

## **ESTUDIO SOBRE LA CARACTERIZACIÓN DE LA DIFUSIÓN ACÚSTICA**

REFERENCIA PACS: 43.55.Br

Ivana Rossell Turull, Sergi Soler Rocasalbas  
Departament d'Acústica, Enginyeria La Salle, Universitat Ramon Llull  
Pg Bonanova, 8  
08022 Barcelona. España  
Tel: 34 932 902 400 (ext. 202)  
Fax: 34 932 902 416  
E-Mail: ivana@salleurl.edu

### **ABSTRACT**

The last years have seen a vast increase in knowledge concerning the application and design of sound diffusors used in architectural acoustics. An ability to predict, measure, quantify, and optimize the scattering from surfaces is been developed in order to get accuracy in simulated situations and in prediction for real ones.

### **RESUMEN**

El fenómeno de la difusión del campo sonoro, imprescindible en la mayoría de los diseños acústicos, es uno de los más difíciles de predecir y cuantificar con precisión. La era de las simulaciones por ordenador supone la demanda de un "coeficiente de difusión" aplicable a cualquier material. Así, se despierta el interés por cuantificar este fenómeno y su relación con parámetros como el tiempo de reverberación o la inteligibilidad.

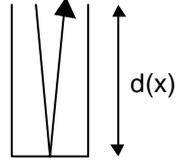
La idea de un coeficiente de difusión único parece, en principio, una simplificación demasiado basta del problema, pero permite la simulación con poco cómputo y por el momento parece ser la tendencia generalizada.

### **INTRODUCCIÓN TEÓRICA**

La teoría más influyente sobre la difusión acústica es la del investigador alemán Manfred R. Schroeder. Esta teoría permite diseñar estructuras altamente difusoras del sonido en un intervalo de frecuencias, y su eficacia se acostumbra a medir y representar por diagramas polares.

Las estructuras difusoras de Schroeder consisten en un conjunto de rendijas o ranuras de igual amplitud y diferente profundidad, siguiendo series numéricas que tienden a uniformizar la respuesta polar. Esta respuesta se puede predecir a partir del retardo que crea cada rendija utilizando la teoría de Fraunhofer de campo lejano.

El retardo que introduce cada ranura se puede expresar como:



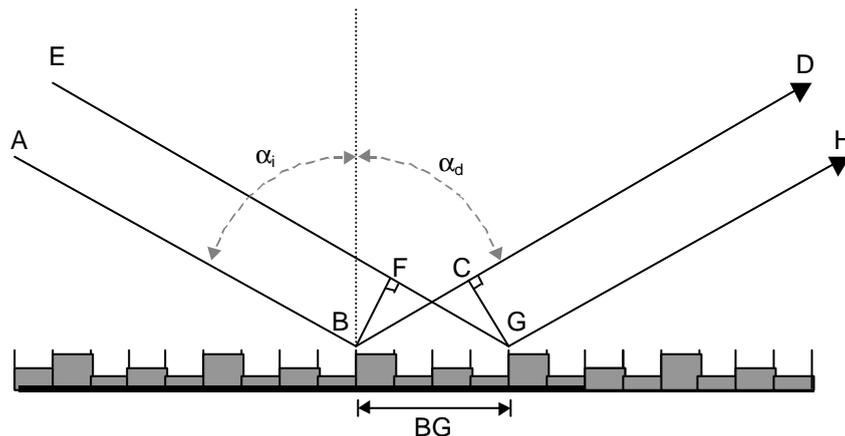
$$r(x) = e^{j2p \frac{d(x)}{l}}$$

Donde  $d(x)$  es la profundidad de la ranura que hay en  $x$ . Estas profundidades son las que siguen la serie numérica  $S_n$ :

$$d(x)|_n = dn = \frac{S_n \cdot I_0}{2 \cdot N}$$

Así pues, de cada ranura sale un frente de onda con una fase que nosotros podemos controlar y que se interferirá con los frentes de onda del resto de ranuras. En algunas direcciones, la interferencia es constructiva, dándose así el fenómeno conocido como difracción.

