

SOBRE EL RENDIMIENTO DE DIFUSORES DE SONIDO BASADOS EN CRISTALES DE SONIDO

PACS: 43.55.+p , 43.55 Br, 43.55 Ka

J. Redondo¹, J.V. Sánchez-Pérez², J. Barreiro¹, Iluminada Pérez³

¹Instituto para la Gestión integral de Zonas Costeras.

Universitat Politècnica de València. Campus de Gandía. C. Paranimf, 1. Grao Gandía (Spain)

E-mail: fredondo@fis.upv.es

²Centro de Tecnologías Físicas: Acústica, Materiales y Astrofísica.

Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. Valencia (Spain)

³Dpto. de Comunicación Audiovisual, Documentación e Historia del Arte

Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n. Valencia (Spain)

ABSTRACT

The theory of periodic structures gave rise to the invention of sound diffusers about 40 years ago. However it is only recently that some authors have noted the possible application of a special kind of periodic structure, called Sonic Crystal, as sound diffusers. This paper explores the efficiency of these periodic structures arranged on the walls of a room in different ways. The diffusion of the sound field in a room fitted with these diffusers is compared with conventional diffusers using classical parameters. The sound field is obtained using the Finite Difference Time Domain method. We have used the impulse responses thus obtained in different rooms to design a perceptive experiment that shows very promising preliminary results.

RESUMEN

La teoría de estructuras periódicas dio pie a la invención de difusores de sonido hace aproximadamente 40 años. Sin embargo ha sido recientemente cuando algunos autores se han percatado de la posible aplicación de un tipo de estructura periódica, los cristales de sonido, como difusores de sonido. Este trabajo explora la eficiencia de estas estructuras periódicas dispuestas sobre las paredes de una sala. La difusión del campo sonoro en una sala acondicionada con estos difusores es medida con estimadores tradicionales y comparada con difusores clásicos. El campo sonoro es obtenido mediante un esquema numérico basado en el método de Diferencias Finitas en Dominio Temporal. Se han utilizado las respuesta impulsivas así obtenidas en diferentes salas para diseñar un experimento perceptivo que arroja resultados preliminares muy prometedores.

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de mejorar la calidad sonora de recintos mediante la inserción de estructuras en su interior es conocida desde hace décadas [1]. Estas estructuras se denominan genéricamente difusores acústicos, y su mecanismo de funcionamiento consiste en uniformizar la energía acústica que incide sobre ellas, diseminándola por el recinto. La principal limitación de los difusores convencionales (generalmente conocidos como difusores de Schröder [2]) es

que para ser eficientes en el rango de bajas frecuencias (bandas de octava de 125-250 Hz) necesitan espesores del orden de un metro. Recientemente se ha propuesto la utilización de cristales de sonido como difusores acústicos (Sonic Crystal Sound Diffusers-SCSD) [3], habiéndose demostrado que pueden actuar en el régimen de bajas frecuencias sin necesidad de utilizar espesores elevados, por lo que el uso de este tipo de difusores es más que recomendable allí donde existan problemas en dichas bandas de frecuencia.

En este trabajo se presenta un estudio preliminar para caracterizar acústicamente los difusores SCSD utilizando tanto parámetros objetivos como subjetivos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no existe una relación unívoca entre el coeficiente de difusión de las superficies de una sala [4] y los parámetros acústicos existentes. Esta relación sí que existe entre el coeficiente de absorción y algunos de dichos parámetros como sucede con el tiempo de reverberación, relación establecida ya por Sabine hace más de 100 años. El presente trabajo no pretende encontrar la relación anteriormente citada entre el coeficiente de difusión y los parámetros acústicos de salas, dado que esto conllevaría la realización de un gran número de salas con tipologías y acondicionamientos diferentes. Pero sí que se pretende, al menos, analizar una situación muy concreta y controlada, demostrando que los SCSD provocan un cambio en el campo sonoro en la sala y que estas diferencias pueden ser medidas y percibidas por oyentes entrenados. El análisis efectuado no permite llegar a conclusiones certeras, pero sí que abre un campo de investigación planteando nuevos retos en el campo de la calidad sonora en acústica de salas.

Como herramienta de simulación de las diferentes salas consideradas se ha utilizado el método de las diferencias finitas en el dominio del tiempo (Finite Difference Time Domain-FDTD) [5].

