

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA**

**I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)**

---



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA**

# **“Estudio del comportamiento de un difusor de estructura cristalina”**

***TRABAJO FINAL DE CARRERA***

Autor/es:

**Pedro Atanasio Moraga**

**José Miguel Fuster Fajardo**

Director/es:

**D. Francisco Javier Redondo Pastor**

**D. Rubén Picó Vila**

***GANDIA, 2011***



## **Agradecimientos**

*A todos aquellos que me hacen despertar con una sonrisa en la cara.*

*A mis padres, Paqui y Pepe, por apoyarme y animarme en cada nuevo reto que se pasa por mi cabeza y estar ahí siempre que los necesito.*

*A mi hermano José Antonio y mi hermana Ángela. A María. Esto no sería igual sin vosotros. Gracias por ayudarme a seguir adelante con todo esto y motivarme para que lo consiga.*

*A Martita, que con su alegría y enorme sonrisa me hace estar feliz todo el día. Gracias por tu apoyo, tu amor y tu compañía.*

*A mi abuela Catalina, allá donde esté. Sé que le habría gustado ver esto.*

*A mis amigos de toda la vida, gracias por vuestros ánimos.*

*A Joe, por su paciencia y aguante ante toda presión ejercida por este proyecto que compartimos. Gracias por tu amistad.*

*A todas las personas que han hecho que estos 3 años sean inolvidables: José, Jaime, Tony, Ribes, Jorge, Fran y demás “personajes entrañables” de este Gandía.*

*A Javier Redondo y Rubén Picó, por la confianza que depositaron desde el principio en nosotros con este proyecto. Gracias por vuestros consejos y ayudas. Gracias también por vuestra amistad.*

*A Fernando, por su ayuda en la construcción del prototipo.*

**Pedro Atanasio Moraga**

*Quiero darle las gracias en primer lugar a mi familia por apoyarme en cada nuevo reto que emprendo y por no dejar de confiar en mí en ningún momento.*

*A Pedro por su amistad y comprensión al compartir esta experiencia conmigo.*

*A Javier Redondo y Rubén Picó por su confianza y por la inestimable ayuda que nos han prestado de forma incondicional.*

*A Fernando su experiencia aportada en la construcción del prototipo.*

*A José Olcina , Jaime Barberá , Pedro Atanasio, Javier Redondo y otros “individuos entrañables” por su amistad y su compañía a lo largo de estos 3 años, son una parte responsable muy importante del éxito alcanzado.*

**José Miguel Fuster Fajardo**



**Índice de contenidos**

	Página
<b>1.- Objeto y antecedentes</b>	1
1.1.- Introducción	1
1.2.- Objetivos	1
<b>2.- Introducción teórica</b>	3
2.1.- Campo libre y campo difuso	3
2.1.1.- Introducción	3
2.1.2.- Reflexión y refracción sonora	3
2.1.3.- Reverberación	4
2.2.- Difusión acústica	5
2.2.1.- Introducción	5
2.2.2.- Difusores de sonido	5
2.2.3.- Principales tipos de difusores R.P.G.	6
2.2.3.1.- Difusores MLS	6
2.2.3.2.- Difusores QRD ®	7
2.2.3.3.- Difusores PRD ®	9
<b>3.- Difusores de estructura cristalina</b>	10
3.1.- Introducción a los cristales	10
3.2.- Cristales de sonido	14
3.2.1.- Difracción de ondas por cristales	14
3.2.2.-Bandas prohibidas de energía	15

3.2.3.- Parámetros estructurales	17
<b>4.- Programa de experiencias</b>	<b>19</b>
4.1.- Diseño del prototipo	19
4.2.- Construcción del prototipo	23
4.2.1.- Prototipo de superficie totalmente reflectante	27
4.3.- Sistema de medición	28
4.4.- Método de medición	31
<b>5.- Análisis de resultados</b>	<b>35</b>
<b>6.- Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>38</b>
<b>7.- Bibliografía</b>	<b>40</b>

## Índice de figuras

	Página
1.- Fenómeno de difracción sonora.	3
2.- Fenómeno de reflexión sonora.	4
3.- Representación de la caída del nivel de presión sonora en dB.	5
4.- Difusor MLS.	7
5.- Difusor QRD unidimensional.	8
6.- Difusor QRD bidimensional.	8
7.- Difusor PRD.	9
8.- Ordenación geométrica de la estructura del cloruro sódico	10
9.- a) Retículo espacial de un sólido cristalino ideal	11
b) Celda unidad con constantes reticulares	11
10.- Puntos reticulares de una red espacial en 2D	12
11.- Redes de Bravais más comunes en 2D	12
12.- Celda de Wigner-Seitz.	13
13.- Reflexión de Bragg.	15
14.- Zonas de Brillouin.	17
15.- Prototipo original del cristal de sonido	20
16.- Factor de llenado del difusor.	21
17.- Prototipo a escala del difusor.	22
18.- Esquema para guiado de barras en el montaje del difusor	24
19.- Base para el difusor.	24
20.- Proceso de guiado de las barras.	25
21.- Colocación de barras en el prototipo.	25
22.- Prototipo del difusor de estructura cristalina. Vista frontal.	26
23.- Prototipo del difusor de estructura cristalina. Vista lateral.	27
24.- Prototipo de superficie totalmente reflectante.	28
25.- Interface HR-2000	28
26.- Micrófono MIC-01	29
27.- Monitor activo BEHRINGER B2031A	29
28.- Montaje del brazo robotizado que sujeta el micrófono	30
29.- Configuración del sistema de medición	31
30.- Ejemplo de técnica de medición bidimensional	32
31.- Montaje del brazo robotizado en cámara anecoica	32
32.- Medida de la reflexión del difusor en cámara anecoica	33
33.- Medida sin difusor	33
34.- Medida con superficie totalmente reflectante	34
35.- Medida de la respuesta impulsiva por el método MLS	35
36.- Diagrama de la obtención de la respuesta al impulso mediante MLS	36
37.- Diagrama de flujo del procesado de datos con MATLAB	36
38.- Gráfica del coeficiente de difusión	37

## 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. 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<sup>(1)</sup>. 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. El difusor objeto del estudio pretende dar solución 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 presentes en 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 estos 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<sup>(2)</sup>. 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 de nuestro estudio es el análisis del comportamiento de un difusor de estructura cristalina.

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

Los objetivos principales del trabajo son:

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

Para ello, se ha estructurado en los siguientes apartados:

1. **OBJETO Y ANTECEDENTES**, en el que encontramos una introducción al estudio y se plantean los objetivos del mismo.

2. **CONCEPTOS TEÓRICOS**, en el que se revisan 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 del difusor.

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

### 2.1.- Campo libre y campo difuso

#### 2.1.1.- Introducción

En los procesos de emisión, recepción y propagación del sonido, el tipo de campo acústico en el que ocurren tiene una gran influencia.

En acústica, se definen dos tipos de campos. Estos son: *Campo acústico libre* y *Campo acústico difusor* <sup>(3)</sup>.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (1.1)$$

Consecuencia de la ecuación (1.1) es que si el sonido radiado por la fuente omnidireccional no es obstaculizado por ningún objeto, la intensidad acústica varía de acuerdo con el inverso del cuadrado de la distancia. En este caso, se habla de propagación en campo libre, como ocurre en un gran espacio abierto, libre de superficies reflectantes.

En los laboratorios de Acústica, estas condiciones de campo libre se consiguen en el interior de una cámara anecoica, en la que sus paredes están recubiertas de un tratamiento altamente absorbente a la energía acústica. Son generalmente, cuñas de lana mineral o de fibra de vidrio, al objeto de evitar cualquier reflexión.

Por el contrario si la onda acústica encuentra obstáculos en su propagación, aparecen fenómenos de difracción y reflexión.

#### 2.1.2.- Reflexión y refracción sonora

Los fenómenos de difracción se presentan cuando se interpone en la trayectoria de la onda acústica un obstáculo de dimensiones reducidas en relación con su longitud de onda o cuando el mismo presenta discontinuidades. En estos casos la onda se comporta como se indica en la siguiente figura (Fig. 1). En caso contrario se reproduce el fenómeno de reflexión (Fig. 2).

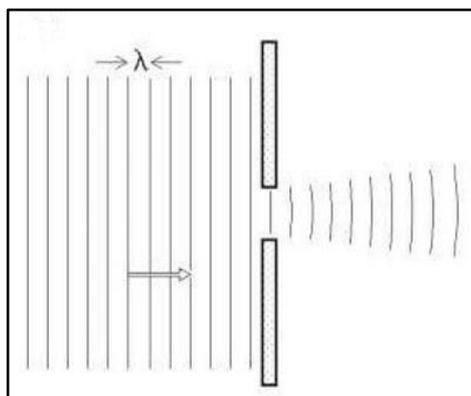


Fig. 1.- Fenómeno de difracción sonora

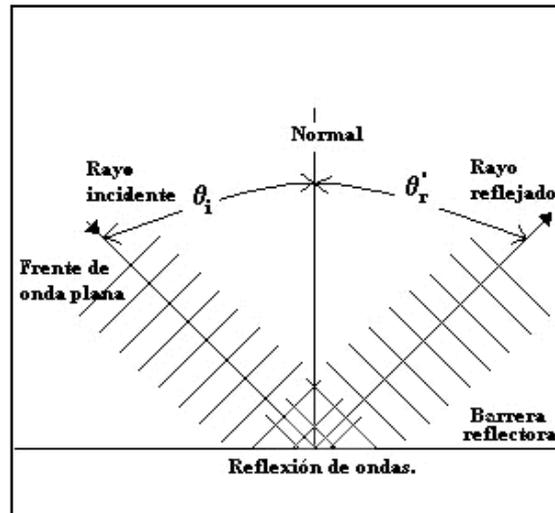


Fig. 2.- Fenómeno de reflexión sonora

### 2.1.3.- Reverberación

Se define como 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, por eso se abrevia como TR-60 (Fig. 3).