Con la teoría de campo lejano de Fraunhofer podemos calcular la amplitud de la dispersión ( $\mathbf{a}(\mathbf{s})$ ) en función de la magnitud del vector de dispersión  $\mathbf{s}$  que contiene información del ángulo incidente y del de difracción:



La diferencia de caminos que tendremos entre los dos frentes de onda es  $BC-FG$  y lo podemos calcular como:

$$\begin{aligned} \sin \alpha_i &= FG/BG \Rightarrow FG = BG \cdot \sin \alpha_i \\ \sin \alpha_d &= BC/BG \Rightarrow BC = BG \cdot \sin \alpha_d \\ \Rightarrow BC-FG &= BC \cdot (\sin \alpha_d - \sin \alpha_i) \end{aligned}$$

Así pues, en el difusor, el retardo ocasionado es:

$$e^{j \frac{2p}{l} (\sin \alpha_d - \sin \alpha_i) \cdot x}$$

Y definiendo el vector de dispersión como:

$$s = \frac{2p}{l} (\sin \alpha_d - \sin \alpha_i)$$

la amplitud de la dispersión nos queda:

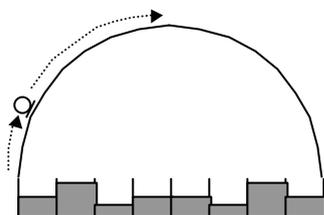
$$a(s) = \frac{1}{L} \int_0^L r(x) \cdot e^{j \cdot s \cdot x} \cdot dx$$

que no deja de ser la Transformada de Fourier de  $r(x)$ , que a su vez, es proporcional a la secuencia exponenciada. Por esto interesa que esta secuencia transforme en una constante en magnitud. Con ello conseguiremos un patrón de difracción uniforme.

La expresión del patrón de difracción es fácilmente programable aproximando la integral y trabajando en el dominio discreto:

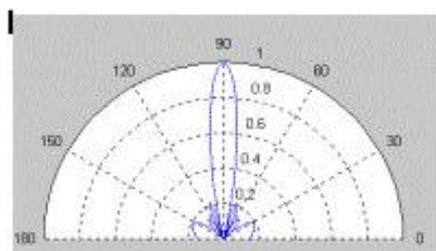
Esto nos permite simular este patrón en un diagrama polar. Este diagrama polar también se puede medir moviendo una sonda intensimétrica a lo largo del semicírculo frontal del difusor, obteniendo para cada punto la intensidad de la reflexión en esa dirección:

$$|S(x)| = \frac{1}{N_x} \sqrt{\left[ \sum_{k=1}^{N_x} \cos\left(sx - 4p \frac{d_k(x)}{I}\right) \right]^2 + \left[ \sum_{k=1}^{N_x} \sin\left(sx - 4p \frac{d_k(x)}{I}\right) \right]^2}$$

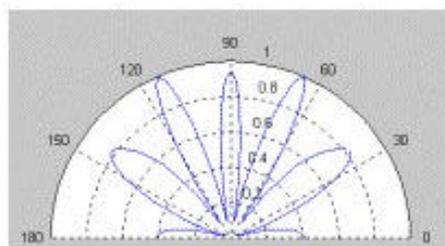


Para conseguir un diagrama polar correcto el número de puntos medidos ha de ser elevado, con esto tendremos la intensidad de la mayor parte de las reflexiones. Entre ellas hay que poder diferenciar la reflexión especular (siguiendo la Ley de Snell) del resto de reflexiones puesto que de la difusión depende la cantidad de energía que contiene cada una de ellas.

Así pues, una superficie con poca difusión reflejará mucha energía en la dirección especular y poca en el resto. El caso contrario será una superficie difusora que repartirá la energía entre las diferentes reflexiones.



