

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Construcción y caracterización de un prototipo de difusor periódico de tres dimensiones de estructura cristalina”

TESIS DE MASTER

Autor:
Andrés Bernhard Molina

Director/es:
F. Javier Redondo Pastor

GANDIA, 5 de septiembre de 2012

Construcción y caracterización de un prototipo de difusor periódico de tres dimensiones de estructura cristalina

Autor: Andrés Bernhard Molina

Director: F. Javier Redondo Pastor

Resumen

En acústica de salas, tanto el sonido directo como el reflejado de las paredes, techo y piso son claves en la determinación de la calidad acústica. Por lo tanto, uno de los temas principales en acústica es cómo manipular estas reflexiones que afectan la forma de propagación del sonido y cómo es percibido por los oyentes. Lo que se busca es crear un campo sonoro difuso, una buena percepción subjetiva de espacialidad y la eliminación de ecos, focalizaciones, coloraciones y efectos de procedencia erróneos. Esto es posible lograrlo evitando reflexiones especulares en algunos puntos, lo cual se puede lograr con la utilización de difusores en una combinación adecuada con absorbentes y reflectores. Se le denomina difusión acústica al efecto de redistribuir espacialmente y temporalmente la energía acústica que incide sobre una superficie. El objeto de este estudio fue la construcción de un prototipo de difusor de sonido de estructura cristalina y su caracterización. Las redes cristalinas son estructuras atómicas o moleculares que se encuentran en la naturaleza que están caracterizadas principalmente por un orden específico y una periodicidad. Para el estudio se construyó un modelo a escala y se caracterizó por medio del coeficiente de difusión basado en la norma AES-4id-2001 (r2007). Todas las mediciones fueron realizadas en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia.

Abstract

In room acoustics, the direct and reflected sound in walls, ceilings and floor are key in determining the acoustic quality. Therefore, one of the main topics in room acoustics is how to manipulate these reflections that affect sound propagation and how it is perceived by listeners. The aim is to create a diffuse sound field, a good perception of subjective spatiality and to eliminate echoes, focalizations, colorations and wrong provenance effects. This is possible avoiding specular reflections in some points, which can be achieved using diffusers in the right combination with absorbers and reflectors. Acoustic diffusion is the effect of redistributing spatially and temporarily the acoustic energy that comes into contact with a surface. The main objective of the present work was the construction of a crystal structure based sound diffuser and its characterization. Crystal structures are atomic or molecular structures found in nature that are characterized by a specific order and periodicity. For this work a scale model was built and was characterized by the diffusion coefficient based on the guidelines published in the article AES-4id-2001 (r2007). All measurements were made in the anechoic chamber of the Escuela Politécnica Superior de Gandia of the Universidad Politécnica de Valencia.

Autor: Andrés Bernhard Molina, email: anbermo@upvnet.upv.es, andresbernhard@gmail.com

Fecha de entrega: 05/09/2012

ÍNDICE

I. Objeto y antecedentes	5
II. Introducción teórica	7
II.1. Fenómenos acústicos	7
II.2. Fenomenología indeseada en acústica de salas	10
II.3. Difusión	13
II.4. Difusores de estructura cristalina	19
III. Programa de experiencias	26
III.1. Diseño del prototipo	26
III.2. Construcción del prototipo	28
III.3. Sistema y equipo de medición	32
III.4. Método de medición	35
IV. Resultados	40
V. Conclusiones y líneas futuras de estudio	44
AGRADECIMIENTOS	46
BIBLIOGRAFÍA	46
ANEXOS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Reflexión sonora	7
Fig. 2. Difracción Sonora	7
Fig. 3. Refracción sonora	8
Fig. 4. Gráfica del tiempo de reverberación TR.....	9
Fig. 5. Ecograma típico de un eco flotante.....	10
Fig. 6. Efecto de una focalización por techo curvo	11
Fig. 7. Modo propio tangencial (1, 3, 0) @ 57Hz de sala rectangular de 7m x10m	11
Fig. 8. Características temporales y espaciales de superficies absorbentes, reflectantes y difusoras	13
Fig. 9. Esquema de la sección de un difusor (Schroeder QRD).....	14
Fig. 10. Interferencia de ondas sonoras. Izq.: constructiva, der.: destructiva	14
Fig. 11. Difusor MLS	15
Fig. 12. Difusores QRD unidimensional.....	16
Fig. 13. Difusores QRD bidimensional.....	17
Fig. 14. Incidencia y difusión para QRD unidimensional y bidimensional	17
Fig. 15. Difusor PRD	18
Fig. 16. Cristales iónicos de CsCl, ZnS y CaF ₂	19
Fig. 17. Celda unitaria y su extensión en tres dimensiones.....	19
Fig. 18. Tipos de celdas unitarias.....	20
Fig. 19. Celda Wigner-Seitz.....	20
Fig. 20. Obtención del patrón de difracción de rayos X en un cristal	21
Fig. 21. Reflexión de rayos X por dos planos de átomos.....	22
Fig. 22. Zonas de Brillouin.....	24
Fig. 23. Sección del difusor bajo estudio	26
Fig. 24. Alineación de los módulos del difusor.....	26
Fig. 25. Celda unitaria de la estructura cristalina del difusor.....	27
Fig. 26. Materiales utilizados para la construcción del prototipo.....	28
Fig. 27. Marcos con retícula para la separación de los tubos	29
Fig. 28. Fabricación de los marcos para el guiado de los tubos	29
Fig. 29. Colocación de los tubos dentro de los marcos	29
Fig. 30. Alineación de los tubos y revisión de estabilidad	30
Fig. 31. Colocación de los módulos en la plancha de madera.....	30
Fig. 32. Difusor a escala terminado (vista isométrica).....	31
Fig. 33. Difusor a escala terminado (vista frontal/superior).....	31
Fig. 34. Interfase CLIO HR-2000	32

Fig. 35. Micrófono omnidireccional electret Audiomatica MIC-01	32
Fig. 36. Altavoz activo Behringer B2031A Truth.....	33
Fig. 37. Montaje de la pértiga al “giratutto”.....	33
Fig. 38. Interfaz gráfica del control del “giratutto”	34
Fig. 39. Esquema del sistema de medición.....	34
Fig. 40. Esquema del montaje del equipo en la cámara anecoica	35
Fig. 41. Posiciones de medición del difusor (0°, 45°, 90° y 135° respectivamente).....	36
Fig. 42. Medición en posición 0° para incidencia normal.....	36
Fig. 43. Medición en posición 45° para incidencia normal.....	37
Fig. 44. Medición de la tabla en posición 0° para incidencia normal.....	37
Fig. 45. Medida de la sala vacía para incidencia 45°	38
Fig. 46. Colocación del altavoz para incidencia 45°	38
Fig. 47. Respuesta al impulso obtenida en las mediciones.....	39
Fig. 48. Medida de respuesta impulsiva mediante señales MLS.....	40
Fig. 49. Flujo de la obtención de la respuesta al impulso mediante señales MLS	41
Fig. 50. Flujo del procesado mediante MATLAB.....	41
Fig. 51. Coeficiente de difusión para incidencia normal.....	42
Fig. 52. Coeficiente de difusión para incidencia 45°	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales utilizados para la construcción del prototipo	28
---	----

I. Objeto y antecedentes

1.1. Introducción

En acústica de salas, tanto el sonido directo como el reflejado de las paredes, techo y piso son claves en la determinación de la calidad acústica. Por lo tanto, uno de los temas principales en acústica es cómo manipular estas reflexiones que afectan la forma de propagación del sonido y cómo es percibido por los oyentes. Lo que se busca es crear un campo sonoro difuso, una buena percepción subjetiva de espacialidad y la eliminación de ecos, focalizaciones, coloraciones y efectos de precedencia erróneos. Esto es posible lograrlo evitando reflexiones especulares en algunos puntos, lo cual se puede lograr con la utilización de difusores en una combinación adecuada con absorbentes y reflectores. Se le denomina difusión acústica al efecto de redistribuir espacial y temporalmente la energía acústica que incide sobre una superficie.

El presente estudio se enfoca en un difusor de estructura cristalina, cuya forma está basada en estructuras atómicas de muchos materiales en la naturaleza. Estas redes cristalinas están caracterizadas principalmente por un orden específico y una periodicidad. Este tipo de difusor pretende solucionar la limitación de trabajo en frecuencias medias-altas, buscando actuar sobre un rango de frecuencias más graves.

Cuando las ondas se propagan a través de un medio dispersor cuyos elementos están colocados periódicamente, como es el caso de un difusor de estructura cristalina, se produce un fenómeno llamado “estructuras en bandas”. Esto significa que las ondas pueden propagarse en un rango específico de frecuencias acorde a las reglas de dispersión, mientras que en otros rangos de frecuencias la propagación no se produce, generando así bandas permitidas y prohibidas (las últimas denominadas “band gaps”).

1.2. Objetivos

El objeto de este estudio es la construcción de un prototipo de difusor de sonido de estructura cristalina y su caracterización. El difusor objeto del análisis presenta una estructura cristalina en tres direcciones del espacio. Por la disposición de los tubos que conforman los módulos del difusor, se trata de un análisis tridimensional.

Los objetivos principales del trabajo son:

1. Analizar y explicar los fundamentos del comportamiento de los difusores de sonido.
2. Construir el prototipo basado en una estructura cristalina.
3. Evaluar el comportamiento del difusor bajo estudio.

Para esto, se ha estructurado el trabajo en los siguientes apartados:

- **Objeto y antecedentes**, donde se encuentra una breve introducción y los objetivos del estudio.
- **Introducción teórica**, donde se reúnen fundamentos y conceptos básicos necesarios, así como los principios del funcionamiento de los difusores de estructura cristalina.
- **Programa de experiencias**, donde se describe el proceso de construcción del prototipo y las actividades realizadas para caracterizarlo.
- **Resultados**, donde se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio.
- **Conclusiones y líneas futuras de estudio**, donde se resaltan los puntos más importantes obtenidos de los resultados, así como las limitantes en el estudio y las líneas futuras para complementar el mismo.
- **Bibliografía**, donde se muestran las fuentes consultadas y de referencia.

II. Introducción teórica

II.1. Fenómenos acústicos

II.1.1. Reflexión, difracción y refracción

Una *reflexión*¹ se produce cuando en el recorrido de una onda se sitúa un obstáculo, el cual hace que parte de la energía acústica retorne. Si la superficie de este obstáculo es lisa y suficientemente grande, se producirá una reflexión en una sola dirección siguiendo la ley de Snell, es decir, el ángulo reflejado r es igual al ángulo incidente i (Fig. 1).

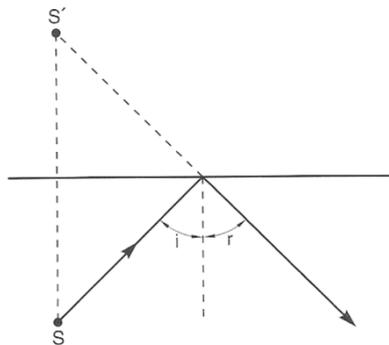


Fig. 1. Reflexión sonora
(Fuente: Arau, 1999²)

Si las dimensiones del obstáculo no son grandes, habrá otra onda que se propagará sobrepasándolo en la misma dirección de incidencia. A este fenómeno, en el que el sonido bordea los obstáculos suficientemente pequeños se le denomina *difracción*³ (Fig. 2). Los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que aumenta el tamaño del obstáculo comparado con la longitud de onda.

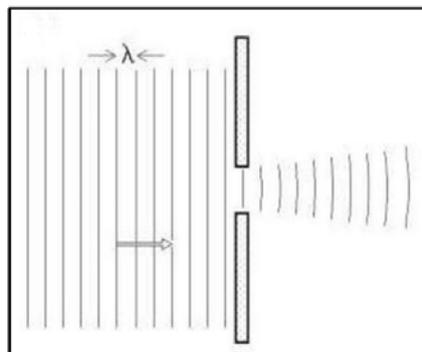


Fig. 2. Difracción Sonora
(Fuente: Atanasio *et al*, 2011³)

El fenómeno de la *refracción*¹ se produce cuando la dirección de la onda cambia al cambiar el medio de propagación (Fig.3). Generalmente, en acústica de salas no se producen cambios en el medio por lo que este fenómeno no es de importancia. Sin embargo, si existen gradientes significativos de temperatura en la sala, este fenómeno puede producirse, lo cual tiene como resultado una alteración en la dirección de la propagación de las ondas.

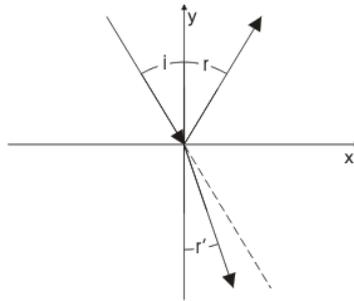


Fig. 3. Refracción sonora

II.1.2. Reverberación

Se denomina *reverberación*¹ a la persistencia del sonido en un recinto después de que cesa la irradiación de energía acústica de la fuente. Cuando la fuente cesa de emitir, la densidad de energía acumulada no desaparece inmediatamente ya que, cuando las ondas acústicas inciden en los distintos cerramientos, se producen reflexiones que debilitan las ondas progresivamente por la pérdida de energía por la absorción.

La reverberación es un fenómeno muy importante en acústica de salas, ya sea para mensajes hablados o musicales. Esta persistencia del sonido puede ser beneficiosa, ya que puede reforzarlo y prolongarlo. Sin embargo, en ocasiones puede ser perjudicial cuando se enmascaran unos sonidos con otros, lo cual conlleva a una pérdida en la claridad del mensaje.

II.1.2.1. Tiempo de reverberación

El tiempo de reverberación (TR) es un parámetro para evaluar la calidad acústica de una sala. Se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente sonora deja de emitir hasta que la energía decae a $1/10^6$ de su valor original. En términos de intensidad acústica, corresponde a la caída de 60 decibelios en escala logarítmica (Fig. 4).

