

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“ Estudio acústico y simulación del  
 acondicionamiento del local de  
 conciertos de la Unión Musical de  
 Higuieruelas”**

**TRABAJO FINAL DE CARRERA**

Autor/es:

**Francisco José Moreno Gálvez**

Director/es:

**D.Francico Javier Redondo Pastor**

**D. Juan Antonio Martínez Mora**

**GANDIA, 2011**

## INDICE GENERAL.

### 1.-INTRODUCCIÓN:

#### 1.1-Objetivos

#### 1.2-Plan de desarrollo

##### 1.2.1-Realización medidas acústicas

##### 1.2.2-Comparación de los resultados obtenidos con los valores ideales.

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

##### 1.2.4-Plantear la solución para la mejora acústica

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

#### 1.3-Ubicación del lugar

### 2-INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

#### 2.1-Elementos que condicionan el sonido dentro de un recinto

#### 2.2-Teoría Geométrica

#### 2.3-Teoría Ondulatoria

#### 2.4-Teoría estadística

#### 2.5-Psicoacústica

### 3-PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE LAS SALAS.

#### 3.1-Tiempo de reverberación

##### 3.1.1-Bass Ratio (BR)

##### 3.1.2-Brillo (Br)

##### 3.1.3-Early Decay Time (EDT)

##### 3.1.4-Sonoridad

##### 3.1.5-Initial-Time-Delay Gap (Ti)

#### 3.2-Relaciones energéticas

##### 3.2.1-Relaciones Energéticas (ELR)

##### 3.2.2-Claridad

##### 3.2.3-Curva de energía reflejada (RECC)

##### 3.2.4-Espaciabilidad del sonido, amplitud aparente de la fuente (ASW)

3.2.5-Eficiencia Lateral (LF)

3.2.6-Corrección cruzada interaural ( $IACC_E$ )

3.2.7-Espaciabilidad del sonido. Sensación de sonido envolvente (LEV)

3.2.8-Corrección cruzada interaural ( $IACC_L$ )

3.2.9-Índice de difusión (SDI)

3.3-Parámetros dependientes del escenario

3.3.1 Soporte objetivo (ST1)

3.4-Relacionados con la orquesta y sus secciones

3.5-Anomalías en las salas

3.5.1-Coloración del sonido

3.5.2-Desplazamiento de la fuente sonora

3.5.3-Ecos y focalizaciones

3.5.3.1-Ecos

3.5.3.2-Eco flotante

3.5.3.3-Focalización del sonido

3.5.4-Efecto "Seat Dip"

3.5.5-Efecto galería de susurros

#### 4.-NORMATIVA VIGENTE PARA LA MEDIDA DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

4.1-Condiciones de medida

4.1.1-Generalidades

4.1.2-Instrumentación

4.1.3-Posiciones de medición

4.1.4-Procedimientos de medición

4.1.5-Particularidades de la medición de algunos parámetros.

4.1.6-Evaluación de las curvas de decrecimiento.

4.1.7-Incertidumbre de medición

4.1.8-Parámetros de medida

4.2-Expresiones de resultados

## 5.-ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

### 5.1-Materiales para el acondicionamiento

#### 5.1.1-Materiales absorbentes

5.1.1.1-Espesor del material

5.1.1.2-Porosidad del material

5.1.1.3-Densidad del material

5.1.1.4-Distancia del material a la pared rígida

5.1.1.5-Colocación de los materiales

#### 5.1.2-Resonadores (absorbentes selectivos)

5.1.2.1-Resonador de membrana o diafragmático

5.1.2.2-Resonador de cavidad simple (Helmholtz)

5.1.2.3-Resonador de cavidad múltiple

5.1.2.4-Resonador de cavidad múltiple a base de listones

#### 5.1.3-Reflectores

6.1.3.1-Reflectores planos

6.1.3.2-Reflectores curvos

#### 5.1.4-Difusores

5.1.4.1-Difusores poli cilíndricos

5.1.4.2-Difusores de Schroeder

5.1.4.2.1-Difusores MLS

5.1.4.2.2-Difusores QRD

5.1.4.2.2.1-Unidimensionales

5.1.4.2.2.2 -Bidimensionales

5.1.4.2.3-Difusores PRD

### 5.2-Aspectos a tener en cuenta en el acondicionamiento.

5.2.1-Absorción del aire

5.2.2-Absorción de las superficies vibrantes

5.2.3-Absorción del público y de las sillas

## 6.-TOMA DE MEDIDAS IN-SITU

### 6.1-Tiempo de reverberación

#### 6.1.1-Bass Ratio

#### 6.1.2-Brillo

#### 6.1.3-Sonoridad

#### 6.1.4.-Intial Time Delay

### 6.2.-Relaciones energéticas

#### 6.2.1-Claridad

### 6.3-Resultados

#### 6.3.1- Comparación

#### 6.3.2-Solución para el acondicionamiento

## 7-SIMULACIÓN EN CATT-ACOUSTICS

### 7.1-Simulación del recinto actual

#### 7.1.1-Simulación fuente1

#### 7.1.2 Simulación fuente 2

#### 7.1.3 Simulación fuente 3

### 7.2-Simulación del recinto modificado

#### 7.2.1-Simulación fuente1

#### 7.2.2 Simulación fuente 2

#### 7.2.3 Simulación fuente 3

### 7.3.-Comparación resultado, medido, simulado y simulado acondicionado.

## 8-CONCLUSIÓN

## 9- ANEXOS

### 9.1 BIBLIOGRÁFIA

## 1. INTRODUCCIÓN.

### 1.1. OBJETIVOS.

Los objetivos son dos:

Por un parte hacer un estudio acústico del local, comparando los valores de los parámetros acústicos obtenidos mediante ensayos acústicos, con los parámetros teóricos que debería tener y realizar el diseño del local en *catt-acoustic*.

Para ello tomaremos medías del recinto, realizaremos las medidas acústicas con la fuente dodecaédrica y tomando resultados en las posiciones de recepción según la teoría y a continuación realizando los cálculos pertinentes obtener los valores de los parámetros acústicos. Una vez obtenidos realizar la comparación con los valores teóricos.

Una vez tenemos los resultados prácticos y mediante las soluciones constructivas del local deberíamos hacer un diseño en *catt-acoustic* del recinto y hacer que las simulaciones que se hagan en ese recinto sean lo más similares posible a los valores prácticos, para que a la hora de la simulación del acondicionamiento, sea un resultado lo más certero posible y cercano a la realidad si algún día se ejecuta la propuesta de acondicionamiento.

Por otra parte, con la comparación realizada, hacer una propuesta de solución y acondicionamiento y simulación mediante *catt-acoustic*.

Con la comparación de los parámetros, propondremos una solución para llevar los resultados obtenidos, lo más cerca posible de los teóricos, siempre teniendo en cuenta que existe posibilidad de no llegar a la perfección y que dentro del punto de vista acústico, se propondrá una solución lo más compensada y lógica posible.

Esta solución será simulada mediante *catt-acoustic* de manera que podremos probar las diferentes propuestas de solución que planteemos y así ver cuál de ellas está más compensada y resultaría más correcta.

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

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

Se realizarán unas medidas del local según la especificación de los estándares ISO actuales.

Las medidas serán tomadas mediante el equipo de la universidad, Anexo 1.

Una vez tengamos estos valores en frecuencias podremos trabajar para realizar los cálculos pertinentes.

Los parámetros más relevantes que vamos a examinar serán:

-Criterios de calidad: TR, EDT

-Criterios de energía:  $C_{80}$

-Criterios de inteligibilidad: STI

### **1.2.2. Comparación de los resultados obtenidos con los valores ideales.**

Una vez obtenidos los valores de los parámetros acústicos mediante los cálculos y las medidas tomadas in-situ en el local, las compararemos con los valores que en la teoría debería tener una sala de las condiciones similares.

Cuando hagamos estas comparaciones nos encontraremos con bastantes parámetros que estén en discordia con los resultados deseados. Esto será debido a que el local ya sabemos que no se ha hecho desde ningún punto de vista acústico de manera que nos hace pensar así.

### **1.2.3. 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.

### **1.2.4. Plantear la solución para la mejora acústica.**

Una vez que tengamos los valores comparados con los valores ideales veremos cuáles son los que tenemos que modificar más y en qué zonas tenemos que aplicar los cambios.

Los problemas que nos podemos encontrar en el recinto, pueden ser:

Falta o exceso de tiempo de reverberación, problemas con el sonido directo, amplificación o atenuación de algunas frecuencias.

Una vez decididas las variaciones que vamos hacer ser realizará un informe o varios con las distintas propuestas de mejoras y cuáles serían más viables y equilibradas.

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

Una vez obtenidas las diferentes soluciones propuestas, las aplicaremos en nuestro recinto simulado y realizando tantas simulaciones como propuestas de soluciones tengamos.

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 Higuieruelas, a unos 60 kilómetros de Valencia, en la comarca de los serranos. Es un local polivalente del municipio de Higuieruelas, pero que está cedido a la Unión Musical de Higuieruelas, perteneciendo este siempre a la sociedad mientras exista.

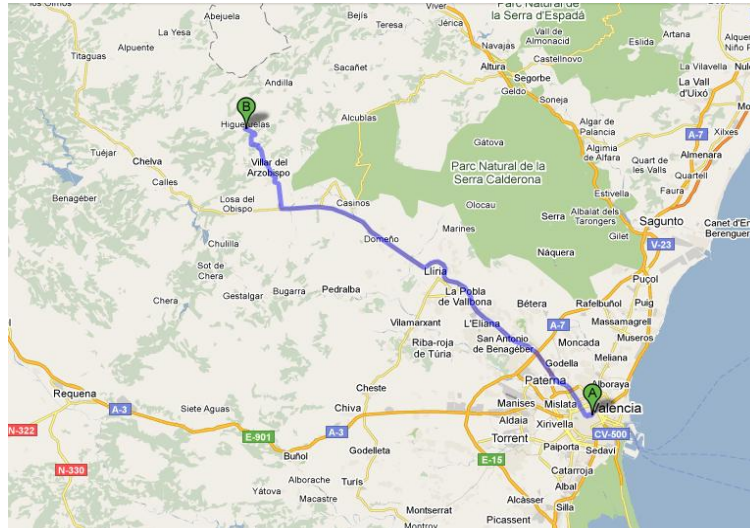


Figura 1: Localización del pueblo donde está el local a estudiar

El local está situado a las afueras del casco urbano, pero junto al barrio residencial. No tiene apenas edificios unidos a sus laterales. Solamente un casa por la calle Diputación y solo comparten una pequeña parte y sin ser esta medianera. 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.

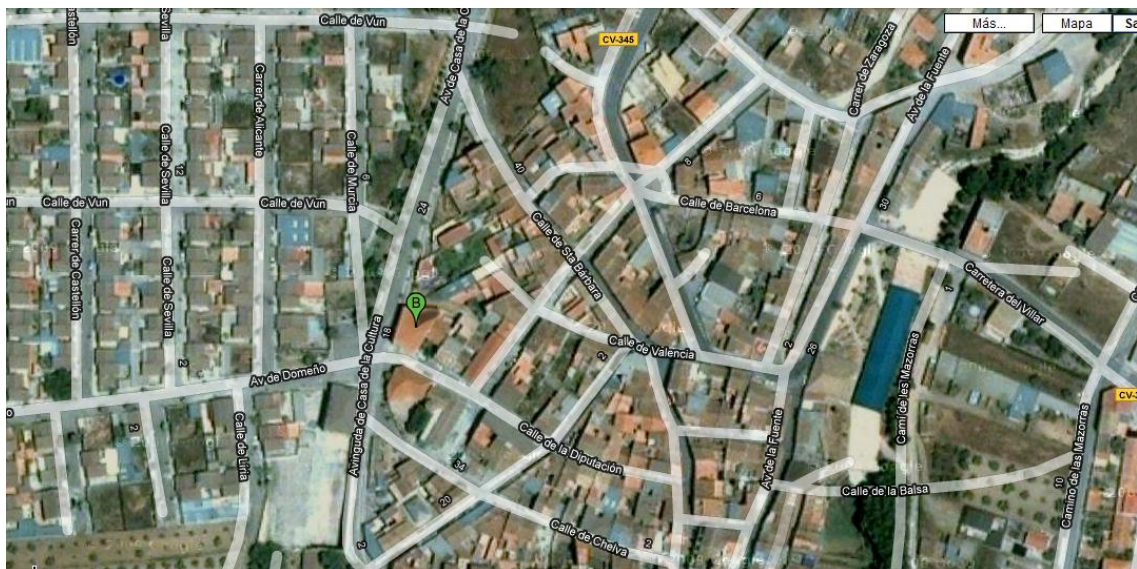


Figura 2: Ubicación del local dentro del casco Urbano

El edificio se encuentra entre la Avenida de la Casa de la Cultura y calle de la Diputación. Dando la puerta de entrada del local a esta última. Como vemos el foto es un edificio que consta de tres alturas a simple vista. La planta baja es independiente y no pertenece a la Unión Musical de Higuieruelas.



Figura 3: Localización del local

El interior de los dos pisos restantes se distribuyen en un gran espacio diáfano, que es donde es el local de conciertos, y la parte trasera una tercera altura donde están los despachos y las aulas, esta parte no se muestra ya que no afecta acústicamente al volumen del recinto. De manera que queda la distribución del local para conciertos como se ve en la siguiente simulación en 3D.

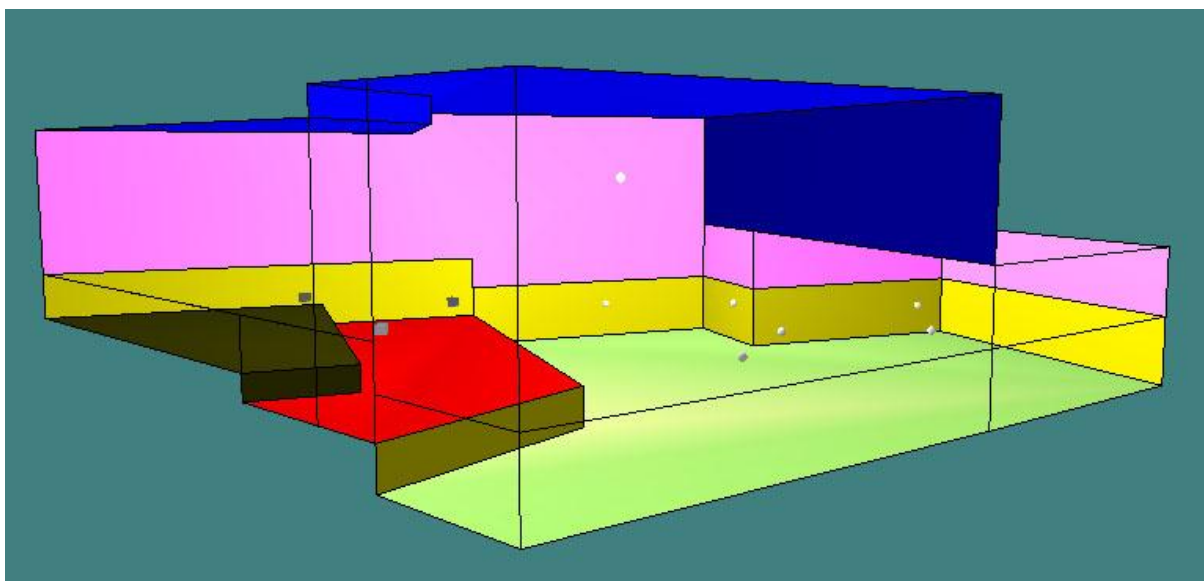


Figura 4 y 5: Simulación del local en 3D con Catt- Acoustic

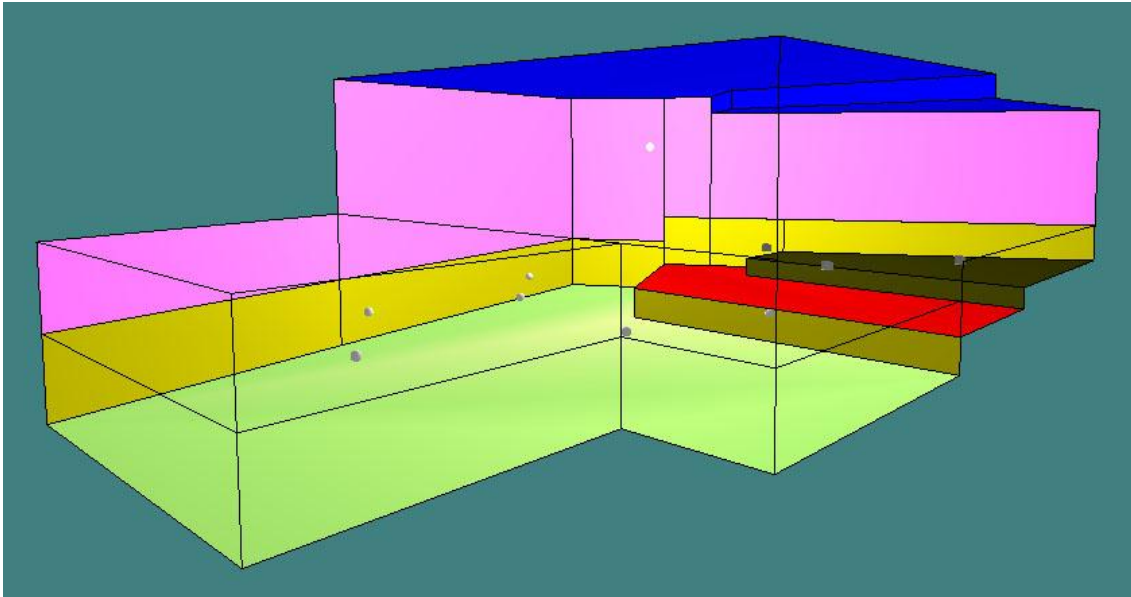


Figura 5

A continuación se muestra un plano de la planta del edificio, donde vemos el escenario y las escaleras de acceso que tienen. Además vemos en la parte inferior izquierda un círculo que representa la escalera de caracol que da acceso a las clases.

Junto a la escalera de entrada vemos otras escaleras más estrechas, que son las que comunican la planta baja con el local de la banda. Escaleras que por parte del ayuntamiento se ha planteado que sean suprimidas para que los dos locales sean totalmente independientes.

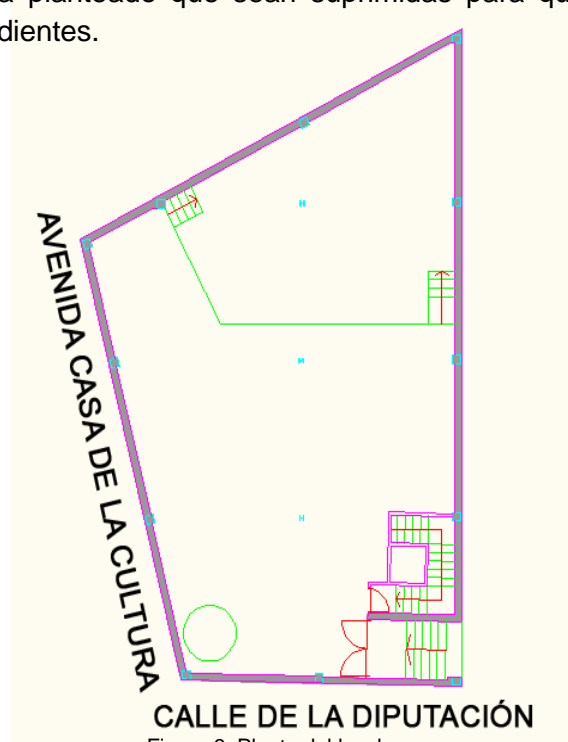


Figura 6: Planta del local a ensayar

Esto implica que en la solución a proponer del acondicionamiento se tendrá que tener en cuenta que harán aseso en esta superficie. En un primer momento se ha planteado también por parte del ayuntamiento realizar una pared lateral izquierda paralela que deje un espacio entre la fachada y esta y ahí aprovechar para hacer los baños y más clases arriba de estos comunicándose estas con las ya existentes.

## 2. INTRODUCCIÓN TEÓRICA.

### 2.1. ELEMENTOS QUE CONDICIONAN EL SONIDO DENTRO DE UN RECINTO.

Para analizar el comportamiento del sonido en una sala, partimos de una fuente de sonido omnidireccional.

Inicialmente el sonido se propaga libremente hasta que choca con los cerramientos del local donde se producen los siguientes efectos:

- **INTERFERENCIAS:**  
Cuando en un medio se propagan dos o más movimientos ondulatorios, el estado de perturbación de un punto la onda resultante será reforzada (interferencia constructiva) o atenuada (interferencia destructiva)
- **REFLEXIÓN ESPECULAR:**  
Cuando la onda sonora incide sobre la superficie, parte de su energía será radiada según las leyes de la reflexión.

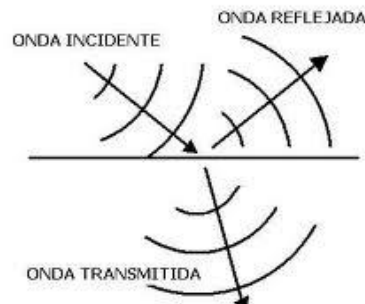


Figura 8: Ejemplo de cómo se comportan las ondas acústicas

- **REFLEXIÓN DIFUSA O DIFUSIÓN:**  
Se produce cuando la superficie de reflexión no se trata de una superficie lisa, sino rugosa. Como consecuencia habrá una gran cantidad de puntos de incidencia, que reflejarán el sonido en todas las direcciones dispersando el sonido.
- **REFRACCIÓN:**  
Las leyes se obtienen de manera similar a las de la reflexión. Cuando la onda incide sobre una superficie y la parte refractada se propaga en medios distintos y por tanto a velocidades distintas. En resumen los senos de los ángulos de incidencia y refracción son proporcionales a las velocidades de propagación en los medios de la onda incidente y refractado.
- **DIFRACCIÓN:**  
Ocurre cuando la onda encuentra un obstáculo o una abertura del tamaño comparable a la longitud de onda  $\lambda$ .

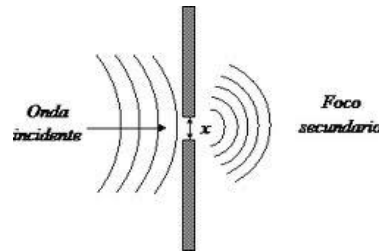
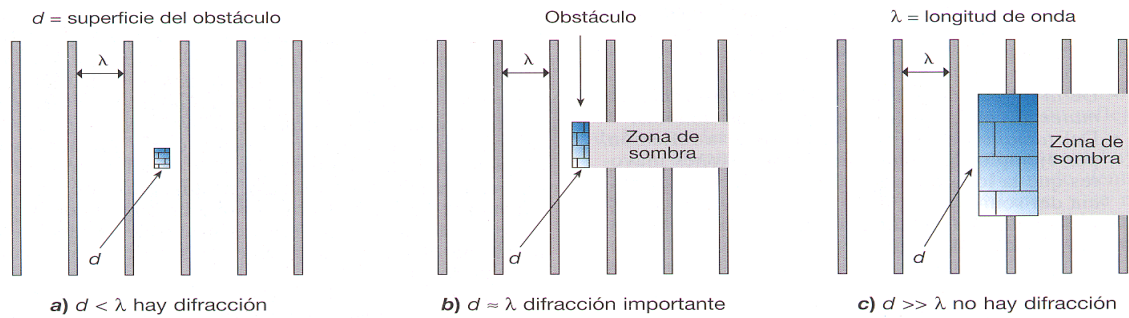


Figura 9: Ejemplo de cómo se comportan las ondas acústicas ante un obstáculo o abertura.

Si el obstáculo o abertura es más pequeño que la longitud de onda, la onda pasa bordando el obstáculo sin más siguiendo su trayectoria. Pero si este es mayor o igual que  $\lambda$ , se hace evidente la distorsión que afecta a la onda.

Como vemos en la figura se trata de un obstáculo se produce una zona de sombra y si se trata de una abertura se produce una nueva fuente sonora puntual secundaria radiando ondas esféricas.

- **ABSORCIÓN O ATENUACIÓN:**

Las ondas planas permanecen constantes en su propagación, mientras que la esférica disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente.

El sonido lleva implícita una disipación de energía bajo la forma de un desprendimiento de calor así, la pérdida de presión por un factor exponencial siendo  $\alpha$  la constante de atenuación del medio.

Los sonidos de baja frecuencia se absorben menos que los de alta. Lo que explica que, cuanto más nos alejamos de una fuente, mas grave nos parece el sonido percibido. Esta atenuación depende de la frecuencia, de la temperatura y del grado de humedad del aire en que se propaga.

- **SONIDO DIRECTO:**

Se trata del sonido que llega directamente si sufre ninguna desviación y reflexión. Se trata del sonido que se recibiría en un espacio al aire libre. Este solo depende de la distancia disminuyendo a razón de 6 dB cada vez que se duplica la distancia (ley cuadrática inversa).

- **SONIDO REFLEJADO:**

Es aquel que tras sufrir una desviación al chocar con las superficies llega al receptor. Depende de dos factores:

-Del recorrido que realice el sonido ya que según la longitud recorrida la cantidad de energía resultante al llegar al receptor será distinta. Por lo que no es lo mismo la cantidad de energía que recibimos si es una reflexión temprana que si ha sufrido varias reflexiones.

-De las superficies con las que choca la onda. Según el tipo de superficie y del compuesto de esta, el sonido será reflejado de una manera más difusa o menos y será más absorbido menos.

- **PRIMERAS REFLEXIONES O REFLEXIONES TEMPRANAS:**

Son aquellas que llegan al receptor después de sufrir un choque y llegan antes de que transcurran 100ms de haber recibido el sonido directo. Este tiempo puede ser distinto, por ejemplo para recintos para la audición de música, habrá que analizar los primeros 80ms. Estas reflexiones son típicas de cada punto y de cada sala y son necesarias para describir las condiciones acústicas del receptor situado en una posición en concreto.

- **COLA REVERBERANTE O REFLEXIONES TARDÍAS:**

Estas reflexiones generalmente son de orden superior a 3. Y la densidad es mayor que las primeras al haberse dispersado al chocar con las superficies. El nivel sonoro es menor ya que con el recorrido del sonido y junto a la absorción de las superficies este es atenuado.

Las reflexiones tardías llegan de manera discreta, pero es nuestro cerebro el que se encarga de integrarlas e interpretarlas como un único sonido. De manera que estas nos determinan como es la reverberación del sonido, el tiempo que tarda en desaparecer el sonido desde que la fuente deja de emitir sonido.

Por lo que deducimos que la reverberación dependerá de las características de las superficies que encierran el local y del volumen de este.

De la observación mas general del campo sonoro en el interior de un recinto podemos decir que las zonas más próximas a la fuente del sonido, predominará el sonido directo, denominado esta zona como campo directo, a medida que nos alejamos este irá disminuyendo y el sonido reflejado aumentando y cuando estos dos sean igualados nos encontraremos a la distancia crítica, donde coinciden el nivel de sonido directo con el de reflejado. Si seguimos alejándonos el nivel sonido reflejado se hace más fuerte que el directo de manera que nos encontraremos en la zona de campo reverberante.

## 2.2 TEORÍA GEOMÉTRICA.

Con la teoría geométrica es con la que se interpreta el sonido como si fuese un rayo de luz, basada en el principio de Fermat, contemplándose el mismo tipo de propiedades que para esta, tanto reflexión, difracción, refracción, por cambio de medio, pero esta última no la vamos a tener en cuenta porque en acústica consideramos que todo el recinto, tiene las mismas condiciones, el mismo aire, temperatura, de decir que no hay cambio de medio.

Con esta teoría podemos trabajar sobre la influencia del campo directo y las primeras reflexiones de manera individualizada, ser capaces de detectar posibles ecos y si las hubiese, focalizaciones. En el caso de zonas donde no llega correctamente el sonido nos da posibilidad del estudiar el guiado de este.

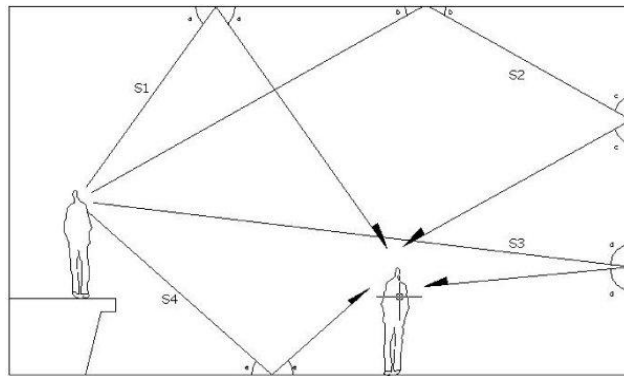


Figura 10: Ejemplo de cómo le llegan al receptor las ondas acústicas simuladas por rayos.

Esta teoría solo nos será útil y representativa para medias y altas frecuencias, dejando las bajas de lado debido a que se comportan de una forma bastante diferente al chocar contra los obstáculos. Cuando la longitud de onda es grande, cualquier obstáculo en el recorrido de esta resulta pequeño de manera que se producen difracciones, por lo cual no puede ser aplicada esta teoría.

Todo esto significa que el método solo se puede emplear con exactitud sólo cuando comparativamente se consideran grandes superficies reflectantes o bien cuando analizamos sonido de media o alta frecuencia.

- **Método geométrico**

Se basa en la aproximación del frente de ondas propagándose en sus direcciones en rayos sonoros que se comportan igual que los rayos luminosos y emergen de la fuente, obteniendo cambios de dirección y cuando pasan de un medio a otro y existiendo reflexión geométrica sobre obstáculos.

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} Q$$

En una fuente que emita supuestamente omnidireccionalmente, la intensidad(I) disminuye con el cuadrado de la distancia recorrida(r), y en el caso de que la fuente no emita igual en todas las direcciones entre en juego Q que es el factor de direccionalidad. Los rayos reflejados en la superficie emergen todos desde una misma fuente, siendo esta la fuente imagen situada virtualmente al otro lado de la superficie, perpendicularmente y a la misma distancia que la fuente real.

- **Focalizaciones**

Como ya hemos visto como se producen las reflexiones sobre las diversas superficies, según las características geométricas en superficies planas.

Ahora vamos a ver cómo afecta el que la superficie sea curva, tanto cóncava como convexa desde el punto de vista de la fuente.

En un principio se va a actuar como si se tratase de una superficie plana, considerando en cada punto la superficie tangente a la misma. Podemos deducir que si la fuente sonora está sobre la superficie o muy cerca, los rayos que parten sufrirán varias reflexiones y aquellos que coincidan con el lado de uno de los infinitos polígonos regulares, el rayo volverá a la fuente.

Las superficies cóncavas son las responsables de producir las focalizaciones.

Se crean focos conjugados por ejemplo el caso de una superficie elíptica, todo el sonido que sale de la fuente se concentra en un punto en concreto en el extremo opuesto, llamándose este el foco conjugado.

Este fenómeno manifiesta la concentración de rayos, produciendo graves efectos en la homogeneidad acústica de la sala por lo cual debemos evitar en la medida de lo posible este tipo de superficies. También existe de que la fuente no se coloque justo en la mitad de la superficie y se coloque más cerca de la curva, de esta manera la parábola se comportará divulgando todos los rayos paralelos.

Por lo contrario las superficies implican dispersión de los rayos, de manera que es una de las posibilidades que existe para compensar las focalizaciones no deseadas, otra opción será recubrir la superficie de material absorbente.

- **Estudio del eco**

Este se da cuando la diferencia de tiempo de recepción de una misma señal acústica desde la misma fuente tiene un desfase. El oído humano tiene una respuesta media de unos 50ns, es decir todas las señales que lleguen con un desfase inferior este se percibe como una única señal.