- Superficie poco difusora



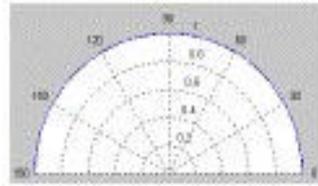
- Superficie difusora

El patrón de difracción podría expresarse en forma polinómica o en una matriz, pero de todas formas la cantidad de información que contendría sería excesiva para cualquier simulador. Además, hay que tener en cuenta que este patrón cambia según los materiales que rodean al difusor.

Por esta razón, a partir de estos diagramas polares se define un primer coeficiente llamado coeficiente de uniformidad de difusión. Este coeficiente es un único valor numérico que evalúa la uniformidad de la difusión y sigue la fórmula:

$$d_{uc} = \frac{\left( \sum_j I_j \right)^2 - \sum_j (I_j)^2}{(N-1) \cdot \left( \sum I_j \right)}$$

El coeficiente de uniformidad normalmente se evalúa para cada banda de frecuencia y su valor varía de 0 a 1, siendo 0 en superficies poco difusoras y 1 en superficies con difusión totalmente uniforme:



$$\Rightarrow \delta_{uc}=1$$

La naturaleza de este coeficiente lo hace apto para comparar difusores entre sí, nos da una idea cualitativa de la calidad de la difusión, pero no de cómo se distribuye la energía en las reflexiones. Por este motivo el coeficiente de uniformidad de difusión no es válido en los programas de simulación acústica de recintos.

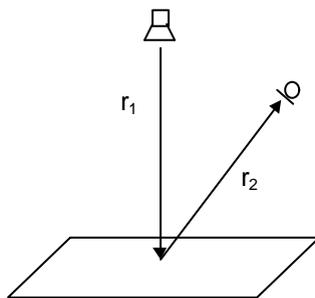
En la simulación acústica se tiende a introducir un coeficiente mucho más adecuado definido empíricamente como:

$$\delta = \frac{\text{Energía reflejada en direcciones no difusas}}{\text{Energía total radiada}}$$

Así pues, si un difusor refleja el 75% de la energía en su dirección especular y el 25% en otras direcciones, decimos que tiene coeficiente energético de difusión  $\delta=0,25$  y denota un comportamiento claramente especular.

Este coeficiente contiene información de cuánta energía se difunde pero no de cómo se reparte entre las diferentes direcciones no especulares. Una aproximación aceptable es suponer que la energía de las direcciones no difusas se distribuye uniformemente en todas sus direcciones.

Como ejemplo de utilización del coeficiente energético de difusión podemos suponer que excitamos un difusor con una fuente omnidireccional situada frontalmente a  $r_1$  metros de éste. La intensidad en las direcciones no especulares será:



$$I_{dif} = W_{inc} \cdot \frac{d}{2 \cdot p \cdot r_2^2} = \frac{W \cdot S_{dif}}{4 \cdot p \cdot r_1^2} \cdot \frac{d}{2 \cdot p \cdot r_2^2}$$

$$I_{esp} = \frac{W \cdot (1-d)}{4 \cdot p \cdot (r_1 + r_2)^2}$$

y en la dirección especular:

Hasta ahora únicamente hemos trabajado con las amplitudes de las reflexiones, y en todo caso, hemos mirado los retardos producidos en el difusor para saber en qué dirección tenemos interferencias constructivas. Experimentalmente hemos podido medir que para una misma dirección no especular, la reflexión de una estructura RPG va retrasada respecto a la de una estructura no difusora. Esto, sumado a que la contribución en el TR60 de la sala es mayor debido a que tiene mayor amplitud, confirma que el tiempo de reverberación incrementará con los difusores RPG.

Las medidas Energía-Tiempo nos muestran que la reflexión del difusor es de mayor amplitud y que además de estar retrasada su duración temporal es mayor.