SCSD Y SALAS BAJO ESTUDIO

En la Figura 1 se observan las principales características, tanto geométricas como acústicas, del SCSD utilizado en este trabajo. La Figura 1(a) representa esquemáticamente la disposición de los cristales de sonido como difusores acústicos. El difusor propuesto está formado por cuatro zonas alternas con dos parámetros de red ligeramente modificados en una dirección con respecto a la otra. Un esquema de esta disposición se puede observar en la Figura 1(b). De este modo, los factores de llenado (área ocupada por los dispersores cilíndricos en relación con el área de la celda unidad) de cada una de las zonas varían, y su valor es, $f_b=0,55$ y $f_c=0,67$.

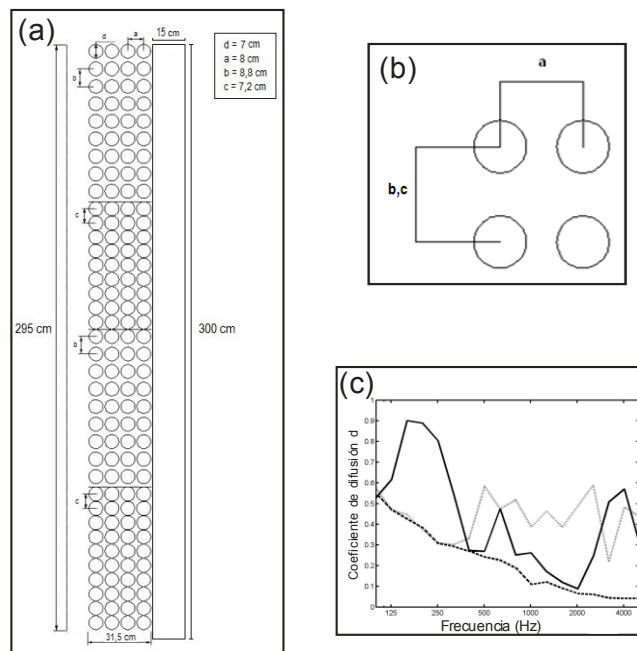


Figura 1: Principales características del SCSD utilizado: (a) Sección del SCSD. Se observa la estructura del difusor creado a partir de un cristal de sonido adyacente a una pared; (b) Celda unidad rectangular del cristal de sonido que actúa como difusor. La distancia $a=0,08\text{m}$ es constante en todo el cristal. Las distancias $b=0,088\text{m}$ o $c=0,072\text{m}$ definen las dos zonas del difusor bizona; (c) Coeficiente de difusión en función de la frecuencia (en tercios de octava) de un panel plano (línea discontinua), de un SCSD (línea continua) y de un difusor de residuo cuadrático de dimensiones similares (línea de puntos).

Por último, en la Figura 1 se compara los coeficientes de difusión del SCSD considerado con el de una pared plana y con el de un difusor de residuo cuadrático. Este último gráfico se obtuvo en [3] mediante simulación numérica. Como ya se ha dicho es notable principalmente la efectividad del SCSD a bajas frecuencias.

Para el diseño de las salas se ha tenido en cuenta que la eficiencia de un acondicionamiento depende no sólo de parámetros tales como los coeficientes de absorción y difusión de las superficies a instalar, sino también de la disposición de las mismas. Para poder estudiar una variedad de disposiciones de materiales se ha seguido la estrategia de uno de los trabajos pioneros para el estudio de la difusión del campo sonoro en una sala [6]. Las geometrías de acuerdo a la distribución de los difusores se muestran a continuación:

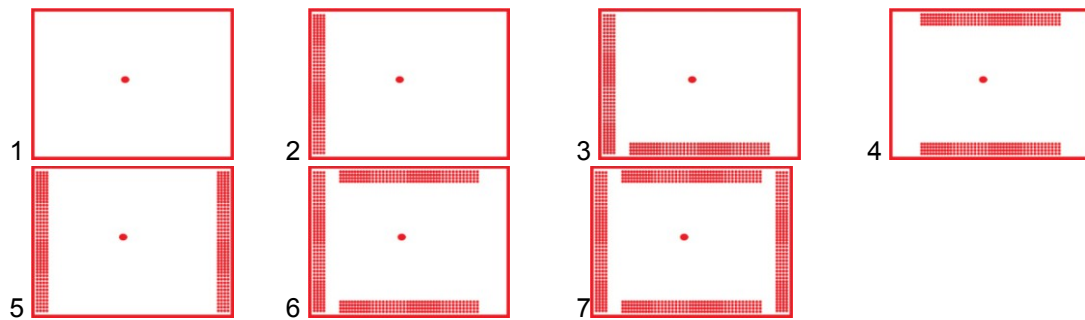


Figura 2: Disposición esquemática de las siete salas analizadas. El punto central representa la cabeza binaural

Adicionalmente y para poder realizar una comparativa con los difusores propuestos, se ha realizado un estudio similar sobre siete salas con diferentes acondicionamientos a base de difusores de sonido convencionales, (QR diffusers- Difusores de residuo cuadrático [2]). La siguiente figura muestra las situaciones consideradas.