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.

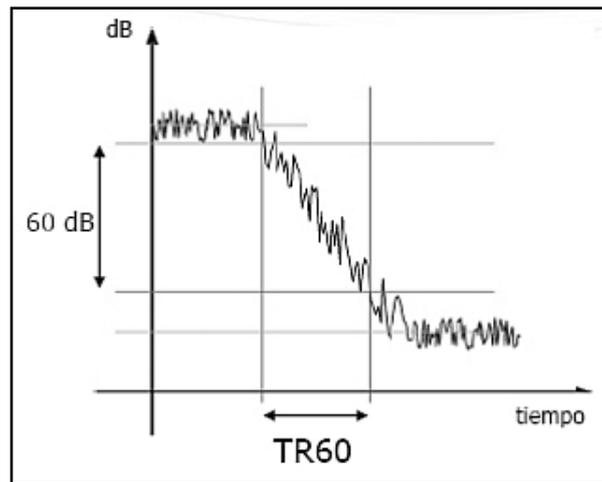


Fig. 3.- Representación de la caída de nivel de presión sonora en dB con el tiempo

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. 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 resonante. La reverberación determina la buena acústica de un ambiente.

## 2.2.- Difusión acústica

### 2.2.1.- Introducción

La difusión acústica es el efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie denominada “difusor”.

Los principales beneficios de la difusión acústica son un menor estrés o cansancio auditivo del oyente principalmente por no tener que utilizar altos niveles sonoros, debido a que el sonido está correctamente distribuido dentro del recinto, además de ser percibido con una mayor espacialidad.

### 2.2.2.- 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<sup>(4)(5)</sup>, 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 reradiación 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.

### 2.2.3.- Principales tipos de difusores de Schroeder:

#### 2.2.3.1.- Difusores MLS (*Maximun Lenght Sequence*)

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

Se crea 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.

$W = \lambda/2 \rightarrow$  Anchura de cada tramo

$D = \lambda/4 \rightarrow$  Profundidad de cada tramo

Donde " $\lambda$ " es la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de diseño del difusor.

El margen de frecuencias para la 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.

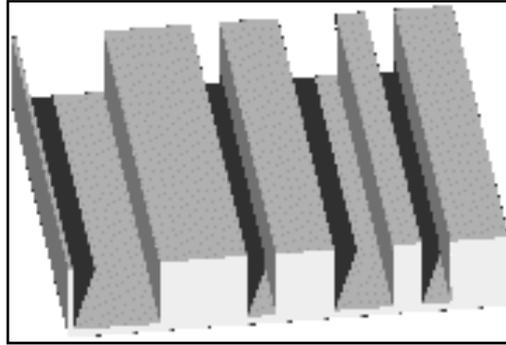


Fig. 4.- a) Difusor MLS

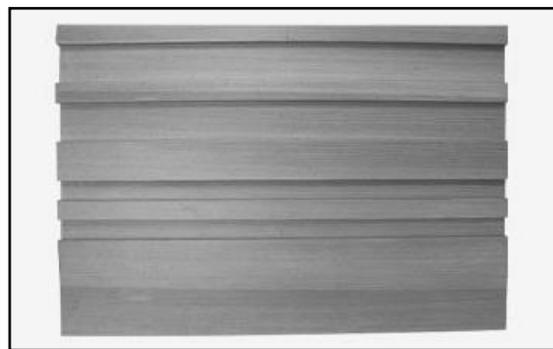


Fig. 4.- b) Difusor MLS

### 2.2.3.2.- Difusores QRD (*Quadratic Residue Difusor*)

Existen dos tipos de difusores de residuos cuadrados, los unidimensionales (Fig. 5) y los bidimensionales (Fig. 6).

#### - Unidimensionales:

Son los más utilizados a nivel práctico. 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 del sonido o difusión en planos perpendiculares a dicha ranura.

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.

De todas formas 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:

$$\frac{f_{max}}{f_0} \leq 8 \quad (1.2)$$

Donde  $f_{max}$  corresponde a la frecuencia máxima para la cual se desea una óptima difusión y  $f_0$  corresponde a la frecuencia de diseño (la mínima).

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

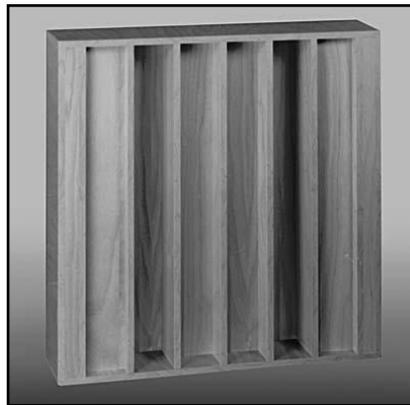


Fig. 5.- Difusor QRD unidimensional

#### - Bidimensionales

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.

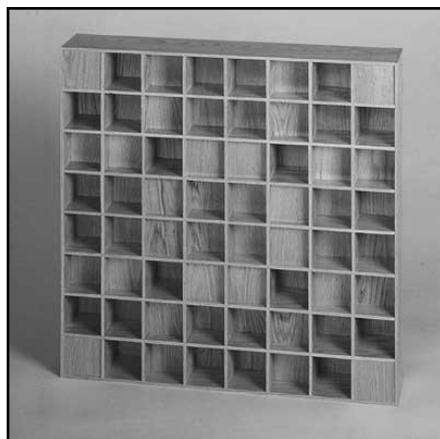


Fig. 6.- Difusor QRD bidimensional

### 2.2.3.3.- Difusores PRD (*Primitive Root Difussor*)

Son análogos a los difusores unidimensionales QRD, con la única diferencia de que la profundidad para cada ranura se obtiene a partir de otra secuencia generadora.

A diferencia de lo que sucede con los difusores QRD, no existe simetría dentro de cada periodo. Esto se puede observar en la figura siguiente (Fig. 7).

La reflexión especular que producen es prácticamente nula, por lo que los hace aconsejables como canceladores de ruido.

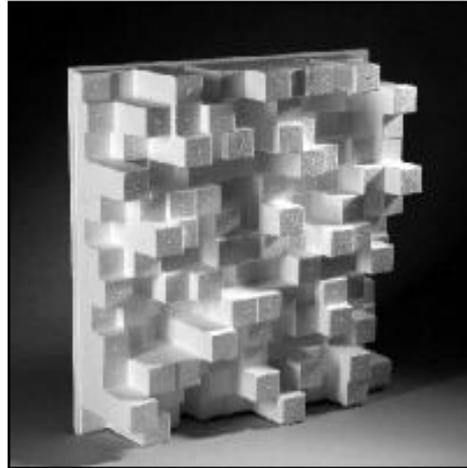


Fig. 7.- Difusor PRD

### 3.- Difusores de estructura cristalina

#### 3.1.- Introducción a los cristales

Se sabe que una gran cantidad de sólidos en la naturaleza están basados en estructuras repetitivas y regulares (a nivel microscópico), tales como los diamantes o estructuras sencillas de NaCl, CLCs, SZn. A los materiales de estas características se les denominan cristales. No han sido pocos los trabajos que se han realizado para llegar a la conclusión de denominar cristales a los materiales con esas características, pero el trabajo 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<sup>(6)</sup> 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.

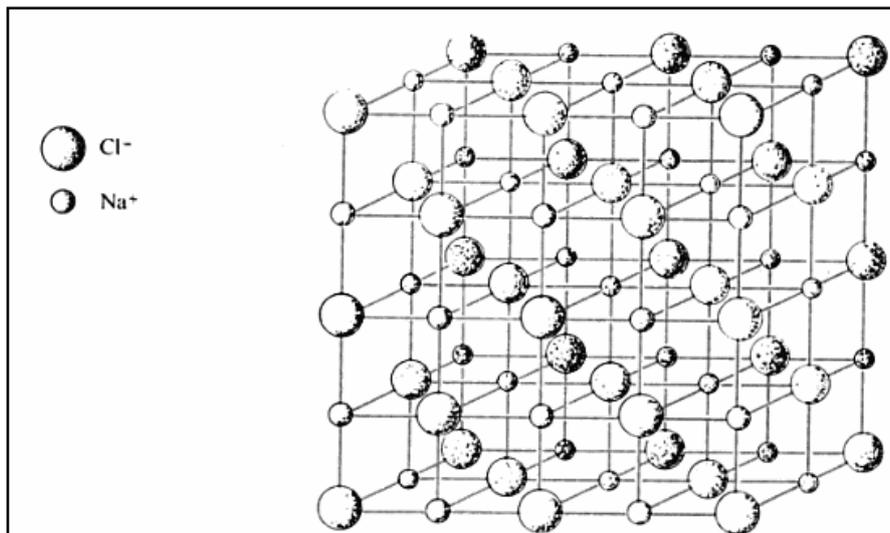


Fig. 8.- Modelo mostrando la ordenación geométrica de la estructura del cloruro sódico

Un ejemplo lo suministra un cristal de cloruro sódico. El cristal contiene muchos iones positivos y negativos que se mantienen juntos por atracciones electrostáticas. Los detalles de la ordenación dependen del equilibrio de las fuerzas atractivas y repulsivas, que incluye igualmente los efectos electrostáticos y de tamaño iónico. En la estructura del cloruro sódico (Fig. 8), cada ión está rodeado por seis iones de carga opuesta, situados en los vértices de un octaedro regular, y la estructura cristalina representa una ordenación de estos iones que da lugar a un mínimo de energía potencial.

La formación de una partícula sólida conduce a la cristalinidad. Hay una orientación y posición preferidas en la unión de cada molécula al sólido, y si la velocidad de deposición es lo bastante lenta para permitir a las moléculas alcanzar esta

disposición favorecida, la estructura se ajusta a la definición de cristal. Tenemos un modelo compuesto de átomos o moléculas, que se repite una y otra vez, a intervalos regularmente espaciados, y con la misma orientación, por todo el cristal.

Un concepto de interés dentro de los cristales es la *celdilla unidad*<sup>(7)</sup> (Fig. 9). 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.

