



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLI TÉCNICA SUPERIOR DE GANDIA  
I.T. TELECOMUNICACIÓN (SONIDO E IMAGEN)



**ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO Y  
SIMULACIÓN DE UN RECINTO DE  
ENSAYOS.  
ADAPTACIÓN A ESTUDIO DE GRABACIÓN.  
TRABAJO DE FINAL DE CARRERA**

**JUAN JOSÉ ALMENDROS VIDAL  
TUTOR: DR. RUBÉN PICÓ VILA  
GANDIA, SEPTIEMBRE 2012**

# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b>	4
1.1. Objetivos	4
1.2. Plan de desarrollo	5
1.2.1. Realización de medidas acústicas	
1.2.2. Simulación con catt-acoustics e intentar obtener los mismos valores	
1.2.3. Predicción de los resultados mediante la simulación en catt-acoustic	
1.3. Ubicación y tamaño de la sala	6
<b>2. Conceptos teóricos básicos</b>	7
2.1. El sonido.	8
2.1.1. Introducción al acondicionamiento acústico	
2.1.2. Reflexión	
2.1.3. Difraccion	
2.1.4. Absorción	
2.1.5. Difusión	
2.1.6. El decibelio	
2.2. Propagación en recinto cerrado	14
2.2.1. Sonido reflejado	
2.2.2. Estudio de las primeras reflexiones	
2.2.3. Modos propios de una sala	
2.3. Parámetros acústicos	19
2.3.1. Nivel de presión sonora(spl)	
2.3.2. Tiempo de reverberación(TR)	
2.3.2.1. Formula de sabine	
2.3.2.2. Formula de eyring	
2.3.2.3. Calidez acústica(br)	
2.3.2.4. Brillo(br)	
2.4. Defectos acústicos	24
2.4.1. Ecos	
2.4.2. Focalización del sonido	
2.4.3. Efecto “seat dip”	
2.4.4. Efecto “larsen”	
2.5. Materiales de acondicionamiento	27

2.5.1. Materiales absorbentes	
2.5.2. Resonadores	
2.5.3. Reflectores	
2.5.4. Difusores	
<b>3. Resultados prácticos</b>	<b>43</b>
3.1. Diseño de la sala	43
3.2. Simulación	43
3.2.1. Simulación receptor 1	
3.2.2. Simulación receptor 2	
3.3. Modificación de la sala	46
3.3.1. Simulación receptor 1 con pared adicional	
<b>4. Conclusiones</b>	<b>51</b>
<b>5. Bibliografía</b>	<b>53</b>

## **1. INTRODUCCIÓN.**

El proyecto que presentamos a continuación es una simulación acústica de una sala de ensayos de una banda de música la cual ha estado construida recientemente, tanto para realizar ensayos de banda instrumental como diferentes audiciones musicales. No obstante, pensamos que esta sala no tiene la acústica mas deseada para dicho uso y por tanto vamos a realizar un estudio acústico que nos mostrará la absorción, difracción, reverberación, etc. que esta presenta. Así pues, tras analizar los diferentes parámetros llevaremos a cabo los ajustes necesarios para mejorar y acondicionar las instalaciones acústica y sonoramente teniendo en cuenta la finalidad para la que fue construida.

Todo esto será visto a través de un software de simulaciones llamado CATT-Acoustics, donde se nos muestran diferentes curvas de reverberación, respuestas al impulso, etc. Así como también, la sala en 3d con sus diferentes elementos(paredes, puertas, ventanas...).

### **1.1. OBJETIVOS.**

Los objetivos que pretendemos alcanzar mediante la realización de este proyecto son los siguientes:

Por una parte hacer un estudio, simulación y realizar el diseño del local en catt-acoustics.

Para ello tomaremos medidas del recinto, a continuación realizaremos los cálculos pertinentes para obtener los valores de los parámetros acústicos. Una vez tenemos los resultados prácticos del local deberíamos hacer un diseño en catt-acoustic del recinto y hacer las simulaciones pertinentes para así poder probar diferentes propuestas de solución y mejora de la acústica de la sala.

Por otra parte, pasaremos a realizar un diseño alternativo a la sala construyendo un tabique en una parte de la sala para cambiar el tamaño y

por tanto el comportamiento acústico de dicha sala.

## **1.2. PLAN DE DESARROLLO.**

### **1.2.1. Realización de medidas acústicas.**

Se realizan medidas métricas de la sala para luego pasar a ver donde se pueden obtener los distintos nodos para las distintas frecuencias, para luego hacer las modificaciones necesarias para atenuar o acentuar dichas frecuencias según convenga.

### **1.2.2. Simulación con *catt-acoustics* e intentar obtener los mismos valores.**

Con los resultados ya vistos haremos un diseño en el programa de simulación con las características del local. Teniendo en cuenta los elementos constructivos de las paredes (bloques), techo (recubierto de talla), los ventanales, volumen del recinto y geometría del local.

Una vez realizado el diseño se hará una simulación, esperando que el resultado sea lo más aproximado a los resultados obtenidos. Si vemos que no están muy relacionados deberemos hacer algún ajuste en los materiales, ya que puede que varíe algo de lo que consta en planos a la realidad, para que los resultados sean lo más similares posibles.

El objetivo de que se sean lo más parecidos posibles es con el objetivo de que cuando hagamos la propuesta de acondicionamiento y apliquemos la solución de acondicionamiento y realicemos la simulación, los resultados se acerquen al máximo a los resultados reales.

### **1.2.3. Predicción de los resultados mediante la simulación en *catt-acoustic*.**

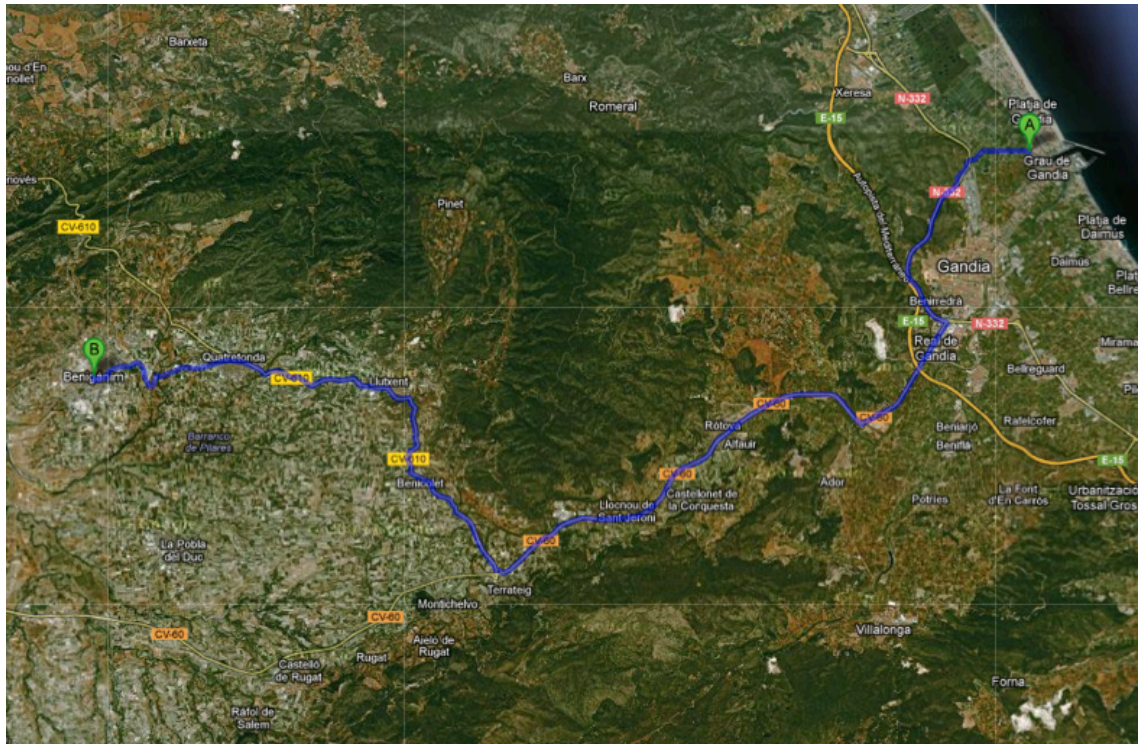
Una vez obtenidas las diferentes soluciones propuestas, las aplicaremos en nuestro recinto simulado. De esta manera obtendremos claramente en que carece y en que priman las diferentes soluciones. Sabiendo que no podremos llegar al equilibrio de que todo los parámetros

estén dentro de los márgenes recomendados.

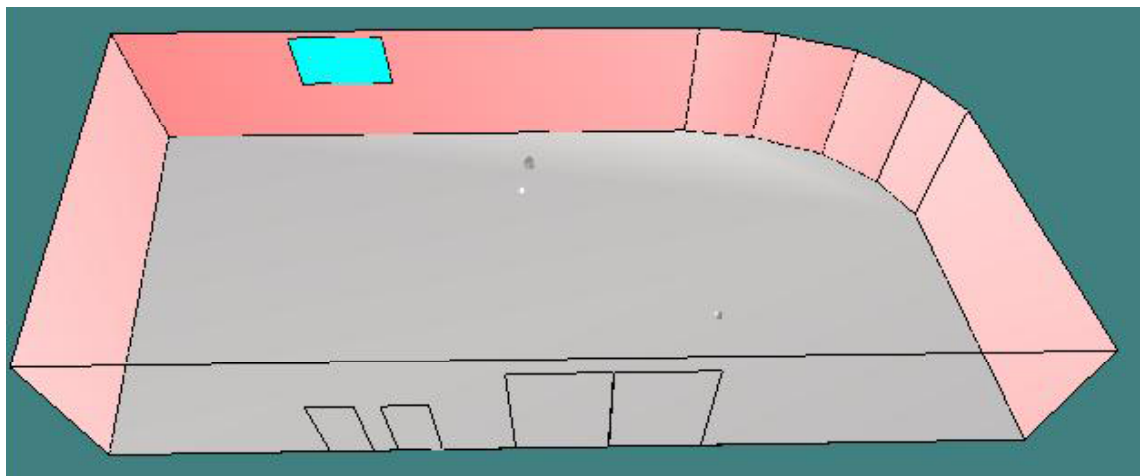
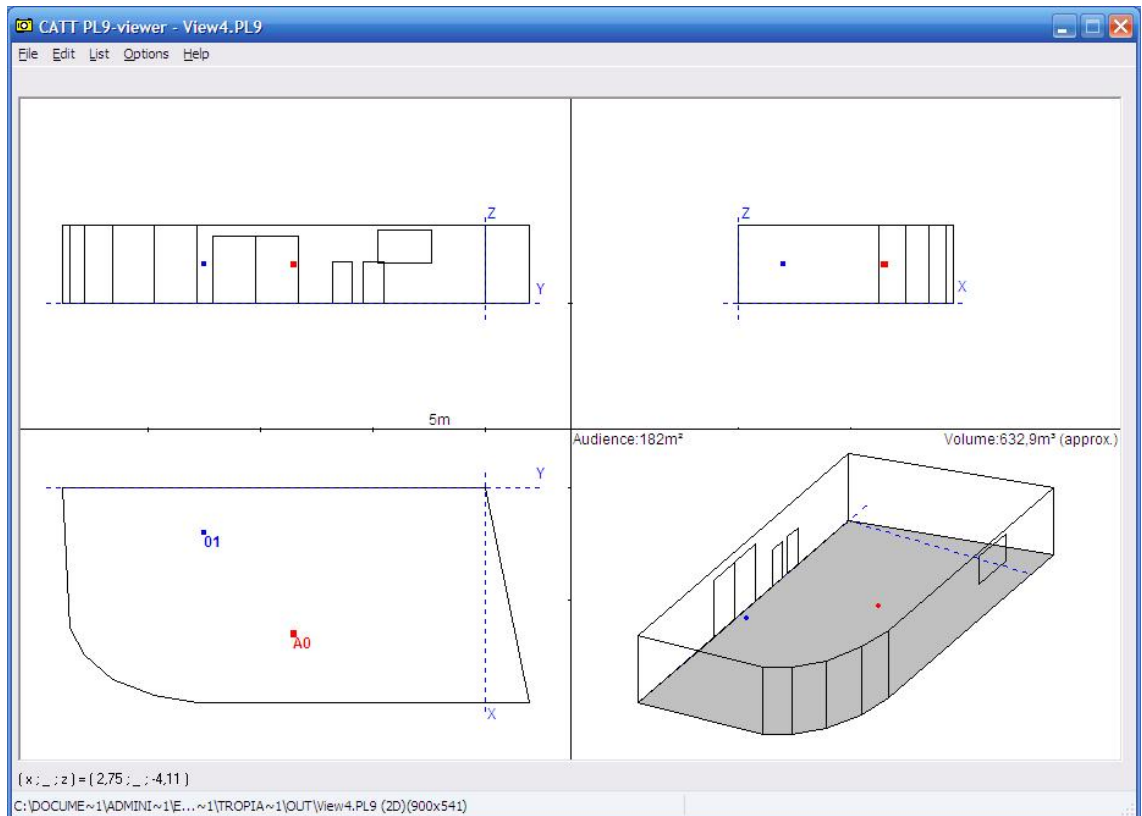
Así que habrá que dar más peso a unos que a otros para intentar llevar nuestro recinto a que por lo menos estos parámetros estén dentro de los márgenes recomendados y así es como nos decidiremos por la solución más adecuada.

### 1.3. UBICACIÓN Y TAMAÑO DE LA SALA.

El local a ensayar, se encuentra en la población de Benigánim, a unos 60 kilómetros de Valencia, en la Vall d'Albaida. Es un local dedicado exclusivamente a ensayos de la S.M. La Tropical de Benigánim.



El local está situado a las afueras del casco urbano, pero junto al barrio residencial. No tiene edificios unidos a sus laterales. De esta manera evitaremos problemas con los ruidos que puedan proporcionar los vecinos y los que nosotros podamos proporcionar hacia ellos y así evitar molestias.