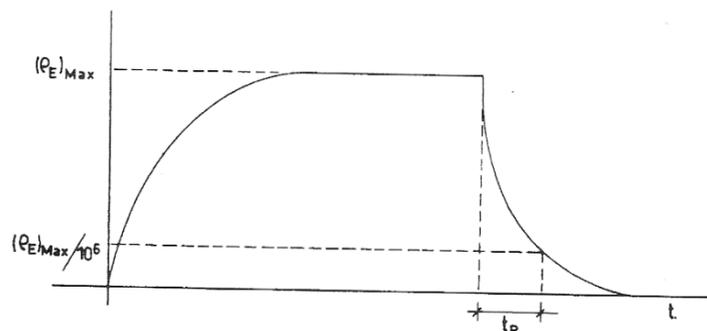


Fig. 4. Gráfica del tiempo de reverberación TR

(Fuente: Llinares *et al*, 2011¹)

El tiempo de reverberación de un recinto depende de las características de sus elementos. Cuando se tienen elementos muy absorbentes, el tiempo de reverberación es pequeño, resultando así en una sala “seca”. Cuando los elementos son muy reflectantes, el tiempo de reverberación aumenta. Si éste es demasiado alto, tendrá como resultado una sala muy “reverberante” donde los mensajes sonoros serán confusos. Por esta razón, el tiempo de reverberación es un parámetro muy importante para caracterizar la calidad acústica de un recinto.

II.1.3. Campo difuso y campo libre

Los procesos acústicos de emisión, propagación y recepción dependen del campo acústico en el que ocurren. Los campos se pueden dividir en dos grupos principales: *campo difuso* y *campo libre*.

Las leyes de la reverberación explicadas anteriormente, basadas en la acústica estadística, aplican únicamente en campos acústicos en los que todas las direcciones de propagación del sonido aportan la misma intensidad sonora en cualquier momento (estado estacionario y descenso). Un campo acústico que cumple con estas condiciones se denomina *campo difuso*¹, en el cual la distribución de energía acústica es homogénea e isotrópica en cualquier instante y punto. La reverberación y la difusión están estrechamente relacionadas; mientras más reverberación, más difusión y viceversa.

Cuando el sonido radiado por una fuente no es obstaculizado por ningún objeto, la propagación de las ondas se produce en un *campo libre*. Para poder conseguir esta condición en un laboratorio se debe contar con una cámara anecoica. En estas salas las paredes tienen un tratamiento acústico con cuñas muy absorbentes, por lo general de lana mineral, que minimizan las reflexiones en el interior para cumplir con las condiciones de campo libre, es decir, libre de reflexiones.

II.2. Fenomenología indeseada en acústica de salas

II.2.1. Ecos

El fenómeno del *eco*¹ se produce cuando una señal acústica emitida por una fuente es percibida por el oyente como dos o más señales desfasadas. El oído humano tiene un tiempo de respuesta promedio de aproximadamente 50ms. Esto significa que si dos señales llegan con un desfase temporal menor a 50ms, el oído lo interpreta como una señal única. Si las señales llegan desfasadas con un tiempo superior, se percibirá como que fueran dos señales distintas.

El efecto del eco se puede producir cuando la diferencia de recorridos entre el sonido directo y reflejado es muy grande. Otra forma es el denominado *eco flotante*², el cual es una repetición indeseable del sonido producido por reflexiones entre paredes paralelas, lo cual es percibido por el oyente como una sucesión rápida de pequeños ecos (Fig. 5).

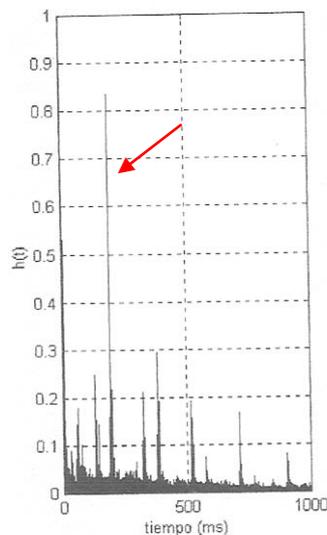


Fig. 5. Ecograma típico de un eco flotante

(Fuente: Arau, 1999²)

II.2.2. Focalizaciones

Una *focalización*¹ se trata de un fenómeno de concentración de reflexiones en un punto del espacio. Esto tiene como efecto ocasionar grandes defectos en la homogeneidad acústica de una sala, ya que se concentra en un punto gran cantidad de energía acústica, mientras que en otros puntos de la sala ésta es muy deficiente.

La Fig. 6 muestra la focalización generada por un techo abovedado. El efecto de la focalización en este caso se produce debido a que la altura es del orden del radio de la bóveda y a que se trata de una superficie muy reflectante.

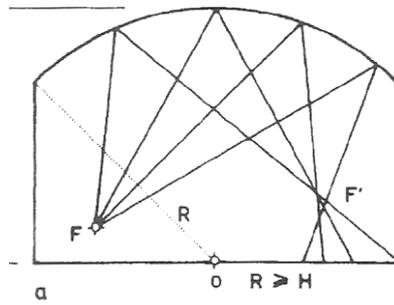


Fig. 6. Efecto de una focalización por techo curvo

(Fuente: Llinares *et al*, 2011¹)

II.2.3. Coloración

Cualquier sala o recinto tiene *frecuencias propias*¹, es decir, frecuencias específicas de resonancia debidas a la aparición de ondas estacionarias dentro del recinto. Estas frecuencias dependen principalmente de la forma, del tamaño y de las condiciones de contorno. El amortiguamiento y el tiempo de duración de las mismas dependen del tratamiento de las superficies interiores.

Existen tres tipos de modos propios en una sala: axiales, tangenciales y oblicuos. La Fig. 7 muestra una simulación del modo propio tangencial (1, 3, 0) de una sala rectangular de 7m x10m.

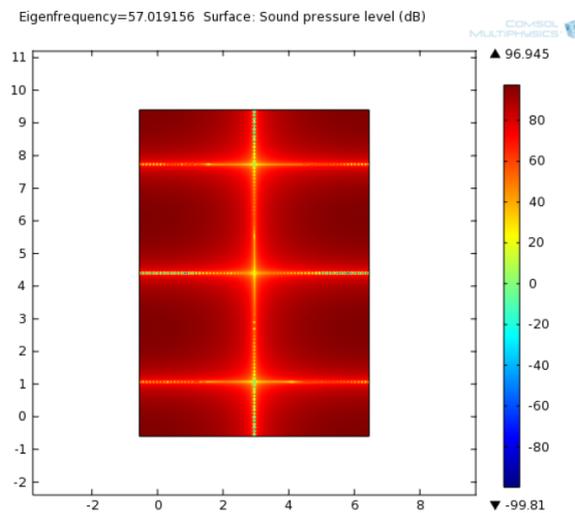


Figura 23. Modo (1, 3, 0) @57Hz

Fig. 7. Modo propio tangencial (1, 3, 0) @ 57Hz de sala rectangular de 7m x10m

Para evitar la coloración de una sala se deben evitar formas excesivamente regulares, evitar superficies paralelas reflectantes y evitar dimensiones conmensurables de la sala, es decir, que no haya relaciones aritméticas simples entre ellas.

II.2.4. Efecto de precedencia

También denominado *Efecto Haas*, se produce cuando los oídos reciben varias señales de similar nivel y distinta posición, como lo puede ser el sonido directo de una fuente y el sonido reflejado por una superficie del recinto. El efecto es la localización de la fuente en la dirección de la que llega primero y se aprecia sobre todo en el plano horizontal.

Si se desea que ambas señales, es decir, sonido directo y reflejado, se perciban como una sola señal de mayor nivel, la diferencia temporal entre el sonido que llega de las reflexiones y el sonido directo debe ser menor a 30-40ms. Con esta condición se logra identificar de forma correcta la procedencia de la fuente original. Diferencias temporales mayores a 50ms hacen que se perciban ecos, lo cual puede afectar la identificación de la procedencia del sonido de la fuente.

II.3. Difusión

II.3.1. Introducción

Tanto el sonido directo como el reflejado de las paredes, techo y piso son claves en la determinación de la calidad acústica. Por lo tanto, uno de los temas principales en acústica es cómo manipular estas reflexiones que afectan la forma de propagación del sonido y cómo es percibido por los oyentes. Lo que se busca es crear un campo sonoro difuso, una buena precepción subjetiva de espacialidad y la eliminación de ecos, focalizaciones, coloraciones y efectos de procedencia erróneos. Esto es posible lograrlo evitando reflexiones especulares en algunos puntos, lo cual se puede lograr con la utilización de difusores en una combinación adecuada con absorbentes y reflectores. Se le denomina *difusión acústica*⁴ al efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie.

Cuando el sonido llega a una superficie se puede transmitir, absorber o reflejar. Cuánta energía corresponde a cada caso depende de las propiedades acústicas de la superficie donde incide el sonido. La Fig. 8 muestra las características temporales y espaciales según las características de la superficie donde incide el sonido.

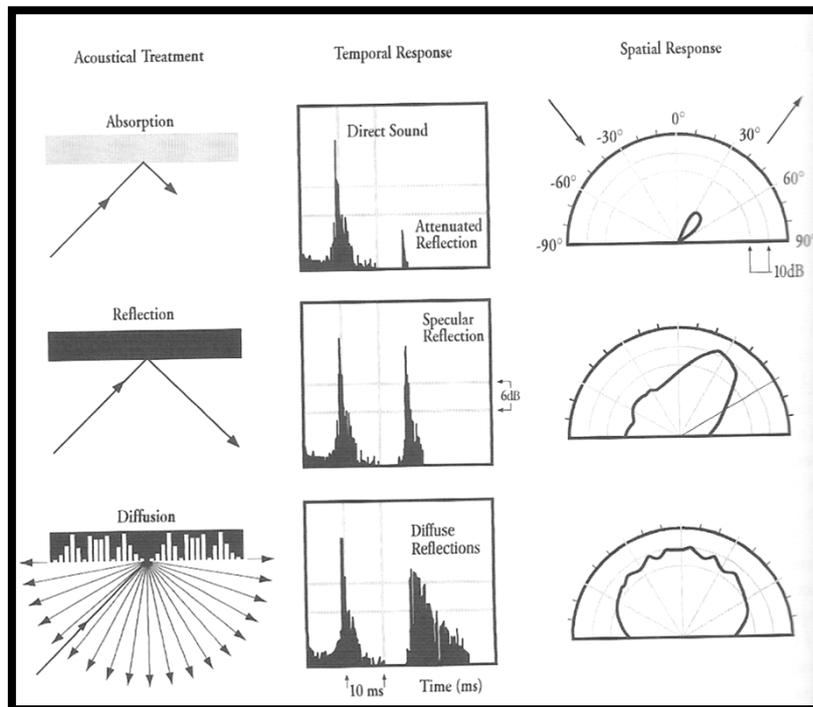


Fig. 8. Características temporales y espaciales de superficies absorbentes, reflectantes y difusoras

(Fuente: Cox *et al.*, 2009⁴)

Para prevenir distorsión acústica se pueden utilizar tanto absorbentes como difusores. Qué tipo de tratamiento es más adecuado depende principalmente si se desea un decremento en el tiempo de reverberación y/o del nivel sonoro. Si se desea el decremento en el tiempo de reverberación y/o del nivel sonoro, la utilización de absorbentes es más adecuada. Si se desea conservar la energía acústica del recinto, como es el caso en muchas salas de conciertos, la utilización de difusores es preferible.

II.3.2. Difusores de sonido

Los difusores de sonido son elementos diseñados para reflejar y dispersar el sonido que incide en ellos de forma uniforme en múltiples direcciones. Las dimensiones del difusor condicionan el rango de frecuencias para el que debe trabajar.

Los difusores pioneros y más utilizados son los de *Schroeder*^{3,4}. Estos consisten en dispositivos con un grupo periódico de hendiduras de mismo ancho w pero distinta profundidad d_n (Fig. 9). Las paredes entre las hendiduras son muy estrechas y rígidas. Las profundidades se determinan a través de secuencias numéricas que se explicarán con mayor detalle en las secciones siguientes.

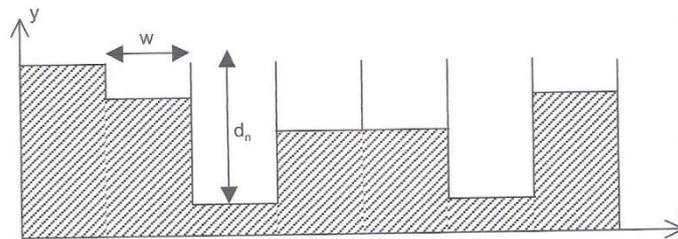


Fig. 9. Esquema de la sección de un difusor (Schroeder QRD)

(Fuente: Cox *et al*, 2009⁴)

El principio de funcionamiento de estos difusores es la interferencia de ondas. Existen dos tipos de interferencias de ondas: interferencias constructivas y destructivas. Cuando las ondas sonoras se superponen, la amplitud de la onda resultante se ve afectada dependiendo de la amplitud original de las mismas y de la fase entre ambas⁵ (Fig. 10).

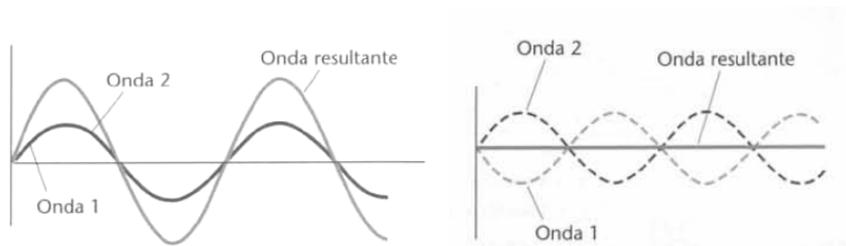


Fig. 10. Interferencia de ondas sonoras. Izk.: constructiva, der.: destructiva

(Fuente: Tipler *et al*, 2009⁵)

Cuando la onda incide sobre una de las ranuras, ésta se propaga por su interior siguiendo un camino paralelo a las paredes hasta alcanzar el fondo. En este momento, la onda se refleja y se propaga en el sentido opuesto 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 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 tendrá lugar, es decir, de la secuencia de valores de las profundidades de las ranuras.

