

**UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA**

**ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA**

**Master en Ingeniería Acústica**

---



**UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA**

# **Estudio del aumento de la difusión del sonido producida por cristales de sonido**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

Autor:

**Alberto Quintana Gallardo**

Tutor:

**D. Fco. Javier Redondo Pastor**

**GANDIA, 2015**

## **Resumen**

El presente trabajo trata el estudio de la difusión y los parámetros acústicos, en una pequeña sala usando la técnica de simulación de Diferencias Finitas en el Dominio Temporal. El estudio se realiza en 3 condiciones diferentes: La primera de ellas con la habitación con las paredes lisas reflejantes, la segunda con las paredes recubiertas con Difusores basados en Cristales de Sonido y la tercera con las paredes recubiertas con Difusores basados en Cristales de Sonido optimizados. Los parámetros acústicos y de difusión no solo se estudian objetivamente a través de la respuesta impulsiva del recinto, sino que además se realiza una encuesta a diferentes músicos profesionales para saber si ellos son capaces de notar la diferencia entre las tres diferentes configuraciones, escuchando como sonaría una pequeña pieza musical interpretada por un Fagotista si ese recinto estuviera construido.

## **Abstract**

The dissertation deals with the study of the scattering and acoustics parameters, in a small room using the simulation technique of Finite Differences in Time Domain. The study is made in three different conditions: the first one is with flat walls, the second one with the walls covered with Sonic Crystal Sound Diffusers y the third one with the walls covered with optimized Sonic Crystal Sound Diffusers. The sound and scattering parameters are studied not only mathematically through the impulse response of the room, but also with inquiry to a different professional musicians to know if they feel the difference between the three room configurations, hearing how an small musical piece interpreted by a bassoon would sound if the room were constructed.

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a todos los profesores del campus de Gandía de la UPV su trabajo y compromiso por la educación, en especial a mi tutor en el presente trabajo cuya dedicación en la materia es digna de mencionar. Mencionar también a Blanca Hervás, por su esfuerzo y entrega.

Quiero agradecer a mi familia su apoyo incondicional, a Esmeralda por corregir hasta la última coma del texto y a mis compañeros de máster, amigos y todas las personas que he conocido en Gandía por hacer todo siempre más fácil.

**Acrónimos utilizados**

FDTD: “Finite differences in time domain”.

SCSD: “Sonic Crystal Sound Diffusers”.

EDT: “Early Decay Time”.

T60: Tiempo de reverberación medido a la caída de 60 dB.

C80: Parámetro de medida de la claridad sonido.

C50: Parámetro de medida de la claridad de la voz.

D: Parámetro de medida de la definición sonido.

BR: Parámetro de medida de la calidez del sonido.

Br: Parámetro de medida de la brillantez del sonido.

Tr1: Parámetro para identificar si una sala resulta más cálida o más brillante.

IACC: “Inter-Aural Cross-correlation Coefficient”

LEF: “Lateral Energy Factor”

CEE: Coeficiente de Eficiencia Energética.

**ÍNDICE**

	Pág.
<b>I. Introducción</b> .....	6
<b>II. Objetivos</b> .....	9
<b>III. Planteamiento inicial</b> .....	10
III.1. Descripción de la técnica FDTD .....	12
<b>IV. Simulación y cálculo de parámetros objetivos de difusión</b> .....	18
IV.1. Parámetros acústicos.....	19
IV.2. Coloración de la señal.....	24
IV.3. Desviación del tiempo de reverberación.....	27
IV.4. IACC .....	29
IV.5. LEF .....	32
IV.6. Eficiencia Energética.....	34
IV.7. Pendiente de las rectas de caída.....	36
<b>V. Programa de encuestas y parámetros subjetivos</b> .....	39
V.1. Obtención de los archivos de audio.....	40
V.2. Programación en Guide.....	41
V.3. Proceso de encuestas .....	42
V.4. Resultados de las encuestas.....	43
<b>VI. Resumen de resultados</b> .....	49
<b>VII. Conclusiones</b> .....	53
<b>Referencias</b> .....	54
<b>índice de figuras y tablas</b> .....	55
<b>índice de anexos</b> .....	56

## I. Introducción

Desde las primeras representaciones teatrales y espectáculos públicos, la acústica siempre ha sido uno de los puntos clave a tener en cuenta para la construcción o la elección del espacio de representación.

En los primeros teatros griegos, se trataba de conseguir ser oído por todo el público en un espacio significativamente grande y al aire libre. El ejemplo perfecto de éxito en esto es el Teatro Griego de Epidauro, en el cual se podía escuchar perfectamente a los actores desde las últimas filas, situadas a 70m de distancia de los mismos.

Nada podían saber los griegos de la increíble intervención de las gradas de dicho teatro para conseguir tan magnífico resultado, ya que hoy sabemos que las gradas actuaban como difusores acústicos. No conocían la razón del éxito de su empresa, y toda su evolución al respecto se basaba en el ensayo-error. El conocimiento en acústica estaba basado en una simple relación de experiencia, y continuó siendo así hasta finales del siglo XIX, cuando Wallace Clement Sabine, profesor de física en la Universidad de Harvard, empezó a relacionar la acústica de las salas con el tiempo de reverberación y creó métodos de cálculo para predecirlo.

Con el paso de los años se desarrollaron diversas teorías para el estudio del sonido: la teoría estadística, la geométrica y la ondulatoria.

En acústica arquitectónica, se generalizó el uso de la teoría geométrica de rayos, ya que resulta altamente intuitiva y visual. Sin embargo, presenta grandes carencias para la baja frecuencia, donde falla considerablemente y además no tiene en cuenta los fenómenos de scattering.

A pesar del continuo paso de los años, los objetivos acústicos para un recinto siguen siendo los mismos: proporcionar una experiencia musical adecuada para el tipo de música o representación que se realice en el recinto, y que esta experiencia sea lo más parecida posible en toda la superficie de audiencia. En lo que a la homogeneidad de la experiencia se refiere, es donde entra el estudio de la difusión en una sala. La geometría de las salas, las dimensiones y materiales no siempre ayudan a que una sala sea lo suficientemente difusa en cuanto al sonido, sobretudo en bajas frecuencias. Por ello surgió lo que se conoce como difusores. Los difusores son estructuras cuya superficie irregular produce un efecto de scattering o difusión del sonido al impactar en ellos, en lugar de producir un rebote especular del sonido. Existe mucha biografía sobre distintos tipos de difusores como son:

- **QRD** (Cuadratic Residue Difussor)
- **RD** (Primitive Roots Difussor)
- **MLS** (Maximum Length Frecuence)

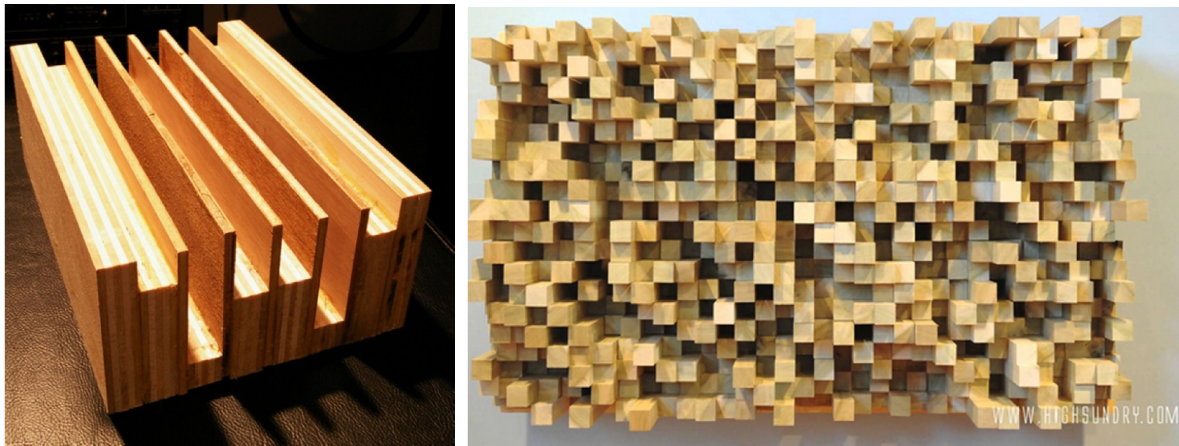


Fig.1. Ejemplo de difusores de Schroeder

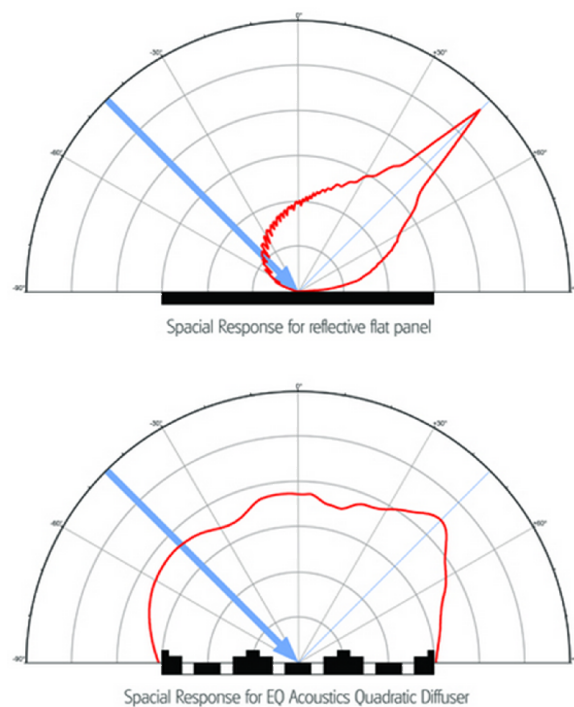


Fig.2. Esquema del efecto de un difusor de Schroeder

Estos difusores, conocidos como difusores de Schroeder, sin embargo necesitan grandes espesores (del orden de 1 metro) para ser eficientes en baja frecuencia, lo que resulta un gran inconveniente a la hora de ser incluidos dentro de un espacio arquitectónico, donde las dimensiones son limitadas. Dichos difusores no forman parte del desarrollo de este trabajo, pero resulta importante nombrarlos y conocerlos.

Existe una rama importante sobre difusores dentro de la investigación en acústica, es por ello por lo que aparecen nuevos tipos de difusores que necesitan ser estudiados. A raíz de ello surgen recientemente los SCSD (Sonic Crystal Sound Diffusers), los cuales han demostrado que producen scattering en bajas frecuencias con un espesor mucho menor a los difusores de Schroeder. Actualmente, se sigue investigando para mejorar este tipo de difusores, motivo por el cual aparecen los SCSD optimizados, creados a través de algoritmos genéticos y que producen una mejor

respuesta en baja frecuencia. La poca cantidad de bibliografía sobre los SCSD los hace especialmente interesantes para ser estudiados.

En el desarrollo del trabajo, se tratará el efecto que producen los SCSD dentro de una sala, tanto en lo que a difusión se refiere, como en el resto de parámetros acústicos. El estudio pretende comparar la difusión en un recinto dependiendo de si la sala se encuentra con las paredes lisas o si ponemos en ellas SCSD no optimizados o SCSD optimizados.

No es posible establecer mediante la teoría de rayos el comportamiento acústico de un difusor. Por ello resulta fundamental el papel de los métodos de simulación, que se basan en la teoría ondulatoria, discretizando la ecuación de onda. Calcular la capacidad difusora de un difusor mediante ensayos significaría un gasto alto tanto de tiempo como de miles de euros en material de laboratorio. Sin embargo, se puede realizar una estimación sumamente certera del comportamiento de un difusor mediante métodos numéricos con tan solo un PC con un software de cálculo como Matlab.

Para este trabajo, dado que se trata de un estudio sobre difusores, se utiliza la teoría ondulatoria. Para llevar a cabo los cálculos, se utiliza la técnica FDTD (Finite Differences in Time Domain). Este método, al trabajar en el dominio del tiempo, nos permite visualizar el propio frente de ondas y trabajar con todo el espectro simultáneamente, obteniendo las respuestas impulsivas de la sala.



## II. Objetivos

Los objetivos perseguidos en este trabajo son los siguientes:

- Realización de un programa en FDTD que obtenga las respuestas al impulso de un mismo recinto acústico excitado con una señal MLS en 3 casos distintos: sin difusores, con difusores de cristales de sonido y con difusores de cristales de sonido optimizados
- El cálculo de distintos parámetros de difusión en la sala, a través de las mencionadas respuestas al impulso de las 3 tipologías estudiadas. Con ello se pretende establecer de manera objetiva en que caso el sonido resulta más difuso y como cambian los parámetros acústicos.
- La convolución de una señal de audio con la respuesta impulsiva de la sala, en este caso un fragmento de un fagot, para así poder escuchar como sonaría el recinto en caso de estar construido (auralización).
- Obtención de datos subjetivos sobre el sonido en la sala. A través de los audios obtenidos, crear una encuesta en Guide para que distintos músicos profesionales y estudiantes de música puedan opinar respecto a su percepción auditiva en cada uno de los 3 casos y puntuarlos.
- Comparación de los resultados obtenidos en los parámetros objetivos y subjetivos.

### III. Planteamiento inicial

Para la comprensión del trabajo realizado, es necesario el conocimiento sobre que son y para qué sirven los difusores basados en cristales de sonido. Son una distribución periódica de dispersores cilíndricos rígidos, entre los cuales está el propio aire de la sala. El fenómeno producido en estos difusores tiene lugar debido a la relación entre el diámetro de los cilindros y el espacio entre los mismos, lo que da lugar a que ciertas frecuencias se puedan propagar a través de la estructura cristalina (estas serán conocidas como frecuencias permitidas) y ciertas no (se las conocerá como bandas prohibidas o band gap). Este fenómeno es conocido como estructuras en bandas. Estos difusores, consiguen mayor difusión en baja frecuencia que los difusores QRD (Cuadratic Residue Difussor), siendo precisamente en baja frecuencia donde más dificultoso resulta conseguir un sonido difuso.

Además del análisis de los difusores basados en cristales de sonido convencionales, este trabajo trata también sobre el efecto de los cristales de sonido optimizados. Dichos cristales de sonido se crean a través de algoritmos genéticos y en este caso han sido creados por mi tutor en el presente trabajo Javier Redondo. Por tanto, como ya se ha detallado en el apartado de objetivos, se procederá a realizar la simulación en FDTD de una sala para comparar el efecto de dichos difusores basados en cristales de sonido.

Para lograr los objetivos propuestos, se planteará el trabajo de la manera siguiente: el objeto de estudio, será una sala en 2 dimensiones cuadrada de 4,4 metros de largo. La dimensión escogida no es casualidad, se ha decidido tomar una sala pequeña y de dimensiones regulares, a sabiendas de que estas características contribuyen a una mala difusión, por tanto se busca comprobar hasta qué punto se puede, con difusores basados en cristales de sonido, mejorar el sonido dentro de la misma.

Por tanto se procederá simulando la sala de 3 maneras distintas para comparar entre ellas: la sala con las paredes lisas reflejantes, la sala con cristales de sonido en toda su superficie y la sala con cristales de sonido optimizados, como se puede observar en la imágenes siguientes:

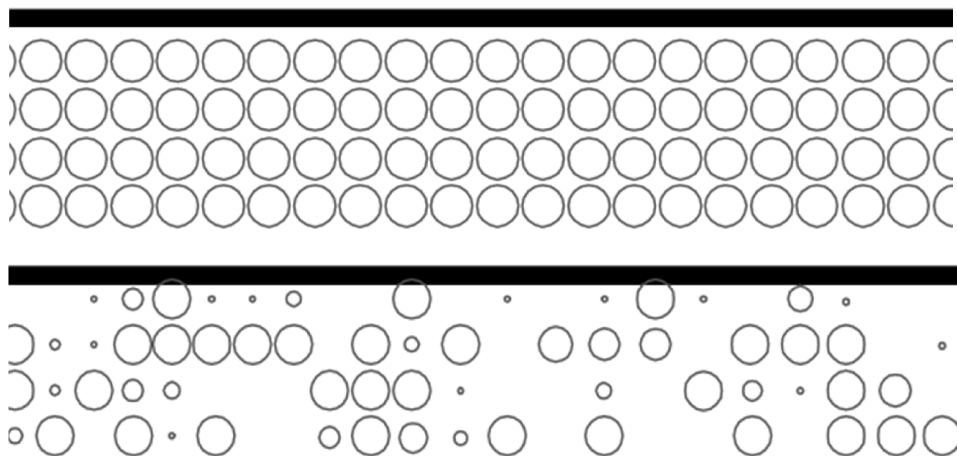


Fig.3. SCSD convencionales (arriba) optimizados (abajo)

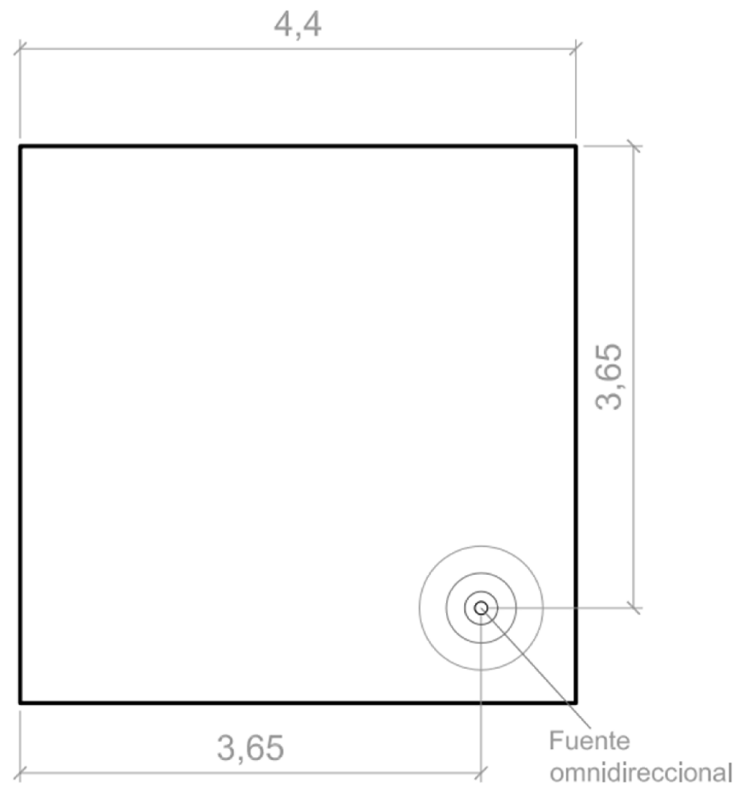


Fig.4. Dimensiones de la sala y posición de la fuente sonora

En esta figura (Fig. 5) se encuentra posicionada la fuente. Se trata de una fuente omnidireccional, que emite una señal MLS (Máximum Lenght Secuence), el código de la misma se encuentra facilitado en los anexos a este trabajo.