## 2. Conceptos teóricos básicos.

### 2.1 El sonido.

El sonido es un fenómeno vibratorio transmitido en forma de ondas. Para que se genere un sonido es necesario que vibre alguna fuente. Las vibraciones pueden ser transmitidas a través de diversos medios elásticos, entre los más comunes se encuentran el aire y el agua. La fonética acústica concentra su interés especialmente en los sonidos del habla: cómo se

generan, cómo se perciben, y cómo se pueden describir gráfica y/o cuantitativamente.

### **2.1.1 Introducción al acondicionamiento acústico**

La finalidad de acondicionar acústicamente un determinado recinto (cerrado o al aire libre) es lograr que el sonido proveniente de una fuente o fuentes sea irradiado por igual en todas direcciones logrando un campo sonoro difuso ideal.

Esta uniformidad no siempre se consigue y la acústica arquitectónica, intenta aproximarse al máximo a este ideal a través de ciertas técnicas que aprovechan las cualidades de absorción , reflexión y difusión de los materiales constructivos de techos, paredes y suelos y de los objetos u otros elementos presentes en el recinto. De hecho, cosas tan aparentemente triviales como la colocación o eliminación de una moqueta, una cortina o un panel, son cruciales y pueden cambiar las condiciones acústicas de un recinto.

Dentro de los recintos cerrados, es fundamental conseguir un equilibrio adecuado entre el sonido directo y el campo sonoro reverberante. Por ello, un adecuado acondicionamiento acústico implica que las ondas reflejadas sean las menos posibles, por lo que desempeña un papel la capacidad de absorción de los materiales absorbentes que minimizarán la reverberación indeseada o ecos que pueden dificultar la inteligibilidad de la comunicación sonora.

### **2.1.2. Reflexión**

Una de las propiedades de las ondas sonoras es la reflexión, entendiendo por tal su rebote sobre una superficie u objeto; parte de su energía se pierde en cada citado rebote, absorbida por la superficie u objeto sobre el que incide, por lo que la onda reflejada posee menos energía que la onda incidente.



## MECANISMO DE REFLEXIÓN ACÚSTICA

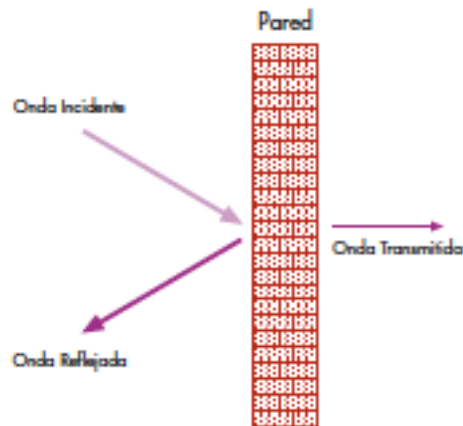


Fig. 1.

La reflexión de las ondas sonoras cumple las leyes de la óptica geométrica siempre que las dimensiones de las superficies sobre las que inciden sean superiores a su longitud de onda; así como que las rugosidades de dichas superficies sean inferiores a su ya citada longitud de onda; como se recordará la longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre frentes de ondas consecutivas.

Esta característica de la reflexión tiene una gran importancia arquitectónica, pues permite orientar las reflexiones sonoras en función de la forma de las superficies reflectantes, de tal manera que colocando paneles o lamas de diversos materiales (madera, metacrilato, etc.) y formas apropiadas de los mismos, podemos conseguir orientar las ondas sonoras, hacia zonas de un local en que sin estas disposiciones no les llegaría el sonido o sólo muy debilitado; como se podrá comprender tiene una importancia capital en el diseño de salas de conciertos, auditorios etc.

La reflexión de las ondas sonoras cumple las leyes de la óptica geométrica siempre que las dimensiones de las superficies sobre las que inciden sean superiores a su longitud de onda; así como que las rugosidades de dichas superficies sean inferiores a su ya citada longitud de onda; como se recordará la longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre frentes

de ondas consecutivas.

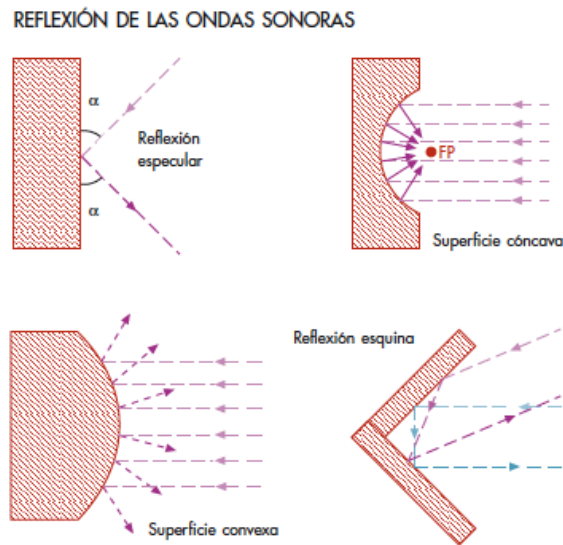


Fig. 2.

### 2.1.3. Difracción

La difracción consiste en que una onda puede rodear un obstáculo o propagarse a través de una pequeña abertura. Aunque este fenómeno es general, su magnitud depende de la relación que existe entre la longitud de onda y el tamaño del obstáculo o abertura. Si una abertura (obstáculo) es grande en comparación con la longitud de onda, el efecto de la difracción es pequeño, y la onda se propaga en líneas rectas o rayos, de forma semejante a como lo hace un haz de partículas. Sin embargo, cuando el tamaño de la abertura (obstáculo) es comparable a la longitud de onda, los efectos de la difracción son grandes y la onda no se propaga simplemente en la dirección de los rayos rectilíneos, sino que se dispersa como si procediese de una fuente puntual localizada en la abertura.

Las longitudes de onda del sonido audible están entre 3 cm y 12 m, y son habitualmente grandes comparadas con los obstáculos y aberturas (por ejemplo puertas o ventanas), por lo que la desviación de las ondas rodeando las esquinas es un fenómeno común.

### 2.1.4. Absorción

Consiste en la disminución de la energía sonora, debido a su

disipación en forma de calor, al ser absorbida por el medio que atraviesa. Dicha variación de energía dependerá de la intensidad de la onda sonora, de la distancia recorrida y de las características del medio, que se definen con un coeficiente de absorción. Así, tendremos la absorción debida al aire, a los materiales usados en las paredes y en los objetos presentes en el recinto, y a las personas que se encuentren dentro de la sala.

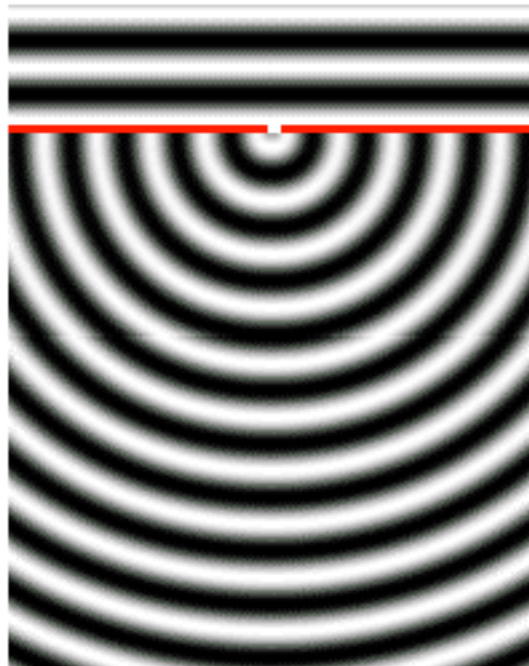


Fig. 3.

### **2.1.5. Difusión**

Según las teorías clásicas, la difusión es el efecto de redistribuir espacialmente la energía acústica que incide sobre una superficie. Recientemente se advirtió que este concepto describe en forma incompleta el funcionamiento de un Difusor debido a la existencia de redistribución temporal en cierto tipo de difusores desarrollados para optimización de acondicionamientos acústicos. En el 1er Congreso Latinoamericano de AES se presentó una definición más completa del fenómeno Difusión: "es el efecto de diseminar la energía acústica incidente sobre una superficie en el espacio y en el tiempo".

### **2.1.6. El decibelio**

El decibelio es la unidad de medida utilizada para el nivel de potencia y el nivel de intensidad del ruido.

Se utiliza una escala logarítmica porque la sensibilidad que presenta el oído humano a las variaciones de intensidad sonora sigue una escala aproximadamente logarítmica, no lineal. Por ello el belio (B) y su submúltiplo el decibelio (dB), resultan adecuados para valorar la percepción de los sonidos por un oyente. Se define como la comparación o relación entre dos sonidos porque en los estudios sobre acústica fisiológica se vio que un oyente, al que se le hace escuchar un solo sonido, no puede dar una indicación fiable de su intensidad, mientras que, si se le hace escuchar dos sonidos diferentes, es capaz de distinguir la diferencia de intensidad.

Como el decibelio es una unidad relativa, para las aplicaciones acústicas se asigna el valor de 0 dB al umbral de audición del ser humano, que por convención se estima que equivale a un sonido con una presión de 20 micropascales, algo así como un aumento de la presión atmosférica normal de  $1/5.000.000.000$ . Aun así, el verdadero umbral de audición varía entre distintas personas y dentro de la misma persona, para distintas frecuencias. Se considera el umbral del dolor para el humano a partir de los 140 dB. Esta suele ser, aproximadamente, la medida máxima considerada en aplicaciones de acústica.

Para el cálculo de la sensación recibida por un oyente, a partir de las unidades físicas medibles de una fuente sonora, se define el nivel de potencia,  $L_w$ , en decibelios, y para ello se relaciona la potencia de la fuente del sonido a estudiar con la potencia de otra fuente cuyo sonido esté en el umbral de audición, por la fórmula siguiente:

$$L_W = 10 \times \log_{10} \frac{W_1}{W_0} (dB) = 10 \times \log_{10} \frac{W_1}{10^{-12}} (dB)$$

En donde  $W_1$  es la potencia a estudiar, en vatios (variable),  $W_0$  es el valor de referencia, igual a  $10^{-12} \text{ vatios/m}^2$  y  $\log_{10}$  es el logaritmo en base 10 de la relación entre estas dos potencias. Este valor de referencia se aproxima al umbral de audición en el aire. Notaréis que si  $W_1$  es mayor que la potencia de referencia  $W_0$  el  $L_p = 10 \times \log_{10} \frac{P_1^2}{P_0^2} (dB) = 20 \times \log_{10} \frac{P_1}{20 \times 10^{-6}} (dB) P_0$  valor en decibelios es positivo. Y si  $W_1$  es menor que la referencia  $W_0$  el resultado es negativo. También observaréis que un aumento en un factor 10 (10 veces) en la potencia  $W_1$  con respecto a la referencia significa un aumento de 10 unidades (10 dB) aditivas en la escala logarítmica (intensidad subjetiva). Y que al aumentar al doble (factor 2) la potencia  $W_1$  con respecto a  $W_0$  significa un aumento aditivo de 3 dB en la escala logarítmica ( $\log_{10} 2 = 0,301B = 3,01dB$ ).

Las ondas de sonido producen un aumento de presión en el aire, luego otra manera de medir físicamente el sonido es en unidades de presión (pascales). Y puede definirse el *Nivel de presión*,  $L_p$ , que también se mide en decibelios.

$$L_p = 10 \times \log_{10} \frac{P_1^2}{P_0^2} (dB) = 20 \times \log_{10} \frac{P_1}{20 \times 10^{-6}} (dB)$$

En donde  $P_1$  es la presión del sonido a estudiar, y  $P_0$  es el valor de referencia, que para sonido en el aire es igual a  $20 \times 10^{-6}$  Pa, o sea 20 micropascales (20  $\mu$ Pa, donde Pa = Pascal, unidad de presión). Este valor de referencia se aproxima al umbral de audición en el aire.

## **2.2 Propagación en recinto cerrado**

Para analizar el comportamiento del sonido en el interior de una sala, partimos de una fuente puntual omnidireccional (radia por igual en todas las direcciones), que emite un impulso (sonido intenso y de corta duración).

Inicialmente, el sonido se propaga hasta que choca con las paredes límite y otros objetos que obstaculizan su camino. Como consecuencia, se producen los siguientes fenómenos:

### **2.2.1 Sonido reflejado**

La energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto.

En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido directo como a las sucesivas reflexiones.

Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto del estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferentes: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o

reflexiones tempranas (*early reflections*), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante.

Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llega de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden inferior a 3). Se dice que un reflexión es de orden "n" cuando el rayo sonoro asociado ha incidido "n" veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor.

Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto.

La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la figura se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

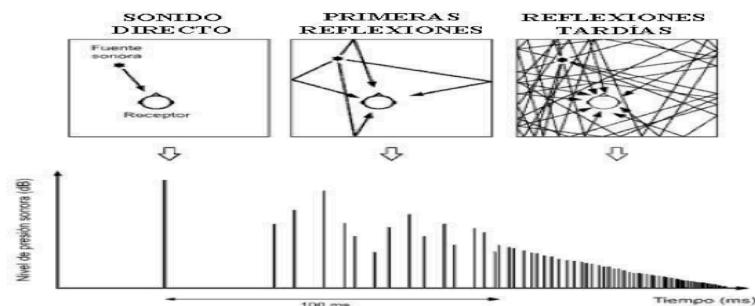


Fig. 4.

### 2.2.2 Estudio de las primeras reflexiones.

En general, las primeras reflexiones presenta un nivel energético mayor que las correspondientes a la cola reverberante, ya que son de un orden más bajo.

Además, por el hecho de depender directamente de las formas geométricas de la sala, son específicas de cada punto, y por tanto, determinan las características acústicas propias del mismo, juntamente con el sonido directo.

