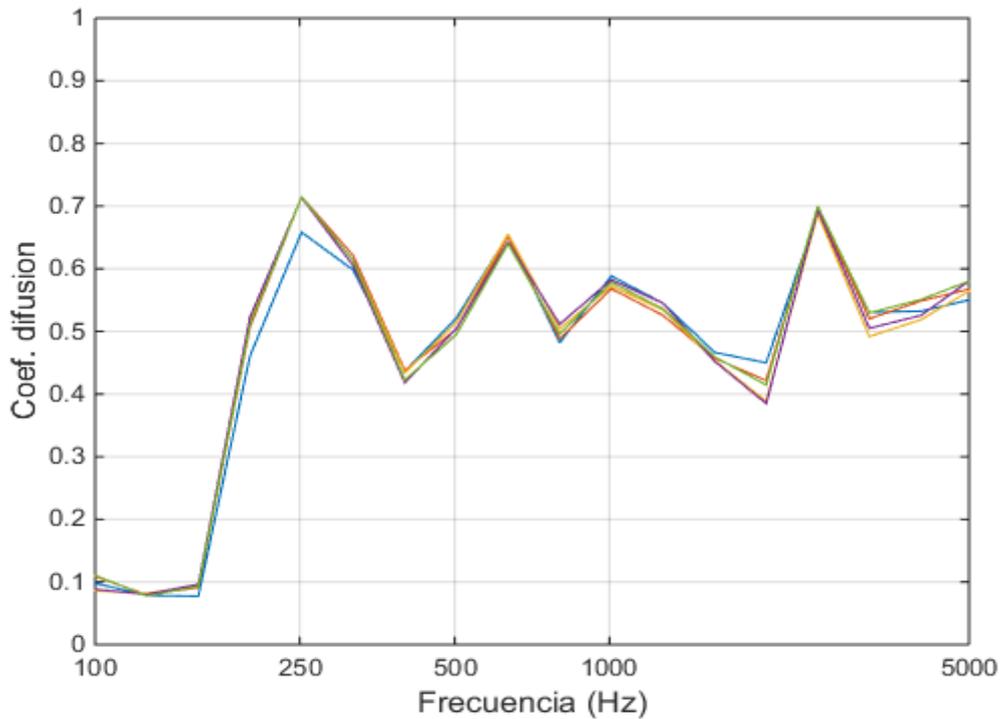


Figura 16: Coeficientes de difusión normalizados de los cinco mejores individuos

Como siguiente método de decisión se pensó en buscar aquel individuo con máximo coeficiente de difusión en la banda a estudio y aquel que tuviera la máxima mediana calculadas en todas las bandas del rango 100 Hz – 5kHz.

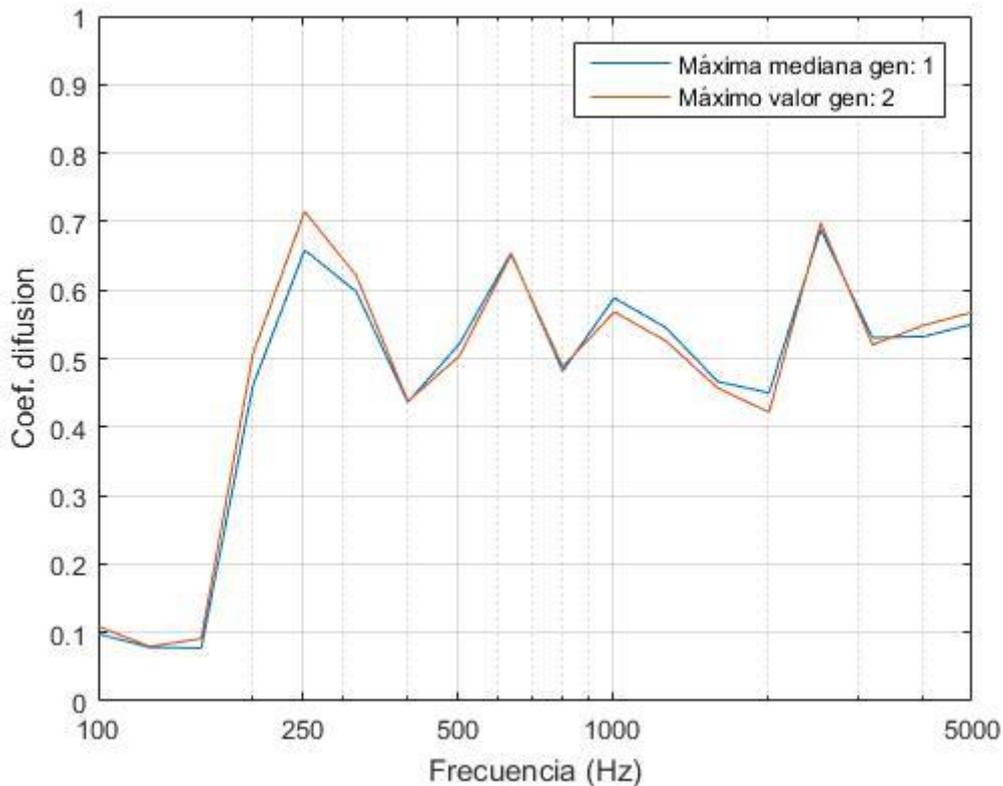


Figura 17: Coeficientes de difusión normalizados de los dos mejores individuos

Para seguir eliminando individuos se pensó en utilizar el individuo que fuera más económico de construir y que produjera la menor cantidad de desperdicio. Para ello se hizo un cálculo de la cantidad de tubos necesarios de cada diámetro comercial disponible.

Diámetros (mm)	20	25	30	40	50	60	70	Total
Individuo 1	2	0	3	0	1	2	15	23
Individuo 2	2	1	2	1	1	1	16	24

Tabla 1: Diámetros de los dos mejores individuos

La cantidad de tubos está calculada para tubos de 6 metros que es la longitud que ofrece la empresa suministradora. Cada tubo se cortó en cinco partes iguales de 1,2 m de longitud. Debido a esto se generó una cantidad de desperdicio en forma de tubos de aluminio que no serían utilizados.

Finalmente se decidió optar por el individuo 1 ya que era el que cumplía todos los requisitos. No solo se podía construir con un tubo menos, siendo así más económico, sino que evitaba tener que comprar tubos de dos de los diámetros, además de generar menos desperdicios en la construcción.