Ahora teniendo en cuenta que la velocidad de propagación del sonido en el aire es 340m/s resulta:

$$\Delta l = c \times t = 340 \times 50^{-3} = 17m$$



De manera que en consecuencia, si la diferencia de recorridos entre el sonido directo y el reflejado es mayor de 17m, el sonido llegará cuando ya finalizó la impresión sonora del sonido directo, percibiéndose entonces la sensación del eco.

En general, la forma de tratar el eco es una sala es en primer lugar identificar las superficies propensas a generar eco y actuando sobre ellas haciéndolas más absorbentes de modo que las reflexiones que produzcan sean suficientemente débiles para no ser audibles.

- **Diseño de un buen sonido directo**

En una sala es fundamental que esta cuente con la energía directa y reverberada suficiente, mediante un adecuado diseño y guiado del sonido.

Para facilitar la llegada del sonido directo es importante reducir al máximo la distancia entre fuente y público. Esto sería en el caso del diseño de una sala, nosotros esta parte ya la tenemos delimitada, debido a que el edificio ya está construido, y nosotros vamos a realizar el acondicionamiento.

Aquí mostramos los tipos de planta que deberían tener para un buen diseño, de las formas representadas es la trapezoidal la que proporciona menor distancia media fuente receptor, también hay que tener en cuenta que esta proporciona una serie de reflexiones que pueden ser tan útiles como el sonido directo.

Es importante tener en cuenta que el camino recorrido por el sonido directo esté libre de público, ya que si el sonido atraviesa zona ocupada por público se absorbe con razón de 0,65dB/m. Para ello se realiza la elevación entre dos filas consecutivas debe ser del orden de 8-12cm, para que el sonido llegue libre de las cabezas de los espectadores anteriores.

El arranque de la rampa se puede alejar de la fuente, elevando la fuente a una altura de  $h$ , tal que:

$$d = b(2,5h - 1)$$

Siendo  $d$  la distancia donde debe iniciarse la pendiente del suelo y  $b$  la distancia entre dos filas consecutivas.

- **Diseño para el sonido reflejado**

En una sala cuando las paredes no sean muy absorbentes el campo acústico estará contribuido por sonido directo y reflejado por las paredes de la misma. Mediante procedimientos geométricos podemos guiar el sonido, (al menos en frecuencias medias y altas). Con esto podemos permitir aumentar la sonoridad en aquellas partes más alejadas de la fuente donde la componente directa es más débil.

Para la audición musical hay que proveer los auditorios de muchas reflexiones decayendo gradualmente en intensidad a medida que se distancian más de la llegada del sonido directo.

Muy útiles son los elementos difusores porque hace que el sonido salga en todas direcciones. En la figura se muestra.



Figura 10 bis: Ejemplo de cómo los rayos salen en todas las direcciones.

Es muy importante el diseño del techo para que el sonido dirija todas sus reflexiones por igual a toda la sala, es conveniente que a medida que aumenta la distancia al foco sonoro la cantidad de rayos sonoros sea mayor, así de alguna manera compensamos la pérdida de nivel por distancia con la superposición de reflexiones.

En primer lugar del direccionamiento del sonido, es conveniente el inclinar la pared del techo para evitar el eco en las primeras filas y así dirigir el sonido para las últimas, de la misma manera es bueno una inclinación distinta para la parte del techo donde se está la fuente y en la parte trasera de los locales también se les da cierta inclinación para dirigir el rayo.

En cuanto a la planta los laterales de alado de la fuente se han inclinado en la zona próxima a la fuente para dirigir adecuadamente las reflexiones hacia el fondo del local.

### 2.3. TEORÍA ONDULATORIA.

Es la teoría para obtener la respuesta de la sala. Existen propiedades acústicas que no son capaces de ser detectadas mediante las teorías observadas y estas pueden ser responsables de las alteraciones y defectos acústicas de la sala.

Por ejemplo podríamos encontrarnos con redes de interferencias, producción simultánea de ondas estacionarias, lo que conlleva una distribución altamente heterogénea del nivel de presión sonora en la sala, con la pérdida de calidad acústica en la sala.

Como ya sabemos por las teorías de vibraciones todos los elementos son susceptibles a vibrar, al separarlo de su posición de equilibrio y dejarlo libre, vibra siempre de unas determinadas formas que corresponden a lo que se denomina sus modos naturales de vibración. Lo mismo ocurre con las salas que actúan como canal de transmisión del campo acústico, estos modos naturales de vibración, llevan asociadas unas frecuencias, las cuales son las frecuencias propias de vibración y van ligadas a la naturaleza del recinto, forma, geometría, dimensiones y tamaño y características del objeto susceptible a entrar en vibración.

**Modos propios de vibración:** Cualquiera que sea la forma de la sala, todas poseen unas frecuencias propias de vibración que les son características y que se explican por la formación de ondas estacionarias dentro del recinto.

La frecuencia características, son aquellas que la onda acústica, tras un recorrido por la sala vuelve a encontrarse en su punto de origen, de manera que se produce una onda estacionaria, ya que esta no progresa, la energía no se propaga fuera del recorrido de esa onda. Esto dará que existan puntos con presión acústica mínima en todo instante (nodos), y otros con presión máxima (vientres), esto produce que exista una gran heterogeneidad de la sala.

A cada frecuencia de las posibles ondas estacionarias que se forma en un recinto corresponde una frecuencia característica de un modo propio o natural de vibración del local.

**Fenómenos de resonancia:** La resonancia bien dada de que cualquier objeto es susceptible de vibrar, siempre según unas frecuencias determinadas, llamadas frecuencias propias del objeto o en nuestro caso será del recinto. Existen dos posibilidades, que al objeto se lo haga vibrar a una frecuencia que no sea la propia, de manera que no existirá correlación de fase y por tanto no se reforzará la vibración del modo propio. La otra posibilidad es que el objeto que se hace vibrar con una frecuencia igual a la suya propia, de manera que se producirá una correlación de fase entre su movimiento natural y el inducido, aumentando así la amplitud de la vibración.

En nuestro caso cuando el foco sonoro produce un campo acústico se puede producir el fenómeno de resonancia, ya que como hemos comentado antes debido a la coincidencia de las frecuencias del campo acústico emitido, con las frecuencias correspondientes a los modos propios de vibración de la sala. De esta manera el efecto de la resonancia consiste en la excitación de los modos de resonancia propios del local produciéndose ondas estacionarias en distintas direcciones y a distintas frecuencias. Una vez puesta en funcionamiento la fuente sonora queda pues excitados

los modos propios de la sala y se ponen a vibrar y cada vez a mayor amplitud, dado que la fuente va aumentando la energía hasta que se establece un equilibrio entre la energía que reciben y la que pierden por absorciones. Esto hablando para las frecuencias que cumplen las condiciones de resonancia para las demás tras un cierto número de reflexiones desaparece y no sufren ningún tipo de refuerzo.

Como ya hemos comentado anteriormente, en las ondas estacionarias se producirán nodos y vientres de manera que si el punto de recepción se coloca en un vientre la frecuencia de este modo estará muy reforzada mientras que si se coloca en un nodo estará muy atenuada. Este caso se puede comprobar experimentalmente, observando cómo cambia la presión acústica percibida de unos puntos a otros de la sala según estén en un vientre o un nodo.

Podemos obtener las frecuencias de resonancia de una manera experimental, en una sala rectangular, podemos colocar la fuente en un ángulo y en el opuesto colocar el receptor y realizar un barrido de frecuencia mediante tonos puros e ir comprobando en cuál de ellas se produce el aumento de nivel de presión de manera que estas frecuencias son las que se considerarán con las frecuencias propias de la sala, produciéndose una resonancia.

Cuando interrumpamos la fuente, podremos observar como decae el nivel de presión de todas las frecuencias a una cierta velocidad, siendo las frecuencias de resonancia las que más despacio caerán, de manera que el local tendrá un tiempo de reverberación más alto para las frecuencias de resonancia.

Como vemos en la imagen el número de resonancias a alta frecuencia es más alto pero son de menor intensidad que a bajas frecuencias, que aun estando más separadas estas son de mayor intensidad relativa.

**Modos axiales:** son aquellos cuya dirección de propagación es paralela a un eje. Se producen cuando dos cosenos directores son nulos. La onda estacionaria se produce entre dos planos paralelos. La onda incidente y reflejada son normales, ambas al cerramiento.

En esta figura observamos la distribución de isóbaras correspondientes al modo axial de vibración.

**Modos tangenciales:** presentan sólo dos componentes del vector de onda siendo el tercero nulo. Se producen estos modos cuando la dirección de propagación de las ondas correspondientes permanece paralela al plano de uno de los cerramientos.

**Modos oblicuos:** son aquellos que corresponden a valores no nulos de  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_z$ . La dirección de propagación de las ondas correspondientes no es paralela a ningún plano

Las frecuencias propias de asociadas a los diferentes modos de propios dependen de la geometría de la sala, su determinación resulta muy compleja. De manera que solo es posible calcularlos y de una manera muy sencilla cuando se trata de una sala paralelepípedica con superficies totalmente reflectantes. Para estos casos se utiliza la fórmula de Rayleigt:

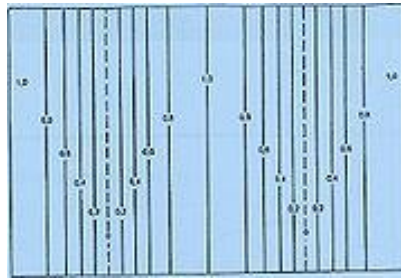


Figura 11: Ejemplo de cómo se comportan los modos oblicuos

$$f_{k,m,n} = 172,5 \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

Donde  $L_x, L_y, L_z$  representan las dimensiones de la sala en metros, y  $n_x, n_y, n_z$  pueden tomar cualquier valor entero (0, 1, 2, 3.....).

Cada combinación de los elementos dos dará la frecuencia y modo propio asociado.

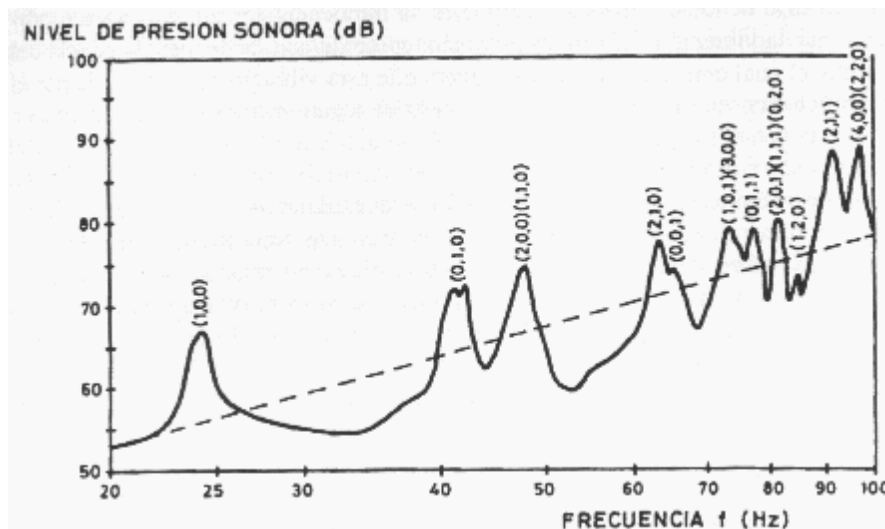


Figura 12: Distribución de los modos propios en frecuencia.

Por otra parte hablamos de que los fenómenos de resonancia se aprecian más a bajas frecuencias y en recintos con dimensiones reducidas y de una geometría muy regular. A partir de una frecuencia concreta estos se hacen muy numerosos de manera que se hace equivalente a la ausencia de estos, ya que no haz frecuencias con un nivel sonoro muy diferente al resto.

La fórmula que permite calcular es la siguiente, la cual nos muestra la frecuencia límite a partir de la cual los modos se consideran nulos.

$$f_{max} = \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} = \left(\frac{c^3 t_r}{8,8\pi V}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde  $V$  es el volumen en  $m^3$ ,  $RT_{mid}$  el tiempo de reverberación como promedio de los valores correspondientes a las bandas de octava centradas en 500Khz y 1 khz

**Conclusiones del diseño:** ya hemos visto como se comporta una sala según sus dimensiones, los modos de resonancia y que pueden producir problemas acústicos, sobre todo en salas pequeñas y son más acusadas y perceptibles a bajas frecuencias y a medida que aumentamos la frecuencia el problema deja de tener importancia, donde los modos excitados son muchos y barren casi todas las frecuencias.

Una clave para evitar problemas acústicos relacionados con los modos propios de resonancia de una sala, se evitará el realizar excesivamente regulares, así como grandes planos y superficies paralelas y reflectantes. Para ello se elegirán las dimensiones de la sala con proporciones de manera que no haya relaciones aritméticas entre ellas. Ya que de no ser así las simetrías por relaciones simples favorecen a la creación de modos propios, viéndose más reforzada y aumentada las irregularidades en el campo acústico.

De manera que las proporciones recomendadas son según los tamaños:

Para salas de pequeñas dimensiones las proporciones entre sus dimensiones serán:

$$\frac{h}{1} = \frac{b}{\sqrt[3]{2}} = \frac{l}{\sqrt[3]{4}}$$

Para salas mayores, la proporcionalidad será:

$$\frac{h}{b} = \frac{b}{3} = \frac{l}{5}$$

Realmente las proporciones pueden variar en un margen relativo respecto a las dadas así en el gráfico se delimitan dos zonas, la zona A donde las proporciones aseguran una distribución uniforme de modos propios y en la zona B dan una distribución no favorable de frecuencias propias.

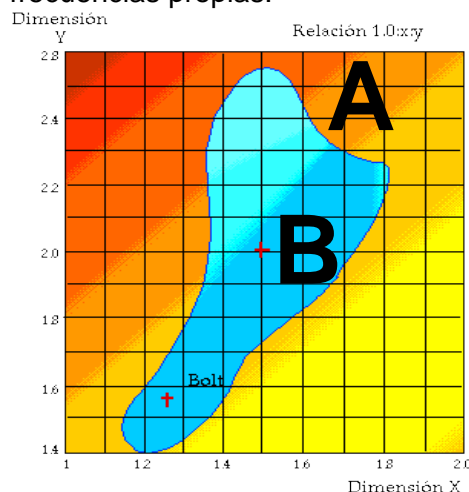


Figura 13: Diagrama de Bolt

## 2.4. TERORÍA ESTADÍSTICA.

Cuando la fuente sonora comienza a irradiar energía acústica en un recinto, el campo acústico empieza propagándose libremente, transcurrido un tiempo, que depende de la distancia de la fuente a los cerramientos, las ondas acústicas empiezan a sufrir reflexiones y se producen superposiciones entre los incidentes y las reflejadas.

La energía que se genera en la sala se va absorbiendo por los cerramientos y por la absorción del medio. Cuando el conjunto absorbe la misma energía por unidad de tiempo que la emitida por la fuente, la energía llega a una situación estacionaria, a partir de este momento la densidad de energía media en la sala permanece constante.

Si la fuente es interrumpida, como no decrece en todas las frecuencias de igual manera, va siendo absorbida por la sala hasta que el nivel es inaudible. A este fenómeno le denominaremos reverberación. Esta persistencia puede ser buena, reforzando la plenitud de sonidos musicales y el efecto de mezcla, y perjudiciales, enmascarando unos sonidos con otros y dificultando la claridad de estos.

La reverberación desde el punto de vista de la acústica Ondulatoria, se explica como el descenso de energía de cada una de las ondas que se propagan en una sala, tras la interrupción de la fuente. Es decir las ondas se debilitan progresivamente por la pérdida continua de energía por absorción.

Desde el punto de vista de acústica Geométrica, se explica como la suma de rayos que llegan a un punto de un recinto, cierto tiempo después de dejar de emitir la fuente, provenientes de sucesivas reflexiones, cuyas intensidades van disminuyendo cada vez que se produce una reflexión, por la absorción de energía acústica por el cerramiento.

Y desde el punto de vista de acústica Estadística está basada sobre los principios similares a los de la teoría cinética de gases, establece que todas las partículas sonoras son idénticas en tamaño y energía. Asimismo, la distribución de velocidades es de forma que la probabilidad de tener cualquier dirección es la misma, lo que confiere al conjunto de partículas sonoras una total incoherencia, sin interferencias, pudiéndose sumar energías sonoras sin tener en cuenta diferencias de fase.

**Condiciones del campo difuso.** En los campos acústicos en los que todas las direcciones de propagación del sonido aporten la misma intensidad sonora, no solo en estado estacionario sino en cualquier momento se le denominará campo difuso y en aquellos en que la distribución de la energía acústica es homogénea e isótropa en cualquier instante y punto del mismo.

En un primer lugar tomaremos las medidas del local, para ver según el volumen que tiene calcular el tiempo de reverberación óptimo

Para recintos grandes

$$t_{R_{op}} = 0,32 + 0,17 \log V$$

Para recintos pequeños

$$t_{Rop} = 0,4 + 5 * 10^{-4}V$$

Como el recinto ya está diseñado no podremos fijarnos en las proporcionalidades que se ven en la teoría ondulatoria para evitar que se produzcan modos propios. Pero si en la propuesta de acondicionamiento modificásemos el recinto tendríamos en cuenta en la media de lo posible este aspecto.

**El tiempo de reverberación** es conocido como tiempo que tarda en descender el sonido o la velocidad a la que lo hace desde que es desconectada la fuente sonora. Y no la duración de la reverberación que ésta sería infinita, ni la duración de la reverberación audible, que depende de la potencia de emisión de la fuente y del nivel de ruido de fondo.

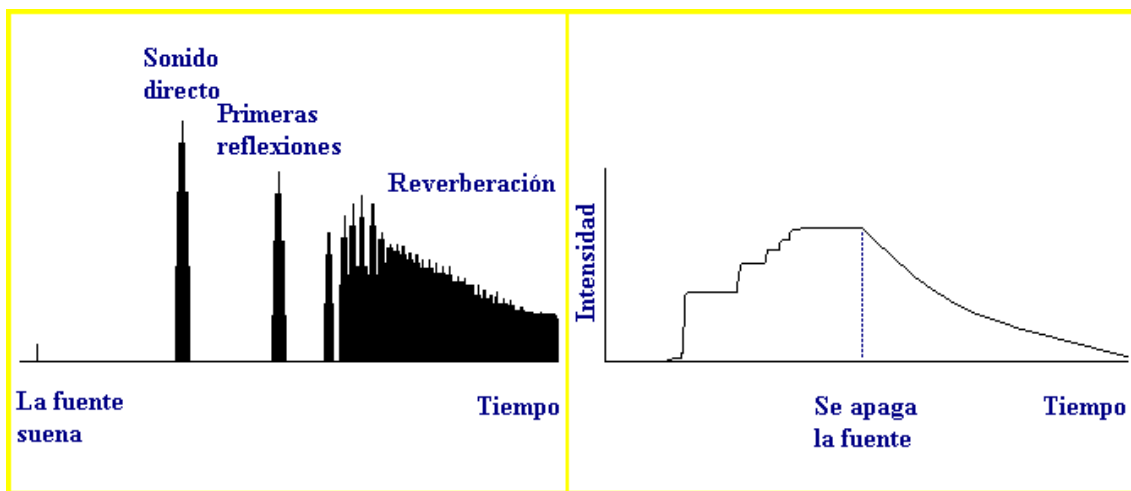


Figura 14: Ejemplo del espectro generado por una fuente en un local.

Sabine realizó distintas medidas experimentales del tiempo de reverberación de la que concluyó con que este dependía del volumen y del área de absorción equivalente.

$$RT = \frac{0,162V}{Atot} = \frac{0,162V}{\sum \alpha_i S_i}$$

V=Volumen de la sala.

Atot=Absorción total de la sala.

m= constante de atenuación del aire.

Atot, se obtiene a partir de los coeficientes de absorción  $\alpha = \frac{\text{Energía absorbida}}{\text{Energía incidente}}$  sabiendo que  $Atot = \sum_i \alpha_i * S_i$ ,  $i=1 \dots n/n=n^o$  de superficies.

Por lo que podemos definir el coeficiente de absorción medio de absorción como:

$$\alpha = \frac{Atot}{Stot} \text{ siendo } Stot = S1 + S2 \dots \dots Sn$$



## Estudio de locales más absorbentes

La formula que Sabine planteada produce problemas, esta trata que la energía se pierde gradualmente y de forma proporcional al conjunto de energía que queda en el recinto. En realidad la pérdida por absorción en las reflexiones es realmente discontinua.

Cuanto más absorbente es la sala mas discordia se produce entre el tiempo de reverberación real y el de Sabine. En campo abierto debería tener tiempo de reverberación nulo, sin embargo mediante la fórmula de Sabine este no es así. En la práctica se observa que cuando el coeficiente de absorción medio es mayor de 0,2 se produce un error considerable.

Para ello se utiliza la formula obtenida por Eyring, la cual se puede obtener de la de Sabine, reemplazando el coeficiente de absorción por un exponente de absorción.

$$-(Ln(1 - \bar{\alpha}))$$

$$\bar{\alpha} = \frac{(\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 \dots \dots)}{S_1 + S_2 + S_3 \dots \dots}$$

De esta manera para campo abierto se obtiene un tiempo de reverberación nulo como es razonable.

Para valores de absorción pequeños los resultados coinciden con los de la fórmula según Sabine.

### Como medir el coeficiente de absorción de un material

Según hemos visto en las formulas anteriores, podemos obtener el tiempo de reverberación teórico, conociendo el volumen y la superficie de absorción. Pues con un simple cálculo podemos realizar el paso inverso y conociendo el volumen de la sala de ensayos y su tiempo de reverberación podremos deducir el coeficiente de absorción del elemento evaluado.

$$t_{R1} = \frac{0,162V}{(S - S_1)\alpha + S_1\alpha_1}$$

De manera que "S" es la superficie total de todos los cerramientos de nuestra cámara reverberante y "S<sub>1</sub>" es la superficie que vamos a evaluar. Como es lógico al colocar nuestra muestra este trozo de superficie tendrá el coeficiente de absorción de la muestra y no el de la cámara de manera que hay que restárselo a la superficie total.

Una vez aclarado esto despejando de la fórmula anterior " $\alpha_1$ " obtendremos el valor de absorción de la muestra.

### **Efecto del aire en la absorción de la energía acústica.**

Aunque no suele ser muy significativa esta absorción ya que la mayoría de se produce por las reflexiones con los cerramientos y con las difracciones al chocar con los obstáculos.

En salas considerablemente grandes se tiene que tener en cuenta ya que esta puede llegar a ser bastante significativa. Y este se hace más notable a frecuencias elevadas. De hecho cuanto más reverberante sea la sala mayor es la influencia relativa de la absorción del aire.

Esta pérdida tendrá que ser incluida en la fórmula de cálculo del tiempo de reverberación y será cuando el volumen de la sala sea superior a  $200\text{m}^3$

Se introduce un parámetro "m" que multiplicará al volumen, este depende de la frecuencia "f" y de la "h" humedad relativa.

$$m = 5,5 * 10^4 * \frac{50}{h} \left( \frac{f}{1000} \right)^{1,7}$$

$$RT = 0,61 * \frac{V}{A_{tot} + 4mV}$$

### **Consideraciones sobre el tiempo de reverberación.**

El tiempo de reverberación no es constante para todas las frecuencias ya que este depende de la absorción de los cerramientos. El tiempo también depende del volumen de la sala como ya hemos visto en la fórmula anterior, de los cerramientos y sus revestimientos y de los objetos que se encuentren en el local.

En la práctica basta con hacer un estudio del tiempo de reverberación en el margen de 125Hz a 4 KHz.

Como ya hemos comentado en el estudio de la absorción del aire, en salas relativamente pequeñas esta puede ser despreciada, siempre que relacionada con la absorción media de la sala sea alta. En el caso de recintos grandes solo hay que tenerla en cuenta para frecuencias altas.

El tiempo de reverberación es lo que principalmente caracteriza un local. Sin informarnos de la totalidad de la calidad y parámetros de la sala y de cómo va a sonar. Nos puede proporcionar una idea de los posibles problemas y decadencias.

### Campo acústico estacionario en un recinto cerrado. Campo directo y campo reverberado.

El campo acústico estacionario se alcanza cuando se produce la suma del directo con el reverberado y este produce un nivel estable.

Una fuente radiando al aire libre produce un campo acústico a su alrededor que denominamos **campo directo**. Esta misma fuente situada en un recinto cerrado produce un resultado ya que las paredes producen reflexiones, de esta manera el campo creado en el recinto será el resultado de la superposición entre el campo directo y el producido por las reflexiones, dando lugar al **campo reverberado**.

Como se observa en la figura vemos en el campo directo la densidad de energía disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente mientras que el campo reverberado la densidad de energía permanece constante. Depende solamente de la absorción del recinto y la potencia de la fuente.

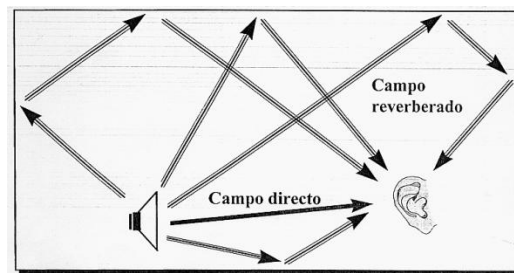


Figura 15: Ejemplo de campo reverberado y campo directo.

En el momento que se igualan campo directo y reverberado aparece el concepto de radio crítico, que puede definirse en función de la absorción o en función de la reverberación.

$$r_c = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$r_c = 0,1 \sqrt{\frac{V}{\pi t_r}}$$

Si la absorción de la sala es pequeña, alejándonos un poco de la fuente, predomina ya el campo reverberado y el nivel sonoro es prácticamente constante, así que el radio crítico es pequeño y en casi toda la sala predomina el campo reverberado.

Si se da el caso contrario de que la sala es muy absorbente el radio crítico es muy grande predominando en casi toda la sala el campo directo.

### Recintos acoplados acústicamente.

Al conectar una fuente sonora en un recinto, la energía pasa desde el recinto primario (donde está situada la fuente) al secundario y vuelve de nuevo alterando por tanto el carácter del campo sonoro en ambos recintos. Por tanto las propiedades acústicas del recinto bien dadas por la combinación de ambos.

Para tener en cuenta la energía hay que tener en cuenta que donde se encuentra la fuente sonora es necesario por una parte restar la energía radiada por la fuente en unidad de tiempo  $W_0$ , la energía absorbida en el recinto primario  $W_{a1}$ , y la energía que pasa del recinto primario al secundario  $W_{a2}$ , a través de la abertura.

Hay que tener también en cuenta que la energía que pasa al recinto secundario es reflejada en las paredes de este y vuelve hacia al recinto primario, actuando como si en este hubiese otra fuente radiando hacia el primario.

Cuando se alcanza el estado en el que el aumento de energía cesa se llega a la siguiente expresión donde  $W_{21}$  es la energía radiada desde el recinto secundario hacia el primario donde está situada la fuente.

$$W_{a1} + W_{a2} = W_0 + W_{21}$$

$W_{a1} = \frac{c\alpha_1 S_1}{4} * e_{01}$  Energía absorbida por el recinto primario en la unidad de tiempo.

$W_{a2} = \frac{cS}{4} * e_{01}$  Energía que pasa del recinto primario al segundo en la unidad de tiempo.

$W_{a1} = \frac{cS_1}{4} * e_{02}$  Energía que vuelve del recinto secundario al primario.

$$\frac{c(\alpha_1 S_1 + S)}{4} e_{01} = W_0 + \frac{cS}{4} e_{02}$$

La abertura que conecta acústicamente los dos recintos será  $S$ , y  $S_1$  área total de las superficies interiores del recinto primario y  $\alpha_1$  coeficiente medio de absorción sonora del recinto primario.

La ecuación para el recinto secundario será análoga a la anterior a excepción de que no aparecerá la fuente y que  $S_2$  y  $\alpha_2$  serán el área total de la superficie interior del recinto secundario y coeficiente medio de absorción sonora del recinto secundario.

$$\frac{c(\alpha_2 S_2 + S)}{4} e_{02} = \frac{cS}{4} e_{01}$$

A partir de las anteriores ecuaciones obtenemos:

$$e_{01} = \frac{4W_0}{c(\alpha_1 S_1 + S)(1 - Q_1 Q_2)}$$

$$e_{02} = e_{01} * Q_2$$

$Q_1 = \frac{S}{\alpha_1 S_1 + S}$  Coeficiente de acoplamiento entre el recinto primario y el secundario

$Q_2 = \frac{S}{\alpha_2 S_2 + S}$  Coeficiente de acoplamiento entre el recinto secundario y el primario.

Un caso particular es cuando  $\alpha_1 S_1 \ll S$  y  $\alpha_2 S_2 \ll S$ , quiere decir que  $Q_1$  y  $Q_2$  son aproximadamente la unidad, en este caso cuando la abertura de conexión tienen un área grande, las densidades de energía en los dos recintos se hacen iguales

### Valoración del grado de difusión.

El campo difuso ideal no existe de manera que lo que debemos calcular es la diferencia de nuestra sala con los cálculos realizados.

Gráficamente comparando entre la curva de caída real con la ideal, este parámetro será conocido como SPRING-RANDAL, que relaciona las áreas.

$$\text{Relación Áreas} = \frac{\text{Área real (curva)}}{\text{Área ideal (triángulo)}}$$

Analíticamente si el  $EDT = T_{20} = T_{30}$  estamos en campo difuso. Si no, podemos medir lo que se aleja haciendo la diferencia  $|EDT - 20|$

En recintos pequeños se tiene en cuenta:

- La desviación al colocar el micro en distintas posiciones.
- La desviación de la relación de caída para pequeñas variaciones de frecuencia.
- La variación de la absorción al colocarlo en varios lugares de la sala.
- Desviación de la velocidad de la partícula según la dirección.
- Cambio de gradiente entre la primera y la segunda parte de la caída.

## 2.5. PSICOACÚSTICA.

Se encarga de examinar y modelar las características de la audición humana que permiten localizar o identificar la fuente de un sonido percibido. Para la calificación de esos se somete al oyente a varios estímulos.

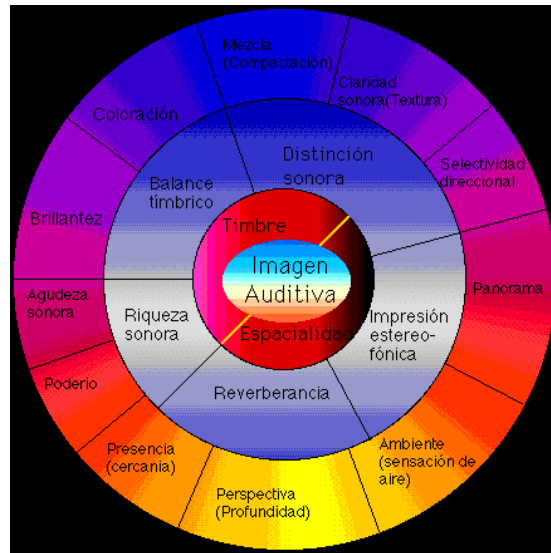


Figura 16: Sensaciones auditivas estudiadas

Entre las sensaciones auditivas encontramos:

- Sonoridad: clasifica por el volumen y la intensidad percibida.
- Tonalidad: diferencia los sonidos por su frecuencia fundamental, los diferencia de agudos y graves.
- Enmascaramiento: consiste en la desaparición perceptiva de algunas frecuencias próximas a la frecuencia en la que se produce el estímulo sonoro.

La psicoacústica también ha analizado la información que usamos inconscientemente para deducir la posición de la fuente.

- Diferencias interaurales: Cuando la fuente no está colocada a una distancia equidistante de los dos oídos, de manera que nos permite situarla a un plano lateral izquierdo o derecho. Se pueden clasificar en dos:
  - Diferencias interaurales de intensidad (IID): se aprecian a frecuencias a partir de 1,5KHz, ya que a partir de estas las

longitud de onda es menor que el diámetro de la cabeza, de manera que es un obstáculo para llegar al otro oído, de ahí que lleguen con distintos niveles de presión.