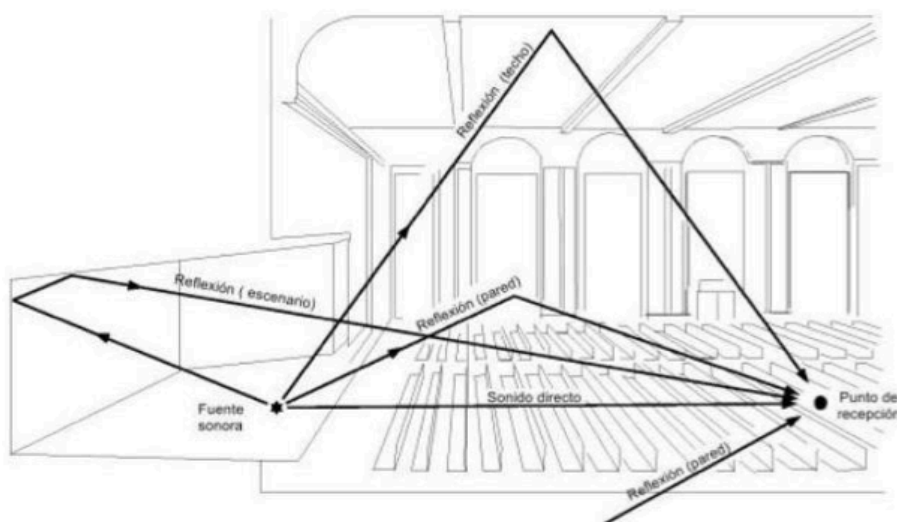


Fig. 5.

El análisis acústico basado en la hipótesis de reflexión especular constituye la base de la denominada acústica geométrica.

Evidentemente, dicho análisis no es más que una aproximación a la realidad. Ya que sólo en determinadas circunstancias la hipótesis especular es totalmente veraz.



Para que en la práctica se produzca una reflexión mercadamente especular es necesario que se cumplan los siguiente requisitos, por lo que a la superficie de reflexión se refiere:

- Dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda del sonido en consideración.
- Superficie lisa y muy reflectante (poco absorbente).

En el caso de que las dimensiones sean menores o similares a la longitud de onda del sonido, la onda sonora rodea la superficie y sigue propagándose como si el obstáculo que representa la misma no existiese. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difracción.

Si la superficie presenta irregularidades de dimensiones comparables con la longitud de onda, se produce una reflexión de la onda incidente en múltiples direcciones. Dicho fenómeno se conoce con el nombre de difusión del sonido.

Por otro lado, como se ha comentado anteriormente, la cola reverberante está formada por las reflexiones tardías (por regla general, se consideran las reflexiones de orden superior a 3). Debido a que la densidad temporal de reflexiones en un punto cualquiera de un recinto cerrado aumenta de forma cuadrática con el tiempo, existe una gran concentración de dichas reflexiones en cualquier punto de recepción y, además, sus características son prácticamente iguales con independencia del punto considerado.

Es por ello que el estudio de la cola reverberante se efectúa siempre mediante criterios basados en la denominada acústica estadística, en lugar de la acústica geométrica.

A título de ejemplo, en un auditorio de tamaño medio un oyente recibe alrededor de 8.000 reflexiones en el primer segundo después de la llegada del sonido directo. De todas formas, debido a que el oído humano es incapaz de discriminar la llegada discreta de todas y cada una de las reflexiones, lo que generalmente se percibe es un sonido continuo. Sólo en

determinados casos es posible percibir individualmente una o varias reflexiones. Para ello es necesario que su nivel y retardo respecto al sonido directo sean significativos, como se verá a continuación.

### **2.2.3 Modos propios de una sala**

Dentro del campo de la Acústica ondulatoria, recibe el nombre de **modo propio** aquella onda estacionaria generada en el interior de un determinado espacio, por ejemplo una sala o habitación. Este tipo de interferencias, ya sean constructivas (suma) o destructivas (cancelación), vienen dadas por la interacción entre las ondas incidentes y reflejadas dentro del recinto.

Así mismo, cada modo propio está asociado a una frecuencia (denominada *frecuencia propia*) y nivel de presión sonora específicos en función del punto a considerar, de forma que si la distancia entre dos paredes paralelas dentro de una sala es igual a la longitud de onda de una determinada frecuencia, podremos decir que ésta se trata de un modo propio y que, por tanto, permanecerá estacionaria reflejándose entre las dos superficies paralelas, perdiendo paulatinamente energía acústica.

Esta clase de ondas estacionarias suponen un importante problema a tener en cuenta, especialmente en recintos destinados al uso de la palabra y del sonido en general (salones de conferencia, salas de conciertos, estudios de grabación musical, salas de cine...) donde pueden llegar a ocasionar una notable pérdida en la inteligibilidad de la palabra y en la calidad acústica del recinto.

Pese a que la existencia de modos propios es inevitable, éstos pueden ser distribuidos de manera uniforme a lo largo de todo el espectro de frecuencias audibles de manera que no supongan una deficiencia en la escucha. Para ello es necesario seleccionar una relación adecuada entre las dimensiones de la sala o recinto en cuestión a fin de evitar la concentración

de energía en bandas estrechas de frecuencias o, lo que es lo mismo, la coloración excesiva del sonido.

## 2.3 Parámetros acústicos

Hay dos parámetros clásicos fundamentales, que durante mucho tiempo han servido para determinar la calidad acústica de un recinto:

### 2.3.1 Nivel de presión sonora

El **nivel de presión sonora** (o SPL, Sound Pressure Level en inglés) determina la intensidad del sonido que genera una presión sonora instantánea (es decir, del sonido que alcanza a una persona en un momento dado), se mide en dB y varía entre 0 dB umbral de audición y 140 dB umbral de dolor.

se adopta una escala logarítmica y se utiliza como unidad el decibelio. Como el decibelio es adimensional y relativo, para medir valores absolutos se necesita especificar a que unidades está referida. En el caso del nivel de presión sonora (el  $dB_{SPL}$  toma como unidad de referencia 20  $\mu$ Pa). Precisamente, las siglas SPL hacen referencia al nivel de presión sonora en inglés (Sound Pressure Level).

$$L_P = 20 \times \log \frac{P_1}{P_0} = dB_{SPL}$$

en donde

- **P<sub>1</sub>** es la presión sonora instantánea.
- **P<sub>0</sub>** es la presión de referencia y se toma como referencia la presión sonora en el umbral de audición, que son 20 microPa.
- log es un logaritmo decimal

### 2.3.2. Tiempo de Reverberación (TR)

Se define como el tiempo que transcurre desde que la fuente cesa su emisión, hasta que la energía acústica presente en el interior de una sala, cae 60 dB. Es posible medir el tiempo de reverberación a partir de la curva energía-tiempo. Sin embargo, como el ruido de fondo suele ocultar la parte final de dicha curva, en la práctica se mide el tiempo que tarda en caer 20 o 30 dB y se aproxima TR, multiplicando dichos tiempos por 3 o 2, respectivamente.

Esta curva de decaimiento energético es distinta para cada posición dentro de la sala y además, varía con la frecuencia. Por ello, se adquieren los tiempos de reverberación de varias posiciones, que serán promediados a continuación. Y esto se hace para las bandas de octava centradas en las frecuencias 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 y 8000 Hz. Es habitual prescindir de la primera y última banda, en especial, para salas dedicadas a la palabra.

También podemos calcular TR mediante fórmulas basadas en la teoría estadística (Sabine, Norris-Eyring, Arau-Puchades, Kuttruff, etc.). El inconveniente es que su valor es independiente de la posición del receptor y además, sólo es válido en condiciones de campo difuso (la propagación del sonido en el recinto es equiprobable en cualquier dirección).

#### 2.3.2.1 Fórmula de Sabine

Sabine intuyó y probó que la reverberación es un parámetro adecuado para evaluar la calidad acústica de una sala. Como índice de medida de esta magnitud definió el **tiempo de reverberación** como el tiempo requerido, después de cesar la fuente, para reducir la energía presente en la sala a la millonésima parte de su valor en régimen estacionario, o lo que es lo mismo, el tiempo que tarda el sonido en disminuir 60 dB a partir de que se apaga la fuente.

La fórmula del tiempo de reverberación de Sabine depende del volumen de la sala y la absorción de ésta:

$$TR = \frac{0,161V}{Aa}$$

donde "V" es el volumen de la sala, "A" la superficie de la sala y "a" la absorción

De la fórmula se desprende que el tiempo de reverberación es:

- El mismo sobre cualquier punto de la sala.
- Independiente de la forma y geometría de la sala.
- Independiente de la situación de la fuente.
- Independiente de la distribución de materiales, aunque hay que recordar que los cálculos se supone en situación de campo difuso, con lo que exige homogeneidad y poca absorción en los mismos.

La reverberación en una sala modifica de forma importante sus cualidades acústicas. Para que la sonoridad sea la adecuada, el tiempo no debe ser alto ni bajo, sino ajustarse al uso que tendrá la sala. Así, salas con tiempos bajos o «secas» pueden ser aptas para teatro o palabra hablada pero poco adecuadas para la audición de música. Al mismo tiempo, diversos géneros de música exigen diferentes tiempos, en general mucho mayores que el considerado óptimo para la palabra. Todo esto hace muy difícil encontrar salas polivalentes, aunque mediante diversas técnicas es posible «afinar» una sala o variar su tiempo de reverberación.

El volumen de una sala determina directamente (junto a otros factores como los materiales de la misma) el tiempo de reverberación. El tiempo óptimo es una función del volumen, y generalmente se prefieren tiempos óptimos mayores cuando las salas son más grandes, y viceversa.

De manera empírica se consideran tiempos óptimos aproximados en relación con el uso de una sala, los siguientes:

<b>Uso de la sala</b>	<b>T<sub>60</sub> (s)</b>
Teatro y palabra hablada	0.4 - 1
Música de cámara	1 - 1.4
Música orquestal	1.5
Ópera	1.6 - 1.8
Música coral y sacra	hasta 2.3

### **2.3.2.2 Fórmula de Eyring**

La fórmula de Sabine en ocasiones da tiempos de reverberación más altos que los reales. Su hipótesis es una simplificación ya que considera que la energía se pierde gradualmente y de forma proporcional al conjunto de energía que queda el recinto. Además en locales más absorbentes es cuando se produce mayor dispersión entre el tiempo de reverberación real y el hallado mediante el previsto por Sabine.

Eyring evolucionó la fórmula del tiempo de reverberación de Sabine, obteniendo valores más cercanos a la realidad en casos de locales más absorbentes, y coincidiendo con la fórmula de Sabine en recintos con valores de absorción pequeños:

$$t_R = \frac{0.162V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})}$$

siendo  $S$  la superficie total de los cerramientos y suponiendo que todas las superficies tienen el mismo coeficiente de absorción ( $\bar{\alpha}$ ).

En casos de campo abierto, ( $\bar{\alpha} = 1$ ), se obtiene un tiempo de reverberación nulo, cosa que con la fórmula de Sabine no era posible.

### 2.3.2.3 Calidez

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las bajas frecuencias (125 y 250 Hz) y de las frecuencias medias (500 y 1000 Hz).

$$BR \equiv \frac{RT(125) + RT(250)}{RT(500) + RT(1000)}$$

Representa la riqueza en bajas frecuencias (sonidos graves) de una sala, lo que es indicativo de la sensación subjetiva de calidez y suavidad de la música escuchada en ella.

Durante la fase de diseño se deberá tener especial cuidado con los materiales usados, a fin de evitar coeficientes de absorción altos en bajas frecuencias, que reducirían la calidez acústica.

Así, según Beranek, los valores recomendados para una sala de música sinfónica, ocupada, dependen del  $TR_{mid}$  óptimo. Por ejemplo:

Si  $TR_{mid} = 1,8$  segundos, el margen de valores aceptables para la calidez es:

$$1,10 \leq BR \leq 1,45$$

Si  $TR_{mid} = 2,2$  segundos, entonces se tiene:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25$$

Para los valores de  $TR_{mid}$  intermedios, el valor de BR se obtiene por interpolación de los anteriores.

#### **2.3.2.4 Brillo**

Es la relación entre los tiempos de reverberación de las altas frecuencias (2 y 4 KHz) y de las frecuencias medias (500 y 1000 Hz).

$$Br \equiv \frac{RT(2K) + RT(4K)}{RT(500) + RT(1K)}$$

Mide la riqueza en altas frecuencias (sonidos agudos) de la sala, lo que conduce a un sonido claro y brillante.

Beranek recomienda un valor de  $Br \geq 0,87$ . Sin embargo, un excesivo brillo origina un sonido artificial molesto, por eso, es aconsejable que Br no supere la unidad. De hecho, la mayor absorción del aire en altas frecuencias (mayor cuanto menor humedad relativa haya), ayuda a que esto se cumpla.

#### **2.4 Defectos acústicos**

Durante la fase de diseño de una sala podemos advertir la posible aparición de algunos fenómenos sonoros perjudiciales, mediante el análisis de su curva energía-tiempo o mediante auralización. Para eliminarlos tendremos que recurrir al uso de los materiales acondicionadores adecuados y, a veces, incluso será necesario variar la geometría de la sala.



### **2.4.1 Ecos**

Se denomina eco a cualquier reflexión de primer orden que llega con un retardo

superior a 50 ms, para salas destinadas a la palabra, u 80 ms, para salas dedicadas a

música, respecto al sonido directo y con un nivel relativo perceptible.

Si se cumplen

estas dos condiciones, el oído lo percibe como una repetición del sonido directo.

Todas las reflexiones recibidas dentro de los primeros 50-80 ms son integradas

por el oído con el sonido directo y percibidas como un único sonido.

Mientras que las

reflexiones posteriores que tienen un nivel sonoro bajo, son consideradas parte de la

cola reverberante.

### **2.4.2 Focalización del sonido**

Consiste en la agrupación de reflexiones en una zona limitada de la sala, alcanzando en ocasiones un nivel superior al del sonido directo. Este efecto rompe la uniformidad de la difusión en la sala y es además, muy molesto para los oyentes situados en el foco, ya que estas reflexiones desvirtúan la localización del sonido.

La causa de que se produzca es la presencia de cualquier tipo de superficie cóncava en la sala: techos abovedados, cúpulas, paredes semicirculares con el centro de curvatura en una zona del público o del escenario, etc. Sin embargo, existe un caso, estudiado por Cremer y Müller, en el que estas concavidades funcionan como difusores del sonido: cuando tanto la fuente sonora como cualquier posición receptora dentro de la sala, quedan fuera del círculo que formaría la superficie cóncava si cerramos su perímetro. Para ello es necesario que estas superficies sean bastante

cóncavas y estén a la suficiente distancia. Se eliminan utilizando los mismos métodos que para los ecos.