Como resultado del proceso obtenemos la configuración mostrada en la figura 15. Las unidades de la vista en planta son milímetros

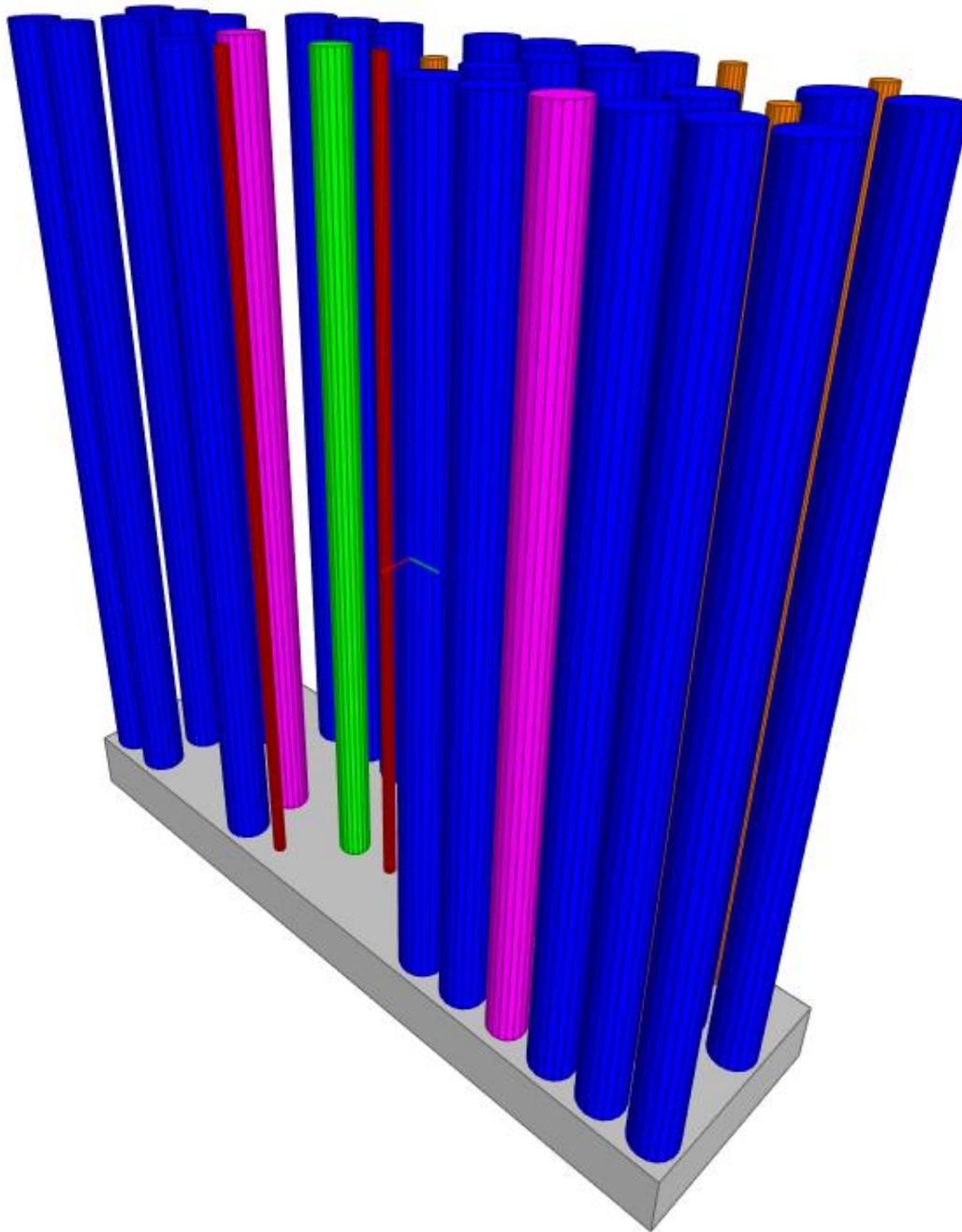


Figura 16: Vista en 3D del diseño obtenido mediante el proceso de optimización

3.2.3 Construcción del prototipo

Teniendo definido el diseño del difusor, se procedió a la construcción del prototipo. Se optó por utilizar tubos de aluminio como material principal del difusor y tablonc de madera como superficies de anclaje.

Debido a las dimensiones totales del prototipo ($3,6 m \times 1,2 m \times 0,36 m$) dividido en tres módulos de ($1,2 m \times 1,2 m \times 0,36 m$), este se diseñó para ser desmontable y así poder transportarlo con mayor facilidad.

A continuación se encuentra el listado de los materiales y herramientas utilizados en la construcción.

Materiales	Unidades
Tubo aluminio (120 cm longitud, \emptyset exterior 7 cm)	75
Tubo aluminio (120 cm longitud, \emptyset exterior 6 cm)	6
Tubo aluminio (120 cm longitud, \emptyset exterior 5 cm)	3
Tubo aluminio (120 cm longitud, \emptyset exterior 3 cm)	12
Tubo aluminio (120 cm longitud, \emptyset exterior 2 cm)	6
Tabla de madera MDF (120 cm x 120 cm x 1,6 cm)	3
Tabla de madera MDF (120 cm x 36 cm x 1 cm)	12
Escuadra perforada acero (9 cm x 9 cm x 0,4 cm)	6
Escuadra perforada acero (5 cm x 1,5 cm x 0,2 cm)	6
Placa poliestireno expandido (120 cm x 36 cm x 1 cm)	6
Tornillos acero avellanados (6 cm alto x \emptyset 0,6 cm)	48
Arandelas acero (\emptyset 0,6 cm)	48
Tuerca mariposa acero zincado (\emptyset 0,6 cm)	48

Tabla 2: Materiales construcción

Herramientas	Unidades
Taladro percutor Bosch 700 W	1
Multiherramienta DREMEL	1
Sierra de corona (\emptyset 7 cm)	1
Sierra de corona (\emptyset 6 cm)	1
Sierra de corona (\emptyset 5 cm)	1
Sierra de corona (\emptyset 3 cm)	1
Sierra de corona (\emptyset 2 cm)	1
Sargentos de apriete	8
Destornillador estrella	1

Tabla 3: Herramientas construcción

Los tubos de diferente diámetro conforman los cilindros del difusor. Para la sujeción de los tubos se fabricaron dos cubiertas, una que hace función de base y la otra de tapa superior. Ambas tienen el mismo proceso de fabricación, a excepción del tamaño de la escuadra perforada para la sujeción de la tapa trasera.

El proceso a seguir es el siguiente, primero se perforan las cubiertas superior e inferior para poder pasar los tubos. Se continúa limando el interior de cada orificio para evitar rozaduras se instaló, finalmente se atornilla junto a una tabla de madera ciega y a una lámina de poliestireno expandido en medio de las dos tablas de madera para formar cada conjunto de cubierta.