- Diferencias interaurales temporales (ITD): surgen cuando el recorrido por recorrer del sonido para llegar a un oído es más largo. Llegando en distintos instantes de tiempo. Este desfase se hace más notable hasta 1KHz, las frecuencias superiores se detecta la envolvente de la ITD
- Influencia de los pabellones auditivos: La forma del pabellón auditivo y sus circonvoluciones afectan en como es percibido el sonido según las frecuencias. En este se producen retardos y difracciones, que producen variaciones en la respuesta tanto en frecuencia como en tiempo recibido en el oído. Estos cambios se modelan mediante filtros de HRTF (Head Related Transfer Functions), los cuales se aplicarán uno para cada oído, que no solo simulan el pabellón auditivo sino que también las reflexiones y difracciones que ocurren con el torso, cabeza, hombros, etc.  
Gracias a estos pabellones podemos detectar de la colocación de la fuente, (arriba-abajo) utilizando la información recogida en cada oído y en (delante-detrás) con la comparación de lo percibido por ambos oídos.
- Movimiento relativo de la fuente: cuando el oyente mueve la cabeza, este recopila más información para poder comparar y situar con más precisión la localización de la fuente.  
Existe la posibilidad de que la fuente y el receptor sean móviles, de manera que se producirá el conocido efecto Doppler, en el que varía la frecuencia percibida, de la manera que si la distancia entre ellos disminuye la frecuencia aumenta y si la distancia aumenta la frecuencia disminuye.  
Con estas ideas tendremos más ideas sobre la posición o movimiento de la fuente.
- Intensidad percibida: suele estar relacionada con la proximidad entre fuente y receptor, a mayor proximidad mayor intensidad y viceversa, pero hay que saber distinguir entre intensidad existente e intensidad percibida (sonoridad).  
En condiciones anecoicas, cuando solo existe sonido directo, la intensidad existente decae 6dB cada vez que se duplica la distancia entre fuente receptor, pero la sonoridad decae más rápido unos 10dB. Esta es la que se considera al estimar la distancia absoluta.  
En un recinto cerrado, se producen reflexiones las que llegan al receptor y hacen que sea más complicada la percepción de la distancia relativa, pero por lo contrario aportan información del recinto. En estas condiciones la sonoridad decae más rápido.

- Influencia de los otros sentidos y de la memoria: el poder ver la fuente destapa cualquier duda sobre la situación de esta pero se pueden producir incoherencias cuando se ve la fuente en un lugar y el sonido procede de otro distinto .  
Como el cerebro es el que coordina la percepción de todos los estímulos y los interpreta, juega un papel importante la memoria, en el cual tenemos almacenado datos para comparar y describir, lo que hace que la audición sea diferente para cada individuo.
- Entorno acústico: la percepción binaural se ve influenciada por las condiciones de escucha.  
Si nos encontráramos en un ambiente reverberante, la señal se ve reforzada por las repeticiones de la señal, atenuada y retardada. Estas también son modificadas por los modos propios de la sala.  
Todo esto empeoraría la localización de la fuente, si no fuera por el efecto *Hass*. Según este efecto también conocido como efecto de precedencia, cuando varios sonidos son recibidos en un intervalo pequeño de tiempo (entorno a los 50ms), el que determina la el origen del sonido es el percibido en primer lugar, enmascarando las contribuciones posteriores. De esta manera se puede detectar el origen del sonido incluso en ambientes muy reverberantes.



### 3. PARÁMETROS ACÚSTICOS PARA LA EVALUACIÓN ACÚSTICA DE LAS SALAS.

Todos los primeros parámetros que vamos a ver están relacionados con el grado de reverberación

Según la hipótesis de Sabine, debería ser el mismo independientemente de la situación de la fuente y de los puntos de medida. Pero suelen violarse algunas de las hipótesis, ya que a menos difusión del recinto, mayores son las diferencias que podemos encontrar, puesto que la reverberación y el grado de difusión están íntimamente relacionadas. Influye que todos los cerramientos no son iguales lo que hace que si estamos más cerca de uno más absorbente el tiempo será menor. Al igual que en las proximidades de la fuente las medidas se distorsionan por la falta total de difusión.

#### 3.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

Según Beranek el **tiempo de reverberación** valor medio de los RT ha de ser el correspondiente a las bandas de 500Hz y 1 kHz.

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2}$$

El tiempo de reverberación óptimo para los recintos de música sinfónica debe estar entre 1,8 -2 ms y para la música barroca y clásica entre 1,6 – 1,8 ms. Con la sala ocupada.

| TIPO DE MÚSICA           | TIEMPO DE REVERBERACIÓN(RT <sub>mid</sub> ) |
|--------------------------|---------------------------------------------|
| Música sinfónica         | 1,8-2,0                                     |
| Música barroca y clásica | 1,6-1,8                                     |
| Música de cámara         | 1,3-1,7                                     |
| Ópera                    | 1,2-1,5                                     |

Tabla 1: Márgenes recomendados para los distintos tipos de música

Siguiendo con el tiempo de reverberación y teniéndolo detallado por tercios de octava podremos obtener otro parámetro acústico como es la calidez acústica y el brillo.

##### 3.1.1. Bass Ratio (BR).

El calor de las salas se define como la suma de los RT de las frecuencias bajas (125Hz a 250Hz) y medias (500Hz a 1kHz), gracias a el, la sala debe reforzar los sonidos graves de forma que haga que la música más cálida. Si esto no se produce la sala da sensación de que la música es muy frágil, carece de fuerza.

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1Khz)}$$

Durante el diseño del acondicionamiento tendremos que tener especial cuidado en la utilización de materiales absorbentes para bajar el tiempo de reverberación y que tengan altos coeficientes de absorción a bajas frecuencias.

Según Beranek, los márgenes de valores válidos para una sala de conciertos destinada a la música sinfónica y totalmente ocupada es:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25(\text{si el } RT_{mid} = 2,2 \text{ s})$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,45(\text{si el } RT_{mid} = 1,8 \text{ s})$$

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

Sin dejar de lado los tiempos de reverberación los seguimos teniendo en cuenta para el cálculo del brillo de nuestra sala.

### 3.1.2. Brillo (Br).

Relación entre los tiempos de reverberación de las altas frecuencias (2 y 4 KHz) y de las frecuencias medias (500Hz y 1000Hz)

$$Br = \frac{RT(2KHz) + RT(4KHz)}{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}$$

Beranek recomienda que el valor del Br para todas las salas totalmente ocupadas verifique:

$$Br \geq 0,87$$

Hay que tener en cuenta que el brillo no será superior a la unidad. Esto es debido a la pérdida de energía de las ondas al propagarse a través del aire. Esta absorción tiene más efecto a partir de los 2kHz y aumenta con la frecuencia y con el descenso de la humedad relativa.

### 3.1.3. Early Decay Time (EDT).

A medida que iban aumentando los conocimientos sobre la percepción humana aparecerían otros parámetros acústicos que mejoran considerablemente los resultados de los análisis de la acústica de sala.

Entre ellos encontramos “**Early Decay Time**” (EDT), este se define como seis veces el tiempo que transcurre desde que desconectamos la fuente hasta que el nivel de presión sonora ha decaído 10dB (figura).

Es un parámetro muy relacionado con el TR, y sabiendo que el EDT mide la reverberación percibida (subjetiva) y el TR la reverberación real (objetiva), para determinar el grado de viveza de una sala es más fiable guiarse por el valor del EDT.

En el supuesto caso de que la sala fuese perfecta geoméricamente hablando y los materiales absorbentes dispuestos homogéneamente y se produjese una difusión uniforme del sonido, la curva de decaimiento energético sería la misma para el EDT que para el TR.

Obviamente las salas no cumplen estos requisitos, de manera que se producirán una doble pendiente en la curva energía-tiempo y en ellos valores de EDT y TR diferentes.

Si el EDT decae más rápido respecto del TR, tendrá una sensación subjetiva de una sala mas apagada. El caso donde los valores serán menores será en los puntos que presentan una mayor concentración de las reflexiones o también con una mayor absorción respecto al resto de la sala.

Se aconseja que la media aritmética de EDT en las frecuencias de 500 Hz y 1 KHz con la sala vacía denominada  $EDT_{mid}$ , sea lo más parecida a los valores recomendados para  $TR_{mid}$ .

Existe la posibilidad de que en puntos nos encontremos con una doble pendiente en la curva de decaimiento energético sonoro. Esto puede ocurrir en zonas con un elevado grado de absorción o en una parte del recinto con características bastante distintas al resto de la sala. Con lo que produce una primera caída más rápida de energía correspondiente al ritmo de disminución de la energía correspondiente al ritmo de disminución propio de dicho espacio, seguidamente de una disminución más lenta correspondiente al resto de la sala.

De manera que para garantizar una buena difusión en toda la sala es necesario que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500Hz y 1kHz sea del mismo orden que  $RT_{mid}$ :

$$EDT_{mid} = RT_{mid}$$

### 3.1.4. Sonoridad (G).

Corresponde al grado de amplificación producido por la sala. Esta depende de la distancia del oyente al escenario, de la superficie ocupada por el público, de la energía asociada a las primeras reflexiones y del nivel del campo reverberante.

Se distinguen dos parámetros que son mutuamente excluyentes:

-“Speech sound level”(S): utilizado para salas dedicadas a la palabra.

-“Strength factor”(G): empleado en recintos destinados para la música.

Este segundo parámetro es el que nosotros vamos a utilizar puesto que el recinto es para la audición de música.

Según Lehmann se define como, la relación que existe entre el nivel de presión recibido en un punto de la sala (SPL) radiado por la fuente omnidireccional y el nivel creado por esta fuente en campo libre a una distancia de 10 metros.

Las medidas se tomarán por bandas de frecuencias de octava (entre 125Hz y 4 KHz) y aplicando la misma potencia de fuente. El nivel de referencia en cada banda de frecuencia es de 69 dB SPL.

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{p,E,10} \text{ dB}$$

Beranek recomienda para una sala de conciertos vacía:

$$4 \leq G_{mid} \leq 5,5dB$$

Este se calcula como la media aritmética de G en las bandas de octava centradas en las frecuencias de 500Hz a 1000Hz con la sala vacía.

Los factores que influyen para la media de son:

- La distancia de la fuente al receptor: disminuye al aumentar dicha distancia.
- El área ocupada por el público: disminuye ya que aumenta la absorción.
- El nivel de sonido reverberante: aumenta, al aumentar la contribución energética debida a la reverberación, aunque empeora la inteligibilidad.
- Las primeras reflexiones: aumenta, cuando aumenta el número de primeras reflexiones, que a su vez aumenta la inteligibilidad.

### 3.1.5. Initial Time Delay GAP (Ti).

Corresponde con la impresión subjetiva de "intimidad acústica". Mide el tiempo que transcurre desde que llega el sonido directo hasta que se recibe la primera reflexión, nos da la sensación de que el recinto es más pequeño de lo que es en realidad.

Según Beranek el tiempo debe ser superior a 20ms en el centro del patio de butacas, valores superiores a 35ms representan generalmente una reducción de la calidad acústica. La razón por la que se elige este, es porque los puntos cercanos a paredes o palcos siempre resultan ser cortos y no describen objetivamente el grado de intimidad de la sala.

## 3.2. RELACIONES ENERGÉTICAS.

### 3.2.1. Relaciones energéticas (ELR).

Se crean con el fin de estudiar las características del sonido reflejado en una sala y la relación con el sonido directo.

Podemos definir tres tipos:

- $C_t$ : es la relación entre la energía recibida hasta el instante t, incluyendo el sonido directo y la energía que llega después de t.

El  $C_t$  se expresa en escala logarítmica (dB), y para música se suele utilizar el valor medio de los correspondientes a las bandas de 500Hz, 1kHz y 2KHz.

$$C_t = \frac{\text{Energía hasta el instante } t}{\text{Energía a partir del instante } t} (\text{en dB})$$

El valor de  $C_t$  para  $t=80ms$  se corresponde con el parámetro  $C_{80}$  que definiremos mas tarde.

- $C_{t0}$ : es la relación entre la energía recibida hasta el instante  $t$ , excluyendo el sonido directo y la energía que llega después de  $t$ .

$$C_{t0}(t) = \frac{\text{Energía hasta el instante } t \text{ (excluyendo el sonido directo)}}{\text{Energía a partir del instante } t} \text{ (en dB)}$$

Sirve para estudiar el grado de concentración de las reflexiones, si hay primeras reflexiones y de mas, comparándola con  $C_t$ , podemos averiguar la importancia del sonido directo en un punto considerado de la sala. A medida que nos alejamos de la fuente se van igualando ambos parámetros, esto significa que el sonido directo está debilitado.

- $C_x$ : es el  $C_{t0}$  teórico, cuando el campo sonoro es perfectamente difuso.

Con la diferencia de  $C_{t0}$  respecto a  $C_x$ , nos indica cómo se difunde el sonido en la sala.

- $C_{t0} > C_x$ : las primeras reflexiones son significativas.
- $C_{t0} = C_x$ : difusión óptima del sonido (comportamiento ideal).
- $C_{t0} < C_x$ : las primeras reflexiones nos son significativas.

Las primeras reflexiones junto al sonido directo es integrado por nuestro oído, de manera que cuanto mayor sea el aporte energético mayor será la inteligibilidad de palabra y sonoridad. Se produciría un aumento de:

- Claridad, recintos para palabra y música.
- Definición, recintos para la palabra.

### 3.2.2. Claridad.

Para medirla existen dos parámetros distintos de medir la proporción efectiva de las primeras reflexiones:

- Claridad de la voz ( $C_{50}$ ): para salas dedicadas a la palabra.
- Claridad musical ( $C_{80}$ ): para salas destinadas a la música.

Como nuestra sala se va modificar con el objetivo de albergar solo música, tendremos en cuenta la claridad musical, esta nos indicará el grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical.

La elección de 80ms es porque cuando se trata de música, las reflexiones que llegan al oyente dentro de dicho intervalo son integradas por el oído con el sonido directo, de manera que contribuyen a aumentar la claridad. De manera que son las conocidas primeras reflexiones. El cálculo Según Cremer se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los primeros 80ms después de recibir el sonido directo (este incluido) y la energía que llega después y se expresa en dB:

$$C_{80}(dB) = \frac{\text{Energía}_{t0-80ms}}{\text{Energía}_{80ms-\infty}}$$

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} p^2(t) dt}{\int_{t_1}^{\infty} p^2(t) dt}$$

Como valor representativo Beranek se utiliza el “Music Average” que se calcula para el rango de frecuencias 500Hz, 1KHz y 2KHz. Recomienda que el valor esté comprendido entre:

$$-4 \leq C_{80}(\text{Music Average}) \leq 0 \text{dB}$$

En cualquier caso deben evitarse los valores  $C_{80}$  superiores a +1dB.

Por su parte, L.G. Marshall aconseja el siguiente margen de valores:

$$-2 \leq C_{80}(\text{Music Average}) \leq 2 \text{dB}$$

Cabe destacar que la claridad no es un término independiente, sino que está altamente relacionado con el tiempo de reverberación. Según se ha observado en estudios a medida que el  $C_{80}$  disminuye el valor del  $RT_{\text{mid}}$  aumenta de manera que da la sensación de una sala más viva. Hay que resaltar que este parámetro no solo depende de la sala, sino que también influyen los parámetros puramente musicales, así como habilidad y virtuosismo de los intérpretes.

### 3.2.3. Curva de energía reflejada (RECC).

Es un parámetro que está relacionado con el escenario. Mide la calidad de este para que llegue lo más pronto posible al estado estacionario.

Nos proporciona un idea de cómo se comporta la energía reflejada en un punto de la sala, para ello se valora la energía recibida en los primeros t segundos desde el sonido directo, descontando la energía recibida por este.

$$RECC(t) = \text{Energía hasta el instante } t(\text{excluyendo el sonido directo})(\text{dB})$$

Las frecuencias que se tienen en cuenta para este parámetro son de 250Hz hasta 2.000Hz. Para los valores de t inferiores a aproximadamente 100ms, el valor de RECC se corresponde con la energía asociada a las primeras reflexiones.

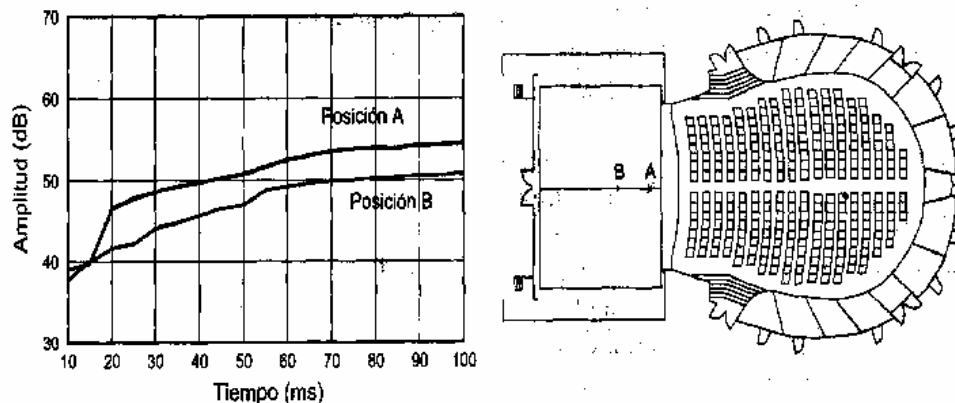


Figura 17: Curvas RECC en un punto central de una sala correspondientes a las posiciones A y B de la fuente sonora sobre el escenario

Como vemos en la figura anterior en el punto B al estar la fuente mas en el interior del escenario la cantidad de energía reflejada es menor de manera que comprobamos que cuanto mayor sea la velocidad que salga el sonido hacia el público y se produzcan las reflexiones mejor será el resultado de esta.

La curva RECC se representa logarítmicamente (dB) y al igual que el ELR no tiene un valor recomendado.

### 3.2.4. Espacialidad del sonido, amplitud aparente de la fuente (ASW).

Se asocia a la sensación de que llega el sonido del escenario si se trata de una fuente puntual o realmente se trata de una orquesta. Cuanto mayor sea este parámetro mayor será la sensación de espacialidad de la sala.

Este parámetro según A.H. Marshall y Barron está ligado a las primeras reflexiones de los laterales que inciden sobre el público. Esto es debido a que el oído la integra junto con el sonido directo que recibe y produce que no seamos capaces de identificar en un punto en concreto y parezca que el sonido nos envuelva.

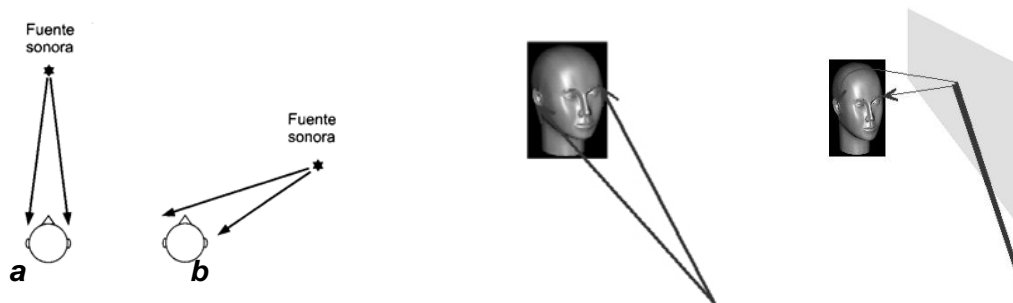


Figura 18: Grado de disimilitud entre los sonidos que llegan a ambos oídos en función del ángulo de llegada: a) incidencia frontal (sonidos muy parecidos); b) incidencia lateral (sonidos diferentes)

Viendo las imágenes anteriores podemos deducir que el sonido va a llegar más tarde a un oído a que al otro por el recorrido y porque se encuentra con más obstáculos así como la cabeza. Esto hace que si las reflexiones laterales son muy importantes la diferencia de un oído a otro sea muy distinta. De manera que cuanto mayor sea esta mayor será el ASW.

Este parámetro se cuantifica y se mide por sus otros dos parámetros relacionados. Son el factor de eficiencia lateral (LF) y el de correlación cruzada interaural (IACC<sub>E</sub>).

### 3.2.5. Eficiencia lateral (LF).

Se conoce como la relación de energía que llega a un punto de la audiencia desde un lateral, dentro de los primeros 80ms después de que llegue el sonido directo, excluyendo este, con la energía recibida en todas las direcciones en dicho intervalo de tiempo.

$$LF = \frac{\text{Energía lateral hasta 80ms (excluyendo sonido directo)}}{\text{Energía total hasta los 80ms}}$$

$$LE = FEL = LF = \frac{\int_{25}^{80} p_{\infty}^2}{\int_0^{80} p_0^2}$$

Existen dos variantes  $LF^{80}_0$  y  $LF^{80}_5$ , según se tenga en cuenta o no la energía de la onda directa. Habitualmente se utiliza el valor medio de LF correspondientes a las bandas de frecuencias de octava comprendidas entre 125Hz y 1KHz.

$$LF_{E4} = \frac{LF(125HZ) + LF(250HZ) + LF(500HZ) + LF(1KHZ)}{4}$$

El valor debe cumplir con la sala vacía:

$$LF_{E4} \geq 0,19$$

Cuanto más elevado sea el valor mayor será el ASW, y por relación mayor será el grado de espacialidad del sonido.

### 3.2.6. Corrección cruzada interaural (IACC<sub>E</sub>).

Está definida como la correlación entre la señal que llega a ambos oídos, y lo que representa es el grado de similitud entre una y otra. Si las señales son iguales el IACC valdrá 1, mientras que si son totalmente distintas valdrá 0.

El IACC<sub>E3</sub> utiliza las reflexiones tempranas que llegan a los oídos, hasta los primeros 80ms a partir del sonido directo. Como ya hemos visto cuanto más distintas sean menor será el valor, de manera que se suele utilizar el parámetro (1-IACC<sub>E3</sub>) y así un aumento de este significará un aumento de la disimilitud entre las señales recibidas por los distintos oídos y un aumento de la amplitud de la fuente.

| (1-IACC <sub>E3</sub> ) | CATEGORÍA ACÚSTICA DE SALAS |
|-------------------------|-----------------------------|
| 0,66                    | Excelente                   |
| 0,55                    | Muy Buena                   |
| 0,41                    | Aceptable/Buena             |

Tabla 2: Correspondencia entre los valores de (1-IACC<sub>E3</sub>) y la clasificación de la sala desde el punto de vista acústico.(según Beranek)

Como en los parámetros anteriores tampoco existe un valor recomendado pero si Beranek recomienda que el valor con la sala vacía sea aproximadamente 0,70.

Este parámetro con el tiempo ha cogido mucha importancia y se ha demostrado su fiabilidad y comparándolo con las valoraciones subjetivas de las salas se ha podido dividir los valores y realizar la clasificación antes mostrada.

$$IACC = \max \frac{\int_{0,005}^{0,08} h_L(t) * h_r(t + \tau) dt}{\left( \int_{0,005}^{0,08} h_L^2(t) dt \int_{0,005}^{0,08} h_R^2(t) dt \right)^{1/2}} \quad (\text{para } |\tau| \leq 1ms)$$

### 3.2.7. Espacialidad del sonido. Sensación de sonido envolvente (LEV).

Es la sensación de que el sonido nos rodea, que lo tenemos por todo alrededor y nos llega de todos los lados. Esta es la segunda componente básica de la espacialidad delo sonido.

La condición que se relaciona con este parámetro es que el sonido reverberado llegue igual de todas las direcciones, para ello el sonido cuando choca con el



cerramiento deberá ser dispersado, lo que conlleva que existan bastantes irregularidades en el recinto.

Al igual que ASW a mayor valor mayor será el resultado subjetivo de nuestra sala. No existe ningún parámetro medible que esté relacionado con el grado de difusión del sonido.

Tras estudios se ha visto que las reflexiones laterales tardías, a diferencia de las tempranas no se suman al sonido directo, sino que el sistema auditivo las separa y tanto temporalmente como espacialmente, de ahí la sensación de estar envuelto de sonido. Además estas reflexiones cuando contienen un nivel elevado producen un enmascaramiento de las tempranas de manera que estas ayudan a tener una sensación de sonido envolvente y también hacen que aumente la sensación aparente de la amplitud de la fuente.

De manera que el que en una sala de conciertos tenga este parámetro bien será garantizar una existencia de reflexiones laterales tardías, siendo estas bastantes fuertes.

Como este es un parámetro nuevo existen otros relacionados que vamos a ver a continuación.

### 3.2.8. Correlación cruzada interaural ( $IACC_L$ ).

Anteriormente ya hemos definido el  $IACC_E$  el cual significa la correlación cruzada interaural de las reflexiones tempranas (EARLY) y en este caso como estamos hablando de las reflexiones tardías hablamos del  $IACC_L$  (LATE). Así en este caso se valorarán los resultados obtenidos para el sonido que llega después de los primeros 80ms. Para el cálculo se realiza igual que el  $IACC_E$  consiste en la comparación de la audición por los dos oídos. También se realiza el  $|1 - IACC_{L3}|$  que corresponderá con el grado de difusión y al mismo tiempo con el LEV.

A diferencia del otro factor de corrección este es de menos fiabilidad puesto que los resultados para la clasificación de las salas en tres grupos son muy similar.

| $(1-IACC_{L3})$ | CATEGORÍA ACÚSTICA DE SALAS |
|-----------------|-----------------------------|
| 0,88            | Excelente                   |
| 0,87            | Muy Buena                   |
| 0,85            | Aceptable/Buena             |

Tabla 3: Correspondencia entre los valores de  $(1-IACC_{L3})$  y la clasificación de la sala desde el punto de vista acústico.(según Beranek)

Que los valores sean tan cercanos hace que este parámetro no sea válido para la clasificación de la difusión de la sala. Pero si podemos decir que si el valor es muy pequeño la sala produce poca difusión.

### 3.2.9. Índice de difusión (SDI).

Es el otro parámetro relacionado con el LEV. Este parámetro no se obtiene mediante pruebas acústicas, sino mediante una supervisión de la sala de las superficies.

Los profesionales del medio llaman “grado de difusión” a la cantidad de irregularidades que tiene el cerramiento. De manera que este se obtiene otorgando diferentes pesos a las distintas superficies según son de irregulares. Clasificando con

1 si esta es muy irregular, máxima dispersión, 0,5 si es un término medio y 0 si la superficie es totalmente lisa.

Una vez sabido esto para el cálculo se pondera el valor por la superficie asociada en cada caso y se suma, y el valor del resultado es dividido por el total de superficie, techo, suelo y laterales.

El valor debe estar entre 0 para difusión nula y 1 para difusión total.

$$0 \leq SDI \leq 1$$

A mayor SDI mayor LEV y mayor grado de sensación espacial.

Mediante el estudio con audiencia se ha podido catalogar que está muy relacionado el resultado de este con el parámetro con la sensación subjetiva de espacialidad del sonido. Lo cual indica que las paredes y techo son bastante importantes a la hora de pasar de tener una sala buena aceptable, a una sala excelente.

### 3.3. PARÁMETROS DEPENDIENTES DEL ESCENARIO Y DE LA ORQUESTA.

Hasta este punto todos los parámetros dependían de la sala, sus ornamentaciones, diseño y materiales utilizados. Ahora vamos a seguir con los parámetros que dependen del escenario y que son para el beneficio de los músicos de la orquesta.

#### 3.3.1. Soporte objetivo (ST1).

Es parámetro es representativo y busca que el músico se escuche bien a sí mismo y oiga al resto de la orquesta de una manera compensada y cómoda.

De manera que se basa en la relación entre la energía recibida de las primeras reflexiones generadas por el techo y las paredes del escenario entre los 20ms y 100ms y la energía recibida en los primeros 20ms. Siempre esto valores obtenidos a un metro de la fuente, siendo esta omnidireccional y situada en el escenario.

$$ST1 = \frac{\text{Energía entre 20ms y 100ms}}{\text{Energía hasta 20ms}} \text{ en dB}$$

$$ST1 = 10 \log \frac{\int_{20ms}^{100ms} P^2(t) dt}{\int_{0ms}^{20ms} P^2(t) dt}$$

La medida de este parámetro debe hacerse con la sala vacía pero con los elementos que siempre están así como sillas de escenario, atriles, instrumentos de percusión.

El parámetro habitualmente se utiliza el valor medio que se obtiene como:

$$ST1_{mid} = \frac{ST1(250Hz) + ST1(500) + ST1(1KHz) + ST1(2KHz)}{4}$$

$$-14 \leq SDT1_{mid} \leq -12,5$$

Valores recomendados según Beranek más favorables.

### **3.4. TERMINOS RELACIONADOS CON LA ORQUESTA Y SUS DIVERSAS SECCIONES.**

Beranek define los siguientes parámetros:

- Balance (“balance”): este hace que toda la orquesta suene por igual independientemente de la situación y del instrumento. Es el equilibrio entre todas las partes de la orquesta. Este beneficia a que todos se oigan mejor y destaquen más los solistas.
- Fusión (“blend”): mezcla de los sonidos de los diferentes instrumentos de la orquesta, de manera que desde el patio de butacas se oiga como un solo sonido y un único intérprete.
- Conjunción (“ensemble”): habilidad de los músicos de tocar al unisono por el hecho de poder escucharse satisfactoriamente.
- Inmediatez de respuesta (“attack”): el músico debe tener sensación de que inmediatamente interpretan una nota la sala responde simultáneamente. Esta característica de la sala está relacionada con el retardo con que llegan las primeras reflexiones que vienen de la sala a los músicos. Hay que encontrar el equilibrio para que el músico tenga esta sensación, si las reflexiones llegan muy tarde se tiene sensación de que es eco y si solamente llegan de las paredes más cercanas, el músico no tendrá ninguna sensación de la sala, porque las reflexiones no vienen puramente de la sala.

### **3.5. ANOMALÍAS EN LAS SALAS.**

Son efectos que por el diseño, elementos y materiales hacen que no se cumpla la previsión de los parámetros y se produzcan efectos no deseados.

#### **3.5.1. Coloración del sonido, calidad tonal de la sala.**

Consiste en que la sala responda de una forma plana al sonido, sin amplificar ni atenuar ninguna de las frecuencias al combinarse el sonido directo y reflejado.

Como ya se ha mencionado las salas constan de modos propios asociados que por interferencias constructivas y destructivas, pueden producir amplificación y atenuación. Generalmente este problema es más acusado en salas con dimensiones pequeñas.

Las paredes planas que se colocan con el objetivo de producir unas buenas reflexiones, tampoco responde de una forma plana, de manera que la solución será darle una cierta convexidad a la pared.

La calidad puede verse alterada por la ornamentación del lugar las cavidades que puedan haber y produzcan resonadores.

### **3.5.2. Desplazamiento de la fuente sonora.**

Nuestro oído puede verse engañado al recibir una reflexión temprana entre los primeros 50-80ms de una superficie y que esta proceda con una considerable cantidad de energía. Interpretando nuestro oído que este sonido es directo y nos llega de la pared reflectora, produciendo así un desplazamiento virtual de la fuente.

### **3.5.3. Ecos y focalizaciones.**

#### **3.5.3.1. Ecos.**

Se le denomina a las reflexiones primeras que llegan al espectador después de los primeros 80ms y con un cierto nivel de energía. El oído todo lo que recibe entre los 50 y 80ms lo integra como sonido directo, de ahí la explicación anterior de la falsa focalización. Y todo lo que llega después pero con un nivel bajo se considera cola reverberante.