En los últimos años se han desarrollado diferentes tipos de difusores, siendo los más relevantes los MLS (Maximum Length Sequence), los QRD (Quadratic-Residue Diffuser) y los PRD (Primitive Root Diffuser). Estos difusores acústicos generalmente trabajan en un rango de frecuencias limitado, usualmente en frecuencias medias-altas.

II.3.2.1. Difusores MLS

Los *difusores MLS* (Maximum Length Sequence)^{3,4} están basados en una secuencia pseudoaleatoria periódica que pueden adquirir los valores -1 o $+1$. La superficie del difusor es lisa y reflectante con divisiones del mismo ancho y misma profundidad (Fig. 11). Cada división tiene asignada un valor de la secuencia y se aplica de la siguiente forma:

- $-1 \rightarrow$ La división no se altera (no hay ranura)
- $+1 \rightarrow$ Hay ranura en la división

El ancho w y la profundidad d de las divisiones se calculan de la siguiente forma:

$$w = \frac{\lambda}{2} \quad d = \frac{\lambda}{4} \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda de diseño.

El difusor trabaja de forma óptima únicamente para el rango de una octava.

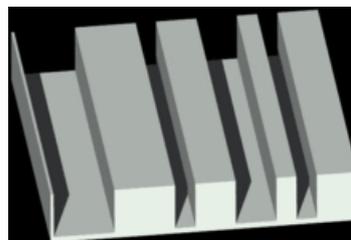


Fig. 11. Difusor MLS

II.3.2.2. Difusores QRD

Los difusores QRD (Quadratic Residue Difusser)^{3,4} están divididos en dos tipos: unidimensionales y bidimensionales.

Los difusores *unidimensionales* son los más utilizados. Están conformados por una serie de ranuras con el mismo ancho pero profundidades distintas. Las ranuras están separadas por paredes delgadas y rígidas (Fig. 12).

Las dimensiones del difusor vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$w = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad s_n = n^2 \text{ mod } N \quad d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (2)$$

donde w es el ancho de la ranura, s_n es el número de la secuencia, n es el número de la ranura, mod es el resto no-negativo de la división (módulo), N es el generador numérico y el número total de ranuras, y λ_0 es la longitud de onda de la frecuencia de diseño.

Los difusores Schroeder trabajan en múltiplos enteros de una frecuencia de diseño f_0 . La frecuencia de diseño es normalmente la frecuencia límite más baja con longitud de onda λ_{min} . Sin embargo, es más conveniente presentar la tercera ecuación de (2) en términos de λ_0 . Consecuentemente, las profundidades de las ranuras varían entre 0 y $\lambda_0/2$.

La frecuencia de diseño f_0 no es la frecuencia más baja en la cual la superficie produce más dispersión que una superficie plana. En realidad corresponde a la primera frecuencia en la cual se pueden obtener lóbulos de difracción de energía uniforme.

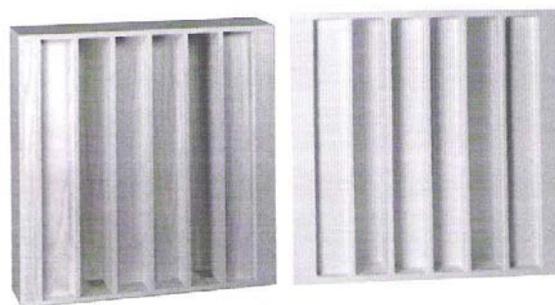


Fig. 12. Difusores QRD unidimensional

(Fuente: Cox *et al.*, 2009⁴)

La frecuencia más alta para la que se obtiene una difusión de sonido aumenta a medida que disminuye el ancho de las ranuras. La frecuencia más baja disminuye a medida que aumenta la profundidad máxima. Sin embargo, ranuras muy estrechas y profundas producen un exceso de

absorción, por lo que existe un límite de dicha relación, en el cual el margen útil de frecuencias está restringido prácticamente a tres octavas, es decir,

$$\frac{f_{max}}{f_0} \leq 8 \quad (3)$$

donde f_{max} es la frecuencia máxima en la que se desea una difusión óptima.

Los difusores *bidimensionales* tienen como función generar una difusión óptima en todas las direcciones. Están conformados por hendiduras generalmente cuadradas con profundidades variables (Fig. 13). Habitualmente, las hendiduras están en configuraciones simétricas.

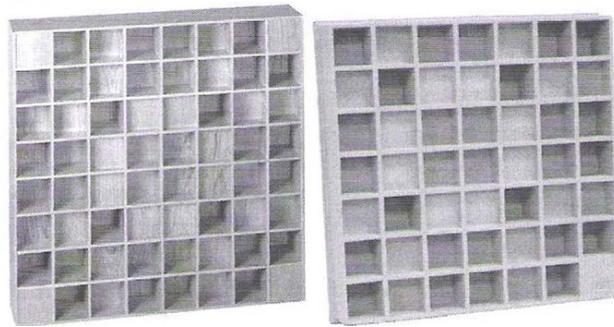


Fig. 13. Difusores QRD bidimensional

(Fuente: Cox *et al.*, 2009⁴)

La Fig. 14 muestra la diferencia en la difusión de los difusores QRD unidimensionales y bidimensionales, respectivamente.

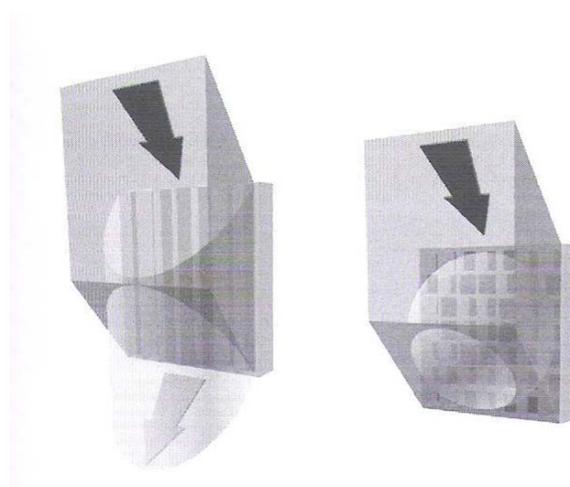


Fig. 14. Incidencia y difusión para QRD unidimensional y bidimensional

(Fuente: Cox *et al.*, 2009⁴)

II.3.2.3. Difusores PRD

Los *difusores PRD* (Primitive Root Diffusser)^{3,4} son similares a los QRD bidimensionales. Sin embargo, las ecuaciones de diseño varían. El número de secuencia s_n se obtiene a través de una expresión recursiva, es decir,

$$s_n = (r \cdot s_{n-1}) \bmod N \quad (4)$$

donde r es la raíz primitiva de N y el difusor tendrá $N-1$ hendiduras por período.

Por esta razón, no existe simetría dentro de cada período en este tipo de difusores, a diferencia de los QRD (Fig. 15).



Fig. 15. Difusor PRD

(Fuente: www.oliverprime.com, 2012)

II.4. Difusores de estructura cristalina

II.4.1. Estructuras cristalinas

Las *estructuras cristalinas*⁶ están presentes en gran cantidad de sólidos en la naturaleza. Son estructuras repetitivas con un ordenamiento estricto y regular, es decir, sus átomos, moléculas o iones ocupan posiciones específicas.

Por la distribución de estas partículas en el sólido cristalino, las fuerzas netas de atracción intermolecular son máximas. Estas fuerzas que mantienen la estabilidad del cristal pueden ser iónicas, covalentes, de van der Waals, de enlaces de hidrógeno o una combinación de todas las anteriores. La Fig. 16 muestra algunos ejemplos de cristales iónicos.

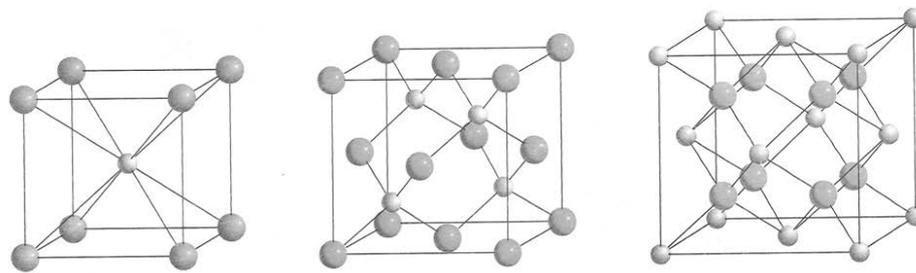


Fig. 16. Cristales iónicos de CsCl, ZnS y CaF₂

(Fuente: Chang, 2002⁶)

La celda unitaria es la unidad estructural que se repite en un sólido cristalino. La Fig.17 muestra una celda unitaria y su extensión en tres dimensiones. Cada esfera representa un átomo, ion o molécula y se denomina punto reticular.

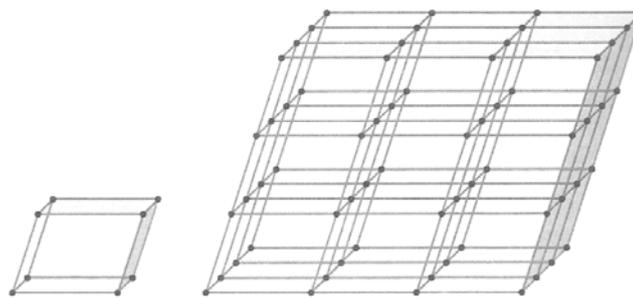


Fig. 17. Celda unitaria y su extensión en tres dimensiones

(Fuente: Chang, 2002⁶)

Cada sólido de estructura cristalina se representa con uno de los siete tipos de celdas unitarias que se muestran en la Fig.18. Evidentemente, la estructura cúbica simple es la más sencilla, ya que todos los lados y ángulos son iguales. Cualquiera de las celdas unitarias que se repite en tres dimensiones conforma una estructura reticular característica de los sólidos cristalinos.

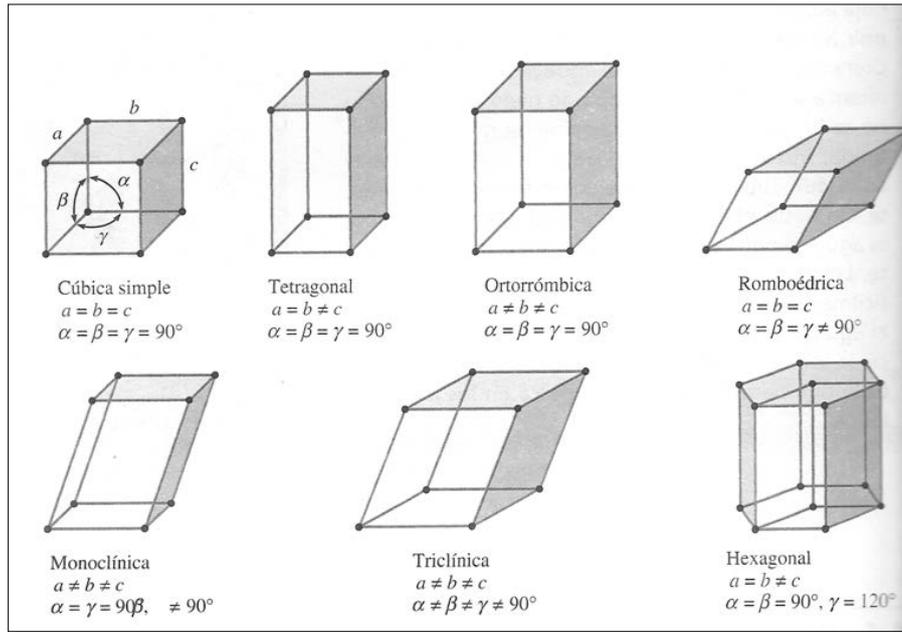


Fig. 18. Tipos de celdas unitarias

(Fuente: Chang, 2002⁶)

Otro tipo de celda unitaria es la Wigner-Seitz (Fig. 19). Esta celda unitaria primitiva se forma tomando un punto central de la red y trazando una línea hacia los puntos exteriores. Éstos luego se dividen a la mitad y se traza una línea transversal en la bisección de cada tramo. La figura resultante es la celda unitaria.

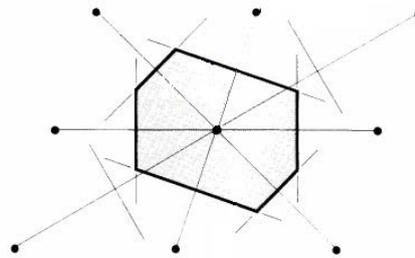


Fig. 19. Celda Wigner-Seitz

La fracción de espacio ocupada por los átomos, moléculas o iones de una celda unitaria, suponiendo que se trata de esferas sólidas, se denomina *factor de llenado*³. Se define acorde a la siguiente expresión:

$$F = \frac{nV}{V_c} \quad (5)$$

donde F es el factor de llenado, n es el número de esferas por celda, V es el volumen de la esfera y V_c es el volumen de la celda.

II.4.2. Cristales de sonido

II.4.2.1. Difracción de ondas en redes cristalinas

Prácticamente todo lo que se conoce sobre estructuras cristalinas se ha obtenido a través de estudios de *difracción de rayos X*⁶, es decir, la dispersión de los rayos por las unidades de un sólido cristalino. Con los patrones de dispersión (o difracción) se puede deducir el ordenamiento de las partículas en la *red cristalina*⁶ (Fig. 20). Parte de la radiación recibida es absorbida por el cristal y luego emitida.