Figura 16: Tablas de madera perforadas



Figura 17: Vista lateral de la cubierta superior

Se colocó las láminas de poliestireno expandido para compensar la diferencia de longitudes en los tubos de aluminio. Esta diferencia vino provocada por la merma en el corte de los tubos que originalmente eran de seis metros de longitud. El corte de los tubos lo realizó la empresa distribuidora del material.

Para añadir estabilidad al prototipo se fijó una tabla trasera con ayuda de escuadras de acero, cada tabla de madera tiene las mismas dimensiones que el módulo al que soporta ($120\text{ cm} \times 120\text{ cm} \times 1,6\text{ cm}$). La tabla trasera también sirve para simular una superficie reflectante plana y así poder comparar el efecto del difusor.



Figura 18: Construcción de los tres módulos

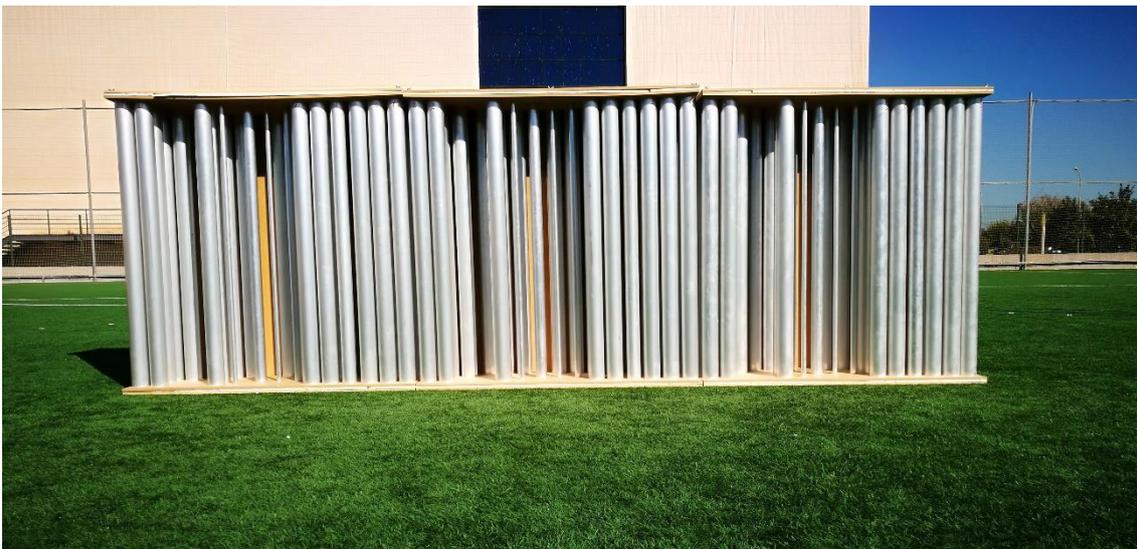


Figura 19: Prototipo final

3.3 Sistema y equipo de medida

Para poder caracterizar el difusor se utilizó un ordenador portátil con procesador Intel® Core™ i7-4710HQ @2.50 GHZ y el software Cool Edit con el plugin Aurora. El plugin, entre otras funcionalidades, nos permite realizar una convolución rápida de muestras anecoicas con respuestas al impulso binaurales sin la necesidad de DSPs, generar señales de excitación como MLS o Sweep, deconvolucionar la respuesta al impulso de una sala a partir de la señal generada, realizar un análisis espectral u obtener parámetros acústicos, tales como el tiempo de reverberación, EDT, T20 o T30.

Además, se conectó el mezclador usb Behringer Xenyx Q802USB para controlar las entradas y salidas. Una salida se utilizó para generar la señal y una entrada para recibir la señal desde el micrófono.



Figura 20: Mezclador Behringer Xenyx Q802USB

El sistema de captación es el ISEMcon EMX-7150, un micrófono omnidireccional para campo libre de condensador. Es un micrófono de gran precisión con una respuesta plana en un rango mayor al audible por el ser humano, entre 10Hz-20kHz. (Ver Anexos para las especificaciones técnicas).



Figura 21: Micrófono EMX-7150

La señal MLS generada por el ordenador es radiada mediante el altavoz activo de PA Skytec SP1500A, es un sistema bass réflex de dos vías que incluye una etapa propia de amplificación. (Ver Anexos para las especificaciones técnicas).



Figura 22: Altavoz Skytec SP1500A

Cumpliendo con la norma ISO 17497-2 (6) la medida se debe realizar en una semicircunferencia completa alrededor del dispositivo (i.e. $\varphi \pm 90^\circ$). La máxima resolución angular es de 5° (i.e. $\Delta\varphi \leq 5^\circ$), se consiguió con un sistema discreto de posiciones fijas. Para no mover el dispositivo una vez montado se hizo la medida en circunferencia completa (i.e. $\varphi \pm 180^\circ$) moviendo el sistema generador de posición. La fuente tuvo dos posiciones, la primera posición para medir la superficie reflectante plana y la segunda para medir el difusor, ambas en incidencia normal.

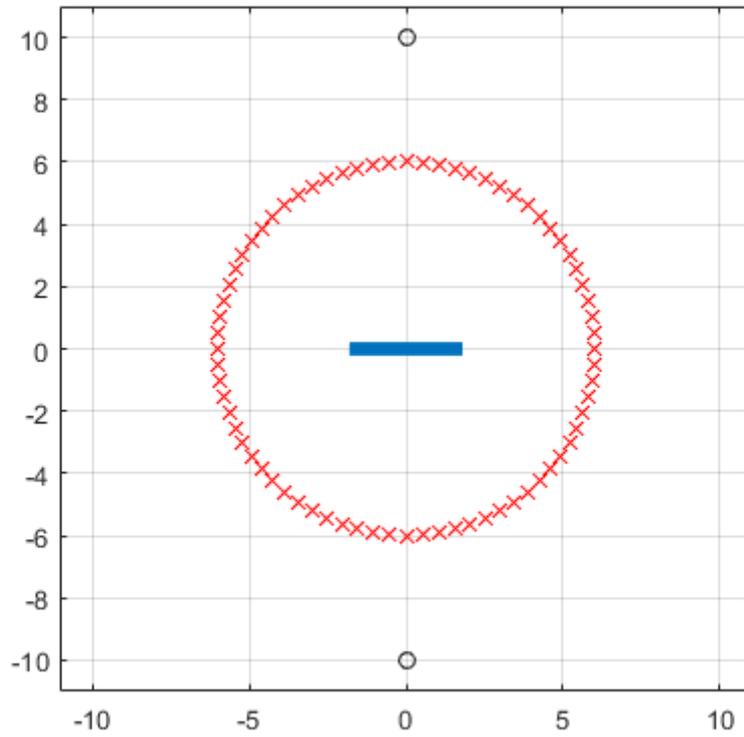


Figura 23: Posiciones de medida teóricas

En la figura anterior se puede observar las diferentes posiciones de medida (rojo), el difusor fijo (azul) y las posiciones del altavoz (negro).