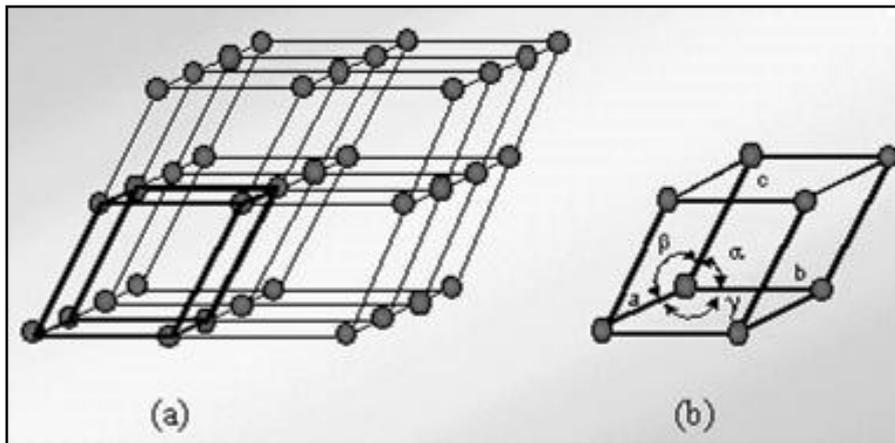


Fig. 9.- a) Retículo espacial de un sólido cristalino ideal. b) Celda unidad con constantes reticulares

Podemos olvidarnos ahora de los átomos como tales y pensar en puntos imaginarios, a modo del esqueleto del cristal. Podemos 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* (Fig. 10), los cuales están colocados de tal manera en el espacio que cada punto contiene idénticos alrededores (lógicamente, los alrededores parecerán distintos cerca de la superficie, pero supondremos que el cristal contiene tantos modelos que se repiten que los efectos superficiales son despreciables), entendiéndolo 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.

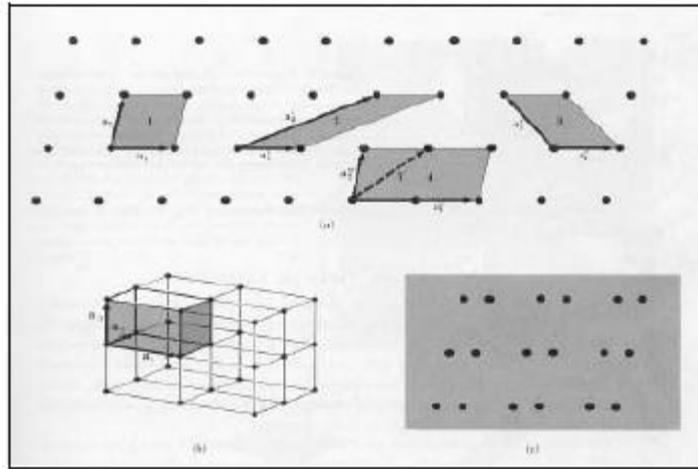


Fig. 10.- Puntos reticulares de una red espacial en dos dimensiones. Los pares de vectores  $a_1$  y  $a_2$  son vectores de traslación de la red.

El cristalógrafo francés Bravais demostró en 1848 que hay 14 puntos reticulares posibles y ninguno más, de ahí que a los puntos reticulares se los conozca como *retículos de Bravais*.

Denominaremos pues *red de Bravais* <sup>(7)</sup> (Fig. 11) 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 traslación.

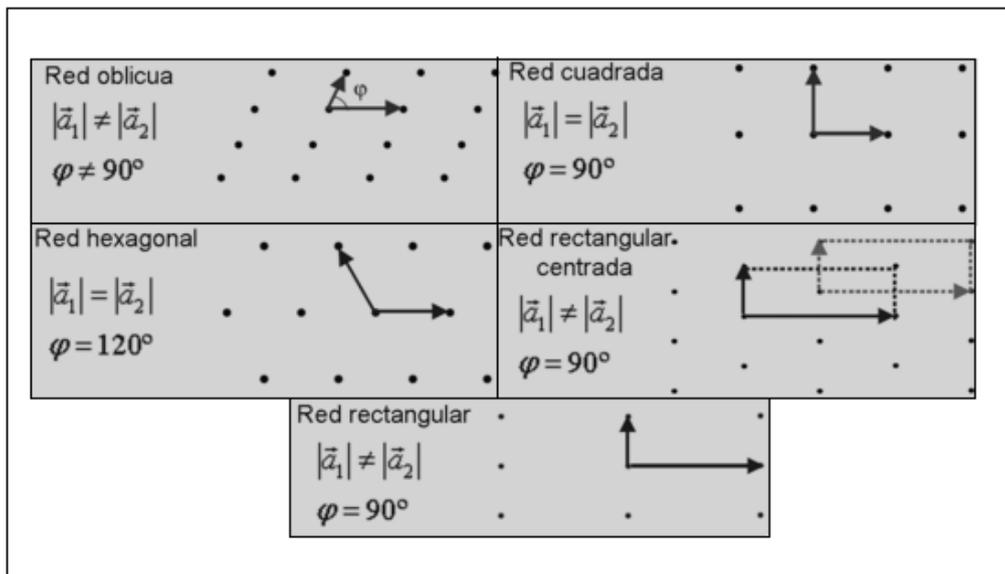


Fig. 11.- Redes de Bravais más comunes en dos dimensiones.

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:

$$f = \frac{nv}{V_c} \quad (1.3)$$

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.

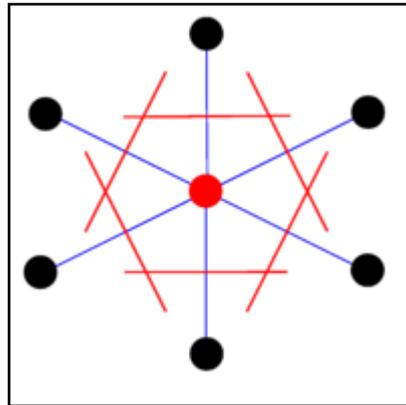


Fig. 12.- Celda de Wigner- Seitz. El volumen encerrado más pequeño que se obtiene para conseguir una celda primitiva es la celda primitiva de Wigner- Seitz.

### 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 nos 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*.

La aparición de estos huecos 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. 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.

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*<sup>(7)</sup>.

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. 13). 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  $\lambda$  del haz (1.4). En este proceso se considera que la difusión es elástica, por tanto, la energía del rayo no cambia en la reflexión.

La *reflexión de Bragg* (Fig. 13) 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).

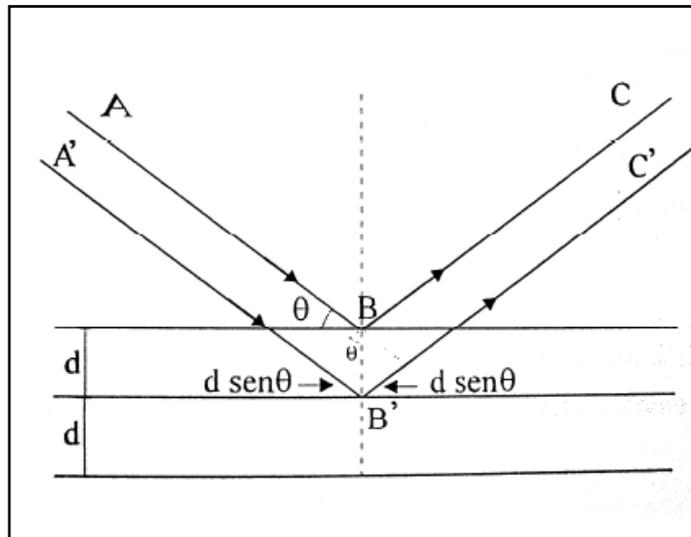


Fig. 13.- Reflexión de Bragg  $\lambda$

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

$$n\lambda = 2d \sin (\theta) \quad (1.4)$$

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

$$\lambda = 2d = \frac{c}{f} \quad (1.5)$$

Donde:

$$f = \frac{c}{2d} = \frac{c}{2a} \rightarrow k = \frac{\pi}{a} \quad (1.6)$$

La cual corresponde con el límite de la *zona de Brillouin*<sup>(8)</sup>

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 (1.6) es equivalente a la condición de difracción:

$$(k')^2 = (k + G)^2 \quad (1.7)$$

Donde  $G$  corresponde a vectores de traslación:

$$G = \left(\frac{2\pi}{a}\right) \cdot (xn_x + yn_y) \quad \text{Producto vectorial} \quad (1.8)$$

La expresión (1.7) la podemos simplificar:

$$k = \pm \frac{1}{2}G \quad (1.9)$$

Por lo tanto, aplicando la expresión (1.8)

$$k = \pm n \frac{\pi}{a} \quad (1.10)$$

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.

Como ya sabemos, 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".