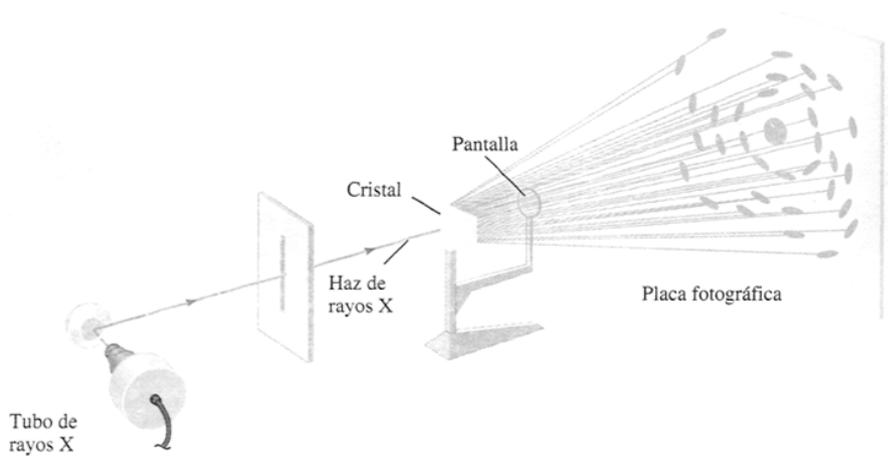


Fig. 20. Obtención del patrón de difracción de rayos X en un cristal

(Fuente: Chang, 2002⁶)

Debido a que los rayos X son una forma de radiación electromagnética, y por lo tanto de ondas, se puede esperar que tengan un comportamiento ondulatorio en las condiciones adecuadas. En 1912, Max von Laue sugirió que debido a que la longitud de onda de los rayos X es comparable con la magnitud de las distancias que hay entre los puntos reticulares de un cristal, la red sería capaz de difractar los rayos X. El patrón de difracción es consecuencia de las interferencias en las ondas asociadas a los rayos.

Para entender el fenómeno de la difracción se analizará la dispersión de rayos X por átomos de dos planos paralelos mostrado en la Fig. 21. Inicialmente, ambos rayos incidentes están en fase uno respecto del otro.

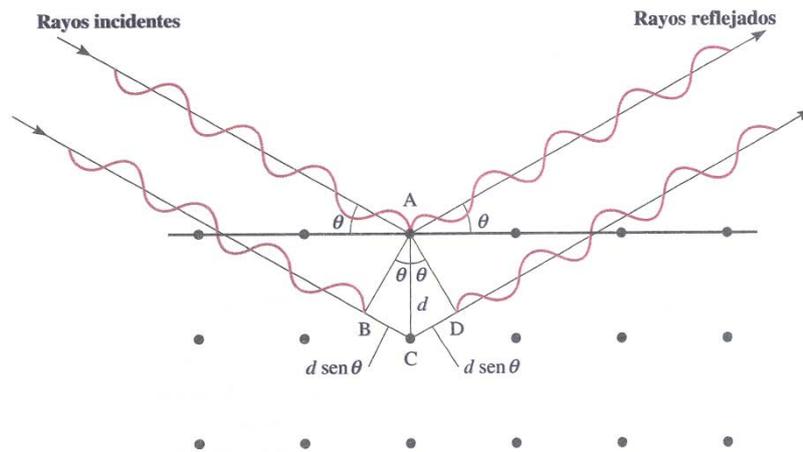


Fig. 21. Reflexión de rayos X por dos planos de átomos

(Fuente: Chang, 2002⁶)

La onda superior es dispersada, o reflejada, por un átomo del primer plano. Por el otro lado, la onda inferior es dispersada por un átomo del segundo plano. Para que ambas ondas dispersadas entren en fase nuevamente, la distancia adicional que recorre la onda inferior debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda λ de los rayos X, es decir,

$$BC + CD = 2d \sin \theta = n\lambda \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (6)$$

donde θ es el ángulo entre los rayos y el plano del cristal, d es la distancia entre planos adyacentes y λ la longitud de onda del frente incidente. A la ecuación (6) se le conoce como *ecuación de Bragg*⁶ en honor a William H. Bragg y Sir William L. Bragg.

II.4.2.2. Estructuras en bandas

Cuando un conjunto de ondas se propaga a través de un medio con muchos elementos dispersores, cada onda será dispersada por cada uno de los elementos, y las ondas dispersadas volverán a dispersarse por los otros elementos. Se establece entonces un proceso recursivo de “redispersión”.

Adicionalmente, si estos elementos se encuentran colocados de forma periódica, como es el caso en las estructuras cristalinas, se producirá un fenómeno denominado *estructuras en bandas*³. Esto quiere decir que las ondas se pueden propagar en un rango de frecuencias determinado, acorde a las reglas de dispersión, mientras que para otros rangos la propagación es cancelada. Las primeras se

llaman bandas permitidas, y las últimas, bandas prohibidas (“band gap”). La reflexión de Bragg, explicada en el apartado II.4.2.1, es la causante la aparición de las bandas prohibidas.

En un campo acústico, la aparición de bandas permitidas y prohibidas se produce cuando el frente de ondas de encuentra con una distribución periódica de la densidad del obstáculo dispersor, y que ésta tenga un tamaño comparable con la longitud de onda del frente incidente. Así, una estructura, cuyos elementos están organizados en forma periódica según las dimensiones de la longitud de onda acústica que incide sobre ella, creando interferencia en el frente de ondas, se denomina cristal de sonido.

La primera banda de energía está asociada a la primera reflexión de Bragg, que corresponde con el límite de la *zona de Brillouin*⁷. Para $n=1$ e incidencia normal, la ecuación (6) se escribe:

$$\lambda = 2d = \frac{c}{f} \quad (7)$$

donde c es la velocidad de propagación de la onda y f la frecuencia.

Despejando f ,

$$f = \frac{c}{2d} \quad (8)$$

El número de onda k se define entonces,

$$k = \frac{w}{c} = \frac{2\pi f}{c} = \frac{2\pi(\frac{c}{2d})}{c} = \frac{\pi}{d} \quad (9)$$

Las zonas de Brillouin son regiones limitadas en energía. En la primera zona, la onda tendrá energía comprendida entre valores máximos y mínimos, cuyos límites indicarán los valores de vectores de onda que tienen difracción de Bragg. Aplicando las condiciones de difracción y sustituyendo las expresiones para los vectores de traslación, se obtiene que las reflexiones de Bragg ocurren para:

$$k = \pm n \frac{\pi}{d} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

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

Para los valores de k de la ecuación (10) las soluciones están conformadas por ondas que viajan hacia la derecha y hacia la izquierda, creando así reflexiones sucesivas que generan ondas estacionarias. Debido a estas ondas estacionarias aparecen bandas prohibidas (Fig. 22).

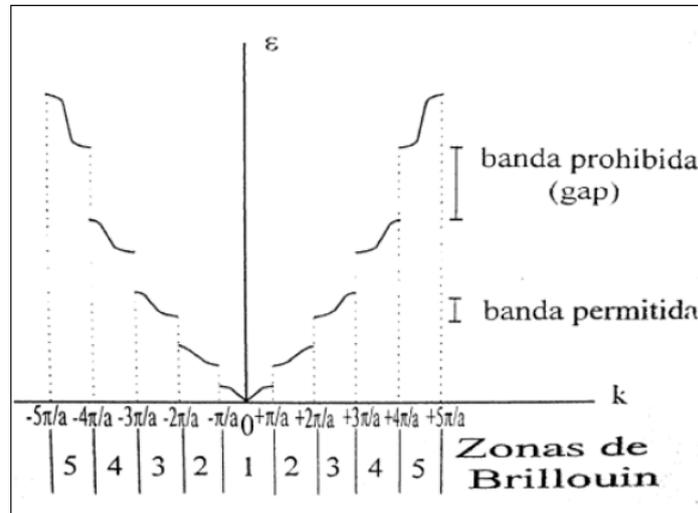


Fig. 22. Zonas de Brillouin

(Fuente: Atanasio *et al.*, 2011³)

Las zonas de Brillouin se construyen uniendo la celda origen con las celdas vecinas más próximas.

II.4.2.3. Parámetros estructurales

La aparición de las bandas prohibidas está controlada por los parámetros siguientes³:

1. Simetría de la estructura

Mientras más redonda es la celda de Wigner-Seitz de la red recíproca, más posibilidades hay que aparezca la banda prohibida. Esto significa teóricamente que la banda prohibida en los cristales de sonido formados a partir de redes triangulares aparecen antes que en una red cuadrada⁸.

2. Contraste de velocidad

El *contraste de velocidad* entre la onda que se propaga por el material “huésped” y por el elemento dispersor.

3. Cociente entre las densidades de los elementos que forman el cristal

Acorde a Sigalas M.M. *et al*⁹ este se considera como el factor determinante para la aparición de bandas prohibidas en los cristales de sonido. Si el cociente de densidades aumenta se produce un aumento de la banda prohibida existente. A pesar de esto, en los cristales de sonido este cociente puede hacerse tan grande que el material de más alta densidad se comporta como rígido y el sonido no se transmite por él, sino solamente por el de baja densidad.

4. Factor de llenado

Definido como la relación entre el volumen ocupado por cada dispersor respecto al volumen total de la celda unitaria (Ver Sección II.4.1.).

5. Topología

La dispersión se consigue a través del uso de dos materiales con diferentes velocidades de propagación. En los cristales de sonido, el material dispersor es el que presenta mayor densidad, lo cual implica que posee una mayor velocidad de propagación de ondas acústicas a través de él. Existen dos tipologías básicas:

a. Topología Cermet

El material dispersor consiste en inclusiones aisladas, cada una de las cuales está rodeada totalmente por el material huésped. Teóricamente, esta tipología favorece al desarrollo de huecos para ondas acústicas.

b. Topología Network

El material dispersor está conectado formando una red de trabajo a lo largo de toda la estructura.

III. Programa de experiencias

III.1. Diseño del prototipo

Para poder estudiar el comportamiento del difusor de estructura cristalina, se debe diseñar apropiadamente un prototipo que permita realizar una caracterización adecuada. Se pretende que el difusor bajo estudio trabaje a bajas frecuencias buscando evitar la limitación característica de los difusores tradicionales de ser eficientes únicamente a frecuencias medias-altas.

El difusor está formado por un panel plano y un conjunto de módulos cuadrados con cilindros de un mismo diámetro D , misma longitud L y separados a una distancia a igual entre sí (Fig. 23).

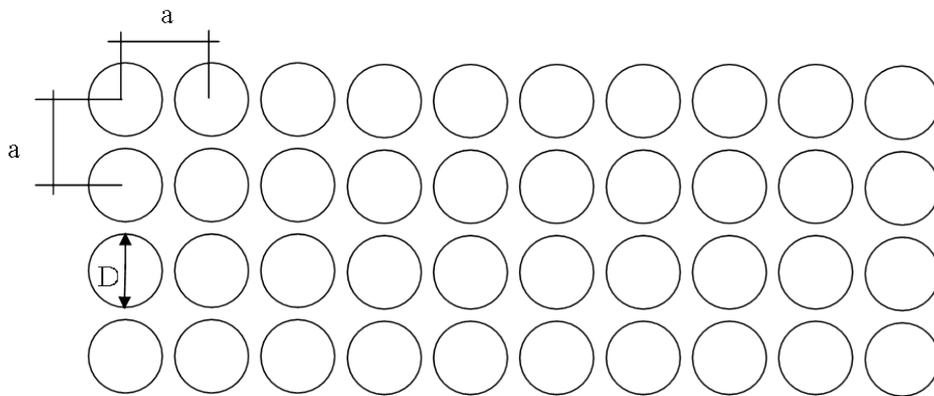


Fig. 23. Sección del difusor bajo estudio

Debido a que se trata de un difusor modular, se decidió analizar nueve módulos para que fuera representativo el efecto del conjunto. En el prototipo original, cada módulo tiene una longitud L de 0,79m y están colocados alternando la dirección de los cilindros (Fig. 24).

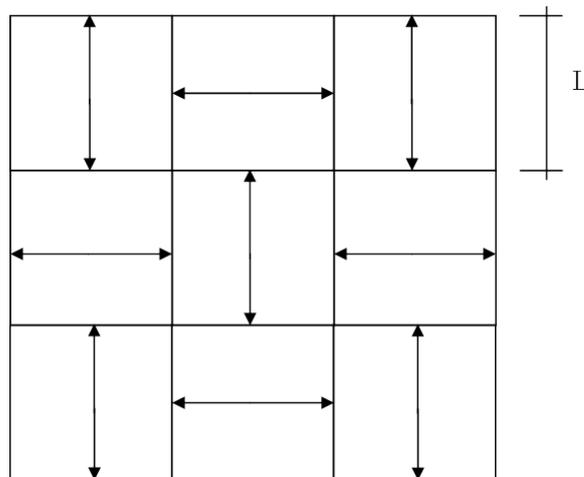


Fig. 24. Alineación de los módulos del difusor

El prototipo original tiene entonces una longitud y altura total de 2,37m. Debido a que se trata de un tamaño demasiado grande para poder estudiarlo correctamente, se decidió realizar un diseño a escala para poder obtener un prototipo más pequeño y más liviano. Esto permite estudiar el difusor en la cámara anecoica que se tiene disponible en la EPSG. Un prototipo demasiado grande no permitiría trabajar en condiciones de campo lejano como se desea.

Como se tiene un modelo a escala, las frecuencias de trabajo se ven también afectadas. Como se desea un rango de trabajo en bajas frecuencias (aprox. entre 100 y 1000Hz), se consideró una escala 1:5 para que el prototipo fuera estudiado entre 500 y 5000Hz. Sin embargo, esta escala no se ajusta a las dimensiones de los materiales que se encuentran disponibles comercialmente. Por esta razón, la escala escogida fue 1:4,38 para ajustarse a los diámetros de los tubos disponibles.

La escala afecta a todas las dimensiones del difusor, tanto en diámetro, en longitud como en espesor. Por lo tanto, el tamaño final del prototipo del difusor a estudiar fue 0,54m de longitud y de altura.

El factor de llenado para este difusor está basado en la Fig. 25. La celda unitaria es cuadrada con dimensiones iguales a la distancia entre los centros de los cilindros.