### **2.4.3 Efecto "seat dip"**

Consiste en la fuerte atenuación del sonido directo, especialmente en bajas frecuencias, cuando éste se propaga sobre la zona del público con un ángulo de incidencia pequeño (rasante).

Las mayores atenuaciones se concentran entre las frecuencias de 100 y 300 Hz y varían entre 10 y 30 dB. Y se ha comprobado que la máxima atenuación, generalmente, es de 15 dB a la frecuencia de 125 Hz.

Se ha verificado que dicho efecto, que existe porque la zona del público es muy absorbente, es independiente de si las sillas están vacías u ocupadas. Aunque se sabe que la absorción de las sillas ocupadas es mayor en todas las frecuencias y que el porcentaje de tapizado también aumenta la absorción, especialmente en bajas frecuencias.

### **2.4.4 Efecto de "larsen"**

Se produce en salas con sistema de megafonía cuando los micrófonos y los altavoces se acoplan, produciendo un pitido muy molesto.

La señal emitida es captada por un micrófono, amplificada y posteriormente, transmitida por un altavoz hacia la zona del público que queda fuera de la cobertura de la fuente sonora. Después de un cierto retardo, la señal del altavoz se introduce de nuevo por el micrófono. De esta manera, se llega a un sistema cerrado (micrófono amplificador-altavoz-micrófono), que oscilará cuando el SPL que llega al micrófono procedente del orador coincide con el SPL que llega del altavoz. Dicha oscilación genera el pitido.

Una forma de evitarlo es colocando el micrófono próximo a la fuente

y el altavoz lejos del micrófono y próximo a la audiencia. Por supuesto, cuanto más directivos sean los micrófonos y altavoces, se podrá alcanzar mayor ganancia acústica sin riesgo a oscilaciones.

## **2.5 Materiales de acondicionamiento**

Dentro de los recintos cerrados, es fundamental conseguir un equilibrio adecuado entre el sonido directo y el campo sonoro reverberante. Por ello, un adecuado acondicionamiento acústico implica que las ondas reflejadas sean las menos posibles, por lo que desempeña un papel la capacidad de absorción de los materiales absorbentes que minimizaran la reverberaciones indeseadas o ecos que pueden dificultar la ininteligibilidad de la comunicación sonora.

### **2.5.1 Materiales absorbentes**

Aunque todos los materiales tienen asociada una determinada capacidad de absorción, como pueden ser: los materiales básicos de las paredes, techos y suelos, las superficies vibrantes como ventanas, puertas o tabiques separadores, el público y las sillas, etc., se denominan materiales absorbentes a aquellos usados específicamente como revestimiento del interior de un recinto, para aumentar la absorción del sonido con al menos uno de los siguientes objetivos:

- Reducir el nivel del campo reverberante, en ambientes excesivamente ruidosos.
- Optimizar el tiempo de reverberación según la aplicación a la que se dedique el recinto.
- Eliminar o prevenir la aparición de ecos.

Además, estos materiales, al absorber la energía sonora incidente, mejoran los resultados de los materiales propiamente aislantes.

Generalmente, son materiales porosos de estructura fibrosa o granular, constituidos básicamente de lana de vidrio, lana mineral, espuma a base de resina de melamina o espuma de poliuretano.

El mecanismo de absorción es el siguiente:

Cuando la onda sonora incide sobre estos materiales, una parte de la energía es reflejada y el resto penetra en su interior, a través de sus poros. Una vez dentro, la presión sonora pone en movimiento las partículas de aire que se encuentran en los espacios huecos del material. Este flujo de aire interno es el responsable de la disipación de la energía sonora en forma de calor, debido al rozamiento con las capas sólidas del material.

Cuantas más veces se haga pasar la onda sonora a través de estos materiales, mayor será la atenuación que experimente. Por eso, se suelen colocar sobre las paredes limítrofes del recinto que se pretende acondicionar. Así, la porción de energía que atraviesa completamente el material, es reflejada hacia el mismo por la pared interior, donde nuevamente es absorbida.

La capacidad de absorción de estos materiales porosos se mide por medio del denominado coeficiente de absorción,  $\alpha$ , que mide la relación entre la energía absorbida y la incidente. Suelen ser proporcionados por el fabricante de dichos materiales para las 6 bandas de octava: 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 Hz. Y a veces, también para las bandas centradas en 63 y 8000 Hz.

Vemos, pues, que  $\alpha$  depende de la frecuencia. Generalmente, en estos materiales suele aumentar con la misma. De modo que, según sean nuestras necesidades de absorción, deberemos seleccionar uno u otro material.

Por otra parte, las características de absorción no sólo dependen de cuál sea el valor de  $\alpha$ , sino que hay otros factores muy influyentes, como:

- El espesor del material.
- La distancia del material a la pared.
- El grado de porosidad del material.
- La densidad del material.

- La colocación.

### **2.5.2 Resonadores**

Los resonadores son absorbentes selectivos, cuyo coeficiente de absorción presenta un máximo en la denominada frecuencia de resonancia.

Dicha frecuencia estará determinada por la estructura y las propiedades de los materiales que componen el resonador.

Su uso permite recortar la respuesta de la sala en determinadas frecuencias para reducir su tiempo de reverberación. Aunque es habitual utilizarlos como complemento de los materiales absorbentes, con el fin de lograr un mayor aumento de la absorción en bajas frecuencias ( $\leq 500$  Hz).

Podemos distinguir 4 tipos de resonadores:

- De membrana o diafragmático.
- Simple de cavidad.
- Múltiple de cavidad a partir de paneles perforados o ranurados.
- Múltiple de cavidad a base de listones.

a) Resonador de membrana o diafragmático:

Es una cavidad formada por un panel no poroso, pero flexible, como la madera, colocado a una distancia  $d$  de una pared rígida.

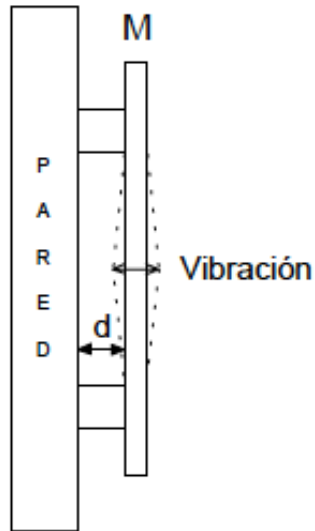


Fig. 6.

Dicha cavidad, generalmente ocupada por aire, permite que el panel vibre cuando la onda sonora incide sobre él. De este modo, la energía reflejada es menor que si incidiese directamente sobre la pared, puesto que parte de ella se disipa en forma de calor, como consecuencia de la vibración generada.

La frecuencia a la que la vibración es máxima, se denomina frecuencia de resonancia  $f_0$  y es específica de cada resonador.

Se ha comprobado que la variación de la absorción con la frecuencia tiene forma de campana de Gauss centrada en  $f_0$ .

Según las características del material que ocupa la cavidad ( $\rho_0 c$ ) y la resistencia del panel al flujo de aire ( $r_s =$  relación entre la diferencia de niveles a ambos lados del panel y la velocidad del flujo que lo atraviesa), tendremos una campana de Gauss más o menos estrecha:

$r_s < \rho_0 c$	Curva estrecha $\alpha < 1$
$r_s = \rho_0 c$	Curva óptima $\alpha = 1$
$r_s > \rho_0 c$	Curva ancha $\alpha < 1$

Una forma de aumentar  $r_s$  es añadir a la cavidad un material absorbente. Sin embargo, su efecto diferirá según sea la relación inicial entre  $r_s$  y  $\rho_0 c$ .

– Si  $r_s < \rho_0 c$  entonces el material absorbente aumenta la absorción y, se consigue que el coeficiente de absorción a la frecuencia de resonancia se aproxime a 1.

– Si  $r_s > \rho_0 c$  entonces el material absorbente hace que la curva de absorción se ensanche, siendo menos selectiva en frecuencia y disminuyendo el coeficiente de absorción máximo, centrado en la frecuencia de resonancia.

Por último mencionar que dado que los materiales de absorción suelen ser recubiertos por materiales protectores, en caso de que éstos sean no porosos y flexibles, como el plástico o el papel, obtendremos un resonador de membrana.

b) Resonador simple de cavidad (Helmholtz):

Es una cavidad, rellena de aire, que accede a la sala mediante una pequeña abertura.

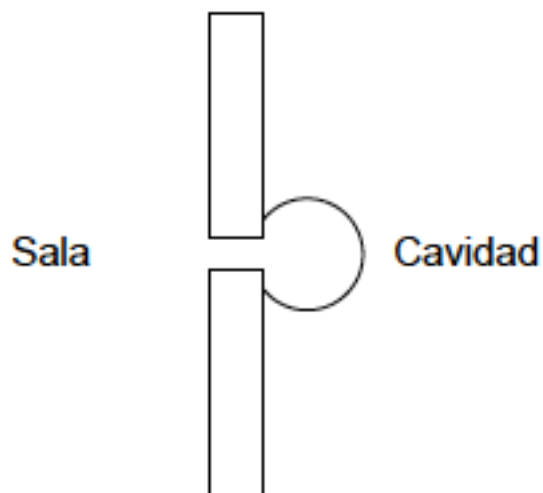


Fig. 7.

La masa de aire que se encuentra en el hueco de la pared está sometida a un diferencial de presión, cuando la onda sonora incide sobre ella, comportándose como el panel del resonador de membrana. Mientras que el aire contenido en la cavidad ofrece la resistencia que conduce a la disipación de energía.

Al igual que el resonador anterior, presenta una curva de absorción con un máximo en la frecuencia de resonancia, que generalmente se encuentra por debajo de 250 Hz.

Si la cavidad está vacía, es decir, sólo contiene aire, su absorción es muy selectiva en frecuencia. Sin embargo, si se rellena con algún material absorbente, la curva de absorción se suaviza, aumentando la absorción en un rango de frecuencias más amplio, a costa de tener una menor absorción en la frecuencia de resonancia.

Su aplicación es la misma que la del resonador de membrana: aumentar la absorción en una determinada banda de bajas frecuencias. Pero, dado que la superficie que ocupa es demasiado pequeña en comparación con el espacio que debe tratarse (paredes o techos), es habitual colocar una sucesión de resonadores simples de cavidad en serie,



distribuidos sobre la superficie cuya absorción pretende aumentarse.

En la siguiente figura se aprecia un ejemplo de este tipo de resonador.

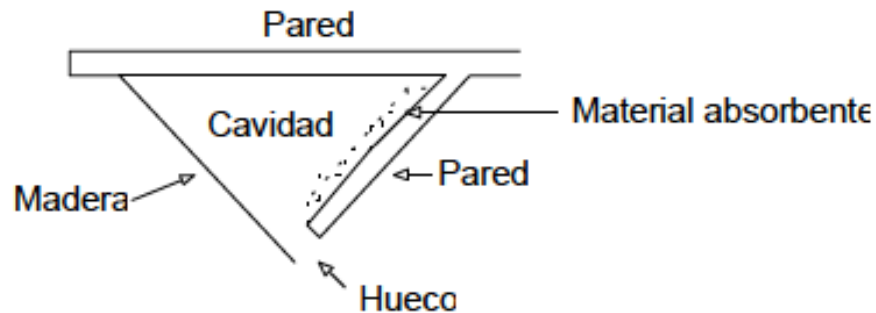


Fig. 8.

Su forma permite, además de aumentar la absorción en bajas frecuencias, mejorar la difusión del sonido incrementando las reflexiones en distintas direcciones. También, suele utilizarse para eliminar los modos propios de la sala, evitando así el efecto de la coloración del sonido.

c) Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz) mediante paneles perforados:

Se forma, al igual que el resonador de membrana, colocando un panel no poroso a una distancia  $d$  de la pared, quedando entre ambos una cavidad rellena de aire. La diferencia radica en que el panel ahora es rígido y presenta una serie de perforaciones circulares o de ranuras (rectangulares). Se suele escoger como material para el panel: madera, cartón-yeso, chapa metálica o ladrillo.

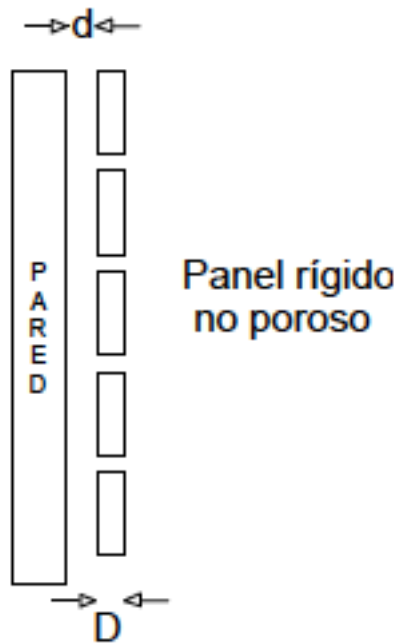


Fig. 9.

Debido a la presencia de estas ranuras, también puede verse como una agrupación de resonadores simples de cavidad, acoplados entre sí. Así que, aunque sigue comportándose como un resonador, con máxima absorción a la frecuencia de resonancia, es menos selectivo que el resonador simple, por causa del acoplamiento entre cavidades.

Una forma de aumentar la absorción que se produce en el resonador, es introducir en la cavidad un material absorbente. Éste, hará aumentar la absorción para todas las frecuencias, pero reducirá la frecuencia de absorción.

También el lugar donde coloquemos este material absorbente va a influir en la forma de la curva de absorción del resonador. Así, si lo ponemos justo detrás del panel perforado, la curva será amplia y se irá estrechando a medida que acercamos el material absorbente a la pared rígida.

Por último, destacar que para un funcionamiento eficaz como resonador, la distancia  $d$  a la pared debe ser constante y las perforaciones o

ranuras tienen que estar uniformemente distribuidas a lo largo del panel. Si d fuese variable o la distribución de los agujeros no uniforme o el porcentaje de éstos aumentase excesivamente, su comportamiento se parecería más al de un material absorbente.

d) Resonador múltiple de cavidad (Helmholtz), formado por listones:

Es una variante del resonador múltiple Helmholtz basado en paneles perforados o ranurados.