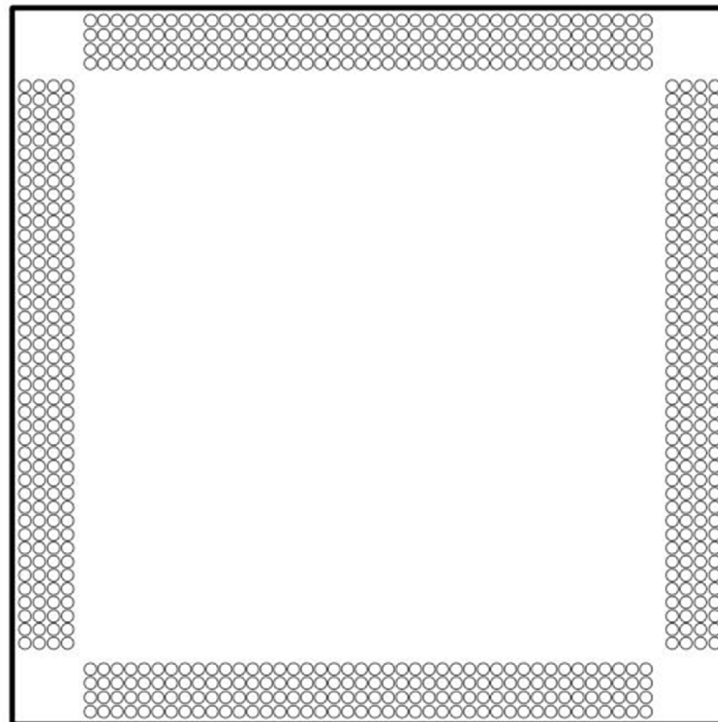


Fig.5. Sala con difusores de cristales de sonido convencionales.

En las figuras 6 y 7, vemos la sala con los SCSD colocados en la superficie de las paredes (Vista en planta)

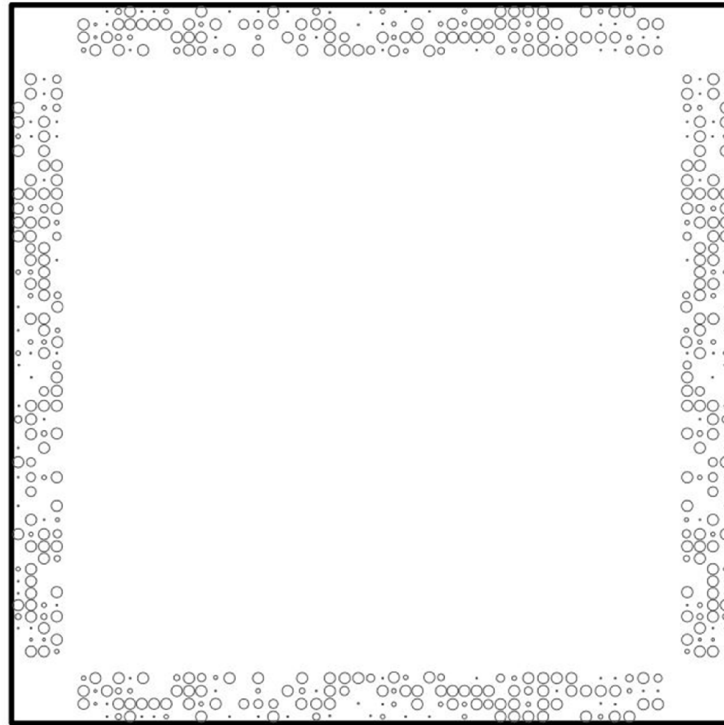


Fig.6. Sala con difusores de cristales de sonido optimizados.

### III.1. Descripción de la técnica FDTD

La técnica FDTD (Finite Differences in Time Domain), es un método de simulación numérico, que está ampliamente extendido en electromagnetismo. Este método se basa en la discretización de las ecuaciones de Maxwell, creando una mallado en cuyos puntos se resolverán dichas ecuaciones de manera iterativa, convirtiéndolas en ecuaciones de actualización e implementándolas en un software de cálculo.

En el caso de la acústica, este método puede ser aplicado análogamente:

Sound waves	TE waves	TM waves
$v_x$	$E_y$	$-G_y$
$v_y$	$-E_x$	$G_x$
$p$	$G_z$	$E_z$
$\bar{K}$	$\underline{\mu}$	$\underline{\epsilon}$
$\underline{\rho}$	$\underline{\epsilon}$	$\underline{\mu}$

Tabla 1. Analogía entre las ondas acústicas y las electromagnéticas en FDTD.

Encontrándonos en un medio isotrópico sin pérdidas utilizamos la ecuación de continuidad

$$\nabla p + \rho \frac{du}{dt} = 0$$

$$\frac{dp}{dt} + \rho c^2 (\vec{\nabla} * \vec{u}) = 0$$

Siendo:

$p(r, z, t)$  = presión acústica

$\vec{u}(r, z, t)$  = velocidad de partícula

$\rho$  = densidad del aire

$c$  = velocidad del sonido

Estas ecuaciones pueden ser reescritas en 2 dimensiones

$$\frac{dp}{dx} + \rho \frac{du_x}{dt} = 0$$

$$\frac{dp}{dy} + \rho \frac{du_y}{dt} = 0$$

$$\frac{dp}{dt} + \rho c^2 \left( \frac{du_x}{dx} + \frac{du_y}{dy} \right) = 0$$

Mediante la discretización de las ecuaciones anteriores, aproximando las derivadas por diferencias finitas, será como apliquemos la técnica:

$$\left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_0} = \frac{f\left(x_0 + \frac{1}{2}\Delta x\right) - f\left(x_0 - \frac{1}{2}\Delta x\right)}{\Delta x}$$

$$\left. \frac{df}{dt} \right|_{t=t_0} = \frac{f\left(t_0 + \frac{1}{2}\Delta t\right) - f\left(t_0 - \frac{1}{2}\Delta t\right)}{\Delta t}$$

En las ecuaciones anteriores, podemos observar  $\Delta x$  y  $\Delta t$ . Esto hace referencia a la resolución temporal y espacial, que será elegida a la hora de realizar la simulación para adaptarse a las necesidades de la misma. Un aumento de estas, implicará un mayor coste computacional. En el caso de  $\Delta x$ , el tamaño de la malla irá acorde a la frecuencia máxima que queramos calcular para no producir efecto de aliasing.

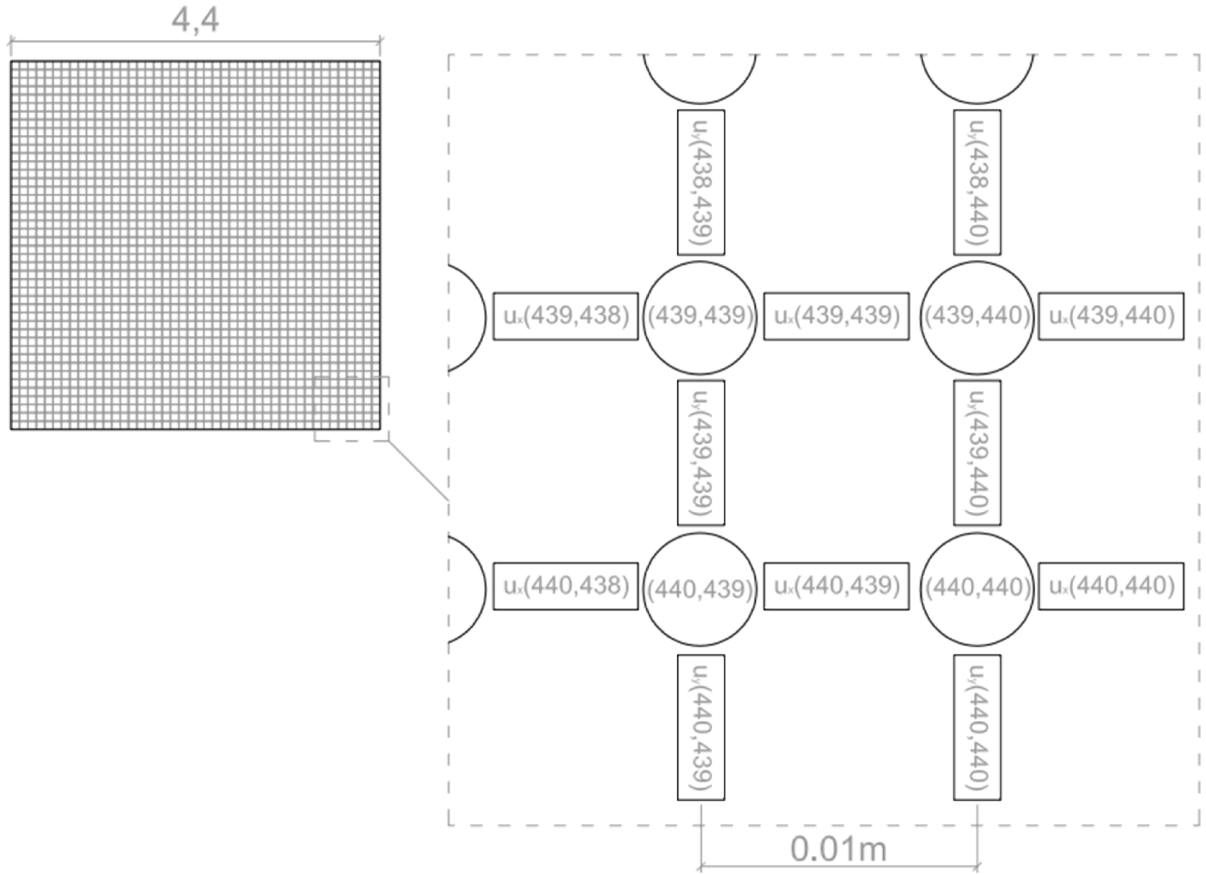


Fig. 7. Representación gráfica de la malla espacial usada para la simulación.

En la imagen anterior se representa la malla utilizada para la simulación en este trabajo. Los cruces entre líneas (círculos) representan los puntos en los cuales se calcula la presión y en los rectángulos entre los mismos vemos los valores de velocidad en el eje X y en el eje Y. Es importante resaltar, que en la Figura 7, los números dentro de las figuras que representan presión y velocidad en el eje x y el eje y, no son coordenadas cartesianas, son las posiciones dentro de la matriz que se utiliza en Matlab.

Si despejamos la siguiente ecuación:

$$\frac{p\left(439,439,t+\frac{\Delta t}{2}\right)-p\left(439,439,t-\frac{\Delta t}{2}\right)}{\Delta t}+\rho c^2\left(\frac{u_x(339,339,t)-u_x(338,339,t)}{\Delta x}+\frac{u_x(339,339,t)-u_x(339,338,t)}{\Delta y}\right)=0$$

Podemos obtener los valores de presión del punto contiguo a un valor de presión conocido despejando la ecuación anterior:

$$p\left(439,439,t+\frac{\Delta t}{2}\right)=p\left(439,439,t-\frac{\Delta t}{2}\right)+\Delta t\cdot\rho c^2\left(\frac{u_x(339,339,t)-u_x(338,339,t)}{\Delta x}+\frac{u_x(339,339,t)-u_x(339,338,t)}{\Delta y}\right)$$

Estimando también su velocidad mediante las siguientes ecuaciones:

$$u_y(338,440) = (+1) \cdot \frac{p(339,440)}{Z}$$

$$u_y(440,440) = (-1) \cdot \frac{p(440,440)}{Z}$$

Cuando existan superficies no ortogonales, se deberán tener en cuenta los ángulos de inclinación de las mismas:

$$u_y(339,438) = (+1)\sin(\alpha) \cdot \frac{p(339,439)}{Z}$$

$$u_y(438,439) = (-1)\cos(\alpha) \cdot \frac{p(439,439)}{Z}$$

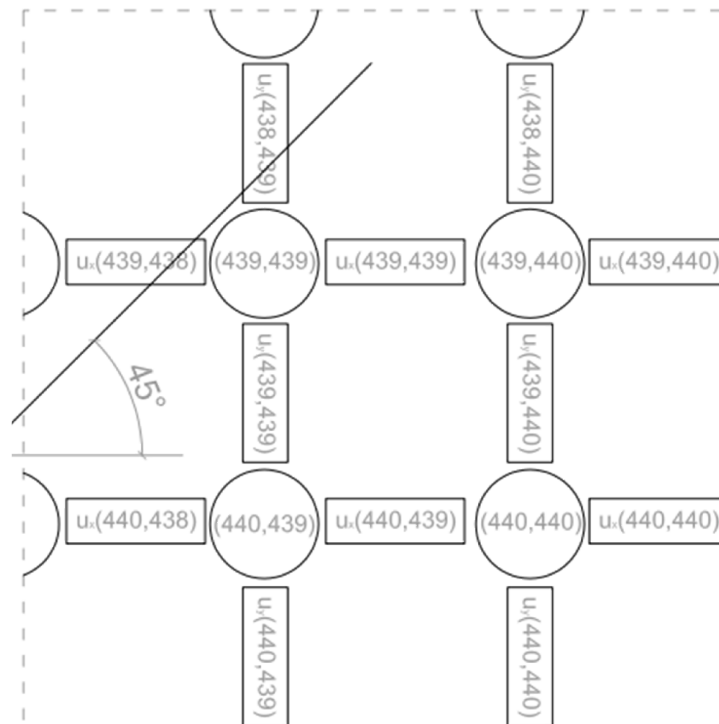


Fig.8. Ejemplo de resolución de malla con paredes no ortogonales

En el presente proyecto todas las superficies son ortogonales, pero resulta conveniente ejemplificarlo para la mayor comprensión global de la técnica.

Como se ha explicado en páginas anteriores, conocida la presión en un punto calcular la velocidad en los puntos contiguos a través de las ecuaciones de actualización anteriores y, a partir de esta, podremos calcular la presión en el siguiente punto. De esa manera podremos conocer sucesivamente la presión en cada punto de la sala en cada instante.

El objetivo de estos cálculos, es almacenar los valores de presión de distintos puntos de la sala, como si de un micrófono se tratase y así obtener la respuesta impulsiva de la sala.

### III.2. Obtención de la respuesta al impulso

Consideramos a la sala como un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI), por tanto, según la teoría de sistemas, puede ser completamente caracterizado mediante su respuesta al impulso:

$$y(t) = x(t) \otimes h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau$$

Por tanto, conocida una señal de entrada  $x(t)$ , podemos conocer la señal de salida  $y(t)$ , convolucionando con la repuesta impulsiva  $h(t)$  tal y como se muestra en la ecuación anterior.

Debe ser tenido en cuenta, que esto es una simplificación de la realidad, ya que una sala no es realmente un sistema LTI. Sin embargo resulta una aproximación que se asemeja profundamente a la realidad.

Para obtener la respuesta al impulso de la sala, utilizamos un método conocido como Exponencial Sine Sweep (ESS). Se emite una señal de sweep exponencial logarítmica  $x(t)$  y su salida del sistema  $y(t)$  la convolucionamos con un correcto filtro inverso para obtener  $h(t)$ . Este filtro inverso, se trata de la señal de Sweep que utilizamos como excitación, invertida en el tiempo y con un término de ganancia para asegurar una pendiente de +3dB/octava en el dominio frecuencial, compensando así los -3dB de caída de  $x(t)$ . La señal de entrada utilizada es la siguiente:

$$x(t) = \sin \left[ \frac{2\pi \cdot T \cdot f_1}{\ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} \cdot \left( e^{\frac{t}{T} \cdot \ln \left( \frac{f_2}{f_1} \right)} - 1 \right) \right]$$

Este método se basa en que el filtro aplicado  $xi(t)$ , convolucionado con la señal  $x(t)$ , debería resultar en una delta de Dirac teórica. Por tanto al convolucionar dicho filtro por la salida del sistema  $y(t)$ , obtenemos la respuesta al impulso de la sala. El programa utilizado con su respectivo Sine Sweep está incluido en los anexos.

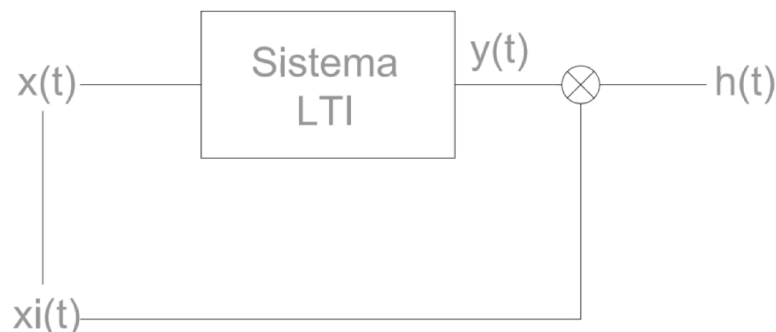


Fig.9. Esquema de la obtención de la respuesta impulsiva en un sistema LTI

Una vez obtenida dicha respuesta impulsiva, se podrán comenzar a desarrollar los objetivos del trabajo. Puesto que la sala ya queda perfectamente caracterizada. Se podrán realizar las



auralizaciones y el cálculo de los parámetros acústicos y de difusión que se procederá a desarrollar en los puntos siguientes.