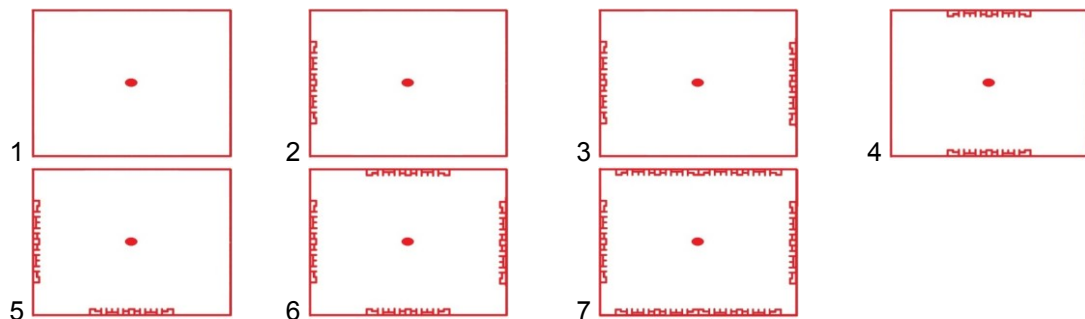


Figura 3: Disposición esquemática de las siete salas de referencia.

SIMULACION DE LAS SALAS CONSIDERADAS

Tal y como se ha comentado anteriormente, para la simulación acústica de las salas se ha utilizado el método FDTD. Se ha recreado la vista en planta de la sala en 2D. La señal de test emitida será una señal de tipo sine sweep (20Hz-10KHz) a partir de la cual se obtiene la respuesta impulsiva.

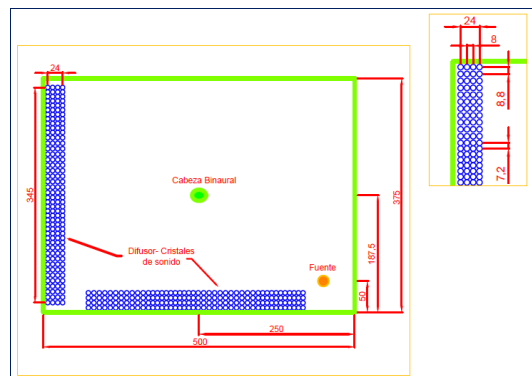


Figura 4. Dimensiones del difusor y la sala así como también la ubicación de la fuente y la cabeza Binaural.

La resolución espacial es de medio centímetro, y la temporal es tal que se supera con creces la frecuencia comercial típica de audio. En particular, la frecuencia de muestreo es de $7,33 \cdot 10^6$ Hz. La impedancia de las paredes se ha ajustado para tener un tiempo de reverberación entre 0,4 y 0,5 segundos. Cada sala requiere de algo más de dos horas y media para su simulación.

Las dimensiones de la sala ($3,75 \times 5 \text{m}^2$) son iguales en todos los casos, siendo la única diferencia entre ellas el número y disposición de los SCSD utilizados. Las salas consideradas tienen unas dimensiones típicas de pequeño estudio de grabación o pequeña sala de ensayo. No se ha extendido el estudio a salas más grandes para que los tiempos de cálculo sean suficientemente cortos. La extrapolación a salas mayores es trivial. No lo es tanto la consideración de salas 3D, que podrían hacer que los tiempos de cálculo fueran superiores a un mes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez obtenidas las respuestas impulsivas binaurales se ha procedido a calcular los parámetros acústicos típicos. En este estudio se han considerado: Tiempo de reverberación a frecuencias medias (RTmid), Bass Ratio (BR), Brilliance (Br), Índice de claridad (C80), Índice de definición (D50), Sonoridad (Gmid) y Correlación cruzada interaural (IACC) (las definiciones de estos parámetros pueden encontrarse en [7]). Los resultados obtenidos se muestran a continuación, tanto para el caso de los difusores QRD (Tabla 1) como para los SCSD (Tabla 2).