La diferencia radica en que ahora los huecos por los que penetra la onda sonora se encuentran entre listones sucesivos.

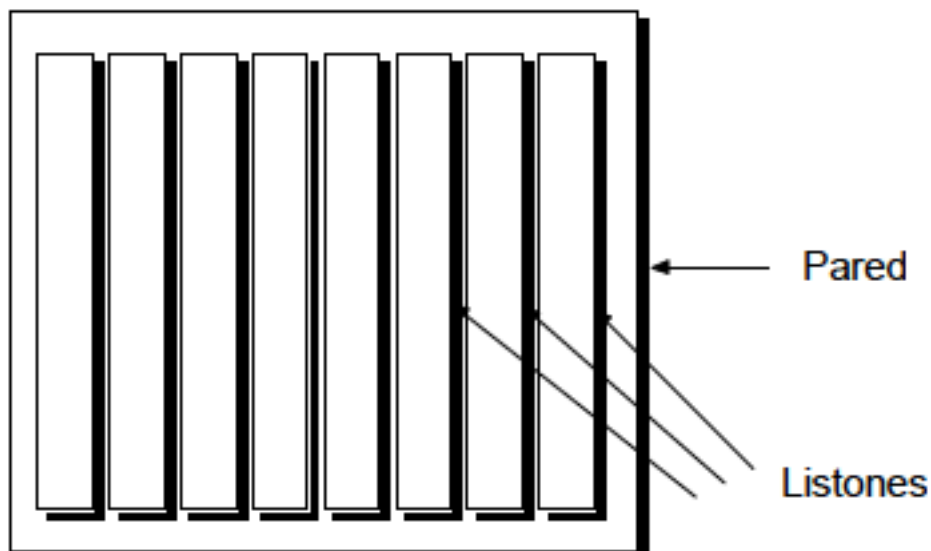


Fig. 10.

Este resonador también presenta en su curva de absorción un máximo a la frecuencia de resonancia. Y sigue el mismo comportamiento que el resonador de paneles perforados.

### 2.5.3 Reflectores

Aunque todos los elementos son susceptibles de sufrir reflexión, en menor o mayor grado dependiendo de su coeficiente de absorción (mayor reflexión  $\Leftrightarrow$  menor absorción), se denominan reflectores a aquellos

elementos específicamente diseñados para generar reflexiones orientadas hacia las zonas del público que necesitan ser reforzadas.

Se caracterizan por ser lisos, rígidos y no porosos, de modo que su coeficiente de absorción es mínimo (idealmente  $\alpha=0$ ). Estas características hacen que la mayor parte de la energía sonora que incide sobre ellos se refleje concentrada en la dirección especular.

Su objetivo fundamental es aumentar la presencia de reflexiones útiles destinadas al público. Entendemos por reflexiones útiles aquellas primeras reflexiones que llegan después del sonido directo y que son integradas con el mismo por el oído.

En el caso de salas destinadas a la palabra, sólo se consideran los primeros 50 ms y una riqueza de primeras reflexiones implicará una inteligibilidad y sonoridad altas.

Durante el diseño de un elemento reflector para acondicionar una sala, tendremos que tener presente:

- El fenómeno de difracción inherente a su tamaño limitado.
- La aparición de anomalías que perjudican la calidad acústica final de la sala: ecos, focalizaciones, coloración del sonido, etc.

La difracción es especialmente notoria en bajas frecuencias, donde el reflector corre el riesgo de tener unas dimensiones inferiores a la longitud de onda. De modo que el sonido lo bordeará como si no existiese.

Respecto a las anomalías mencionadas, pueden aparecer si el nivel del sonido reflejado es demasiado alto. Este problema se soluciona consiguiendo una buena difusión del sonido en la sala.

Podemos distinguir dos tipos de reflectores:

- o Reflectores planos.
- o Reflectores curvos.

a) Reflectores planos:

Este tipo de reflectores es el que utilizamos en la simulación de las aulas nuevas. En ellas distinguimos dos situaciones distintas:

1º) Aplicando sólo un reflector de primer orden.

2º) Reforzando al reflector de primer orden con uno de segundo orden.

El procedimiento seguido para su obtención es el siguiente:

Partimos de una fuente de altura  $h_f$  separada un metro de la pared.

En primer lugar, se calcula la fuente imagen de primer orden. Para ello se traza desde la fuente, una perpendicular al techo, y el punto que está del otro lado del techo, a la misma distancia del techo que la fuente ( $d$ ), es la fuente imagen. Ahora dibujamos dos rayos desde la fuente imagen hasta los límites de la zona del público, cuya calidad acústica queremos mejorar. Los puntos de intersección de estas dos rectas con el techo definen el reflector  $a-b$  de primer orden.

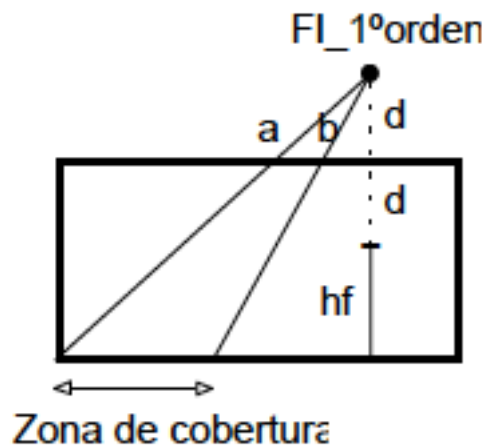


Fig. 11.

b) Reflector de segundo orden:

Para calcular el reflector de segundo orden, tenemos que obtener la fuente imagen de segundo orden. Inicialmente, se dibuja una fuente paralela a la original, al otro lado de la pared y con su misma altura. A

continuación, se prolonga desde esta fuente imaginaria, una perpendicular al techo. De nuevo, el punto equidistante (distancia  $d$ ) al techo es la fuente imagen, en este caso, de segundo orden.

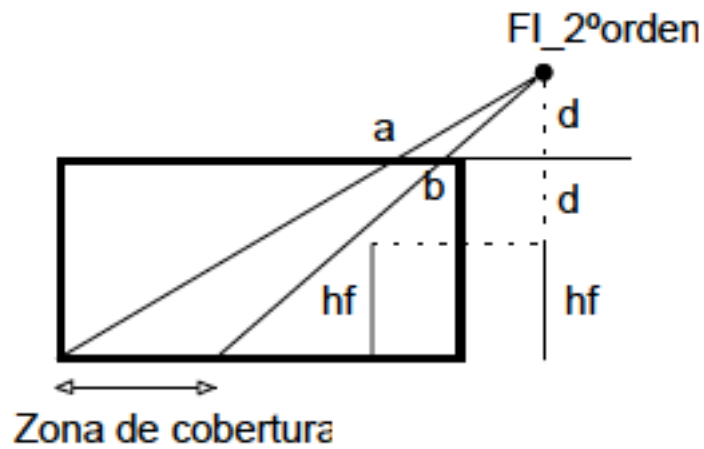


Fig. 12.

Emitiendo dos rayos desde esta fuente imagen hasta los extremos de la zona que queremos mejorar, encontramos los puntos que definen al reflector de segundo orden  $a-b$ . En ambos casos, al diseñar el reflector se deben considerar los efectos de difracción que aparecerán debido a sus limitadas dimensiones. En consecuencia, la variación respecto a la frecuencia será la siguiente:

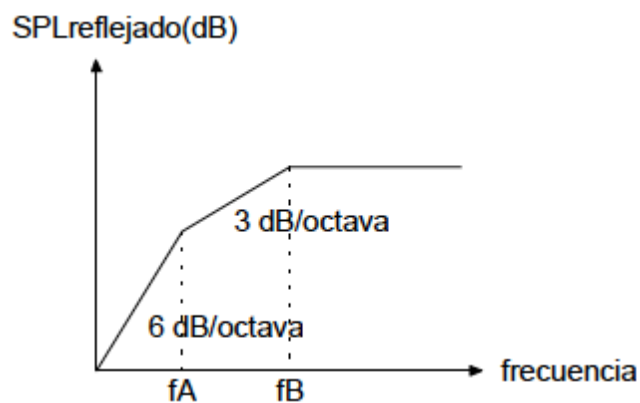


Fig. 13.

Donde:

$$f_A = \frac{c}{\left[ \frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right] \cdot B^2 \cdot \cos^2(\theta)} \quad (\text{Hz})$$

$$f_B = \frac{c}{\left[ \frac{1}{s} + \frac{1}{r} \right] \cdot A^2} \quad (\text{Hz})$$

siendo:

:

**s:** distancia de la fuente al centro del reflector (m).

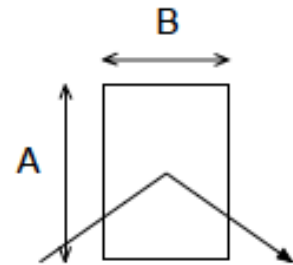
**r:** distancia del receptor al centro del reflector (m).

**A:** longitud del reflector (m).

**B:** anchura del reflector (m).

**$\theta$ :** ángulo de incidencia y de reflexión sobre el reflector.

**C:** velocidad del sonido (345 m/s a 22°C).



Por tanto, sólo para frecuencias superiores a  $f_B$ , el reflector se comporta de forma óptima. Dado que interesa que el reflector se comporte como tal en el mayor rango de frecuencias posible, es conveniente reducir las frecuencias  $f_A$  y  $f_B$ . De la observación de sus expresiones se deduce que éstas disminuirán cuando decrece la distancia entre el reflector y los receptores o cuando el ángulo de incidencia  $\theta$  es pequeño. También se consigue reducir  $f_A$  y  $f_B$  aumentando las dimensiones del reflector (A y B). Por tanto, interesan reflectores próximos al público, lo que ya conlleva reflectores de tamaños considerables, puesto que el público suele ocupar un área grande.

Sin embargo, reflectores de dimensiones excesivamente grandes tienen la desventaja de que pueden aparecer anomalías (coloración del sonido, ambigüedad en la localización de la fuente, etc.), como consecuencia de la aparición de reflexiones de gran nivel, incluso de nivel superior al del sonido directo.

En la práctica, un método de diseño es hacer que  $f_B$  sea menor que 500 Hz, para que la respuesta del reflector sea plana en frecuencias medias y altas.

b) Reflectores curvos:

La cobertura del reflector curvo es bastante mayor que la del plano. En consecuencia, la difusión del sonido es mayor y el nivel de las reflexiones añadidas disminuye, evitando, por tanto, la aparición de las anomalías mencionadas para el reflector plano.

En la práctica, se consigue un óptimo funcionamiento diseñando un reflector convexo con radio de curvatura mayor que 5 m. Si el radio es menor, se comportará como difusor en vez de como reflector.

La elección de la forma convexa en lugar de cóncava es porque las superficies cóncavas tienden a focalizar el sonido y en determinadas ocasiones pueden utilizarse como difusores.

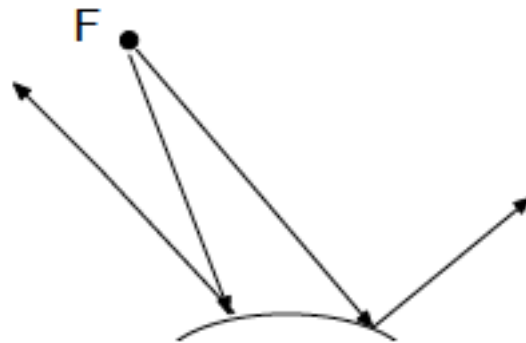


Fig. 14.

#### 2.5.4 Difusores

Se denominan difusores a aquellos elementos que reflejan el sonido uniformemente en todas las direcciones.

Su aplicación está fundamentalmente destinada a salas de conciertos.



Con ellos se consigue elevar el grado de espacialidad del sonido, con lo que la impresión de la calidad acústica del recinto mejora considerablemente. Un uso alternativo, válido para cualquier tipo de sala, es mejorar la difusión del sonido para eliminar anomalías acústicas como: ecos, coloraciones, focalizaciones, etc.

Existen distintos elementos que funcionan como difusores del sonido:

- Superficies con adornos, relieves, irregularidades, huecos, rugosidades etc. Por ejemplo, techos artesonados (con paneles poligonales), estatuas, etc. Un caso particular es la zona ocupada por las sillas, con o sin espectadores, que presenta un alto grado de difusión, pero debido a su alta absorción no funciona como difusor.

- Difusores policilíndricos: conjunto de superficies lisas y convexas cuyo radio de curvatura es menor que 5 m. La zona de cobertura es mucho mayor que la de los reflectores convexas y el nivel de las reflexiones menor, por ese motivo funcionan como difusores.

- Difusores de Schroeder: superficies con irregularidades creadas según la teoría de los números de Schroeder. También se denominan RPG ("Reflection Phase Grating").

Todos ellos se comportan como difusores para un determinado rango de frecuencias, fijado por las dimensiones de las irregularidades. Para frecuencias bajas (longitud de onda alta), las reflexiones tienden a concentrarse en la dirección especular, porque para estas frecuencias las irregularidades son imperceptibles. Así que, según la frecuencia límite a partir de la cual queremos aumentar la difusión sonora, así deberán ser las dimensiones de las irregularidades. Cuanto más grandes sean, más baja será la frecuencia límite. Entre los difusores Schroeder podemos distinguir tres tipos:

a) Difusores MLS ("Maximum Length Sequence"):

Estos difusores se forman a partir de una superficie lisa, reflectora, a la que se le practican una serie de ranuras. El tamaño y distribución de las ranuras dependerá de la frecuencia de diseño. Una vez establecida ésta:

1º) Se divide la superficie en tramos de anchura  $W=\lambda/2$ .

2º) Se genera una secuencia pseudoaleatoria periódica de máxima longitud. Dicha secuencia sólo contiene +1 o -1.

3º) Se asocia a cada tramo un número de la secuencia, del siguiente modo:

+1  $\Rightarrow$  Tramo inalterado.

-1  $\Rightarrow$  Tramo con ranura.

4º) Se hace la ranura, en los tramos que les corresponde, con profundidad  $d=\lambda/4$ .