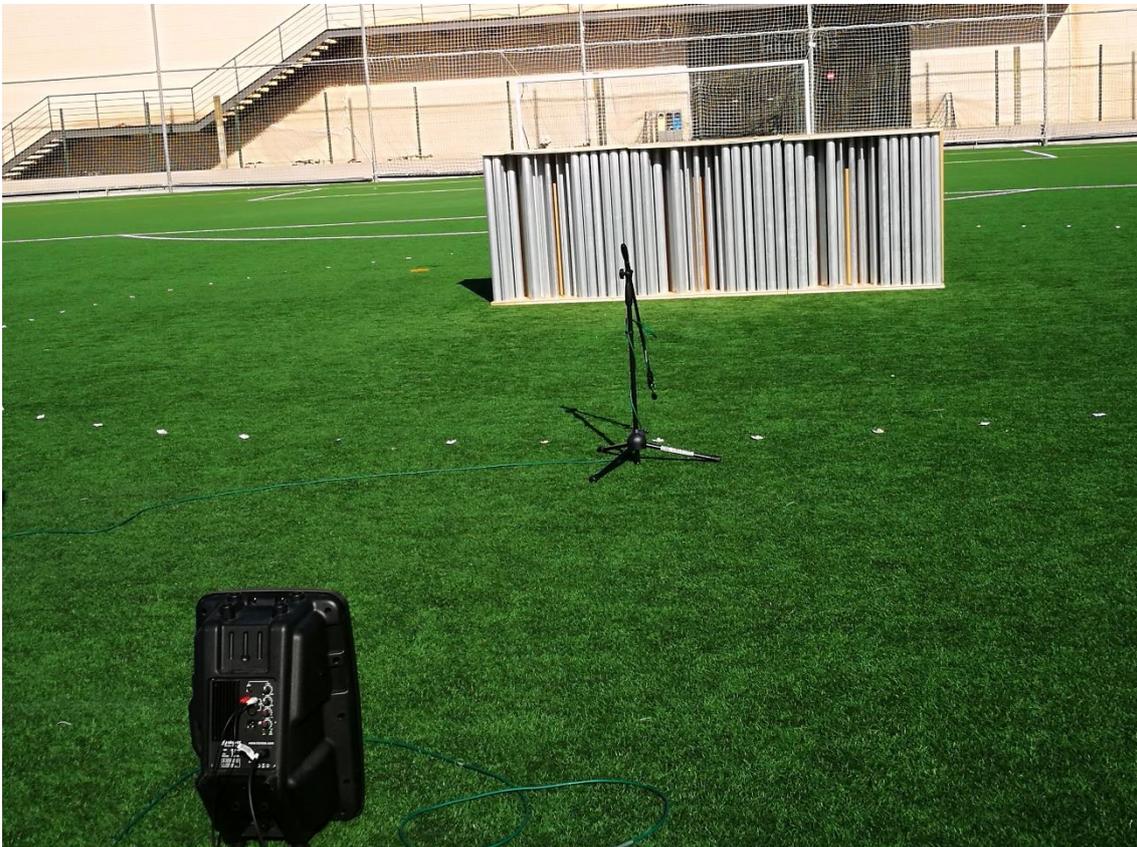


Figura 24: Posiciones de medida experimental

Dado que el sistema final cubre los 360° alrededor del difusor, marcamos las correspondientes 73 posiciones que ocupara el micrófono, el número de posiciones se obtiene al dividir una circunferencia completa en pasos de 5°.

La altura del micrófono debe ser mayor que la menor longitud de onda a estudio, sabiendo que la frecuencia más alta es de 5 kHz y conociendo la velocidad de sonido en el aire:

$$c = (331.5 + 0.6 \cdot t) [m/s] \quad (3.3)$$

Donde t es la temperatura en grados Celsius, el día que se realizó la medida había una temperatura en Valencia de 20°C.

$$c = (331.5 + 0.6 \cdot 20) = 343.5 [m/s] \quad (3.4)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{343.5}{5000} = 0.069 m \quad (3.5)$$

Obteniendo así, una altura mínima del micrófono de aproximadamente siete centímetros.

Inicialmente se pensó en utilizar una señal Sweep como señal de excitación ya que muestran menor afectación frente a la distorsión armónica y varianza de tiempo que las señales pseudoaleatorias.

Capturar respuestas impulsivas con el propósito de obtener una auralización de alta calidad requiere de una relación señal a ruido mayor a 90 dB. Esto es fácilmente realizable con una señal Sweep ya que permiten eliminar completamente la distorsión armónica, por el contrario, en una señal pseudoaleatoria no es posible debido a la no linealidad del altavoz.

Por otra parte, se pensó en utilizar una señal MLS (Maximum Length Sequence). El método MLS se basa en la correlación cruzada entre una excitación de entrada y una señal de salida a través de un sistema lineal, donde la excitación es una señal pseudoaleatoria periódica representada de forma binaria con +1 y -1.

Se trata de una técnica de medida de la respuesta impulsiva de un sistema lineal. A pesar de tener muchas propiedades del ruido blanco, una secuencia MLS es determinista y periódica. Las principales ventajas de utilizar un sistema MLS son su fácil implementación, rapidez en el cálculo de la respuesta al impulso de un sistema, muy buena relación señal a ruido e inmunidad a interferencia y ruido de fondo. Esta última ventaja fue la determinante debida al ruido de fondo que había en la zona de medida.

Para obtener la respuesta al impulso del sistema se realizó la correlación cruzada entre la señal generada y la señal captada por el micrófono, dicha correlación cruzada corresponde a la deconvolución de la respuesta del difusor con la señal generada por el altavoz.

La figura 25 muestra el esquema de la obtención de la respuesta al impulso mediante señales MLS, este procedimiento lo realiza el plugin Aurora de Cool Edit. Para el presente estudio se utilizó una señal MLS con una frecuencia de muestreo de 44.1 kHz, tamaño 16k y 10 promedios.