Tabla 1. Valores de los parámetros acústicos objetivos para las salas con difusores QRD

	Rtmid	BR	Br	C80	D50	Gmid	IACC
sala 1	0,63	0,95	1,26	6,94	-1,67	7,53	0,22
sala 2	0,60	0,87	1,16	8,54	-1,21	8,42	0,29
sala 3	0,58	0,81	1,23	8,74	-1,26	7,55	0,25
sala 4	0,55	0,76	1,30	8,93	-1,17	6,23	0,25
sala 5	0,53	0,75	1,20	9,38	-1,12	9,42	0,30
sala 6	0,45	0,67	1,30	10,64	-0,90	7,84	0,27

sala 7	0,41	0,59	1,17	12,80	-0,70	6,89	0,27
--------	------	------	------	-------	-------	------	------

En una primera fase se ha buscado si hay algún parámetro objetivo que parezca estar relacionado con el número de difusores en la sala. En el caso de los difusores QRD, tanto R_{tmid} como BR tienen una relación decreciente con el número de difusores, mientras que C80 y D50 crecen monótonamente con el número de difusores. Aun cuando en la simulación no se consideraban pérdidas termoviscosas que pudieran simular este importante efecto que provoca una importante absorción de estas estructuras, sí que la inserción de difusores supone un aumento de la superficie de contorno de la sala y por tanto supone una mayor absorción que viene a explicar las disminuciones de R_{tmid} y BR así como el aumento de C80 y D50.

Tabla 2. Valores de los parámetros acústicos objetivos para las salas con difusores SCSD

	R _{tmid}	BR	Br	C80	D50	G _{mid}	IACC
sala 1	0,40	1,02	1,01	11,02	-1,04	8,93	0,17
sala 2	0,46	0,84	0,85	10,51	-1,04	9,12	0,20
sala 3	0,45	0,62	1,07	9,74	-1,15	8,28	0,28
sala 4	0,47	0,68	1,02	9,26	-1,21	9,81	0,36
sala 5	0,48	0,68	0,96	8,98	-1,14	9,46	0,20
sala 6	0,39	0,76	1,25	10,50	-1,06	6,54	0,25
sala 7	0,48	0,56	0,98	8,44	-1,59	10,36	0,19

En el caso de las salas acondicionadas con difusores SCSD, los únicos parámetros que crecen o decrecen monótonamente con el aumento de superficie difusora son los Índices de claridad (C80) y el de Definición (D50). También lo hacen aproximadamente el Bass Ratio (BR) y el Tiempo de Reverberación a frecuencias medias (R_{tmid}), aunque este último sufre una variación muy pequeña.

En una segunda fase se ha realizado un análisis subjetivo de las salas con difusores SCSD, elaborando una encuesta perceptiva que ha sido contestada por un grupo reducido de estudiantes de música. En concreto, se les ha pedido que valoren los siguientes aspectos del sonido de 0 a 5 en las siete salas:

- Claridad: Grado de separación entre sonidos individuales
- Definición: Precisión de las articulaciones sonoras
- Reverberación: Grado de viveza de la sala
- Calidez: Riqueza en sonidos graves, melosidad y suavidad de la música
- Brillo: Riqueza en sonidos agudos
- Sonoridad: Amplificación producida por la sala
- Intimidad: Sensación subjetiva del volumen de la sala

Previamente y para estimar la viabilidad del experimento se pedía al encuestado que indicara si encontraba diferencias evidentes entre las distintas salas. En todos los casos la respuesta fue afirmativa. La tabla 3 recoge los resultados promediados de las valoraciones sobre los siete parámetros anteriormente citados.

Tabla 3. Valores de los parámetros acústicos subjetivos

	claridad	definición	reverberación	calidez	brillo	sonoridad	intimidad
sala 1	2,67	2,17	2,17	2,5	2,83	2	2,67
sala 2	3,33	3	2,5	2,5	3,17	2,83	3
sala 3	2	2	2	1,67	1,5	3,17	2,83
sala 4	2,67	2,5	2,67	2,17	3	3	2,67

sala 5	2,33	2,67	3,17	2,17	1,5	3,17	2,33
sala 6	3,83	4	3	2,67	3,5	3	2,83
sala 7	3,83	4	3,83	2,5	3	4	3,33

En la prueba perceptiva también se pedía al encuestado que eligieran la mejor y peor sala, sin embargo no se ha llegado a un resultado fiable dada al limitado número de individuos encuestados hasta el momento. Aun así queda claro que las salas mejor valoradas son, en general, aquellas con mayor número de difusores instalados.