Estos difusores son poco utilizados actualmente y el rango de frecuencias donde se comportan óptimamente como tales, es la banda de octava que contiene la frecuencia de diseño.

b) Difusores QRD (Quadratic-Residue Diffusor):

Al igual que los difusores anteriores se forman a partir de una secuencia pseudoaleatoria periódica, pero en esta ocasión aplicada a la profundidad de los huecos.

Hay dos tipos de difusores QRD:

– Unidimensionales:

Consisten en una agrupación de ranuras rectangulares de igual anchura, pero distinta profundidad, separadas por láminas rígidas y delgadas. Su orientación determina la dirección de máxima difusión: la orientación horizontal (vertical) crea difusión en el plano vertical (horizontal). Su comportamiento como difusor está comprendido en un margen determinado de frecuencias, fuera del cual tiende a reflejar el sonido en la dirección especular. La frecuencia mínima es establecida por la profundidad, siendo menor para una mayor profundidad. La frecuencia máxima es fijada por la anchura de las ranuras, aumentando al disminuir ésta. Son los más utilizados.

– Bidimensionales:

Consigue una difusión más uniforme en todas las direcciones al agrupar los dos tipos de difusores unidimensionales (vertical y horizontal) en uno. Básicamente consiste en una cuadrícula (la forma de los huecos puede ser distinta al cuadrado, aunque ésta es la habitual), con huecos de distinta profundidad.

### 3. Resultados prácticos

#### 3.1 Diseño de la sala

Tenemos una sala con unas dimensiones de 9,54 x 18,83 x 3,5 metros. Esta sala no es totalmente rectangular pero se puede hacer una aproximación. Esto facilita el cálculo de nodos propios. En el Anexo 1 podemos observar que la sala tiene una sonoridad bastante aceptable para la música de banda, aunque luego veremos medidas mas detalladas de dicha sala.

#### 3.2 Simulación

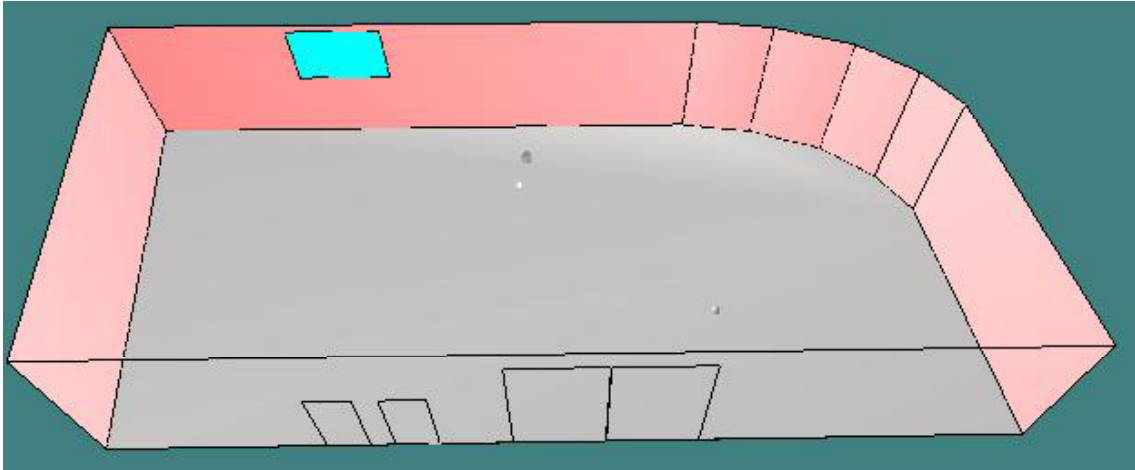
Para la simulación hemos intentado mantener lo mas próximo posible los materiales de las paredes, ventanas y puertas, con los valores de absorción para facilitar el estudio de la sala.

Descripción	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz
Ventana de doble vidrio	25	10	7	6	4	2
Puerta de madera	15	20	6	8	10	5
Panel perforado 10% sobre manto poroso 50mm para pared	20	35	65	85	85	75
Placa de yeso para techo	20	12	9	3	2	2
Piso de hormigón	1	1	2	2	2	2

##### 3.2.1 Simulación receptor 1

Para la medida del primer receptor lo posicionamos en el lugar donde

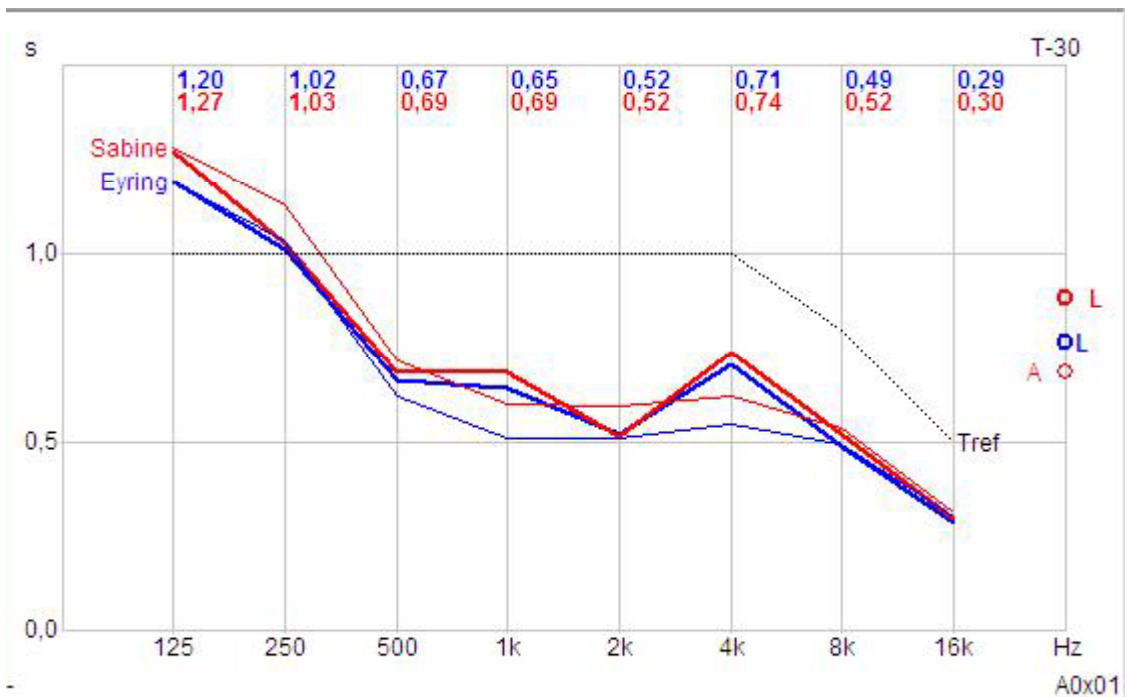
se sitúa el director de la banda de música, este sitio esta situado estratégicamente para focalizar el sonido de dicha banda hacia el punto concreto.



Hacemos tres pruebas distintas colocando los emisores en la posición de clarinetes y trompetas, metales pesados como trombones, bombardinos y tubas y para finalizar la tercera en la zona de saxofones.

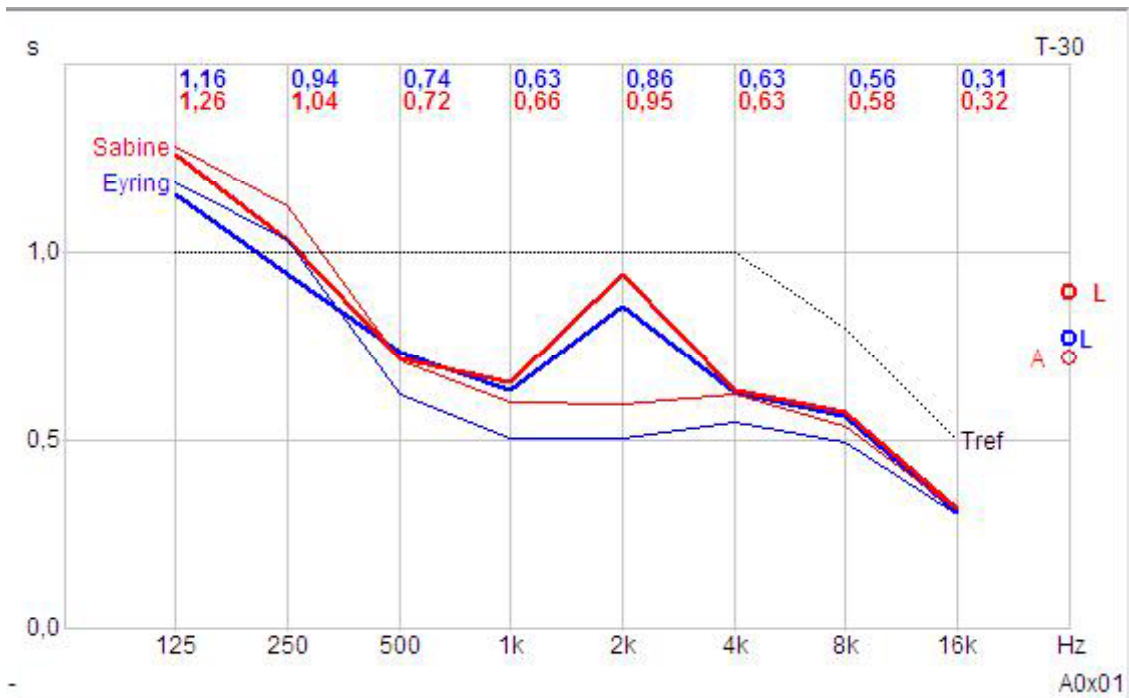
En esta simulación obtuve las siguientes curvaturas:

➤ Emisor 1



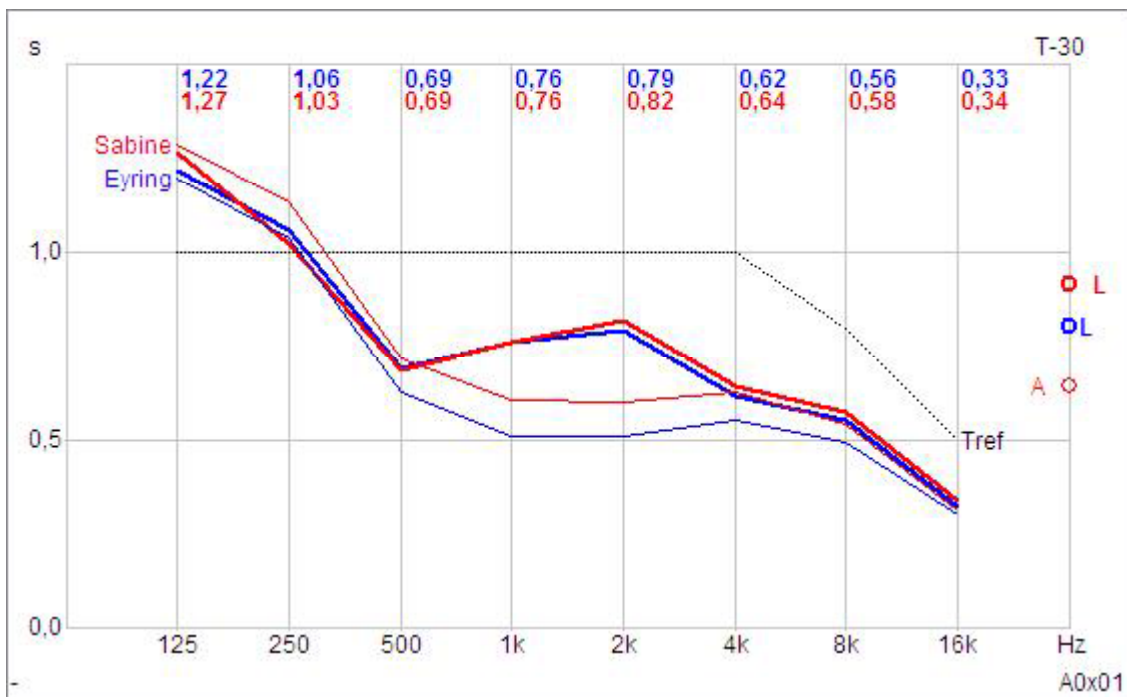
Grafica 1.

➤ Emisor 2



Grafica 2.

➤ Emisor 3



Grafica 3.

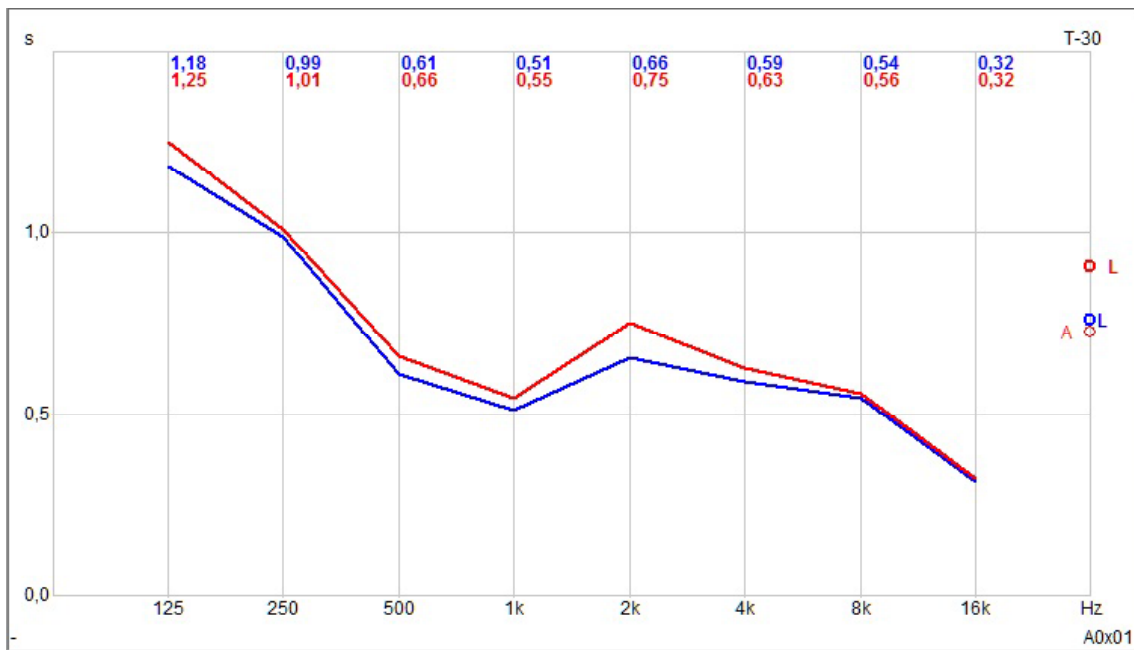
Podemos comprobar por las diferentes curvas de t30 de las distintas fuentes que tenemos un nodo en la frecuencia de 2KHz y 4KHz. Trataremos de mejorar la acústica de la sala para eliminar estos desperfectos.

