

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Caracterización de la difusión producida por difusores de estructura cristalina”

TESIS DE MASTER

Autor:
Pedro Atanasio Moraga

Director/es:
D. Francisco Javier Redondo Pastor

GANDIA, 05/09/2012

*“Si las puertas de la percepción se purificaran todo
se le aparecería al hombre como es, infinito”*

William Blake

“Caracterización de la difusión producida por difusores de estructura cristalina”

Autor: Pedro Atanasio Moraga

Director: Francisco Javier Redondo Pastor

Resumen

Uno de los problemas más importantes a resolver en la Acústica de Salas consiste en la creación de un campo sonoro difuso. Es bien sabido que los difusores de sonido pueden mejorar el rendimiento acústico de las salas de diferentes maneras, por ejemplo, aumentando la difusión del campo sonoro, la impresión subjetiva de la 'espacialidad', y la eliminación de ecos, focalizaciones y la coloración⁽¹⁾. Para esto es necesario evitar, en lo posible, las reflexiones especulares en algunos lugares.

Los difusores acústicos empleados habitualmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, generalmente, a frecuencias medias-altas. Los difusores objeto del estudio pretenden dar soluciones a dicha limitación, actuando sobre un rango de frecuencias más graves, que normalmente son las que más problemas generan en cuanto a la percepción óptima del sonido. La forma de este tipo de difusores se basa en una red cristalina, presente en la estructura atómica de muchos materiales de la naturaleza.

Abstract

One of the most important problems to be solved in room acoustics is the creation of a diffuse sound field. It is widely known that sound diffusers can improve the acoustic performance of rooms in different ways, for instance, by enhancing the sound field diffusion, the subjective impression of “spatiality”, removing echoes, sound focusing/ targeting and colouration. To achieve this, specular reflections must be avoided, as much as possible, in some places.

The commonly used acoustic diffusers work in a limited range of frequency, usually medium and high frequencies. In this paper, diffusers which are the object of study are aimed to solve this limitation and to work in a range of lower frequencies, what usually causes more problems while perceiving the sound. The shape of this sort of diffusers is based on a crystal structure commonly present in the atomic structure of many materials in nature.

Autor: Pedro Atanasio Moraga

Email: pedatmo@epsg.upv.es

Fecha de entrega: 05-09-2012

Índice de contenidos

	Página
1.- Objeto y antecedentes.....	5
1.1.- <i>Introducción.....</i>	5
1.2.- <i>Objetivos.....</i>	5
2.- Introducción teórica.....	7
2.1.- <i>Difusión acústica.....</i>	9
2.1.1.- <i>Introducción.....</i>	9
2.1.2.- <i>Difusores de sonido.....</i>	9
2.1.3.- <i>Principales tipos de difusores de Schoroeder.....</i>	10
2.1.3.1.- <i>Difusores MLS.....</i>	10
2.1.3.2.- <i>Difusores QRD.....</i>	11
2.1.3.3.- <i>Difusores PRD.....</i>	13
3.- Difusores de estructura cristalina.....	15
3.1.- <i>Introducción a los cristales.....</i>	15
3.2.- <i>Cristales de sonido.....</i>	18
3.2.1.- <i>Difracción de ondas por cristales.....</i>	18
3.2.2.- <i>Bandas prohibidas de energía.....</i>	19
3.2.3.- <i>Parámetros estructurales.....</i>	22
4.- Programa de experiencias	24
4.1.- <i>Difusores a estudio.....</i>	24
4.1.1.- <i>Difusor bidimensional de estructura cristalina.....</i>	24
4.1.2.- <i>Difusor tridimensional de estructura cristalina.....</i>	27
4.2.- <i>Medición en cámara anecoica.....</i>	28
4.2.1.- <i>Sistema de medición.....</i>	28
4.2.2.- <i>Método de medición.....</i>	31
4.3.- <i>Medición en sala real a escala.....</i>	36

<i>4.3.1.- Sistema de medición</i>	36
<i>4.3.2.- Método de medición</i>	38
5.- Análisis de resultados	41
<i>5.1.- Cámara anecoica</i>	41
<i>5.2.- Sala real a escala</i>	43
6.- Conclusiones y líneas futuras	46
7.- Bibliografía	48

Índice de figuras

	Página
1.- Representación de la caída del nivel de presión sonora en dB.....	7
2.- Difusor MLS.....	11
3.- Difusor QRD unidimensional.....	13
4.- Difusor QRD bidimensional.....	13
5.- Difusor PRD.....	14
6.- Ordenación geométrica de la estructura del cloruro sódico	15
7.- a) Retículo espacial de un sólido cristalino ideal	16
b) Celda unidad con constantes reticulares	16
8.- Puntos reticulares de una red espacial en 2D	16
9.- Redes de Bravais más comunes en 2D.....	17
10.- Celda de Wigner-Seitz.....	17
11.- Haces difractados en un cristal.....	19
12.- Reflexión de Bragg.....	20
13.- Zonas de Brillouin.....	21
14.- Prototipo original del cristal de sonido.....	25
15.- Factor de llenado del difusor.....	26
16.- Prototipo del difusor de estructura cristalina. Vista frontal y lateral	27
17.- Interface HR-2000	28
18.- Micrófono MIC-01.....	29
19.- Monitor activo BEHRINGER B2031A.....	29
20.- Montaje del brazo robotizado que sujeta el micrófono.....	30
21.- Configuración del sistema de medición cámara anecoica	30
22.- Ejemplo de técnica de medición bidimensional.....	31
23.- Montaje del brazo robotizado en cámara anecoica	31
24.- Medida de la reflexión del difusor en cámara anecoica.....	32
25.- Medida sin difusor	33
26.- Medida con superficie totalmente reflectante.....	33
27.- Diagrama de la obtención de la respuesta al impulso mediante MLS	34
28.- Diagrama de obtención de la respuesta al impulso mediante SWEEP....	35
29.- Monitor de estudio activo Genelec 8020b	37
30.- Medidas recinto a escala.....	37
31.- Medidas recinto real.....	37
32.- Configuración del sistema de medición sala real	38
33.- Método de medición en sala real a escala	39
34.- Detalle de mallado en suelo de sala real a escala.....	39
35.- Método de medición difusor bidimensional	40
36.- Diagrama de flujo del procesado de datos con MATLAB	41
37.- Gráfica del coeficiente de difusión	42
38.- Tiempo de reverberación medio por tercios de octava.....	43
39.- Desviación estándar del tiempo de reverberación	44
40.- SPL medio por tercios de octava.	45
41.- Desviación estándar del SPL.....	45

1- Objeto y antecedentes

1.1.- Introducción

Uno de los problemas más importantes a resolver en la Acústica de Salas consiste en la creación de un campo sonoro difuso⁽¹⁾. Es bien sabido que los difusores de sonido pueden mejorar el rendimiento acústico de las salas de diferentes maneras, por ejemplo, aumentando la difusión del campo sonoro, la impresión subjetiva de la 'espacialidad', y la eliminación de ecos, focalizaciones y la coloración⁽²⁾. Para esto es necesario evitar, en lo posible, las reflexiones especulares en algunos lugares.

Los difusores acústicos empleados habitualmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, generalmente, a frecuencias medias-altas. Los difusores objeto del estudio pretenden dar soluciones a dicha limitación, actuando sobre un rango de frecuencias más graves, que normalmente son las que más problemas generan en cuanto a la percepción óptima del sonido.

La forma de este tipo de difusores se basa en una red cristalina, presente en la estructura atómica de muchos materiales de la naturaleza. Las redes cristalinas se caracterizan fundamentalmente por un orden o periodicidad. La estructura interna de los cristales viene representada por la llamada celdilla unidad, que se repite una y otra vez en las tres direcciones del espacio.

Cuando las ondas se propagan a través de un medio con elementos dispersores y éstos además están colocados de forma periódica como ocurre en las estructuras cristalinas, la dispersión múltiple nos lleva a un fenómeno conocido como estructuras en bandas. Esto significa que las ondas se pueden propagar en un cierto rango de frecuencias, siguiendo unas reglas de dispersión, mientras que en otros rangos de frecuencias la propagación es eliminada. Las primeras son llamadas bandas permitidas y las últimas bandas prohibidas (*band gap*).

La aparición de estos *gaps* en las bandas frecuenciales, donde la propagación está prohibida, fue estudiada primeramente para ondas electrónicas en sólidos, proporcionando la base para la comprensión de las propiedades de los conductores, semiconductores y aislantes⁽³⁾. Posteriormente estos estudios fueron aplicados en el campo de la óptica a través de la teoría de la difracción y desde hace escasos años a la acústica, campo objeto del presente trabajo.

1.2.- Objetivos

El objeto del estudio es el análisis del comportamiento de varios difusores de estructura cristalina.

El primer difusor objeto del análisis sólo presenta estructura cristalina en dos direcciones del espacio, puesto que solamente se analizará la difusión horizontal del sonido. Por tanto, será un difusor bidimensional.

El segundo difusor objeto del estudio presenta estructura cristalina en 3 direcciones del espacio, teniendo así un difusor tridimensional. Se analizará la difusión horizontal y vertical del sonido.

Los objetivos principales del trabajo son:

- 1-. Explicar y comprobar las características reales de estos dispositivos.
- 2-. Evaluar el comportamiento de estos difusores en campo libre y en campo confinado.

Para ello, se ha estructurado en los siguientes apartados:

1. **OBJETO Y ANTECEDENTES**, en el que se encuentra una introducción al estudio y se plantean los objetivos del mismo.
2. **CONCEPTOS TEÓRICOS**, en el que se revisa la teoría necesaria para abordar el estudio de este tipo de dispositivos.
3. **DIFUSORES DE ESTRUCTURA CRISTALINA**, en el que se realiza una descripción de cómo funcionan este tipo de difusores en base a la teoría descrita en el punto anterior.
4. **PROGRAMA DE EXPERIENCIAS**, donde se describen las actividades realizadas para analizar el comportamiento de los difusores.
5. **ANÁLISIS DE RESULTADOS**, donde se resumen los resultados del programa de experiencias.
6. **CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**.
7. **BIBLIOGRAFÍA**, donde se recopila la bibliografía de referencia.

2.- Introducción teórica

El presente trabajo se inscribe dentro de la acústica de Salas, una de las tres ramas de la acústica arquitectónica junto con el aislamiento acústico y la acústica urbanística. La acústica de salas estudia la transmisión de sonidos en el interior de un recinto.

El principal fenómeno acústico asociado a la propagación de sonidos en el interior de una sala es la reverberación.

Se entiende por reverberación la persistencia del sonido tras la extinción de la fuente sonora debido a las múltiples ondas reflejadas que continúan llegando al oído. Es la continua vuelta del sonido causada por efectos de acústica ambiental.

El sonido producido en una habitación normal se ve algo modificado por las reverberaciones debidas a las paredes y los elementos que encontramos en su interior.

Para lograr las mejores cualidades acústicas, las salas deben diseñarse de forma que reflejen el sonido lo suficiente para proporcionar una calidad natural, sin que introduzcan una reverberación excesiva en ninguna frecuencia, sin que provoquen ecos no naturales en determinadas frecuencias y sin que produzcan interferencias o distorsiones no deseables.

- *Tiempo de reverberación*

Es el tiempo que transcurre desde el instante en que una fuente sonora se interrumpe hasta que su energía decae a $1/1.000.000$ de su fuerza original. Esta caída de energía es cuantificada como nivel de presión sonora, que en escala logarítmica corresponde a 60 decibelios con respecto a su valor inicial, por eso se abrevia como TR-60 (Fig. 1).

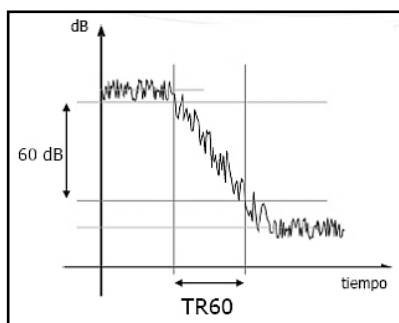


Fig. 1.- Representación de la caída de nivel de presión sonora en dB con el tiempo

En cuanto a la percepción del oído, correspondería al tiempo que tarda un sonido en desaparecer y fundirse entre los sonidos ambientales dentro de un espacio cerrado.

El tiempo de reverberación de un ambiente depende de la absorción de sus elementos; cuando son muy absorbentes, el tiempo es pequeño y se dice que la sala es sorda o apagada. Si los elementos son reflectores, el tiempo es muy grande y los sonidos se percibirán entremezclados y confusos; entonces se dice que la sala es viva o resonante. La reverberación determina la buena acústica de un ambiente.