Podemos decir entonces, que existe una banda prohibida en  $k = \pm \frac{\pi}{a}$ , que corresponde con la primera reflexión de Bragg y con los límites de la zona de Brillouin (Fig. 14)

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

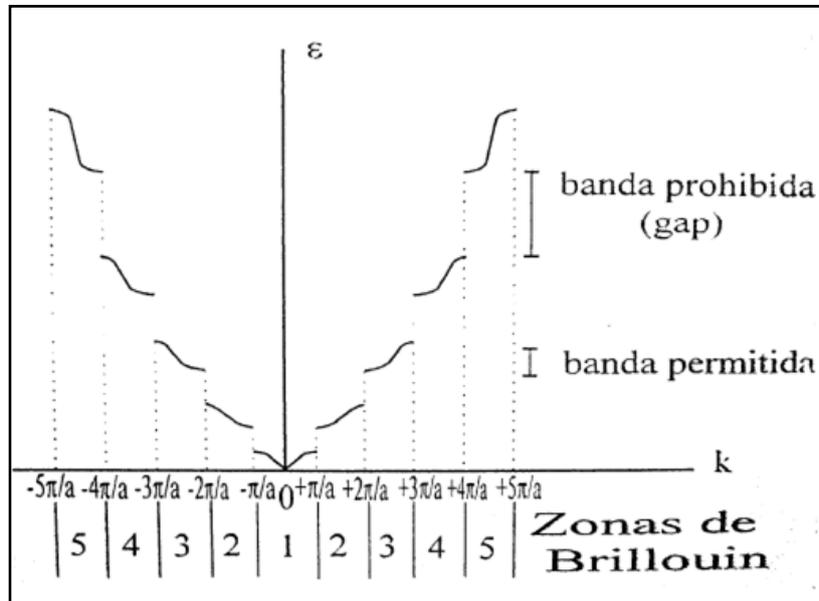


Fig. 14.- Zonas de Brillouin

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 nuestro experimento hemos utilizado una red rectangular, aunque algunos autores como Economou et al<sup>(9)</sup> 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<sup>(10)</sup> 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 vamos a dedicarlo a la descripción y puesta a punto del sistema experimental de medida para el estudio del comportamiento de un difusor de estructura cristalina. 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.- Diseño del prototipo

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento de un difusor de estructura cristalina, tenemos la necesidad de diseñar un prototipo con antelación.

Para ello, hay que tener en cuenta diversos factores que van a influir en el comportamiento final del cristal de sonido.

A diferencia de la mayoría de los estudios realizados anteriormente, se pretende que este difusor sea útil para un determinado rango de frecuencia. Más concretamente, y debido a la inexistencia de difusores para bajas frecuencias, se pretende que funcione entre 100- 500 Hz, utilizándose para reducir o incluso eliminar los efectos perniciosos asociados con los modos de baja frecuencia de una sala.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1.11)$$

Sustituyendo en (1.11) la velocidad del sonido  $c=343 \text{ m/s}$  y la frecuencia más baja a la que deseamos que funcione el difusor,  $f=100 \text{ Hz}$ , ya que trabajamos en tercios de octava, obtenemos la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{343}{100} = 3,43 \text{ metros} \quad (1.12)$$

En la ecuación (1.12) podemos deducir que el prototipo debe más o menos igual de ancho que la longitud de onda.

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 nos encontramos con cuatro partes alternadas de dos en dos en el difusor (*difusor bizona*). 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. 15). De esta manera conseguimos 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. La altura es indiferente, ya que nuestra medición se va a realizar en un plano perpendicular al prototipo.

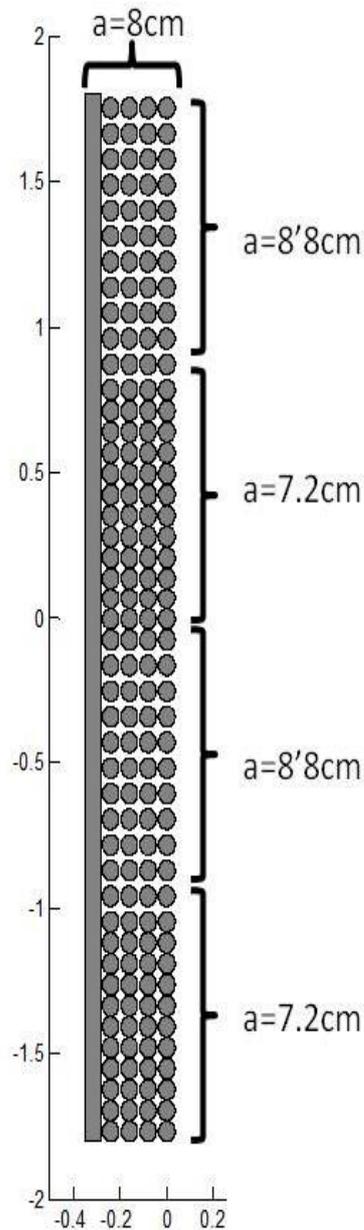


Fig. 15.- Prototipo original del cristal de sonido <sup>(1)</sup>

Debido a las grandes dimensiones del prototipo original, y al excesivo peso que tendría dicho modelo, decidimos hacer un diseño a escala, para conseguir un difusor más manejable y poder medir con más facilidad, ya que trabajamos en campo lejano y la cámara anecoica de la Escuela no es muy grande. Para ello, lo primero que tenemos en cuenta es el rango de frecuencias en el cual trabaja, y a partir de aquí decidimos la escala.

Si el rango de trabajo es de 100- 500 Hz, es fácil pensar en una escala 1:5, ya que así el prototipo escalado es válido para un rango de frecuencias de 500- 2500 Hz. Según esta escala, el radio de cada barra sería de 0,007 metros. Esto es un problema, ya que el radio mínimo de barras que se comercializa es de 0,008 metros. Por tanto, la escala elegida finalmente, y acorde con el radio de las barras, es 1:4,37. Con dicha escala conseguimos que el prototipo esté dentro de los tercios de octava del rango de frecuencias y simplificamos, en parte, el proceso de construcción del prototipo.

Por tanto, a escala 1:4,37, tenemos 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:

$$f = \frac{\pi r^2}{ab} \quad (1.13)$$

donde  $a$  es la distancia entre barras frontalmente y  $b$  es la distancia entre barras lateralmente.

Podemos verlo con más facilidad en un plano de alzado en la figura 16:

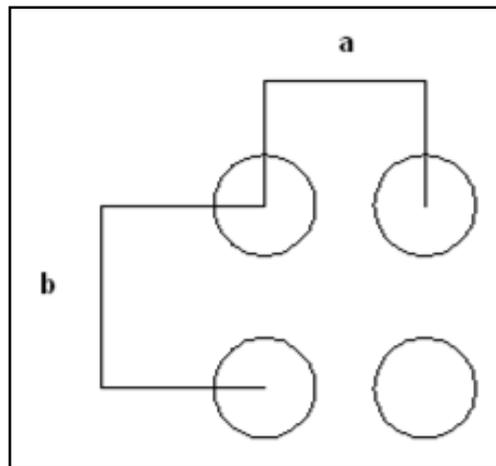


Fig. 16.- Factor de llenado del difusor. Existe una distancia  $a$  entre centros frontalmente, y una distancia  $b$  lateralmente.

Por tanto, y aplicando la fórmula (1.11) y la distancia entre centros y el radio descritos con anterioridad tenemos:

$$f = \frac{\pi * 0,008^2}{0,0164 * 0,018} = 0,6811 \quad (1.14)$$

El resultado obtenido en (1.14) es el factor de llenado para la zona del interespaciado menor.

Para la zona de interespaciado mayor, tenemos un factor de llenado:

$$f = \frac{\pi * 0,008^2}{0,020 * 0,018} = 0,5585 \quad (1.15)$$

El prototipo a escala quedaría de la siguiente forma (Fig. 17)

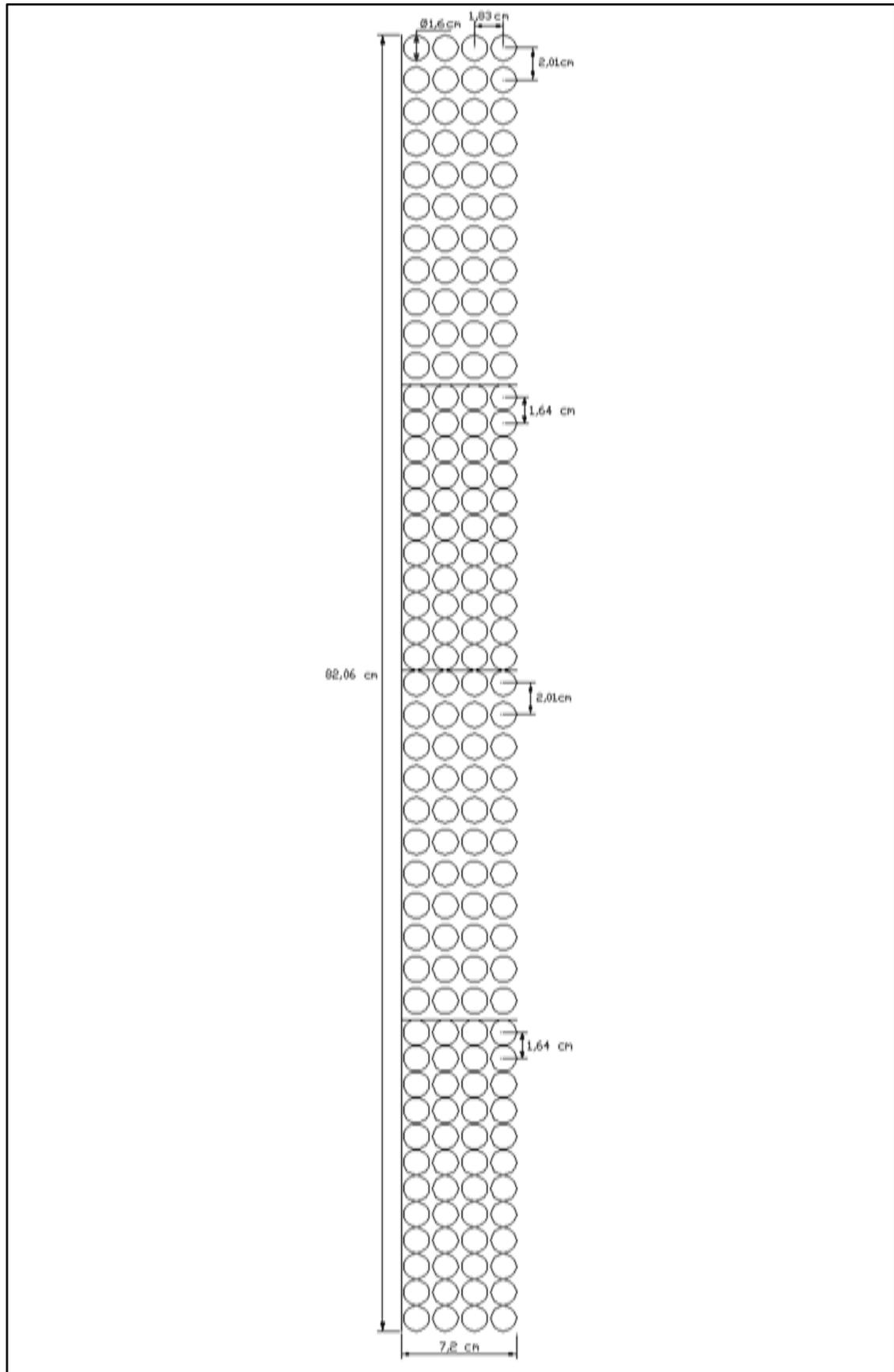


Fig. 17.- Prototipo a escala del difusor.