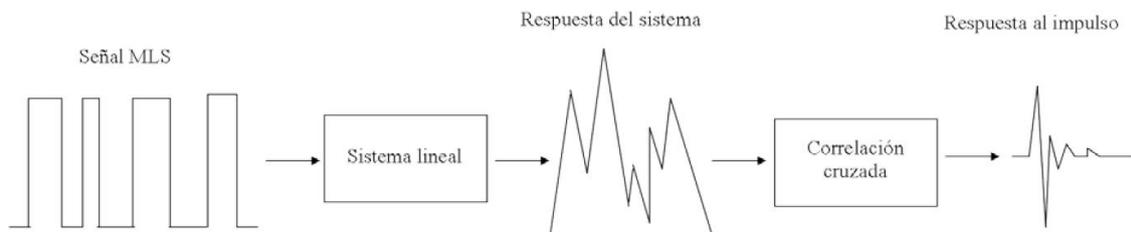


Figura 25: Flujo de obtención de la respuesta al impulso mediante señales MLS

(Fuente: Andrés Bernhard Molina (13))

La prioridad principal es medir la respuesta al impulso de tal manera que la reflexión del difusor pueda ser aislada del sonido directo y pequeñas reflexiones no deseadas.

3.4 Tratamiento de los datos obtenidos experimentalmente

Una vez obtenidas las respuestas al impulso en todas las posiciones explicadas en la sección anterior se procedió a procesar los datos obtenidos mediante el software matemático *MATLAB* acorde al diagrama de flujo mostrado en la figura 26.

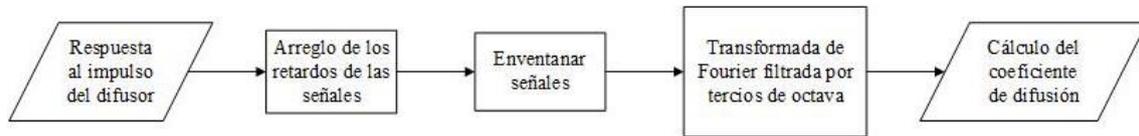


Figura 26: Cálculo de los coeficientes de difusión

A partir de la respuesta al impulso del difusor medida en cada punto se realiza un arreglo que depende de la posición del micrófono, la posición de la fuente y el ángulo respecto a la normal.

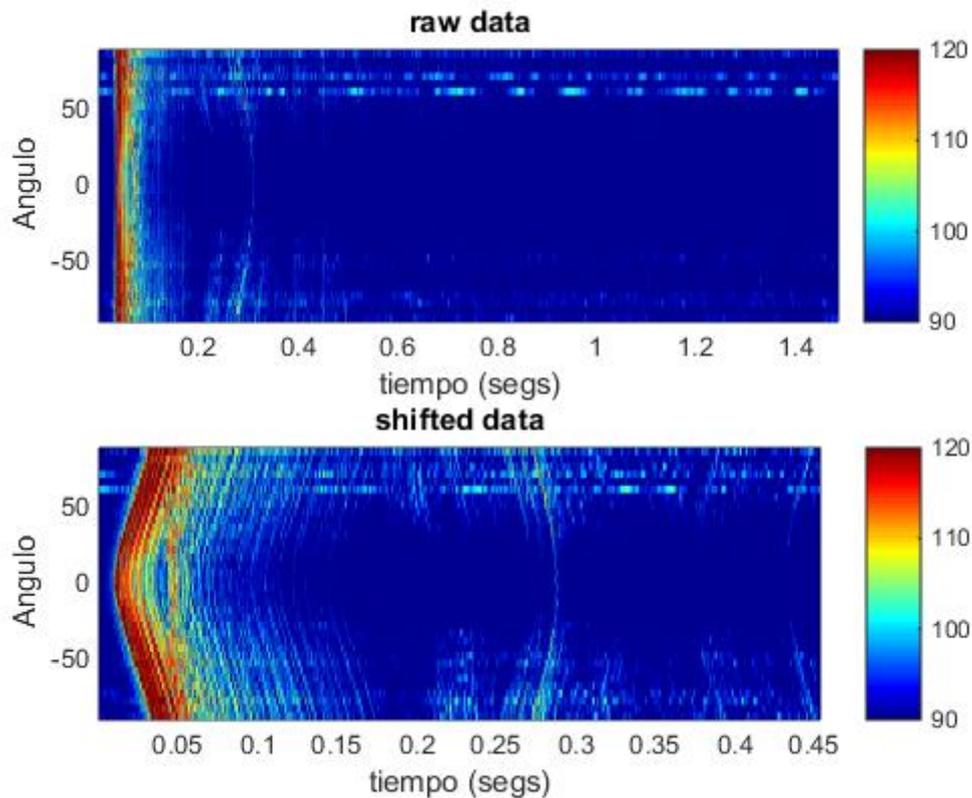


Figura 27: a) Datos medidos; b) Datos arreglados

Se aplica una ventana rectangular con ganancia unidad en la zona de las reflexiones del difusor y cero en el resto, la ventana elimina reflexiones residuales claramente separadas de las reflexiones del difusor en el tiempo. Para determinar el tamaño de la ventana se considera el mayor intervalo temporal con reflexiones provenientes de la superficie a estudio. El valor de tiempo más pequeño se puede calcular por simple geometría, para el camino de reflexión más largo posible se deben considerar más reflexiones que las de primer orden para asegurar que se obtiene la respuesta total del difusor. El valor máximo del intervalo se obtiene mediante una inspección visual de la respuesta impulsional.

Para poder dar como válido el intervalo de la ventana se debe obtener una relación señal a ruido de, al menos, 40 dB para la superficie plana de referencia. Esta limitación se debe comprobar en todas las bandas de tercio de octava a estudio.