⁽⁴⁾Según la teoría estadística se puede predecir el tiempo de reverberación a partir del volumen y absorción de una sala. La fórmula más utilizada para el cálculo del tiempo de reverberación es la fórmula de Sabine:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{total}} \text{ (s)} \quad (1)$$

donde:

V es el volumen de la sala

A_{total} es la Absorción total, definida como

$$A_{total} = \alpha S \quad (2)$$

donde:

α es el coeficiente de absorción

S es la Superficie

El tiempo de reverberación varía con la frecuencia, tendiendo a disminuir cuando ésta aumenta, dado que la absorción de la mayoría de los materiales es mayor a altas frecuencias.

-Modos propios⁽⁵⁾

La combinación de ondas incidentes y reflejadas en una sala da lugar a interferencias constructivas y destructivas o, lo que es lo mismo, a la aparición de las denominadas ondas estacionarias o modos propios de la sala. Cada modo propio va asociado a una frecuencia, igualmente denominada propia, y está caracterizado por un nivel de presión sonora SPL que varía en función del punto considerado. El número de modos propios es ilimitado. La presencia de todos ellos provoca en cada punto una concentración de energía alrededor de las

diversas frecuencias propias, lo que confiere un sonido característico a cada sala, llamado “coloración”.

2.1.- Difusión acústica

2.1.1.- Introducción

Se puede definir la difusión acústica como el efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie denominada “difusor”. La existencia de difusión de sonido en salas de concierto significa que la energía del campo reverberante llega a los oídos de los espectadores por un igual desde todas las direcciones del espacio. Ello contribuirá a crear un sonido altamente envolvente y, por lo tanto, a aumentar el grado de impresión espacial existente, con lo que aumenta también la valoración subjetiva de la calidad acústica del recinto en cuestión.

⁽⁶⁾ Uno de los problemas más importantes en la acústica arquitectónica son los ecos. Los ecos son causados por las reflexiones tardías que llegan con un nivel significativamente por encima de la reverberación general. A menudo se oyen ecos en la parte delantera de auditorios mal diseñados, llegando desde la pared posterior. Los ecos también pueden llegar de balcones o de otros múltiples caminos de reflexión. Un tipo de ecos son los ecos flotantes, los cuales se producen por las reflexiones entre paredes paralelas, creando una repetición del sonido percibida como una sucesión rápida de pequeños ecos.

El uso de difusores puede ser muy ventajoso en el tratamiento de ecos respecto de la absorción, ya que estos no eliminan la energía del campo sonoro.

Los difusores se usan también para eliminar otras anomalías que pueden aparecer en estos recintos, en forma de coloraciones, desplazamiento de la fuente sonora o focalizaciones del sonido.

En acústica, es difícil distinguir entre dispersión y difusión. El coeficiente de dispersión hace referencia a la capacidad de una superficie de eliminar la energía en la dirección de la reflexión especular, mientras que el coeficiente de difusión hace referencia a una medida de calidad referida a la uniformidad espacial de las reflexiones producidas por una superficie.

2.1.2.- Difusores de sonido ⁽⁴⁾

Los difusores de sonido son elementos diseñados para reflejar y dispersar el sonido de manera uniforme en sus múltiples direcciones. Pueden ser superficies con diferentes coeficientes de

absorción colocadas una al lado de otra o elementos expresamente diseñados para dispersar de forma uniforme y en múltiples direcciones la energía sonora que incide sobre los mismos.

Estos elementos están creados específicamente para márgenes de frecuencias determinados, los cuales condicionan las dimensiones de los mismos.

Los difusores más utilizados son los difusores de Schroeder⁽⁶⁾⁽⁷⁾, también conocidos como difusores **R.P.G.** (Reflection Phase Grating). Son dispositivos que consisten en un grupo periódico de hendiduras de igual amplitud pero de diferentes profundidades, separadas por paredes rígidas pero muy estrechas.

Las profundidades de las rendijas se determinan a partir de secuencias matemáticas que tienen la propiedad de que la transformada de Fourier del factor de reflexión es constante.

El principio de funcionamiento de éste tipo de difusores está basado en el fenómeno de interferencia entre ondas sonoras. Cuando dos ondas se superponen, las presiones sonoras instantáneas respectivas se suman. Si las ondas son iguales (misma amplitud) y están en el mismo estado de vibración en cada instante de tiempo, la presión sonora se dobla, pero si ambas ondas tienen misma amplitud y signo diferente se cancelan, produciéndose una interferencia destructiva.

Cuando una onda incide sobre una de las ranuras, ésta se propaga por su interior siguiendo un camino paralelo a las paredes de la ranura hasta alcanzar el fondo de la misma, en dicho instante, la onda se refleja y viaja en sentido contrario hasta alcanzar nuevamente el extremo superior. La fase de dicha onda depende del camino total recorrido por la misma en el interior de la ranura. Debido a que las ranuras tienen distintas profundidades, la fase de la señal asociada a cada una en el instante de la re-radiación será diferente, lo cual dará lugar a un fenómeno de interferencia entre todas las ondas que intervienen.

La distribución de la energía reflejada por el difusor en las diferentes direcciones del espacio dependerá del tipo de interferencia que tenga lugar, es decir, de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras.

2.1.3.- Principales tipos de difusores de Schroeder:

2.1.3.1.- Difusores MLS (Maximum Length Sequence)

Basados en unas secuencias pseudoaleatorias periódicas, denominadas de longitud máxima, que sólo pueden adquirir dos valores diferentes: -1 y +1.

Se crean partiendo de una superficie lisa y reflectante, la cual se subdivide en tramos de igual anchura. A cada tramo se le asigna un valor de la secuencia pseudoaleatoria, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Si el valor es -1, el tramo queda inalterado.
- Si el valor es +1, se crea una ranura en el espacio ocupado por el tramo.

La anchura (W) y la profundidad (D) de cada tramo, se calculan como sigue

$$W = \lambda/2 \quad (3)$$

$$D = \lambda/4 \quad (4)$$

donde “ λ ” es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

El margen de frecuencias para el cual la difusión es óptima es únicamente del orden de una octava.

Este tipo de difusores presenta una menor absorción a bajas frecuencias que los difusores QRD y PRD.

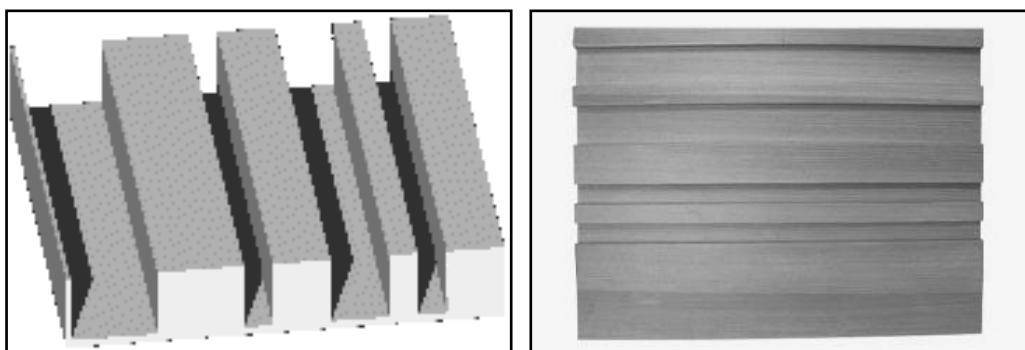


Fig. 2.- Difusor MLS

2.1.3.2.- Difusores QRD (*Quadratic Residue Difusor*)

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadráticos QRD, los unidimensionales (Fig. 3) y los bidimensionales (Fig. 4).

- *Unidimensionales:*

Los difusores unidimensionales QRD son los más utilizados a nivel práctico, tanto en salas de concierto como en estudios de grabación. Consisten en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de igual anchura y de diferente profundidad. Por lo general, dichas ranuras están separadas por unos divisores delgados y rígidos.

La profundidad de cada ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática prefijada dando lugar a estructuras repetitivas (periódicas) que producen, en un determinado margen de frecuencias, una dispersión o difusión del sonido incidente en planos perpendiculares a dichas ranuras.

$$s = n^2 \text{ mod } p \quad (5)$$

donde:

p es un número primo

n es un número entero que va desde 0 hasta $p-1$

mod es la operación matemática módulo.

Se logra una óptima difusión del sonido dentro de un determinado margen de frecuencias. La frecuencia más elevada para la cual se produce difusión del sonido aumenta a medida que la anchura de las ranuras disminuye, en tanto que la mínima frecuencia disminuye a medida que aumenta la máxima profundidad.

Existe un límite al valor máximo de dicha relación, puesto que las ranuras estrechas y muy profundas producen un exceso de absorción acústica. Dicho límite lleva a que, en la práctica, el margen útil de frecuencias quede restringido a prácticamente 3 octavas, es decir:

$$\frac{f_{max}}{f_0} \leq 8 \quad (6)$$

donde:

f_{max} = frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión

f_0 = frecuencia de diseño (la mínima).

Fuera de dicho margen, el difusor tiende a comportarse como una superficie plana, dando lugar a reflexiones prácticamente especulares.

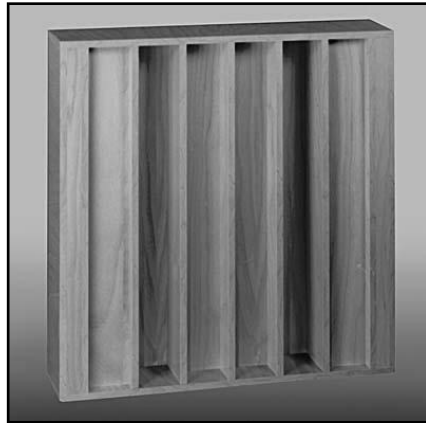


Fig. 3.- Difusor QRD unidimensional

- *Bidimensionales*

Los difusores bidimensionales QRD aparecen con el objetivo de obtener una óptima difusión del sonido incidente en todas las direcciones del espacio.

En este tipo de difusores, las ranuras son sustituidas por pozos dispuestos en paralelo, de profundidad variable y de forma generalmente cuadrada.

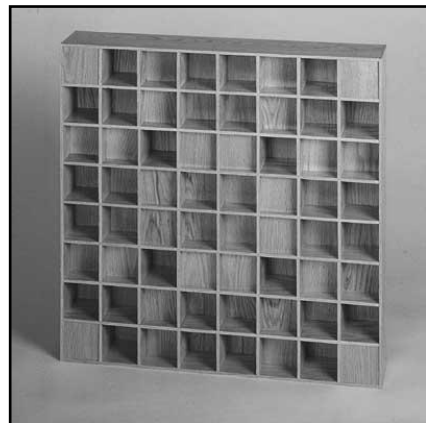


Fig. 4.- Difusor QRD bidimensional

2.1.3.3.- *Difusores PRD (Primitive Root Difussor)*

Los difusores de raíces primitivas PRD son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la única diferencia de que la profundidad para cada ranura se obtiene a partir de una secuencia generadora distinta.

$$s_n = g^n \text{ mod } p \quad (7)$$

donde:

p es un número primo

g es la raíz primitiva de p

n es un número entero que va desde 1 hasta $p-1$

mod es la operación matemática módulo.

A diferencia de lo que sucede con los difusores QRD, no existe simetría dentro de cada periodo (Fig.5).

Las propiedades de este tipo de difusores son muy parecidas a las de los difusores unidimensionales QRD, salvo por el hecho de que la energía asociada a la reflexión especular es prácticamente nula, por lo que los hace aconsejables como canceladores de eco.

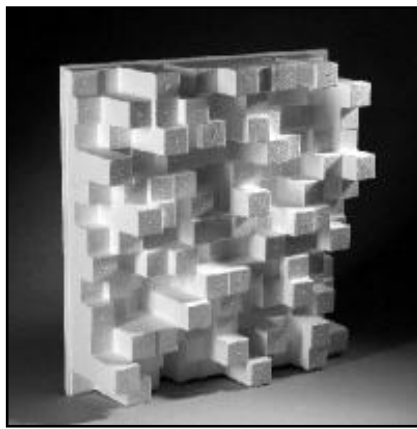


Fig. 5.- Difusor PRD

3.- Difusores de estructura cristalina

3.1.- Introducción a los cristales

Se sabe que una gran cantidad de sólidos en la naturaleza poseen estructuras repetitivas y regulares (a nivel microscópico), tales como los diamantes o estructuras sencillas de NaCl, CLCs, SZn. No han sido pocos los trabajos que se han realizado para llegar a la conclusión de denominar cristales a los materiales con estas características, pero el que confirmó que los cristales estaban formados por una repetición regular de estructuras idénticas (átomos o grupos de átomos) a lo largo de todo el sólido fue presentado en 1912 por Laue, Friedrich y Knipping. Consiguieron demostrar su teoría⁽⁸⁾ por medio de los estudios que realizaron en el campo de la difracción de rayos-X. Este trabajo demostraba dos hechos; el primero, que los rayos-X eran ondas, ya que se podían difractar; el segundo, que los sólidos cristalinos estaban formados por una malla periódica de átomos en las tres direcciones del espacio.