## 4.2.- Construcción del prototipo

Una vez definido el diseño y con todos los parámetros estructurales claros, pasamos a la construcción del prototipo del difusor de estructura cristalina.

Para ello necesitamos:

- 180 barras cilíndricas de aluminio, de 1 metro de longitud y 0.015 metros de diámetro.
- 6 placas de aluminio de 0,82 metros de largo, 0,01 metros de alto y 0,002 metros de espesor.
- 44 placas de aluminio de 0,081 metros de largo, 0,01 metros de alto y 0,004 metros de espesor.
- 44 placas de aluminio de 0,081 metros de largo, 0,01 metros de alto y 0,0005 metros de espesor.
- 4 perfiles en L de aluminio de 1 metro de largo, 0,02 metros de alto y 0,001 de espesor.
- 3 placas de aluminio de 0.82 metros de largo, 0,02 metros de alto y 0,0015 m de espesor.
- 2 superficies rectangulares de madera de pino de 0,82 metros de largo, 0,1 metros de alto y 0.02 metros de espesor.
- 1 plancha de madera de 1 metro de alto y 0,82 metros de ancho.
- 2 cinchas de carraca.

Las dos superficies rectangulares de madera se van a usar como tapa superior e inferior del difusor. La plancha de madera de 1 metro de alto será un panel rígido posterior, dado que estamos estudiando su posible aplicación en Acústica de Salas, y por tanto, se va a utilizar para cubrir superficies planas <sup>(1)</sup>. Gracias al espesor de los perfiles en L, conseguimos que la plancha de madera quede a la distancia deseada de la última barra.

El número de barras cilíndricas a introducir para la construcción del difusor es muy elevado. Para ello, hemos ideado un sistema mediante el cual podemos guiar las barras utilizando los 4 perfiles en L de aluminio como base y las 3 placas de aluminio de 0,82 metros de largo como separadores entre filas de barras, simplificando en parte la construcción del prototipo. Como la distancia entre centros es mínima, y debido a los escasos medios disponibles para realizar un trabajo minucioso en la Escuela, introducimos entre las barras unas pequeñas placas de aluminio. Para la primera parte del difusor, como existe más distancia entre centros, introducimos las de 0,004 metros de espesor. Para la otra parte introducimos las demás (Fig. 18, 19, 20)

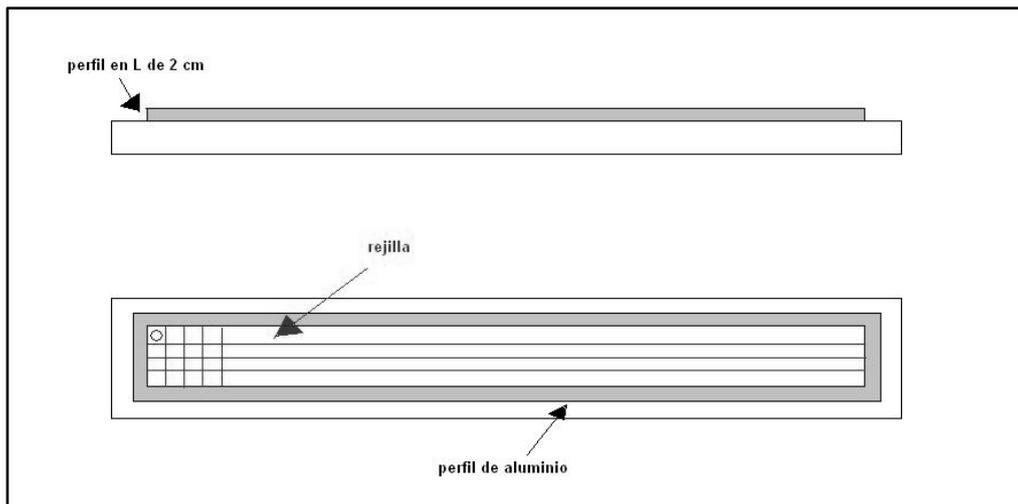


Fig. 18.- Esquema para guiado de barras en el montaje del difusor.



Fig. 19.- Base para el difusor. La parte superior e inferior son iguales.

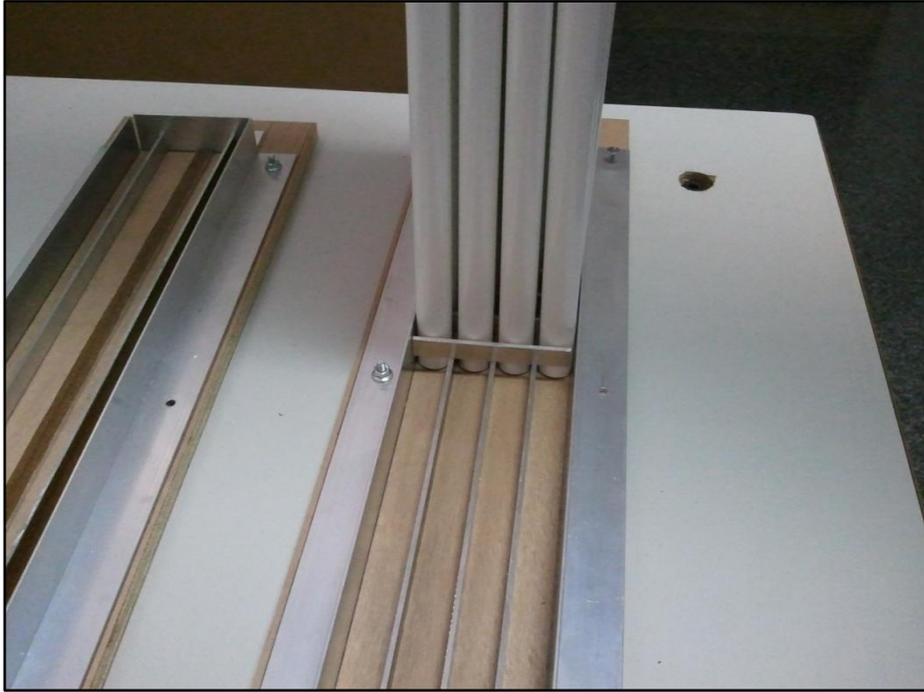


Fig. 20.- Proceso de guiado de las barras. Podemos observar las plaquitas que consiguen la separación exacta entre barras.

Para el correcto guiado de las barras y para que no fuera muy costoso montar todo el prototipo, colocamos las bases encima de una mesa en posición horizontal, apoyadas en uno de los cantos de la madera. Introduciendo las primeras columnas de barras conseguimos la altura del difusor deseada, sujetando luego una de las bases con una presilla para evitar que se muevan. El resto era colocar barras cilíndricas y plaquitas hasta tener el difusor montado casi en su totalidad (Fig. 21)



Fig. 21.- Colocación de barras en el prototipo. Podemos observar el panel rígido posterior.

Después de cerrar la base inferior y superior del difusor, procedemos a levantarlo. Gracias al panel rígido posterior conseguimos facilitar la tarea, ya que confiere gran firmeza a la estructura para ponerlo en posición vertical.

Para asegurar el prototipo y que ninguna de las barras cilíndricas, plaquitas y demás instrumentos utilizados en el montaje se caiga, hemos usado dos cinchas de carraca de 2,5 metros de largo. Gracias a los perfiles en L de aluminio montados en las bases, conseguimos apretar ambas cinchas, y con ello colocar correctamente todas las partes del prototipo. El resultado final se puede observar en las figuras 22 y 23.

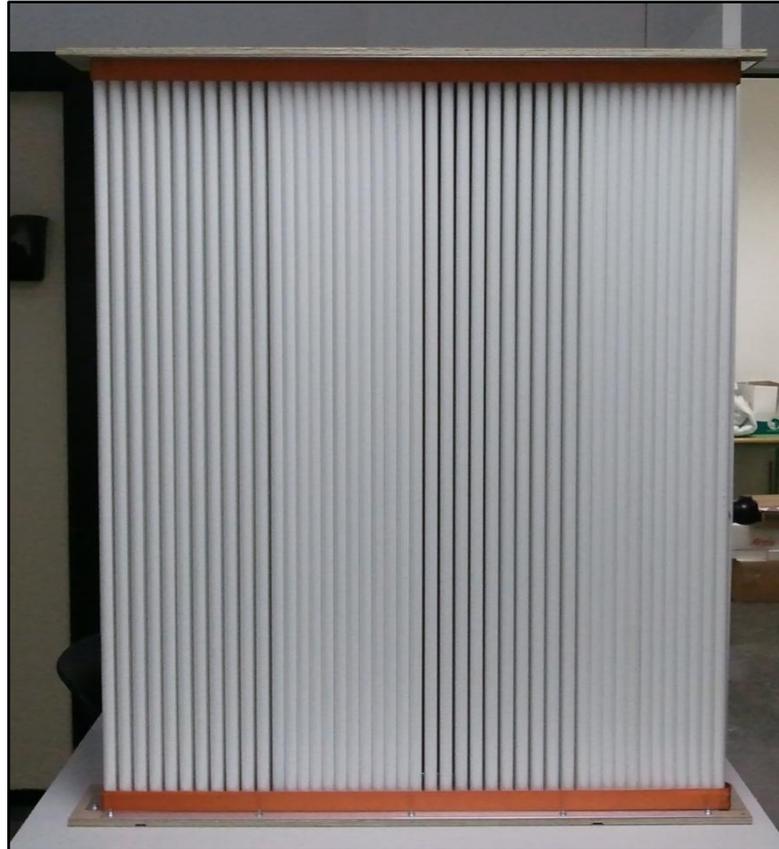


Fig. 22.- Prototipo del difusor de estructura cristalina. Vista frontal. Obsérvese en la parte inferior y superior la cincha de carraca de color naranja.

