

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

# “Diseño y acondicionamiento acústico de la sala de grabación musical de Basic Productions en Valencia”

**TRABAJO FINAL DE CARRERA**

Autor/es:  
**Dídac Corbí Albella**

Director/es:  
**Rubén Picó Vila**

**GANDIA, 2013**

# Índice del Proyecto.

## 1. Objetivos

### 2. Principios del sonido.

2.1 Percepción del sonido en la frecuencia.

2.2 Medición del sonido.

2.2.1 Red de ponderación A y escala lineal.

2.3 Curvas NC.

2.4 Propagación sonora en una sala.

2.4.1 El sonido reflejado

2.4.2 Acústica geométrica, las primeras reflexiones.

2.4.3 Ecos.

2.4.4 Modos propios de una sala.

2.4.5 Campo directo y reverberante. Nivel total de presión sonora.

2.4.6 El tiempo de reverberación

2.4.7 Inteligibilidad de la palabra: %ALCons y STI/RASTI.

2.4.8 El tiempo de reverberación y la inteligibilidad.

### 3. Materiales utilizados en el acondicionamiento acústico de salas.

3.1 Introducción

3.2 Absorción del sonido

3.2.1 Absorción de los materiales constructivos rígidos.

3.2.2 Absorción del aire

3.2.3 Absorción de las superficies vibrantes.

3.2.4 Elementos absorbentes

3.2.5 Resonadores.

3.3 Difusión del sonido.

3.3.1 Difusores poli cilíndricos.

3.3.2 Difusores de Schroeder.

### 4. Diseño de una sala de grabación.

4.1 Tiempo de Reverberación deseado.

4.2 Materiales constructivos en techo, paredes y suelo. Absorción y características.

4.3 Elementos de acondicionamiento acústico.

### 5. Resultados.

5.1 Control de los modos propios: Ratios de la sala.

5.1.1 Simulación de modos propios a bajas frecuencias.

5.2 Acondicionamiento acústico de la sala de grabación.

5.2.1 Primera propuesta: Absorbente en el techo.

5.2.2 Segunda propuesta: Absorbente en techo y paredes.

5.2.3 Tercera propuesta: Absorbente en el techo y moqueta en las paredes.

5.3 Propuesta elegida: Absorbente en el techo y paredes.

### 6. Conclusiones.

Anexo 1

Anexo 2

Anexo 3

Bibliografía

Referencias

# 1. Objetivos

El objetivo de este proyecto es el estudio del comportamiento del sonido en recintos cerrados para después realizar con éxito el diseño y acondicionamiento de la sala de grabación de los estudios Basic Productions, ubicados en la Calle Arquitecto Juan Pérez 6, 46019 (Valencia).

Esta sala será utilizada para grabaciones musicales por lo que se tendrá en cuenta esto a la hora de valorar las condiciones acústicas más adecuadas para este.

Se considerará como objetivo principal el control del tiempo de reverberación para obtener uno adecuado al tipo de sala, así como lograr una distribución uniforme del nivel de presión sonora en la sala, variando las proporciones de la misma.

Como objetivo secundario se intentará lograr un buen resultado para el uso de la sala para la palabra, atendiendo especialmente al valor de inteligibilidad de la palabra STI.

Cabe destacar que las proporciones del recinto vienen limitadas por el tamaño del local donde se ubica el estudio y que esto conlleva ciertas restricciones a la hora de elegir las dimensiones, que deben aprovechar al máximo el espacio disponible a la vez que buscan obtener una distribución uniforme del nivel de presión sonora.

## 2. Principios del sonido.

### 2.1 Percepción del sonido en la frecuencia.

El ser humano tiene la capacidad de percibir el sonido en una banda de frecuencias determinada, en el caso de una persona joven con una condición auditiva normal, está comprendida entre los 20 Hz y los 20 KHz.

Es importante recalcar que nuestro oído no es igual de sensible para todas las frecuencias en este rango. En el anexo 1 podemos ver la figura 2.1 en la que se observa la diferencia de los umbrales de audición y de dolor dependiendo de la frecuencia.

Como podemos observar el oído es poco sensible a frecuencias bajas, es decir, para que un sonido grave tenga la misma sonoridad que uno en frecuencias medias, el sonido grave deberá tener un nivel sonoro mucho mayor. Un nivel de presión sonora = 70 dB, a 20 Hz, produce la misma sensación auditiva de nivel sonoro que un nivel de presión sonora = 5 dB, a 1 KHz.

De la gráfica también podemos deducir que el oído presenta cierta atenuación en altas frecuencias, cuando hay poco nivel sonoro. Sin embargo cuando el nivel aumenta, nuestro oído empieza a responder de forma más homogénea en todas las frecuencias audibles, y cuando la sonoridad es muy elevada, la sensación subjetiva de los tonos puros con distinta frecuencia es parecida.

Este estudio del comportamiento del oído en función del nivel sonoro explica porque al subir el volumen del equipo de música, se perciben mejor los graves y los agudos de la canción, motivo por el cual la masterización, se convierte en un proceso vital en la post-producción de un tema musical.

Una vez queda descrito el comportamiento del oído humano en este punto, es interesante realizar una comparación entre los niveles de recepción sonora a diferentes frecuencias y las zonas de generación sonora asociadas a la voz y a los instrumentos musicales.