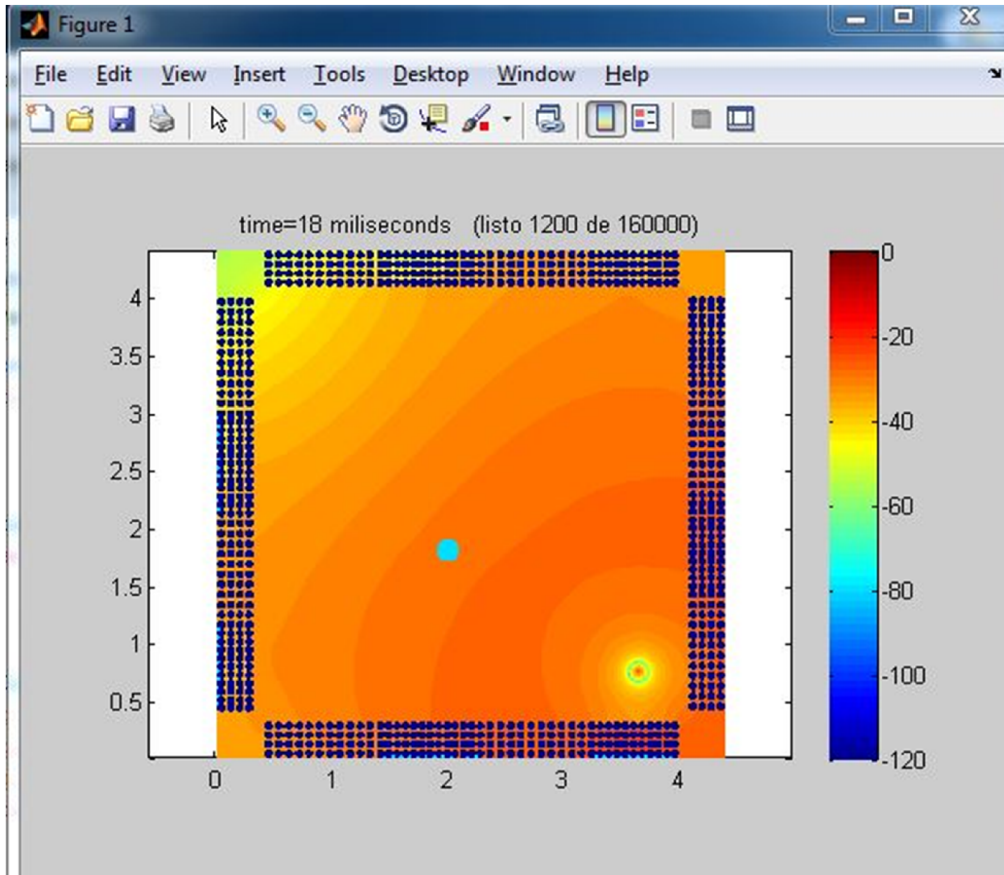


Fig.10. Proceso de simulación con SCSD convencionales

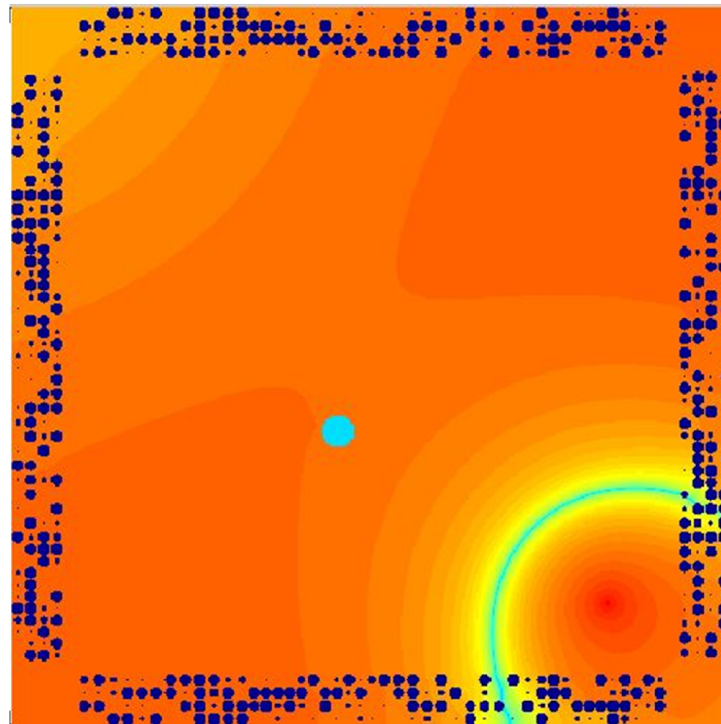


Fig.11. Proceso de simulación con SCSD optimizados

#### IV. Simulación y cálculo de los parámetros objetivos de difusión

En el presente punto se desarrolla el proceso utilizado para obtener los parámetros acústicos y los resultados obtenidos.

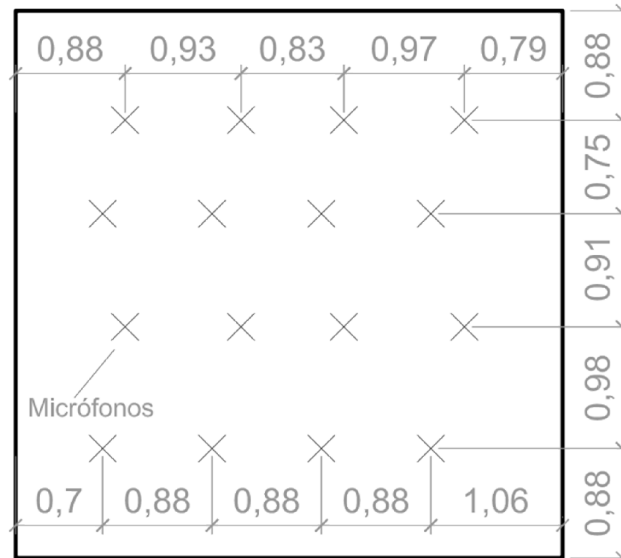


Fig.12. Colocación de los micrófonos en la simulación

En la imagen anterior se puede observar la colocación de los micrófonos dentro de la sala. Después de la realización de la simulación, los valores obtenidos en cada uno de los mismos, se convolucionarán con el filtro inverso del Sine Sweep tal y como está descrito en el punto III.2 para obtener sus respuestas impulsivas. Mediante ello seremos capaces de obtener los parámetros acústicos y de difusión desarrollados en este trabajo.

Únicamente el apartado IV.1 será sobre parámetros acústicos genéricos, el resto de apartados del punto IV, se centran en la medición de la difusión en la sala.

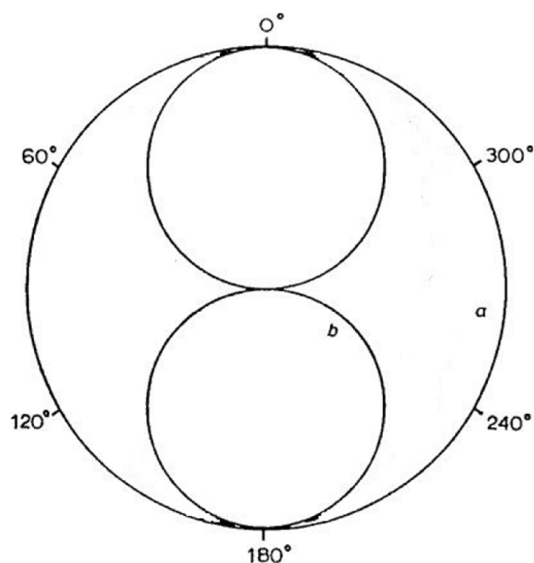


Fig. 13. Diagramas polares de los micrófonos utilizados. Omnidireccional (a) direccional (b)

#### IV.1. *Parámetros acústicos*

Determinar parámetros acústicos como EDT, C80 o C50, a pesar de no tratarse de parámetros de difusión, resulta fundamental para la correcta comprensión del sonido dentro del recinto a estudiar. Por tanto se procede a desarrollar una breve explicación de cada uno de los parámetros, su cálculo y los resultados obtenidos:

#### **T60 y EDT**

El tiempo de reverberación (T60), es el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en caer 60 decibelios una vez la fuente deja de emitir. Su medición in situ resulta a veces poco fiable, puesto que una caída de 60 dB implica que debe haber un nivel de ruido de fondo realmente bajo.

El “Early Decay Time” es una de las maneras que se utilizan habitualmente para medir el tiempo de reverberación. Está definido como 6 veces el tiempo que tarda el sonido en decaer 10 dB una vez la fuente deja de emitir. Está altamente relacionado con la percepción subjetiva de la viveza de la sala, por lo que pudiendo ser significativamente diferente del TR tradicional, el EDT representa mejor la impresión auditiva humana de la reverberación de la sala. En las siguientes gráficas vemos los resultados calculados del EDT y del T60 a través de las respuestas impulsivas de cada una de las 3 salas.

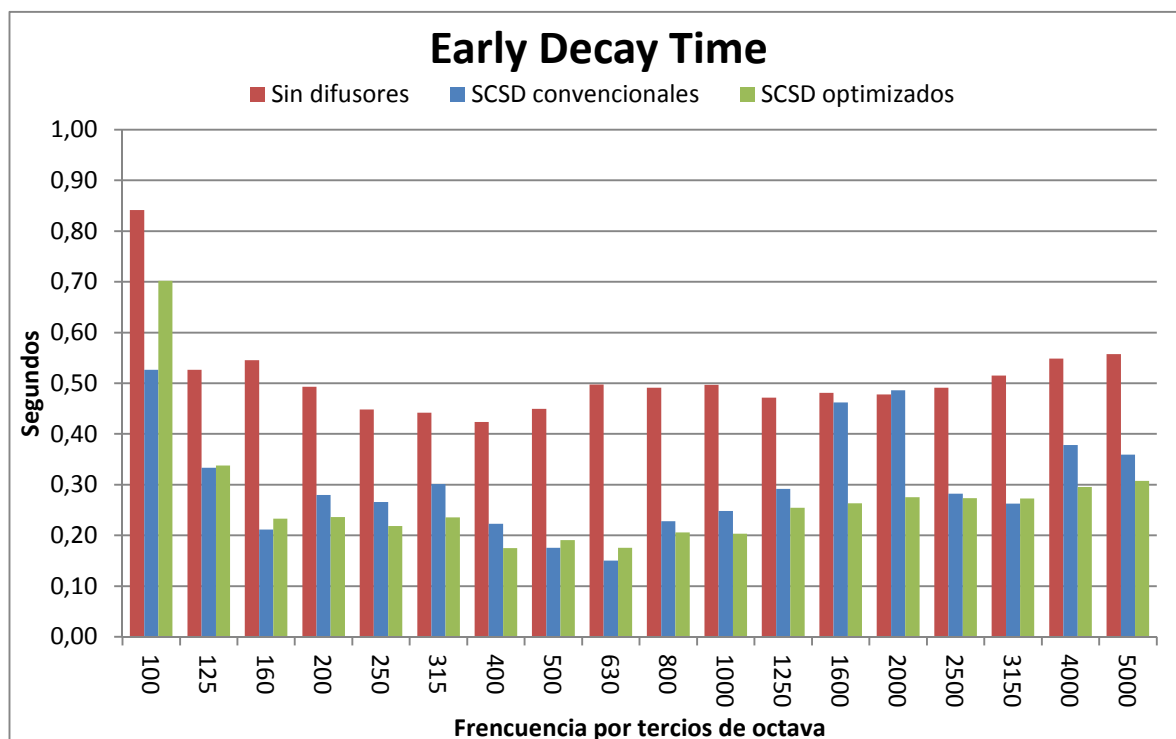


Fig. 14. Gráfica EDT

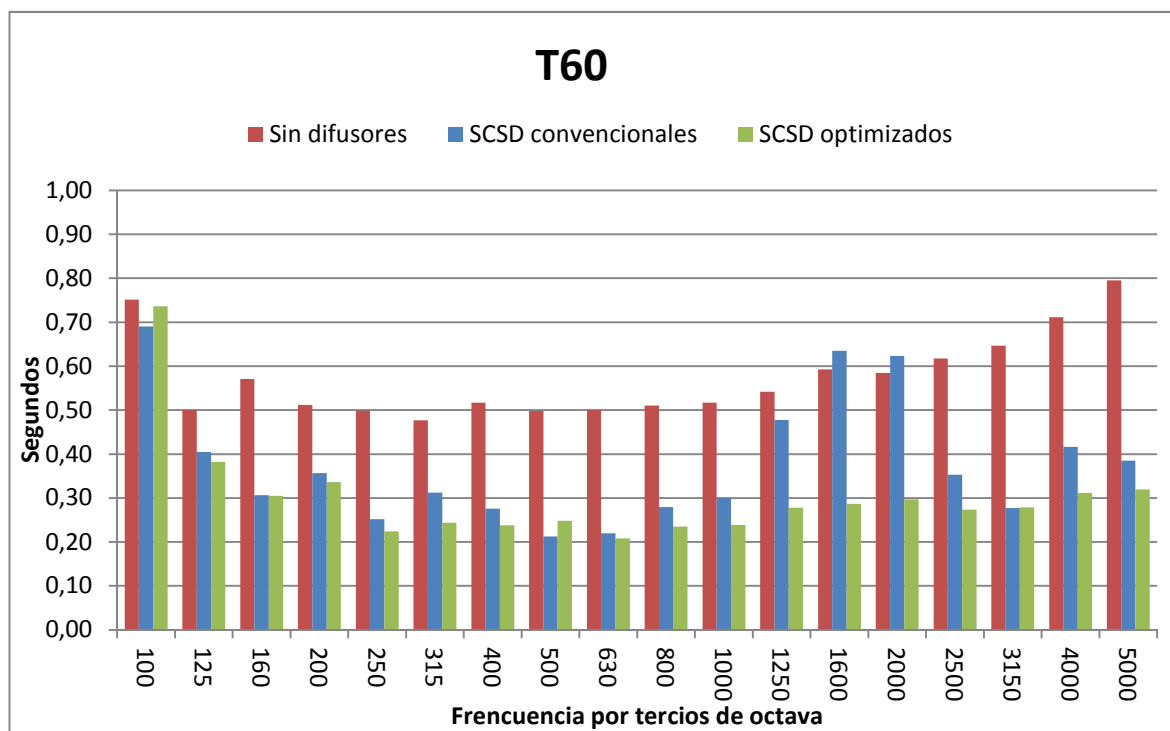


Fig. 15. Gráfica T60

Vemos en los resultados, que las 3 salas son realmente poco reverberantes, siendo más acentuado con difusores y especialmente con los difusores optimizados. Resulta interesante observar el efecto producido por los difusores, viendo que reducen significativamente tanto el tiempo en el EDT como en el T60 a partir sobretodo de los 125 Hz. Es un efecto peculiar, ya que los difusores no están pensados para actuar como absorbentes.

### C80, C50 y Definición

El C80, conocido como claridad musical, indica la separación entre los distintos sonidos pertenecientes a una composición musical. Se potencia reforzando el sonido temprano. Se define como la relación entre la energía que llega durante los primeros 80ms y la que llega una vez pasados los primeros 80ms:

$$C80 = 10\log\left(\frac{\int_{0\text{ms}}^{80\text{ms}} p^2 dt}{\int_{80\text{ms}}^{\infty} p^2 dt}\right) \quad (\text{en dB})$$

El C50 hace referencia a la claridad de la voz, se trata de un parámetro similar al anterior, y se calcula ponderando por frecuencias de la manera siguiente:

$$C50 = 10\log\left(\frac{\int_{0\text{ms}}^{50\text{ms}} p^2 dt}{\int_{50\text{ms}}^{\infty} p^2 dt}\right) \quad (\text{en dB})$$

$$C50 = 0.15 \cdot C50(500\text{Hz}) + 0.25 \cdot C50(1\text{KHz}) + 0.35 \cdot C50(2\text{KHz}) + 0.25 \cdot C50(4\text{KHz})$$

Relaciona la energía que llega en los primeros 50 milisegundos con la energía total. Se considera recomendable que el valor sea superior a 0.5. Será mejor cuanto más alto sea.

$$D = 10\log\left(\frac{\int_{0\text{ms}}^{50\text{ms}} p^2 dt}{\int_{0\text{ms}}^{\infty} p^2 dt}\right) \quad (\text{en dB})$$

Se obtienen los siguientes resultados:

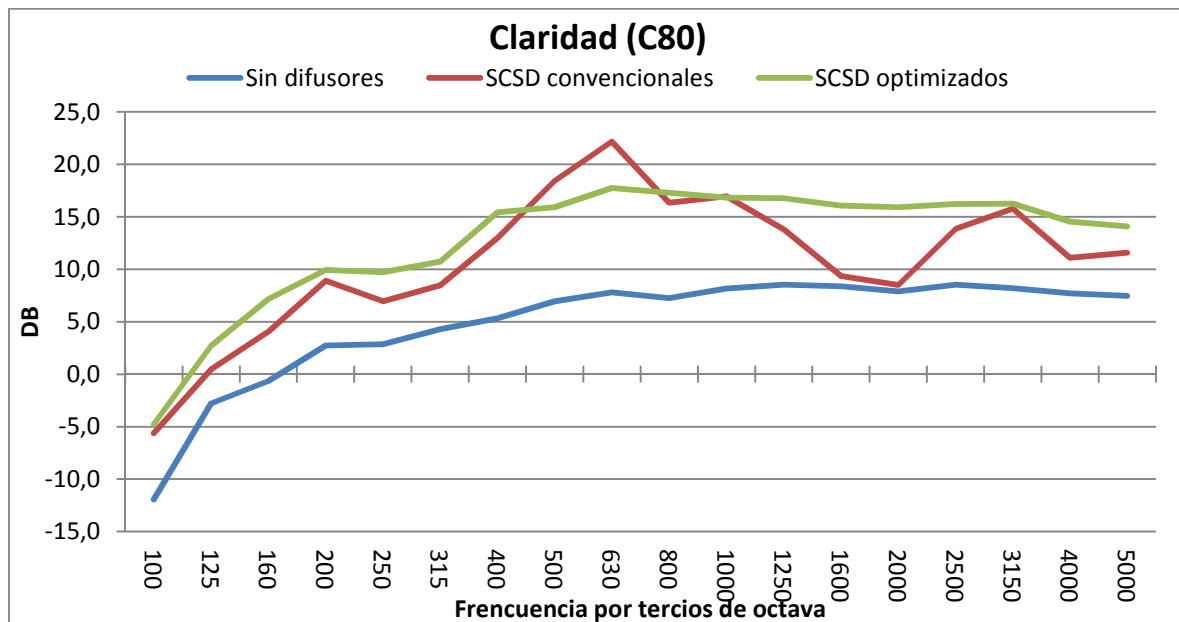


Fig.16. Resultados C80

Observando los resultados del C80, vemos que la sala con mayor claridad es la sala con difusores optimizados, seguida por los difusores convencionales y con una menor claridad, está la sala sin

difusores. Valores positivos implican salas poco reverberantes y valores negativos salas más vivas, con mayor reverberación. La idoneidad de este parámetro dependerá del uso al que pueda ir destinada la sala en cuestión.