Por último, se ha realizado un análisis de correlación de todos los parámetros utilizados, tanto objetivos como subjetivos para el caso de difusores SCSD. Los resultados de dicha correlación se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4. Correlación de parámetros objetivos y subjetivos

	claridad	definición	reverbera	calidez	brillo	sonoridad	intimidad	Rtmid	BR	Br	C80	D50	Gmid	IACC	correlación
claridad	1,00	0,86	0,39	0,71	0,69	0,11	0,45	0,03	0,00	0,03	0,00	0,12	0,02	0,07	claridad
definición		1,00	0,65	0,48	0,37	0,32	0,32	0,00	0,08	0,08	0,06	0,21	0,02	0,05	definición
reverber			1,00	0,20	0,05	0,55	0,11	0,17	0,28	0,00	0,47	0,54	0,11	0,05	reverberac
calidez				1,00	0,68	0,02	0,09	0,16	0,20	0,00	0,09	0,00	0,02	0,22	calidez
brillo					1,00	0,01	0,25	0,17	0,11	0,03	0,11	0,00	0,03	0,00	brillo
sonoridad						1,00	0,25	0,43	0,86	0,00	0,74	0,68	0,10	0,01	sonoridad
intimida							1,00	0,01	0,07	0,01	0,02	0,37	0,02	0,03	intimidad
Rtmid								1,00	0,45	0,42	0,68	0,34	0,62	0,01	Rtmid
BR									1,00	0,01	0,77	0,48	0,07	0,15	BR
Br										1,00	0,03	0,01	0,58	0,12	Br
C80											1,00	0,67	0,39	0,04	C80
D50												1,00	0,36	0,00	D50
Gmid													1,00	0,01	Gmid
IACC														1,00	IACC

En el análisis de los resultados obtenidos llama la atención, en primer lugar, la baja correlación de parejas de parámetros objetivo/subjetivo que deberían tener una elevada correlación como RTmid y reverberación (0,17), D50 y Definición (0,21), BR y Calidez (0,20), Br y Brillo (0,03), Gmid y Sonoridad (0,1) y finalmente Claridad y C80 (0).

Por otra parte, las correlaciones más elevadas (entre parejas objetivo/subjetivo) son las encontradas entre BR y sonoridad (decreciente, esto es, a mayor BR menor sonoridad) seguido de C80 y sonoridad (también decreciente). La primera carece totalmente de sentido, no así la segunda que es coherente con las definiciones de ambos parámetros.

Por último, las correlaciones entre D50 y sonoridad (decreciente, a mayor sonoridad menor definición), y D50 y reverberación (decreciente, a mayor reverberación menor definición), son algo menores, siendo ambas relaciones lógicas. Las demás correlaciones son menores de 0,50.

CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

Los resultados obtenidos muestran que los SCSD modifican notablemente el campo sonoro en el interior de una sala con los cerramientos cubiertos en mayor o menor grado por estos dispositivos. Este efecto es claramente perceptible por oyentes entrenados.

Los parámetros convencionales no muestran la correlación que cabría esperar posiblemente debido a que el rango de variación de estos es muy limitado dadas las características de las salas estudiadas.

En futuros trabajos nos centraremos en parámetros acústicos alternativos. Como parámetros objetivos se utilizarán aquellos específicos para la estimación del grado de difusión de la sala, y como parámetros subjetivos, deberemos proponer nuevos parámetros dado que hasta donde sabemos, tan sólo los parámetros IACC y LEF (factor de energía lateral) están asociados

directamente al grado de difusión del sonido en la sala. Asimismo, y para valorar en profundidad los nuevos parámetros subjetivos propuestos, extenderemos el estudio a oyentes no entrenados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y la Unión Europea FEDER a través del proyecto FIS2011-29731-C02-02.

REFERENCIAS

- [1] T.J. Cox, P. D'Antonio, A brief History of Room Acoustic Diffusers, *Acoustics Today*, 18 (2006)
- [2] M. R. Schroeder, "Binaural dissimilarity and optimum ceilings for concert halls: more lateral sound diffusion", *J. Acoust. Soc. Am.* 65, 958-963 (1979).
- [3] J. Redondo, R. Picó, V. J. Sánchez-Morcillo and W. Woszczyk, Sound diffusers based on sonic crystals. *J. Acoust. Soc. Am.* 134, 4412 (2013);
- [4] ISO 17497-2:2012 "Measurement of sound scattering properties of surfaces — Part 2: Measurement of the directional diffusion coefficient in a free field"
- [5] X. Yuan, D. Borup, J. W. Wiskin, M. Berggren, R. Eidens, S. A. Johnson: Formulation and validation of Berenger's PML absorbing boundary for the FDTD simulation of acoustic scattering. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control* 44 (1997) 816–822
- [6] Spring, N. F.; Randall, K. E., The measurement of sound diffusion index in small rooms. Research Dep., Engineering Div., BBC, Kingswood Warren ; 1969
- [7] UNE-EN ISO 3382(2001): Acústica. Medición del tiempo de reverberación de recintos con referencia a otros parámetros acústicos. (ISO 3382:1997).