Este problema lo podemos encontrar cuando la distancia desde la fuente hasta la pared del fondo hay una distancia de 13,8 metros que es la mitad de 27,6 metros que son los que puede recorrer el sonido en 80ms. Pero además de esta distancia la pared tiene que ser altamente reflectante para que la reflexión sea con bastante energía.

Para evitarlo deberíamos poner material absorbente en esta pared, siempre si superar el 10% de la superficie total, si no afectaría al tiempo de reverberación y la sonoridad.

También podemos superponer superficies convexas en las productoras de eco, en caso de que estas superficies sean reflectoras su radio deberá ser mayor a 5 metros, sino funcionarán como difusores.

#### **3.5.3.2. Eco flotante.**

Consiste en una repetición múltiple de un sonido, en un breve periodo de tiempo, generado por una fuente entre dos paredes muy reflectantes. Estas reflexiones son de un nivel significativo y cada una es menor que la anterior hasta que desaparece.

Es percibido como un sonido repetido muchas veces durante un periodo pequeño de tiempo.

Las formas de evitar este eco, pasaría por evitar la situación de una fuente en un lugar que pueda producir esto y además hay que evitar que las paredes sean paralelas, lisas y muy reflectantes, de manera que es recomendable darles unos 5° de diferencia entre una y otra.

Otra opción menos efectiva sería poner parte difusora o absorbente para evitar estas reflexiones.

#### 3.5.3.4. Focalización del sonido.

Este efecto se produce cuando una gran cantidad de reflexiones se agrupan en una zona concreta de la sala. Rompiendo así la homogeneidad del sonido incluso llegando a veces a ser superior en estas localizaciones que el propio sonido directo.

La causa de estas se produce generalmente por la presencia de cualquier tipo de superficies cóncavas en la sala, como techo abovedados, cúpulas etc.

#### 3.5.4. Efecto "Seat Dip".

Este efecto afecta más a las bajas frecuencias. Consiste en el desplazamiento del sonido generado desde el escenario hacia la audiencia con un pequeño ángulo por encima de estas, y como esta es una superficie muy absorbente se produce una gran atenuación.

Aunque este parámetro no está muy deducido parece ser que se produce porque se genera una resonancia horizontal y vertical entre las filas consecutivas produciendo una interferencia destructiva. Esta atenuación en cuantos e ha propagado por las primeras filas y se mantiene constante en las siguientes

Una solución que se propone es darle a una cierta inclinación de  $15^\circ$  para que el rayo directo y el plano del público tengan mayor ángulo.

Según Barron este no es un gran problema porque el oído no es capaz de identificarlo, porque al oído humano le falta sensibilidad y las reflexiones tan tempranas las interpreta como sonido directo, de manera que no nota la atenuación esta.

#### 3.5.5. Efecto galería de susurros.

Sucede en escenarios con forma esférica y con superficies muy reflectantes.

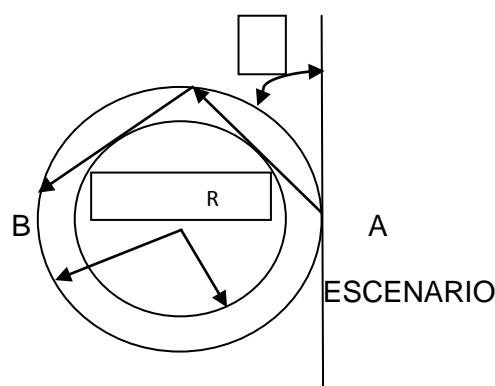


Figura 19: Propagación de los rayos sonoros en una superficie en forma circular.

En esta clase de escenarios los rayos emitidos en el punto A y comprendidos en un ángulo  $\alpha$ , quedan confinados dentro del anillo limitado por los radios R y  $R\cos\alpha$  serán apreciados en R con una gran claridad e intensidad, es decir se produce una gran concentración de sonidos dentro de los puntos situados dentro de este anillo.

Este problema producirá una falta de conjunción entre los músicos ya que mientras uno situado en B oirá mucho a A y con un cierto retardo lo que producirá que sea más complicado el interpretar al unísono.

**Resumen de los valores de los parámetros de caracterización de las salas de conciertos.**

| PARÁMETRO ACÚSTICO                                                                                                            | VALOR RECOMENDADO                                                                                                              | VALORACIÓN SUBJETIVA                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tiempo de reverberación medio $RT_{mid}$ (500Hz-1KHz), sala ocupada                                                           | $1,8 \leq RT_{mid} \leq 2s$                                                                                                    | Grado de viveza                                                                                            |
| Calidez acústica BR, sala ocupada                                                                                             | $1,10 \leq BR \leq 1,25$ (si $RT_{mid}=2,2s$ ) <sup>(*)</sup><br>$1,10 \leq BR \leq 1,45$ (si $RT_{mid}=1,8s$ ) <sup>(*)</sup> | Riqueza de sonidos graves, melosidad y suavidad de la música                                               |
| Brillo Br, sala ocupada                                                                                                       | $Br \geq 0,87$                                                                                                                 | Riqueza de los sonidos agudos                                                                              |
| “Early Decay Time”, medio $EDT_{mid}$ (500Hz-1KHz), sala ocupada                                                              | $EDT_{mid} \approx RT_{mid}$                                                                                                   | Grado de viveza de la sala.                                                                                |
| Sonoridad media $G_{mid}$ (500Hz-1KHz), sala vacía                                                                            | $4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ dB                                                                                                   | Grado de amplificación producido por la sala                                                               |
| “Initial-Time-Decay Gap” $t_i$ (centro platea)                                                                                | $t_i \leq 20ms$                                                                                                                | Intimidación acústica (sensación subjetiva de volumen de la sala; grado de identificación con la orquesta) |
| Claridad musical media (“music average”) $C_{80}(3)$ (500Hz-2KHz)                                                             | $-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ dB, sala vacía<br>$-2 \leq C_{80}(3) \leq 2$ dB, sala ocupada                                       | Grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical       |
| Eficiencia lateral $LF_{E4}$ (125 Hz-1KHz), sala vacía                                                                        | $LF_{E4} \geq 0,19$                                                                                                            | Impresión espacial del sonido (amplitud aparente de la fuente sonora)                                      |
| Correlación cruzada interaural (1-IACC <sub>E3</sub> )(500Hz – 2KHz), sala vacía                                              | $(1-IACC_{E3}) \approx 0,70$                                                                                                   | Impresión espacial del sonido (amplitud aparente de la fuente sonora)                                      |
| Índice de difusión SDI                                                                                                        | $SDI \rightarrow 1$                                                                                                            | Impresión espacial del sonido (sensación de sonido envolvente)                                             |
| Soporte objetivo medio $ST1_{mid}$ , (250Hz-2KHz), sala vacía y escenario sin músicos, pero con los elementos que son propios | $-14 \leq ST1_{mid} \leq -12$ dB                                                                                               | Capacidad de los músicos de escucharse a sí mismos y al resto de componentes de la orquesta                |

Tabla 4: Valores recomendados de los parámetros acústicos asociados a las salas de conciertos. (\*)Para valores de  $RT_{mid}$  entre 1,8 y 2,2 s, el valor máximo recomendado de BR se halla de la interpolación

#### 4. NORMATIVA VIGENTE PARA LA MEDIDA DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

La norma que rige estas medidas es la UNE-EN ISO 3382, esta norma consta de dos partes una primera dedicada a las salas de espectáculos y una segunda para recintos ordinarios.

En nuestro caso tendremos en cuenta la primera parte de la norma la dedicada a las salas de espectáculos y realizada en el 2009.

##### 4.1. CONDICIONES DE MEDIDA.

###### 4.1.1 Generalidades.

Las mediciones del tiempo de reverberación se pueden hacer para cada uno de los estados de ocupación del recinto y si este cuenta con componentes regulables o condiciones que cambien la acústica, puede ser conveniente realizar medidas acústicas por separado para cada configuración.

Una descripción concreta del estado de la sala tiene una importancia decisiva en la evaluación de los resultados obtenidos durante la medición del tiempo de reverberación.

###### 4.1.2. Instrumentación.

La fuente debe ser omnidireccional, debe ser capaz de generar un nivel de presión acústica suficiente para poder generar las curvas de decrecimiento con el rango dinámico mínimo requerido sin contaminación por ruido de fondo.

Se deben utilizar micrófonos omnidireccionales para detectar la presión acústica y la salida se pueda conectar a un amplificador, un conjunto de filtros y un sistema donde se muestran las curvas.

El micrófono debe cumplir los requisitos de sonómetro tipo 1, de acuerdo con la norma IEC 61672-1

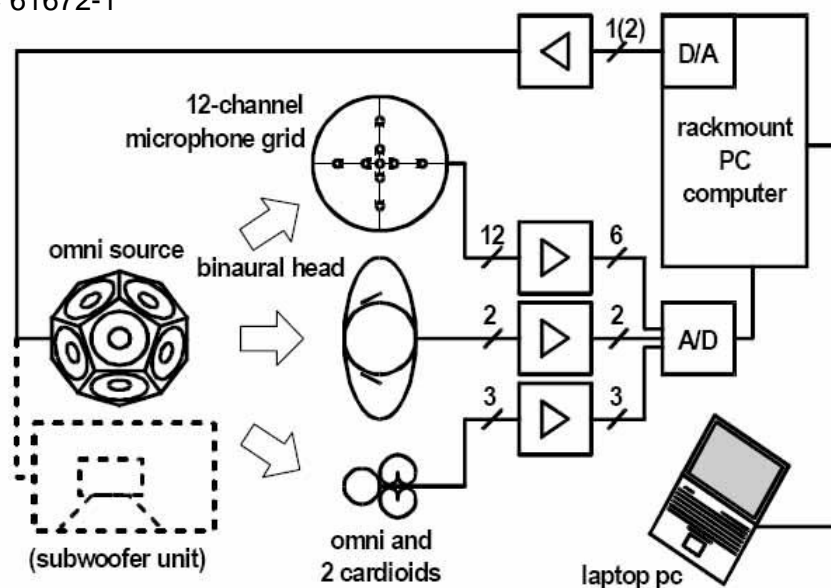


Figura 20: Tipo de cómo montar el equipo para tomar las medidas.

El tiempo de registro de cada decrecimiento debe ser lo suficientemente largo para permitir la determinación del nivel de ruido de fondo final tras el decrecimiento; la duración mínima recomendado es de cinco segundos además del tiempo de reverberación esperado.

El equipo para el registro del decrecimiento tiene que tener la constante de tiempo de un dispositivo promediador exponencial, debe ser lo más próximo a  $T/30$ .

#### 4.1.3. Posiciones de medición.

Las posiciones de la fuente serán 3 pero irá en función del tamaño del escenario. Se deberían colocar donde se situarían generalmente las fuentes sonoras naturales. Se deben utilizar al menos dos posiciones de fuente. La fuente debe situarse a 1,5 metros del suelo.

Las posiciones del micrófono como es lógico deberían colocarse por donde situarían los oyentes y deben ser mínimo 6. Es importante que las posiciones sean representativas del tamaño total de la audiencia. Las posiciones del micrófono deben estar alejadas unas de otras al menos una media longitud de onda, a una distancia aproximada de 2 metros para el rango de frecuencias habitual, a su vez se deben colocar a al menos un cuarto de onda (aproximadamente 1 metro) de la superficie reflectante más cercana, incluido el suelo.

Ninguna posición de micrófono debe estar excesivamente cerca de cualquier posición de la fuente, a fin de evitar una influencia demasiado fuerte del sonido directo. En las salas de concierto conviene colocar el micrófono a una altura de 1,2 metros que sería la altura de los oyentes sentados.

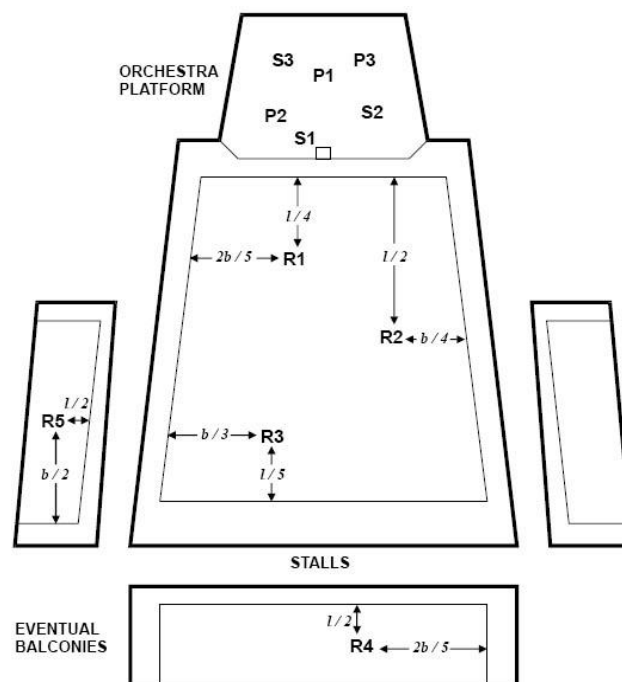


Figura 21: Ejemplo de distribución de las fuente y de receptores.



#### 4.1.4. Procedimientos de la medición.

Existen dos tipos de medida, el método por ruido interrumpido y el método de la respuesta impulsiva integrada. Ambos tienen el mismo valor teórico. Cuando no existan requisitos para bandas de frecuencias, deberían cubrir al menos desde 250Hz a 2000Hz, para los métodos de ingeniería y de precisión será de 125Hz hasta 4000Hz en banda de octava.

El método de ruido interrumpido se utiliza un altavoz y la señal que recibe procede de un ruido eléctrico de banda ancha aleatorio o pseudoaleatorio. La fuente debe ser lo suficiente potente para que pueda producir hasta unos 45dB por encima del ruido de fondo sobre todas las frecuencias para poder calcular el T30.

El número de posiciones determinará la precisión, pero teniendo en cuenta el carácter aleatorio de la fuente, es necesario calcular el promedio a partir del número de mediciones en cada posición para obtener una incertidumbre de medición más aceptable.

El promedio en cada posición de micrófono se puede calcular de dos formas diferentes hallando los tiempos de reverberación individuales para todas las curvas de decrecimiento y sacando el valor medio o haciendo una media del conjunto de los decrecimientos de presión acústica al cuadrado ya hallando el tiempo de reverberación de la curva de decrecimiento resultante.

Para un valor único de los parámetros, se aplica el promediado aritmético para las bandas de octava, excepto para  $L_j$  que se debe promediar energéticamente.

El método por respuesta impulsiva se puede medir de varias maneras (utilizando disparos, impulsos generados por chispazos, o secuencias de longitud máxima como señales (MLS))

La fuente impulsiva tiene que producir un nivel de presión sonora que garantice un pico suficiente para poder calcular la curva de decrecimiento empezando al menos de 35dB por encima del ruido de fondo y si queremos calcular el T30 al menos tiene que ser 45dB sobre el ruido de fondo.

#### 4.1.5. Particularidades de la medición de algunos parámetros.

**Eficiencia lateral**, tendremos que utilizar un micrófono bi-direccional con respuesta en forma de ocho. Se pretende que el cero del micrófono bi-direccional apunte al centro de la escena o exactamente a cada posición de fuente, de manera que este micrófono reaccione ante todo a la energía procedente de las direcciones laterales y nos vea influenciado por el sonido directo.

Dado que la directividad tiene esencialmente forma de coseno y que los valores de presión están elevados al cuadrado, la fracción de energía lateral obtenida para una reflexión individual varía con el cuadrado del coseno del ángulo de incidencia de la reflexión con respecto al eje de sensibilidad máxima del micrófono.

Como alternativa se puede utilizar la siguiente aproximación para obtener la fracción de energía lateral, con contribuciones que varían únicamente con el coseno del ángulo.

$$ST_T = 10 \log \frac{\int_{0,5ms}^{80ms} (P_L(t) * P(t)) dt}{\int_{0ms}^{80ms} P^2(t) dt}$$

$P_L$  es la presión acústica instantánea en la respuesta impulsiva del auditorio medida con un micrófono bi-direccional de respuesta en ocho.

$P$  es la presión acústica instantánea de la respuesta impulsiva medida en el punto de medición.

**Correlación cruzada interaural**, tendremos que utilizar una cabeza artificial (“dummy head”) con pabellones y canales auditivos y colocarla a una altura de 1,2 metros del suelo y seguir el proceso habitual de posiciones de fuente y receptor. Siempre teniendo muy presente la orientación de la cabeza.

**Soporte precoz y tardío**, la altura de la fuente y del receptor tendrá que ser la misma, 1 o 1,5 metros por encima del suelo. Generalmente se tendrán que utilizar tres posiciones de fuente y del receptor. Preferiblemente las medidas se deben realizar con los atriles y sillas del escenario excepto los que rodean a la fuente y micrófono en un diámetro de 2 metro para que no se refleje el sonido.

#### 4.5.6. Evaluación de las curvas de decrecimiento.

Par determinar el  $T_{30}$ , el rango evaluado para las curvas de decrecimiento se extiende de 5dB a 35 dB por debajo del nivel de régimen estacionario. En el caso de curvas de decrecimiento dibujadas directamente por el registrador de nivel se debe trazar una recta a mano lo más cerca posible a la curva de decrecimiento. La pendiente de la recta indica la tasa de decrecimiento,  $d$ , en decibelios por segundo, a partir de la cual se calcula el tiempo de reverberación como  $T_{30}=60/d$ . para la determinación de  $T_{20}$ , el rango de evaluación es de 5dB a 25dB.

#### 4.1.7. Incertidumbre de medición.

Debido a la naturaleza aleatoria de la señal la incertidumbre depende mucho del número de promedios realizados. El promedio de conjunto y el promediado de los tiempos de reverberación individuales tienen la misma sensibilidad frente al número de promedios. La desviación típica del resultado de medición,  $\sigma(T_{20})$  o  $\sigma(T_{30})$ , se puede estimar a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\sigma(T_{20}) = 0,88T_{20} \sqrt{\frac{1 + \frac{1,90}{n}}{NBT_{20}}}$$

$$\sigma(T_{30}) = 0,88T_{30} \sqrt{\frac{1 + 1,90/n}{NB T_{30}}}$$

Siendo:

- B el ancho de banda en hercios
- n el numero de decrecimientos medidos en cada posición
- N número de posiciones de medición independientes (combinaciones de posiciones de fuente y micrófono)
- $T_{20}, T_{30}$  tiempo de reverberación en segundos en función de un rango de evaluación de 20dB y 30 dB

En el caso de tiempos de reverberación muy cortos, la curva de decrecimiento puede estar influenciada por el filtro y detector. De manera que los límites inferiores para la obtención de resultados fiables deben ser conformes a:

$$BT > 16$$

$$T > 2T_{20}$$

Donde:

- B el ancho de banda en hercios
- T tiempo de reverberación medio en segundos
- $T_{det}$  tiempo de reverberación medio en segundos del promediador.

#### 4.5.8. Parámetros de medida.

- Nivel sonoro subjetivo.
- Reverberación percibida.
- Calidad del percibida.
- Ancho aparente de la fuente sonora.

## 4.2. EXPRESIÓN DE LOS RESULTADOS.

Los tiempos de reverberación deben para cada frecuencia de medición se deben dibujar en forma de gráfico y se deben presentar en una tabla. Las características de la grafica y detalles están descritos en la norma.

Para un valor único de los parámetros, se aplica el promedio aritmético para las bandas de octava, excepto para  $L_j$ .

La energía lateral se promedia

$$L_{J,avg} = 10 \log \left[ 0,25 \sum_{i=1}^4 10^{L_{Ji}/10} \right]$$

$L_{Ji}$  es el valor en la banda octava de  $i$ ,

$i$  representa cada una de las cuatro bandas de octava con frecuencias 125, 250, 500 y 1000 HZ

Los resultados de la medición de las magnitudes descritas en la norma no se deberían promediar sobre la totalidad de posiciones de micrófono en una sala, porque las magnitudes deberían describir las condiciones acústicas del local.

El informe del ensayo debe incluir la siguiente información:

- a) Una declaración de que las mediciones se realizaron de acuerdo con esta parte de la norma ISO 3382.
- b) El nombre y lugar del recinto sometido a ensayo.
- c) Un esquema del recinto, con una indicación de la sala
- d) Volumen del recinto
- e) Número y tipo de asientos
- f) Descripción de los materiales de las paredes y del techo
- g) Estado de ocupación o no de la sala y de las sillas y número de ocupantes.
- h) Estado de cualquier equipo variable
- i) Temperatura y humedad del momento de los ensayos
- j) Descripción del equipo de medición
- k) Descripción de la señal utilizada
- l) Detalles de las posiciones de fuente y micrófono en un plano junto a detalle de las alturas
- m) Fecha del ensayo y nombre del organismo de medición.

## 5. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO.

Un buen diseño geométrico es muy importante para el diseño del acondicionamiento. Como nosotros ya tenemos el diseño nos encontramos más limitados.

También podemos plantear una solución si fuera necesaria, más laboriosa que incluyera la modificación geométrica del recinto.

Por otra parte la colocación de la audiencia es muy importante también para que el sonido llegue a todos lo mas regular posible y no existan grandes diferencias entre los situados en unas zonas y otras.

Una buena condición para obtener un resultado satisfactorio tanto acústicamente y visualmente hablando se trata de darle la inclinación correspondiente al patio de butacas. El mínimo ángulo que se recomienda es 15° y el máximo 35°.

Además de tener esto en cuenta también tendremos que recordar cosas como:

- No colocar las paredes laterales paralelas y lisas, siendo estas altamente reflectantes y produciendo ecos flotantes.
- Colocar la pared trasera a mas de 8,5 metros y si no hay posibilidad hacer esta lo mas absorbente posible para evitar ecos.
- Evitar las superficies cóncavas para evitar las focalizaciones del sonido.
- Hay que evitar las grandes superficies lisas y reflectantes que utilizamos para guiar el sonido ya que estas nos pueden llevar a una coloración del sonido. Si no es posible esto darle una cierta convexidad a la superficie para evitar esta coloración.

### 5.1. MATERIALES DE ACONDICIONAMIENTO.

Dependiendo del resultado que persigamos tendremos que utilizar unos materiales u otros.

- **Materiales absorbentes** para minimizar la reverberación de la sala.
- **Resonadores** para reducir la reverberación de ciertas frecuencias.
- **Reflectores** para aumentar las primeras reflexiones dirigidas al público.
- **Difusores** para conseguir del sonido más uniforme.

#### 5.1.1. Materiales absorbentes.

Estos se utilizan para la obtención de tiempos de reverberación, prevención de ecos y reducción del campo reverberante en sitios muy ruidosos.

Estos materiales suelen colocarse como revestimiento del recinto. Estos materiales además de absorber la energía producen que aumente el valor de los materiales aislantes.

Generalmente estos materiales son porosos y canales a través de los cuales la onda puede penetrar, la absorción se hace mediante la disipación en forma de calor. La energía incidente parte es reflejada y parte es conducida por los diversos canales hasta que esta choca con la pared del recinto e intenta salir otra vez rebotada y vuelve

a pasar por los canales del material, de esta manera se hace pasar la onda dos veces por el material ya que cuantas mas veces pase mayor será su absorción. Esta absorción se transforma en forma de calor debido al rozamiento de las capas sólidas del material.

La capacidad absorción se mide por medio del denominado coeficiente de absorción,  $\alpha$ , que mide la relación entre la energía absorbida y la incidente, estos datos suele proporcionarlos el fabricante y para las banda de octava de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000Hz.

Además de las características de los materiales también se ven influenciados por los siguientes parámetros y que también hay que tener en cuenta.

**El espesor del material**

**Porosidad del material**

**Densidad del material**

**Distancia del material a la pared rígida**

**Colocación de los materiales**

#### 5.1.1.1. Espesor del material.

Continuando con la suposición de que colocamos y el material sobre la pared. Descubrimos que con el aumento del grosor del material aumenta también la absorción de este y siendo más apreciable a bajas y medias frecuencias.

Hay que tener en cuenta que la absorción es baja para todas aquellas frecuencias para las que se cumple que el espesor  $D$  es mucho menor que la longitud de onda  $\lambda$ .

$$\lambda = 2\pi f \quad D \ll \lambda$$

Si estudiamos el movimiento de las ondas vemos que a  $\lambda/2$  se produce un mínimo y a  $\lambda/4$  se produce un máximo. De manera que si vemos que la  $D$  del material coincide con un múltiplo impar de  $\lambda/4$  se producirá un máximo de absorción.

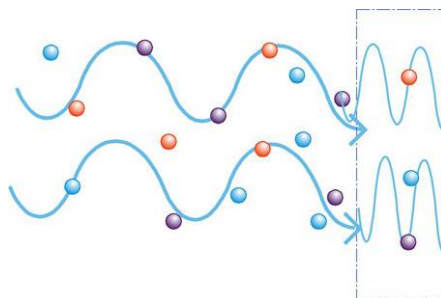


Figura 22: Ejemplo ondas sonoras contra material absorbente

Sabiendo que  $\lambda$  es inversamente proporcional a la frecuencia. Cuanto menor sea la  $D$  menor será la absorción a bajas y medias frecuencias. Y a medida que aumentemos el espesor del material aumentaremos la absorción a bajas frecuencias.

Por tanto si queremos que el material absorbente tenga su máximo rendimiento sobre una frecuencia en concreto calcularemos su espesor de la siguiente manera:

$$D = k \frac{\lambda}{4} = k \frac{c}{4f} \quad k = 1,3,5,7 \dots$$

Donde c es la velocidad de propagación del sonido en el aire.

### 5.1.1.2. Porosidad del material.

Como es de esperar a mayor nivel de porosidad mayor será el nivel de absorción ya que será mayor el número de canales y podrán penetrar mas cantidad de ondas. Es fenómeno afectará igual a todas las frecuencias.

### 5.1.1.3. Densidad del material.

Si la densidad del material es baja, existen pocas perdidas por fricción y en consecuencias la absorción es baja. A medida que la densidad aumenta las perdida por rozamiento llegando a un límite donde la absorción vuelve a descender. Siendo como máximo una densidad aproximadamente de 40 y 70 Kg/m<sup>3</sup> no debiéndose superar en ningún caso los 100Kg/m<sup>3</sup>.

La explicación de esto es debido a que la atenuación se produce por la transformación y disipación de calor debido al rozamiento de las capas de unas con otras. Al aumentar estas llega un punto donde la porosidad ya disminuye, de manera que el material pasa de ser absorbente a reflejar las ondas.

### 5.1.1.4. Distancia del material a pared rígida.

Si pretendemos tener absorción a bajas frecuencias no siempre es necesario contar con materiales muy gruesos. Basta con utilizar materiales de tamaño medio y colocarlos a las distancia adecuada de la pared rígida, sabiendo que la máxima absorción se producirá para la cual la distancia d sea igual a  $\lambda/4$  (en este caso,  $\lambda$  es la longitud de onda del sonido cuando se propaga en el aire que encontramos entre el material absorbente y la pared rígida). Ello es debido a que la amplitud de la velocidad de las partículas de aire es máxima para  $d = \lambda/4$ .

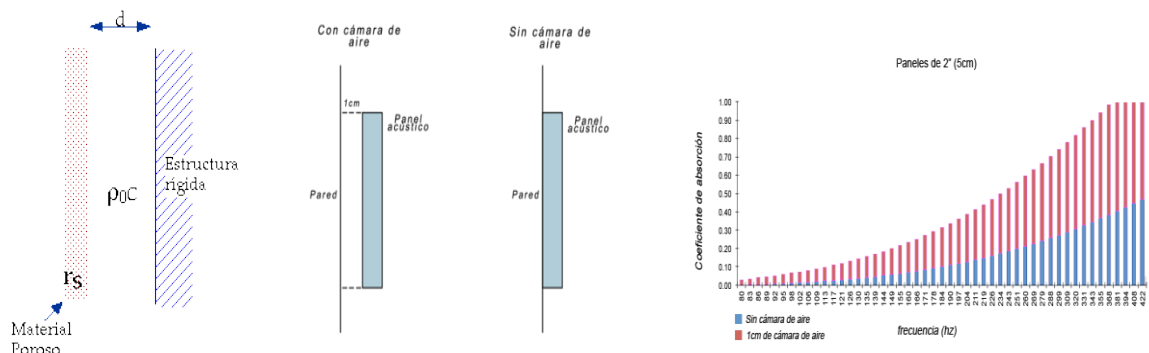


Figura 23: Comportamiento de las ondas ante varias formas de colocar el material absorbente y su respuesta.

Cuanto mayor sea la distancia “d” mayor será la absorción a bajas frecuencias, pero llegará a un momento donde las altas frecuencias no son nada absorbidas. En una situación límite donde el espesor tiende a cero, viene a quedarse como una superficie porosa pesada que no vibra, colocada paralelamente a una distancia “d” la absorción varía entre un máximo y un mínimo.

$$f = \frac{(2k + 1)c}{4d} \quad K = 0,1,2,3.. \quad ==> \text{MAXIMO}$$

$$f = \frac{(2k)c}{2d} \quad K = 0,1,2,3 \dots \dots \quad ==> \text{MÍNIMO}$$

Debido a que la mayoría de materiales no se puede garantizar la ausencia completa de vibraciones las características de absorción pueden variar. Para evitar estos picos de absorción se opta por colocar los materiales absorbentes dispuestos de forma irregular en forma de zigzag de manera que las distancias del material a la pared varía y se produce una mayor uniformidad.

Finalmente hay que tener en cuenta que independientemente del grosor del material si este se separa considerablemente de la pared rígida, las explicaciones anteriores dejan de ser válidas, de manera que hay que estudiar las cavidades a ambos lados del material

#### **5.1.1.5. Colocación de los materiales absorbentes, suspendidos en el techo.**

Hasta el momento hemos analizado los materiales para colocarlos en las paredes, pero de nos puede dar el caso que no podamos colocarlos es estas superficie, o simplemente que necesitamos tratar mas superficie de la que hay disponible. De esta manera se recurre al techo.

Normalmente esto ocurre en recintos con grandes volúmenes y altos niveles ruidosos, fabricas, comedores polideportivos, etc.

Cabe destacar que estos materiales son cuidados y recubiertos para evitar su degradación y pérdida de propiedades. De manera que es protegida mediante un velo transparente acústicamente, o también es tratado y bañado con una superficie micro porosa que no impide el paso de las ondas pero si la degradación.

También existen materiales ya preparados para esto como placa rígida de mortero poroso, compuesta por el mortero poroso cámara de aire, material absorbente y la pared rígida. De este mismo tipo encontramos también la placa de viruta de madera

#### **5.1.2. Resonadores (absorbentes selectivos).**

Además de los materiales mostrados anteriormente, para la absorción de las bajas frecuencias, si realmente queremos bajar el tiempo de reverberación debemos hacerlo mediante estos absorbentes.



Estos actúan para frecuencias por debajo de los 500Hz y sobre todo se centran en una frecuencia en concreto, esta depende de las condiciones geométricas y de las características físicas del elemento y esta es conocida como frecuencia de resonancia.

Estos resonadores se pueden utilizar de forma independiente o como forma complementaria de los materiales absorbentes.

### 5.1.2.1. Resonador de membrana o diafragmático.

Se trata de una lámina flexible no porosa colocada a una distancia de la pared rígida, dejando una cavidad que será ocupada por el aire. De manera que la lámina pueda vibrar una vez que la onda incide sobre esta. Dicha amplitud de vibración depende la frecuencia de la onda y es máxima para la frecuencia de resonancia.

Esta vibración produce una deformación del material y se atenúa debido a su disipación en forma de calor. Se ha comprobado que su comportamiento de absorción es forma de campana de Gaus.

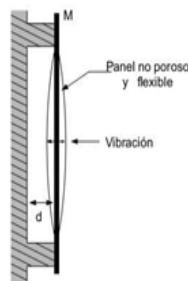


Figura 24: Esquema de un resonador de membrana o diafragmático.