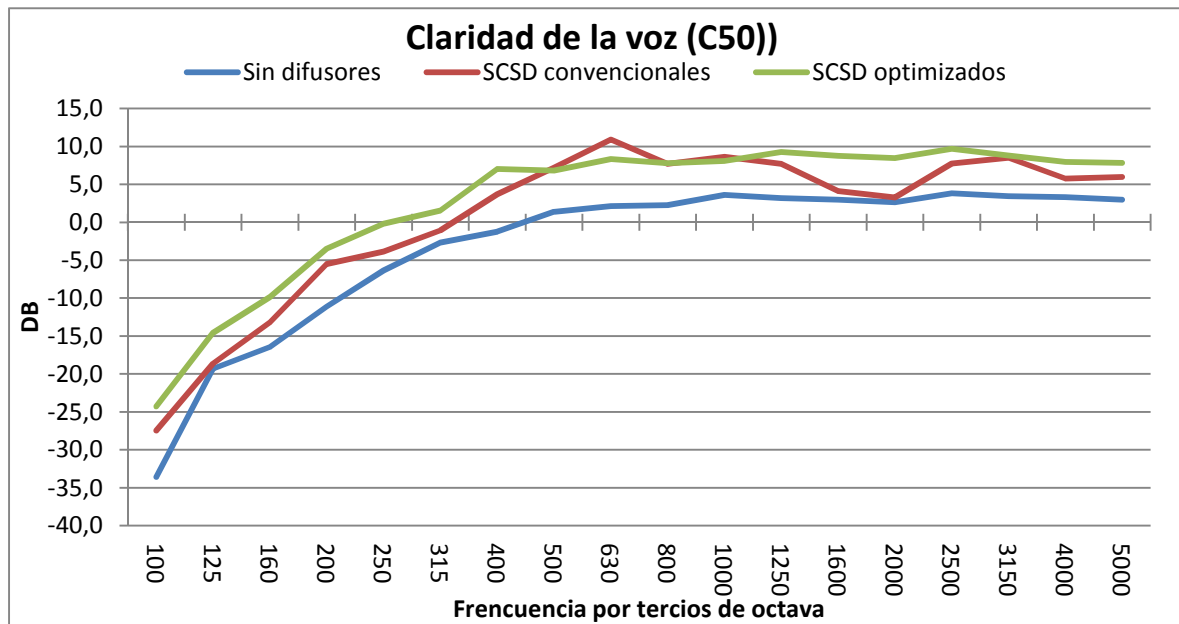


Fig.17. Resultados C50

En cuanto al C50, los valores importantes son los siguientes, calculados con la ponderación en frecuencias expresada anteriormente:

C50 sala sin difusores=2.9 dB

C50 sala con SCSD no optimizados=5.8 dB

C50 sala con SCSD optimizados =8 dB

Este valor resulta ser mucho mayor en las salas con difusores, especialmente en la sala con difusores optimizados. Son recomendables valores superiores a 2 dB, las 3 salas lo cumplen. Implica que las 3 salas tienen una suficiente inteligibilidad de la palabra, pero resultan mejores las salas con difusores, especialmente la sala con SCSD optimizados.

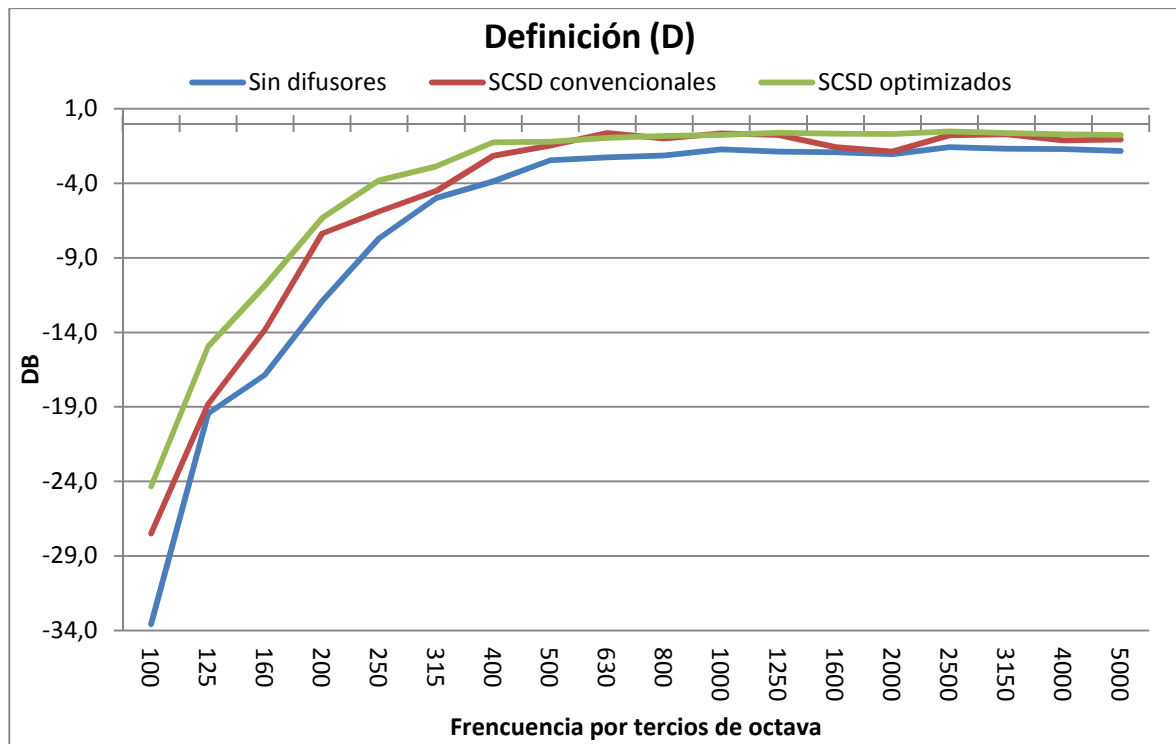


Fig.18. Resultados de D (definición en dB)

En cuanto a la definición, vemos que las salas con difusores son superiores en todo el espectro a la sala sin ellos, destacando por encima la de difusores optimizados sobretodo en baja frecuencia. Ninguna de las 3 salas llega al valor recomendado de definición que sería 0.5 o superior.

### Calidez acústica (BR), Brillo (Br) y Timbre (Tr1)

Estos 3 parámetros relacionan los tiempos de reverberación por frecuencias con la calidez el brillo y el timbre de la sala. Se definen de la manera siguiente:

Se dice que una sala tiene calidez acústica, si tiene una buena respuesta y riqueza en graves

$$BR = \frac{TR(125\text{Hz}) + TR(250\text{Hz})}{TR(500\text{Hz}) + TR(1000\text{Hz})}$$

Se conoce como sonido brillante aquel con un alto contenido en armónicos, por tanto en agudos. Se calcula de la siguiente manera

$$Br = \frac{TR(2000\text{Hz}) + TR(4000\text{Hz})}{TR(500\text{Hz}) + TR(1000\text{Hz})}$$

También se han definido otros parámetros para definir si la sala es cálida o brillante como el Tr1 o timbre:

$$Tr1 = \frac{TR(2000\text{Hz}) + TR(4000\text{Hz})}{TR(125\text{Hz}) + TR(250\text{Hz})}$$

Obtenemos los siguientes resultados:

	Sin difusores	SCSD convencionales	SCSD optimizados
BR	1,029549925	1,411427541	1,410613019
Br	1,084410394	2,037376997	1,446837872
Tr	1,053285875	1,44348678	1,02568022

Tabla 2. Resultados de BR, Br y Tr1

A la luz de los datos obtenidos, las 3 salas son cálidas, puesto que su BR es superior a 1 destacando las salas con difusores con un Bass Ratio muy elevado. También son Brillantes las 3, siendo superiores a 1 su Br, destacando la sala 1 como muy brillante. Para comprobar si son más brillantes o más cálidas, se utiliza el Tr1, cuyo valor indica si es mayor a la unidad que nos encontramos ante una sala brillante y si es menor que 1, que nos encontramos ante una sala cálida. En este caso, las 3 son más brillantes que cálidas, sobretodo la sala con SCSD no optimizados. La sala con SCSD teniendo tanto un brillo alto como una calidez alta, resulta más equilibrada que la sala con los difusores no optimizados.

#### IV.2. Coloración de la señal

Se dice que existe coloración en la señal cuando existen realces o atenuaciones en la señal emitida por la fuente. Las formas y dimensiones de la sala (relación con su distribución modal), así como la presencia de ciertos materiales que puedan vibrar en resonancia a distintas frecuencias (chapas metálicas, tubos de órgano, etc.) pueden producir este efecto de coloración.

En el presente proyecto, se han elegido dimensiones regulares de 4.4x4.4m sabiendo que van a producir modos propios. Se puede considerar que una sala en la que aparece coloración es una sala poco difusa, por lo tanto se puede considerar esto como un parámetro de difusión. Lo interesante radica en averiguar si la introducción de los difusores reduce el efecto de coloración de la señal, mejorando la respuesta en frecuencia de la misma.

Existen múltiples maneras de medir la coloración, en el presente trabajo se ha elegido realizar una FFT y por bandas de tercio de octava, realizar la desviación estándar de los valores de frecuencia por tercio de octava. A mayor desviación, mayor será la coloración, por tanto el campo será menos difuso. La fórmula de la desviación estándar es la siguiente:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(h - \bar{h})^2}{N - 1}}$$

Siendo  $h$  cada uno de los valores discretos de la respuesta impulsiva de cada una de las bandas de tercio de octava,  $\bar{h}$  la media de dichos valores y  $N$  el número total de valores de la muestra, en



nuestro caso, el número total de valores discretos de la respuesta impulsiva. Los resultados obtenidos son los siguientes:

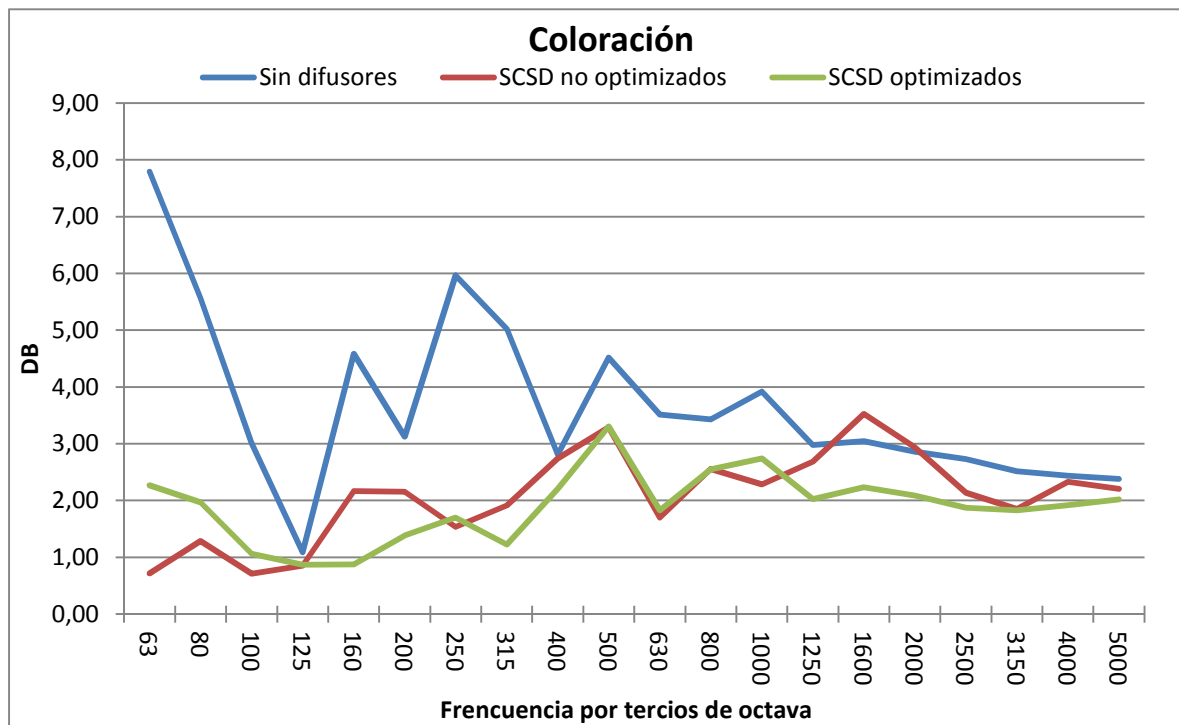


Fig.19. Resultados de la coloración de la señal

En la gráfica, se puede observar que la coloración de la señal es drásticamente superior en la sala sin difusores. Entre las salas con difusores, se observa una menor coloración en la sala con difusores no optimizados hasta los 100Hz, posteriormente los difusores optimizados reducen más la coloración entre 100Hz y 400Hz, sin resultar sin embargo un diferencia llamativa. Ambos difusores consiguen una mejora en la coloración de la señal muy significativa hasta llegar a frecuencias del orden de 1KHz, donde comienza a ser menos importante la coloración en la sala sin difusores.

Resulta interesante una vez calculados los resultados ver cuáles son los modos propios del recinto y ver si existe una relación con la gráfica de la desviación y los difusores corrigen el problema derivado de los modos propios.

La ecuación utilizada para el cálculo de los modos propios ha sido la siguiente:

$$f_{nx ny nz} = \frac{c}{2L} \cdot \sqrt{nx^2 + ny^2 + nz^2}$$

Al tratarse de un recinto de 2 dimensiones, le quitaremos la componente Z, quedando de la manera siguiente:

$$f_{nx ny} = \frac{c}{2L} \cdot \sqrt{nx^2 + ny^2}$$

Modos		Frecuencia (Hz)
1	0	38,75
1	1	54,80
2	0	77,50
2	1	86,65
2	2	109,60
3	0	116,25
3	1	122,54
3	2	139,72
3	3	164,40
4	0	155,00
4	1	159,77
4	2	173,30
4	3	193,75
4	4	219,20

Tabla 3. Modos propios del recinto.(Sala cuadrada, por lo que el modo 10 será igual al 01).

Resulta complicado extraer nuevas conclusiones a través del cálculo de los modos propios, ya que vemos que la desviación de la presión en la sala sin difusores es muy grande en todo el espectro y los modos propios se encuentran realmente juntos. En cualquier caso se puede concluir a la luz de los datos obtenidos que el uso de SCSD, tanto convencionales como optimizados, atenúa los efectos de los modos propios presentes en la sala, aumentando por tanto la difusión de la sala.

### IV.3. Desviación del tiempo de reverberación

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el tiempo de reverberación es uno de los parámetros fundamentales y que mejor define el sonido en una sala. En una sala con un alto grado de difusión, el tiempo de reverberación debe ser altamente homogéneo en toda la superficie de la misma. Por tanto podemos saber si el campo en una sala es difuso viendo cuanto varía la reverberación en los distintos puntos de la sala.

En el presente proyecto esto se ha realizado colocando 16 micrófonos dentro de la superficie de la sala, tal y como se explica al inicio del presente punto y calculando el EDT de cada uno de ellos a través de su respuesta impulsiva. Posteriormente calculado la desviación estándar por tercios de octava. A mayor desviación menos difuso será el campo sonoro.

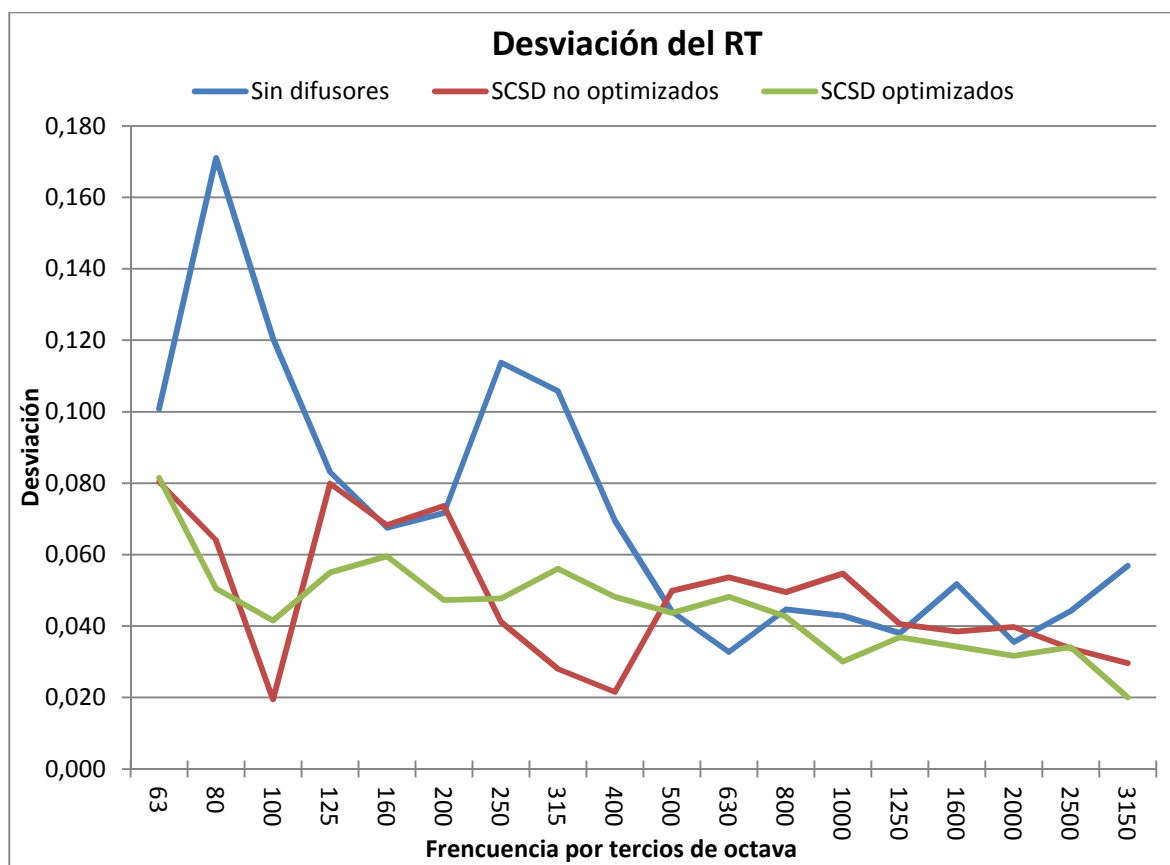


Fig.20. Gráfica de la desviación estándar del EDT de la señal.