El rasgo importante de un cristal es la periodicidad o regularidad de la disposición en los modelos.

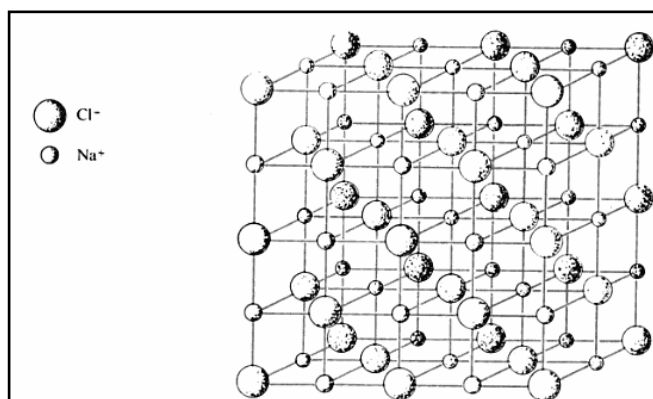


Fig. 6.- Modelo mostrando la ordenación geométrica de la estructura del cloruro sódico

Una estructura compuesta de átomos o moléculas que se repite una y otra vez a intervalos regularmente espaciados y con la misma orientación, se ajusta perfectamente a la definición de cristal

Un concepto de interés dentro de los cristales es la *celdilla unidad*⁽⁹⁾ (Fig. 7). Una pequeña unidad del cristal al repetirla reproduce el cristal completo. Si la celda unidad se compone del mínimo volumen posible, se denomina *celda primitiva*. Se puede decir que una celdilla unidad es como una plantilla maestra para todo el cristal.

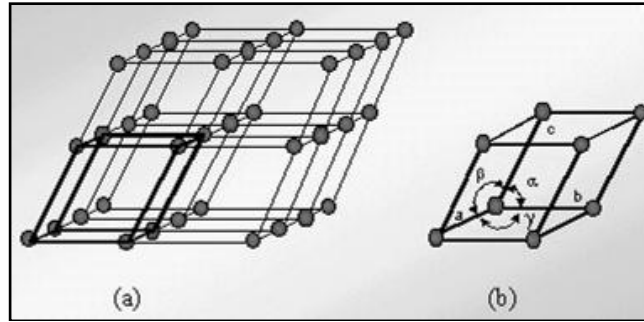


Fig. 7.- a) Retículo espacial de un sólido cristalino ideal. b) Celda unidad con constantes reticulares

Se puede considerar el espacio dividido en tres conjuntos de planos, cada uno de ellos constituido por planos paralelos y a igual distancia. Esta división del espacio produce el conjunto de celdas unidad, idénticas en tamaño, forma y orientación. Cada celda es un paralelepípedo y cada una un paralelogramo. Como los planos interaccionan entre sí, se producen conjuntos de líneas, y al hacerlo estas líneas lo harán en puntos. Dichos puntos son los *puntos reticulares* (*retículos de Bravais*) (Fig. 8), los cuales están colocados de tal manera en el espacio que cada punto contiene idénticos alrededores, entendiendo por idénticos alrededores que el retículo cuando se mira en una dirección determinada a partir de un punto reticular, tiene la misma apariencia cuando se mira en igual dirección desde cualquier otro punto reticular.

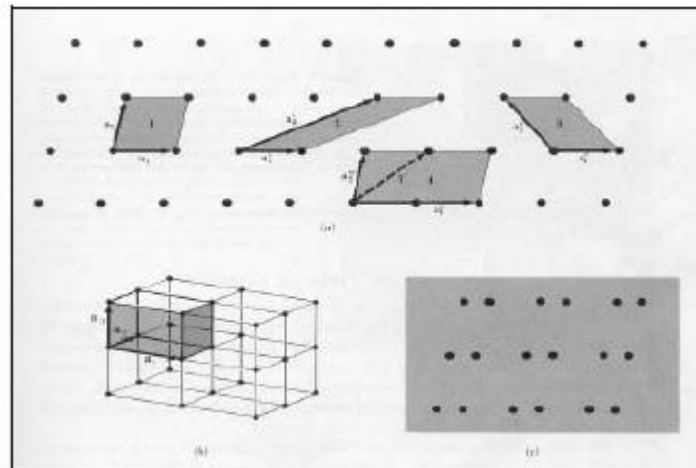


Fig. 8.- Puntos reticulares de una red espacial en dos dimensiones. Los pares de vectores a_1 y a_2 son vectores de translación de la red.

Se denomina *red de Bravais* ⁽⁸⁾ (Fig. 9) a una red periódica de puntos. Se trata de una red discreta de puntos con una disposición y orientación idénticas, independientemente de cuál sea el punto de orientación. 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.

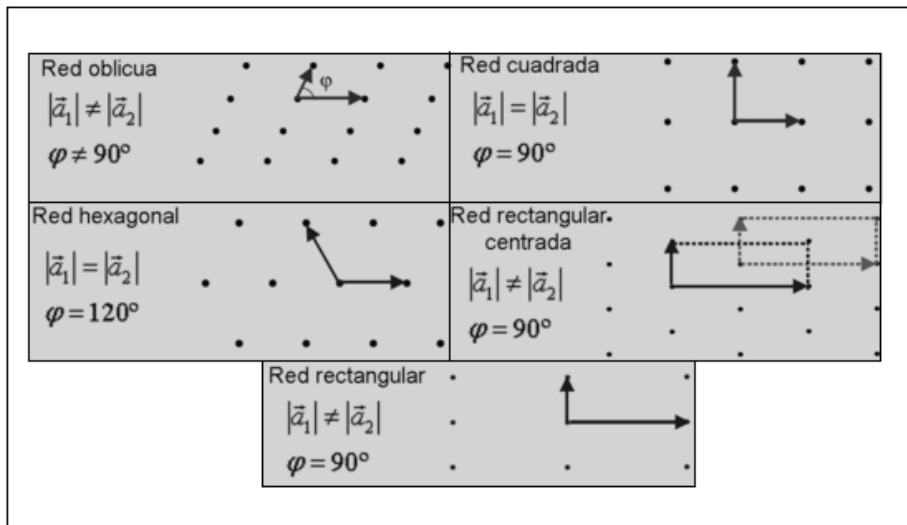


Fig. 9.- Redes de Bravais más comunes en dos dimensiones.

Hay que tener en cuenta la fracción del espacio de la celda unitaria ocupada por los átomos, suponiendo que estos son esferas sólidas. Es lo que se llama *factor de llenado*. Viene dado por la siguiente fórmula:

$$f = \frac{nv}{V_c} \tag{8}$$

donde f es el factor de llenado o fracción de volumen ocupado, n es el número de átomos por celda, v es el volumen del átomo y V_c es el volumen de la celda.

Otro tipo de celda es la *celda de Wigner-Seitz* (Fig. 12), definida como la celda unidad primitiva elegida de forma que el punto de la red que contiene es el centro de la celda. Todo el espacio puede rellenarse con estas celdas.

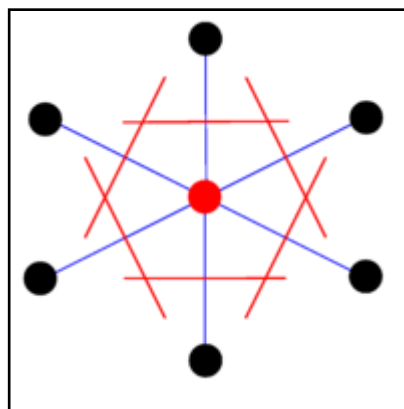


Fig. 10.- Celda de Wigner- Seitz. El volumen encerrado más pequeño que se obtiene para conseguir una celda primitiva es la celda primitiva de Wigner- Seitz.

3.2.- Cristales de sonido

3.2.1.- Difracción de ondas por cristales

En física, la difracción es un fenómeno característico de las ondas que consiste en la dispersión y curvado aparente de las ondas cuando encuentran un obstáculo. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio.

El fenómeno de la difracción es un fenómeno de tipo interferencial, y como tal, requiere la superposición de ondas coherentes entre sí. Los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que el tamaño del objeto aumenta comparado con la longitud de onda.

Cuando un conjunto de ondas se propaga a través de un medio que contiene muchos elementos dispersores, cada onda va a ser dispersada por cada uno de estos elementos, y las ondas dispersadas volverán a ser dispersadas por los otros elementos. Este proceso se repite estableciéndose un patrón recursivo infinito de redispersión entre dispersores.

La dispersión múltiple de ondas es responsable de un buen número de fenómenos, como pueden ser la modulación del sonido ambiente en el océano.

Si además los elementos dispersores están colocados de forma periódica como ocurre en las estructuras cristalinas, la dispersión múltiple lleva a un fenómeno conocido como estructuras en bandas. Esto significa que las ondas pueden propagar en un cierto rango de frecuencias, siguiendo unas reglas de dispersión, mientras que en otros rangos de frecuencias la propagación es eliminada. Las primeras son llamadas bandas permitidas, y las últimas, bandas prohibidas (*band gap*).

En ciertas condiciones, la inhibición de la propagación de la onda ocurre para todas las direcciones de incidencia. En ese caso, podemos decir que se ha producido un “hueco” completo en la banda de frecuencia, el cual se ha demostrado que ocurre cercano a la frecuencia del pico de la *reflexión de Bragg*.

En el caso de bandas permitidas y prohibidas a la propagación del campo acústico, las ondas deben encontrarse con una distribución periódica de la densidad, y que ésta sea comparable a la longitud de onda del frente incidente.

Este tipo de estructuras reciben el nombre de cristales de sonido. Un cristal de sonido se puede denominar como aquel sistema en el que existe una distribución periódica de la densidad, ordenado según las dimensiones de la longitud de onda acústica con la que van a interactuar, de forma que tenga lugar fenómenos de interferencia.

3.2.2.-Bandas prohibidas de energía

La difracción depende pues de la estructura del cristal y de la longitud de onda. Si la longitud de onda de la radiación es comparable o incluso menor que la constante de la red, pueden aparecer haces difractados en direcciones muy diferentes de la correspondiente al haz incidente. La difracción producida por una estructura cristalina verifica la *ley de Bragg*⁽⁸⁾.

La *ley de Bragg* es una explicación de los haces difractados de un cristal. Está basada en la reflexión especular. Si se considera que los cristales pueden comportarse como redes de difracción y se hace una simplificación de que las ondas incidentes se reflejan de manera especular sobre planos paralelos del cristal, el haz difractado solamente será visible cuando exista una interferencia constructiva entre los rayos que van reflejándose sucesivamente en los distintos planos cristalinos paralelos (Fig. 11). La condición de interferencia constructiva indica que la diferencia entre caminos recorridos por rayos reflejados en planos adyacentes debe ser un múltiplo entero de n longitudes de onda λ del haz. En este proceso se considera que la difusión es elástica, por tanto, la energía del rayo no cambia en la reflexión.

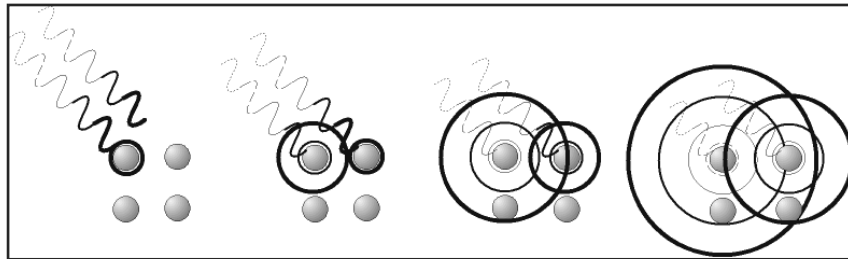
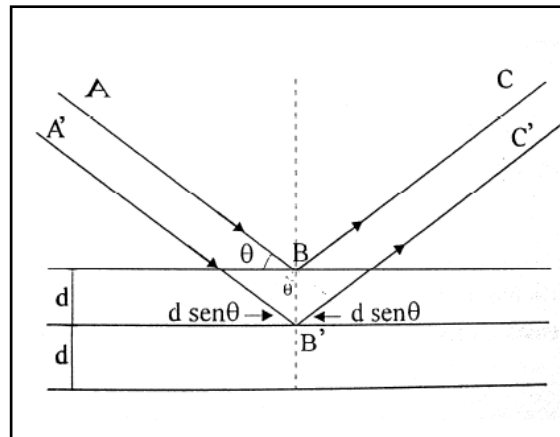


Fig.11.- Haces difractados en un cristal. Ley de Bragg

La *reflexión de Bragg* (Fig. 12) es un fenómeno característico de la propagación de una onda en un cristal. Dicha reflexión es la causante de la aparición de las llamadas “band gap” (bandas prohibidas de energía).