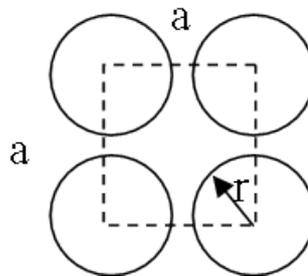


Fig. 25. Celda unitaria de la estructura cristalina del difusor

Por lo tanto, el factor de llenado para el prototipo escalado corresponde a la siguiente expresión:

$$F = \frac{r^2\pi}{a^2} = 0,62 \quad (11)$$

III.2. Construcción del prototipo

Ya teniendo definido el diseño y la escala del difusor, se procedió a la construcción del prototipo. Se optó por utilizar aluminio como material principal del difusor, debido a la disponibilidad comercial y a la facilidad constructiva. La Tabla 1 y la Fig. 26 muestran los materiales utilizados.

Materiales	Unidades
Tubos de aluminio 18,1cm de largo	360
Placas de aluminio 18,5cm x 1,0cm	36
Placas de aluminio 7,1cm x 1,0cm	198
Placas de aluminio 18,1cm x 1,0cm	54
Angulares de aluminio 1,0cm x 1,0cm x 0,5cm	72
Pegamento para montajes Fisher Monta Rapid	1
Tabla de madera 0,54cm x 0,54cm	2

Tabla 1. Materiales utilizados para la construcción del prototipo

Los tubos conforman los cilindros del difusor. Las placas de aluminio sirven para separar los tubos entre sí a la distancia de diseño. Los angulares sirven para estabilizar las placas de aluminio. Una tabla de madera sirve como parte posterior del difusor y la otra para comparar el efecto del difusor respecto a una superficie plana totalmente reflectante.



Fig. 26. Materiales utilizados para la construcción del prototipo

Para poder mantener los tubos separados entre sí de forma estable, se utilizaron las placas de aluminio y los angulares para hacer marcos con una retícula interior que conforman las posiciones de los tubos (Fig. 27). Inicialmente, se había considerado utilizar una placa de madera perforada, pero debido a la poca separación que existe entre los tubos, esto hubiera implicado perforaciones de mucha precisión y un material bastante rígido para evitar que se rompiese.

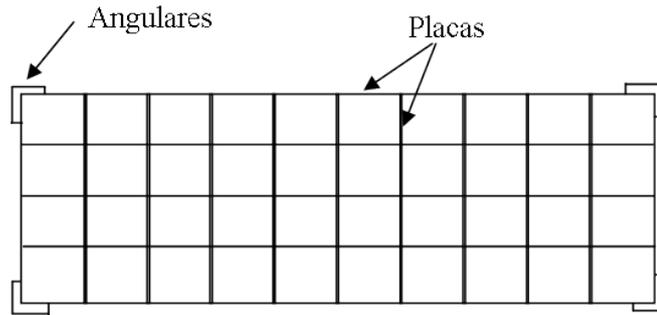


Fig. 27. Marcos con retícula para la separación de los tubos

Para mantener las placas en las posiciones necesarias, se utilizó pegamento transparente y los angulares en las esquinas para garantizar mayor estabilidad. La Fig. 28 muestra el proceso de fabricación de los marcos en el que se colocaron los tubos de forma temporal para mantener las separaciones adecuadas.



Fig. 28. Fabricación de los marcos para el guiado de los tubos

Una vez se encontraban secos y firmes los marcos, se colocaron todos los tubos de forma permanente (Fig. 29).

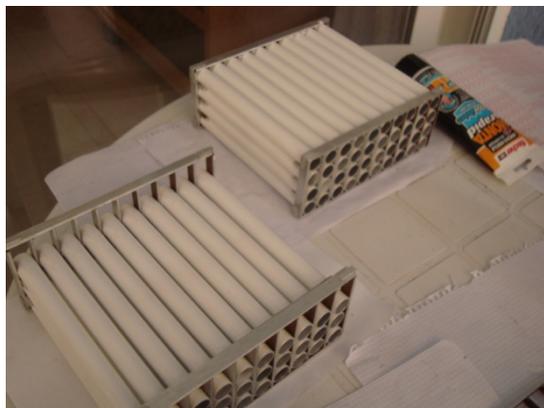


Fig. 29. Colocación de los tubos dentro de los marcos

Para asegurar que los tubos no se salieran de su posición y se mantuvieran alineados, se colocó un poco de pegamento transparente entre los tubos y los marcos, dejando libre la abertura de los tubos (Fig. 30).



Fig. 30. Alineación de los tubos y revisión de estabilidad

Una vez contruidos los nueve módulos, se procedió a pegarlos sobre una tabla de madera acorde a la distribución mostrada en la Fig.21 (Fig. 31).



Fig. 31. Colocación de los módulos en la plancha de madera

Para garantizar la estabilidad del mismo, se dejó un día completo sin moverlo para asegurarse que el pegamento estuviera totalmente seco. Las Fig. 32 y 33 muestran el difusor de estructura cristalina terminado.



Fig. 32. Difusor a escala terminado (vista isométrica)



Fig. 33. Difusor a escala terminado (vista frontal/superior)

Para comparar el efecto del difusor con una superficie totalmente reflectante, se utilizó la otra tabla de madera, la cual tiene exactamente las mismas dimensiones que la tabla posterior del difusor. Debido a que este difusor tiene como finalidad mejorar la acústica de un recinto, la tabla simulará la pared trasera donde se encuentre instalado el mismo.

III.3. Sistema y equipo de medición

Para poder realizar las mediciones necesarias para la caracterización del difusor se utilizó un ordenador tipo PC con procesador Pentium IV. Éste estaba dotado del sistema *Audiomatica CLIO*¹⁰, el cual cuenta con una tarjeta de sonido *HR-2000* de dos entradas y dos salidas de audio (Fig. 34). Una salida se utilizó para generar la señal, y una entrada para recibir la señal captada por el micrófono y poder procesarla.



Fig. 34. Interfase CLIO HR-2000

(Fuente: Audiomatica, 2004¹⁰)

El micrófono utilizado para captar la señal se muestra en la Fig.35. Se trata de un micrófono omnidireccional de condensador electret *MIC-01*. Este es un micrófono de gran precisión cuya respuesta en frecuencia es plana para todo el rango audible, entre 20Hz-20kHz (ver Anexos para las especificaciones técnicas).



Fig. 35. Micrófono omnidireccional electret Audiomatica MIC-01

(Fuente: Audiomatica, 2004¹⁰)

Para poder emitir la señal generada por el sistema CLIO, se utilizó un altavoz activo de dos vías marca *Behringer* modelo *B2031A Truth* (Fig. 36). Este altavoz tipo monitor tiene una respuesta en frecuencia plana entre 50Hz-21kHz.



Fig. 36. Altavoz activo Behringer B2031A Truth

Para poder realizar medidas con el micrófono en diferentes posiciones del espacio, se utilizó una pértiga de 2,15m de longitud anclada a una tornamesa (“giratutto”), la cual permite una rotación de 360° en pasos de 5°. El “giratutto” se montó sobre una base de madera y se colocó de forma vertical, ya que el difusor se colocaría de forma horizontal. Para no forzar el motor del “giratutto”, se colocaron contrapesos en la parte inferior de la pértiga (Fig. 37).



Fig. 37. Montaje de la pértiga al “giratutto”

El “giratutto” está dotado del software *Outline ET Commander XP*, el cual permite controlar a través de ordenador cada giro. La Fig. 38 muestra la interfaz gráfica del software para controlar los giros. En esta figura también se puede apreciar una ventana en la parte superior derecha, la cual es la señal captada por una cámara de video que sirve para controlar que los giros se estén realizando en la dirección correcta y que la pértiga se encuentre estabilizada luego de cada movimiento.

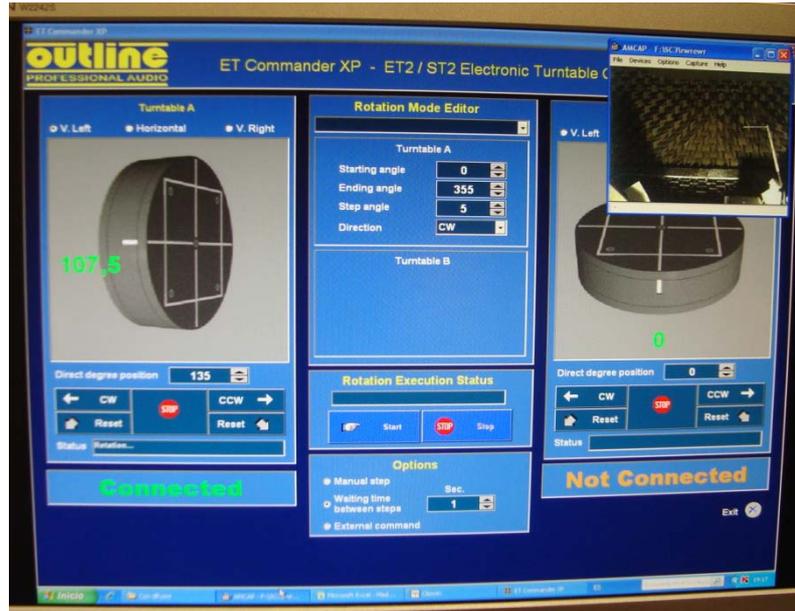


Fig. 38. Interfaz gráfica del control del “giratutto”

La Fig. 39 muestra un esquema del montaje del equipo de medición y las conexiones entre elementos. Como se aprecia en el esquema, el altavoz está suspendido en el techo y el difusor se encuentra de forma horizontal.

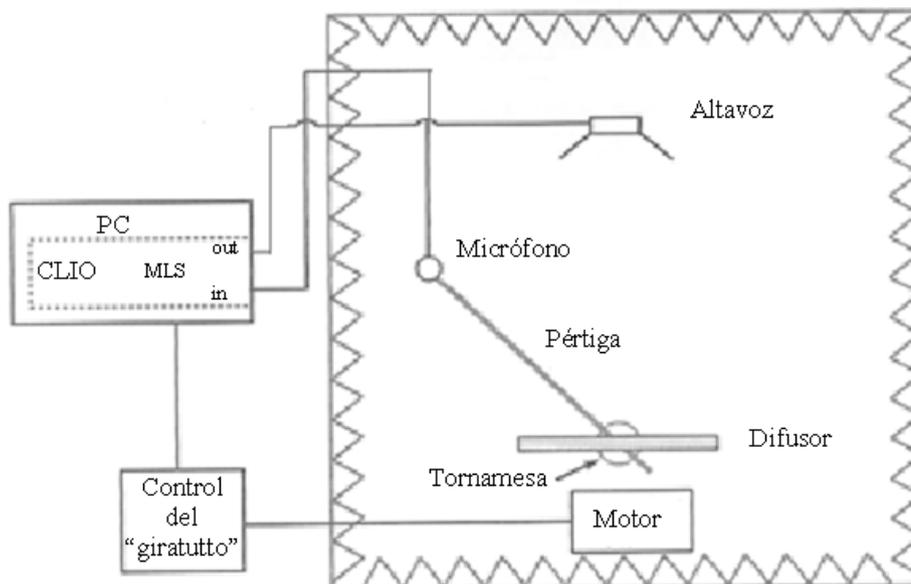


Fig. 39. Esquema del sistema de medición
(Fuente: modificación a esquema de Cox *et al*, 2009⁴)

III.4. Método de medición

El método de medición utilizado en este estudio está basado en la norma AES-4id-2001 (r2007)¹¹. Para ello fue necesario realizar las mediciones en la cámara anecoica de la Escuela Politécnica Superior de Gandía. El montaje del equipo y las distancias reales entre los elementos de medición se muestran en la Fig. 40.

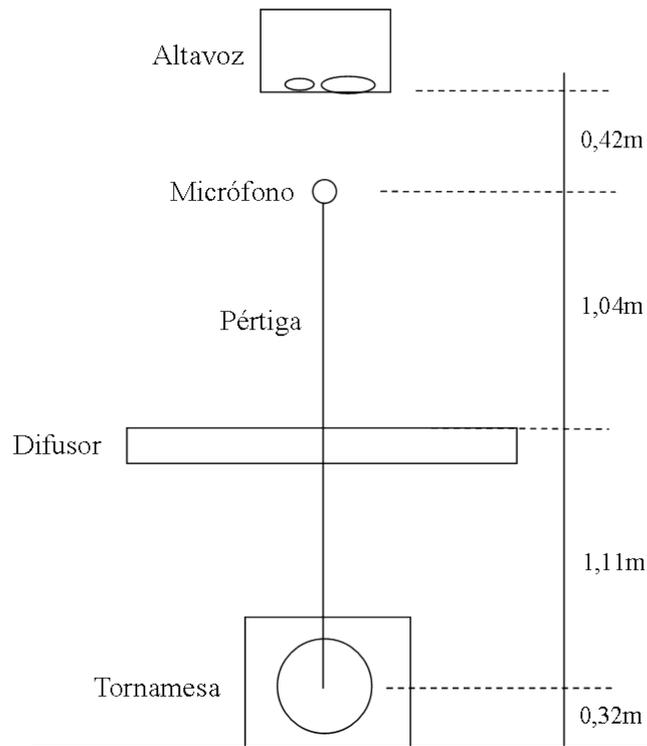


Fig. 40. Esquema del montaje del equipo en la cámara anecoica

Para poder obtener resultados válidos, fue necesario realizar muchas mediciones. A continuación se resume la metodología de las mediciones. Éstas se realizaron con dos posiciones de fuente, tanto para incidencia normal como para 45°:

- Con difusor
 - 0°
 - 45°
 - 90°
 - 135°
- Tabla (superficie reflectante)
 - 0°
 - 45°
- Sala vacía

En la Fig. 38 se muestran las diferentes posiciones en las que se midió el difusor.