Tal y como se puede observar en la gráfica, la desviación en bajas frecuencias de la sala sin difusores es drásticamente superior. No es hasta los 800Hz donde comienza a ser homogéneo entre las 3 salas. Entre la sala con difusores convencionales (Difusor 1) y la de cristales optimizados (difusor 2) existe una menor diferencia, pero cabe decir que la sala con difusores optimizados presenta una desviación más regular en todo su espectro frecuencial que la de difusores no

optimizados, la cual tiene picos pronunciados tanto de baja como de alta desviación en sus distintas frecuencias.

En este parámetro podemos observar claramente una mejora referente al uso de difusores, siendo menos clara la mejora entre los dos tipos de difusores.

#### IV.4. Correlación cruzada interaural (IACC)

El IACC se trata de un parámetro binaural de percepción espacial en la sala y es indicador de cuanto se parecen entre sí las señales percibidas en el oído izquierdo y el derecho. No resulta un parámetro de fácil medición. Para realizarlo es necesario disponer de un maniquí acústico que resulta muy costoso. En caso de la simulación, se puede crear una aproximación de este maniquí, colocando un círculo que simule la forma de la cabeza y 2 micrófonos a sus lados simulando las orejas.

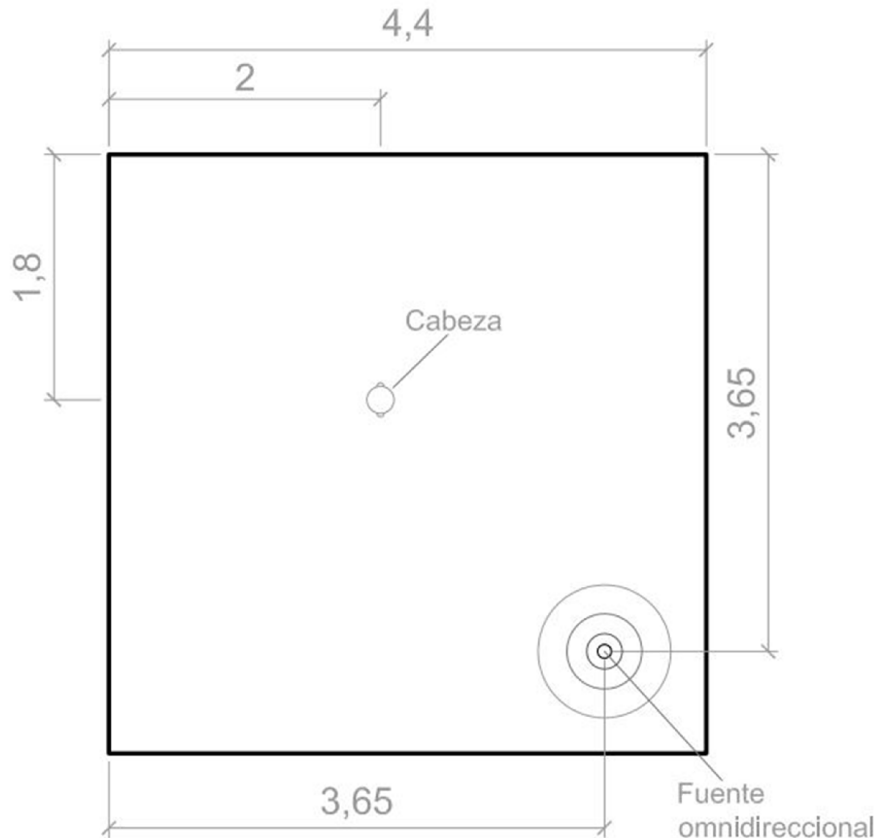


Fig.21. Colocación de la cabeza con micrófonos en la simulación

Está definido como el valor máximo de la correlación cruzada entre las respuestas al impulso de ambos oídos. Se trata de un parámetro que indica cuanto se parecen entre ellas las señales llegadas al oído izquierdo y al derecho. Se calcula de la manera siguiente:

$$IACC = \max \left( \frac{\int_{T_{inicio}}^{T_{final}} p_L(t) p_R(t + \tau) dt}{\int_{T_{inicio}}^{T_{final}} p_L^2(t) dt \cdot \int_{T_{inicio}}^{T_{final}} p_R^2(t) dt} \right)$$

En la fórmula anterior, los subíndices en los valores de presión se refieren L (left) al micrófono izquierdo y R (right) al micrófono derecho. Los valores temporales de inicio y final utilizados para la integración varía según quien realice el estudio, pero se puede considerar que existen 2 IACC

más utilizados, como son el IACC early cuyos parámetros de integración son 5 y 80 milisegundos y el IACC late en el cual van de 80 milisegundos a 1 segundo. En este caso analizaremos los resultados de ambos:

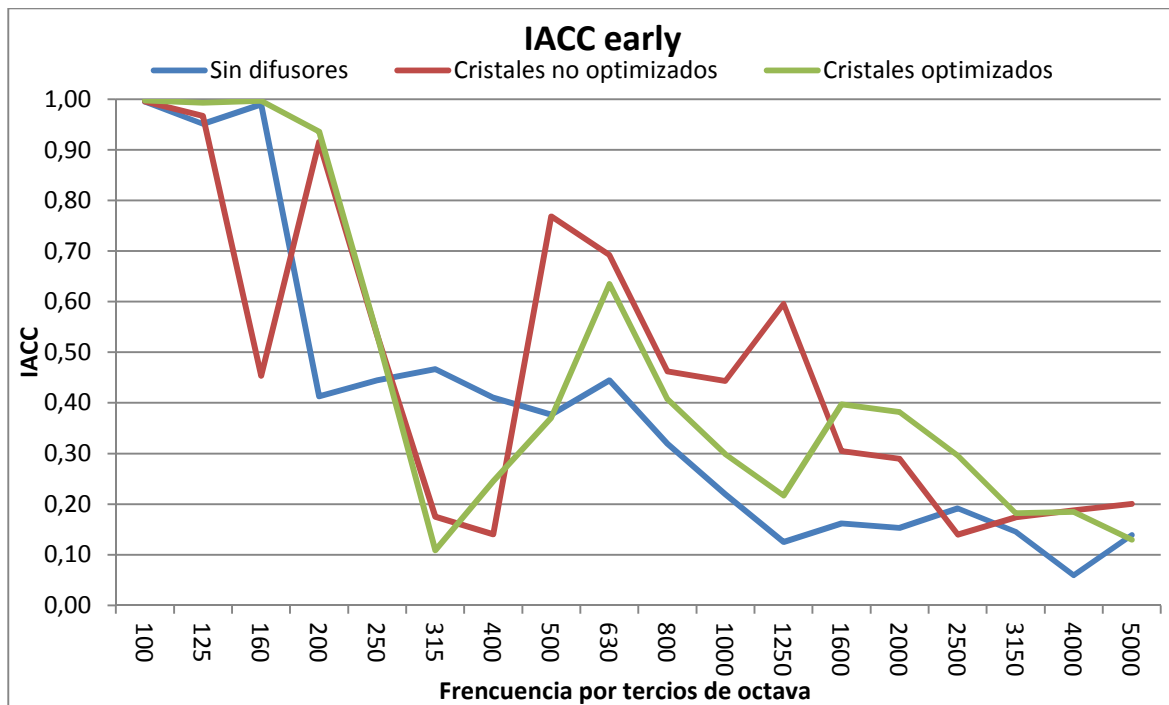


Fig.22. Resultados del IACC early

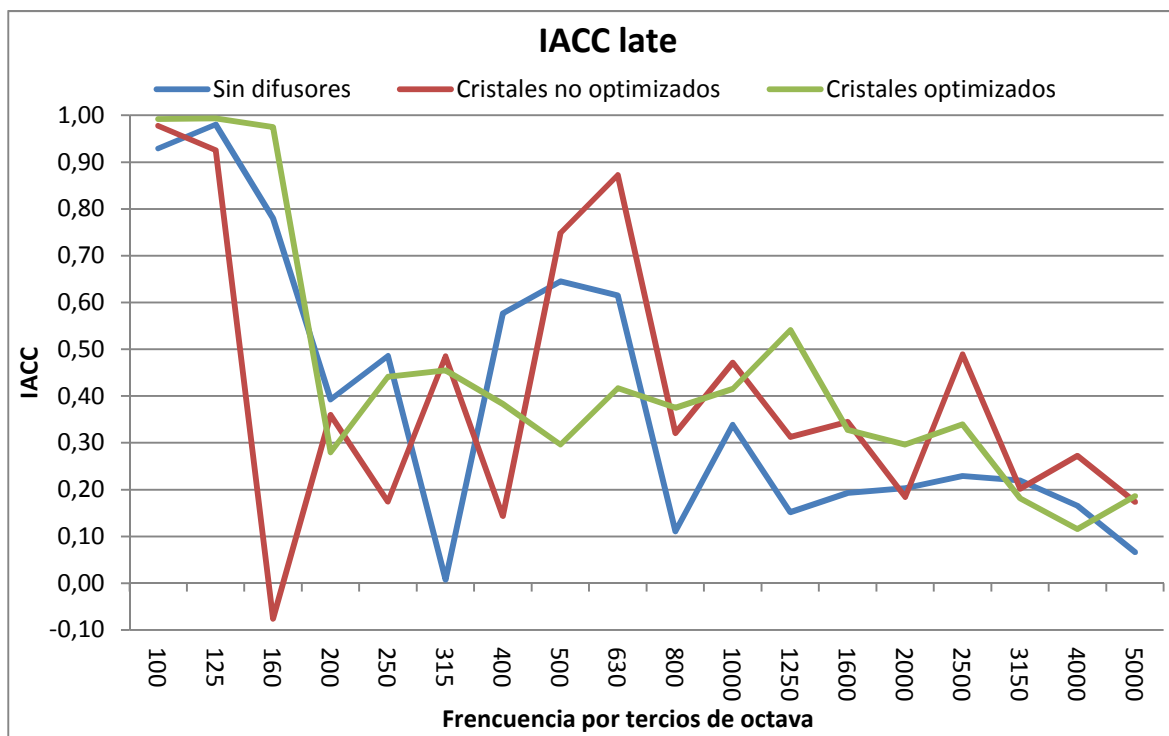


Fig.23. Resultados del IACC late

Mediante la observación de las gráficas vemos que el mayor índice en baja frecuencia es el de los SCSD optimizados, conforme la frecuencia aumenta existen mayores variaciones. Atendiendo al IACC early resulta claro que la sala con SCSD optimizados tiene un coeficiente superior hasta los 250 Hz, acompañados también de buenos resultados en los SCSD, solo empañado este segundo por un valle en pico a los 160 Hz. En el caso de la sala sin difusores sufre una caída a los 200 Hz a partir de la cual desciende de manera más estable. En los 315 Hz ambas salas sin difusores sufren una caída en el coeficiente, de la cual se recuperan a partir de los 400 Hz.

En el caso de el IACC late, la sala con SCSD optimizados obtiene un mejor resultado en prácticamente en todo el espectro, solo superado por pequeños picos en frecuencias concretas por la sala sin difusores y la sala con difusores no optimizados.

Se concluye que claramente los SCSD optimizados mejoran la correlación interaural cruzada de la sala, pudiendo ver también una cierta mejora en la sala con SCSD no optimizados, respecto a la sala sin difusores, aunque esta resulta menos clara.

#### IV.5. Lateral Energy Fraction (LEF)

Se trata de otro parámetro para medir la percepción espacial en la sala. En este caso no se realiza con un maniquí acústico, sino que se comparan las señales recibidas con un micrófono omnidireccional y con otro direccional para evaluar las diferencias entre ambos:

$$LEF = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{\infty}(t)p(t)dt}{\int_{0ms}^{80ms} p^2(t)}$$

En la fórmula anterior,  $p_{\infty}(t)$  hace referencia a la presión sonora con un micrófono con diagrama bidireccional y  $p(t)$  a un micrófono omnidireccional. Los resultados obtenidos son los siguientes:

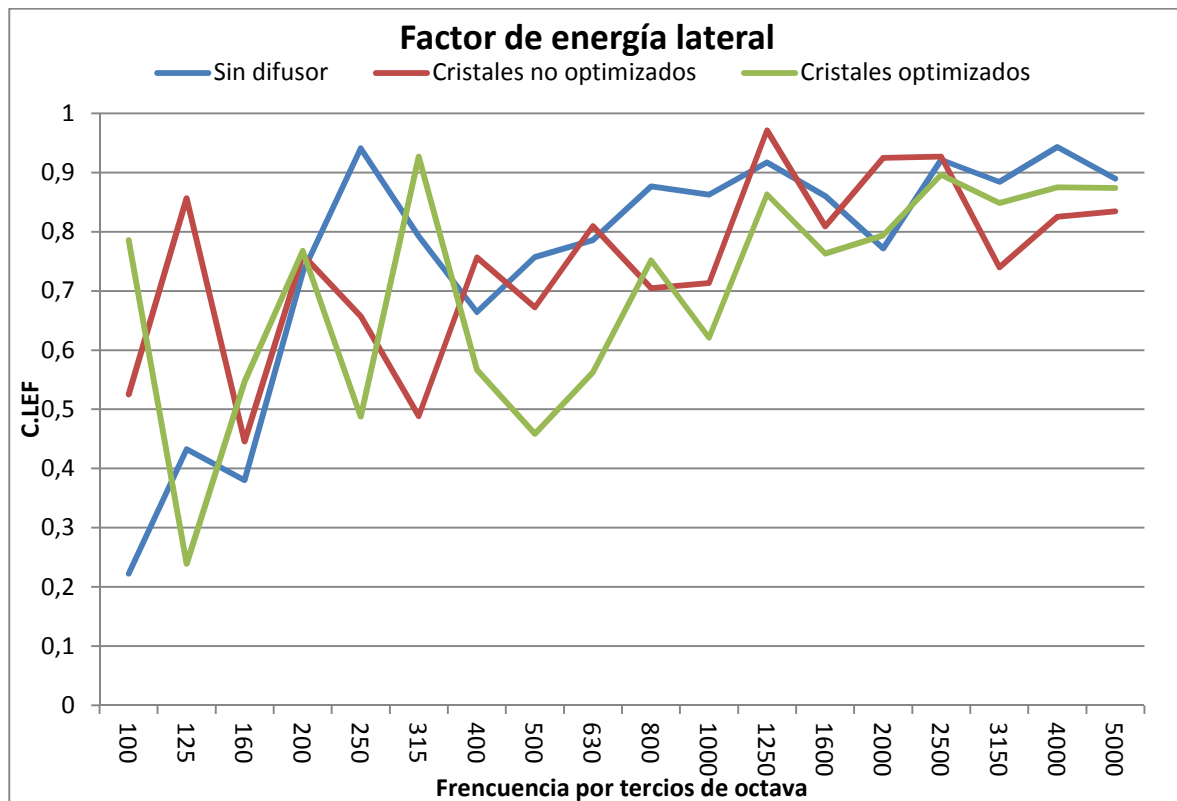


Fig.24. Gráfica de resultados del LEF

En la presente gráfica encontramos resultados del coeficiente de LEF, que no coinciden exactamente con los esperados. En 100Hz vemos una mejora significativa asociada al uso de difusores, sobretodo en el uso de difusores optimizados, sin embargo en 125Hz ocurre lo contrario, los difusores convencionales mejoran tremendamente, pero los optimizados consiguen una difusión incluso menor que la observada en la sala con las paredes lisas. En 160 y 200 Hz vemos resultados más acordes a lo esperado, pero en 250 Hz vuelve a aparecer el problema, teniendo un coeficiente de difusión significativamente más alto la sala sin difusores que las otras dos. A través de la observación de la gráfica anterior resulta complicado extraer conclusiones. Dichas conclusiones se ven reflejadas en el apartado IV de resumen de resultados utilizando una media en baja frecuencia, para observar la influencia media de los difusores en las bandas de mayor interés.



#### IV.6. Eficiencia energética

Otra medida de difusión similar al LEF es la eficiencia energética. Se valora igualmente midiendo la energía recibida en los micrófonos de distintas directividades para contrastar si la energía recibida es homogénea en todas direcciones. La medición de la anisotropía del recinto.

Para calcularlo procederemos calculando la eficiencia energética, con unos límites de integración muy similares al LEF:

$$EE = \frac{\int_{5ms}^{80ms} p_{direccional}(t)p(t)dt}{\int_{5ms}^{80ms} p^2(t)}$$

Posteriormente calculamos la Eficiencia media de energía (DE), parámetro que está definido como el cociente entre la energía media calculada por un micrófono direccional y la energía media captada por un micrófono direccional:

$$DE = \frac{\int p_{direccional}^2(t)dt}{\int p^2(t)dt}$$

Con estas 2 medidas calcularemos el siguiente parámetro de difusión:

$$\delta_{CEE} = 1 - \frac{|DE - EE|}{DE}$$

Para el cálculo de EE y DE se han utilizado micrófonos omnidireccionales y micrófonos direccionales colocados para captar en el eje de las X y en el eje de las Y. Posteriormente se calcula la media entre los resultados de  $\delta_{CEE}$  para ambos ejes y así sacar un parámetro global. Los resultados se han obtenido en tercios de octava.