Fig. 12.- Reflexión de Bragg λ

La primera banda de energía se asocia con la primera reflexión de Bragg, que corresponde a la siguiente expresión:

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \quad (9)$$

Que para incidencia normal y $n=1$ queda:

$$\lambda = 2d = \frac{c}{f} \quad (10)$$

donde:

$$f = \frac{c}{2d} = \frac{c}{2a} \rightarrow k = \frac{\pi}{a} \quad (11)$$

La cual corresponde con el límite de la *zona de Brillouin*⁽¹⁰⁾

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 (G), la red recíproca es periódica al igual que la directa. En esta situación existe una cierta repetición de los vectores que sufren difracción. La celda de Wigner- Seitz, construida en el espacio recíproco, se conoce como la primera zona de Brillouin.

Las zonas de Brillouin son regiones limitadas de energía. En la primera zona, la onda tendrá una energía comprendida entre unos valores máximos y mínimo, y sus límites indicarán los valores de los vectores de onda que sufren difracción de Bragg.

La expresión (11) es equivalente a la condición de difracción:

$$(k')^2 = (k + G)^2 \quad (12)$$

Donde G corresponde a vectores de traslación:

$$G = \left(\frac{2\pi}{a}\right) \cdot (xn_x + yn_y) \quad \text{Producto vectorial} \quad (13)$$

La expresión (12) se puede simplificar:

$$k = \pm \frac{1}{2}G \quad (14)$$

Por lo tanto, aplicando la expresión (13)

$$k = \pm n \frac{\pi}{a} \quad (15)$$

Así, la primera reflexión de Bragg ocurre para $k = \pm \frac{\pi}{a}$, es decir, para aquel vector que coincide con el vector que queda dentro del límite de la primera zona de Brillouin y por tanto cumple las condiciones de reflexión.

Anteriormente se ha estudiado que la reflexión aparece para ese valor debido a que la onda reflejada por un átomo en la red lineal interfiere constructivamente con la onda reflejada por el átomo vecino más próximo. La diferencia de fase entre las 2 ondas reflejadas es $\pm 2\pi$.

Se puede demostrar que para estos valores de k , las soluciones están formadas por ondas que viajan hacia la derecha y hacia la izquierda: son ondas estacionarias, las cuales se producen por reflexiones sucesivas. Por tanto, ha aparecido una “band gap”.

Se puede decir entonces que existe una banda prohibida en $k = \pm \frac{\pi}{a}$ que se corresponde con la primera reflexión de Bragg y con los límites de la zona de Brillouin (Fig. 13)

Las siguientes “band gap” se encuentran en $\pm n \frac{\pi}{a}$, siendo n un número entero.

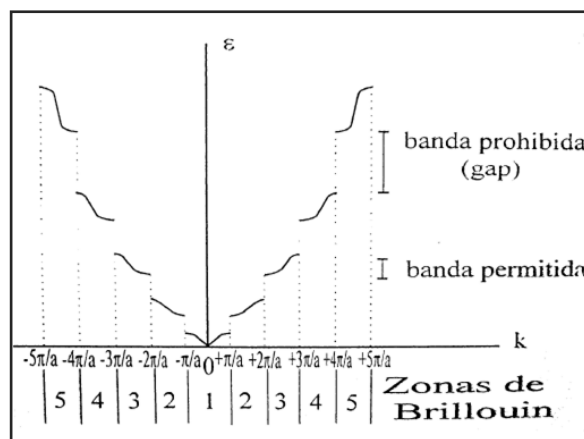


Fig. 13- Zonas de Brillouin

Las zonas de Brillouin se construyen uniendo la celda origen (dado que la estructura es periódica, cualquier volumen básico a partir del cual se forma la estructura puede actuar de celda origen) con sus celdas vecinas más próximas.

3.2.3.- *Parámetros estructurales*

Los parámetros que controlan la aparición de *gaps* son:

- El tipo de simetría de la estructura. En el estudio en cuestión se ha utilizado una red rectangular, aunque algunos autores como Economou et al⁽¹¹⁾ han estudiado teóricamente que, en los cristales de sonido formados a partir de redes triangulares aparece gap antes que en la red cuadrada. Es debido a que cuanto más redonda es la celda de Wigner- Seitz de la red recíproca, más posibilidades hay de que aparezca el gap.

- El contraste de velocidad entre la onda propagándose por el material “huésped” y por el elemento dispersor.

- El cociente entre las densidades de los elementos que forman el cristal. Según algunos autores⁽¹²⁾ este es el factor determinante para la aparición del gap en cristales de sonido. El aumento del cociente de densidades produce un aumento del gap existente. Sin embargo, en cristales de sonido este cociente puede hacerse tan grande que el material de más alta densidad se comporte como rígido y el sonido no se transmita por él, si no únicamente por el de baja densidad.

-El factor de llenado, definido como el ratio entre el volumen ocupado por cada dispersor respecto al total del volumen de la composición.

- La topología. El fenómeno de la dispersión se consigue mediante el uso de 2 materiales, cada uno con diferentes velocidades de propagación. Con los cristales de sonido, el material dispersor se define como aquel que presenta mayor densidad, y esto implica que posee una mayor velocidad de las ondas acústicas a través de él.

Topología Cermet: El material dispersor consiste en inclusiones aisladas, cada una de las cuales está completamente rodeada por el material huésped.

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 es más favorable para el desarrollo de huecos para ondas acústicas.

4.- Programa de experiencias

Este capítulo versará sobre la descripción y puesta a punto de los diferentes sistemas experimentales de medida para el estudio del comportamiento de un difusor de estructura cristalina bidimensional y un difusor de estructura cristalina tridimensional. Las características de los elementos de medida tienen un importante papel en la evolución de los resultados obtenidos, así como la precisión a la hora de realizar los experimentos.

4.1.- Difusores a estudio

El primer difusor objeto del análisis sólo presenta estructura cristalina en dos direcciones del espacio, puesto que solamente se analizará la difusión horizontal del sonido. Además, tiene 2 zonas claramente diferenciadas por la distinta distancia entre los centros en cada una de ellas. Por tanto, será un difusor bidimensional bi-periódico.

El segundo difusor objeto del estudio presenta estructura cristalina en 3 direcciones del espacio, teniendo así un difusor tridimensional periódico. Para ello es necesario realizar distintos módulos y juntarlos de forma que uno esté en posición horizontal, el siguiente a este en posición vertical y así sucesivamente. Se analizará pues la difusión horizontal y vertical del sonido.

4.1.1.- Difusor bidimensional de estructura cristalina

A diferencia de la mayoría de otros estudios realizados con anterioridad, se pretende que el difusor bidimensional de estructura cristalina sea útil para un rango de frecuencias entre 100-500 Hz. Debido a la inexistencia de difusores que trabajen en este margen de frecuencias, se va a usar para reducir o incluso eliminar las anomalías asociadas con los modos propios de dicho margen en una sala.

A efectos de la onda sonora incidente es interesante que la dimensión del difusor sea del mismo orden que la longitud de onda de la misma, para así obtener un manifiesto grado de difusión.

Recurriendo a la definición de longitud de onda $\lambda = c/f$ y sabiendo que la velocidad del sonido en el aire en condiciones normales es $c=345 \text{ m/s}$ se puede obtener la anchura total del elemento de difusión funcionando en un rango de frecuencias de 100 a 500 Hz

$$\lambda = \frac{345}{100} = 3,45 \text{ metros} \quad (16)$$

La muestra de ensayo está formada por un panel plano y un conjunto de cilindros con un radio de 0,035 metros. La distancia es variable entre ellos. En anchura, hay una diferencia de 0,08 metros entre los centros de los cilindros y 0,04 metros del último cilindro al panel plano (Fig. 15). A lo largo hay cuatro partes alternadas de dos en dos en el difusor (*difusor bi-periodico*). En una de ellas, la distancia entre centros es de 0,088 metros, y en la otra, la distancia entre centros es de 0,072 metros (Fig. 16). De esta manera se consigue que funcione a bajas frecuencias.

El prototipo original tiene pues una longitud de alrededor de 3,6 metros de longitud y una anchura de 0,315 metros. Se puede observar que la longitud final es un poco mayor a la calculada con anterioridad. Esto no supone ningún problema, ya que, teóricamente, el difusor funcionara incluso en frecuencias inferiores a 100 Hz. La altura es indiferente, ya que nuestra medición se va a realizar en un plano perpendicular al prototipo.

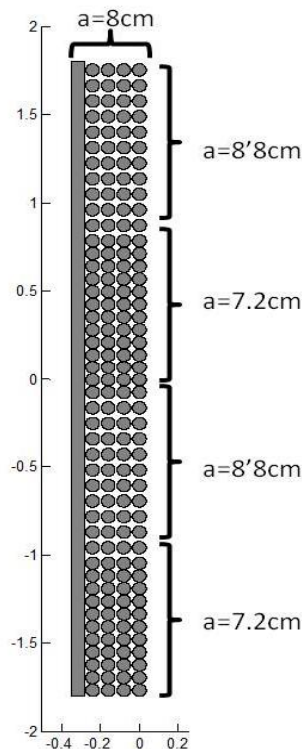


Fig. 14.- Prototipo original del cristal de sonido ⁽¹⁾

Debido a las grandes dimensiones del prototipo original y al excesivo peso que tendría dicho modelo, se ha decidido utilizar un prototipo a escala 1:4,38, para conseguir un difusor más manejable y poder medir con más facilidad, ya que se trabaja en campo lejano y la cámara anecoica de la Escuela no es muy grande. Se ha elegido esta escala por motivos comerciales y porque así el difusor escalado es válido para tercios de octava de un rango de frecuencias de 500-2500 Hz, que es en el que funciona dicho prototipo.

Por tanto, a escala 1:4,38, se tiene una longitud de aproximadamente 0,82 metros y una anchura de de 0,072 metros. Para que el prototipo tenga estabilidad, se ha elegido una altura de barras de 1 metro, algo superior a la longitud.

Lógicamente, la distancia entre centros también se reduce, obteniendo en unas zonas $b=0,0164$ metros y en otras $c=0,0201$ metros. La distancia entre centros en función de las filas es igual para todo el prototipo escalado, $a=0,018$ metros.

El factor de llenado del prototipo escalado es:

$$f = \frac{\pi r^2}{ab} \quad (17)$$

donde:

a es la distancia entre barras frontalmente

b es la distancia entre barras lateralmente.

Se puede ver con más facilidad en un plano de alzado en la figura 15:

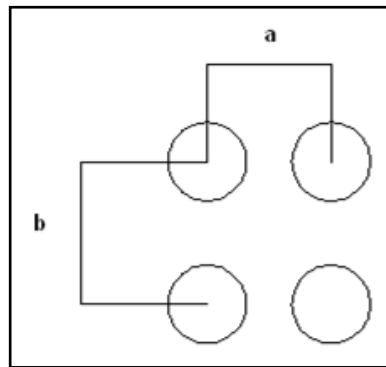


Fig. 15.- Factor de llenado del difusor. Existe una distancia a entre centros frontalmente, y una distancia b lateralmente.

Por tanto, y aplicando la fórmula de la longitud de onda $\lambda = c/f$, la distancia entre centros y el radio descritos con anterioridad, se obtiene el factor de llenado para la zona de interespaciado menor.

$$f = \frac{\pi * 0,008^2}{0,0164 * 0,018} = 0,6811 \quad (18)$$

Para la zona de interespaciado mayor, se tiene un factor de llenado:

$$f = \frac{\pi * 0,008^2}{0,020 * 0,018} = 0,5585 \quad (19)$$

El prototipo a escala que se va a caracterizar se puede visualizar en la siguiente figura

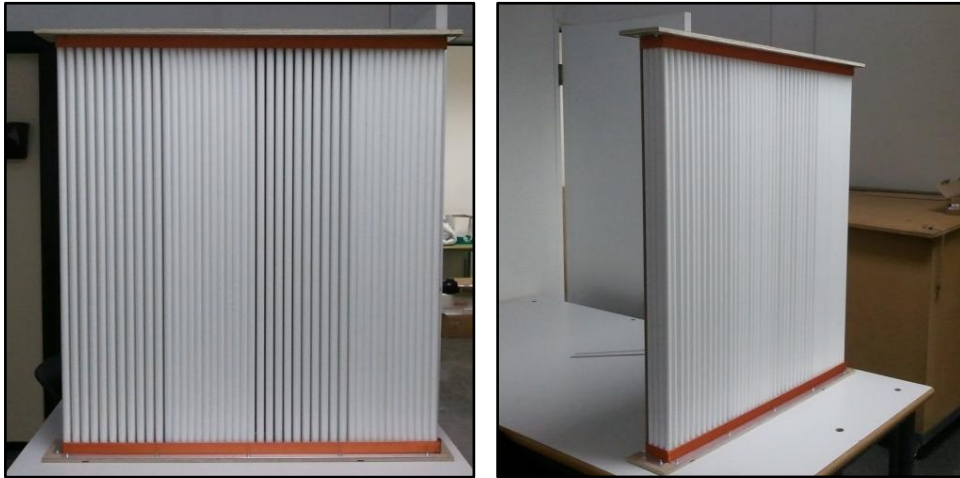


Fig. 16.- Prototipo del difusor de estructura cristalina. Vista frontal y lateral

4.1.2.- Difusor tridimensional de estructura cristalina

La construcción del cristal tridimensional de sonido y el estudio del coeficiente de difusión en cámara anecoica ha sido llevado a cabo en el Trabajo Fin de Máster paralelo a éste “*Construcción y caracterización de un prototipo de difusor periódico de tres dimensiones de estructura cristalina*” realizado por Andrés Bernhard Molina, por lo que se va a obviar todo lo referido a dicha construcción, explicando brevemente su puesta en marcha.