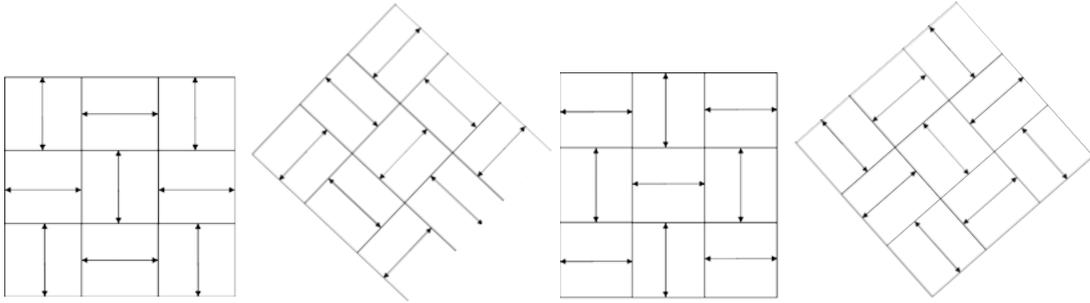


Fig. 41. Posiciones de medición del difusor (0° , 45° , 90° y 135° respectivamente)

Para cada serie de mediciones, se tomaron 37 medidas correspondientes a medio círculo (180°) dividido en pasos de 5° . Como esto se realizó para dos posiciones de fuente, se tomaron un total de 518 medidas.

Debido a que el difusor se colocó de forma horizontal, fue necesario colgar la fuente del techo de la cámara anecoica (Fig. 42). Todo el sistema de medición y la base sobre la que se colocó el difusor se cubrieron de material absorbente para evitar reflexiones indeseadas.

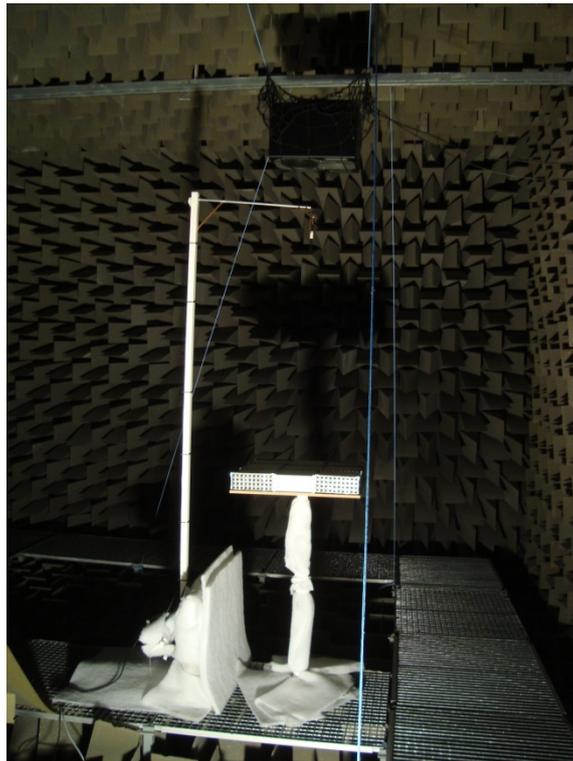


Fig. 42. Medición en posición 0° para incidencia normal

Para realizar las mediciones de todas las posiciones del difusor, únicamente fue necesario rotarlo sobre la base, manteniendo todo el sistema de medición en la misma posición (Fig. 43).

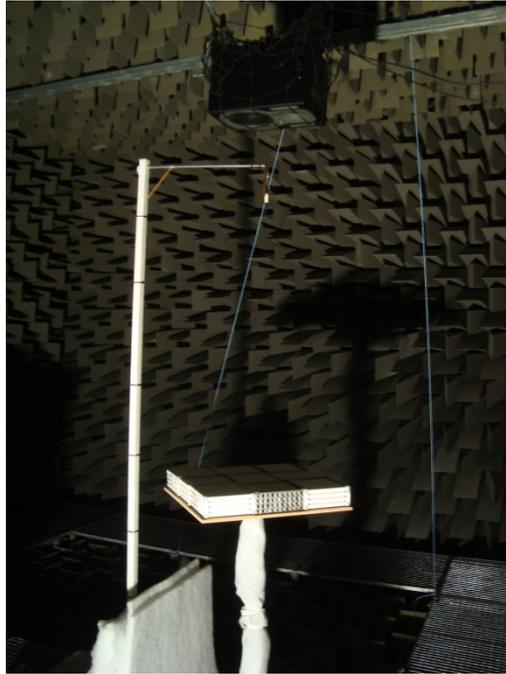


Fig. 43. Medición en posición 45° para incidencia normal

Luego de haber medido todas las posiciones del difusor ($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ y 135°), se procedió a medir la tabla. Esta medición es necesaria para poder realizar una comparación entre el difusor y una superficie reflectante en los resultados de la dispersión (Fig. 44). La tabla se midió en las posiciones 0° y 45° .

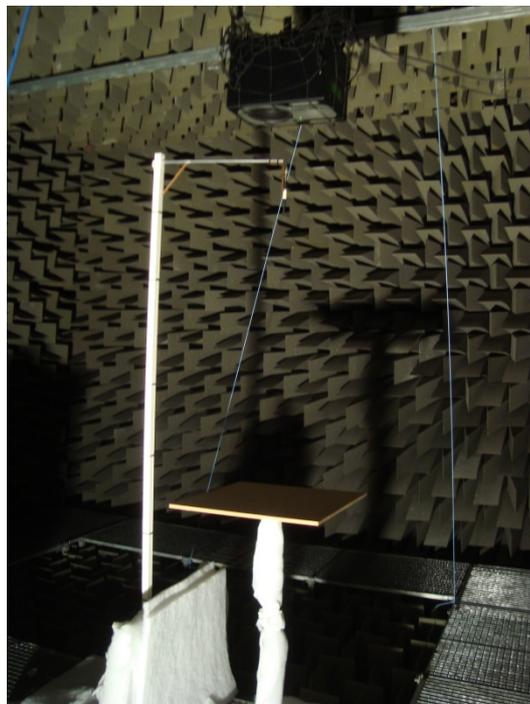


Fig. 44. Medición de la tabla en posición 0° para incidencia normal

Para evitar introducir los efectos de la sala en los resultados, es necesario realizar una serie de mediciones con la sala vacía (Fig. 45). Los resultados de estas medidas son restados posteriormente en el procesado de datos.



Fig. 45. Medida de la sala vacía para incidencia 45°

Para realizar las mediciones para incidencia de 45° fue necesario realizar el montaje mostrado en la Fig.46. Una vez colocado el altavoz en esta posición, se procedió a realizar las mismas series de medidas que se realizaron para incidencia normal.

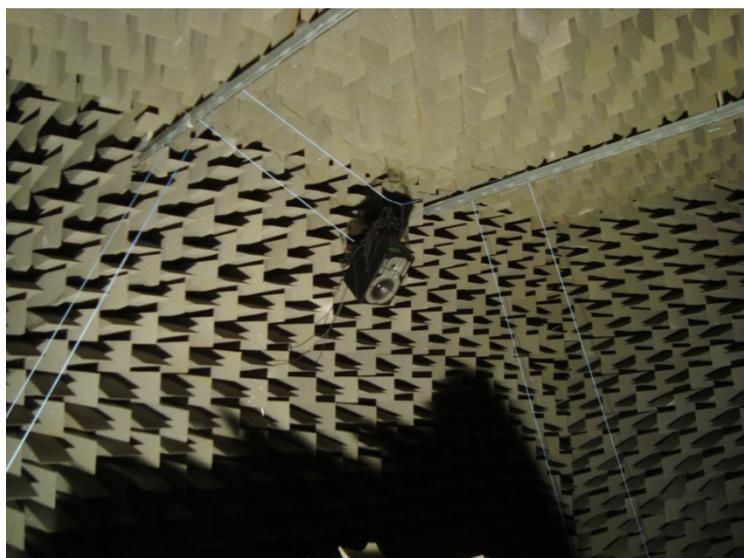


Fig. 46. Colocación del altavoz para incidencia 45°

Los resultados adquiridos de las mediciones son respuestas al impulso (presión en función del tiempo) obtenidas a través de utilización de señales *MLS* (Maximum Length Sequence). La Fig.47 muestra la interfaz gráfica del software de *CLIO* y una respuesta al impulso obtenida de las mediciones.

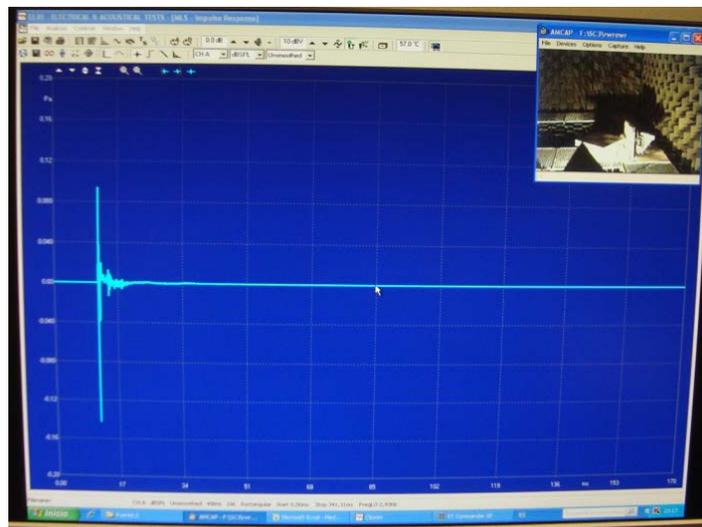


Fig. 47. Respuesta al impulso obtenida en las mediciones

IV. Resultados

Como se mencionó en la parte final del capítulo anterior, las señales utilizadas para realizar las medidas fueron $MLS^{3,12}$ (*Maximum Length Sequence*).

MLS es una técnica de medida de la respuesta impulsiva de un sistema lineal. Esta técnica es muy útil para determinar muchas características de un sistema acústico como la función de transferencia, respuesta en frecuencia, respuesta en fase, etc. A pesar de tener muchas propiedades del ruido blanco, la secuencia MLS es determinista y periódica. Determinista se refiere a que la señal puede ser computada y no necesita ser medida simultáneamente con la respuesta del sistema. Como se trata de una señal periódica no se incurre en errores al inventanar, ya que se puede utilizar un periodo entero de la secuencia al hacer la medida.

El sistema MLS tiene como ventajas su fácil implementación y cálculo rápido de la respuesta impulsiva de un sistema. Además, tiene una muy buena relación señal/ruido e inmunidad a interferencia y ruido de fondo.

La técnica MLS requiere una única señal de entrada y de salida. La señal de salida se trata de una secuencia pseudoaleatoria que consiste en una serie binaria de -1 y +1 con una longitud $L=2^N-1$, donde N es un número entero. La secuencia se genera con polinomios de orden N. La Fig.48 muestra un esquema de la obtención de la respuesta impulsiva de un sistema lineal mediante señales MLS.

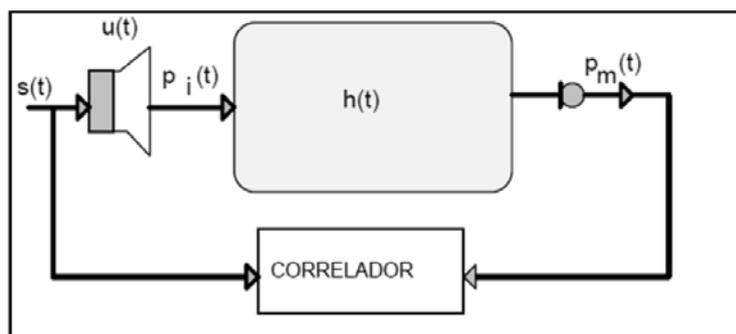


Fig. 48. Medida de respuesta impulsiva mediante señales MLS

(Fuente: Atanasio *et al.*, 2011³)

Para obtener la respuesta al impulso del sistema a través de este tipo de señales es necesaria una correlación cruzada entre la señal generada y la señal captada por el micrófono. Esta correlación cruzada corresponde a la deconvolución de la respuesta con la señal de entrada.

La Fig. 49 muestra un esquema con el flujo en la obtención de la respuesta al impulso mediante señales MLS. Este procedimiento lo realiza el sistema CLIO internamente y lo que se despliega en pantalla es la respuesta al impulso. Los datos a guardar por cada medición son de presión en función del tiempo. Para el presente estudio, se utilizó una señal MLS con una frecuencia de muestreo de 48kHz, de tamaño 16k, con enventanado rectangular y utilizando 5 promedios.



Fig. 49. Flujo de la obtención de la respuesta al impulso mediante señales MLS

Una vez obtenidas las respuestas al impulso para todas las configuraciones explicadas en la sección anterior se procedió a realizar el procesado de datos por medio del software MATLAB acorde al diagrama de flujo mostrado en la Fig.50 (los códigos utilizados se muestran en los Anexos).

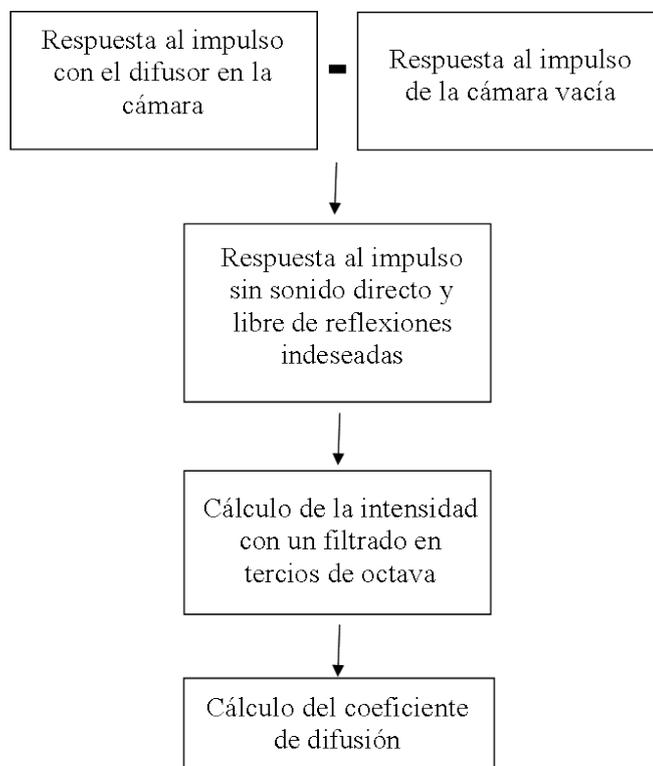


Fig. 50. Flujo del procesado mediante MATLAB

Para evitar las reflexiones indeseadas de la cámara anecoica debidas principalmente al tramex del suelo, a un robot para mediciones que se encuentra en la sala y al sistema de medición (pértiga, “giratutto”, base, etc.), es necesario restarle las medidas de la sala vacía a las medidas con el difusor y con la tabla, con el fin de dejar únicamente la respuesta al impulso sin sonido directo ni ruidos indeseados.