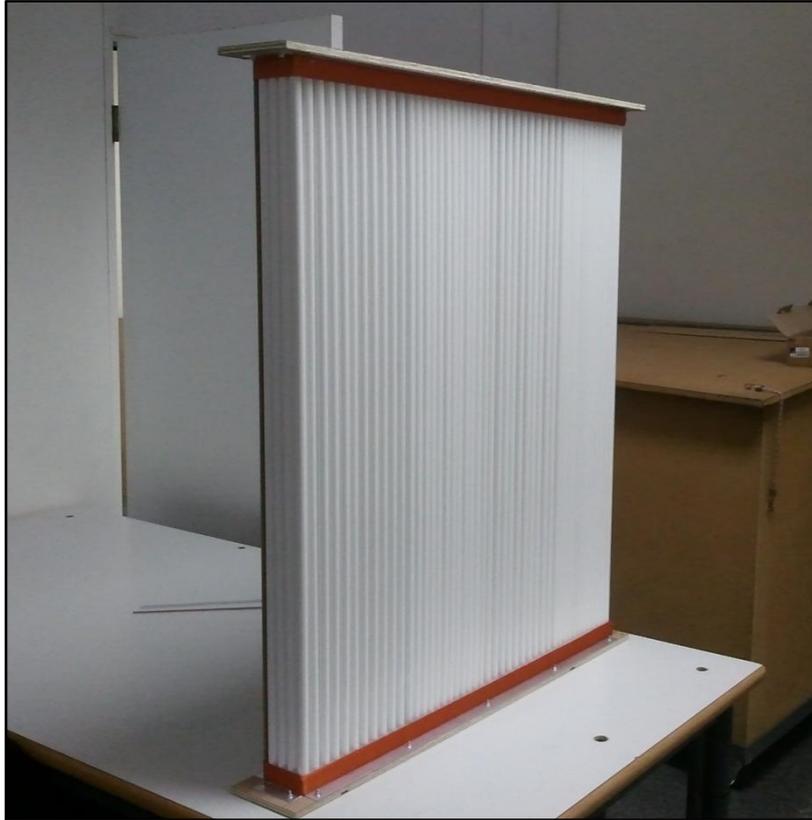


Fig. 23.- Prototipo del difusor de estructura cristalina. Vista lateral.

El prototipo queda así bastante estable, y resulta más o menos manejable a la hora de las mediciones. Su peso es de unos 30 kilogramos.

#### **4.2.1.- Construcción de un prototipo de superficie totalmente reflectante**

Para poder comparar las mediciones del difusor escalado con una superficie plana, nos vemos en la necesidad de construir otro prototipo con una superficie totalmente reflectante.

Para ello, y siguiendo algunos parámetros de diseño anteriores, como son la anchura, altura y profundidad del difusor, elegimos una madera plana con superficie reflectante, que haga las veces de “pared trasera” de la sala donde se coloque el difusor (Fig. 24)

La construcción es sencilla, ya que sólo hay que pegar las dos bases al panel rígido, teniendo en cuenta que dicho panel esté a la misma altura que la superficie reflectora del difusor.



Fig. 24.- Prototipo de superficie totalmente reflectante.

#### 4.3.- Sistema de medición

Para llevar a cabo las mediciones hemos utilizado un PC con procesador Pentium IV equipado con un sistema *CLIO*, cuyo interface de audio podemos ver en la siguiente figura (Fig. 25), del fabricante de equipos para mediciones acústicas *Audiomatica*, y su respectiva licencia de software.

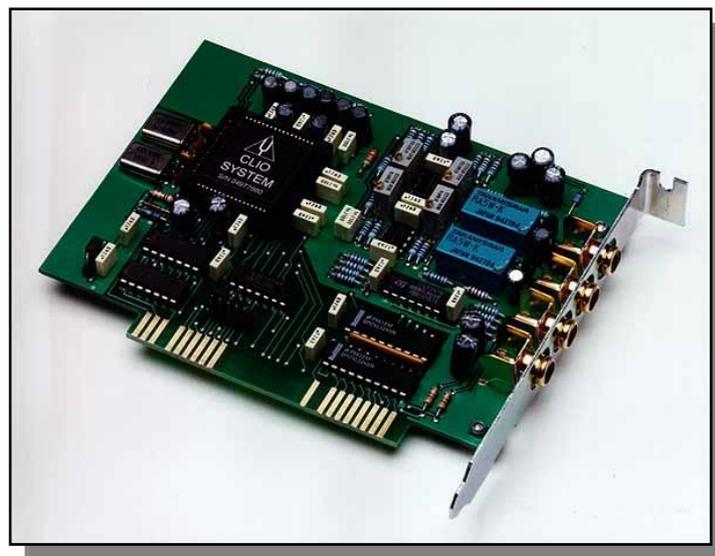


Fig. 25.- Interface HR-2000

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”, lo que nos permite generar una señal de test y recibir la señal que retorna tras incidir en el difusor, la cual utilizaremos para analizar la respuesta acústica del mismo.

Para captar esta señal de retorno el sistema está dotado de un micrófono electret MIC 01 (Fig. 26), 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. 26.- Micrófono MIC-01

Para emitir la señal de test generada por el ordenador utilizamos un monitor de estudio activo de la marca *Behringer* modelo *B2031A Truth* (Fig. 27), que presenta una respuesta plana en la banda de frecuencias de 50Hz - 21kHz.



Fig. 27.- Monitor activo *Behringer B2031A Truth*

Para realizar medidas con diferentes ángulos de incidencia utilizamos una pértiga de 1,50 metros de longitud, anclando uno de sus extremos a una base giratoria robotizada graduada de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  que se mueve en pasos de  $5^\circ$ . En el otro extremo sujetamos el micrófono de medida. La base giratoria está apoyada sobre un soporte de 1,20 m de altura. El montaje puede verse en la siguiente figura (Fig. 28).



Fig. 28.- Montaje del brazo robotizado que sujeta el micrófono

El giro de la plataforma lo controlamos con el PC por medio de su propio software nativo.

En el siguiente diagrama (Fig. 29), podemos ver la configuración del sistema de medición así como la conexión entre los diferentes elementos.

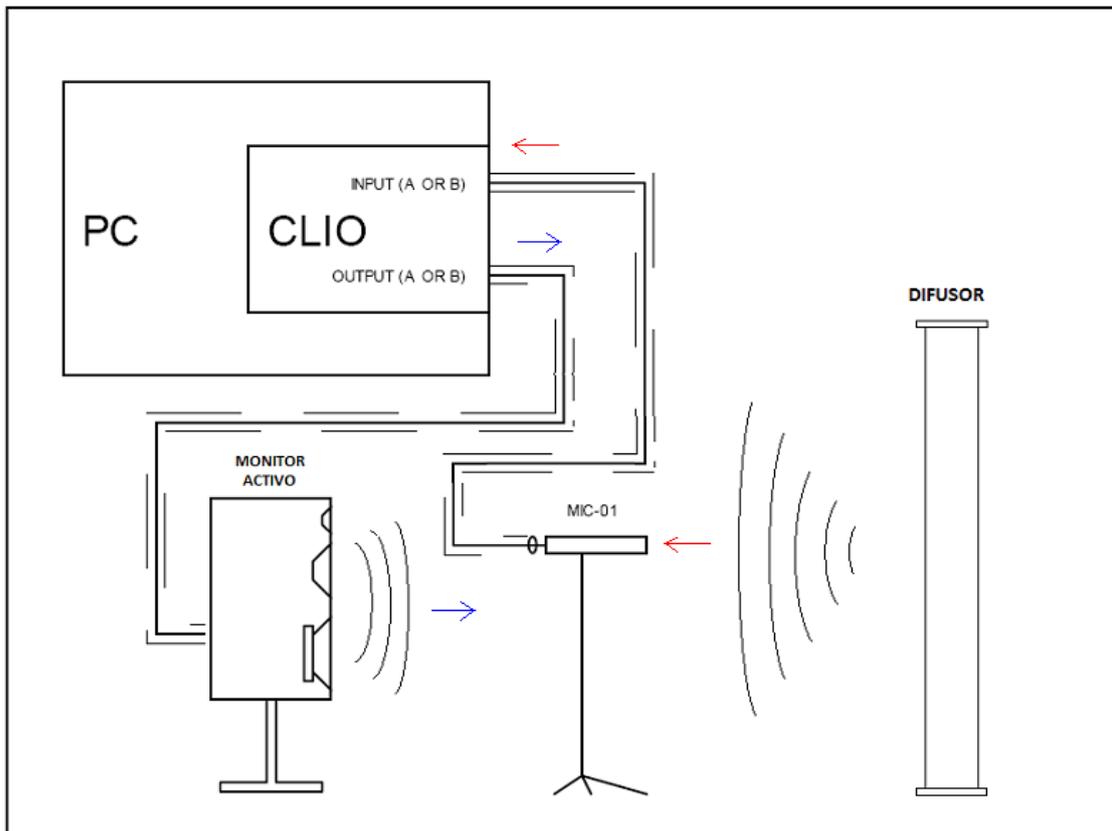


Fig. 29 - Configuración del sistema de medición

#### 4.4.- Método de medición

Es importante tener en cuenta que el estudio del comportamiento de un cristal de sonido bidimensional 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).

El método de medida elegido, estandarizado por la AES<sup>(11)</sup>, 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. 30) podemos ver un ejemplo de medida que cubre todo el ángulo de incidencia deseado.