### 3.2.2 Simulación receptor 2

Para la medida del segundo receptor lo posicionamos en la zona izquierda de la sala, vista desde la puerta de entrada. Esto nos ayudara a verificar donde existen nodos de la sala medido en distintos puntos de la sala.

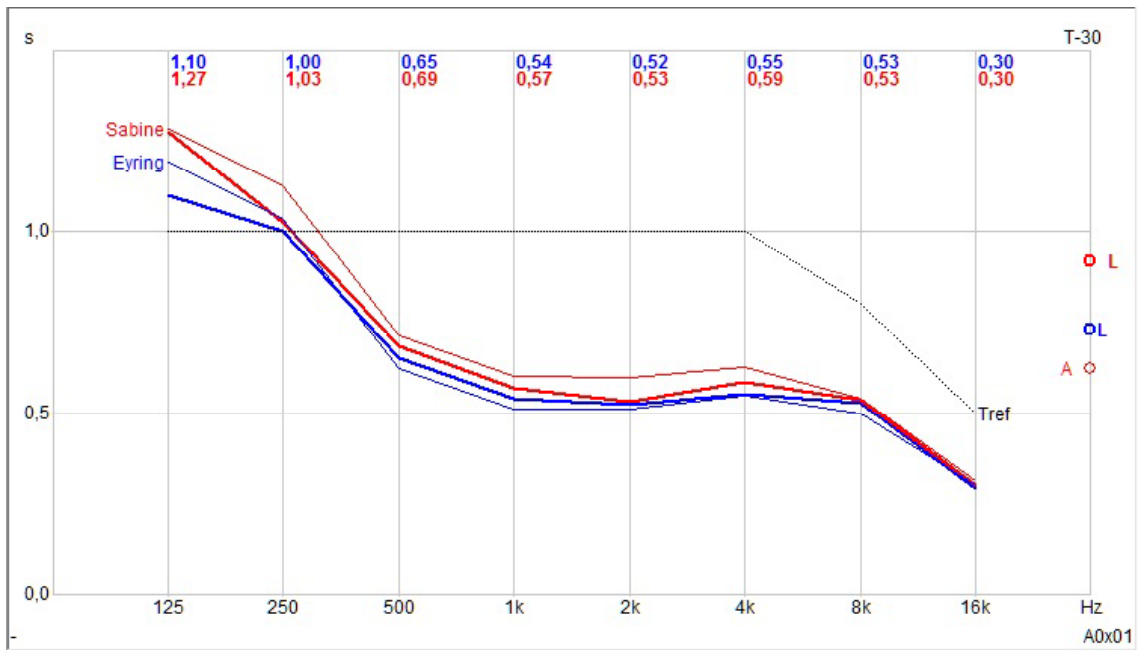
En esta simulación obtuve las siguientes curvaturas:

➤ Emisor 1



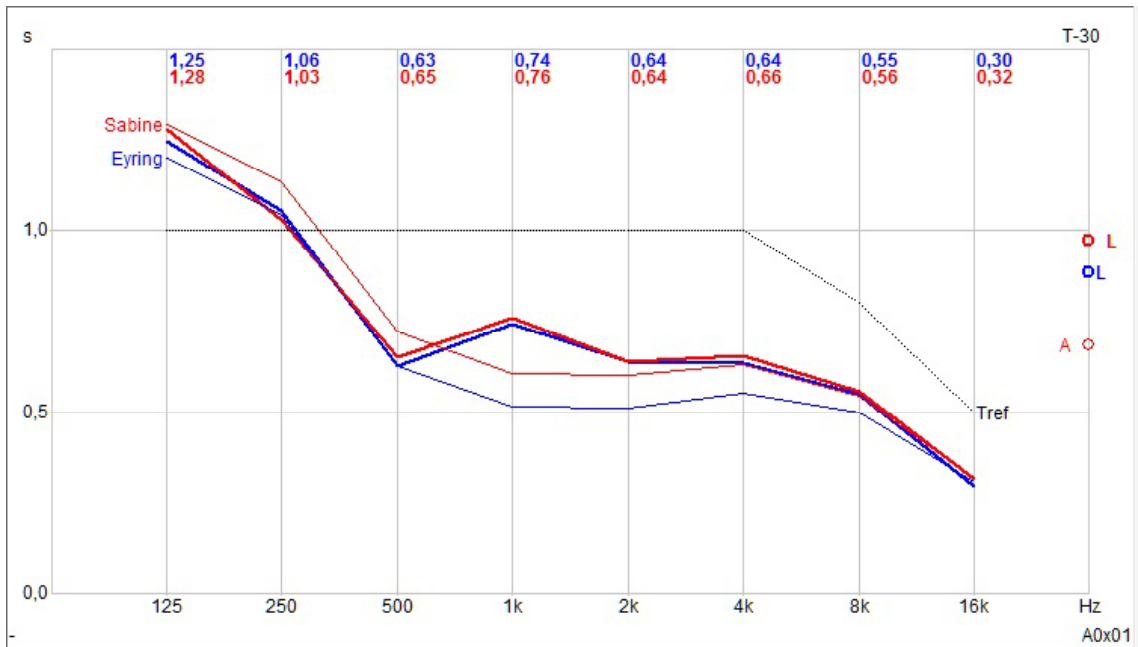
Grafica 4.

➤ Emisor 2



Grafica 5.

➤ Emisor 3

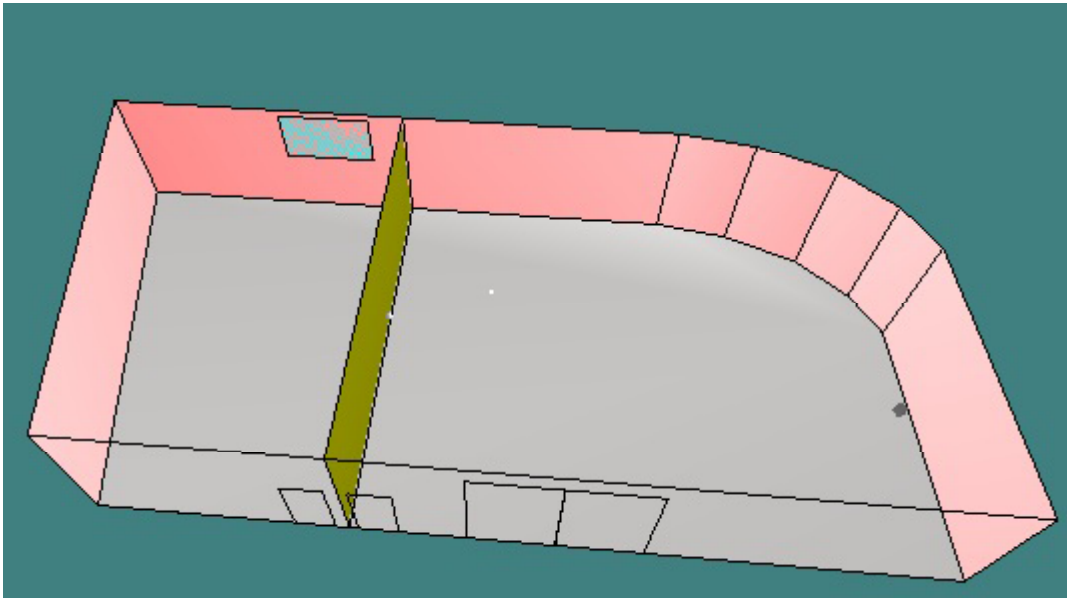


Grafica 6.

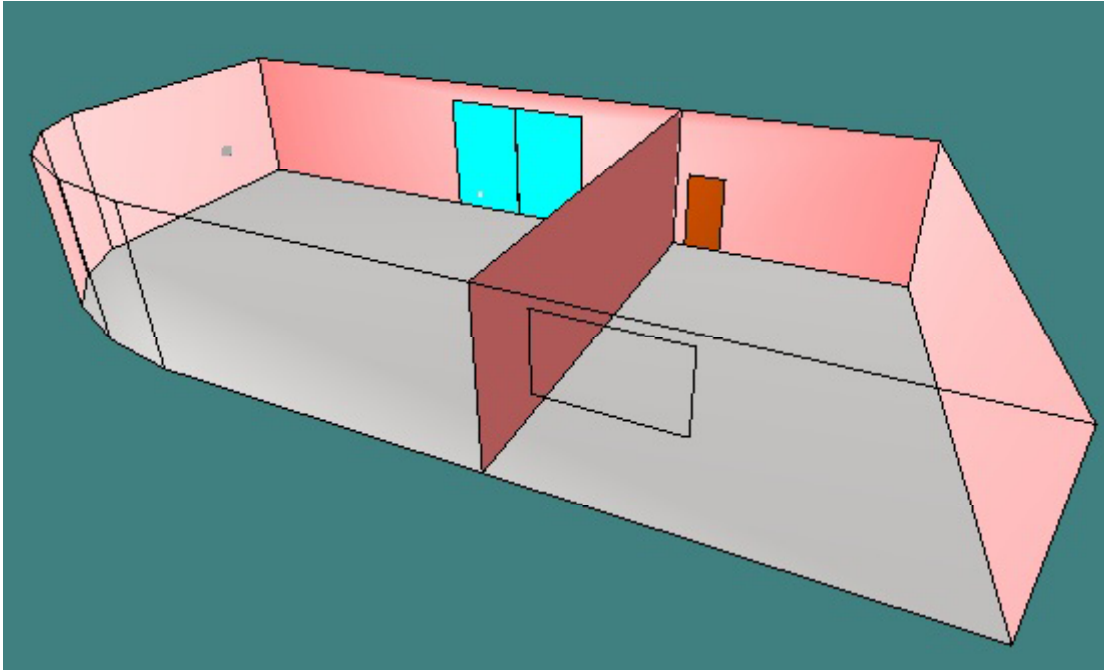
De nuevo vemos que existe un nodo para las frecuencias de 1KHz y 2Khz.

### 3.3 Modificación de la sala

Al hacer la simulación de la sala, hemos visto que existe un nodo en la sala donde se producen cancelaciones a frecuencias de 2Khz, por eso vamos a hacer una pequeña modificación en la sala. Se trata de un tabique entre las dos puertas de la entrada, quedando así dos salas distintas. Esto supone una disminución de la sala original, pero esta sala fue diseñada con el propósito de hacer en un futuro dos salas distintas, una de ensayos y otra como archivo o como clase de estudios, por tanto no afecta al transcurso habitual de ensayos de dicha banda.



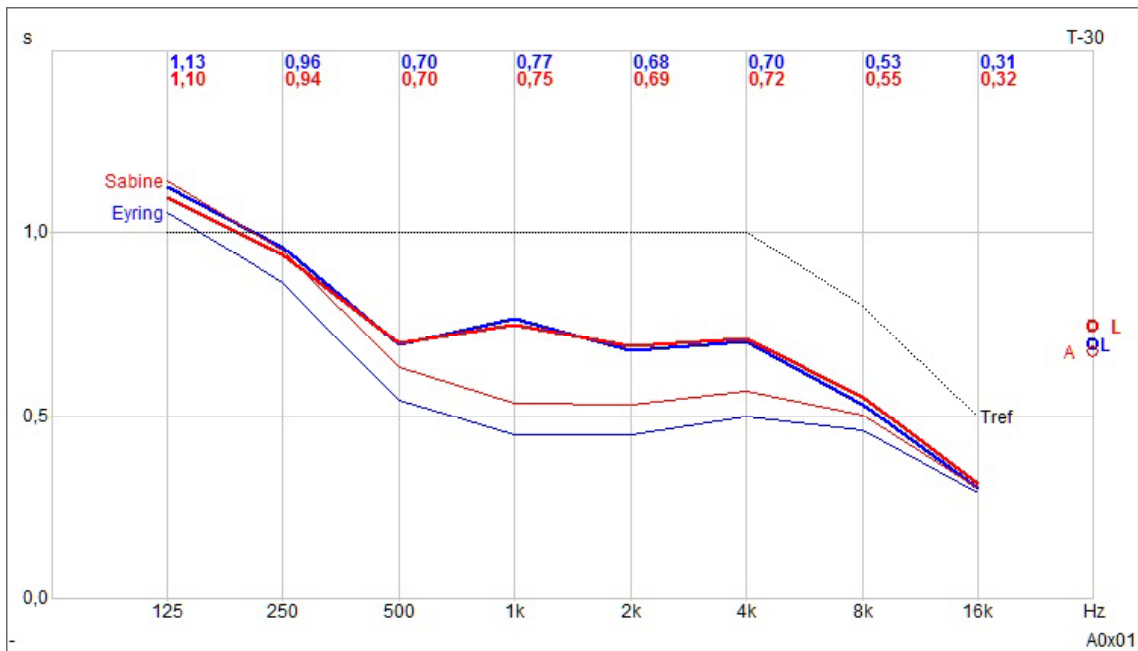




Vamos a realizar una simulación posicionando el receptor 1 ya que es donde se focalizan todos los instrumentos.