Suponiendo que la onda incide perpendicularmente, la expresión para el cálculo de la  $f_0$  es la siguiente:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{Md}} \text{ en Hercios}$$

Donde:

M= masa por unidad de superficie del panel (en Kg/m<sup>2</sup>)

D= distancia del panel a la pared rígida.

Según las características del material que rellenan la cavidad ( $\rho_0 c$ ) y la resistencia del panel al flujo del aire ( $r_s$ = relación entre la diferencia de niveles a ambos lados del panel y velocidad del flujo que lo atraviesa), tendremos una campana mas ancha o mas estrecha. Si el valor de  $r_s$  del panel es bajo ( $r_s < \rho_0 c$ ) al añadir material absorbente se producirá un aumento de  $r_s$  y de absorción principalmente a  $f_0$ . De manera contradictoria ocurrirá si el valor de  $r_s$  del panel es alto ( $r_s > \rho_0 c$ ) y colocamos material absorbente la respuesta será menos selectiva siendo menor la absorción a  $f_0$ .

### 5.1.2.2. Resonador de cavidad simple (Helmholtz).

Está formado por una cavidad rellena de aire que accede a la sala por una pequeña abertura, denominado cuello.

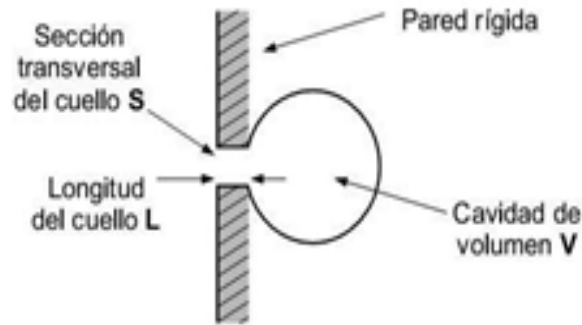


Figura 25: Esquema básico resonador de cavidad simple (Helmholtz).

Partiendo de que estos elementos se crean para la absorción exclusiva a bajas frecuencias se cumple que el aire del cuello se mueve como una unidad, mientras que el de la cavidad se comporta como un muelle, constituyendo así una rigidez. De forma análoga al resonador de membrana se construye un sistema resonante con un pico de absorción a su frecuencias de resonancia.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{LV}} \text{ (En Herzios)}$$

S= sección transversal del cuello en cm

L= longitud del cuello en cm

V= Volumen de la cavidad en cm<sup>3</sup>

Si la cavidad está vacía, solo contiene aire, este resonador es muy selectivo. Si la cavidad es rellenada con un material absorbente, este deja de ser tan selectivo para ser efectivo a un rango de frecuencias más amplio a costa de que la cantidad de absorción para estas es menor.

Su utilidad es similar al resonador de membrana, pero debido a sus pequeñas dimensiones comparado con las superficies a tratar se suelen colocar en batería.

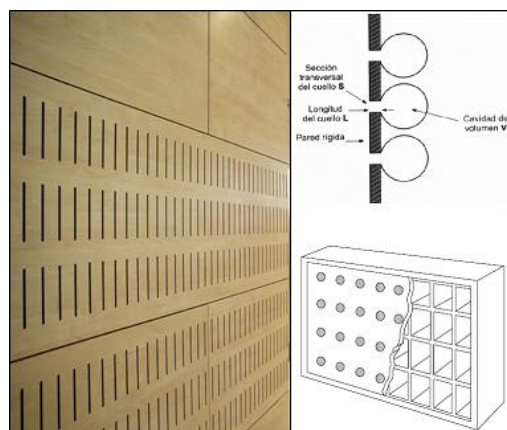


Figura 25: Resonador, basado en este es el que encontramos en la sala de la Filarmónica de Berlín.

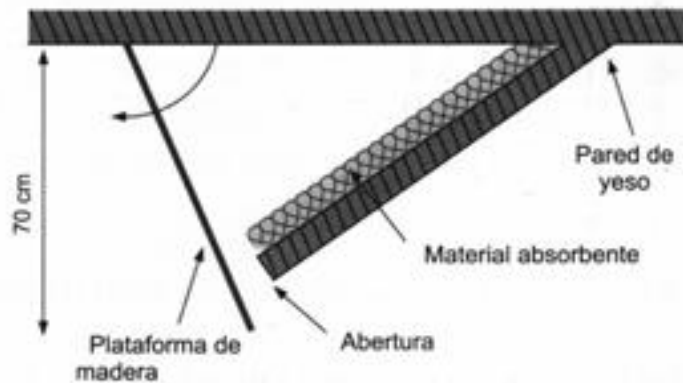


Figura 26: Resonador, basado en este es el que encontramos en la sala de la Filarmónica de Berlín.

Esta es la imagen de un corte transversal del resonador utilizado, como vemos consta de una pequeña abertura que es la que actúa de cuello y en su interior consta de material absorbente. Por su diseño además de servir como absorbente a bajas frecuencias actúa de difusor y así evitando modos propios de la sala, evitando la coloración del sonido.

### 5.1.2.3. Resonador de cavidad múltiple.

Al igual que los resonadores de membrana se coloca una superficie no porosa de una anchura  $D$  y separado una distancia  $d$  de la pared rígida generando entre una superficie y otra un volumen. A diferencia del resonador de membrana, esta tiene unas perforaciones en forma circular o rectangular, y la superficie tiene que ser rígida, para ello se suele utilizar materiales como, madera, yeso, ladrillo.

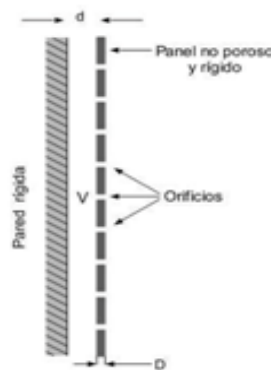


Figura 27: Esquema básico de resonador múltiple de cavidad a base de paneles ranirados.

Al igual que pasa con los anteriores resonadores si colocamos material absorbente, varían las características de este. Cuando colocamos material absorbente en la cavidad aumentará la absorción, pero se reducirá el rango de frecuencias de actuación. Por otro lado además de aumentar la absorción, según donde coloquemos el material variará la absorción, cuanto más cerca de la superficie perforada la curva de absorción pro frecuencias será más ancha, y a medida que nos acerquemos a la pared rígida está se hará más estrecha.

La expresión para el cálculo de la frecuencia de resonancia  $f_0$  es análoga a la correspondiente al resonador simple.

$$f_0 = 5480 \sqrt{\frac{S}{DS_p d}} \text{ (en Herzios)}$$

S= suma de las secciones transversales de los orificios en cm

D= espesor del panel (coincide con la longitud de los orificios) en cm

V=  $S_p d$  volumen de la cavidad en  $\text{cm}^3$

$S_p$ = superficie del panel en  $\text{cm}^2$

d = distancia del panel a la pared rígida en cm

Cabe destacar que la distancia de la pared rígida a la superficie perforada debe ser uniforme a lo largo de todo el panel al igual que la distribución de las perforaciones, de lo contrario el panel se comportaría mas parecido a un material absorbente que a un resonador.

#### 5.1.2.4. Resonador de cavidad múltiple a base de listones.

Este es una variante del resonador múltiple de Helmholtz. La diferencia es que ahora los huecos por los que penetra la onda son los que existen entre los listones colocados sucesivamente.

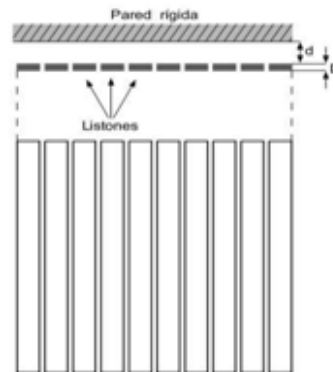


Figura 28: Resonador múltiple a base de listones.

Este resonador también consta de una curva de respuesta de absorción según frecuencia y también de una frecuencia máxima de absorción que coincide con su frecuencia de resonancia. Además del similar en el comportamiento de absorción al colocar el material absorbente, podemos desarrollar una curva menos selectiva a base de modificar la estructura del resonador de las siguientes maneras: variar las distancias entre los listones consecutivos

#### 5.1.3. Reflectores.

Aunque todos los materiales son susceptibles a producir reflexiones en mayor o menor cantidad dependiendo del coeficiente de absorción, a mayor absorción menor reflexión. Conviene destacar que el resultado ideal se produce sobre una superficie completamente lisa y de dimensiones grandes en comparación con la longitud de onda.

Considerando lo mencionado antes y sabiendo que tiene un contenido espectral amplio, dicho elemento solo actuará a partir de una cierta frecuencia. Para todas las superficies que sean menores que las longitudes de onda esta actuará como difusor, difractando la onda ya que esta bordeará la superficie.

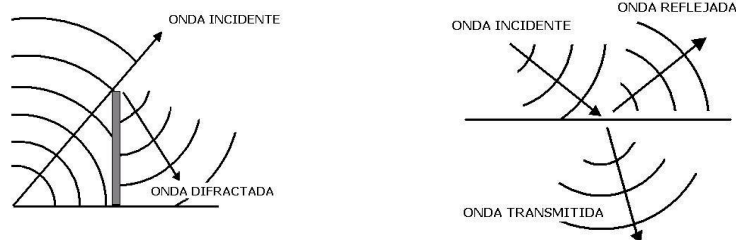


Figura29: comportamiento de los rayos acústicos ante obstáculos

El objetivo primordial de las superficies reflectoras es aumentar la cantidad de primeras reflexiones que llegan después del sonido directo en la superficie de la audiencia. Estas reflexiones son integradas por nuestro oído como parte del sonido directo.

Durante el diseño de un elemento reflector para acondicionar la sala tendremos presente.

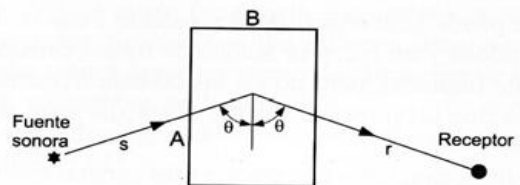
- El fenómeno de difracción es inherente a su tamaño limitado
- La aparición de anomalías que perjudican la calidad acústica final de la sala: ecos, focalizaciones, coloración del sonido, etc.

Respecto a las anomalías aparecen si las reflexiones tienen un nivel demasiado alto, este se soluciona consiguiendo una buena difusión del sonido en la sala.

### 5.1.3.1. Reflectores planos.

Estos reflectores planos cuando se tratan de reflectores finitos, se producen un efecto difracción, con lo que a partir de una cierta frecuencia, el nivel de presión sonora disminuirá progresivamente a medida que la frecuencia también lo haga.

En el diseño reflector se deben tener en cuenta los efectos de difracción que hemos comentado.



Suponemos un reflector de las siguientes medidas:

A= longitud del reflector

B = ancho del reflector

$\Theta$  = ángulo de incidencia y reflexión sobre el reflector

Las frecuencias correspondientes a los extremos donde el reflector se comporta de diferente forma, atenuando se obtienen de la siguiente manera:

$$f_A = \frac{c}{(1/s + 1/r)B^2 \cos^2 \theta}$$

$$f_B = \frac{c}{(1/s + 1/r)A^2}$$

r = distancia del receptor al centro del reflector en metros

s = distancia del emisor al centro del reflector en metros

c = velocidad del sonido

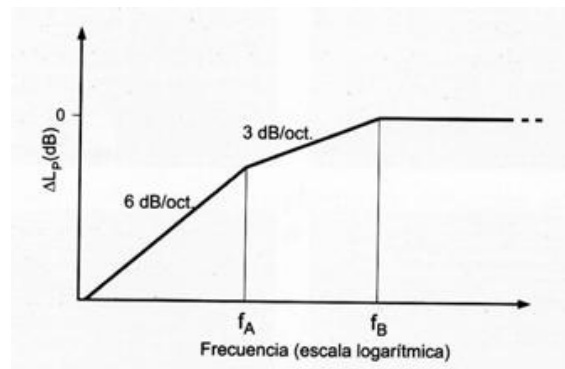


Figura 30 Disminución relativa del nivel de presión sonora correspondiente al sonido reflejado por el reflector plano antes diseñado

Se puede observar que para las frecuencias mayores de  $f_B$  se comporta como si fuera infinito ya que no hay difracción del sonido ni atenuación. Entre las dos frecuencias calculadas empieza a comportarse como difusor debido a su anchura B finita. Para las frecuencias por debajo de  $f_A$  se hace más sensible como difusor debido a su anchura B y longitud A finitas

Es recomendable  $f_B$  menor de 500Hz para que la respuesta sea plana para medias y altas frecuencias.

Dado que interesa que el reflector se comporte como tal en el mayor rango de frecuencias posible, tendremos que hacer que la distancia entre el reflector y receptor el ángulo de incidencia sea pequeño. También aumentando las dimensiones del reflector tanto anchura y altura. Por lo que interesa reflectores próximos al público, lo que conlleva reflectores de tamaños considerables, ya que la superficie del público es muy grande.

Sin embargo hay que andar con cuidado con las grandes superficies reflectoras que pueden producir anomalías como consecuencia de apariciones de reflexiones de gran nivel, incluso de nivel superior al del sonido directo.

### 5.1.3.1. Reflectores curvos.

Los reflectores curvos la mayoría suelen ser convexos, estos dispersan mejor el sonido que los reflectores planos, abarcan mayor zona de cobertura.

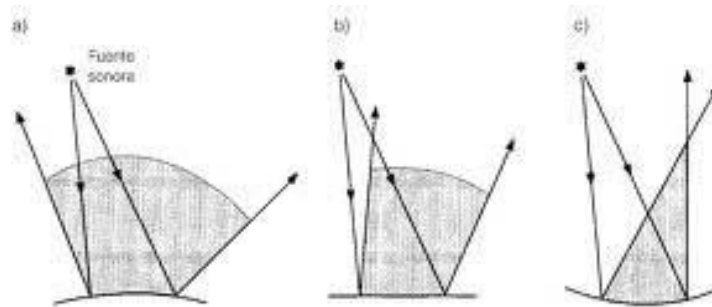


Figura 31: Reflectores Convexos, planos y cóncavos.

En la práctica para que el reflector funcione de una forma optima las citadas anomalías, es preciso que su radio de curvatura sea aproximadamente mayor de 5m. Para radios menores tiende a comportarse como un difusor.

Por lo contrario las superficies cóncavas tienden a focalizar e sonido, concentra el sonido en una zona más reducida y con un nivel mucho más elevado. A menudo ocurre que la energía asociada a dicho sonido es incluso superior al correspondiente al sonido directo.

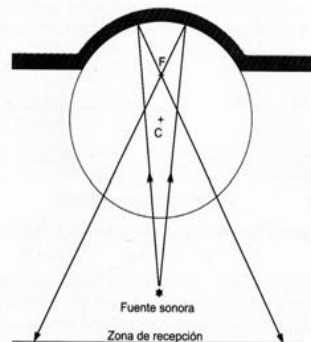


Figura 32: Dispersión del sonido con una superficie cóncava

Como vemos en la figura anterior y se demostró no todas las superficies cóncavas focalizan el sonido. Se ha demostrado que las superficies con un grado de concavidad y superficies separadas del escenario. La regla para saber si la superficie actúa como si como difusor del sonido o focalizando hay que tener en cuenta que ni el emisor ni el receptor estén dentro de la circunferencia creada a partir de la prolongación de la superficie cóncava.

### 5.1.4. Difusores.

Se denominan difusores a aquellas superficies que reflejan el sonido uniformemente en todas la direcciones, también existen los que lo reflejan irregularmente según la direcciones, debido a las irregularidades de la superficie.

Con estos se produce un mayor efecto de espacialidad, con lo que la impresión de la calidad acústica del recinto mejora considerablemente.

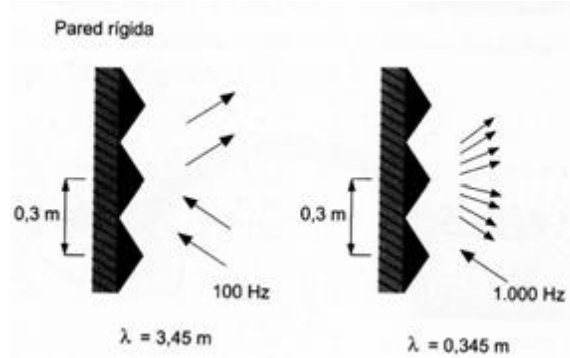


Figura 33: Difusores

Como podemos observar vemos un claro ejemplo de cómo se comportan las superficies según la longitud de onda. Como vemos, el difusor en forma de pirámide actúa como reflector plano produciendo un par de ondas a la frecuencia de 100Hz ya que su  $\lambda=3,45\text{m}$ . y la misma superficie para ondas a 1000Hz

#### 5.1.4.1. Difusores poli cilíndricos.

Los difusores poli cilíndricos consisten en una superficie lisa con una forma convexa con radio inferior a 5m para evitar que actúen como reflectores. Se deben colocar en conjunto dispuestas sucesivamente para que se note más su efecto.



Figura 34: Difusor policilíndrico

#### 5.1.4.2. Difusores de Schroeder.

Además de las superficies irregulares y los conjuntos de difusores poli cilíndricos existen otros que actúan para unos márgenes de frecuencia. Estos están basados en la teoría de números desarrollada por Manfred R. Schroeder y se basan en distintas secuencias matemáticas fijadas.

Consisten en una serie de hendiduras de diferentes profundidades ( $d_n$ ). Cada hendidura modifica la fase de la onda por la cantidad de camino recorrido, el sonido reflejado es el resultado de interferencia entre las diferentes porciones de ondas. Las profundidades de las hendiduras son calculadas a partir de las secuencias matemáticas citadas antes.



### 5.1.4.2.1. Difusores MLS.

Los difusores MLS (“Maximum Length Sequence”), basados en una secuencia pseudoaleatoria periódicas, denominadas de longitud máxima y que solo pueden obtener valores de “-1” y “+1”.

A partir de una superficie lisa y reflectante se subdivide en tramos de igual anchura, asignándole a cada uno de estos y un número de la secuencia pseudoaleatoria. Siendo alterada el tramo si pertenece a un +1 creando una ranura. Se debe tener en cuenta que la anchura de las ranuras  $W = \lambda/2$  y la profundidad  $d=\lambda/4$ .

Estos difusores son poco utilizados y las frecuencias para los que se comporta de una forma optima es para la banda de octava a la frecuencia de diseño.

### 5.1.4.2.2. Difusores QRD.

Los difusores de tipo residuo cuadrático (“Quadratic-Residue Diffusor”) al igual que los difusores anteriores el diseño se realiza mediante una secuencia pseudoaleatoria, pero en este caso se aplicará los resultados a la profundidad de los huecos y existen dos tipos los dedicados a una dimensión y los dedicados a dos.

#### 5.1.4.2.2.1. Unidimensionales.

Son los más utilizados a nivel práctico, tanto en salas de conciertos como en estudios de grabación. Están formado por una sucesión de ranuras de igual anchura, distintas profundidades y separadas una de otras por una lámina delgada y rígida.

La profundidad de la ranura se obtiene a partir de una secuencia matemática que se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$s_n = n^2 \text{ mod } p$$

$p$  = número primo (3, 7, 11....)

$n$  = número entero que va desde 0 a  $p-1$

mod = operación matemática “modulo”, indicativa de que cada valor de  $s_n$  se obtiene como el resto o residuo del cociente entre  $n^2$  y  $p$ .

|                            |   |   |   |   |    |    |    |
|----------------------------|---|---|---|---|----|----|----|
| $n$                        | 0 | 1 | 2 | 3 | 4  | 5  | 6  |
| $n^2$                      | 0 | 1 | 4 | 9 | 16 | 25 | 36 |
| $s_n = n^2 \text{ mod } p$ | 0 | 1 | 4 | 2 | 2  | 4  | 1  |

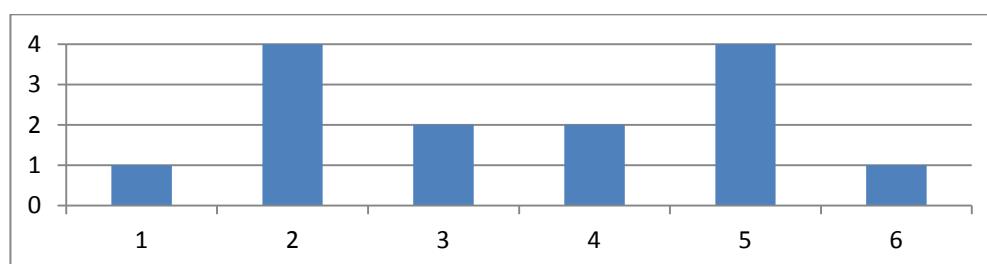


Tabla 5: Difusores QRD

Su comportamiento como difusor es para un margen determinado de frecuencias, fuera del cual tiende a comportarse como un reflector liso. La frecuencia mínima es determinada por la profundidad de la ranura siendo menor frecuencia para una mayor profundidad y la frecuencia máxima la fija la anchura de la ranura, aumentando la anchura para reducir la frecuencia máxima.

Su orientación horizontal crea una difusión vertical y una orientación vertical crea una difusión horizontal.

#### 5.1.4.2.2. Bidimensionales.

Los bidireccionales aparecen como generalización de los QRD con el objetivo de producir una óptima difusión en todas las direcciones.

Básicamente son un conjunto de cuadrados de distintas profundidades, que bien formado como la combinación de los unidimensionales en horizontal y vertical. Para el diseño de la secuencia adimensional las profundidades se generan con la siguiente fórmula:

$$s_{m,n} = (m^2 + n^2) \text{mod } p$$

En la práctica estos difusores son muy poco utilizados.

#### 5.1.4.2.3. Difusores PRD.

Los difusores PRD ("Primitive-Root Diffusor"), son análogos a los QRD, con la diferencia de que la profundidad de la hendidura se calcula con una secuencia pseudoaleatoria distinta, que se calcula de la siguiente manera:

$$s_n = g^2 \text{mod } p$$

p = número primo (3, 7, 11....)

g = raíz primitiva de p

mod = operación matemática "modulo", indicativa de que cada valor de  $s_n$  se obtiene como el resto o residuo del cociente entre  $n^2$  y p.

Para que g sea una raíz primitiva de p es preciso que el número de residuos distintos generados a través de la operación matemática sea igual a p-1.

## 5.2. ASPECTOS A TENER EN CUENTA EN EL ACONDICIONAMIENTO.

### 5.2.1 Absorción del aire.

Esta es producida solo a altas frecuencias ( $\geq 20\text{KHz}$ ) y se tiene en cuenta en recintos considerablemente grandes y con humedad relativa baja.

Una vez conocido el volumen del recinto podemos calcular su tiempo de reverberación teniendo en cuenta esta absorción:

$$RT = \frac{0,161V}{A_{tot} + 4mV} \text{ en segundos}$$

En nuestro caso como el recinto no es muy grande no tendremos en cuenta esta absorción.

### 5.2.2. Absorción de las superficies vibrantes.

Cualquier superficie que encontremos con la posibilidad de vibrar una mínima parte, habrá que tenerla en cuenta ya que esta puede atenuar algunas frecuencias en concreto. Así como las puertas, paredes ligeras separadoras etc.

A l contrario que ocurre con los materiales absorbentes que se puede tener claro su absorción y que va relacionada con la disipación de calor. En las puertas la energía absorbida es radiada hacia fuera y una ecuación que nos puede orientar sobre la absorción de una superficie vibrante es:

$$\alpha = \left( \frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right)^2$$

Donde:

- $\rho_0 = \text{densidad del aire} = \frac{1,18Kg}{m^3}$
- $\omega = 2\pi f$
- $f = \text{frecuencia en Hz}$
- $M = \text{masa por unidad de superficie} \left( \text{en } \frac{Kg}{m^2} \right)$

Dicha aproximación solo es válida en el caso de que el numerador sea pequeño respecto el denominador

Según vemos la absorción puede ser mínimamente a bajas frecuencias

### 5.2.3. Absorción del público y de las sillas.

El grado de reverberación de un recinto viene dado por los materiales absorbentes utilizados en su revestimiento de las superficies así como de una forma muy notoria por la absorción producida por el público y las sillas existentes.

Si se considera la disposición habitual del público en salas destinadas teatros, espectáculos, conciertos, las personas se hallan agrupadas, siempre sentadas de la misma forma, de manera que resulta más correcto utilizar coeficientes de absorción unitarios (por m<sup>2</sup>), en lugar de la absorción por persona. En este caso se utilizan dos conjuntos de coeficientes de absorción, uno con las sillas ocupadas y otro con las sillas vacías, ya que ellas por si solas ya presentan un coeficiente de absorción notable.

Según Kosten y Beranek, la absorción de las sillas (ocupadas y vacías) aumenta en proporción directa a la superficie que ocupan. Esto se cumple siempre que las sillas estén ocupen entre 0,45 y 0,79 m<sup>2</sup>

La absorción de las sillas se calcula de la siguiente manera:

$$A_s = S_A \alpha_s \text{ (en Sabins)}$$

Donde:

$S_A$  = superficie acústica efectiva ocupada por las sillas (en m<sup>2</sup>): formada por la superficie real  $S_s$  ocupada por las mismas + la superficie total en bandas perimetrales de 0,5m de anchura que bordeen los diferentes bloques de sillas (exceptuando las zonas contiguas a una pared)

$\alpha_s$  = coeficiente de absorción unitario de las sillas, vacías u ocupadas

Recientemente Beranek ha publicado una nueva clasificación de los tipos de sillas y su absorción después de haber realizado varias mediciones en salas. La clasificación la hace en tres grupos:

- Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada.
- Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada
- Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada.

| FRECUENCIA (Hz)                                       | 125  | 250  | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada  | 0,72 | 0,79 | 0,83 | 0,84  | 0,83  | 0,79  |
| Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada | 0,56 | 0,64 | 0,70 | 0,72  | 0,68  | 0,62  |
| Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada  | 0,35 | 0,45 | 0,57 | 0,61  | 0,59  | 0,55  |

Tabla 6: Coeficiente de absorción de las sillas vacías

| FRECUENCIA (Hz)                                       | 125  | 250  | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 |
|-------------------------------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Sillas con un alto porcentaje de superficie tapizada  | 0,76 | 0,83 | 0,88 | 0,91  | 0,91  | 0,89  |
| Sillas con un porcentaje medio de superficie tapizada | 0,68 | 0,75 | 0,82 | 0,85  | 0,86  | 0,86  |
| Sillas con un bajo porcentaje de superficie tapizada  | 0,56 | 0,68 | 0,79 | 0,83  | 0,86  | 0,86  |

Tabla 7: Coeficiente de absorción de las sillas ocupadas

Podemos decir que se produce un aumento considerable al pasar de la silla vacía a ocupada. Son más absorbentes sobre todo a bajas frecuencias las sillas más tapizadas cuando estas son ocupadas.



Figura 35: Baja superficie tapizada (izq), Alta superficie tapizada (der)

Según se observa las diferencias más notables corresponden a las sillas con menor superficie de tapizado y sobre todo en las altas frecuencias. Las diferencias menos notables ocurre con las sillas con mayor superficie tapizada y solo se produce la variación más notable a bajas frecuencias.

## 6. TOMA DE MEDIDAS IN-SITU PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA SALA.

En un principio vamos a realizar un ensayo con el local totalmente vacío par realizar un estudio más exacto de las anomalías que podamos encontrar y de cómo está en un principio la distribución de sonido y todos sus parámetros de caracterización.

Una vez realizado este ensayo procederemos a realizar uno con todas las butacas e instrumentación y herramientas típicas del local. Así como atriles, instrumentos de percusión, etc.

Por último realizaremos el ensayo con público en las butacas para comprobar cómo afecta la absorción de las personas y si varía mucho los parámetros de caracterización respecto a la previsión que realicemos.

Para cada uno de los ensayos programados se seguirán las siguientes pautas:

Según la norma antes descrita tomamos 3 posiciones de fuente, en este caso como el recinto no es simétrico tomaremos las posiciones de la manera más representativa del escenario.

Una vez decidió las posiciones de fuente distribuiremos las 6 posiciones de recepción por todo el recinto y por cada posición de fuente pasaremos por las 6 posiciones de recepción. Además de señalar donde son las posiciones indicaremos en el plano las alturas de estas.

En primer lugar empezaremos por los parámetros obtenidos a partir del tiempo de reverberación.

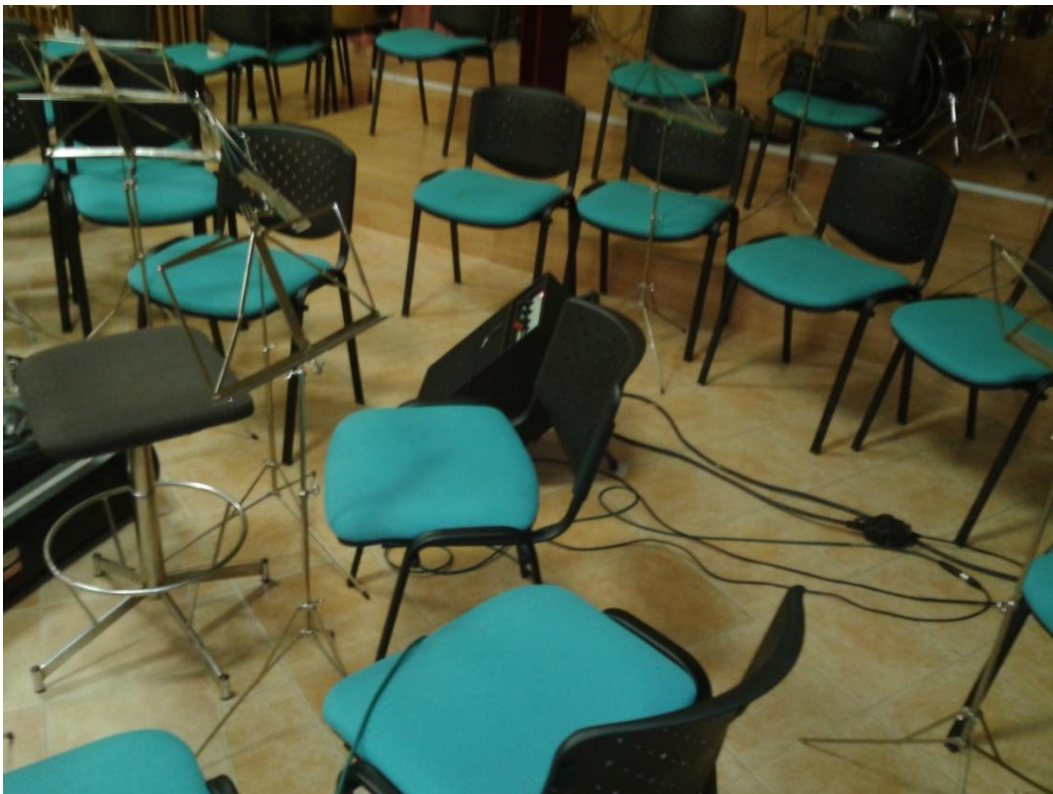


Figura 36: Varias fotos del local durante la realización de las medidas



Figura 36: Varias fotos del local durante la realización de las medidas

## 6.1. TIEMPO DE REVERBERACIÓN.

En primer lugar empezaremos por el tiempo de reverberación, y lo realizaremos mediante respuesta impulsiva integrada. Situaremos la fuente en la posición 1 y el micrófono en el punto de medida 1 y tomaremos la medida y así con el resto de posiciones. Para realizar el cálculo será necesario que el nivel de presión sea al menos 35dB sobre ruido de fondo para poder hacer el cálculo.