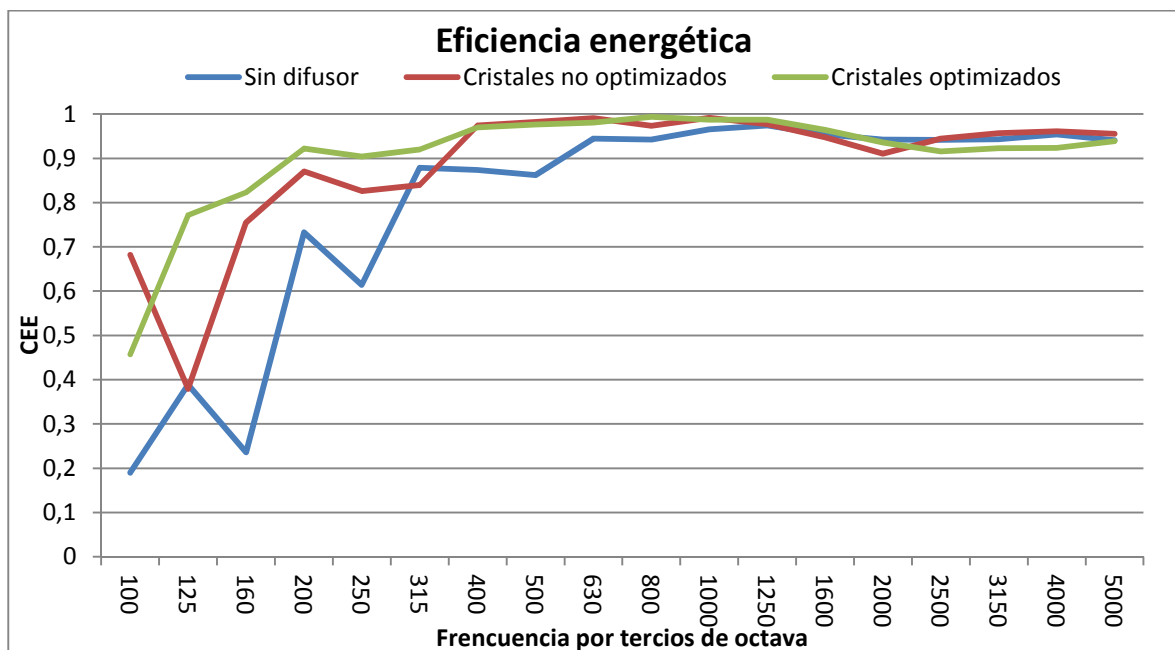


Fig.25. Gráfica de resultados del CEE

En la gráfica de resultados, podemos observar resultados muy acordes con los esperados. Para interpretar la gráfica debemos considerar el CEE como un coeficiente, por lo que sus valores oscilan entre 0 y 1, siendo 1 el máximo valor de difusión. En las frecuencias más problemáticas en cuanto a difusión se refiere (las bajas frecuencias) se puede observar la enorme diferencia entre la sala sin difusores respecto a las 2 que si los tienen, ya que hasta llegar a los 315 Hz el coeficiente de difusión es ostensiblemente más bajo en esta.

Entre las salas con difusores, hay que destacar que los difusores no optimizados de cristales de sonido destacan claramente en la banda de 100Hz y por el contrario son superados ampliamente por los optimizados en la banda de 125Hz. En el resto de bandas se mantienen parejos, siendo ligeramente superiores los difusores optimizados.

#### IV.7. Pendiente de las rectas de caída

Otro método válido para el estudio de la difusión del campo sonoro en un recinto es la linealidad de las curvas de caída. Se compara la similitud entre la caída desde el estado estacionario del sonido en la sala. Cuanto más similar sea la curva de caída a una recta, más difuso debe ser el campo sonoro en el recinto. Por tanto se calcula el tiempo de reverberación por bandas de tercio de octava y se grafican sus curvas de caída para poder hacer una estimación de su similitud a una recta:

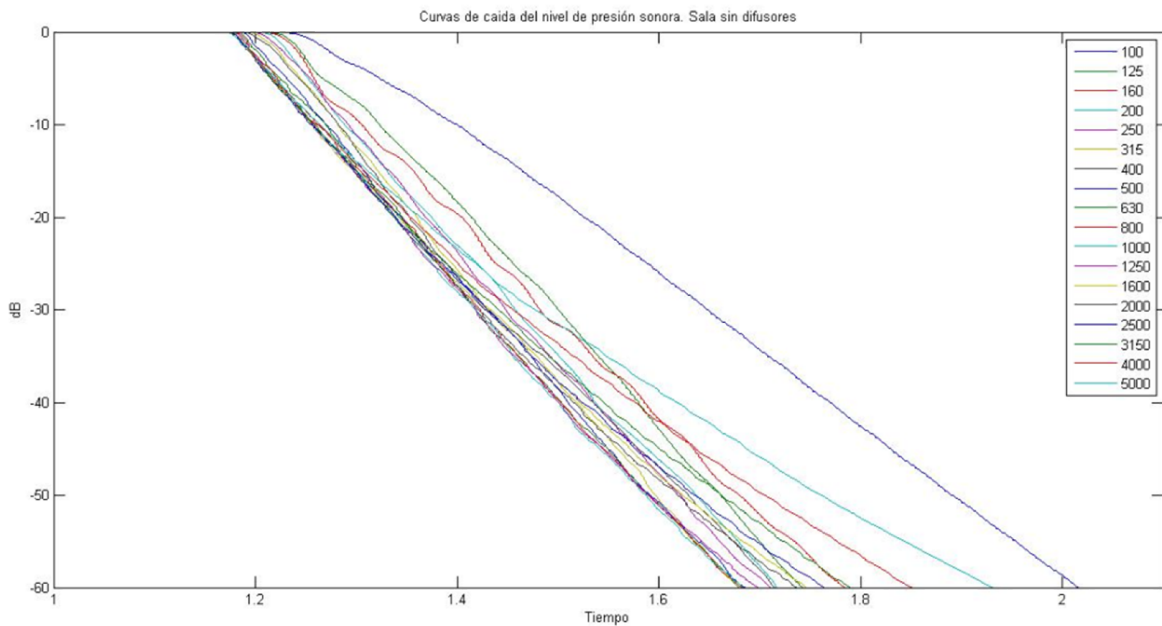


Fig.26. Curvas de caída de la sala sin difusores

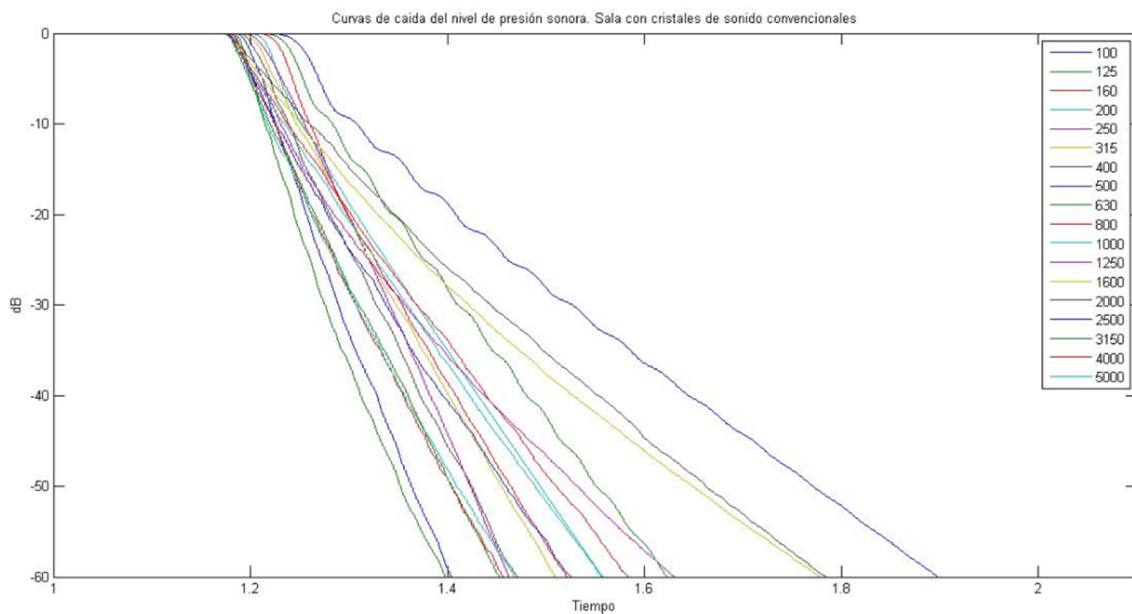


Fig.27. Curvas de caída de la sala con SCSD no optimizados

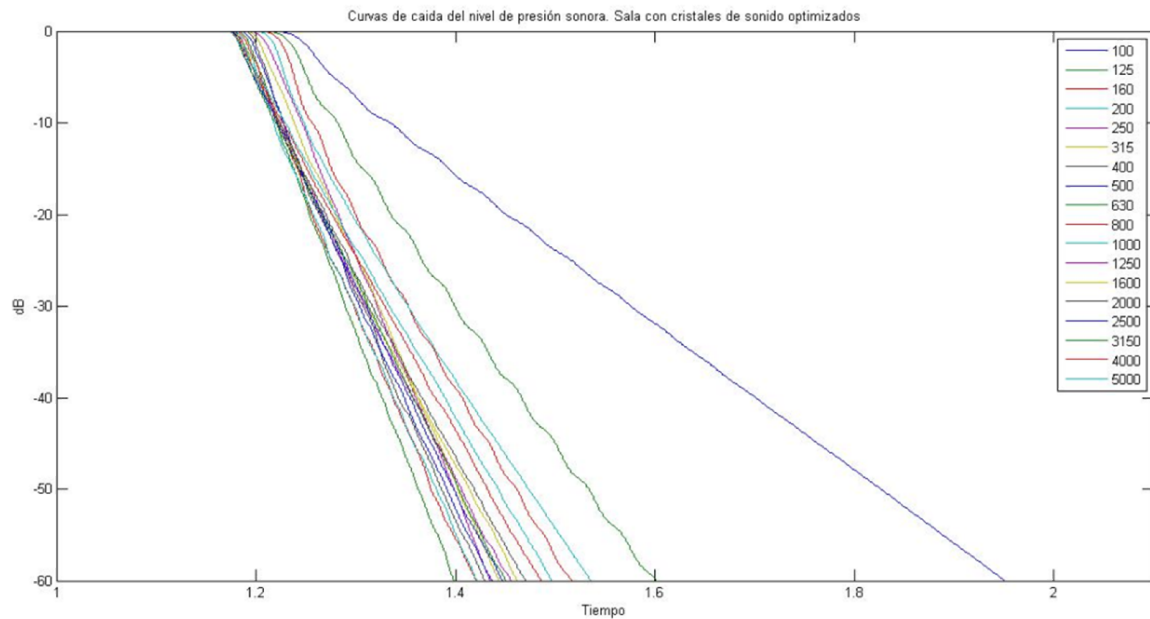


Fig.28. Curvas de caída de la sala con SCSD optimizados

Mediante una primera observación de las caídas es realmente difícil sacar conclusiones, resulta pues necesario extraer algún parámetro a través de la comparación de las curvas de caída a una recta. Una de las múltiples maneras existentes es el ajuste por mínimos cuadrados, a través del cual extraeremos una recta lo más parecida posible a cada una de las curvas de caída por banda de tercio de octavas, para posteriormente realizar una correlación entre la curva de caída y la recta calculada.

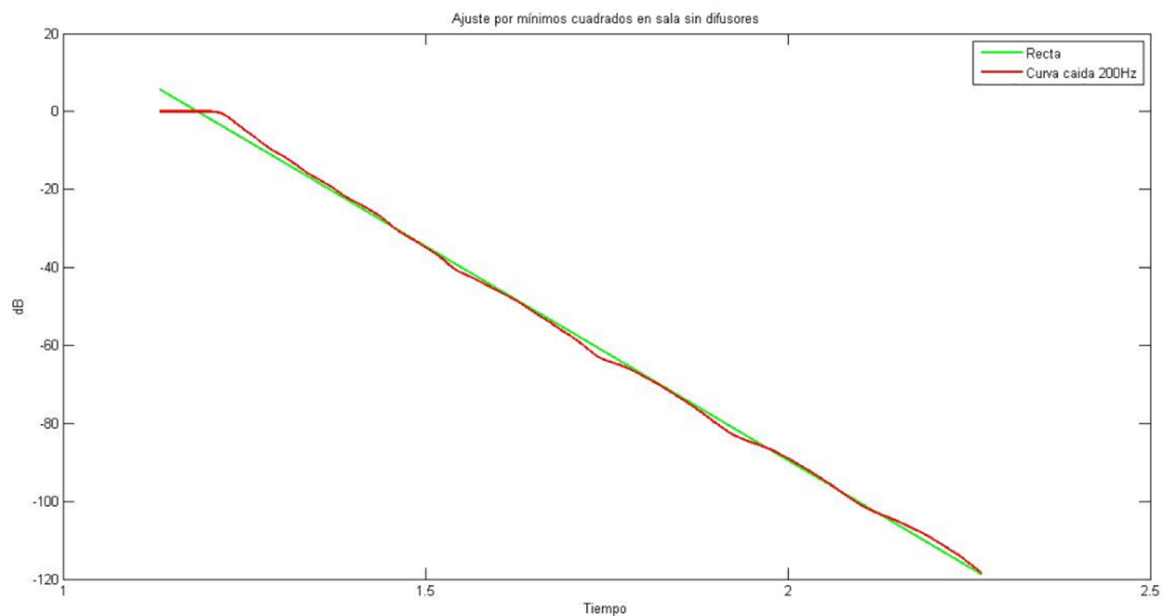


Fig.29. Ejemplo de recta de ajuste obtenida por mínimos cuadrados

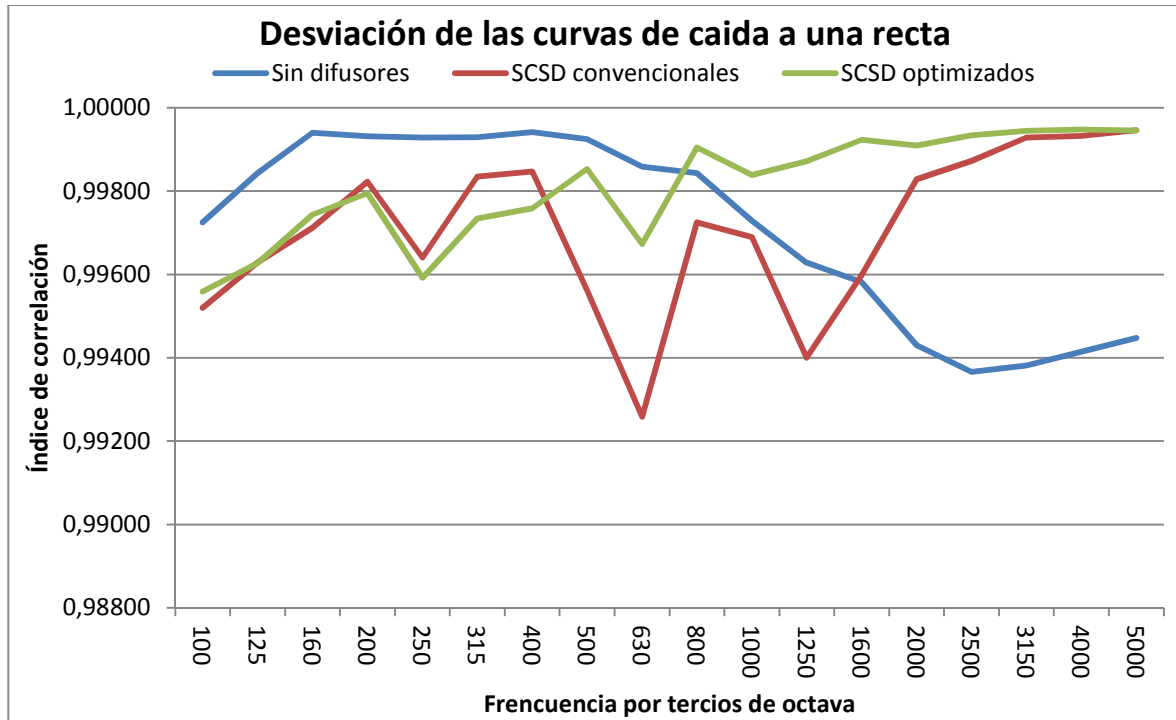


Fig.30. Resultados de la desviación de las curvas de caída respecto a una recta

Mediante la correlación de las curvas con las rectas mencionadas, obtenemos los coeficientes mostrados en la gráfica anterior. A pesar de que todos ellos se acercan drásticamente a 1 (ya que todas las curvas de caída son muy rectas), si miramos los decimales, podemos apreciar la diferencia. En la observación en la gráfica, podemos ver que sorprendentemente, la sala sin difusores, presenta una mayor linealidad en las curvas de caída hasta los 800 Hz, donde las salas con SCSD empiezan a superarla. Por tanto, vemos que en las bandas de frecuencias de interés, la sala sin difusores resulta superior en este parámetro.

## V. Programa de encuestas y parámetros subjetivos

En el presente apartado se busca obtener la valoración subjetiva de los parámetros acústicos de las salas estudiadas, para comprobar que los parámetros que consideramos como buenos objetivamente son en realidad buenos de una manera objetiva bajo la percepción de músicos.