Luego se calcula la intensidad para cada ángulo de incidencia (para este estudio son incidencia normal y 45°) a través de un filtrado en tercios de octava entre 100Hz y 5kHz. Los valores de intensidad se deben introducir a la siguiente expresión para calcular el *coeficiente de difusión direccional*¹¹:

$$d_{\theta} = \frac{(\sum_{i=1}^n 10^{L_i/10})^2 - \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})^2} \quad (12)$$

donde L_i es el nivel de presión sonora (dB) y n el número de receptores (número de ángulos medidos). La ecuación (12) debe ser aplicada a las medidas del difusor y las de la tabla reflectante. El coeficiente de difusión está en un rango entre 0 y 1, donde 1 representa una difusión total del sonido. Los resultados para incidencia normal se muestran en la Fig. 51.

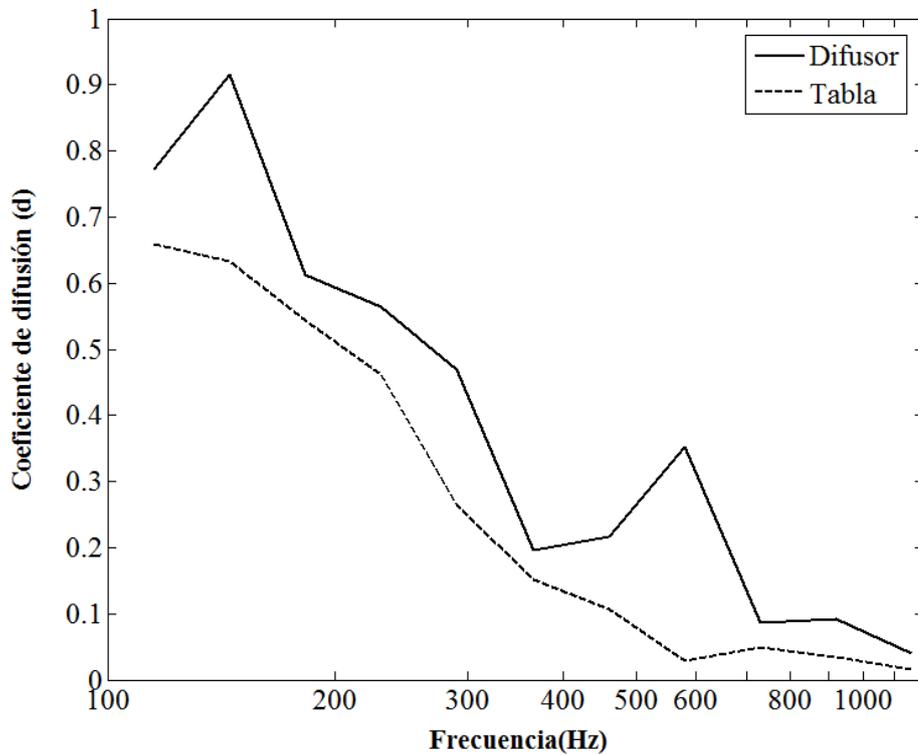


Fig. 51. Coeficiente de difusión para incidencia normal

Los resultados para incidencia a 45° se muestran en la Fig. 52.

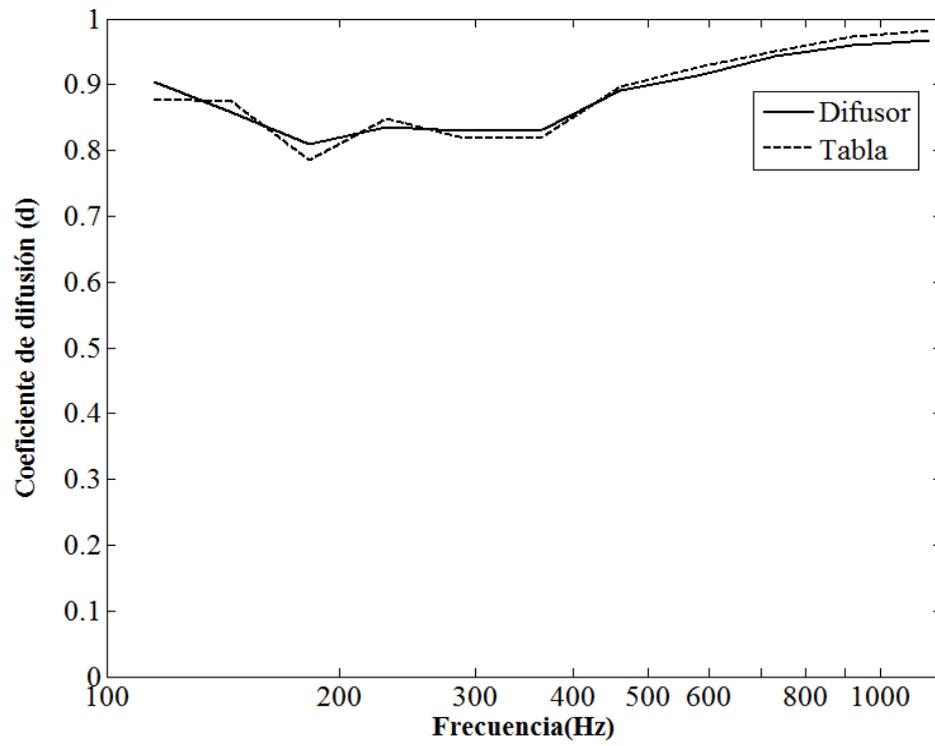


Fig. 52. Coeficiente de difusión para incidencia 45°

V. Conclusiones y líneas futuras de estudio

Analizando los resultados obtenidos para el coeficiente de difusión para incidencia normal (Fig. 51), se puede concluir que el difusor estudiado muestra un comportamiento satisfactorio para dos rangos de frecuencias: 100Hz-180Hz y 365Hz-730Hz, aproximadamente. Para el resto de frecuencias, las diferencias entre el difusor y la tabla no son tan significativas. En términos generales, se puede concluir que el difusor tiene un efecto positivo en la difusión del sonido entre 100Hz-730Hz pero con mayor efecto para los rangos mencionados anteriormente.

Los resultados del coeficiente de difusión para incidencia 45° (Fig. 52) no son satisfactorios y se consideran inválidos, ya que los valores son demasiado altos (muy cercanos a 1) y prácticamente no existe ninguna diferencia entre el efecto del difusor y el de la tabla. Es probable que la invalidez de estos resultados se deba a la gran distancia entre la fuente y el difusor para este ángulo de incidencia, lo cual hace que los efectos del difusor y/o de la tabla no sean percibidos de forma adecuada por el receptor. Debido a que estos resultados no son válidos, no se calculó el *coeficiente de difusión con incidencia aleatoria*¹¹, ya que éste requiere el promediado de ambas posiciones de fuente.

El procedimiento de medida se basó en la norma AES-4id-2001 (r2007)¹¹. Sin embargo, hubo condiciones de distancias mínimas (sección 4.2.3 de la norma) que no se cumplieron enteramente debido a la disponibilidad del equipo de laboratorio y a las dimensiones de la cámara anecoica donde se realizaron las medidas. En concreto, las condiciones 1) y 2) se cumplen parcialmente y la 3) no se cumple.

Para realizar las medidas con mayor precisión, es necesario minimizar los efectos de la sala y de los sistemas de medida. Esto requiere cubrir adecuadamente los materiales ajenos al estudio con buenos materiales absorbentes para evitar reflexiones de estos agentes externos.

El material utilizado para la construcción del prototipo fue aluminio. Éste se seleccionó con base en la disponibilidad comercial y la facilidad constructiva. Este material genera un peso bastante elevado el cual no es significativo en el modelo a escala. No obstante, para el difusor de tamaño real, este peso excesivo sí podría afectar en la estabilidad estructural y en el montaje del mismo. Para esto, se recomienda la consideración de otros materiales para los tubos, como podría ser el PVC (policloruro de vinilo).

Este estudio ha demostrado el efecto satisfactorio en la difusión de sonido por medio de difusores de estructura cristalina. La configuración utilizada en este prototipo no es única, lo cual

permite una continuación en la investigación de este tipo de estructuras como difusores de sonido. El diseño acústico de recintos continúa siendo de vital importancia y el estudio de difusores ha cobrado cada vez más relevancia debido a los efectos positivos que producen en las salas.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al director F. Javier Redondo Pastor por permitirme la participación en este proyecto de investigación de carácter tan innovador y por su continuo apoyo durante la realización del mismo.

Además, quisiera agradecer a Pedro Atanasio y a José Miguel Fuster por su trabajo *Diseño de un difusor de estructura cristalina*³, ya que éste sirvió de guía fundamental y de fuente de información para el presente trabajo. Asimismo, quisiera hacer un especial agradecimiento a Pedro Atanasio por su colaboración en la realización de las medidas y a José Miguel Fuster y a Alejandro de Frutos por su soporte adicional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Llinares *et al*, *Acústica Arquitectónica y Urbanística*. Valencia, España. Universidad Politécnica de Valencia. 2011.
- [2] H. Arau. *ABC de la Acústica Arquitectónica*. España. Grupo Editorial Ceac, S.A. 1999.
- [3] P. Atanasio, J.M. Fuster. *Diseño de un difusor de estructura cristalina*. Valencia, España. Trabajo Fin de Carrera. Universidad Politécnica de Valencia. 2011.
- [4] T.J. Cox, P. D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers. Theory, design and application*. New York, EEUU. Taylor and Francis Group. 2009.
- [5] P.A. Tipler, G. Mosca. *Física para la ciencia y la tecnología. Volumen 1B*. Barcelona, España. Editorial Reverté, S.A. 2005.
- [6] R. Chang. *Química*. México, D.F. McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. 2002.
- [7] L. Brillouin. *Wave propagation in periodic structures*. 1946.
- [8] Economou E.M *et al*. *Stop bands for elastic waves in periodic composite materials*. 1994.
- [9] Sigalas M.M. *et al*. *Band structure of elastic waves in two dimensional systems*. Solid State Communications. 1993.
- [10] Audiomática SRL. *CLIOwin. Electrical and acoustical measurement system*. Manual de Usuario. 2004.
- [11] AES. 2007. AES-4id-2001 (r2007). Information document for room acoustics and sound reinforcement systems – *Characterization and measurement of surface scattering uniformity*.
- [12] J. Vanderkooy, D. Rife. *Transfer-Function Measurement with Maximum-Length Sequences*, J. Audio Engineering. Society., vol. 37, no. 6, pp. 419-444 (Jun. 1989)
- [13] A. Carrión. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universidad Politécnica de Catalunya. Barcelona. 1998.
- [14] ISO. 2002. ISO/DIS 17497-1. *Measurement of sound scattering properties of surfaces*.

ANEXOS

Códigos de Matlab***Coefficiente de difusión con incidencia normal***

```

clear all
close all
clc

%Inicialización
inicio=330;
fin=800;
anguloinicio=8;
angulofin=30;
nangulos=angulofin-anguloinicio+1;

difusor=zeros(2000,nangulos*4);
tabla=zeros(2000,nangulos*2);

%Carga de archivos con las medidas
load difusor11
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,1:nangulos)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load difusor12
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load difusor13
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos*2)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load difusor14
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos*3)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load tablal1
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
tabla(inicio:fin,(1:nangulos))=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

```

```
load tabla12
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio],'r');
colorbar;pause(1);
close
tabla(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos*1)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);
tabla(:,6)=tabla(:,5);

load nadal
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio],'r');
colorbar;drawnow;pause(1);
close all
pause(.1)
clc

%Filtro en tercios de octava
disp('Filtrando')

for ii=1:nangulos*4
    intensidaddifusor(:,ii)=(tercios(difusor(:,ii),48000)).';
end
disp('Sigo filtrando')
for ii=1:nangulos*2
    intensidadtabla(:,ii)=(tercios(tabla(:,ii),48000)).';
end

%Cálculo del coeficiente de difusión (d)
disp('Calculando d')
for ii=1:18
    ddifusor(ii)=(( sum(intensidaddifusor(ii,:)).^2)-
sum(intensidaddifusor(ii,:).^2))/((nangulos*4-
1)*sum(intensidaddifusor(ii,:).^2));
    dtabla(ii)=(( sum(intensidadtabla(ii,:)).^2)-
sum(intensidadtabla(ii,:).^2))/((nangulos*2-1)*sum(intensidadtabla(ii,:).^2));
end

%Despliegue de resultados sin aplicación de la escala
semilogx(100*2.^((0:17)/3),ddifusor,100*2.^((0:17)/3),dtabla)
legend('Difusor','Tabla')
axis([100 5000 0 1])
ylabel('Coeficiente de difusión (d)')
xlabel('Frecuencia(Hz)')

%Despliegue de resultados finales con aplicación de la escala 1:4.38
figure;
semilogx(1/4.38*100*2.^((7:17)/3),ddifusor(8:end),'k',1/4.38*100*2.^((7:17)/3),dt
abla(8:end),'--k')
legend('Difusor','Tabla')
axis([100 1200 0 1])
ylabel('Coeficiente de difusión (d)')
xlabel('Frecuencia(Hz)')
```