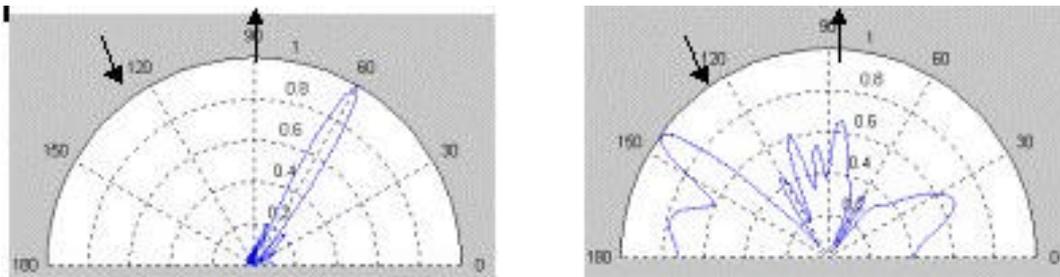
Otro factor a tener en cuenta es que la difracción se produce de forma diferente en cada frecuencia. Matemáticamente es análogo a atenuar por diferente todos los coeficientes de la transformada de Fourier, o lo que es lo mismo, desfigurar completamente la señal temporal. Esto se traduce en una bajada de la correlación cruzada entre diferentes reflexiones y puede ser interesante para disminuir la coherencia interaural en recintos donde interese. Ya estamos estudiando la correlación entre diferentes reflexiones y el siguiente paso será relacionar estos efectos con el coeficiente energético de difusión,  $\delta$ .

### MEDIDAS REALIZADAS

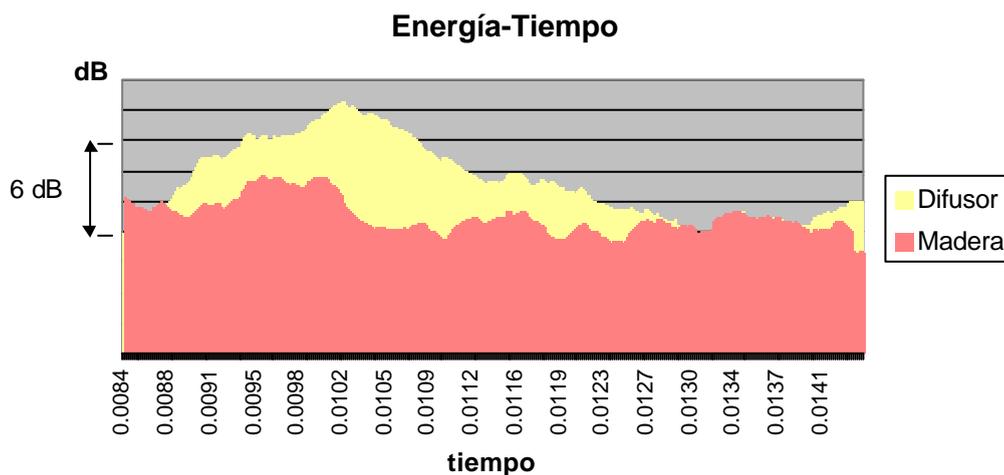
La primera medida Energía-Tiempo se hizo generando un tono burst y midiendo su energía una vez reflejado en el difusor y en la madera lisa. Esta medida se hizo sobre la reflexión normal a la superficie y situando la fuente a un ángulo de  $\pi/6$  radianes de ésta.

Las superficies utilizadas son una madera plana y un difusor RPG que sigue una secuencia QR23, ambas de 83'5 por 135'5 cm.

La simulación del patrón de difracción a 2KHz para cada caso resulta:

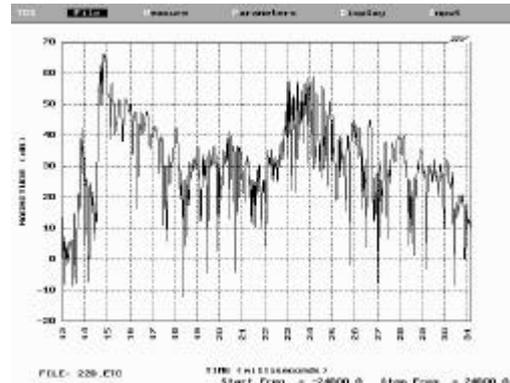
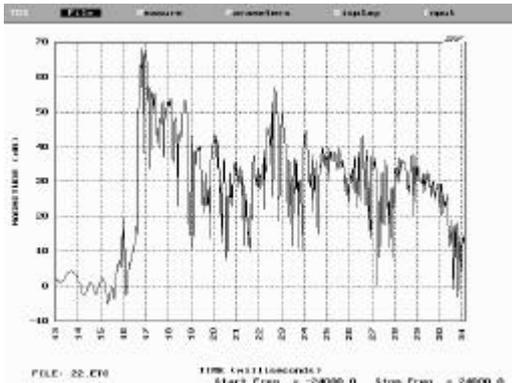
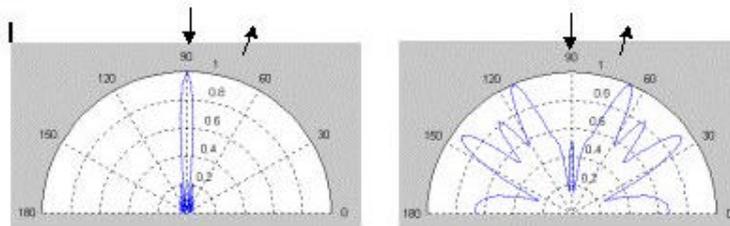


(nota: En la simulación hemos normalizado el eje radial para su mejor visualización.)



La siguiente medida se hizo con un *TEF 20 System*, utilizando el mismo difusor y la misma madera. Esta vez situamos el altavoz frontalmente al difusor y el micrófono a  $22^\circ$  del eje normal en cámara anecoica.

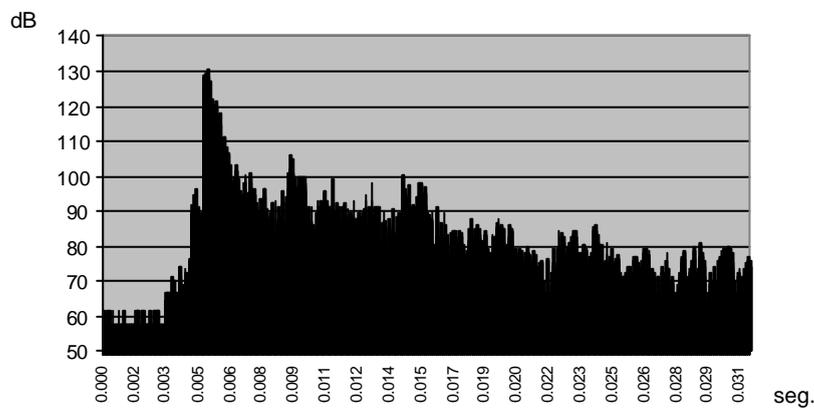
Los patrones de difracción teóricos a 2KHz son y los resultados son:



- Madera plana (22°)

- Difusor QR23 (22°)

Actualmente estamos trabajando con medidas con señales de corta duración (pistola de fuego). Estas señales, además de ser altamente impulsionales, nos permiten alcanzar niveles energéticos de hasta 130dB<sub>SPL</sub> en ambiente anecoico.



- Señal impulsional generada con un petardo.

Seguimos trabajando sobre este tipo de experimentos, aplicándolos a los difusores y estudiando la manera de conseguir una medida con suficiente información para poder extraer de ella los muchos parámetros que esconde el fenómeno de la difusión acústica.

## BIBLIOGRAFÍA

The Reflection Phase Grating Diffusor: Design Theory and Application.  
Peter D'Antonio and John H. Kinnert

J.Audio Eng. Soc., Vol 32, No. 4, 1984 April

Measurement of Sound Scattering Properties of Diffusing Panels through the Wave Fields Synthesis Approach.

Angelo Farina, Michele Zanolin and Elisa Crema

The 108<sup>th</sup> Convention 2000, Paris. Audio Engineering Society preprint.

Binaural dissimilarity and optimum ceiling for concert halls: More lateral diffusion.

Schroeder, M.R.

J.Audio Eng. Soc., Vol 65, No. 4, 1979

[www3.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/AUDIO.html](http://www3.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/AUDIO.html)