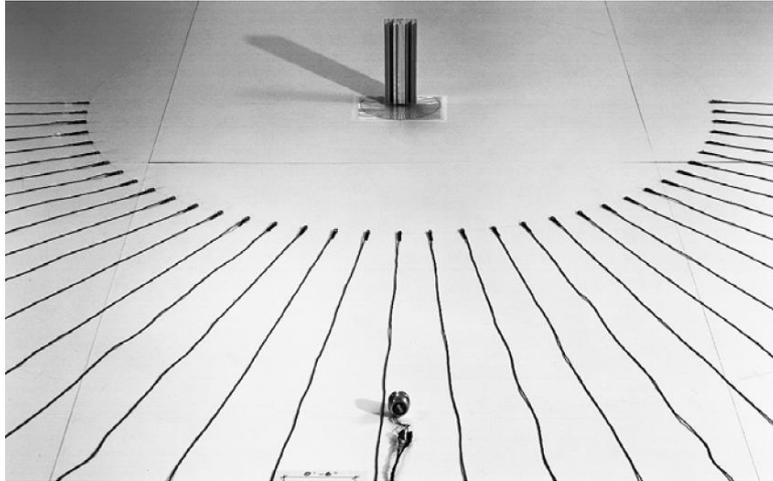


Fig. 30.- Ejemplo de técnica de medición bidimensional

Para este propósito nosotros hemos empleado un micrófono que se mueve a lo largo de una semicircunferencia, centrada en el punto medio de la muestra (en nuestro caso el difusor objeto del estudio), mediante una plataforma circular robotizada graduada de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  en pasos de  $5^\circ$ . El montaje puede observarse en la siguiente figura (Fig. 31).



Fig. 31.- Montaje del brazo robotizado en cámara anecoica

La fuente de sonido la situamos a una distancia de 2,7 metros del difusor. Por otro lado el micro sujeto al brazo robotizado está situado a una distancia de 1,3 metros del difusor. Se han realizado medidas con 9 posiciones de fuente diferentes correspondientes con los 9 ángulos de incidencia diferentes entre fuente y difusor,  $-60^\circ$   $-45^\circ$   $-30^\circ$   $-15^\circ$   $0^\circ$   $15^\circ$   $30^\circ$   $45^\circ$  y  $60^\circ$ , las posiciones correspondientes a  $-90^\circ$   $-75^\circ$   $75^\circ$  y  $90^\circ$  se han despreciado por considerar que la reflexión en estos cuatro ángulos de incidencia es mínima y por tanto son poco significativos en el estudio realizado. A su vez en cada posición de fuente hemos realizado 37 posiciones de micro diferentes abarcando la semicircunferencia que va de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  en pasos de  $5^\circ$ . Sumándolas todas hacen un total de 333 medidas de la reflexión del difusor.

En la siguiente figura podemos ver el sistema de medida con la posición de fuente a  $-15^\circ$  y la posición de micro a  $-80^\circ$  (Fig. 32).

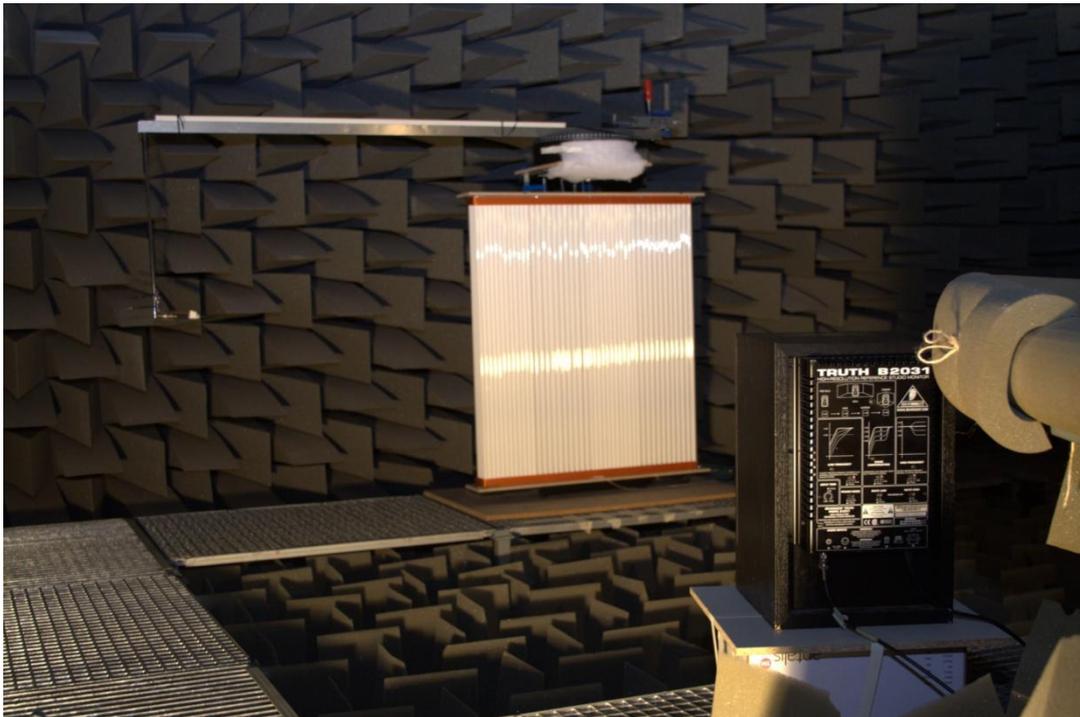


Fig. 32.- Medida de la reflexión del difusor en cámara anecoica

Por otro lado hemos realizado medidas sin el difusor, con una sola posición de fuente en  $0^\circ$  y 37 posiciones de micro abarcando la semicircunferencia que va de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  en pasos de  $5^\circ$ . Estos datos obtenidos representan la absorción total de la señal emitida y por tanto una reflexión nula de la misma, lo que nos sirve para compararla con la reflexión real provocada por el difusor.

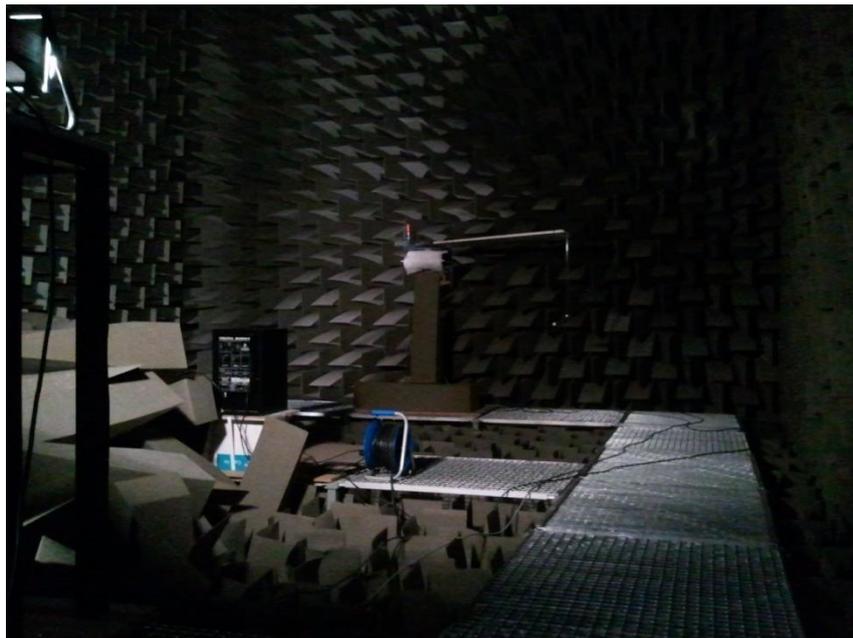


Fig. 33.- Medida sin difusor.

También hemos realizado medidas con el prototipo de superficie totalmente reflectante, que se describe en el apartado 4.2.1 y puede observarse en la siguiente figura (Fig. 34), con 5 posiciones de fuente diferentes en  $0^\circ$   $15^\circ$   $30^\circ$   $45^\circ$   $60^\circ$  y 37 posiciones de micro por cada posición de fuente, abarcando la semicircunferencia que va de  $-90^\circ$  a  $90^\circ$  en pasos de  $5^\circ$ . Solo se han utilizado las posiciones de fuente de los ángulos positivos ya que al ser la superficie totalmente reflectante consideraremos una imagen especular para los ángulos de incidencia negativos. Estos datos obtenidos representan la absorción nula de la señal emitida y por tanto una reflexión máxima de la misma lo que nos sirve para compararla con la reflexión real provocada por el difusor.



Fig. 34 Medida con superficie totalmente reflectante.

Como señal de test hemos usado una señal *MLS* (*Maximum length sequence*). En el capítulo siguiente explicaremos en qué consiste este tipo de señales y su procesado.

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.

## 5.- Análisis de resultados

En este capítulo trataremos el análisis de los datos obtenidos en las mediciones. Para ello es necesario, en primer lugar, observar el pre procesado que tiene lugar tras la captura de la señal a través del micrófono. Necesitamos pues saber que es una señal *MLS* y la manera en la que el ordenador la procesa.

*MLS* es esencialmente una técnica de medida de la respuesta impulsiva de un sistema lineal. A partir de esta medida es capaz de derivar muchas características de un sistema acústico, mediante post-procesado (función de transferencia, respuesta en frecuencia, respuesta de fase, retardo de grupo, etc.). A diferencia del ruido blanco, una secuencia *MLS* es determinista y periódica<sup>(12)</sup>, aunque retiene muchas de las propiedades del ruido blanco. Su naturaleza determinista significa que puede ser computada y que no necesita ser medida simultáneamente con la respuesta del sistema. Su naturaleza periódica implica un error de ventaneo cero, ya que se puede usar el periodo entero de la secuencia para hacer la medida.

El método *MLS*<sup>(13)</sup> requiere una única señal de entrada y de salida. La señal de salida es una secuencia pseudoaleatoria de máxima longitud residente en una tarjeta DSP. Consiste en una serie binaria de  $\pm 1$  con longitud  $L = 2^N - 1$ , donde  $N$  es un número entero. El esquema de la medida de la respuesta impulsiva de un sistema lineal usando señales *MLS* se muestra en la figura siguiente (Fig.35).