El difusor tridimensional de estructura cristalina se ha construido con la intención de que funcione en un margen de frecuencias grave, concretamente de 100 a 1000 Hz. Así, y tras los cálculos pertinentes, estará compuesto por 3 módulos de 0,79 metros de ancho, dispuestos en posición horizontal y vertical alternativamente, obteniendo una anchura total de 2,37 metros.

Debido a que el difusor está diseñado para que funcione a bajas frecuencias, la escala elegida es la misma que en el difusor bidimensional bi periódico, 1:4,38. De esta manera, se consigue reducir el tamaño de cada módulo a 0,18 metros, obteniendo un tamaño total de 0,54 metros, funcionando en un rango de frecuencias de 500 a 5000 Hz. Al reducir el tamaño del prototipo, se consigue menor peso y más manejabilidad del mismo, al igual que sucede con el cristal de sonido bidimensional.

4.2.- *Medición en cámara anecoica*

Es importante tener en cuenta que el estudio del comportamiento de un cristal de sonido, ya sea bidimensional o tridimensional, hay que llevarlo a cabo en condiciones controladas, es decir, evitar reflexiones y garantizar las condiciones de campo lejano. Para ello son necesarios grandes entornos anecoicos. En base a esto el proceso de medida se ha realizado con un modelo a escala en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía (EPSG).

4.2.1.- *Sistema de medición*

Debido a que el estudio del difusor tridimensional en cámara anecoica ha sido realizado por un compañero en una investigación paralela a ésta, referenciada en el punto 4.1, la medición en cámara anecoica en este trabajo se ha centrado en el cristal de sonido bidimensional.

Para llevar a cabo las mediciones se han utilizado dos PC con procesador Pentium IV. El primero de ellos equipado con un sistema *CLIO*, cuyo interface de audio se puede ver en la siguiente figura (Fig. 17), del fabricante de equipos para mediciones acústicas *Audiomatica*, y su respectiva licencia de software.

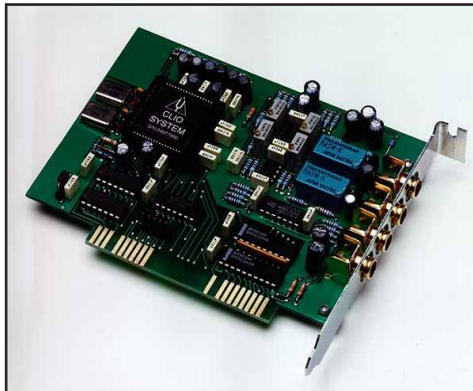


Fig. 17.- Interface HR-2000

Este sistema está dotado de dos salidas y dos entradas de audio que trabajan de forma simultánea en tiempo real, lo que se conoce como configuración “full duplex”. Permite generar una señal de test y recibir la señal que retorna tras incidir en el difusor, la cual se usa para analizar la respuesta acústica del mismo.

Debido a las limitaciones de procesado del software *CLIO* cuando se genera una señal excitadora *SWEEP*, se ha conectado la entrada de datos de dicho interface a un segundo PC con el programa *COOL EDIT PRO* de *ADOBE*, el cual permite analizar la respuesta acústica del mismo.

Para captar esta señal de retorno el sistema está dotado de un micrófono electret MIC 01 (Fig. 18), perfectamente calibrado. Este modelo es específico para realizar mediciones por su respuesta plana en el rango de frecuencias de 20 Hz a 20 KHz.



Fig. 18.- Micrófono MIC-01

La señal de test generada por el ordenador es radiada mediante un monitor de estudio activo de la marca *Behringer* modelo *B2031A Truth* (Fig. 19), que presenta una respuesta plana en la banda de frecuencias de 50Hz - 21kHz.



Fig. 19.- Monitor activo *Behringer B2031A Truth*

Para realizar medidas con diferentes ángulos de incidencia se ha usado una pértiga de 2.50 metros de longitud, anclando uno de sus extremos a una base giratoria robotizada graduada de 0° a 360° que se mueve en pasos de 5°. En el otro extremo se sujeta el micrófono de medida. La base giratoria está apoyada sobre un soporte de 1,20 metros de altura. El montaje puede verse en la siguiente figura (Fig. 20).



Fig. 20.- Montaje del brazo robotizado que sujeta el micrófono

El giro de la plataforma es controlado en todo momento desde el primer PC por medio de su propio software nativo.

En el siguiente diagrama (Fig. 21), se observa la configuración del sistema de medición así como la conexión entre los diferentes elementos.

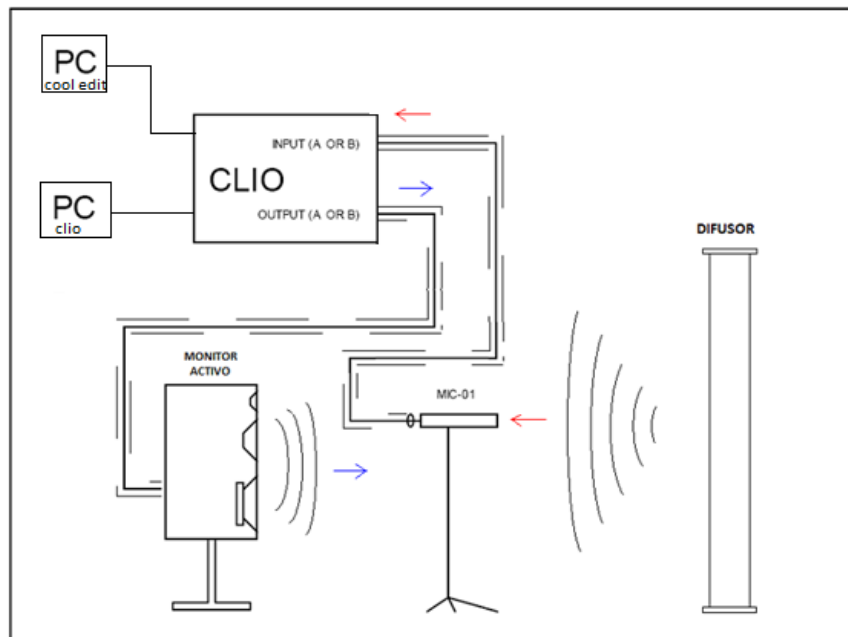


Fig. 21 - Configuración del sistema de medición

4.2.2.- Método de medición

El método de medida elegido, estandarizado por la AES⁽¹³⁾(ver anexo en cd adjunto), se basa en la medición del sonido reflejado en un amplio rango de ángulos. La caracterización completa del difusor se realiza en el ángulo de incidencia que varía de -90 a 90 grados. En la siguiente figura (Fig. 22) se puede ver un ejemplo de medida que cubre todo el ángulo de incidencia deseado.

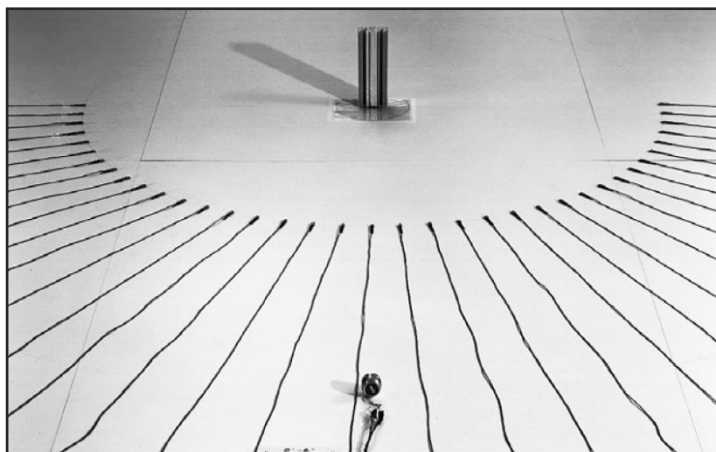


Fig. 22.- Ejemplo de técnica de medición bidimensional

Para este propósito se ha empleado un micrófono que se mueve a lo largo de una semicircunferencia, centrada en el punto medio de la muestra, mediante una plataforma circular robotizada graduada de 0° a 360° en pasos de 5°. El montaje puede observarse en la siguiente figura (Fig. 23).

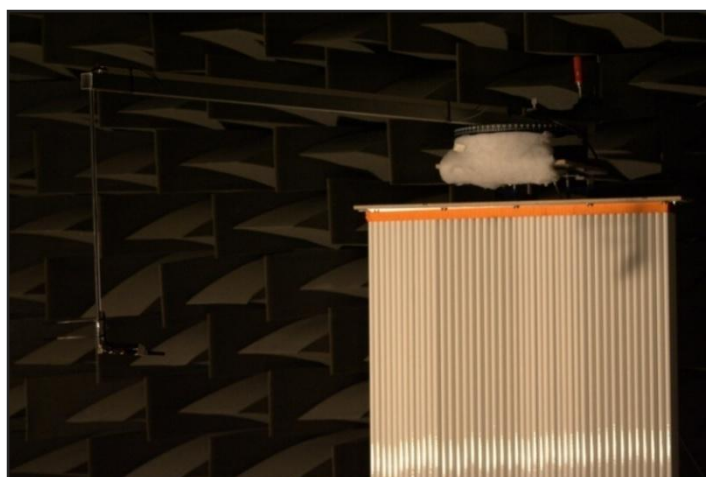


Fig. 23.- Montaje del brazo robotizado en cámara anecoica

La fuente de sonido está situada a una distancia de 3 metros del difusor. Por otro lado el micrófono sujeto al brazo robotizado está a una distancia de 2,2 metros del mismo. Se han

realizado medidas con 2 posiciones de fuente, correspondientes con los 2 ángulos de incidencia diferentes entre fuente y difusor, 0° y 45° . A su vez en cada posición de fuente se ha realizado 37 posiciones de micrófono abarcando la semicircunferencia que va de -90° a 90° en pasos de 5° . Sumándolas todas hacen un total de 74 medidas de la reflexión del difusor.

Para subsanar errores cometidos en medidas anteriores debido a pequeñas reflexiones dentro de la cámara anecoica causados por las guías del techo o el *Tramex* del suelo, se ha decidido elevar el difusor y el altavoz a una altura de 1 metro, adquiriendo un compromiso entre altura y estabilidad.

En la siguiente imagen se visualiza el método de medida con la posición de fuente a 0° y la posición de micro a 0° (Fig. 24).

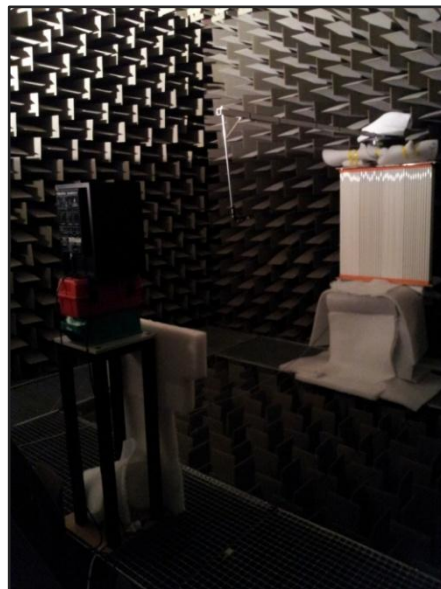


Fig. 24.- Medida de la reflexión del difusor en cámara anecoica

Por otro lado se han realizado medidas sin el difusor, con las 2 mismas posiciones de fuente en 0° y 45° y 37 posiciones de micro abarcando la semicircunferencia que va de -90° a 90° en pasos de 5° . Estos datos obtenidos representan la absorción total de la señal emitida y por tanto una reflexión nula de la misma que sirve para compararla con la reflexión real provocada por el difusor.