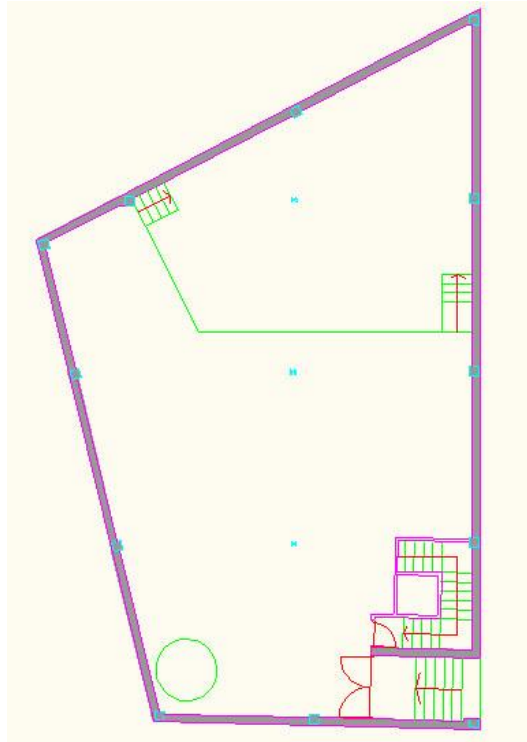


Figura 37: Planta del local a ensayar.

Solo calcularemos los siguientes parámetros,  $RT_{mid}$ , BR(Bass Ratio), Br (Brillo), G(Sonoridad), IDT,  $C_{80}$ . El resto de parámetros no los medimos ya que por el tamaño del recinto y no estar tampoco bien delimitada la zona de escenario y audiencia no se consideran necesario.

Como vemos en la gráfica a partir de que la señal ha caído 20dB continúa cayendo muy lentamente. Esto es debido a un error en la toma de medidas in-situ al no haber obtenido una buena relación señal a ruido. Por eso solo tendremos en cuenta los parámetros extraídos de la caída hasta los primeros 20 dB. Por lo que trabajaremos con el EDT, que serán los parámetros más fiables

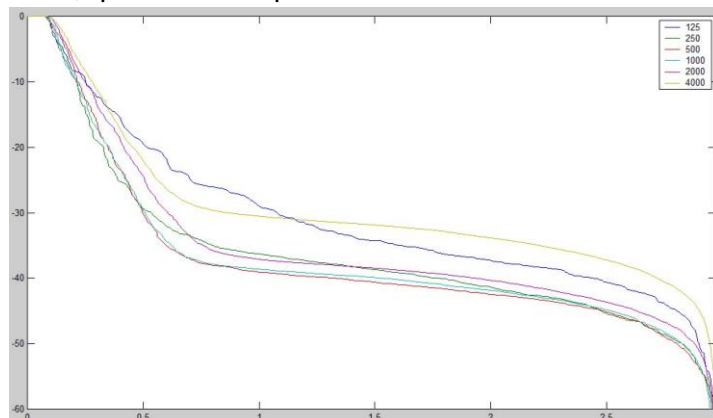


Figura38: Curvas del tiempo de caída de la señal



| Frecuencia Hz       | 125         | 250         | 500         | 1000        | 2000        | 4000        |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| R1/F1               | 1,41        | 0,70        | 0,71        | 0,73        | 0,89        | 1,04        |
| R1/F2               | 1,04        | 0,78        | 0,75        | 0,70        | 0,89        | 1,02        |
| R1/F3               | 1,37        | 0,55        | 0,87        | 0,82        | 1,04        | 1,21        |
| <b>R1(promedio)</b> | <b>1,27</b> | <b>0,68</b> | <b>0,78</b> | <b>0,75</b> | <b>0,94</b> | <b>1,09</b> |
| R2/F1               | 0,88        | 0,69        | 0,62        | 0,76        | 0,92        | 1,00        |
| R2/F2               | 1,10        | 0,53        | 0,73        | 0,76        | 0,92        | 1,04        |
| R2/F3               | 0,84        | 0,67        | 0,57        | 0,89        | 0,85        | 1,04        |
| <b>R2(promedio)</b> | <b>0,94</b> | <b>0,63</b> | <b>0,64</b> | <b>0,80</b> | <b>0,90</b> | <b>1,03</b> |
| R3/F1               | 1,23        | 0,67        | 0,77        | 0,74        | 0,90        | 0,96        |
| R3/F2               | 0,77        | 0,92        | 0,66        | 0,77        | 0,91        | 0,95        |
| R3/F3               | 1,23        | 0,61        | 0,61        | 0,75        | 0,85        | 0,94        |
| <b>R3(promedio)</b> | <b>1,07</b> | <b>0,74</b> | <b>0,68</b> | <b>0,76</b> | <b>0,88</b> | <b>0,95</b> |
| R4/F1               | 1,10        | 0,62        | 0,62        | 0,83        | 0,80        | 0,95        |
| R4/F2               | 0,87        | 0,68        | 0,67        | 0,71        | 0,88        | 0,92        |
| R4/F3               | 0,83        | 0,73        | 0,65        | 0,64        | 0,86        | 0,96        |
| <b>R4(promedio)</b> | <b>0,93</b> | <b>0,68</b> | <b>0,65</b> | <b>0,72</b> | <b>0,85</b> | <b>0,94</b> |
| R5/F1               | 0,81        | 0,60        | 0,66        | 0,68        | 0,93        | 0,98        |
| R5/F2               | 1,25        | 0,76        | 0,57        | 0,67        | 0,85        | 0,93        |
| R5/F3               | 1,08        | 0,68        | 0,64        | 0,69        | 0,82        | 0,87        |
| <b>R5(promedio)</b> | <b>1,05</b> | <b>0,68</b> | <b>0,62</b> | <b>0,68</b> | <b>0,87</b> | <b>0,92</b> |
| R6/F1               | 0,69        | 0,68        | 0,74        | 0,76        | 0,78        | 0,93        |
| R6/F2               | 0,82        | 0,84        | 0,65        | 0,69        | 0,83        | 0,95        |
| R6/F3               | 0,86        | 0,71        | 0,57        | 0,77        | 0,83        | 0,93        |
| <b>R6(promedio)</b> | <b>0,79</b> | <b>0,74</b> | <b>0,65</b> | <b>0,74</b> | <b>0,81</b> | <b>0,94</b> |

Tabla 8: Toma de medidas según receptores y fuentes por frecuencia

| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| EDT           | 1,01 | 0,69 | 0,67 | 0,74 | 0,88 | 0,98 |

Tabla 9: EDT promedio de todas las posiciones

A partir de estos valores aplicando la formula

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}{2}$$

$$RT_{mid} = \frac{0,67s + 0,74s}{2} = 0,71 s$$

Una vez obtenidos los valores compararemos con los valores tipo.

| TIPO DE MÚSICA                  | TIEMPO DE REVERBERACIÓN( $RT_{mid}$ ) |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| Música sinfónica                | 1,8-2,0                               |
| <b>Música barroca y clásica</b> | <b>1,6-1,8</b>                        |
| Música de cámara                | 1,3-1,7                               |
| Ópera                           | 1,2-1,5                               |

Tabla 10: Márgenes recomendados para los distintos tipos de música

### 6.1.1. Bass Ratio (BR).

Siguiendo con el tiempo de reverberación promediado por aplicamos la siguiente fórmula y obtendremos el Bas Ratio.

|               |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
| EDT           | 1,01 | 0,69 | 0,67 | 0,74 | 0,88 | 0,98 |

Tabla 9: EDT promedio de todas las posiciones

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1Khz)}$$

$$BR = \frac{1,01s + 0,69s}{0,67s + 0,74s} = 1,2$$

Una vez obtenido el resultado lo compararemos también con los valores tipo.

$$1,10 \leq BR \leq 1,45(\text{si el } RT_{mid} = 1,8 s)$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,25(\text{si el } RT_{mid} = 2,2 s)$$

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

### 6.1.2. Brillo (Br).

También con los valores de los tiempos de reverberación obtenemos el brillo de la sala.

|               |      |      |      |      |      |      |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
| EDT           | 1,01 | 0,69 | 0,67 | 0,74 | 0,88 | 0,98 |

Tabla 9: EDT promedio de todas las posiciones

$$Br = \frac{RT(2KHz) + RT(4KHz)}{RT(500Hz) + RT(1000Hz)}$$

$$Br = \frac{0,88s + 0,98s}{0,67s + 0,74s} = 1,31$$

Beranek recomienda que el valor del Br para todas las salas totalmente ocupadas verifique:

$$Br \geq 0,87$$

El siguiente parámetro y ultimo referente al tiempo de reverberación es el EDT. Este se define como seis veces el tiempo transcurrido desde que desconectamos la fuente hasta que el nivel ha decaído 10 dB.

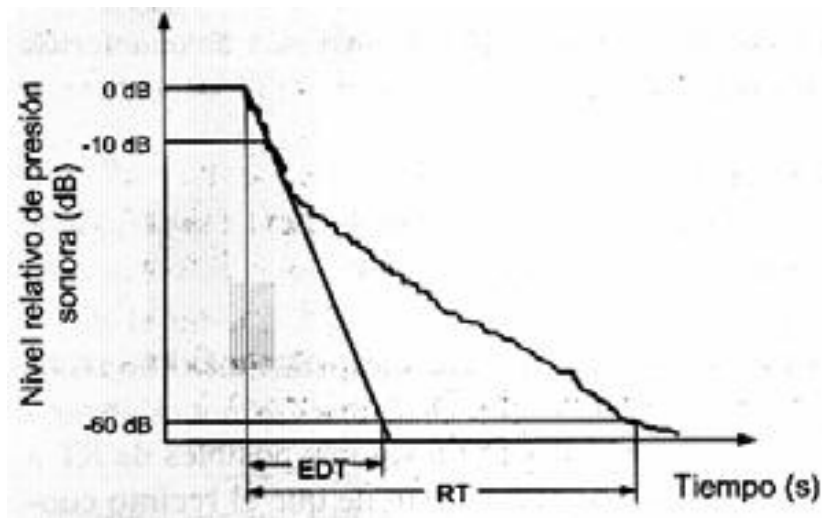


Figura 39: Caída del EDT y RT

De manera que para garantizar una buena difusión en toda la sala es necesario que el valor medio de los EDT correspondientes a las bandas de 500Hz y 1kHz sea del mismo orden que  $RT_{mid}$ .

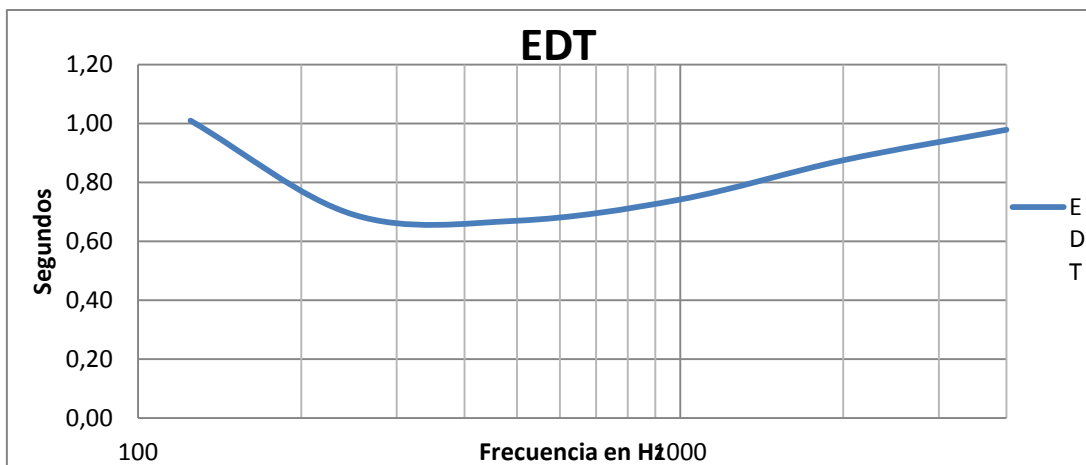
$$EDT_{mid} = RT_{mid}$$

| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| EDT           | 1,01 | 0,69 | 0,67 | 0,74 | 0,88 | 0,98 |

Tabla 9: EDT promedio de todas las posiciones

$$EDT_{mid} = \frac{EDT(500Hz) + EDT(1000Hz)}{2}$$

$$EDT_{mid} = \frac{0,67s + 0,74s}{2} = 0,71s$$



Gráfica 1: EDT medido

### 6.1.3. Sonoridad.

La sonoridad ya es dependiente del nivel de presión sonora. De manera que tendremos que realizar de nuevo otro ensayo para medir los niveles de presión en cada uno de los puntos.

| Frecuencia Hz       | 125          | 250          | 500         | 1000         | 2000         | 4000         | G           |
|---------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| R1/F1               | 14,28        | 12,02        | 8,10        | 10,01        | 18,83        | 19,15        | 9,06        |
| R1/F2               | 14,64        | 10,05        | 7,62        | 9,52         | 20,20        | 20,72        | 8,57        |
| R1/F3               | 15,16        | 10,40        | 5,27        | 12,33        | 19,80        | 20,68        | 8,80        |
| <b>R1(promedio)</b> | <b>14,69</b> | <b>10,82</b> | <b>6,99</b> | <b>10,62</b> | <b>19,61</b> | <b>20,18</b> | <b>8,81</b> |
| R2/F1               | 12,60        | 6,77         | 1,87        | 8,54         | 15,71        | 16,70        | 5,20        |
| R2/F2               | 13,59        | 6,01         | 3,42        | 6,43         | 18,31        | 18,62        | 4,92        |
| R2/F3               | 13,08        | 8,01         | 5,78        | 7,99         | 14,30        | 17,25        | 6,88        |
| <b>R2(promedio)</b> | <b>13,09</b> | <b>6,93</b>  | <b>3,69</b> | <b>7,65</b>  | <b>16,11</b> | <b>17,53</b> | <b>5,67</b> |
| R3/F1               | 8,64         | 8,23         | 2,97        | 8,06         | 14,68        | 14,93        | 5,51        |
| R3/F2               | 9,98         | 4,83         | 1,11        | 5,89         | 12,28        | 14,78        | 3,50        |
| R3/F3               | 8,76         | 9,67         | 7,47        | 9,30         | 15,66        | 18,84        | 8,39        |
| <b>R3(promedio)</b> | <b>9,13</b>  | <b>7,57</b>  | <b>3,85</b> | <b>7,75</b>  | <b>14,21</b> | <b>16,18</b> | <b>5,80</b> |
| R4/F1               | 12,62        | 6,44         | 5,73        | 7,77         | 18,83        | 19,44        | 6,75        |
| R4/F2               | 12,73        | 7,36         | 7,10        | 9,81         | 18,48        | 19,84        | 8,45        |
| R4/F3               | 13,11        | 7,40         | 8,00        | 11,42        | 18,16        | 18,04        | 9,71        |
| <b>R4(promedio)</b> | <b>12,82</b> | <b>7,07</b>  | <b>6,94</b> | <b>9,67</b>  | <b>18,49</b> | <b>19,11</b> | <b>8,30</b> |
| R5/F1               | 12,11        | 8,81         | 7,38        | 8,36         | 16,37        | 15,82        | 7,87        |
| R5/F2               | 10,88        | 7,45         | 7,91        | 9,36         | 15,85        | 14,99        | 8,63        |
| R5/F3               | 12,31        | 7,43         | 8,63        | 10,00        | 2,04         | 2,20         | 9,31        |
| <b>R5(promedio)</b> | <b>11,77</b> | <b>7,90</b>  | <b>7,97</b> | <b>9,24</b>  | <b>11,42</b> | <b>11,00</b> | <b>8,60</b> |
| R6/F1               | 7,57         | 7,80         | 4,78        | 6,98         | 19,46        | 18,56        | 5,88        |
| R6/F2               | 6,91         | 8,30         | 7,87        | 10,55        | 20,52        | 21,09        | 9,21        |
| R6/F3               | 10,22        | 6,32         | 7,22        | 8,79         | 17,88        | 18,06        | 8,01        |
| <b>R6(promedio)</b> | <b>8,23</b>  | <b>7,48</b>  | <b>6,62</b> | <b>8,77</b>  | <b>19,29</b> | <b>19,24</b> | <b>7,70</b> |

Tabla 11: Cálculo de la sonoridad según receptores y fuentes por frecuencia

Obtendremos los niveles de sonoridad para cada uno de los puntos de la sala y posteriormente calcularemos las medias. De esta manera tendremos la relación existente del nivel de presión en la sala radiada por la fuente omnidireccional.

Para el cálculo de la sonoridad lo podemos hacer de distintas maneras mediante la fórmula bajo mostrada,

$$G = 10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = L_{pE} - L_{p,E,10} \text{ dB}$$

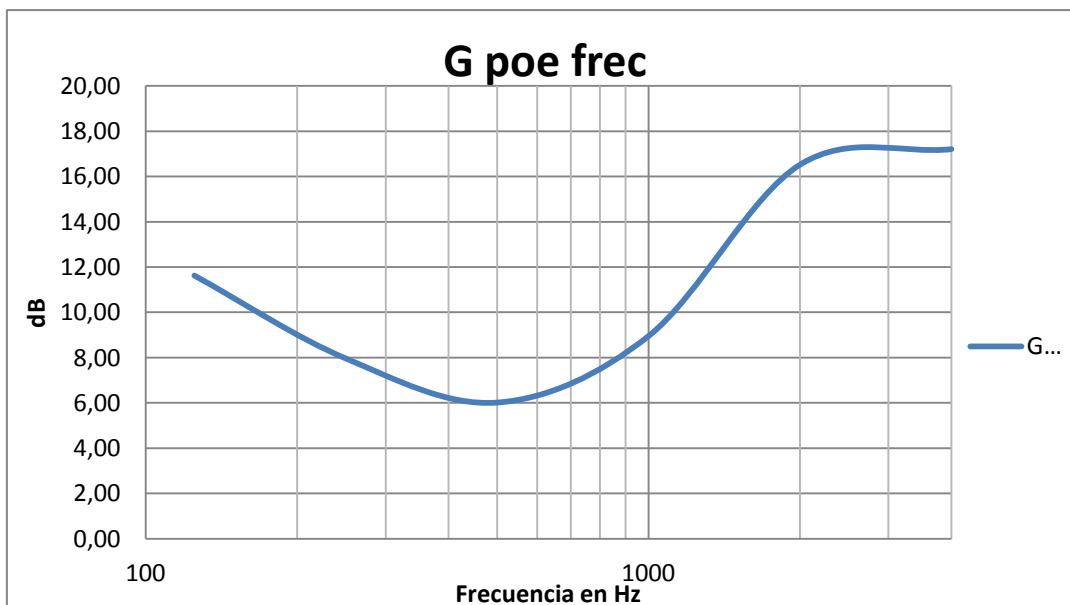
También se puede hacer mediante,

$$G = L_p - L_{p,10}$$

Donde  $L_p$  es el nivel de presión acústica en cada punto de medición del recinto sometido a ensayo y  $L_{p,10}$  es el nivel de presión acústica medido a una distancia de 10 metros en campo libre..

$$G_{mid} = \frac{G(500\text{Hz}) + G(1000\text{Hz})}{2}$$

$$G_{mid} = \frac{3,01\text{dB} + 4,47\text{dB}}{2} = 3,74\text{dB}$$



Gráfica 2: G( Sonoridad) medida

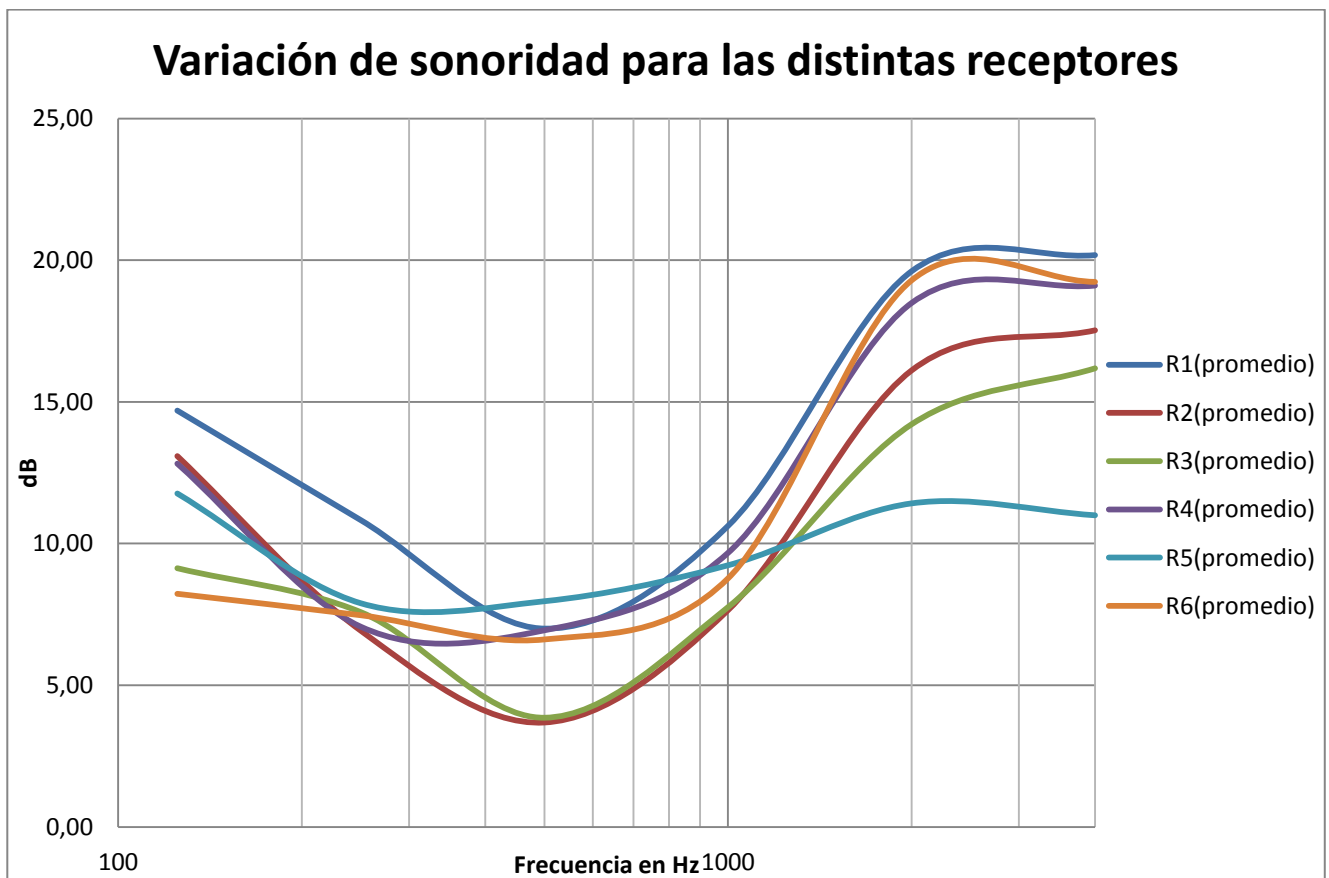
| Frecuencia Hz | 125   | 250  | 500  | 1000 | 2000  | 4000  | G media |
|---------------|-------|------|------|------|-------|-------|---------|
| G poe frec    | 11,62 | 7,96 | 6,01 | 8,95 | 16,52 | 17,21 | 7,48    |

Tabla 12: G(sonoridad) promedio de todas las posiciones

Beranek recomienda para una sala de conciertos vacía:

$$4 \leq G_{mid} \leq 5,5dB$$

Sería conveniente hacer una representación gráfica de la variación de la sonoridad para cada posición de recepción



Gráfica 3: Sonoridad según posición de receptor

### 6.1.4. Initial Time Delay.

Se trata de la diferencia tiempo medida en milisegundos entre el sonido directo y la primera reflexión. Según Beranek es conveniente tomar el dato en el centro de la paleta de audiencia, porque si están demasiado cerca de las paredes o anfiteatros no se podrá juzgar el grado de intimidad.

$$t_i \leq 20ms$$

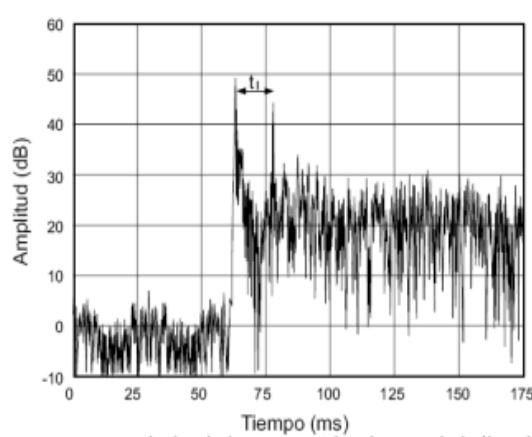


Figura 40: Diferencia llegada sonido directo, primeras reflexiones.

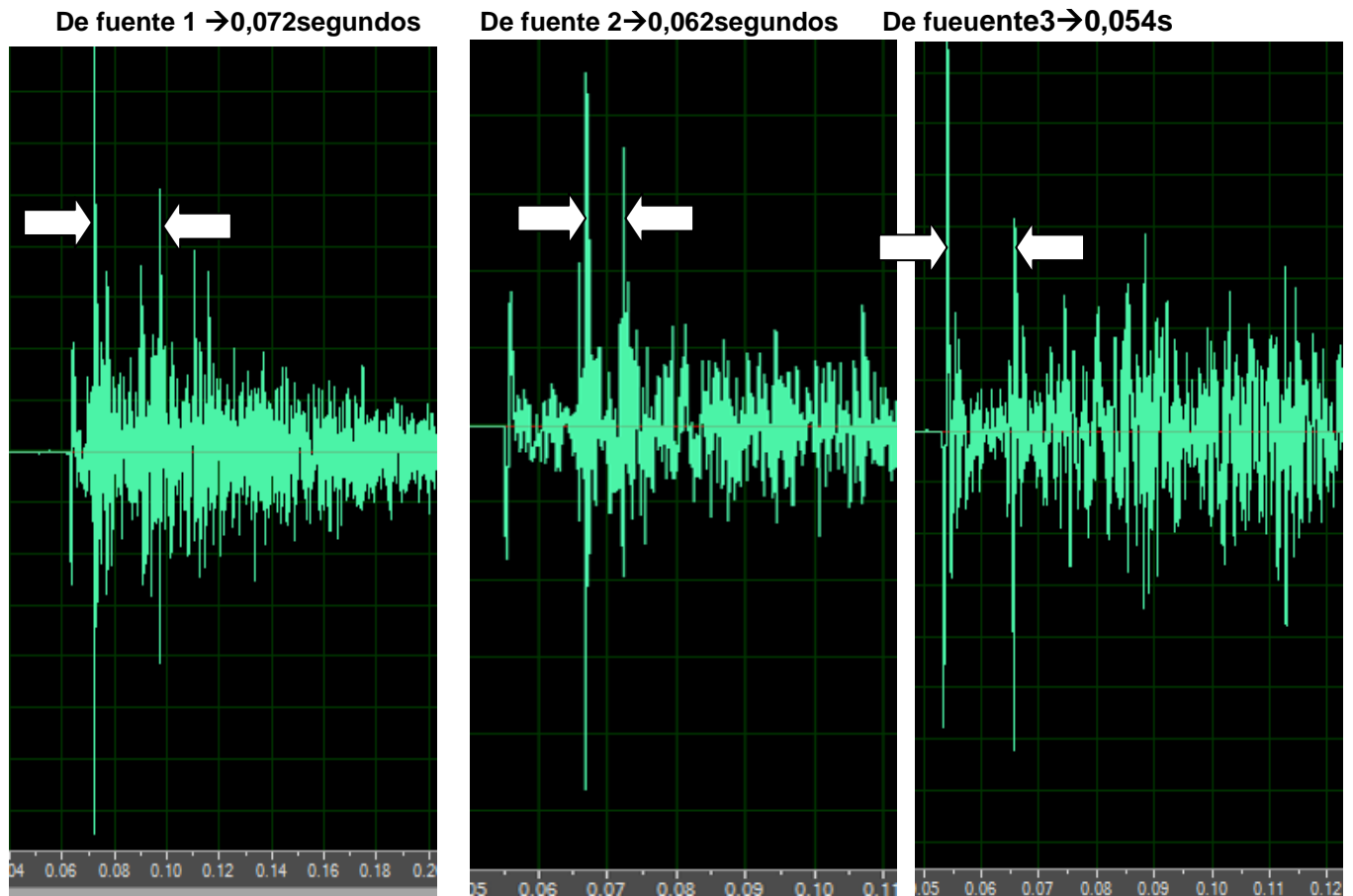


Figura 41: Espectro de distintas fuentes

## 6.2. REALACIONES ENERGÉTICAS.

### 6.2.1. Claridad.

Las reflexiones que llegan dentro de los primeros 80ms el oído lo interpreta como sonido directo. De esta manera se define como la energía sonora recibida durante los primeros 80ms incluido el sonido directo y la recibida después de este. Lo nombraremos como Music Average.

$$C_t = 10 \log \frac{\int_0^{t_1} p^2(t) dt}{\int_{t_1}^{\infty} p^2(t) dt} = -1 + e^{\frac{13,8t_1}{t_R}}$$

Este serían los valores según Beranek.

$$-4 \leq C_{80}(\text{Music Average}) \leq 0 \text{ dB}$$

Por otra parte, L.G Marshall aconseja el siguiente margen de valores.

$$-2 \leq C_{80}(\text{Music Average}) \leq 2 \text{ dB}$$

| Frecuencia Hz       | 125         | 250         | 500         | 1000        | 2000        | 4000        | C80         |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| R1/F1               | 4,81        | 5,52        | 2,82        | 5,97        | 4,15        | 3,15        | 4,31        |
| R1/F2               | 3,56        | 6,37        | 6,48        | 5,31        | 3,31        | 2,89        | 6,37        |
| R1/F3               | 1,99        | 6,40        | 4,78        | 4,75        | 2,00        | 1,53        | 3,84        |
| <b>R1(promedio)</b> | <b>3,45</b> | <b>6,10</b> | <b>4,69</b> | <b>5,34</b> | <b>3,15</b> | <b>2,52</b> | <b>4,84</b> |
| R2/F1               | 1,50        | 4,76        | 5,59        | 6,30        | 4,43        | 4,40        | 5,44        |
| R2/F2               | 3,74        | 8,73        | 6,86        | 4,89        | 5,67        | 4,50        | 5,81        |
| R2/F3               | 6,54        | 5,04        | 5,22        | 4,80        | 4,17        | 1,95        | 4,73        |
| <b>R2(promedio)</b> | <b>3,93</b> | <b>6,18</b> | <b>5,89</b> | <b>5,33</b> | <b>4,76</b> | <b>3,62</b> | <b>5,32</b> |
| R3/F1               | 2,64        | 8,50        | 6,74        | 3,18        | 3,97        | 3,64        | 4,63        |
| R3/F2               | 8,32        | 6,17        | 8,03        | 7,13        | 5,09        | 3,68        | 6,75        |
| R3/F3               | 5,80        | 7,31        | 7,54        | 5,94        | 5,00        | 3,03        | 6,16        |
| <b>R3(promedio)</b> | <b>5,59</b> | <b>7,33</b> | <b>7,44</b> | <b>5,42</b> | <b>4,69</b> | <b>3,45</b> | <b>5,85</b> |
| R4/F1               | 3,24        | 7,38        | 6,48        | 5,53        | 5,98        | 5,05        | 5,99        |
| R4/F2               | 7,47        | 6,66        | 5,16        | 5,66        | 6,05        | 4,56        | 5,63        |
| R4/F3               | 2,85        | 6,68        | 5,88        | 6,59        | 4,88        | 3,99        | 5,78        |
| <b>R4(promedio)</b> | <b>4,52</b> | <b>6,90</b> | <b>5,84</b> | <b>5,93</b> | <b>5,64</b> | <b>4,53</b> | <b>5,80</b> |
| R5/F1               | 3,14        | 6,73        | 8,42        | 6,04        | 3,98        | 4,23        | 6,15        |
| R5/F2               | 2,56        | 7,69        | 9,00        | 4,70        | 7,01        | 4,85        | 6,90        |
| R5/F3               | 3,88        | 7,04        | 9,17        | 6,60        | 7,56        | 7,59        | 7,78        |
| <b>R5(promedio)</b> | <b>3,19</b> | <b>7,15</b> | <b>8,86</b> | <b>5,78</b> | <b>6,18</b> | <b>5,55</b> | <b>6,94</b> |
| R6/F1               | 5,96        | 6,34        | 7,66        | 5,07        | 5,55        | 5,68        | 6,14        |
| R6/F2               | 6,57        | 6,49        | 7,63        | 6,42        | 8,69        | 7,14        | 7,58        |
| R6/F3               | 1,17        | 6,02        | 6,51        | 4,67        | 3,20        | 2,61        | 4,79        |
| <b>R6(promedio)</b> | <b>4,56</b> | <b>6,28</b> | <b>7,27</b> | <b>5,39</b> | <b>5,81</b> | <b>5,14</b> | <b>6,17</b> |