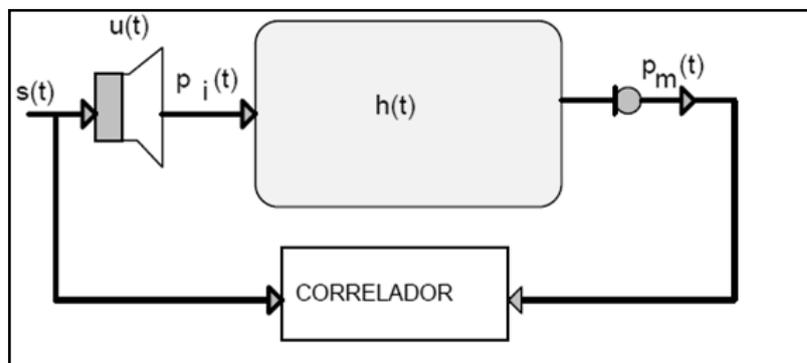


Fig. 35.- Medida de la respuesta impulsiva por el método MLS

Al introducir una señal *MLS* en un sistema acústico, como puede ser la cámara anecoica con todos los objetos que contiene, obtenemos la respuesta a dicho sistema. Gracias a la correlación cruzada, que no es más que una deconvolución de dicha respuesta con la señal de entrada, obtenemos la respuesta al impulso del sistema. Esta respuesta al impulso es representada y almacenada en un PC. Los datos obtenidos los utilizaremos posteriormente para el procesamiento de los mismos y obtención del coeficiente de difusión del prototipo sometido a estudio. (Fig. 36)

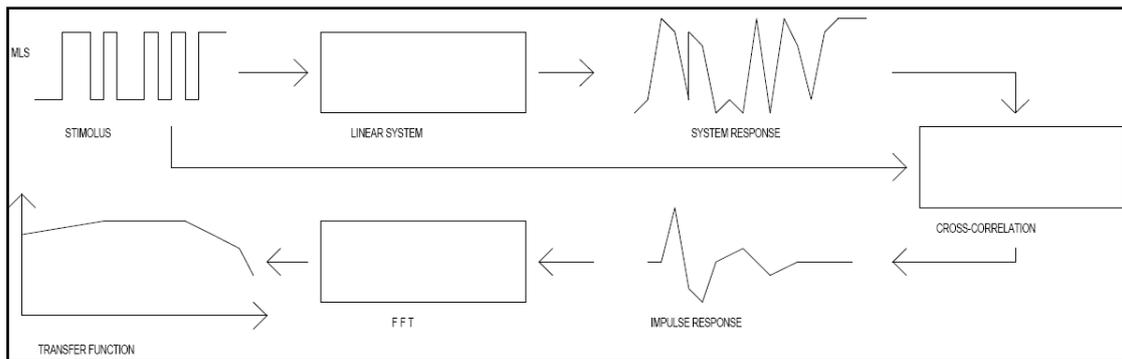


Fig. 36.- Diagrama de obtención de la respuesta al impulso mediante una señal MLS<sup>(13)</sup>

Si posteriormente queremos conocer la respuesta en frecuencia del sistema acústico, podemos realizar la Transformada de Fourier de la señal, pasando del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Una vez obtenida la respuesta al impulso, pasamos al procesamiento de datos mediante MATLAB. Para ello, diseñamos un programa que procesa la señal siguiendo el diagrama de flujo mostrado a continuación (Fig. 37)

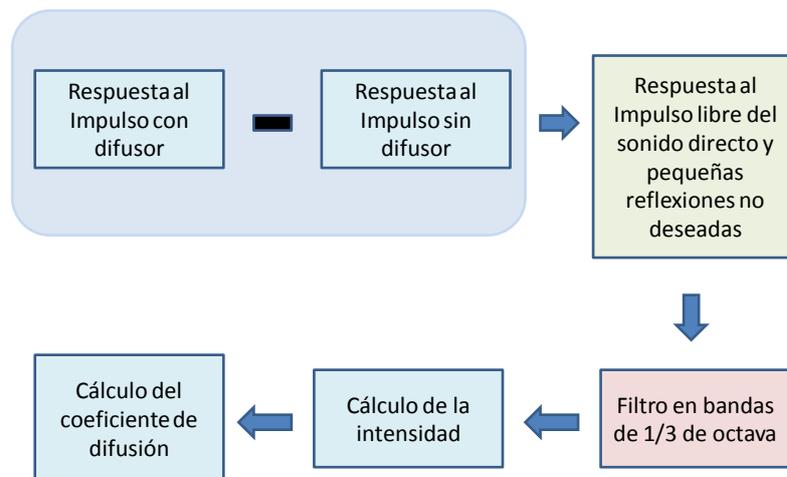


Fig. 37.- Diagrama de flujo del procesamiento de datos con MATLAB.

En primer lugar, restamos la respuesta al impulso del sistema sin difusor a la respuesta al impulso con difusor. Esto lo realizamos para cada ángulo de incidencia (posición de fuente) y todos los ángulos de micrófono. Así, conseguimos 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. Con ello evaluamos solamente la banda que deseamos estudiar.

Posteriormente calculamos la intensidad para cada ángulo de incidencia y cada banda. La intensidad calculada nos sirve para obtener el parámetro conocido como "coeficiente de difusión". Se define de la siguiente manera<sup>(1)</sup>:

$$d = \frac{\left( \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left( 10^{L_i/10} \right)^2}{n - 1 \sum_{i=1}^n \left( 10^{L_i/10} \right)^2} \quad (1.16)$$

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.

En la figura 38 observamos, gráficamente, los resultados obtenidos.

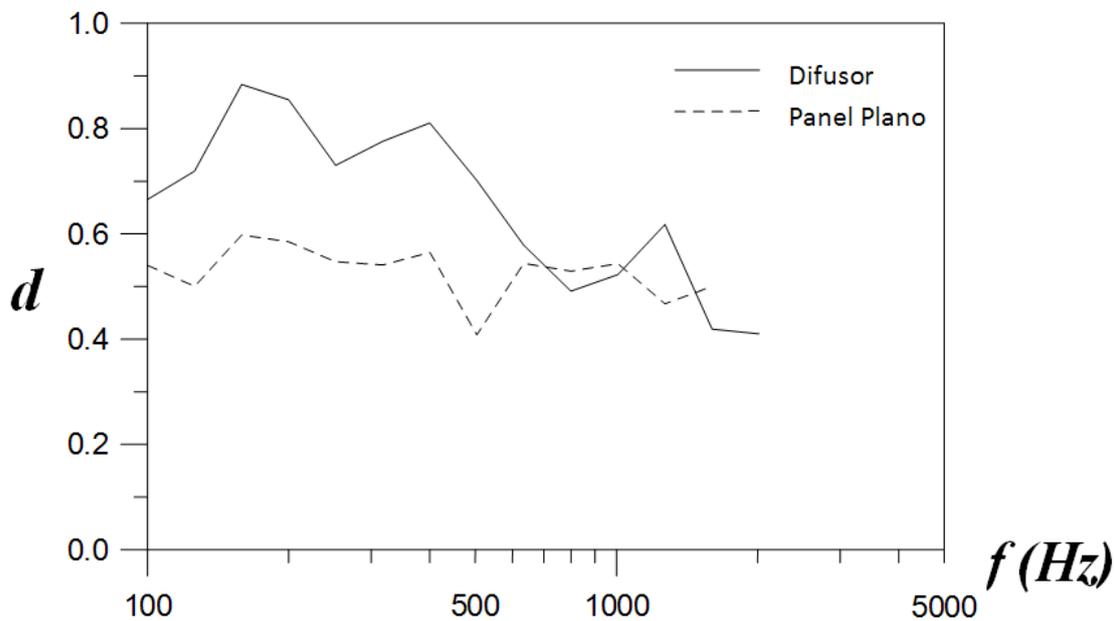


Fig. 38 .- Gráfica del coeficiente de difusión del prototipo respecto a la superficie plana

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.

## 6.- Conclusiones y líneas futuras.

En vista de los resultados obtenidos en el experimento, analizando la gráfica del coeficiente de difusión con respecto a la frecuencia, podemos decir que los cristales acústicos pueden ser usados en el control de la propagación del sonido. En concreto el prototipo de este estudio se comporta de forma satisfactoria para el rango frecuencial de trabajo, 125 Hz a 500 Hz, para el que ha sido diseñado.

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

Cabe reseñar que el proceso de medición no ha seguido estrictamente el procedimiento establecido por la recomendación AES-4id-2001(r2007)<sup>(11)</sup>, en cuanto a las distancias entre los diferentes elementos. Esto es debido a las limitaciones de espacio que nos impone las dimensiones de la cámara anecoica utilizada. Aun con esto el resultado del estudio es significativo y satisfactorio.

Los materiales empleados en la construcción del prototipo a escala hacen que este sea poco ligero 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.

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.



## 7.- Bibliografía

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

[2] Enrique Orduña Malea. “Cristales de sonido ultrasónicos”. [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

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

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

[5] Enrique Orduña Malea. “Caracterización y estudio de difusores RPG”. [www.monografias.com](http://www.monografias.com)

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

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

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

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

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

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

[12] [www.ruvegaudio.com/images/pdf/MLS.pdf](http://www.ruvegaudio.com/images/pdf/MLS.pdf). “La señal MLS (Maximum length sequence)”.

[13] M. Siguero, M. Cuesta, P. cobo. “Directividad de una placa delgada en soporte simple medida con secuencias de máxima longitud (MLS)”. Instituto de Acústica. CSIC.

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

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

[16] Francisco Meseguer Rico y otros. “Lentes acústicas basadas es cristales bi y tridimensionales”. UPV, UAM, Consejo Superior de Investigaciones Científicas.