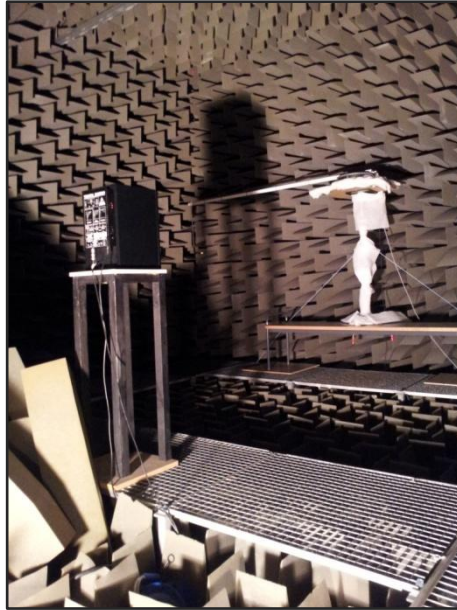


Fig. 25.- Medida sin difusor.

Con objeto de representar la absorción nula de la señal emitida, y por tanto, la reflexión máxima de dicha señal, se han realizado medidas con un prototipo de superficie totalmente reflectante (Fig. 26), con 2 posiciones de fuente diferentes en 0° y 45° , y 37 posiciones de micrófono por cada posición de fuente, abarcando la semicircunferencia que va de -90° a 90° en pasos de 5° . Estos datos obtenidos representan la absorción nula de la señal emitida y por tanto una reflexión máxima de la misma que sirve para compararla con la reflexión real provocada por el difusor.

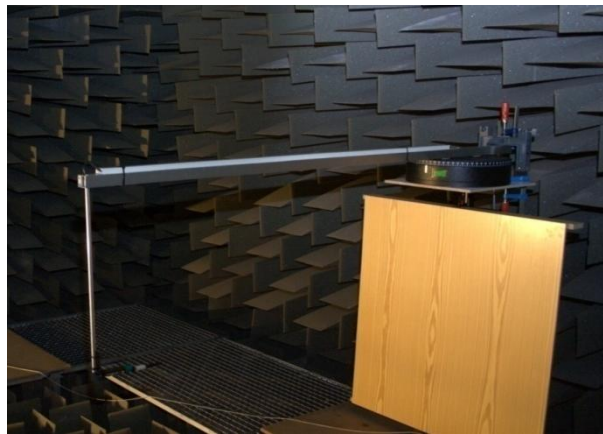


Fig. 26.- Medida con superficie totalmente reflectante.

Como señal de test se ha utilizado una señal *SWEEP*, que esta tiene más densidad de energía en bajas frecuencias que una señal *MLS* (*Maximum Length Sequence*), y ya que el difusor trabaja en un rango de frecuencias graves es más interesante medir con dicha señal.

⁽¹⁴⁾Las mediciones de función de transferencia usando SWEEPS como señal de excitación muestran significativamente mayor inmunidad contra la distorsión y varianza de tiempo que las señales pseudo-aleatorias.

Capturar respuestas impulsivas con propósitos de auralización de alta calidad requiere una relación Señal/Ruido mayor de 90 dB, fácilmente alcanzables mediante SWEEPS debido a que es posible remover completamente la distorsión armónica, no ocurriendo esto con MLS debido a la no linealidad del altavoz.

En MLS la distorsión se reparte en todo el periodo de medición de la respuesta impulsiva. Si se usa ruido como señal de excitación, los productos serán distribuidos como ruido sobre todo el periodo de la respuesta impulsiva. Es decir, si el estímulo tiene fase pseudo-aleatoria, la distorsión también tendrá fase aleatoria, la deconvolución tendrá fase aleatoria y se obtiene un espectro erróneo con fase aleatoria. Si se correlaciona con la señal de excitación, siempre existirá un error en la Respuesta al Impulso del sistema obtenida.

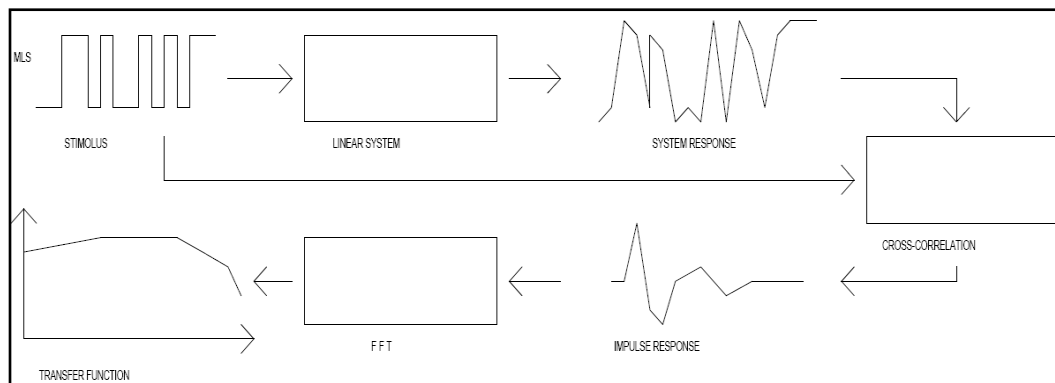


Fig. 27.- Diagrama de obtención de la respuesta al impulso mediante una señal MLS⁽¹³⁾

Este nivel de ruido puede ser reducido utilizando largas señales de excitación MLS, pero nunca excluido. Para ello se necesitan computadores muy potentes, aunque la vulnerabilidad contra la variación del tiempo es predominante en este tipo de señales y puede no resultar efectivo. También se puede usar un nivel bajo de distorsión, pero conduce a que el ruido de fondo contamine el resultado. En señales pseudo-aleatorias, sólo la mitad de la energía total que alimenta al dispositivo bajo estudio es usada para el análisis.

Las señales SWEEPS permiten excluir toda la distorsión armónica producida, dejando prácticamente el ruido de fondo como limitación para alcanzar la relación Señal/Ruido requerida. Debido a esto, el altavoz se puede alimentar con una potencia mayor sin introducir señales artificiales en la respuesta al impulso adquirida. Midiendo en condiciones anecoicas, la distorsión puede ser clasificada como únicos armónicos asociados a la fundamental,

permitiendo la medición simultánea de la función de transferencia y la distorsión en función de la frecuencia. Dicha distorsión armónica aparece en los tiempos negativos, donde pueden ser separadas completamente de la Respuesta al Impulso actual, quedando ésta totalmente intacta de la energía de distorsión. Este proceso se puede realizar de dos maneras:

- 1- Mediante deconvolución lineal para señales no periódicas.
- 2- Mediante sweep más largo que la Respuesta al Impulso del dispositivo a estudio, por ejemplo, incluyendo ceros para doblar su longitud.

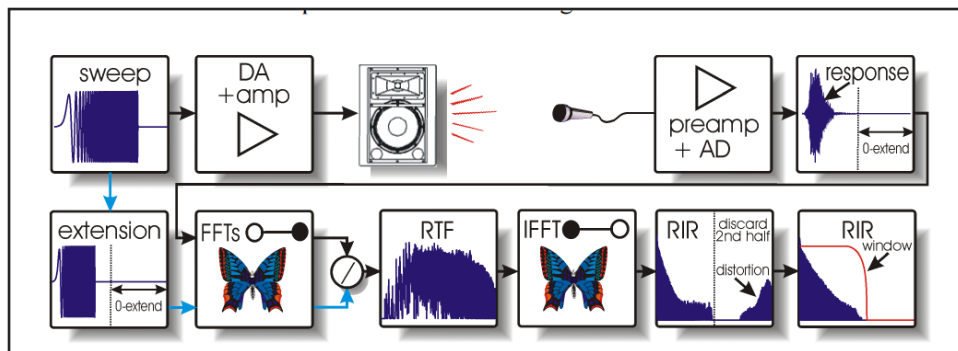


Fig. 28.- Diagrama de obtención de la Respuesta al Impulso mediante una señal SWEEP

En ambos casos, la distorsión aparece al final de la Respuesta Impulsiva, de donde pueden ser removidos sin afectar a la misma.

Las señales SWEEPS son menos vulnerables a las nocivas varianzas del tiempo, y tienen una alta energía para obtener una buena relación Señal/Ruido en todo el rango de interés. Otra de las ventajas es que el espectro de un único SWEEP no repetido es idéntico comparado a su repetición periódica.

Es importante tener cuidado a la hora de medir con SWEEP, ya que la señal de excitación tiene que ser más larga que el retardo en bajas frecuencias, por supuesto, observando el tiempo de llegada entre altavoz y micrófono.

El objeto final de este método es obtener el coeficiente de difusión, que representa aquella porción de energía que no es absorbida ni reflejada en forma especular desde la superficie bajo prueba.

4.3.- Medición en sala real a escala

Con el fin de evaluar el grado de difusión en un recinto generado por ambos cristales, se ha procedido a la obtención de los parámetros necesarios para conocer el efecto real de los difusores a estudio.

⁽¹⁵⁾ En un campo perfectamente difuso, el sonido parece provenir de todas direcciones con igual intensidad. Se dice que el campo es perfectamente difuso si cumple dos condiciones:

- 1- Una distribución uniforme de energía en todo su volumen.
- 2- Que las direcciones de propagación en puntos elegidos arbitrariamente sean completamente aleatorias.

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo) mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

4.3.1.- Sistema de medición

Para la medición en cámara reverberante, se ha utilizado el sistema CLIO⁽¹⁶⁾ especificado anteriormente. En este caso no es necesario el uso de 2 computadoras, ya que se va a utilizar una señal excitadora MLS (descrita con anterioridad) que el sistema CLIO es capaz de procesar sin problemas. Para captar la señal de retorno se hace uso del micrófono ELECTRET MIC 01 calibrado. De esta forma es fácil obtener los parámetros necesarios para conocer la respuesta de ambos cristales de sonido en un recinto real.

El altavoz elegido es un monitor de estudio activo GENELEC 8020B, que presenta una respuesta plana en la banda de frecuencias de 66 a 20000 Hz (ver anexo en cd adjunto)



Figura 29.- Monitor de estudio activo Genelec 8020B

Para simular una sala real se ha utilizado la cámara reverberante a escala presente en el Laboratorio de Acústica. Las medidas de esta sala en metros son las siguientes:

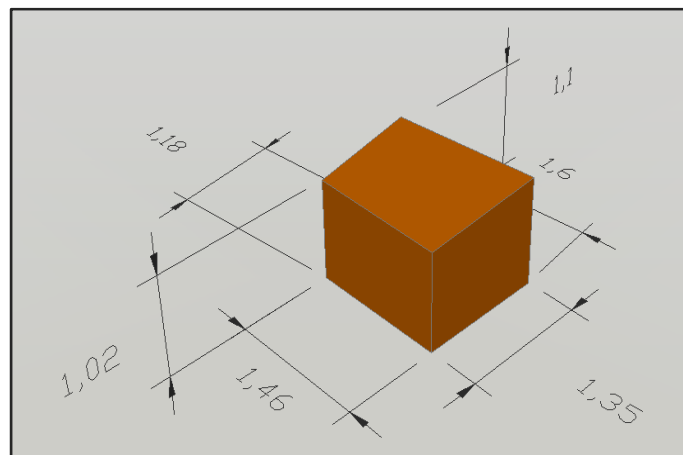


Fig 30.- Medidas cámara reverberante a escala

Suponiendo que la sala está construida con la misma escala que los difusores, se puede considerar la misma como una sala pequeña.

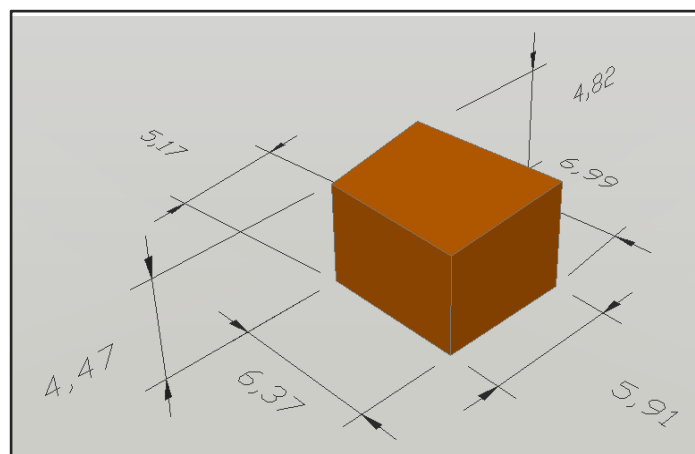


Fig 31.- Medidas cámara reverberante

En el siguiente diagrama se observa la configuración y conexión del sistema de medición.