Para realizarlo, procederemos de la misma manera que para el cálculo del IACC, es decir, colocaremos una ‘cabeza’ en la simulación, con un micrófono que simulará el oído derecho y otro simulando el izquierdo. Mediante el procedimiento ya explicado en el apartado III calcularemos la respuesta impulsiva, la cual convolucionaremos con un archivo de audio. De esta convolución obtenemos un archivo de audio para cada oído, que será la pista musical sonando tal y como sonaría con la sala construida. Por tanto podemos crear un archivo estéreo, colocando un archivo en la pista R y el otro en la L. Se crearán 3 archivos de audio, uno para cada tipología de sala (sin difusores, con difusores de cristales de sonido y con difusores de cristales de sonido optimizados). El objetivo es que estos archivos sean escuchados por un gran número de músicos que puedan valorar los distintos parámetros y comparar sus respuestas con los parámetros acústicos y de difusión de cada sala.

Para la realización se programa un sencillo test con la herramienta de interfaces gráficas de Matlab a través del cual los músicos pueden escuchar cada archivo de audio y valorarlo, siendo almacenados los resultados en un archivo de Excel con su nombre. Las encuestas han sido realizadas por Blanca Hervás Zafra quien está realizando el Trabajo Final del Máster de Música de la Universidad Politécnica de Valencia y por Iluminada Pérez Troya la cual realiza un doctorado de Música en el estudio de los difusores en cristales de sonido en la Universidad Politécnica de Valencia. Ambas son quienes han decidido las preguntas más adecuadas para ser incluidas en el test.

La pieza utilizada dura unos 10 segundos, está interpretada por un fagotista en cámara anecoica. Este hecho, produce que la pieza no tenga sonido de reverberaciones ni sonido ambiente. Esto la hace perfecta para la realización de las auralizaciones. La elección de un fagot está motivada por el hecho de que el fagot es un instrumento donde predominan las bajas frecuencias, que son las frecuencias donde este estudio cobra mayor importancia al ser en estas donde existen los mayores problemas en la difusión, por tanto donde podrá ser mejor apreciado el efecto de los difusores basados en cristales de sonido.

Resulta de vital importancia la elección adecuada de las preguntas a realizar a los músicos. Finalmente se decidió por parte de Blanca Hervás que el test constase de una pregunta genérica sobre cuál es el audio en el que cada encuestado cree que hay un mejor sonido y una pregunta que consta en puntuar distintos parámetros acústicos subjetivos. Los parámetros son los siguientes:

- Redondez: Contenido equilibrado de armónicos en todas las frecuencias.
- Brillo: Riqueza del contenido en alta frecuencia.
- Claridad: Grado de separación entre sonidos individuales.
- Nitidez: Grado de limpieza en general de sonido.
- Riqueza armónica: Cantidad de armónicos que acompañan a la frecuencia fundamental.

A través de las valoraciones de los músicos se realiza un análisis descriptivo estadístico.

### V.1. *Obtención de los archivos de audio*

Para la obtención de los archivos de audio, procederemos en primera instancia de la misma manera utilizada para el cálculo del IACC, es decir, se coloca una cabeza, que no será más que una condición de contorno circular de diámetro similar al de una cabeza humana, donde hacemos 0 la presión. A ambos lados de la misma colocamos 1 micrófono omnidireccional simulando cada uno de los 2 oídos. Mediante el procedimiento explicado en el apartado III, obtendremos las respuestas impulsivas de cada oído. Estas respuestas impulsivas se convolucionan con un archivo de audio, en este caso un pequeño fragmento musical interpretado por un Fagot:

$$y_R(t) = x(t) \otimes h_R(t)$$

$$y_L(t) = x(t) \otimes h_L(t)$$

Siendo  $h_R$  la respuesta al impulso del oído derecho y  $h_L$  la del izquierdo, mediante la convolución con  $x$ , que será la pista de audio en mono, obtendremos la pista de audio del canal R y del L, que podrán ser reproducidas en estéreo.

## V.2. Programación en Guide

Para poder tener la encuesta más controlada y automatizada, se considera conveniente la utilización de un pequeño software que permita simultáneamente escuchar las pistas de audio y contestar a una serie de preguntas personalizadas. No encontrando un software comercial que satisficiera estas premisas del modo en que nosotros considerábamos adecuado, se decide realizar la programación del mismo usando la herramienta de interfaces gráficas de Matlab, Guide. El código completo será adjuntado en los anexos del presente trabajo.

test

Escribe tu nombre completo:

Escucha los siguientes audios y contesta a las preguntas. Una vez cliques espera unos segundos a escuchar el sonido sin pulsar más de una vez seguida.

Audio 1      Audio 2      Audio 3

1.-Valora los siguientes aspectos relacionados con el sonido, puntuando del 1 al 10. Siendo 10 la máxima puntuación

Redondez	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Brillo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Claridad	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Nitidez	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Riqueza armónica	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

2.-¿Cual de los sonidos anteriores consideras que suena mejor?

1       2       3

GUARDAR RESULTADOS

Fig.31. Interfaz del software de encuestas

En el programa que se observa en la imagen anterior los encuestados deberán rellenar las distintas preguntas valorando los parámetros acústicos de los 3 audios, sin tener ninguna información previa sobre lo que representa cada uno de los 3, para evitar condicionar sus respuestas. Los resultados son almacenados en última estancia en un archivo de Excel con el nombre de la persona encuestada para posteriormente ser procesados.



### V.3. *Proceso de encuestas*

Para realizar las encuestas, se hace uso del material siguiente:

- Ordenador.
- Matlab 2013 desde donde se carga el programa de Test con los archivos de audio.
- Auriculares AKG-A44.

Las encuestas son realizadas como ya se ha explicado, antes a músicos o estudiantes de conservatorio, por Blanca Hervás Zafra e Iluminada Pérez Troya. La encuesta se realizó a una muestra de 20 individuos:

- Entre 21 y 25 años: 1 sujetos
- Entre 26 y 30 años: 2 sujetos
- Entre 31 y 35 años: 5 sujetos
- Entre 36 y 40 años: 9 sujetos
- Mayor de 40 años: 3 sujetos

#### V.4. Resultados de las encuestas

En las tablas siguientes, se observan los resultados de las puntuaciones a los distintos parámetros acústicos. Las puntuaciones están expresadas del 1 al 10, siendo 1 la mínima puntuación y 10 la máxima.

SALA 0		Parámetros Subjetivos				
Sujetos	Redondez	Brillo	Claridad	Nitidez	Riqueza Armónica	
1	6	5	6	5	6	
2	6	5	6	5	7	
3	8	5	7	4	7	
4	9	6	5	6	10	
5	7	6	6	7	7	
6	6	6	5	6	7	
7	7	6	6	7	7	
8	7	5	5	6	8	
9	5	3	4	3	5	
10	5	5	4	5	5	
11	6	4	4	4	6	
12	7	5	5	5	5	
13	5	3	4	4	5	
14	6	4	5	5	6	
15	6	5	5	6	6	
16	5	5	4	3	5	
17	6	4	4	4	6	
18	5	5	4	5	6	
19	4	3	3	3	5	
20	7	6	5	5	7	
Media	5,94	4,56	4,66	4,6	6,09	
Desv. Est.	1,18	1,01	0,99	1,21	1,26	

Tabla 4. Resultados de la pregunta 1 de las encuestas para la sala sin difusores

En los resultados obtenidos para la sala 0 (sin difusores) vemos que en general las valoraciones de los músicos han sido muy bajas. Destaca la riqueza armónica con un 6.09 de media y la redondez con un 5.94. El resto de parámetros obtienen una puntuación inferior a 5. Este conjunto de resultados indican una experiencia auditiva altamente deficiente.

SALA 1		Parámetros Subjetivos				
Sujetos	Redondez	Brillo	Claridad	Nitidez	Riqueza Armónica	
1	7	6	7	7	6	
2	7	6	7	7	7	
3	5	7	10	9	6	
4	8	7	7	8	7	
5	8	7	8	8	7	
6	7	7	7	7	8	
7	8	7	7	8	7	
8	8	6	7	8	8	
9	8	7	7	7	8	
10	8	7	8	7	7	
11	7	6	8	8	8	
12	8	7	7	8	7	
13	7	6	7	7	6	
14	7	7	8	8	7	
15	8	6	7	8	7	
16	7	7	7	7	8	
17	8	8	7	8	8	
18	7	8	8	7	8	
19	6	7	8	8	7	
20	7	8	8	8	6	
Media	7,2	6,79	7,44	7,61	7,07	
Desv.Est.	0,8	0,67	0,76	0,59	0,75	

Tabla 5. Resultados de la pregunta 1 de las encuestas para la sala con SCSD no optimizados

En la sala 1 (Difusor de cristales de sonido no optimizado) los resultados mejoran significativamente en todos los apartados, solo estando por debajo del 7 el brillo con un 6,79. Podemos afirmar que la experiencia auditiva mejora enormemente respecto a la sala 0.

SALA 2		Parámetros Subjetivos				
Sujetos	Redondez	Brillo	Claridad	Nitidez	Riqueza Armónica	
1	8	7	8	9	8	
2	9	8	9	9	6	
3	7	8	9	10	5	
4	9	9	6	9	6	
5	9	8	9	9	6	
6	8	8	8	9	7	
7	9	9	9	10	8	
8	9	9	8	10	7	
9	7	6	6	7	7	
10	9	8	8	9	8	
11	9	9	10	10	8	
12	8	9	9	9	8	
13	9	9	9	9	7	
14	8	8	9	9	8	
15	9	9	10	10	8	
16	8	9	9	9	7	
17	7	8	9	9	8	
18	7	8	8	9	8	
19	8	9	9	9	8	
20	8	9	9	10	7	
Media	8,18	8,26	8,4	9,14	7,12	
Desv. Est.	0,79	0,81	1,05	0,7	0,91	

Tabla 6. Resultados de la pregunta 1 de las encuestas para la sala con SCSD optimizados

En los resultados de la sala 2 (con SCSD optimizados), vemos que todas y cada una de las valoraciones subjetivas son más altas que en las salas 0 y 1. Destaca la baja riqueza armónica con un 7,12, ya que el resto de valores superan todos el 8, sobresaliendo la nitidez con un 9,14 de media.

Como primera conclusión a la luz de estos datos, podría ser concluido, que a los oyentes profesionales, les gusta más la sala basada en cristales de sonido optimizados. Sin embargo, para profundizar en el estudio, se grafican los resultados de cada uno de los parámetros con su desviación estándar:

En el eje x aparecen numeradas las 3 salas, siendo 1 la sala 0, 2 la sala 1 y 3 la sala 2. En el eje y, se representan las puntuaciones medias de las mismas en cada parámetro. La barra vertical coincidiendo con los ejes x representa la desviación estándar de cada parámetro.

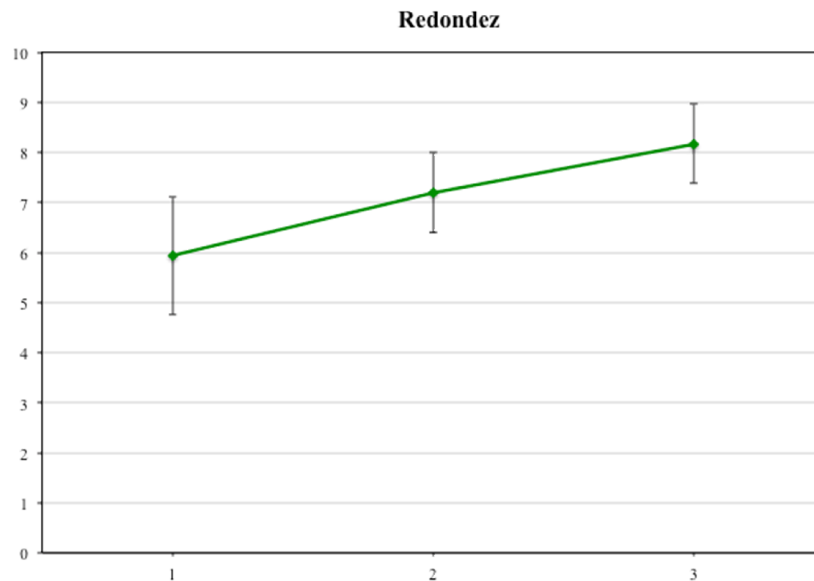


Fig.32. Resultados de la redondez para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una

La redondez en las salas con difusores ha sido mejor valorada en las salas con difusores, sin embargo, existe una gran coincidencia de datos entre las 3 salas y la diferencia no es tan alta entre las puntuaciones. No se puede afirmar con rotundidad, por tanto, que los SCSD ayuden a mejorar la redondez del sonido.

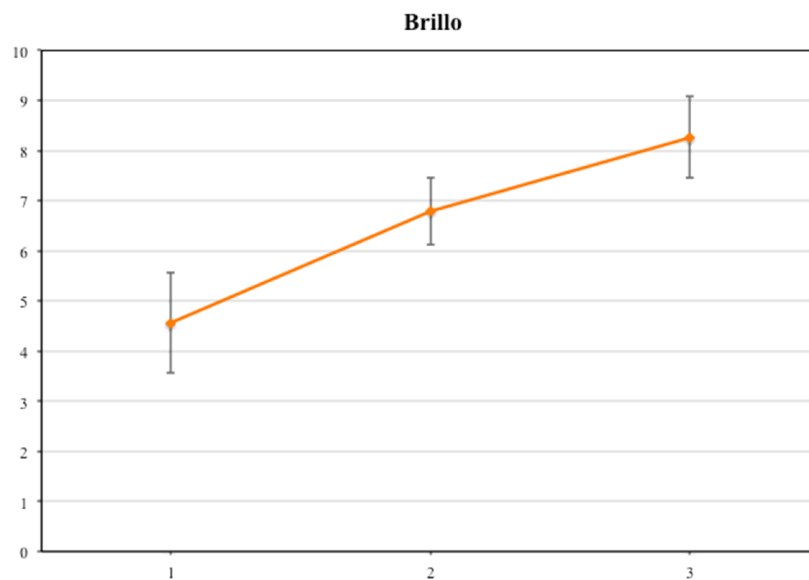


Fig.33. Resultados del brillo para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una

La puntuación obtenida sobre el brillo, refleja un mayor cambio en los resultados con o sin cristales de sonido. Como se puede observar, no existe coincidencia de datos entre la sala 0 y la 1 y 2. A través del brillo tampoco somos capaces de establecer una diferencia significativa entre la sala con SCSD no optimizados y SCSD optimizados por la coincidencia entre los datos.

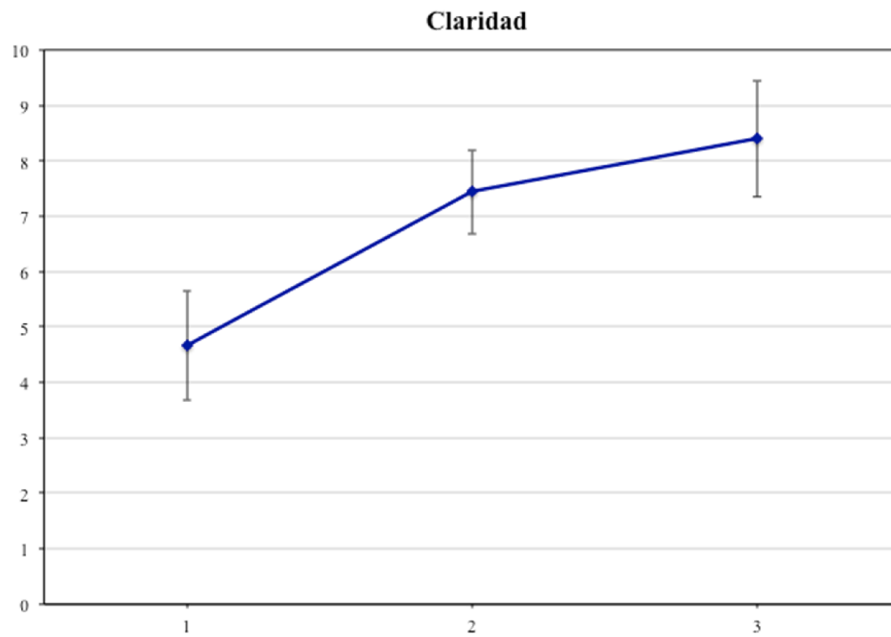


Fig.34. Resultados de la claridad para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una

En la claridad se repite un resultado similar al del brillo, aunque se ve con mayor claridad la diferencia entre las salas con y sin difusores. Sigue siendo imposible determinar la diferencia entre los 2 tipos de difusores

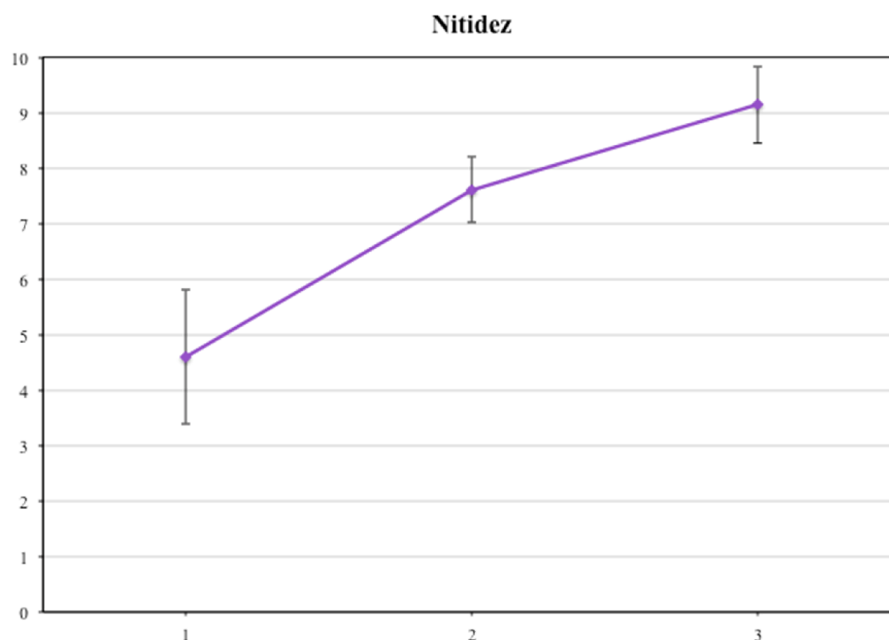


Fig.35. Resultados de la nitidez para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una

En cuanto a la nitidez comenzamos a observar no solo una diferencia entre la sala sin difusores y las otras dos, si no que se trata del único parámetro en el cual no existe coincidencia de datos entre la sala 1 y la sala 2, lo que podría concluirse como una influencia de los SCSD optimizados sobre los SCSD no optimizados en lo que a nitidez se refiere.