Tabla 13: Cálculo del C80 según receptores y fuentes por frecuencia

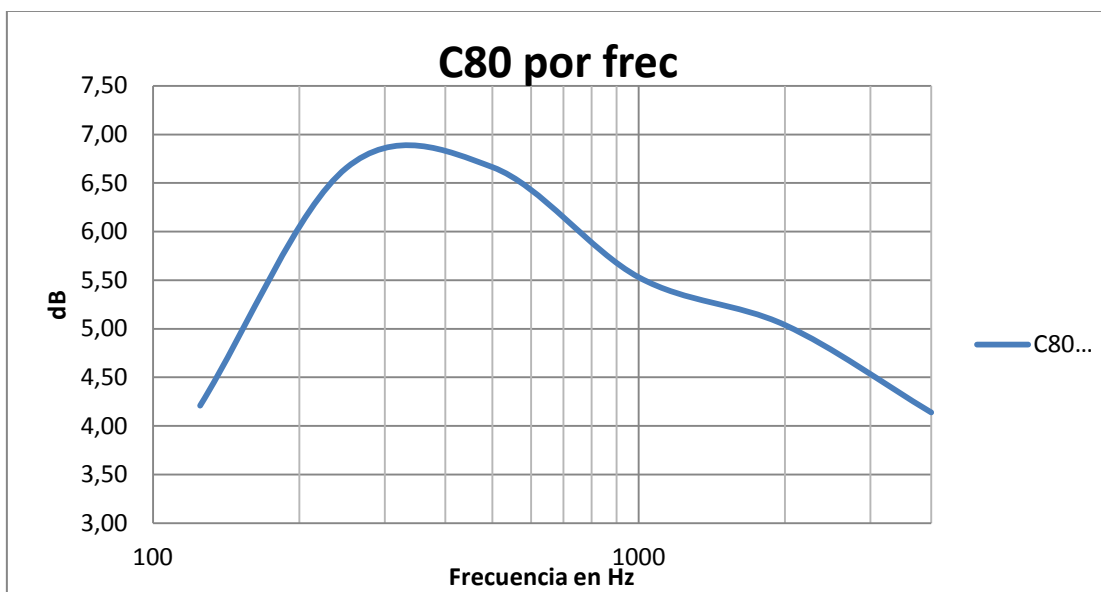


| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|
| C80 por frec  | 4,21 | 6,66 | 6,66 | 5,53 | 5,04 | 4,14 |

Tabla 14: G(sonoridad) promedio de todas las posiciones

$$C80(\text{Music Average}) = \frac{C80(500\text{Hz}) + C80(1\text{kHz}) + C80(2\text{KHz})}{3}$$

$$C80(\text{Music Average}) = \frac{6,66 + 5,53 + 5,04}{3} = 5,74\text{dB}$$



Gráfica 4: C80

### 6.3. RESULTADOS.

#### 6.3.1 Comparación.

| Parámetro                         | Resultado esperado                                                                       | Resultado obtenido | Valoración subjetiva                                                                                   | Valor normativa |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| $RT_{mid}$                        | 1,6-1,8                                                                                  | 0,71s              | Grado de viveza                                                                                        |                 |
| BR (Bass ratio)                   | $1,10 \leq BR \leq 1,45$<br>(si $RT_{mid}=1,8s$ ) <sup>(*)</sup>                         | 1,2                | Riqueza de sonidos graves, melosidad y suavidad de la música                                           |                 |
| Br (Brillo)                       | $Br \geq 0,87$                                                                           | 1,31               | Riqueza en sonidos agudos                                                                              |                 |
| EDT medio                         | $EDT_{mid} = RT_{mid}$                                                                   | 0,71s              | Grado de viveza en la sala                                                                             | 1,0s;3,0s       |
| G (Sonoridad)                     | $4 \leq G_{mid} \leq 5,5$ dB                                                             | 3,74dB             | Grado de amplificación producido por la sala                                                           | -2dB;+10dB      |
| IDT                               | $t_i \leq 20ms$                                                                          | 0,072s             | Intimidad acústica(sensación subjetiva de volumen de la sala; grado de identificación con la orquesta) |                 |
| $C_{80}$ (Claridad) Music average | $-4 \leq C_{80}(3) \leq 0$ dB, sala vacía<br>$-2 \leq C_{80}(3) \leq 2$ dB, sala ocupada | 5,74dB             | Grado de separación entre los diferentes sonidos individuales integrantes de una composición musical   | -5dB;+5dB       |

Tabla 15: Comparación de resultados

#### 6.3.2. Solución para el acondicionamiento.

Como vemos en los resultados en tiempo de reverberación se queda bastante bajo para la audición de música, recordemos que como mínimo para cualquier tipo de música tiene que superar el segundo.

De manera que básicamente habrá que modificar este parámetro, pero tendremos en cuenta que al variar el tiempo de reverberación, si modificamos este parámetro para las frecuencias medias también se verán afectados los parámetros relacionados con el TR, ya que de este depende el Brillo y Bass Ratio. Como estos están correctos y no dependen del  $TR_{mid}$  directamente sino de la proporción entre los valores del TR en unas frecuencias y otras habría que aumentar TR proporcionalmente en todas las frecuencias.

Después de hacer varios estudios sobre los resultados obtenidos tan extraño, ya que la curva tonal nos queda a frecuencias medias baja y a altas y bajas frecuencias aumenta. He llegado a la conclusión de que esto es producido por toda la madera perimetral que actúa como resonador a estas frecuencias de manera que las atenúa notablemente.

De manera que la solución a tomar sería sustituir esta madera perimetral por otro tipo que se comportase de forma más natural o hacer lo posible para que esta que hay montada no actuase como resonador a esas frecuencias medias.

## 7. SIMULACIÓN EN CATT.

### 7.1 SIMULACIÓN RECINTO ACTUAL.

Creamos el recinto de las mismas dimensiones, y forma. Lo más parecido a la realidad con el objetivo de llevar la simulación a los resultados obtenidos in-situ. Simulando las tres posiciones de fuente y las seis de receptor.

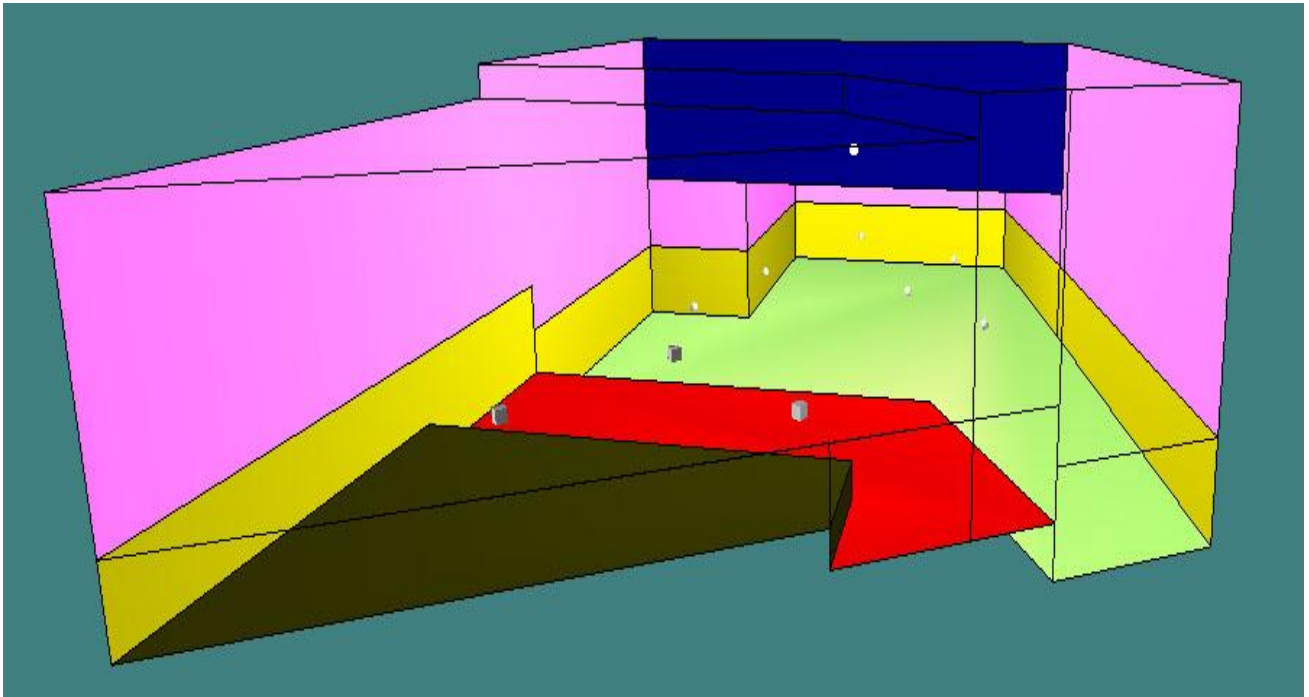


Figura 42: Simulación en Catt-Acoustics 3D del recinto

Colocamos todos los receptores mirando a una posición fija, el centro del escenario. Igualamos el T15 de las medidas in-situ a la simulación.

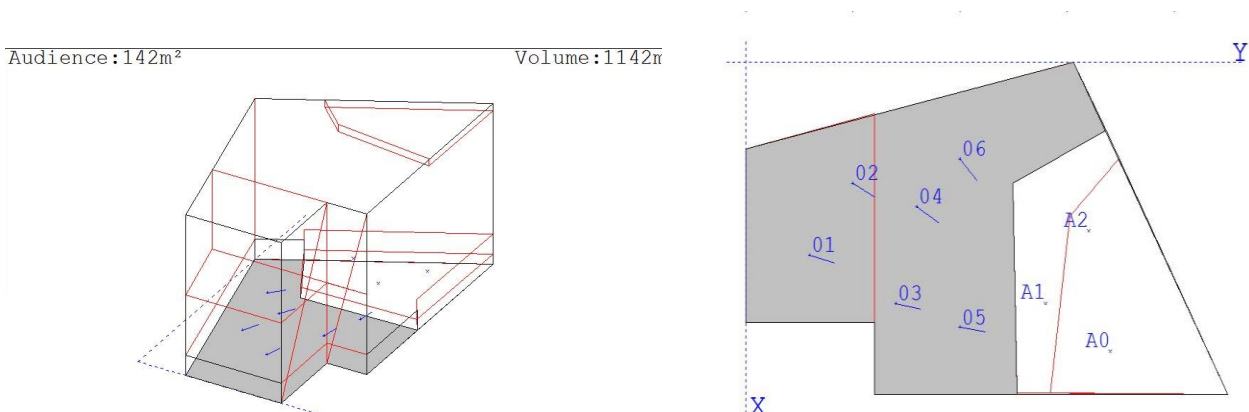


Figura 43: Simulación con fuentes y receptores.

### 7.1.1. Simulación fuente 1.

Calculamos los parámetros según posición de fuente

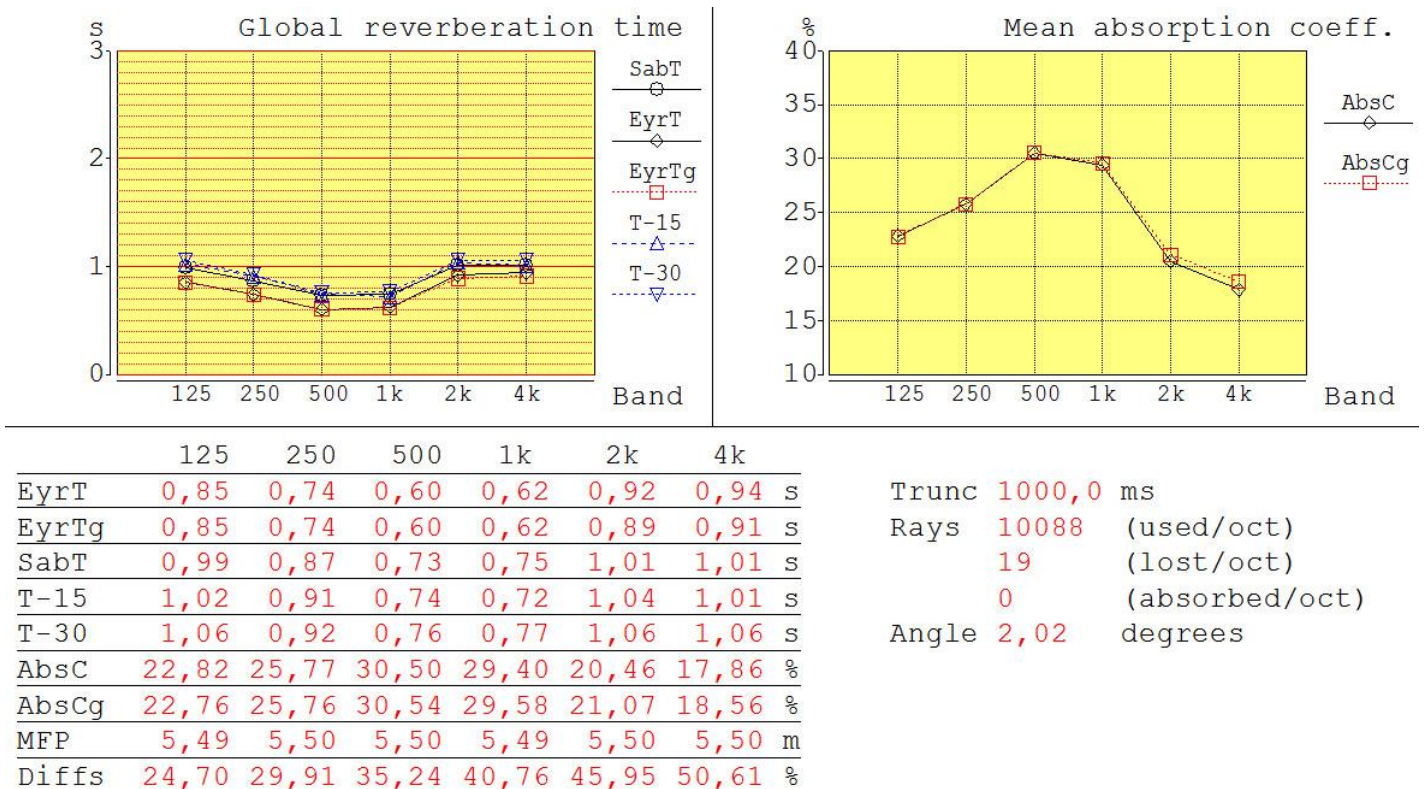


Figura 44: Simulación acondicionamiento fuente 1.

| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | Unidades |
|---------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| T15           | 1,07 | 0,73 | 0,70 | 0,77 | 1,01 | 1,20 | Segundos |

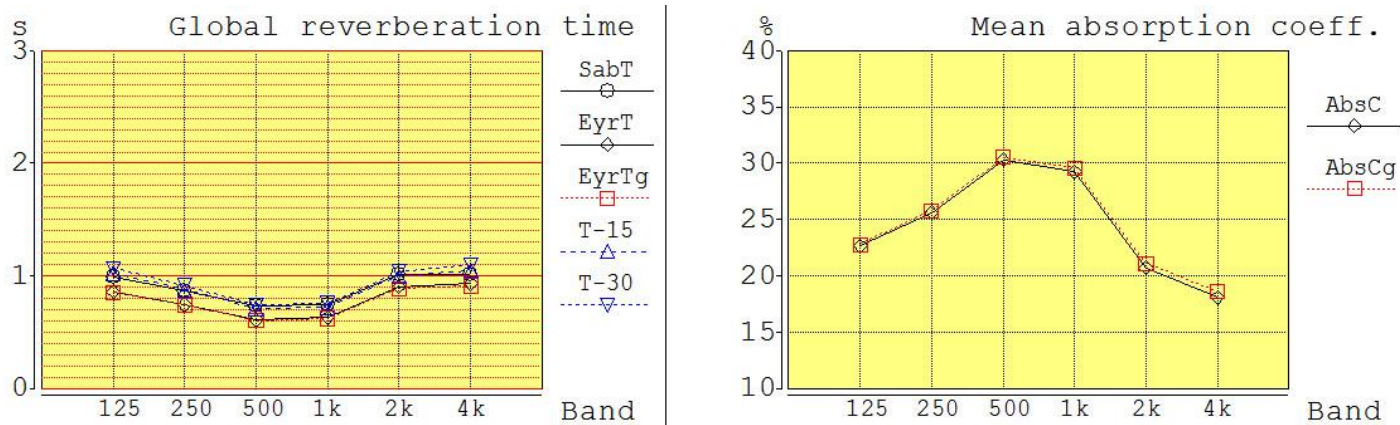
Tabla 16: Datos tomados in-situ.

Estos son los resultados obtenidos en la simulación después de igualar el T-15

| Frecuencia | 125   | 250   | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|----------|
| C80        | 2,8   | 3,9   | 5,3  | 5,1   | 2,6   | 2,9   | dB       |
| G          | 12,10 | 10,60 | 9,30 | 9,40  | 12,60 | 12,70 | dB       |
| EDT        | 0,99  | 0,87  | 0,74 | 0,76  | 1,04  | 1,02  | Segundos |
| T15        | 1,02  | 0,91  | 0,74 | 0,72  | 1,04  | 1,07  | Segundos |

Tabla 17: Resultados simulados fuente1.

7.1.2. Simulación fuente 2.



|       | 125   | 250   | 500   | 1k    | 2k    | 4k    |   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| EyrT  | 0,86  | 0,74  | 0,61  | 0,63  | 0,90  | 0,93  | s |
| EyrTg | 0,85  | 0,74  | 0,60  | 0,62  | 0,89  | 0,91  | s |
| SabT  | 0,99  | 0,87  | 0,73  | 0,75  | 1,01  | 1,01  | s |
| T-15  | 1,02  | 0,88  | 0,71  | 0,72  | 1,00  | 1,05  | s |
| T-30  | 1,06  | 0,91  | 0,74  | 0,75  | 1,03  | 1,10  | s |
| AbsC  | 22,64 | 25,61 | 30,31 | 29,22 | 20,69 | 18,09 | % |
| AbsCg | 22,76 | 25,76 | 30,54 | 29,58 | 21,07 | 18,56 | % |
| MFP   | 5,49  | 5,50  | 5,50  | 5,50  | 5,49  | 5,50  | m |
| Diffs | 24,65 | 30,02 | 35,37 | 40,81 | 46,05 | 50,95 | % |

Trunc 1000,0 ms  
 Rays 10088 (used/oct)  
 16 (lost/oct)  
 0 (absorbed/oct)  
 Angle 2,02 degrees

Figura 45: Simulación acondicionamiento fuente2.

| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | Unidades |
|---------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| T15           | 1,07 | 0,73 | 0,70 | 0,77 | 1,01 | 1,20 | Segundos |

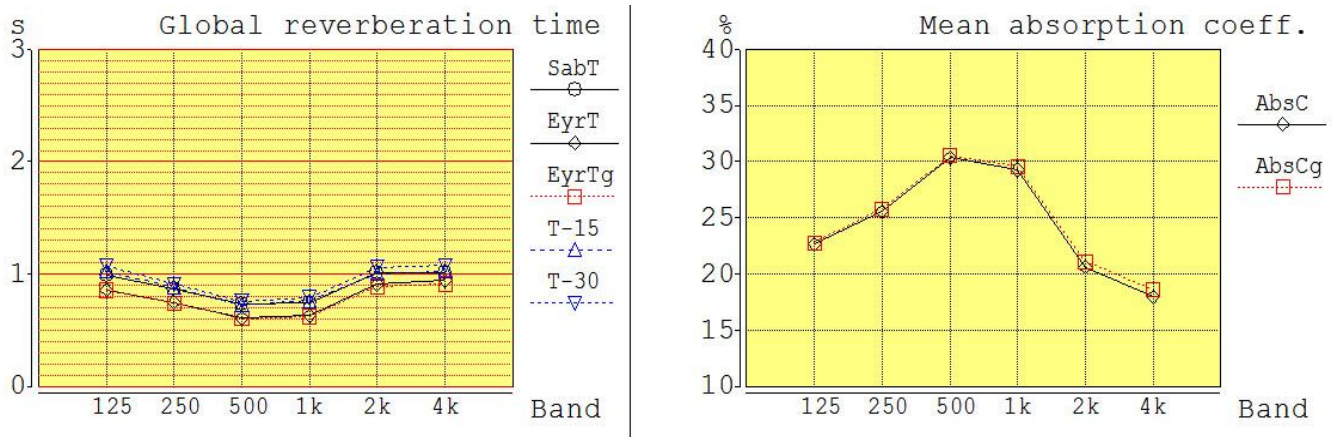
Tabla 16: Datos tomados in-situ.

Datos de la simulación:

| Frecuencia | 125   | 250   | 500   | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| C80        | 3,00  | 4,30  | 5,70  | 5,40  | 2,70  | 2,60  | dB       |
| G          | 13,20 | 12,20 | 11,00 | 11,00 | 12,90 | 12,80 | dB       |
| EDT        | 1     | 0,86  | 0,73  | 0,76  | 1,03  | 1,06  | Segundos |
| T15        | 1,02  | 0,88  | 0,71  | 0,72  | 1     | 1,05  | Segundos |

Tabla 18: Resultados simulados fuente 2.

7.1.3. Simulación fuente 3.



|       | 125   | 250   | 500   | 1k    | 2k    | 4k    |   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| EyrT  | 0,86  | 0,75  | 0,61  | 0,63  | 0,91  | 0,94  | s |
| EyrTg | 0,86  | 0,74  | 0,60  | 0,62  | 0,89  | 0,91  | s |
| SabT  | 0,99  | 0,87  | 0,73  | 0,75  | 1,01  | 1,01  | s |
| T-15  | 1,03  | 0,88  | 0,72  | 0,76  | 1,00  | 1,03  | s |
| T-30  | 1,07  | 0,91  | 0,76  | 0,79  | 1,06  | 1,07  | s |
| AbsC  | 22,65 | 25,58 | 30,35 | 29,27 | 20,59 | 17,95 | % |
| AbsCg | 22,76 | 25,76 | 30,54 | 29,58 | 21,07 | 18,56 | % |
| MFP   | 5,50  | 5,52  | 5,50  | 5,50  | 5,50  | 5,50  | m |
| Diffs | 24,67 | 30,05 | 35,32 | 40,69 | 45,91 | 50,85 | % |

Trunc 1000,0 ms  
 Rays 10088 (used/oct)  
 17 (lost/oct)  
 0 (absorbed/oct)  
 Angle 2,02 degrees

Figura 46: Simulación acondicionamiento fuente3.

| Frecuencia Hz | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | Unidades |
|---------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| T15           | 1,07 | 0,73 | 0,70 | 0,77 | 1,01 | 1,20 | Segundos |

Tabla 16: Datos tomados in-situ.

Datos de la simulación:

| Frecuencia | 125  | 250  | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|------------|------|------|------|-------|-------|-------|----------|
| C80        | 2,90 | 4,00 | 5,60 | 5,40  | 2,70  | 3,00  | dB       |
| G          | 12,8 | 11,6 | 10,5 | 10,6  | 12,6  | 12,9  | dB       |
| EDT        | 0,99 | 0,87 | 0,71 | 0,74  | 1,03  | 1,02  | Segundos |
| T15        | 1,03 | 0,88 | 0,72 | 0,76  | 1     | 1,03  | Segundos |

Tabla 19: Resultados simulados fuente 3.

| Frecuencia   | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | Unidades |
|--------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| EDT Simulado | 1,03 | 0,87 | 0,74 | 0,78 | 1,04 | 1,03 | Segundos |

Tabla 20: Resultados simulados

Comprobamos los cálculos de  $RT_{mid}$ , Calor Bass Ratio (BR), Brillo (Br).

$$RT_{mid} = \frac{0,74s + 0,78s}{2} = 0,76 s$$

$$BR = \frac{1,03s + 0,84s}{0,98s + 0,74s} = 1,25$$

$$Br = \frac{1,04s + 1,03s}{0,78s + 0,74s} = 1,35$$

Como podemos comprobar en las tablas vemos que los resultados son parecidos, después de hacer coincidir el T-15 medido con el de la simulación.

Vemos niveles de sonoridad y C80 a 1KHz del recinto:

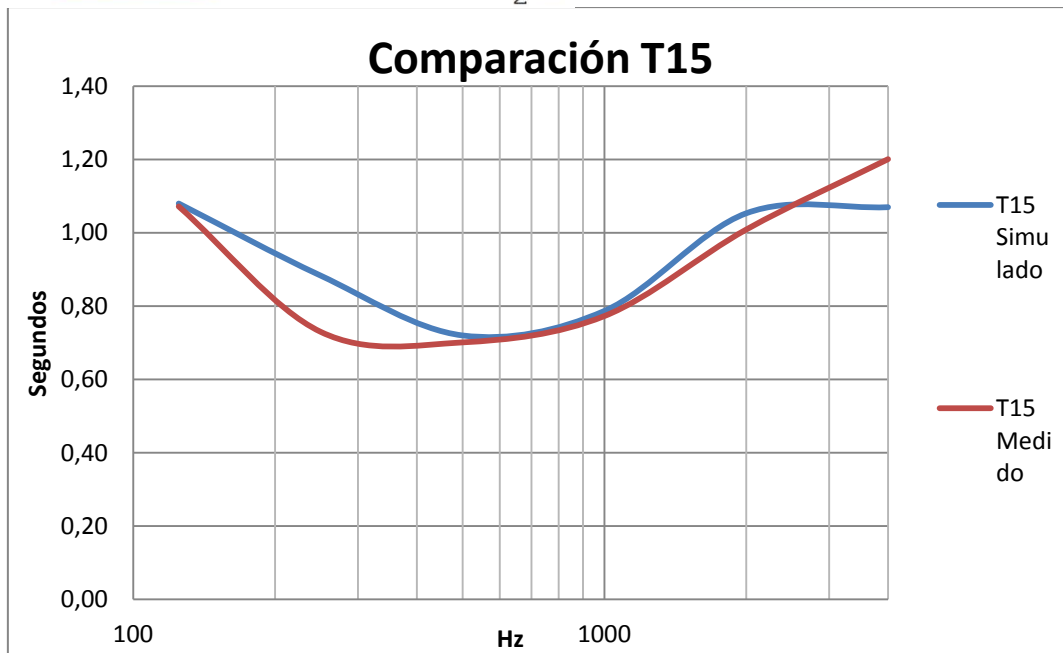
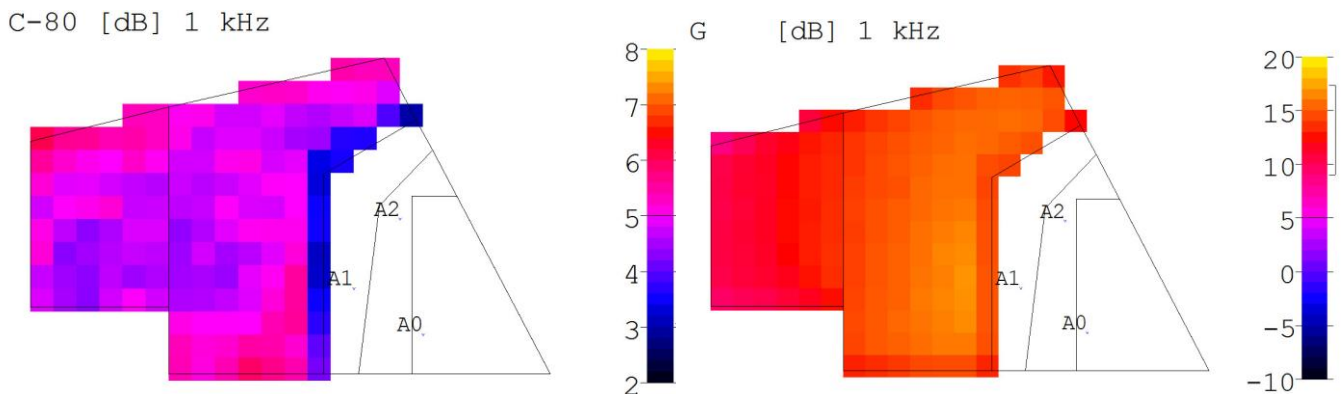


Figura 47: Resultados gráficos de simulación (G,C80, comparación T15)

## 7.2. SIMULACIÓN DEL RECINTO MODIFICADO.

Una vez tenemos en la simulación el diseño del recinto lo más parecido al local como es hoy en. Modificando los parámetros de absorción de la madera perimetral que es la que deducimos que se comporta de una manera extraña, llevamos la simulación a hacerla coincidir con los parámetros obtenidos por la medidas tomadas in-situ.

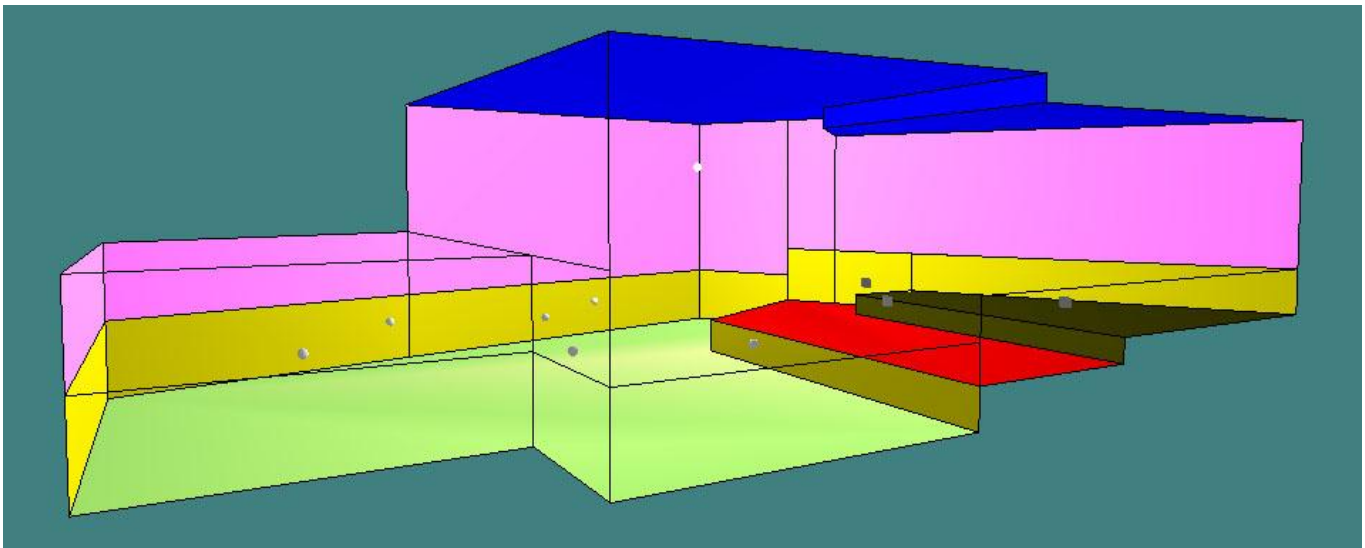


Figura 48: Simulación en Catt-Acoustic del acondicionamiento.