Coefficiente de difusión con incidencia 45°

```

clear all
close all
clc

%Inicialización
inicio=475;
fin=900;
anguloinicio=10;
angulofin=28;
nangulos=angulofin-anguloinicio+1;

difusor=zeros(2000,nangulos*4);
tabla=zeros(2000,nangulos*2);

%Carga de archivos con las medidas
load difusor21
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,1:nangulos)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load difusor22
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load difusor23
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos*2)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load difusor24
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
difusor(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos*3)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load tabla21
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio], 'r');
colorbar;pause(1);
close
tabla(inicio:fin,(1:nangulos))=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);

load tabla22
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
hold on

```

```
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio],'r');
colorbar;pause(1);
close
tabla(inicio:fin,(1:nangulos)+nangulos*1)=y(inicio:fin,anguloinicio:angulofin);
tabla(:,6)=tabla(:,5);

load nada2
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.00001)));shading flat;
hold on
plot([anguloinicio angulofin angulofin anguloinicio anguloinicio],[inicio inicio
fin fin inicio],'r');
colorbar;drawnow;pause(1);
close all
pause(.1)
clc

%Filtro en tercios de octava
disp('Filtrando')

for ii=1:nangulos*4
    intensidaddifusor(:,ii)=(tercios(difusor(:,ii),48000)).';
end
disp('Sigo filtrando')
for ii=1:nangulos*2
    intensidadtabla(:,ii)=(tercios(tabla(:,ii),48000)).';
end

%Cálculo del coeficiente de difusión (d)
disp('Calculando d')
for ii=1:18
    ddifusor(ii)=(( sum(intensidaddifusor(ii,:)).^2)-
sum(intensidaddifusor(ii,:).^2))/((nangulos*4-
1)*sum(intensidaddifusor(ii,:).^2));
    dtabla(ii)=(( sum(intensidadtabla(ii,:)).^2)-
sum(intensidadtabla(ii,:).^2))/((nangulos*2-1)*sum(intensidadtabla(ii,:).^2));
end

%Despliegue de resultados sin aplicación de la escala
semilogx(100*2.^((0:17)/3),ddifusor,100*2.^((0:17)/3),dtabla)
legend('Difusor','Tabla')
axis([100 5000 0 1])
ylabel('Coeficiente de difusión (d)')
xlabel('Frecuencia(Hz)')

%Despliegue de resultados finales con aplicación de la escala 1:4.38
figure;
semilogx(1/4.38*100*2.^((7:17)/3),ddifusor(8:end),'k',1/4.38*100*2.^((7:17)/3),dt
abla(8:end),'--k')
legend('Difusor','Tabla')
axis([100 1200 0 1])
ylabel('Coeficiente de difusión (d)')
xlabel('Frecuencia(Hz)')
```

Filtro en tercios de octava

```
function SPL=tercios(x,fs)

fftx=abs(fft(x));
n=length(x);
fftx=fftx(1:n/2);
f=(0:n/2-1)/n*fs;

ftercios=round(1000*2.^((-10:7)/3));

for ii=1:18
    SPL(ii)=10*log10(sum(fftx(find((f>ftercios(ii)*2.^-
(1/6)).*(f<ftercios(ii)*2.^+(1/6))))).^2));
end
return
figure
semilogx(ftercios,SPL)
```

Código para lectura de archivos con las medidas

```
function leer(previo,name)

angulos=(-90:5:90);
for jj= 1:length(angulos)
    nombre=[previo num2str(angulos(jj)) '.txt'];
    %disp(nombre);
    fid =fopen(nombre);
    tline = fgetl(fid);
    for ii=1:1000;
        x = fgetl(fid);
        x(find(x==' '))='.';
        x=str2num(x);

        y(ii,jj)=x(2);
    end
    fclose(fid);
end
save( name, 'y')

close all

return
```

Lectura de archivos

```
close all
leer('.\condifusor\fuentel\45\','difusor11');
leer('.\condifusor\fuentel\45-90\','difusor12');
leer('.\condifusor\fuentel\recto\','difusor13');
leer('.\condifusor\fuentel\recto90\','difusor14');
leer('.\condifusor\fuentes2\45\','difusor21');
leer('.\condifusor\fuentes2\45-90\','difusor22');
leer('.\condifusor\fuentes2\recto\','difusor23');
leer('.\condifusor\fuentes2\recto90\','difusor24');

leer('.\contabla\fuentel\45\','tabla11');
leer('.\contabla\fuentel\recto\','tabla12');

leer('.\contabla\fuentes2\45\','tabla21');
leer('.\contabla\fuentes2\recto\','tabla22');

leer('.\salavacia\fuentel\','nada1');
```

```
leer('.\salavacia\fuentes2\' , 'nada2');

close all
load difusor11
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor12
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor13
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor14
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor21
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor22
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor23
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load difusor24
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;

load tabla11
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load tabla12
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;

load tabla21
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;
load tabla22
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;

load nada1
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;

load nada2
figure;pcolor(10*log10(max(y.^2,.000001)));shading flat;

return
```

CLIO

ELECTRICAL & ACOUSTICAL TESTS

MICROPHONES

MIC-01

MIC-02

MIC-03



■ PRODUCT DESCRIPTION

MIC-01, MIC-02 and MIC-03 are low cost precision condenser electret microphones perfectly suited for laboratory and on-field acoustical measurements. They have identical performances but differ for their physical size; MIC-01 is preferable for fixed laboratory installations while MIC-02 is highly manageable due to its shorter length; MIC-03 is the best where space saving is a must. Their frequency response is individually tested against specifications and the sensitivity value is supplied. MIC-01, MIC-02 and MIC-03 can be directly connected to your CLIO system's input. The microphone can be supplied with its standard accessories or in the Lite version i.e. without accessories. It is possible to obtain individual frequency calibration data.

■ TECHNICAL SPECIFICATIONS

■ MIC-01, MIC-02 & MIC-03

Type: Condenser Electret
Accuracy (direct field): ± 1 dB 20Hz÷10KHz,
 ± 2 dB 10÷20KHz
Maximum level: 130 dB SPL
Sensitivity (average): 28mV/Pa

■ MIC-01
Dimensions: 8mm diameter, 25 cm long

■ MIC-02
Dimensions: 8mm diameter, 12 cm long

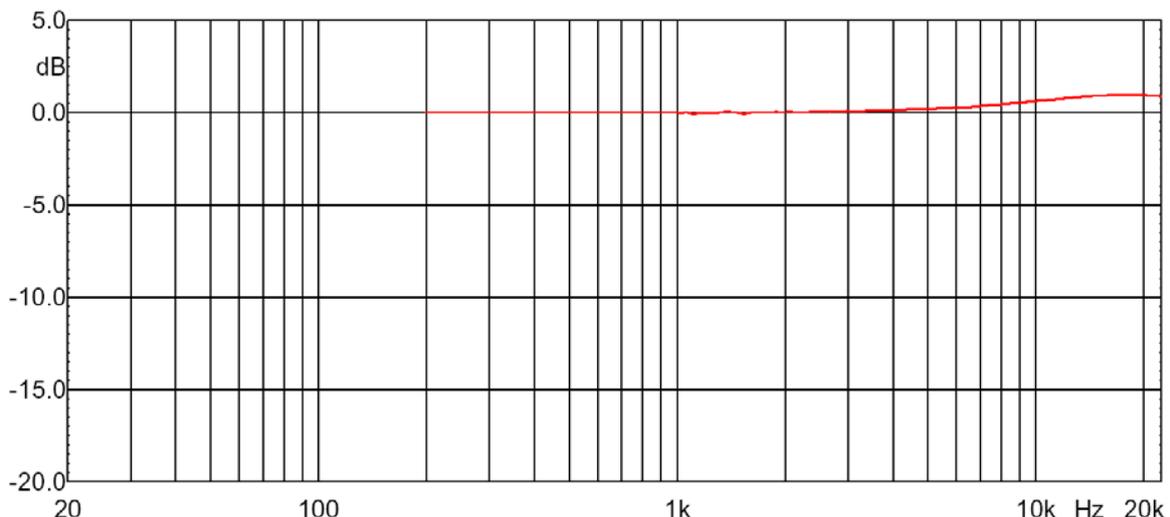
■ MIC-03
Dimensions: 8mm diameter, 7 cm long

■ POWER SUPPLY

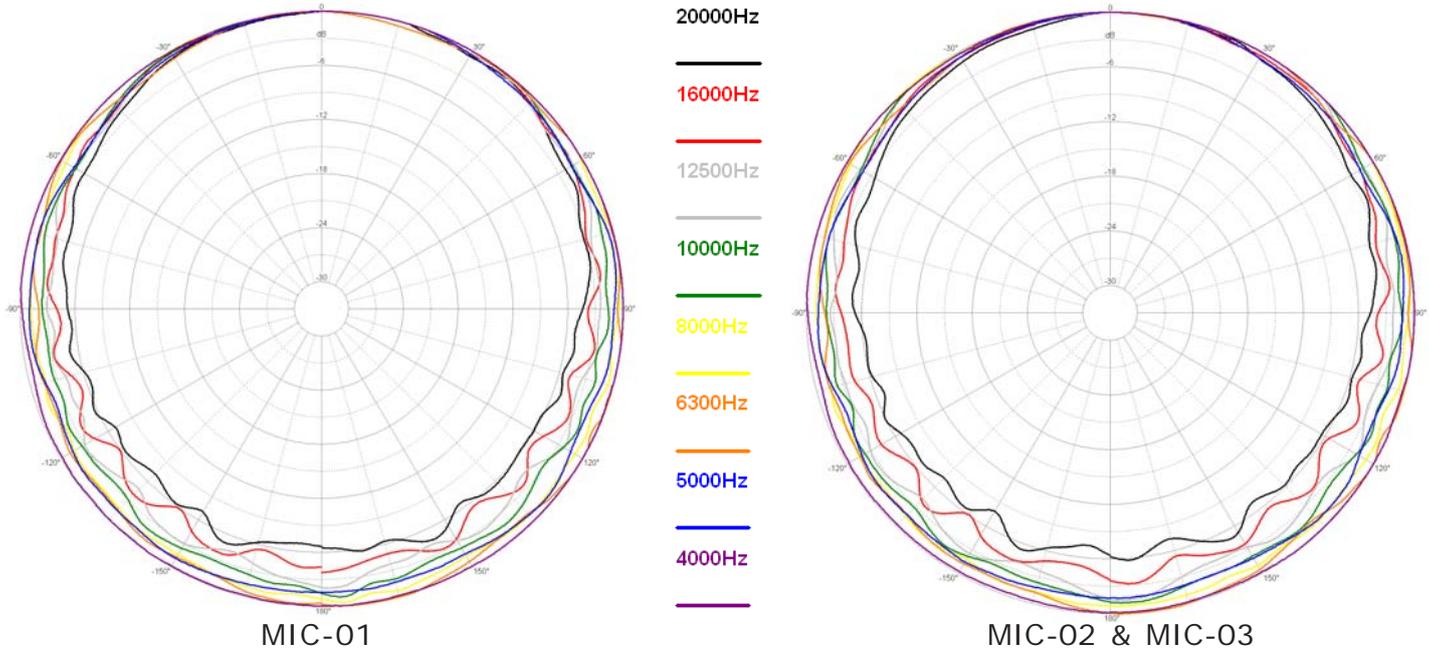
Voltage: 8.2V

Impedance: 5.6kOhm

■ TYPICAL FREQUENCY RESPONSE



■ POLAR RESPONSE



■ STANDARD ACCESSORIES

The microphone comes with the following accessories:
 Cable (2.7m)
 Stand adaptor
 Wooden case



■ MICROPHONE VERSION LITE

The version Lite of the microphone is without the standard accessories



■ FREQUENCY CALIBRATION CHART AND DATA

Calibration data (on disk) and chart are available upon request.



Serial No:
Sensitivity:

**Free-field Microphone
Type MIC 01**

Calibration Chart

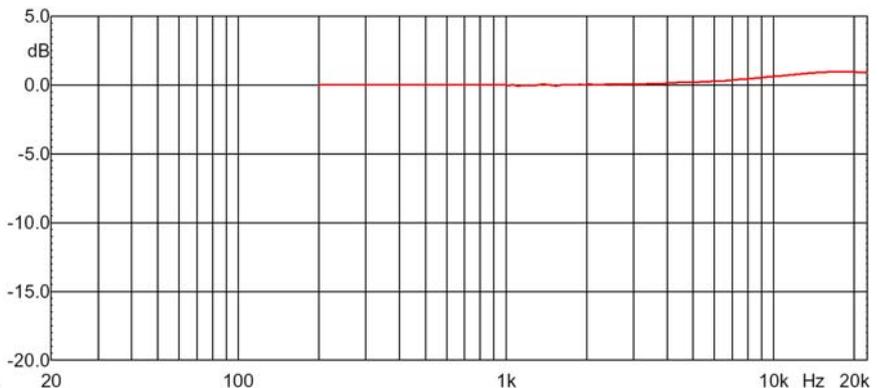
AU0201086
-34.6 dB re 1V/Pa
18.58 mV/Pa

Valid at:
 Temperature: 25 °C
 Ambient Static Pressure: 101.0 kPa
 Relative Humidity: 50 %
 Frequency: 1000 Hz
 Polarization Conditions: 8.2-5.6 V-KOhm

Reference Instruments:

MANUF.	MODEL	SERIAL NO	CALIB. DATE
HP	3468A	2137A09681	20-06-2002
LARSON DAVIS	812	416	10-05-2002
B&K	4231	1759543	10-05-2002
B&K	4939	2345912	05-03-2002

Date: 06/07/02 Certificate NO: 9206 Signature : M.J.



Turns your PC into the most complete easy-to-use electrical and acoustical measurement system



VIA MANFREDI 12-50136 FIRENZE-ITALY
 TEL : +39-0556599036 - FAX : +39-0556503772
 E-MAIL: info@audiomatica.com
 WEB: www.audiomatica.com, www.cliwin.com