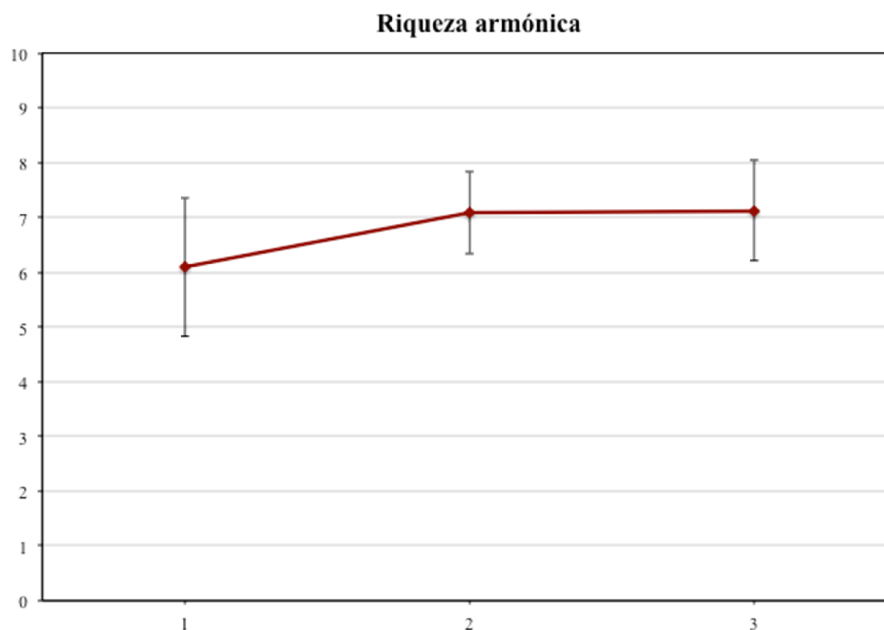


Fig.36. Resultados de la riqueza armónica para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una

La riqueza armónica resulta ser el parámetro subjetivo en el cual han existido menor diferencia entre las 3 salas. La diferencia entre las 3 es ínfima y la coincidencia de datos es total, por lo que no se puede afirmar de ninguna manera que la inclusión de SCSD influya sobre la riqueza armónica.

La segunda y última pregunta del test pregunta cuál es la sala favorita del encuestado, los datos no dejan lugar a la duda. Ni una sola persona de las encuestadas prefiere la sala 0, por lo que se demuestra que los músicos prefieren las salas con cristales de sonido. Entre las salas 1 y 2, existe mayor controversia, puesto que un 45% prefiere la sala con difusores basados en cristales de sonido no optimizados y un 55% prefiere la sala con difusores optimizados, lo que va en línea con los resultados obtenidos en la primera pregunta.

## VI. Resumen de resultados

Ante la gran cantidad de datos obtenidos resulta necesario pensar en ellos de una manera conjunta para extraer conclusiones. Como objetivo general este trabajo tenía el propósito de evaluar objetivamente y subjetivamente la influencia de SCSD en el campo sonoro de una sala. Los parámetros acústicos nos permiten llegar a conclusiones más o menos contundentes que se ven reflejadas en la siguiente tabla:

	Sin difusores	SCSD no optimizados	SCSD optimizados	Unidades
EDT	0,51	0,30	0,27	Segundos
T60	0,57	0,38	0,30	Segundos
BR	1,03	1,41	1,41	Cociente
Br	1,08	2,04	1,45	Cociente
Tr1	1,05	1,44	1,03	Cociente
C80	4,81	10,77	12,69	dB
C50	2,86	5,82	8,00	dB
D	-6,64	-5,09	-4,04	dB

Tabla7. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros acústicos

A la luz de la tabla anterior, se pueden comentar las conclusiones extraídas con los distintos parámetros:

- La introducción de difusores dentro de esta sala ha producido un descenso del tiempo de reverberación (tanto EDT como T60), tanto en los SCSD no optimizados como en los optimizados, haciendo que la sala sea mucho más seca. Este efecto resulta interesante, ya que no forma parte de los efectos propios de un difusor porque no están pensados para ser absorbentes. El tiempo de reverberación no tiene un parámetro fijo a conseguir, si no que depende del tipo de música que se quiera interpretar o el uso al que vaya destinado, por lo que no podemos afirmar que los difusores mejoren ese aspecto, solo que lo varían.
- La calidez (BR) de la sala ha aumentado considerablemente, aumentando casi un 50% con los SCSD, no habiendo distinción entre los 2 tipos de difusores en este aspecto.
- El brillo de la sala también es mucho mayor, sobretodo en la sala con difusores no optimizados, donde el efecto es muy notable aumentando casi el doble del valor del mismo. Podemos afirmar sin duda que la sala ha mejorado con la inclusión de difusores, aumentando el valor de estos parámetros significativamente.



- La claridad y la definición se han visto también claramente aumentadas en ambas salas, sobretodo en el caso de los difusores optimizados, en los cuales se alcanzan 8dB en el C50 respecto a los 2,86 de la sala sin difusores. La definición también aumenta, pero en ningún caso llega al valor mínimo recomendado de 0.5. El C80 resulta también difícil de leer, pero no se encuentra dentro de los valores recomendados en ninguna de las salas. El C50 claramente ha mejorado superando ampliamente el valor mínimo de 2 dB.

### Parámetros de difusión:

Los parámetros de difusión son probablemente el punto fundamental de este trabajo, el análisis de los mismos es lo que nos permitirá discernir si un difusor resulta útil o no. En este trabajo se han obtenido 6 parámetros distintos: Coloración de la señal, desviación del tiempo de reverberación, IACC, factor de energía lateral, eficiencia energética y la linealidad de las curvas de caída. En la tabla siguiente podemos ver a modo de resumen las medias de los valores obtenidos en cada uno de los parámetros:

MEDIA BAJA FRECUENCIA	Sin difusores	SCSD no optimizados	SCSD optimizados
Coloración de la señal	4,33	1,56	1,51
Desviación del $\tau_t$	0,10	0,06	0,05
IACC early	0,67	0,60	0,69
IACC late	0,59	0,43	0,65
LEF	0,59	0,64	0,62
CEE	0,56	0,76	0,82
Curvas de caída	0,99891	0,99715	0,99687

	Mejor resultado
	2º Mejor resultado

Tabla 8. Media de los resultados de difusión en baja frecuencia (hasta 400Hz)

La presente tabla no pretende considerarse como un resultado definitivo de cada parámetro, puesto que el análisis de los mismos es mucho más complejo y debe ser considerado por bandas de octavas o de tercio de octavas. Todo esto ya ha sido comentado en el apartado específico de cada parámetro dentro del punto IV.

En la tabla observamos marcadas en verde las casillas de la sala con un mejor resultado en cada parámetro:

- Coloración de la señal (apartado IV.2.): los resultados obtenidos en este apartado no dejan lugar a dudas. La inclusión de difusores en la sala disminuye la coloración y la formación de modos propios. Se puede observar una menor diferencia entre los SCSD optimizados y los no optimizados, pero sobretodo en baja frecuencia los difusores optimizados consiguen un mejor resultado. (Apartado IV.2). En la tabla de resumen vemos que la desviación media entre los valores de presión sonora dentro de cada banda es significativamente menor en las salas con difusores y algo inferior en la sala con difusores optimizados
- Desviación del tiempo de reverberación (apartado IV.3.): al igual que en el apartado anterior, resulta evidente la mejora obtenida utilizando los cristales de sonido, reduciendo significativamente la desviación estándar respecto a la sala sin estos. Resulta más complicado discernir si los difusores optimizados tienen mejor resultado que los convencionales, ya que son muy similares, sin embargo se observa mayor regularidad en la desviación por frecuencias en los SCSD optimizados. Como se puede ver en la tabla, la desviación es algo menor en la sala con SCSD optimizados que en la sala con SCSD no optimizados.
- En cuanto al IACC (apartado IV.4.), tanto en el early como en el late en baja frecuencia, observamos que los resultados se decantan ampliamente por la sala con SCSD optimizados, siendo como segunda mejor la sala sin difusores. Resulta llamativo que la sala con SCSD no optimizados no alcance unos resultados ni tan siquiera similares a la sala sin difusores. Por tanto vemos que el IACC mejora con el uso de SCSD optimizados.
- En el análisis del factor de energía lateral (LEF apartado IV.5.) podemos ver que es el único parámetro en el cual no hemos podido obtener un mejor resultado en las salas con SCSD. En la tabla a modo de resumen de este apartado vemos que la media de resultados otorga un índice superior a la sala sin difusores. Si observamos la gráfica del LEF presente en el apartado IV.5 a pesar de que podemos observar mejores resultados en baja frecuencia sobretodo en la sala con SCSD optimizados, los valores obtenidos resultan confusos y no permiten una valoración clara de este parámetro. Por tanto no podemos obtener una valoración clara de los resultados en este punto.
- En lo que al coeficiente de eficiencia energética se refiere (CEE apartado IV.6.) volvemos a obtener unos resultados claros, que no solo otorgan un índice medio mayor en las salas con SCSD y especialmente en la sala con SCSD optimizados, si no que en un análisis por frecuencia los resultados son muy superiores en baja frecuencia, siendo significativamente más alto el índice en la sala con SCSD optimizados.
- Como último parámetro, la linealidad de las curvas de caída (apartado IV.7.) otorga unos resultados menos claros, ya que el índice de correlación obtenido, es muy cercano a la unidad. Podemos ver como la sala sin difusores tiene un resultado mejor en baja frecuencia

a las salas con SCSD. Si hiciéramos una media en todo el espectro frecuencial, veríamos que la sala con SCSD optimizados tiene el mejor resultado en el global del espectro, pero las bandas verdaderamente interesantes son las de baja frecuencia, por lo concluimos que este parámetro no mejora con los SCSD.

**Parámetros subjetivos:**

A través de las encuestas desarrolladas en el punto V del presente trabajo se han obtenido las valoraciones subjetivas de un conjunto de músicos profesionales sobre el sonido de la sala. Dichos resultados no dejan ninguna duda sobre que los SCSD han conseguido crear una mejor experiencia sonora dentro de la sala. Esto puede quedar resumido en la tabla siguiente de puntuaciones de los distintos parámetros:

	Sin difusores	SCSD no optimizados	SCSD optimizados
Redondez	5,94	7,2	8,18
Brillo	4,56	6,79	8,26
Claridad	4,66	7,44	8,4
Nitidez	4,6	7,61	9,14
Riqueza Armónica	6,09	7,07	7,12
MEDIA	5,17	7,222	8,22

Tabla 9. Resumen de los resultados obtenidos en la pregunta 1 de las encuestas

Los resultados de los parámetros dejan claro que de manera general los músicos han valorado mejor los parámetros de la sala con SCSD optimizados. En cambio al preguntarles directamente cual es la sala en la que mejor experiencia auditiva tienen los resultados son menos claros, pues un 55% de la gente prefiere la sala con SCSD optimizados y un 45% prefiere la sala con SCSD convencionales. Una encuesta que estudie una población mayor podría ayudarnos a sacar conclusiones más contundentes, sin embargo, lo que si podemos afirmar, es que todos los encuestados prefieren las salas con difusores y que un porcentaje mayor de ellos prefiere la sala con SCSD optimizados.

## VII. Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El uso de difusores basados en cristales de sonido puede ayudar a mejorar ciertos parámetros acústicos, tales como el Brillo, la calidez, la claridad y la definición en una sala.
- El uso de SCSD tiene un efecto notorio en la difusión en bajas frecuencias, mejorando la difusión en estas bandas en todos los parámetros medidos.
- El uso de SCSD mejora la experiencia sonora de los oyentes y puede ser claramente percibida por oyentes con un oído entrenado.
- Los SCSD optimizados han tenido de manera general mejores resultados que los SCSD convencionales en prácticamente todos los parámetros estudiados, tanto en los objetivos como en los subjetivos.
- El uso de técnicas de simulación tales como FDTD resulta un método eficaz para evaluar el campo sonoro de recintos acústicos, ahorrando los enormes costes en material y personal que supondría realizar el experimento en un recinto real.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Antoni Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universidad Politécnica de Catalunya, 1998 .
- [2] Trevor J. Cox and Peter D'Antonio, *Acoustic Absorbers and Diffusers*. Spon Press 2004.
- [3] Tor Erik Vigran. *Building Acoustics*. Taylor & Francis 2007.
- [4] Fco. Javier Redondo Pastor. *Caracterización de la Difusión provocada por dispositivos utilizados en el Acondicionamiento Acústico*. Memoria de Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia 2001.
- [5] Víctor Sánchez Morcillo, Rubén Picó, Fco. Javier Redondo. *Sound diffusers based on Sonic Crystals*. The Journal of the Acoustical Society of America. October 2013.
- [6] Fco. Javier Redondo Pastor, Rubén Picó. M.R. Avis, T. J. Cox. *Predicción del coeficiente de scattering mediante un esquema FDTD*. Artículo. TecniAcústica Cádiz 2009.
- [7] Sergio Castiñeira Ibáñez, Constanza Rubio, Juan Vicente Sánchez Pérez, Vicente Romero García, Lluís Miguel García Raffi. *Pantallas Acústicas Basadas en Cristales de Sonido de Segunda Generación*. Artículo. TecniAcústica Cáceres 2011.
- [8] C.C.J.M. Hak, R. H. C. Wenmaekers, L. C. J. van Luxemburg. *Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters*. Acta Acustica United with Austica. Vol. 98 (2012) 907-915.
- [9] Julián Mauricio Barreiro Pérez. *Estudio sobre la mejora de la difusión en una sala mediante la técnica de simulación diferencias finitas en el dominio temporal*. Trabajo final de Master. Ingeniería Acústica. Universidad Politécnica de Valencia 2014.
- [10] José Miguel Fuster Fajardo. *Estudio de las aplicaciones de los difusores de sonido basados en cristales de sonido*. Trabajo final de Master.. Ingeniería Acústica. Universidad Politécnica de Valencia 2013.
- [11] Andrés Bernhard Molina. *Construcción y caracterización de un prototipo de difusor periódico de tres dimensiones de estructura cristalina*. Trabajo final de Master.. Ingeniería Acústica. Universidad Politécnica de Valencia 2012.

**Índice de figuras**

	Pág.
Fig.1. Ejemplo de difusores de Schroeder .....	7
Fig.2. Esquema del efecto de un difusor de Schroeder.....	7
Fig.3. SCSD convencionales (arriba) optimizados (abajo).....	10
Fig.4. Dimensiones de la sala y posición de la fuente sonora.....	11
Fig.5. Sala con difusores de cristales de sonido convencionales.....	11
Fig.6. Sala con difusores de cristales de sonido optimizados.....	12
Fig.7. Representación gráfica de la malla espacial usada para la simulación.....	14
Fig.8. Ejemplo de resolución de malla con paredes no ortogonales .....	15
Fig.9. Esquema de la obtención de la respuesta impulsiva en un sistema LTI.....	16
Fig.10. Proceso de simulación con SCSD convencionales.....	17
Fig.11. Proceso de simulación con SCSD optimizados.....	17
Fig.12. Colocación de los micrófonos en la simulación.....	18
Fig.13. Diagramas polares de los micrófonos utilizados. Omnidireccional (a) direccional (b).....	18
Fig.14. Resultados EDT .....	20
Fig.15. Resultados T60.....	20
Fig.16. Resultados C80 .....	21
Fig.17. Resultados C50 .....	21
Fig.18. Resultados de D (definición).....	22
Fig.19. Gráfica de la coloración de la señal.....	25
Fig.20. Gráfica de la desviación estándar del EDT de la señal.....	28
Fig.21. Colocación de la cabeza con micrófonos en la simulación .....	29
Fig.22. Resultados del IACC early.....	30
Fig.23. Resultados del IACC late .....	30
Fig.24. Resultados del LEF .....	33
Fig.25. Resultados del CEE.....	34
Fig.26. Curvas de caída de la sala sin difusores .....	36
Fig.27. Curvas de caída de la sala con SCSD convencionales .....	36
Fig.28. Curvas de caída de la sala con SCSD optimizados .....	37
Fig.29. Ejemplo de recta de ajuste obtenida por mínimos cuadrados.....	37
Fig.30. Resultados de la desviación de las curvas de caída respecto a una recta.....	40
Fig.31. Interfaz del software de encuestas.....	41
Fig.32. Resultados de la redondez para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una .....	46
Fig.33. Resultados del brillo para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una .....	46
Fig.34. Resultados de la claridad para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una.....	47
Fig.35. Resultados de la nitidez para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una.....	47
Fig.36. Resultados de la riqueza armónica para las 3 salas con la desviación de resultados de cada una .....	48

**Índice de tablas**

	Pág.
Tabla 1. Analogía entre las ondas acústicas y las electromagnéticas en FDTD. ....	12
Tabla 2. Resultados de BR, Br y Tr1 .....	23
Tabla 3. Modos propios del recinto .....	26
Tabla 4. Resultados de la pregunta 1 de las encuestas para la sala sin difusores.....	43
Tabla 5. Resultados de la pregunta 1 de las encuestas para la sala con SCSD no optimizados.....	44
Tabla 6. Resultados de la pregunta 1 de las encuestas para la sala con SCSD optimizados.....	45
Tabla 7. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros acústicos.....	49
Tabla 8. Resumen de los resultados obtenidos en los parámetros de medida de la difusión .....	50
Tabla 9. Resumen de los resultados obtenidos en la pregunta 1 de las encuestas .....	52

## **Anexos**

Anexo 1. Programas de cálculo de FDTD y la respuesta impulsiva.

Anexo 2. Programas de cálculo de los parámetros acústicos.

Anexo 3. Programas de cálculo de los parámetros de difusión.

Anexo 4. Programa de encuestas creado en Guide.

Anexo 5. Tablas de resultados en Excel