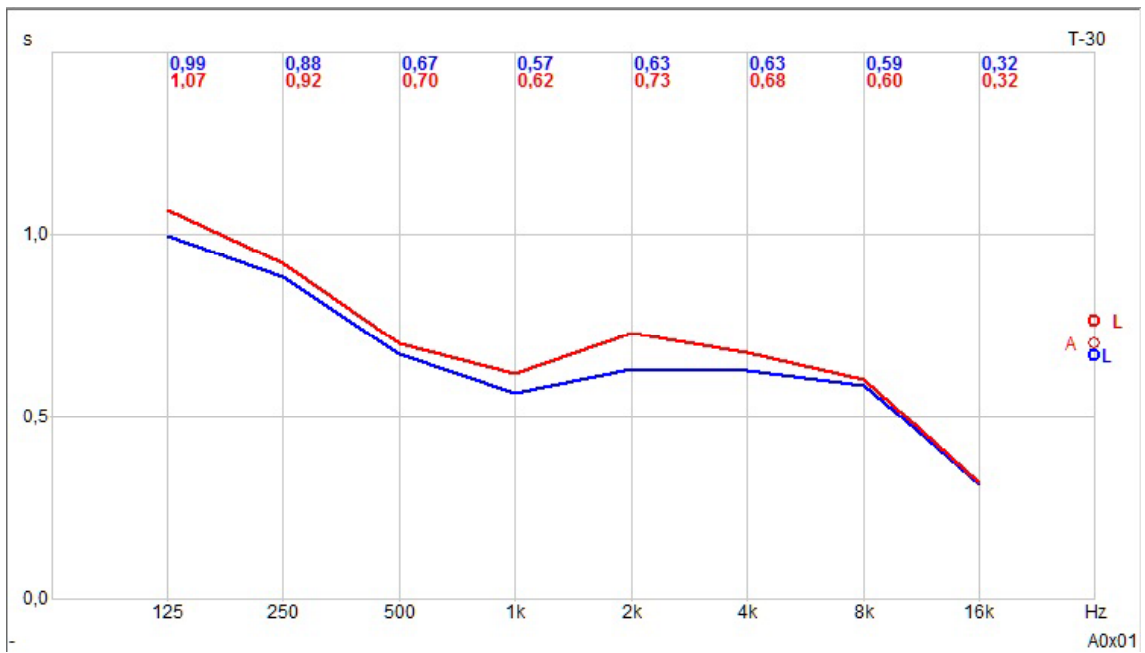
### 3.3.1 Simulación receptor 1 con pared adicional

➤ Emisor 1



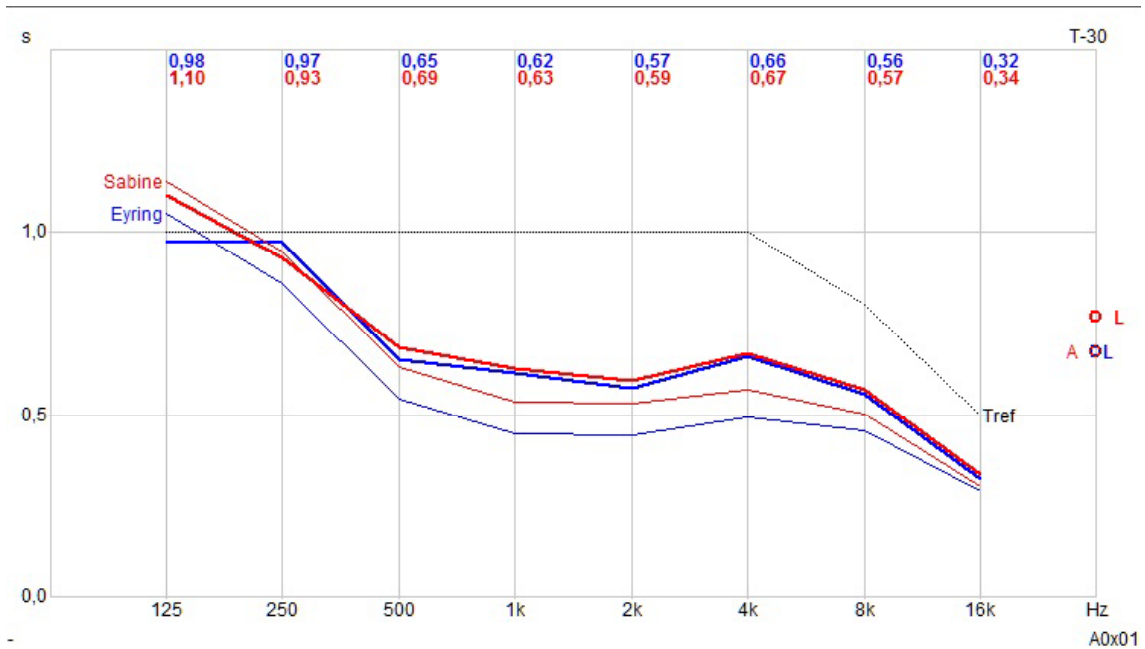
Grafica 7.

➤ Emisor 2



Grafica 8.

➤ Emisor 3



Grafica 9.

Como podemos observar se aprecia una mejora notable del

comportamiento acústico de la sala.

En un futuro sería aceptable crear un tabique para la mejora acústica de la sala y así ganar notablemente en calidad acústica y sonora.

Para finalizar solo remarcar que se debería adaptar la sala con resonadores para mejorar las frecuencias bajas ya que normalmente son mas elevadas. Para una banda de música es muy importante las frecuencias bajas, así que se deberá hacer de manera controlada.

#### **4. Conclusiones**

Como hemos mencionado anteriormente, la calidad del sonido de una sala no suele ser siempre la mejor o la esperada, por eso decidimos hacer un estudio de la sala de ensayos de la S. M. La Tropical de Benigánim, para comprobar, cambiar o mejorar la sonoridad, claridad y calidad del sonido del recinto.

Una vez hecho el estudio, hemos podido comprobar dichos hechos ya que se aprecian, entre otras, claras cancelaciones en frecuencias de 2KHz y los materiales de paredes, suelo y techo no son los mejores o los mas adecuados para una buena absorción del sonido en este tipo de instalaciones. Por tanto, hemos cambiado virtualmente algunos de estos materiales, y hemos añadido un tabique que ayuda a suprimir dichas cancelaciones y mejora la absorción total y la respuesta al impulso, dando lugar a una mejor acústica. Estos cambios podrían llevarse a cabo en la realidad, quedando así una sala mejor acondicionada para la finalidad ya mencionada.

Además, el espacio que se crea al introducir el tabique en la sala, podría ser utilizado como cabina de control de un estudio de grabación para grandes eventos musicales. De este modo, se obtendría un recinto multiusos(ensayos, audiciones y estudio de grabación).

## 5. Bibliografía

### ➤ **Libros:**

KISNLER y LAWRENCE E. (1990). Fundamentos de acústica. México: Limusa.

LLINARES GALIANA, JAIME. (1988). Acústica arquitectónica. Valencia: Universitat Politècnica de València.

CARRIÓN ISBERT, ANTONI. (1998). Diseño acústico de espacios arquitectónicos. 1ª Ed., Barcelona UPC.

Manual del usuario del programa de medición Catt-acoustic

### ➤ **Enlaces web:**

[http://es.wikipedia.org/wiki/Acondicionamiento\\_ac%C3%BAstico](http://es.wikipedia.org/wiki/Acondicionamiento_ac%C3%BAstico)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Sonido>

[www.deteca.es/espacios%20cerrados.pdf](http://www.deteca.es/espacios%20cerrados.pdf)

<http://www.ehu.es/acustica/bachillerato/feaces/feaces.html>

[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_08\\_09/io6/public\\_html/Paginas/reflex.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_08_09/io6/public_html/Paginas/reflex.html)

<http://html.rincondelvago.com/ondas-y-acustica.html>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Absorbente\\_ac%C3%BAstico](http://es.wikipedia.org/wiki/Absorbente_ac%C3%BAstico)

<http://es.wikipedia.org/wiki/Resonado>

<http://www.duiops.net/hifi/cine-en-casa-introduccionacondicionamiento.html>

[http://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%BAstica\\_arquitect%C3%B3nica#Ac.C3.BAstica\\_en\\_espacios\\_abiertos](http://es.wikipedia.org/wiki/Ac%C3%BAstica_arquitect%C3%B3nica#Ac.C3.BAstica_en_espacios_abiertos)

## Anexo 1

Frequency hz	Spacing %			Wavelength	1/2 Wavelength	1/4		
Wavelength p	q	r	Mode					
9.1	37.85	18.92	9.46	1	0	0	Axial	
18.1	49.7	19.03	9.51	4.76	0	1	0	Axial
18.3	1	18.82	9.41	4.71	2	0	0	Axial
20.2	9.4	17.05	8.53	4.26	1	1	0	Tangential
25.7	21.4	13.4	6.7	3.35	2	1	0	Tangential
27.4	6.2	12.57	6.29	3.14	3	0	0	Axial
32.8	16.4	10.5	5.25	2.63	3	1	0	Tangential
36.1	9.1	9.54	4.77	2.39	0	2	0	Axial
36.6	1.3	9.41	4.71	2.35	4	0	0	Axial
37.2	1.6	9.26	4.63	2.31	1	2	0	Tangential
40.5	8.1	8.5	4.25	2.13	2	2	0	Tangential
40.8	0.7	8.44	4.22	2.11	4	1	0	Tangential
45.3	9.9	7.6	3.8	1.9	3	2	0	Tangential
45.7	0.8	7.54	3.77	1.88	5	0	0	Axial
49.2	7.1	7	3.5	1.75	0	0	1	Axial
49.2	0	7	3.5	1.75	5	1	0	Tangential
50.0	1.5	6.89	3.44	1.72	1	0	1	Tangential
51.4	2.7	6.7	3.35	1.68	4	2	0	Tangential
52.4	1.9	6.57	3.29	1.64	0	1	1	Tangential
52.5	0.1	6.56	3.28	1.64	2	0	1	Tangential
53.2	1.3	6.47	3.24	1.62	1	1	1	Oblique
54.2	1.8	6.35	3.18	1.59	0	3	0	Axial
54.9	1.2	6.27	3.14	1.57	1	3	0	Tangential
54.9	0	6.27	3.14	1.57	6	0	0	Axial
55.5	1	6.21	3.1	1.55	2	1	1	Oblique
56.3	1.4	6.12	3.06	1.53	3	0	1	Tangential
57.2	1.5	6.02	3.01	1.51	2	3	0	Tangential

57.8	1	5.96	2.98	1.49	6	1	0	Tangential
58.3	0.8	5.91	2.95	1.48	5	2	0	Tangential
59.2	1.5	5.82	2.91	1.45	3	1	1	Oblique
60.7	2.4	5.67	2.84	1.42	3	3	0	Tangential
61.0	0.4	5.65	2.82	1.41	0	2	1	Tangential
61.3	0.4	5.62	2.81	1.4	4	0	1	Tangential
61.7	0.6	5.58	2.79	1.4	1	2	1	Oblique
63.7	3.1	5.41	2.7	1.35	2	2	1	Oblique
63.9	0.3	5.39	2.7	1.35	4	1	1	Oblique
64.0	0.1	5.38	2.69	1.35	7	0	0	Axial
65.4	2.1	5.27	2.63	1.32	4	3	0	Tangential
65.7	0.4	5.24	2.62	1.31	6	2	0	Tangential
66.5	1.2	5.18	2.59	1.29	7	1	0	Tangential
66.9	0.5	5.15	2.57	1.29	3	2	1	Oblique
67.2	0.4	5.13	2.56	1.28	5	0	1	Tangential
69.6	3.4	4.95	2.47	1.24	5	1	1	Oblique
70.9	1.8	4.86	2.43	1.21	5	3	0	Tangential
71.2	0.4	4.84	2.42	1.21	4	2	1	Oblique
72.2	1.3	4.77	2.39	1.19	0	4	0	Axial
72.8	0.8	4.73	2.37	1.18	1	4	0	Tangential
73.2	0.5	4.71	2.35	1.18	0	3	1	Tangential
73.2	0	4.71	2.35	1.18	8	0	0	Axial
73.5	0.4	4.69	2.34	1.17	7	2	0	Tangential
73.7	0.2	4.67	2.34	1.17	1	3	1	Oblique
73.7	0	4.67	2.34	1.17	6	0	1	Tangential
74.5	1	4.62	2.31	1.16	2	4	0	Tangential
75.4	1.1	4.57	2.28	1.14	2	3	1	Oblique
75.4	0	4.57	2.28	1.14	8	1	0	Tangential
75.9	0.6	4.54	2.27	1.13	6	1	1	Oblique

76.3	0.5	4.51	2.26	1.13	5	2	1	Oblique
77.1	1	4.47	2.23	1.12	6	3	0	Tangential
77.2	0.1	4.46	2.23	1.12	3	4	0	Tangential
78.1	1.1	4.41	2.21	1.1	3	3	1	Oblique
80.7	3.2	4.27	2.13	1.07	7	0	1	Tangential
80.9	0.2	4.26	2.13	1.06	4	4	0	Tangential
81.6	0.8	4.22	2.11	1.06	8	2	0	Tangential
81.8	0.2	4.21	2.11	1.05	4	3	1	Oblique
82.1	0.3	4.2	2.1	1.05	6	2	1	Oblique
82.3	0.2	4.18	2.09	1.05	9	0	0	Axial
82.7	0.4	4.16	2.08	1.04	7	1	1	Oblique
83.9	1.4	4.11	2.05	1.03	7	3	0	Tangential
84.3	0.4	4.09	2.04	1.02	9	1	0	Tangential
85.5	1.4	4.03	2.01	1.01	5	4	0	Tangential
86.3	0.9	3.99	2	1	5	3	1	Oblique
87.4	1.2	3.94	1.97	0.99	0	4	1	Tangential
87.9	0.5	3.92	1.96	0.98	1	4	1	Oblique
88.2	0.3	3.91	1.95	0.98	8	0	1	Tangential
88.4	0.2	3.9	1.95	0.97	7	2	1	Oblique
89.3	1	3.86	1.93	0.96	2	4	1	Oblique
89.9	0.6	3.83	1.92	0.96	9	2	0	Tangential
90.0	0.1	3.83	1.91	0.96	8	1	1	Oblique
90.3	0.3	3.81	1.91	0.95	0	5	0	Axial
90.7	0.4	3.8	1.9	0.95	1	5	0	Tangential
90.7	0	3.8	1.9	0.95	6	4		