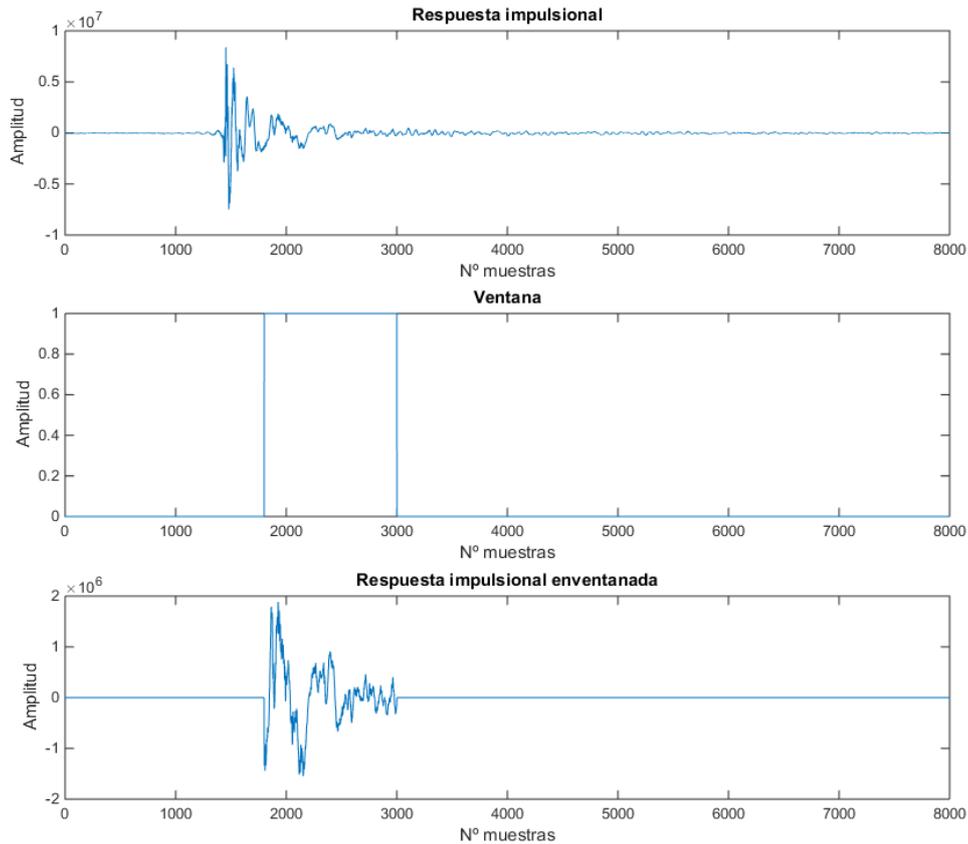


Figura 28: Uso de la ventana rectangular

Se continúa aplicando la transformada de Fourier a la respuesta impulsional eventanada y filtrando por tercios de octava, obteniendo así el nivel de presión sonora, L' , en decibelios, para cada banda frecuencial de interés. Estas bandas de frecuencia deben cumplir con la norma ISO 266. Después de realizar la transformada de Fourier, al menos tres puntos espectrales se deben encontrar en cada banda de tercio de octava de interés, no se puede rellenar por ceros para satisfacer este criterio.

Como se explica en el apartado 2.4 Cuantificación de la calidad de un difusor, para una posición fija de la fuente, en cada banda de tercio de octava, el coeficiente de difusión d'_θ se calcula a partir del nivel de presión L_i y la n posiciones del micrófono.

$$d'_\theta = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (3.6)$$

El coeficiente de difusión está definido dentro del rango $[0,1]$, es decir:

$$d'_\theta = [0, 1] \Leftrightarrow \forall x \in d'_\theta: 0 \leq x \leq 1 \quad (3.7)$$

Un difusor que dispersa completamente el sonido tendrá un coeficiente de difusión de 1. Cuando el nivel de dispersión está concentrado en una sola localización, el coeficiente de difusión tiende a cero.

Capítulo 4. Resultados

Después del proceso descrito anteriormente obtenemos una comparativa clara de la capacidad difusora del prototipo construido y el simulado.

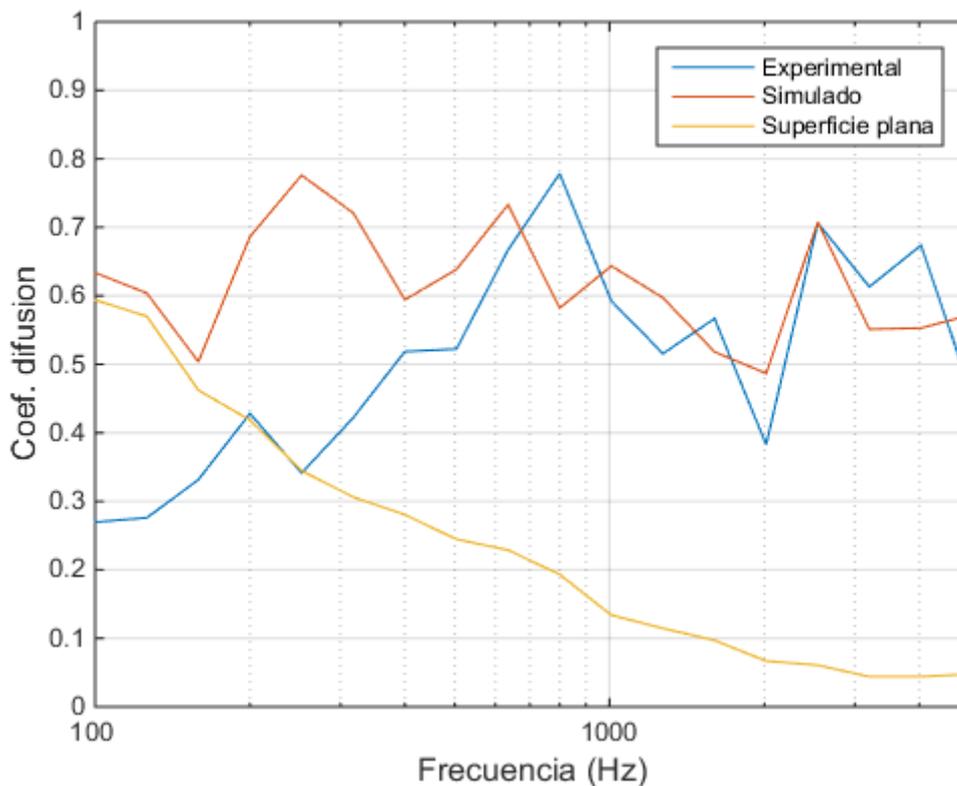
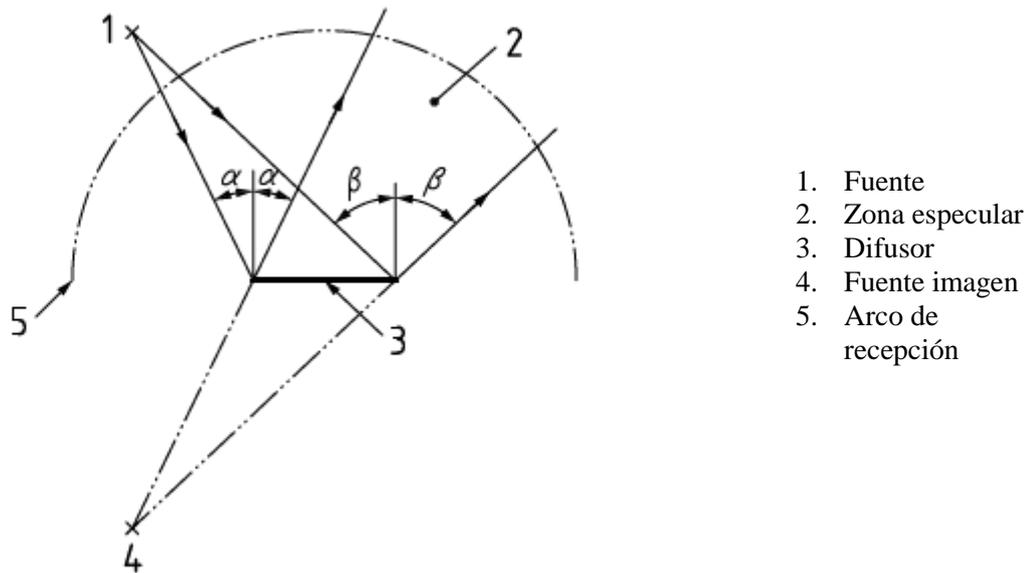


Figura 29: Coeficiente de difusión experimental y simulado

Observando los resultados de la gráfica anterior se puede concluir que el difusor funciona correctamente en medias y altas frecuencias, pero no llega a trabajar en bajas frecuencias que era el objeto de estudio.