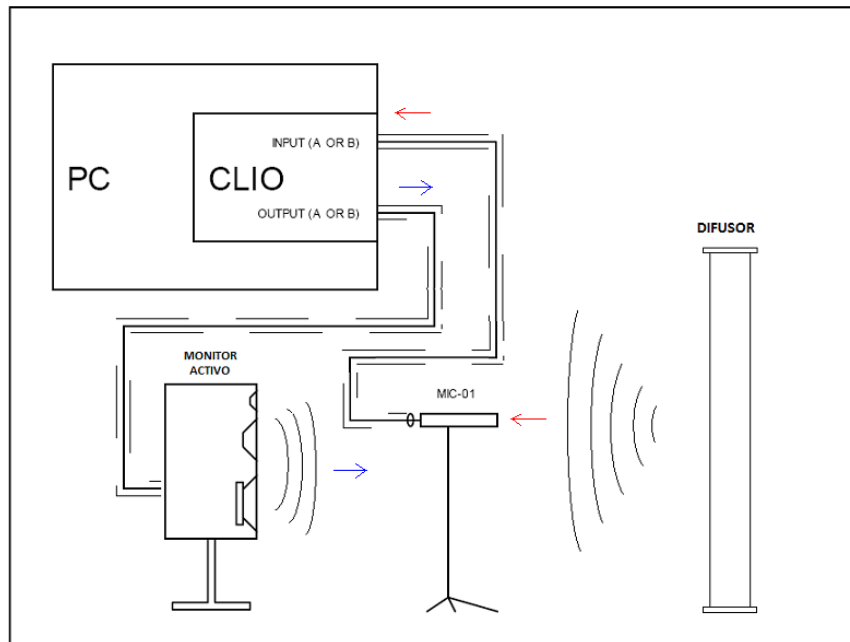


Fig. 32 - Configuración del sistema de medición

4.3.2.- Método de medición

Evaluar la difusión de un campo sonoro es una tarea difícil debido a lo mucho que cuesta medir la difusión y relacionarla con efectos subjetivos sobre el individuo. Además, no existe ninguna norma concreta para poder llevar a cabo la evaluación de la difusión del campo sonoro generado por este tipo de difusores.

Diversos estudios concluyen en que la mejor manera de observar la difusión de un recinto es a partir de la curva de decaimiento energético, de la que es posible extraer una gran cantidad de información sobre las características acústicas del recinto. Para ello, y como se indicó anteriormente, se van a utilizar técnicas MLS para la obtención del tiempo de reverberación en la sala y del nivel de presión sonora con respecto a la frecuencia.

El método elegido se basa en la recepción de sonido directo y reflexiones dentro del recinto, tanto con difusor como con sala vacía.



Fig. 33.- Método de medición en sala real a escala

Se ha realizado una malla con 44 posiciones de micrófono en el suelo del recinto en la que cada posición está separada 15 centímetros de las otras. De esta manera se pueden sumar las contribuciones de cada posición de micrófono para obtener una curva de decaimiento o caída de la que poder obtener datos concretos. Debido a la existencia de sonido directo y reflexiones, la colocación del altavoz es trivial.



Fig. 34.- Detalle mallado

En la pared más alta del recinto, y suponiendo que ésta es el fondo de la sala, se han colocado los difusores, primero el cristal de sonido bidimensional y luego el cristal de sonido tridimensional.

El micrófono se ha colocado a una altura mayor que la menor longitud de onda a medir. Por tanto, aplicando la fórmula de la longitud de onda (λ), y la velocidad del sonido en el aire (c), y sabiendo que la frecuencia mayor a la que se quiere medir son 5000 Hz para el difusor tridimensional:

$$\lambda = c/f = 345/5000 \approx 0.07 \text{ m} \quad (23)$$

Se obtiene una altura mínima de micrófono de aproximadamente 7 centímetros.

Se ha elegido una altura final de 35 centímetros, muy superior a la obtenida, pensando en que si la sala fuera real, la altura a la que estaría situado el oyente sería alrededor de 1,5 metros.

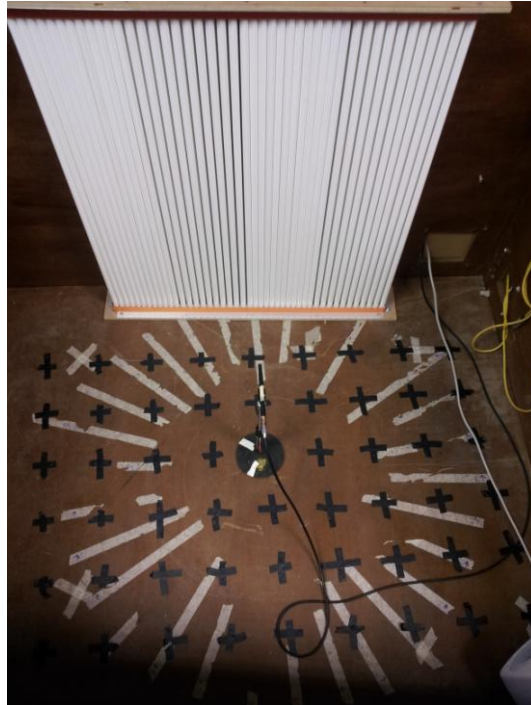


Fig. 35.- Método de medición en sala real a escala

Para representar la absorción total de la señal emitida y por tanto una reflexión nula de la misma, y poder compararla con la reflexión real provocada por los difusores, se ha procedido de la misma manera con la sala vacía.

5.- Análisis de resultados

En este capítulo se trata el análisis de los datos obtenidos en las mediciones. En un primer lugar se van a analizar los datos obtenidos en la cámara anecoica con el difusor bidimensional y una señal de excitación SWEEP, para posteriormente continuar con el análisis del efecto real en un recinto de ambos cristales de sonido utilizando una señal MLS.

5.1.- Cámara anecoica

Una vez obtenida la respuesta al impulso en la cámara anecoica con el procedimiento detallado en el punto 4.2 de este mismo estudio, se realiza el procesado de datos mediante MATLAB. Para ello, se diseña un programa que procesa la señal siguiendo el siguiente diagrama de flujo:

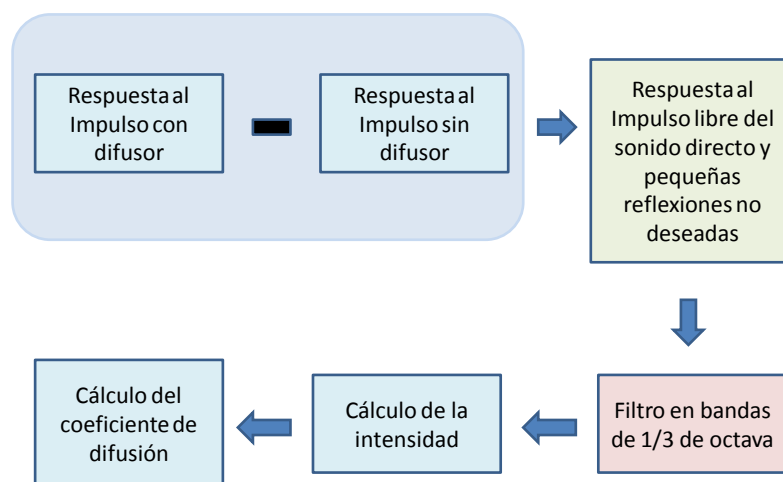


Fig. 36.- Diagrama de flujo del procesado de datos con MATLAB.

En primer lugar, se resta la respuesta al impulso del sistema sin difusor a la respuesta al impulso con difusor. Esto se realiza para cada ángulo de incidencia (posición de fuente) y todos los ángulos de micrófono. Así, se consigue una respuesta al impulso libre del sonido directo y de pequeñas reflexiones no deseadas, realizando un enventanado adecuado de la señal.

El siguiente paso es filtrar dicha respuesta al impulso en tercios de banda de octava, desde 125 Hz a 500 Hz, para evaluar solamente la banda de frecuencia a estudio.

Posteriormente se calcula la intensidad para cada ángulo de incidencia y cada banda. La intensidad calculada sirve para obtener el parámetro conocido como "coeficiente de difusión". Teóricamente, se define el coeficiente de difusión como aquella porción de energía que no es absorbida ni reflejada en forma especular desde la superficie bajo prueba para varios ángulos de incidencia. Analíticamente, se define de la siguiente manera⁽¹⁾:

$$d = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10} \right)^2}{n - 1 \sum_{i=1}^n \left(10^{L_i/10} \right)^2} \quad (24)$$

donde:

L_i es el nivel de presión sonora en dB

N es el número de receptores (ángulos medidos)

El coeficiente de difusión tiene un rango de 0 a 1, donde 0 corresponde a una reflexión total del sonido y 1 corresponde a máxima difusión sonora.

El programa tiene en cuenta todas las posiciones de fuente, obteniéndose un coeficiente de difusión medio.

El proceso descrito anteriormente se aplica tanto al prototipo del difusor como a la superficie reflectante, para obtener una comparación clara de la capacidad difusora del mismo.

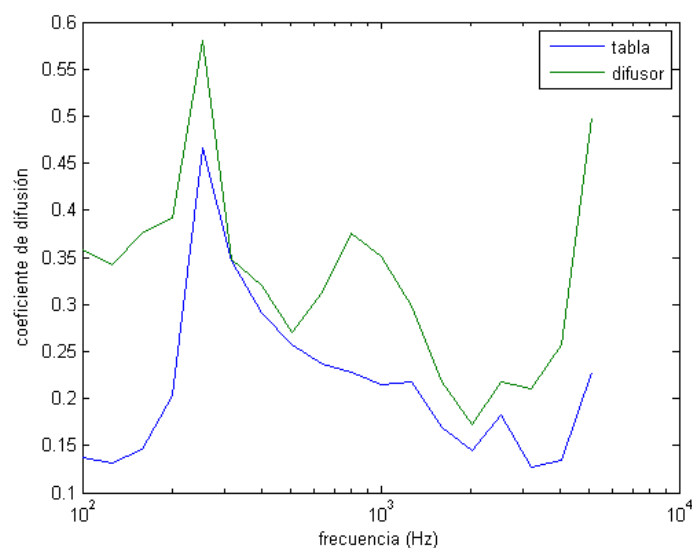


Fig. 37.- Coeficiente de difusión para difusor bidimensional sin escalas

Observando los resultados de la gráfica anterior, se puede concluir que el difusor original funciona de manera satisfactoria en 2 rangos de frecuencia bien diferenciados: 100-250 Hz, alcanzando un máximo en el coeficiente de difusión en esta última frecuencia y 500-1600 Hz, alcanzando un máximo en 800 Hz en este rango frecuencial. Para el resto de frecuencias, las diferencias entre difusor y tabla no son significativas.

5.2.- Sala real a escala

El parámetro más importante en la caracterización de salas es el tiempo de reverberación (TR).

La manera práctica de obtener el valor de TR representativo de una sala a cada frecuencia de trabajo consiste en promediar los valores medidos en diferentes puntos de la sala. Esto es así porque, teóricamente, la curva de decaimiento a 60 dB presenta irregularidades, debido a que en ningún recinto real existe un campo sonoro perfectamente difuso.

La curva promedio se puede obtener integrando todas las contribuciones energéticas asociadas a una única curva, fijando el usuario el instante inicial y final debido a la falta de Margen Dinámico. Es muy común obtener los valores medios para cada una de las bandas de tercio de octavas entre 125 Hz y 4 KHz.

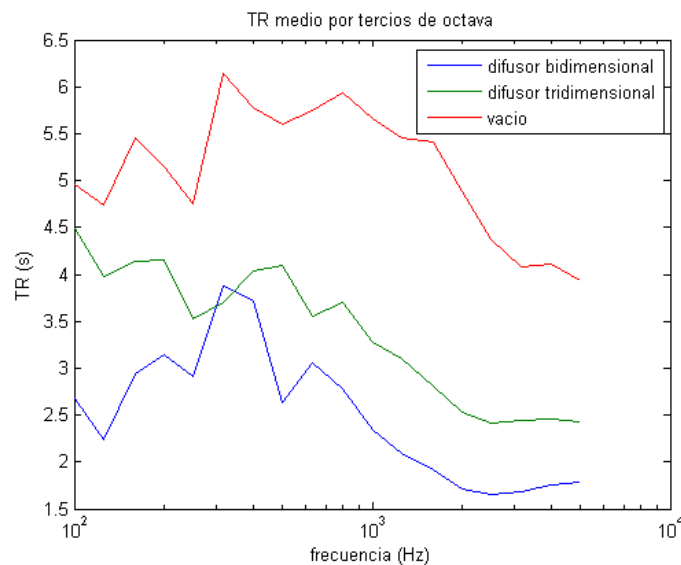


Fig.38.- Tiempo de reverberación medio por tercios de octava

En la gráfica anterior se percibe una notable reducción del tiempo de reverberación, efecto deseado al colocar los elementos de difusión, contribuyendo así a aumentar la absorción en la sala. El difusor bidimensional consigue una reducción mayor que el tridimensional excepto en la frecuencia de 315 Hz, en la cual tienen un efecto similar. Además, en esta frecuencia, se

percibe claramente una resonancia en la sala vacía y con difusor bidimensional, siendo eliminada ésta por el difusor tridimensional.