Una vez realizado el paso anterior pasamos a adoptar la solución ya mencionada. Modificaremos la madera perimetral y la sustituiremos por una por una madera que se comporte de forma normal.

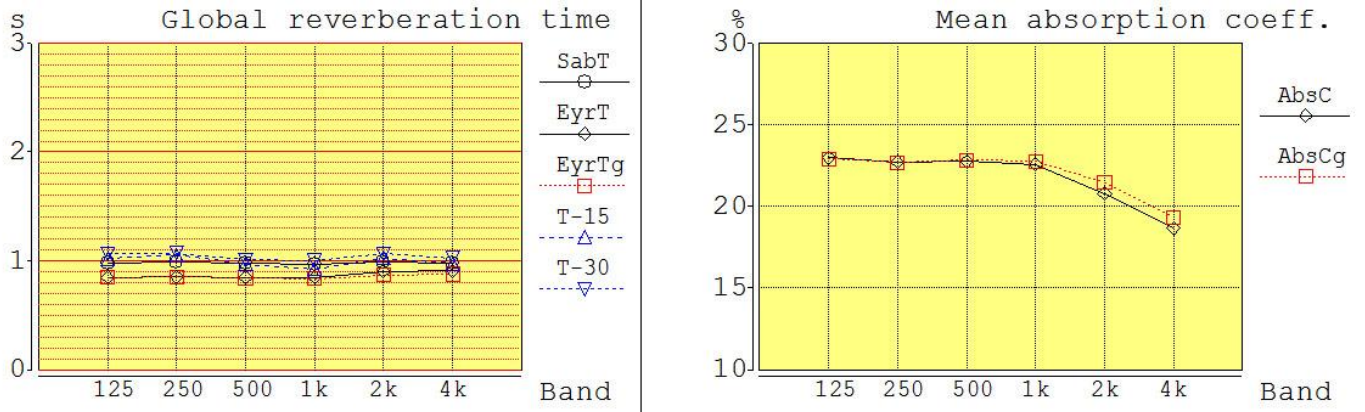
La tarima móvil que hay colocada encima del escenario también es de madera pero de otro tipo (madera aglomerado) no la modificaremos, solo modificaremos la madera perimetral ya que esta es mas propensa a entrar en vibración y deduzco que es la que es la que produce la mayor atenuación de estas frecuencias.

De manera que sustituiremos la banda perimetral por madera con los parámetros típicos de absorción de la madera intentando que desaparezca el efecto resonador que se produce para las frecuencias medias evitando así que se produzca esa curva tan pronunciada en la curva tonal de la sala.

A continuación vemos los resultados por fuentes igual que la simulación anterior pero con la modificación de la absorción de la madera.



7.2.1. Simulación fuente.



|       | 125   | 250   | 500   | 1k    | 2k    | 4k    |   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| EyrT  | 0,84  | 0,85  | 0,85  | 0,85  | 0,90  | 0,91  | s |
| EyrTg | 0,85  | 0,85  | 0,84  | 0,84  | 0,87  | 0,88  | s |
| SabT  | 0,98  | 0,99  | 0,97  | 0,97  | 0,99  | 0,97  | s |
| T-15  | 1,02  | 1,05  | 0,97  | 0,93  | 1,02  | 0,98  | s |
| T-30  | 1,06  | 1,07  | 1,01  | 1,00  | 1,06  | 1,02  | s |
| AbsC  | 22,98 | 22,73 | 22,74 | 22,57 | 20,79 | 18,64 | % |
| AbsCg | 22,89 | 22,67 | 22,81 | 22,76 | 21,46 | 19,34 | % |
| MFP   | 5,49  | 5,49  | 5,50  | 5,50  | 5,50  | 5,50  | m |
| Diffs | 24,68 | 29,99 | 35,02 | 40,63 | 45,84 | 50,78 | % |

Trunc 1000,0 ms  
 Rays 10088 (used/oct)  
 19 (lost/oct)  
 0 (absorbed/oct)  
 Angle 2,02 degrees

Figura 49: Simulación acondicionamiento fuente1.

|     | 125   | 250   | 500   | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| C80 | 2,8   | 2,6   | 3,2   | 3,5   | 2,8   | 3,2   | dB       |
| G   | 12,00 | 12,00 | 11,90 | 11,70 | 12,50 | 12,50 | dB       |
| EDT | 0,99  | 1,01  | 0,96  | 0,93  | 0,99  | 0,97  | Segundos |
| T15 | 1,02  | 1,05  | 0,97  | 0,91  | 0,98  | 1     | Segundos |

Tabla 21: Resultados simulación después del acondicionamiento en fuente 1.

| Frecuencia | 125   | 250   | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|----------|
| C80        | 2,8   | 3,9   | 5,3  | 5,1   | 2,6   | 2,9   | dB       |
| G          | 12,10 | 10,60 | 9,30 | 9,40  | 12,60 | 12,70 | dB       |
| EDT        | 0,99  | 0,87  | 0,74 | 0,76  | 1,04  | 1,02  | Segundos |
| T15        | 1,02  | 0,91  | 0,74 | 0,72  | 1,04  | 1,07  | Segundos |

Tabla 17: Resultados simulados fuente1.

7.2.2. Simulación fuente 2.

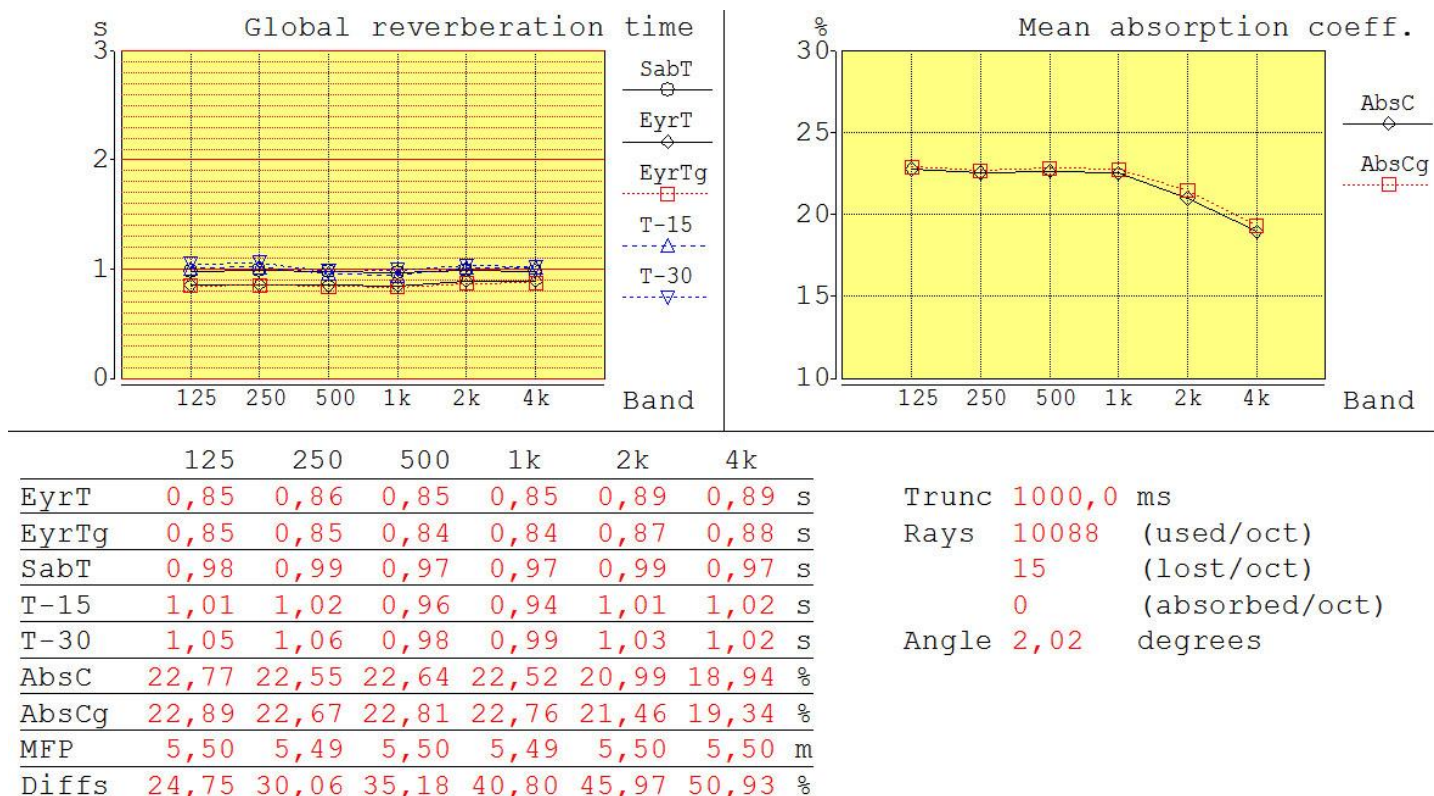


Figura 50: Simulación acondicionamiento fuente2.

|     | 125   | 250   | 500   | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| C80 | 3,20  | 2,80  | 3,20  | 3,50  | 2,90  | 2,80  | dB       |
| G   | 13,30 | 13,10 | 12,90 | 12,60 | 12,70 | 12,70 | dB       |
| EDT | 0,97  | 1,03  | 0,97  | 0,95  | 1,02  | 1,01  | Segundos |
| T15 | 1,01  | 1,04  | 0,97  | 0,98  | 1,02  | 0,97  | Segundos |

Tabla 22: Resultados simulación simulación después del acondicionamiento en fuente 2.

| Frecuencia | 125   | 250   | 500   | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| C80        | 3,00  | 4,30  | 5,70  | 5,40  | 2,70  | 2,60  | dB       |
| G          | 13,20 | 12,20 | 11,00 | 11,00 | 12,90 | 12,80 | dB       |
| EDT        | 1     | 0,86  | 0,73  | 0,76  | 1,03  | 1,06  | Segundos |
| T15        | 1,02  | 0,88  | 0,71  | 0,72  | 1     | 1,05  | Segundos |

Tabla 18: Resultados simulados fuente 2.

7.2.3. Simulación fuente 3.

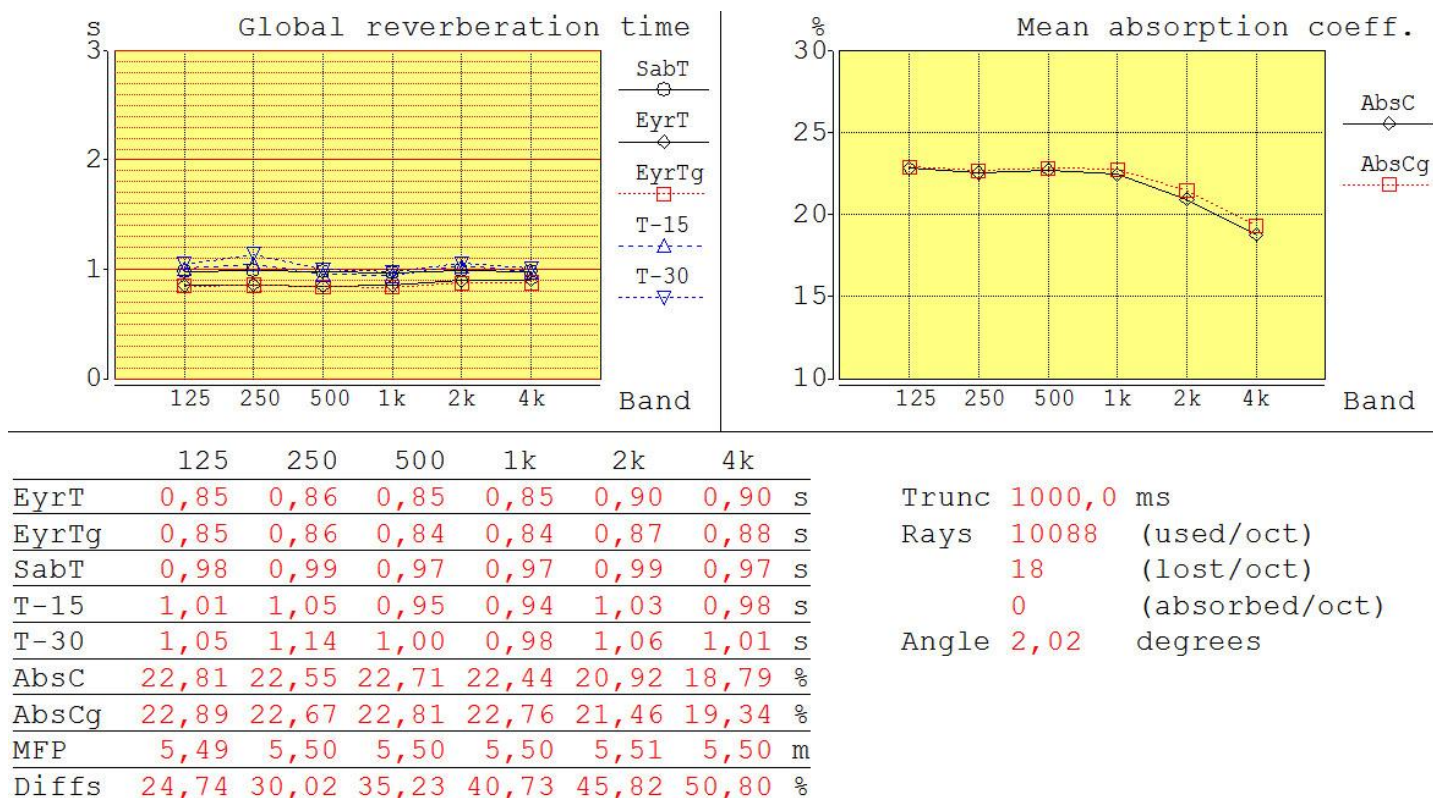


Figura 51: Simulación acondicionamiento fuente3.

|     | 125  | 250  | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|-----|------|------|------|-------|-------|-------|----------|
| C80 | 3,00 | 3,00 | 2,80 | 3,70  | 2,80  | 3,00  | dB       |
| G   | 12,8 | 12,8 | 12,3 | 12,5  | 12,5  | 12,4  | dB       |
| EDT | 0,97 | 1    | 0,98 | 0,92  | 1,02  | 1     | Segundos |
| T15 | 1,01 | 1,05 | 0,98 | 0,93  | 1,03  | 0,99  | Segundos |

Tabla 23: Resultados simulación simulación después del acondicionamiento en fuente 3.

| Frecuencia | 125   | 250   | 500  | 1.000 | 2.000 | 4.000 | Unidades |
|------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|----------|
| C80        | 2,8   | 3,9   | 5,3  | 5,1   | 2,6   | 2,9   | dB       |
| G          | 12,10 | 10,60 | 9,30 | 9,40  | 12,60 | 12,70 | dB       |
| EDT        | 0,99  | 0,87  | 0,74 | 0,76  | 1,04  | 1,02  | Segundos |
| T15        | 1,02  | 0,91  | 0,74 | 0,72  | 1,04  | 1,07  | Segundos |

Tabla 19: Resultados simulados fuente 3.

| Frecuencia        | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | Unidades |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|----------|
| EDT Acondicionado | 0,99 | 1,03 | 0,97 | 0,93 | 1,01 | 1,00 | Segundos |

Tabla 24: Resultados simulados con acondicionamiento.

Realizamos los cálculos de los parámetros relacionados con el tiempo de reverberación para los resultados obtenidos.

$$RT_{mid} = \frac{0,97s + 0,93s}{2} = 0,95 s \quad 1,6 < RT_{mid} < 1,8$$

$$BR = \frac{0,99s + 1,03s}{0,97s + 0,93s} = 1,06 \quad 1,10 \leq BR \leq 1,45$$

$$Br = \frac{1,01s + 1,0s}{0,97s + 0,93s} = 1,05 \quad Br \geq 0,87$$

Vemos en las representaciones gráficas la distribución de la sonoridad y del C80 a la frecuencia de 1Kz en la sala ensayada.

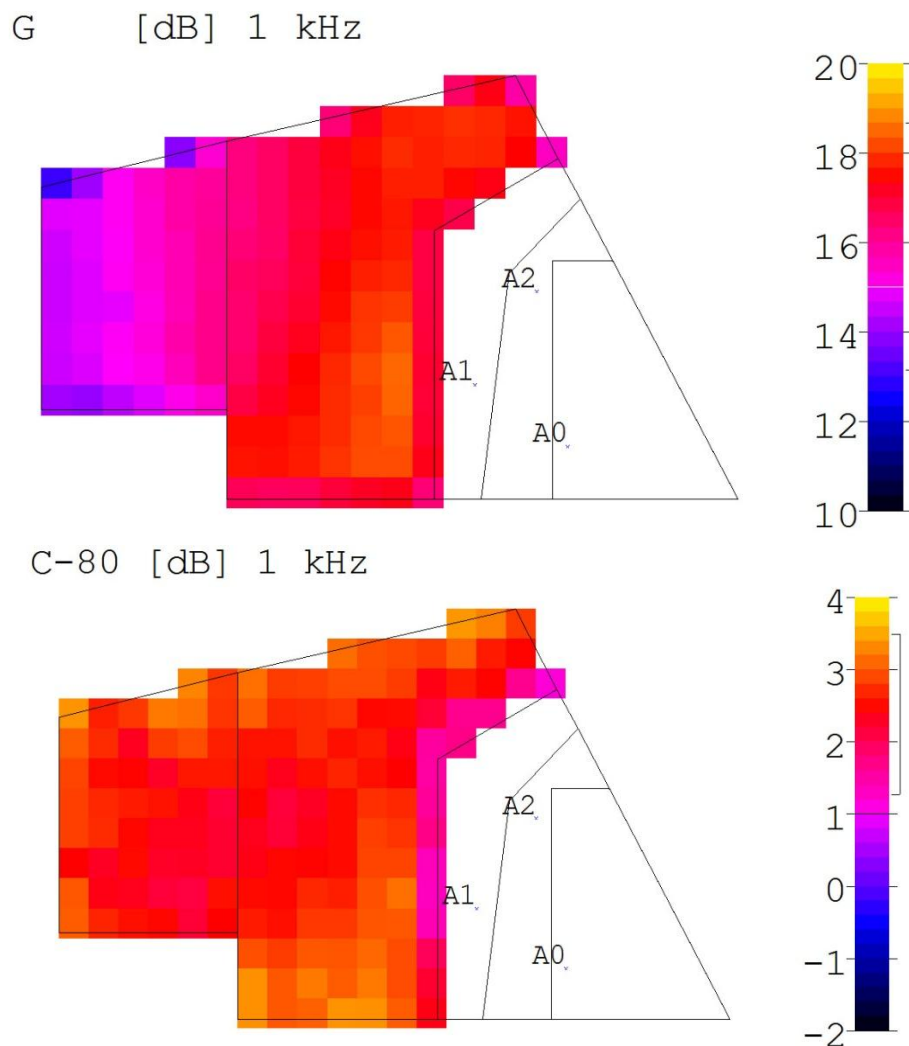
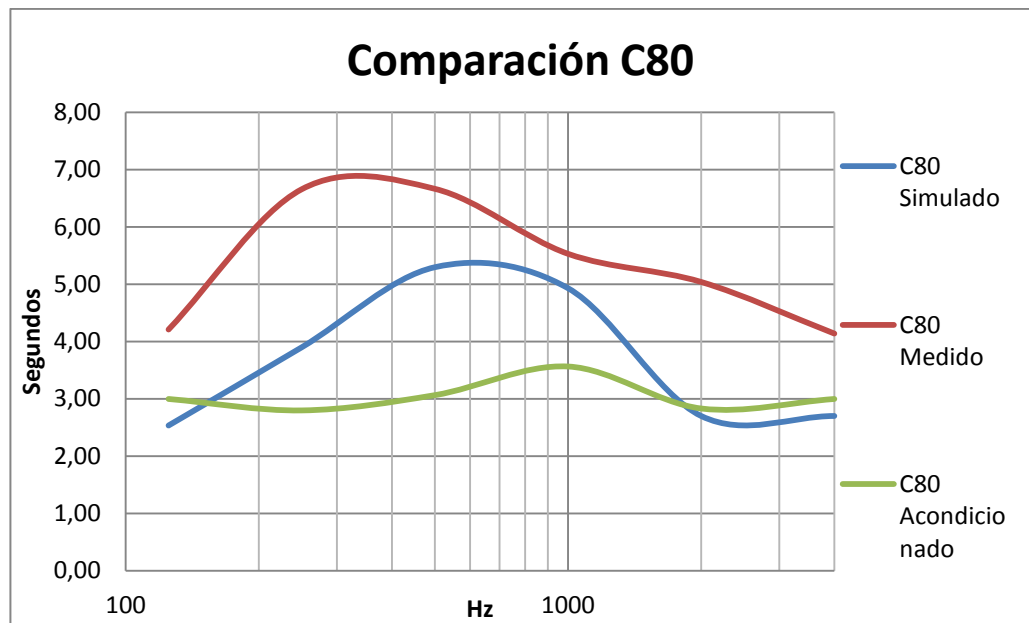


Figura 52: Simulación Resultados gráficos de simulación (G,C80)

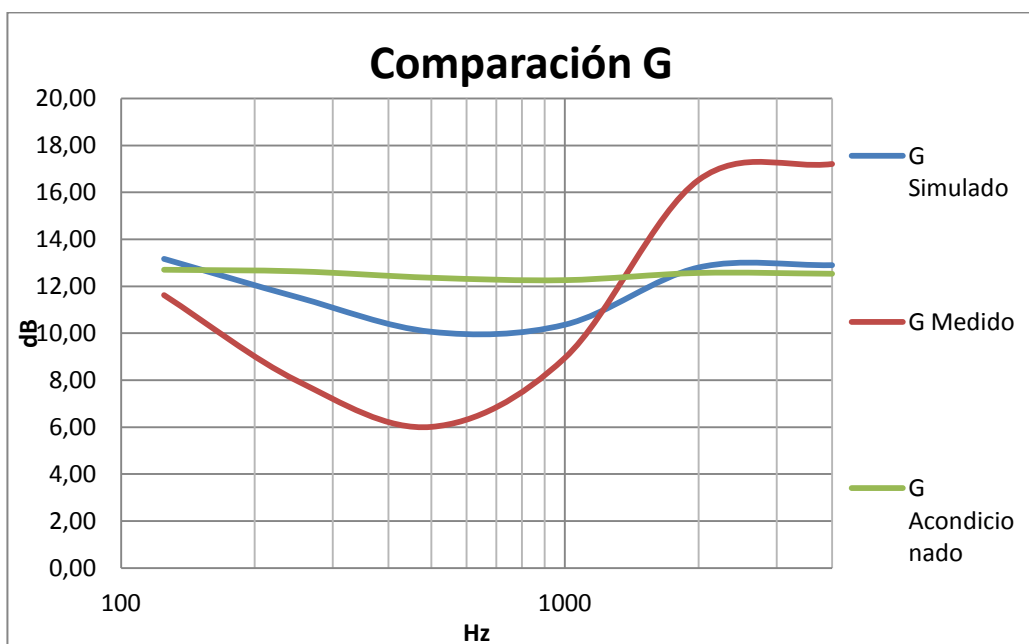
### 7.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS MEDIDOS, SIMULADOS Y ACONDICIONADOS

Una vez que tenemos todos los resultados, realizamos la comparación de los resultados según medidas tomadas in-situ, resultados simulados, y resultados simulados después del acondicionamiento.



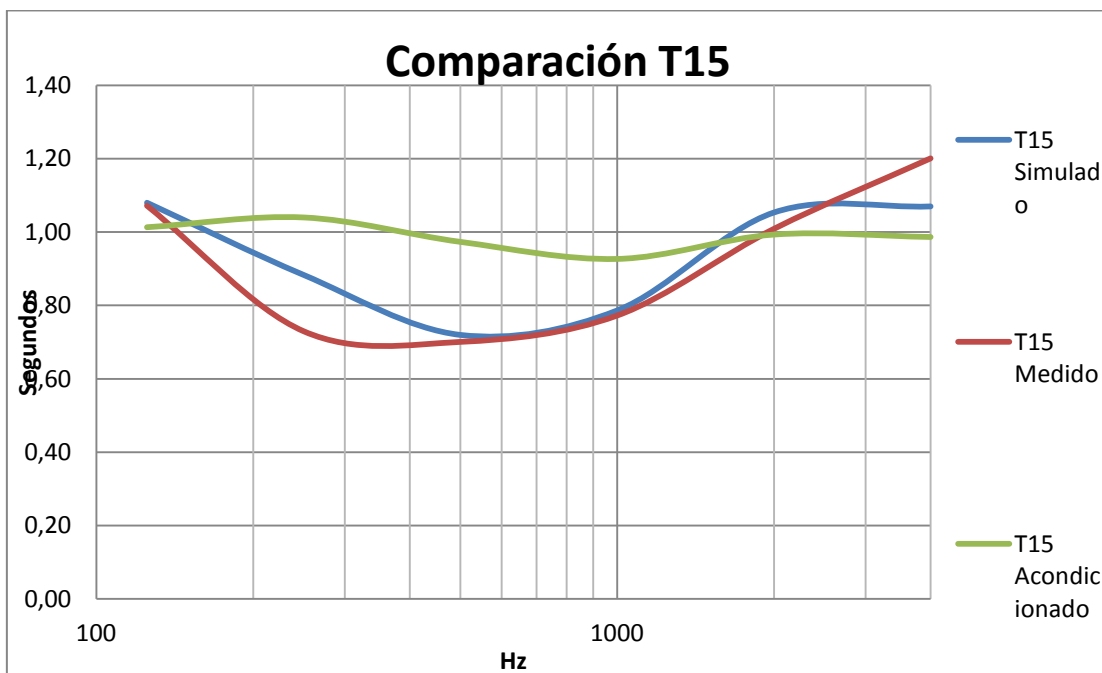
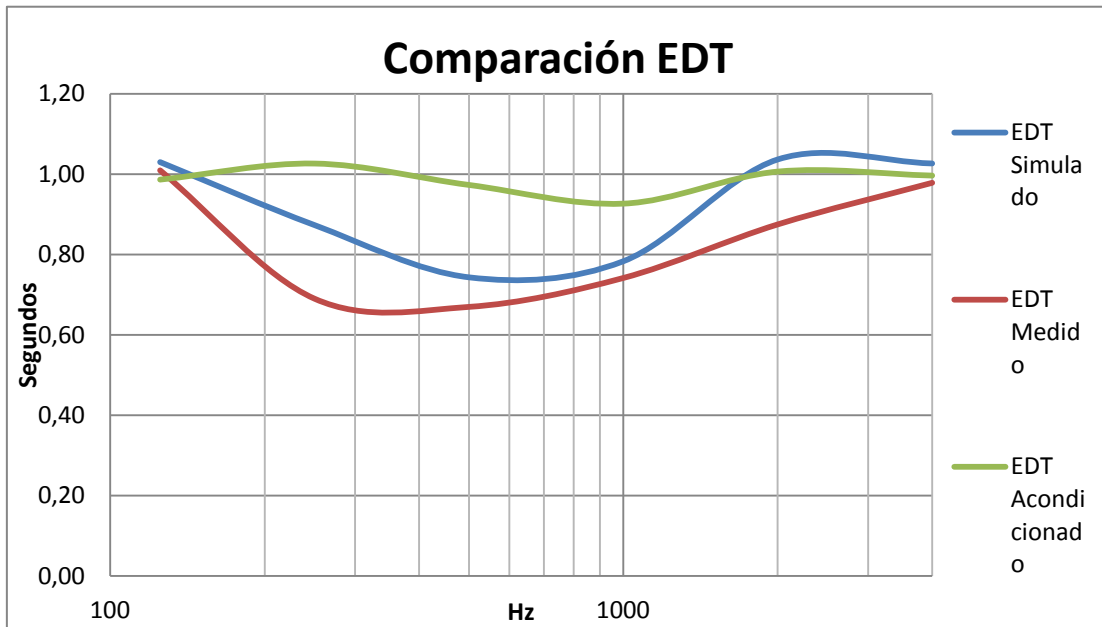
Gráfica 5: Comparación de resultados del C80.

Como vemos en la siguiente gráfica según la simulación el nivel de sonoridad se hace más estable para las distintas frecuencias, es decir que no hay frecuencias que resultan muy atenuadas y otras amplificadas.



Gráfica 6: Comparación de resultados de la sonoridad.

En las siguientes gráficas donde vemos la comparación del EDT y del T15 vemos como al sustituir la banda perimetral por una madera típica el comportamiento se acerca más al comportamiento típico y de disminuye considerablemente la atenuación que se sufría a frecuencias medias.



Gráfica 6: Comparación de resultados del EDT y T15.

## Conclusión

Tras haber realizados los ensayos pertinentes para obtener el tiempo de reverberación y los distintos parámetros a evaluar.

Vemos que el comportamiento de la sala es bastante atípico. Vemos una curva tonal donde las frecuencias medias son fuertemente atenuadas y las altas no, incluso llegan a ser suavemente amplificadas.

Al mismo tiempo vemos como el tiempo de reverberación no se ajusta a los parámetros que buscamos pero por el contrario los referidos a calor (BR) y brillo (Br) si que entran dentro de los parámetros ya que estos no dependen de el tiempo de reverberación a unas frecuencias sino a las relaciones entre el tiempo de reverberación en unas y otras frecuencias.

Después de hacer distintas comprobaciones en la sala se deduce que el comportamiento extraño es producido por la madera perimetral que se comporta como resonador a frecuencias medias, y que la madera de la tarima también afecta.

Realizamos la simulación con Catt-acoustic y ajustamos los parámetros al T-15 que son los parametros medidos in-situ más fiables ya que por un error en la toma de medidas no se obtuvo una buena relación señal a ruido y las señales tomadas una vez que habían caído mas de 20dB no se pueden considerar buenas porque había mucho ruido. De manera que una vez hecho esto se adopta la solución.

La solución pasa por sustituir la madera perimetral por una madera de comportamiento más natural y similar al de la madera, la curva tonal se hace más plana y más típica de una sala. Todavía queda un poco bajita a frecuencias medias ya que solo hemos modificado el parámetro de la banda perimetral. Dejando la tarima de encima del escenario talcual.

Volviendo al comportamiento de la madera seguramente esto es debido a que los materiales utilizados para hacer la banda perimetral no son de madera pura y son materiales más económicos sintéticos y no se comportan con madera tal y además al no estar bien sujetos a la pared entran en vibración y actúan como resonador. Porque estos están sujetos con varios listones a la pared pero no están lo suficiente para que no entrasen en vibración, ya que son materiales muy ligeros que enseguida entran en vibración.

Con el cambio del material simulado de la zona perimetral por madera y con su coeficiente de absorción típico vemos que los parámetros se hacen mas estables según la frecuencia, no varían exageradamente de unas frecuencias a otras. Sin dar cambios bruscos de resultados para distintas frecuencias.

De manera que según la simulación queda una sala que responde a todos los parámetros de una forma bastante similar para todas las frecuencias.

## Bibliografía

- Acondicionamiento acústico, Manuel Recuero López, PARANINFO, THOMSON EDITORES SPAIN PARANINFO S.A. 2001 MADRID
- Ingeniería acústica. Manuel Recuero López, PARANINFO. THOMSON EDITORES SPAIN PARANINFO S.A. 2000 MADRID
- Acústica arquitectónica y urbanística. Fco. Javier Sancho Vendrell, Jaime Llinares Galiana, Ana Llopis Renya. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. SERVICIO DE PUBLICACIONES, 1996 VALENCIA
- Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Antoni Carrión Isbert. EDICIONS UPC. EDICIONS DE LA UNIVERSITAT POLITÉCNICA DE CATALUNYA. SL. 1998 BARCELONA
- Manual del usuario del programa de medición Catt-acoustic