Pasaremos a evaluar el motivo de que los resultados obtenidos del trabajo teórico y experimental no concuerden. Se han tenido en cuenta dos opciones de error que no son mutuamente excluyentes, la primera de ellas ha sido un fallo en la ejecución de la medida en campo lejano y la segunda un error proveniente de la simulación teórica.

Para las medidas en campo lejano se ha utilizado la norma ISO 17497-2 (6), esta indica que al menos un 80 % de las posiciones de recepción tienen que estar fuera de la zona especular, representada en la figura 30.



- 1. Fuente
- 2. Zona especular
- 3. Difusor
- 4. Fuente imagen
- 5. Arco de recepción

Figura 30: Zona especular
 (Fuente: ISO 17497-2 (6))

Donde la distancia de la fuente a la zona de referencia tiene que ser de 10 metros y la semicircunferencia de recepción debe tener un radio mínimo de 5 metros. Aquí encontramos el primero de los problemas ya que la distancia de la fuente a la zona de referencia, en este caso el difusor, fue de 9.5 metros. La condición de distancia mínima de la semicircunferencia de recepción sí que se respetó ya que tenía un radio de 6 metros.

Aunque se respetó la condición de distancia mínima entre difusor y micrófono, está no fue suficiente ya que a bajas frecuencias es imposible diferenciar el sonido directo del reflejado, las ventanas necesarias para diferenciarlos son del mismo tamaño que el periodo de la onda a estudio. Esto provoca la diferencia a bajas frecuencias entre el estudio teórico y el experimental.

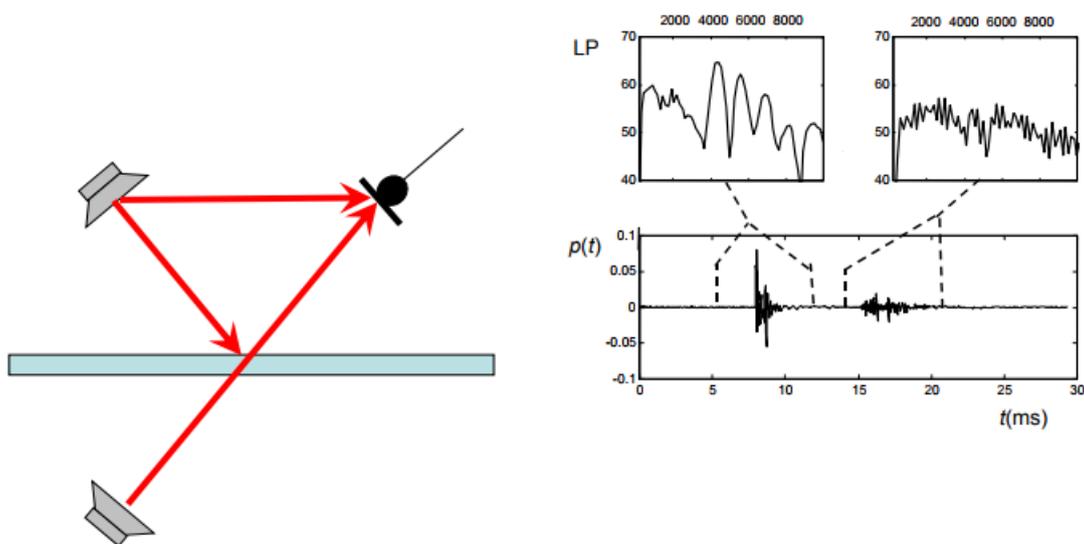


Figura 31: Separación de la reflexión y el sonido directo

Existen dos opciones para solucionar este problema. La primera es repetir la medida doblando el radio entre el micrófono y el difusor, con la nueva diferencia temporal por distancia entre caminos ya sería posible medir correctamente.

La segunda es cambiar el altavoz utilizado por uno con mayor factor de calidad (Q), es un parámetro que mide la relación entre la energía reactiva almacenada y la energía que disipa durante un ciclo completo de la señal. A mayor Q, menor frecuencia de corte del altavoz, pudiendo evaluar mejor la banda de frecuencias por tercios de octava a estudio.

No todas las medidas realizadas son despreciables, aquellas dentro del rango $\varphi \pm 55^\circ$ son aprovechables ya que es posible diferenciar claramente el sonido directo del reflejado. Eliminando las medidas fuera del nuevo rango se obtiene el siguiente coeficiente de difusión:

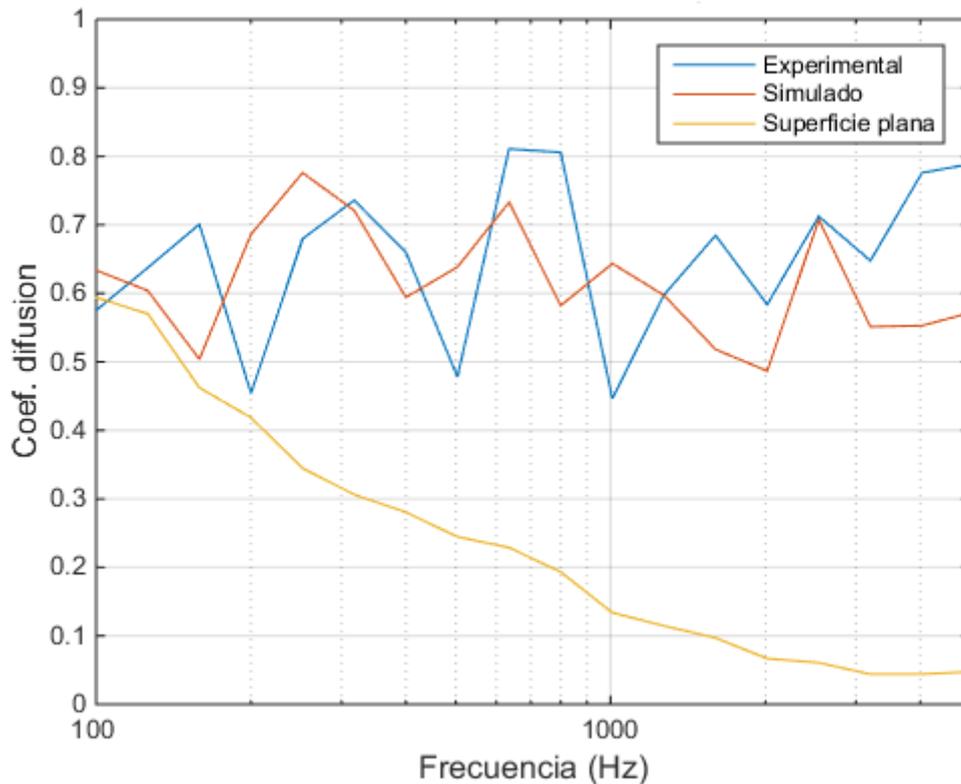


Figura 32: Coeficiente de difusión en el rango $\varphi \pm 55^\circ$

Calculando el coeficiente de difusión bajo las nuevas condiciones vemos que sí que hay difusión a bajas frecuencias por lo que sería correcto suponer que los cálculos teóricos son correctos y el error solo ha ocurrido en la ejecución de la medida.

Capítulo 5. Conclusiones y propuesta de trabajo futuro

Al comienzo del trabajo se han planteado una serie de objetivos que han servido para dar forma al contenido. Todos ellos se han ido cumpliendo en el desarrollo del trabajo.

1. Se ha conseguido sintetizar los conceptos clave sobre los difusores comerciales actuales, tanto sus puntos fuertes como limitaciones. También se ha conseguido condensar los conceptos clave sobre los cristales de sonido.
2. Se ha diseñado un sistema difusor acústico que, en vista de los resultados obtenidos del estudio teórico, analizando la gráfica del coeficiente de difusión respecto a cada banda de frecuencia por tercio de octava, se puede concluir que los cristales de sonido pueden ser usados para controlar las frecuencias graves en la propagación del sonido en una sala.
3. Se ha fabricado el sistema difusor obtenido de la optimización multiobjetivo, realizado mediante funciones en Matlab.
4. Se ha medido la difusión del sistema acústico fabricado siguiendo la norma ISO 17497-2 (6), debido a errores en la ejecución de la medida no todos los datos son aprovechables. Para los datos obtenidos de zonas donde el sonido directo se puede diferenciar del reflejado se obtienen coeficientes de difusión parecidos a los obtenidos teóricamente.

Para corregir esto se propone repetir la medida bajo unas condiciones que permitan diferenciar correctamente ambos sonidos, es decir, que el radio de la semicircunferencia micrófono-difusor tenga una longitud mínima de 12 metros.

Además, para aumentar el conocimiento sobre las prestaciones del diseño obtenido optimizado se propone medir el coeficiente de radiación o coeficiente de scattering. Para ello se seguirá la norma ISO 17497-1 (5), la norma establece que la medida ha de realizarse en cámara reverberante e instalar la muestra a estudio en una mesa giratoria. Teniendo en cuenta que el prototipo tiene una longitud de 3,6 metros, es bastante improbable encontrar una cámara reverberante que pueda albergar el prototipo sobre la mesa giratoria. Se propone volver a construir el prototipo a escala para cumplir este requisito. Aprovechando las nuevas medidas del prototipo a escala también se propone repetir la medida de coeficiente de difusión en cámara anecoica.

Los resultados de este trabajo han sido presentados para su exhibición mediante un panel en la XXXI SALÓN TECNOLÓGICO DE LA CONTRUCCION EXCO 2017.

Capítulo 6. Bibliografía

1. **Ewald, P.P.** *Fifty years of X-ray Diffraction*. Utrecht : N. V. A. Oosthoek's Uitgeversmaatschappij, 1962.
2. **C. Kittel.** *Introduction to Solid State Physics*. New York : John Wiley & sons, 1996.
3. **L. Brillouin.** *Wave propagation in periodic structures*. New York : Dover Publications, 1946.
4. *Band structure of elastic waves in two dimensional systems*. **M. Sigalas y E.N. Economou.** 3, Crete : Solid State Communications, 1993, Vol. 86.
5. **ISO.** 17497-1. *Acoustics sound-scattering properties of surfaces. Part 1: Measurement of the random-incidence scattering coefficient in a reverberation room*. Ginebra : International Organization for Standardization, 2004.
6. —. 17497-2. *Acoustics sound-scattering properties of surfaces. Part 2: Measurement of the Directional Diffusion Coefficient in a Free Field*. Ginebra : International Organization for Standardization, 2012.
7. —. 354. *Acoustics - Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Ginebra : International Organization for Standardization, 2003.
8. **Trevor Cox y Peter D'Antonio.** *Acoustic Absorbers and Diffusers : Theory, design and application*. New York : Taylor & Francis, 2009.
9. **Yee, Kane S.** Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1966, Vols. 14, pp302-307.
10. **Jiménez González, Noé.** *Simulación de tejidos vegetales mediante Diferencias Finitas*. Gandia : Tesis de Master UPV, 2009.
11. **Coello Coello, Carlos A.** *Introducción a la Computación Evolutiva*. Mexico D.F. : CINVESTAV-IPN, 2016.
12. *Optimization of soninc crystal attenuation properties by ev-MOGA multiobjective evolutionay algorithm*. **J.M. Herrero, y otros.** 2, s.l. : Structural and Multidisciplinary Optimization, 2009, Vol. 39. 1615-1488.
13. **Bernhard Molina, Andrés.** *Construcción y caracterización de un prototipo de difusor periódico de tres dimensiones de estructura cristalina*. Gandia : TFM EPSG , 2012.
14. **Bongiovanni, Pablo, Cascino, Marcelo y Sanso, Marco.** *Análisis y diseño de difusores acústicos*. Argentina : Universidad Tecnológica Nacional, 2011.

15. *Optimized sound diffusers based on sonic crystals using a multiobjective evolutionary algorithm.* **Redondo Pastor, Javier, y otros.** 5, s.l. : The Journal of the Acoustical Society of America, 2016, Vol. 139.
16. **Atanasio, P y Fuster, J.M.** *Diseño y caracterización de un difusor de estructura cristalina.* s.l. : EPSG. UPV., 2011.
17. **Borjabad, R.** *Aplicaciones prácticas de la técnica MLS en medidas de acústica arquitectónica.* Barcelona : Tecnicacustica , 1996.
18. *An Efficient Algorithm for Measuring The Response Using Pseudorandom Noise .* **Borish, J y Angell, J.B.** 7, s.l. : J. Audio Eng. Soc., 1983, Vol. 31.