Posteriormente se ha calculado la desviación estándar de los tiempos de reverberación obtenidos en la sala real a escala de los difusores y del recinto vacío. Cuando este parámetro está próximo a cero indica que la sala ha mejorado, ocurriendo lo contrario cuando está próximo a uno.

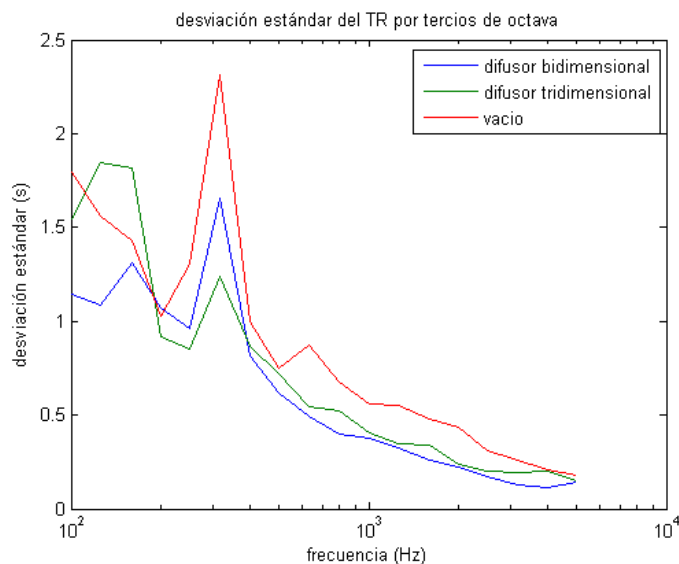


Fig. 39.- Desviación estándar del tiempos de reverberación

Analizando la anterior gráfica se puede deducir que ambos elementos difusores contribuyen a la mejora de la absorción en la sala, puesto que la desviación es menor. De nuevo, es notable una resonancia en la frecuencia 315 Hz en los tres casos medidos. Es a partir de esta frecuencia cuando ambos prototipos empiezan a funcionar de manera similar. En este caso, es importante tener en cuenta que la desviación estándar en sala vacía tiene un margen de error de ± 0.5 segundos respecto a la medida realizada.

Cabe decir que a partir de 1000 Hz no se puede obtener un análisis claro del funcionamiento de las superficies difusoras en el recinto, ya que las diferencias entre los tres no son significativas.

Otro parámetro interesante en la medida en salas acústicas es el nivel de presión sonora o SPL (Sound Pressure Level). Para confirmar su contribución al campo difuso dentro de una sala, es deseable que el mismo esté por debajo cuando están colocados los elementos difusores.

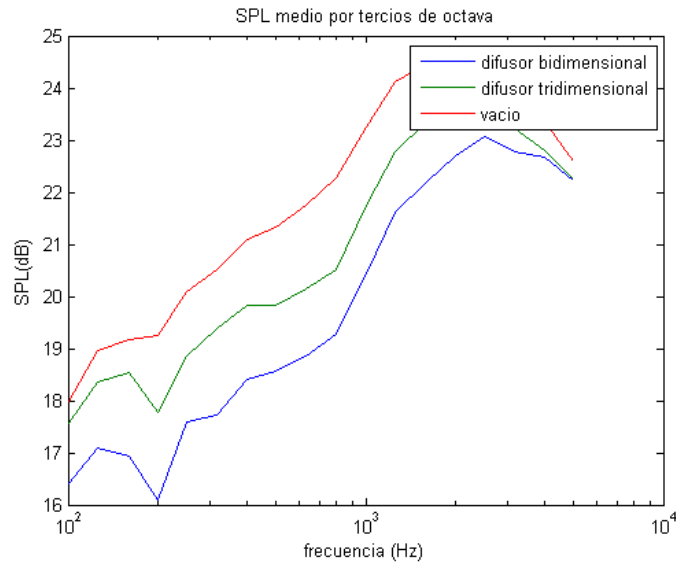


Fig. 40.- SPL medio por tercios de octava

Examinando la gráfica se puede confirmar que con el difusor bidimensional se consiguen unos 2 dB SPL por debajo del recinto vacío, siendo sólo 1 db SPL menos en el otro caso. La mínima diferencia entre los tres casos hace que los resultados no sean concluyentes.

Con el SPL se puede determinar la homogeneidad del campo sonoro creado por los difusores y compararlo con el de la cámara vacía, simplemente realizando la desviación típica de los valores SPL obtenidos en las mediciones.

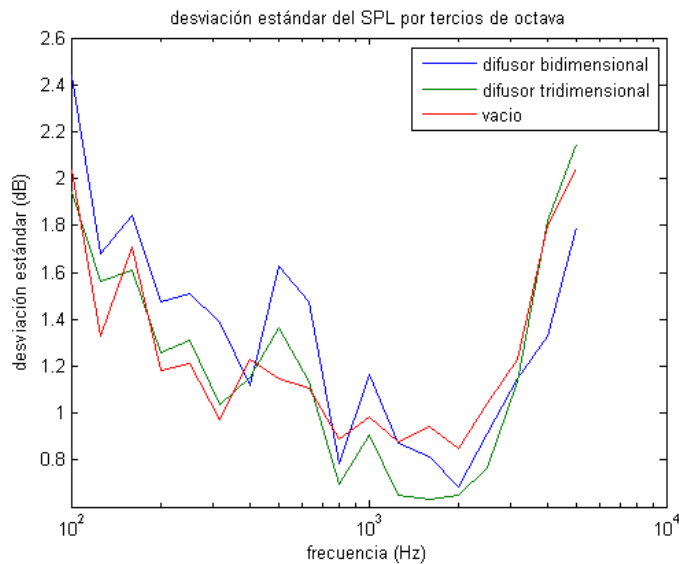


Fig. 41.- Desviación estándar deL SPL

Considerando la gráfica anterior se puede decir a ciencia cierta que la desviación entre los 3 casos es mínima, confirmando así que este parámetro no es concluyente en el estudio de la difusión producida debido a las mínimas diferencias obtenidas.

6.- Conclusiones y líneas futuras.

En vista de los resultados obtenidos en la primera parte de este estudio, analizando la gráfica del coeficiente de difusión con respecto a la frecuencia, se puede decir que los cristales acústicos pueden ser usados en el control de la propagación del sonido en salas. En concreto, el prototipo de esta investigación se comporta de forma satisfactoria para el rango frecuencial de 125 Hz a 250 Hz, algo por debajo del propósito para el que está diseñado, de 125 a 500Hz.

Cabe reseñar que el proceso de medición realizado en la cámara anecoica no ha seguido estrictamente el procedimiento establecido por la recomendación AES-4id-2001(r2007)⁽¹¹⁾ (ver anexo en cd adjunto), en cuanto a las distancias entre los diferentes elementos. Esto es debido a las limitaciones de espacio que nos impone las dimensiones de la misma. Aun así, el resultado del estudio es significativo y satisfactorio.

Respecto a los resultados obtenidos en la segunda parte de este estudio, se puede corroborar que ambas superficies difusoras contribuyen a la reduciendo del tiempo de reverberación en la sala, favoreciendo las propiedades absorbentes en la sala a ciertas frecuencias.

En vista de los resultados obtenidos en las mediciones del SPL, no se puede confirmar que creen un campo sonoro más homogéneo, puesto que no distribuyen por igual la presión sonora dentro del recinto.

En general, comparando el comportamiento de este tipo de difusores con los difusores empleados habitualmente en acústica de salas, conocidos como difusores de Schroeder, se puede afirmar que una de sus principales ventajas es que no necesitan tener mucha profundidad para responder de forma casi óptima a bajas frecuencias.

Los materiales empleados en la construcción del prototipo a escala hacen que éste sea pesado y por tanto presente inconvenientes a la hora de su colocación. Una solución a este pequeño problema es emplear materiales más livianos, como por ejemplo el metacrilato, que además permite una mayor precisión en la fabricación y el montaje, incrementando un poco el coste final del producto.

Una de los aspectos vitales de estos difusores es el diseño final del mismo. El tratamiento acústico debe complementarse con una apariencia visual aceptable para los arquitectos. Si la estética de estos elementos acústicos no es aceptable para ellos, podrían ocultarlos para

hacerlos más agradables a la vista del oyente. O incluso obviarlos. Por tanto, es importante que el diseño final complemente la apariencia del espacio en donde se van a colocar.

Los cristales de sonido dentro de la Acústica de Salas tienen una gran proyección de futuro. Es un campo relativamente reciente dentro de la acústica que se encuentra en continua evolución y desarrollo. Actualmente se están realizando investigaciones paralelas a esta que utilizan los cristales de sonido como barreras acústicas, obteniendo buenos resultados en su propósito, ya que es más fácil evitar la difracción producida por el borde de la barrera.

7.- Bibliografía

[1] P. Atanasio, J.M. Fuster. “Diseño y caracterización de un difusor de estructura cristalina”. EPSG. UPV. 2011

[2] J. Redondo, V. Sánchez- Morcillo, R. Pico. “The potential phononic sound difussers (PSD)”. Journal of building acoustics. 2011

[3] Enrique Orduña Malea. “Cristales de sonido ultrasónicos”. www.monografias.com

[4] Llinares, J. y otros autores. “Acústica arquitectónica y urbanística”. SPUPV. 1991

[5] Carrión Isbert, Antoni. “Diseño acústico de espacios arquitectónicos”. Edicions UPC. 1998

[6] Trevor J. Cox and Peter D’Antonio. “Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, Design and Application”. 2004

[7] Enrique Orduña Malea. “Caracterización y estudio de difusores RPG”. www.monografias.com

[8] P.P. Ewald. Ed., Fifty years of x- ray diffraction, A. Oosthiek’s Uitgeversmij., Utrecht, 1962.

[9] Kittel, C. “Introduction to Solid State Physics”. New York (1996)

[10] Brillouin L. “Wave propagation in periodic structures”. 1946

[11] Economou E.M et al. “Stop bands for elastic waves in periodic composite materials” (1994)

[12] Sigalas M.M: et al “Band structure of elastic waves in two dimensional system” Solid State Communications (1993)

[13] AES-4id-2001 (r2007). “Information document for room acoustics and sound reinforcement systems. Characterization and measurement of surface scattering uniformity”. AES. 2007

[14] S. Müller, P. Massarani. Traducción de M. Uribarri y J. Undurraga. “Medición de Función de Transferencia con sweeps. Director’s cut including previously unreleased material”. Institut für Technische Akustik. Aachen, Alemania.

[15] J. Ramis, A. Uris, J. Alba, J.A. Martínez. “Curso experimental de acústica de salas”. SPUPV (1998)

[16] Audiomatica. “CLIO electrical & acoustical test. User’s manual. V.4.0”. Audiomatica.

Agradecimientos

A Javier Redondo Pastor, por su paciencia, su ayuda y su buen hacer. Siempre nos quedarán las fotos al aire.

A todos los compañeros del Máster de Ingeniería Acústica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía, en especial a Andrés Bernhard, José Miguel Fuster, Alejandro de Frutos y Luis Salmerón, por su ayuda prestada en la realización de mediciones en este proyecto.

A todos los que se fueron buscando un futuro mejor. A Tony. A Ribes.

A todos los que se quedan intentando un futuro mejor. A Jorge.

A toda la gente de la Asociación de Grupos de la EPSG. A Adri, Salva, Rafa, Carlos, Juan Óscar, etc.

A todos mis amigos de Villanueva de la Serena.

A toda mi familia en estos momentos. A mi madre Paqui y mi padre Pepe.
¡¡Ánimo!!

A mi hermano José y María. Espero disfrutéis de vuestra nueva aventura en la vida.

A mi hermana Ángela. Simplemente...¡¡olé tú!!!

A mi sobrinita María.

A mi querida Martita, que como siempre está ahí apoyando en todo lo que se pasa por mi cabeza.

¡¡¡Os quiero!!!

A mi abuela Catalina, que seguro le gusta ver esto allá donde esté.

A todos los que han conseguido que este año sea especial, tanto en lo bueno como en lo malo.