Si vemos la figura 2.2 del anexo podremos apreciar que estamos mucho más capacitados para escuchar el sonido que para emitirlo.

### 2.2 Medición del sonido.

Es evidente que surge la necesidad de hacer acopio de un instrumento que permita medir el nivel sonoro en situaciones prefijadas, para que los resultados que se obtengan sean lo más objetivo posibles, dentro de unos márgenes. Este dispositivo es el sonómetro.

La función del sonómetro es la medición de niveles de presión sonora. Con el podemos realizar medidas globales, podemos hacerlo por bandas frecuenciales o también con distintas respuestas temporales.

Para reducir las diferencias entre las mediciones realizadas con sonómetros de diferentes marcas o modelos, existen unas normas internacionales que tienen que cumplir los fabricantes de estos instrumentos.

En Europa, las normas más representativas son las CEI. Las equivalentes en España son las normas UNE.

#### 2.2.1 Red de ponderación A y escala lineal.

Teniendo en consideración la sensibilidad auditiva del ser humano en las diferentes frecuencias, y el hecho de que esta no guarda una relación directa con la sonoridad objetiva del sonido en una escala

lineal, para que esta medida represente la sonoridad asociada real, equipos de medición llevan incorporada la red de ponderación A.

La figura 2.3 (Anexo 1) representa la curva de respuesta en frecuencia de la red de ponderación A. Se puede considerar que 1 KHz es la frecuencia de referencia, para frecuencias inferiores a esta hay una importante atenuación de nivel.

El nivel de presión sonora medido con la red de ponderación A se expresa en dBA.

## 2.3 Curvas NC.

Para evaluar el grado de molestia que provoca en un oyente cierto ruido ambiental, se realiza una comparación entre los niveles de ruido de fondo existentes para cada banda de octava entre 63 Hz y 8 KHz, con las curvas de referencia NC o Noise Criteria.

Estas curvas también se utilizan para establecer los niveles máximos de ruido Recomendados para diferentes tipos de recintos, dependiendo de la función de los mismos, como pueden ser; teatros, salas de conciertos, oficinas...

Una sala cumple con cierta curva NC solo cuando los niveles de ruido de fondo, en todas las bandas de octava en el rango entre 63Hz y 8kHz, están por debajo de esa curva NC.

Según observamos en la figura 2,4 que encontraremos en el anexo 1, estas curvas siguen aproximadamente la sensibilidad del oído en función de la frecuencia. Esto significa que, para cada curva NC, los niveles de presión permitidos a bajas frecuencias son mayores que los correspondientes a frecuencias altas, debido a que el oído es menos sensible frecuencias bajas.

Para poder verificar que se cumple una especificación NC, hay que analizar el ruido de fondo en el recinto por bandas de octava. Aunque, el nivel de ruido de fondo se puede representar también por el nivel global de presión sonora  $L_{eq}$  o  $L_A$  medidos en dBA. Y se podría comprobar que, a partir de la curva NC-35, este nivel estará unos 10 dB por encima del valor correspondiente de la curva NC.

Tipo de recinto	Curva NC recomendada	Equivalencia en dBA.
Estudios de grabación	15	28
Salas de conciertos y teatros	15 - 25	28 - 38
Salas de conferencias/Aulas	20 - 30	33 - 42

Tabla 2.1 Tipos de recintos y Curvas NC

Por tanto la medida del nivel global resulta una forma aproximada de cálculo de la curva NC de una sala si no disponemos de un sonómetro con análisis frecuencial. En la tabla 2.1 expuesta se muestran las diferentes curvas NC aconsejadas para los distintos tipos de recintos, y su equivalencia en dBA. [2,3,4]

## 2.4 Propagación sonora en una sala.

Cuando una fuente sonora emite una onda en una sala, el oyente recibe dicha onda de dos formas distintas: Una es el sonido directo procedente del oyente tal y como se daría en la propagación en espacio abierto, y otra es el sonido reflejado, que consiste en la suma de las reflexiones de la onda sonora que rebotan en las superficies de la sala y llegan al receptor.

Mientras que el nivel de presión sonora asociada al sonido directo solamente depende de la distancia a la fuente, la correspondiente al sonido reflejado depende de la forma de la sala y la posición del emisor y el oyente, que definirán el camino que recorrerá el rayo sonoro. También entraran en juego los materiales de la sala, siendo determinante la absorción, difusión y otras características acústicas. Evidentemente cuanto mayor sea la absorción de los materiales así como la distancia recorrida por el rayo, menor será la energía sonora que percibirá el oyente de esta contribución.

### **2.4.1 El sonido reflejado**

Si analizamos la respuesta temporal del sonido reflejado dentro de un recinto podemos rápidamente diferenciar las primeras reflexiones, que se analizan con el cálculo de rayos, de las reflexiones tardías, que se analizan con el cálculo estadístico.

Las primeras reflexiones llegan al oyente de forma más irregular y puntual, al tratarse de reflexiones de orden bajo que han rebotado en, por lo general, menos de 3 superficies antes de llegar al receptor

Normalmente se delimita temporalmente las primeras reflexiones a 100ms después de la llegada del sonido directo, si bien esto puede variar dependiendo del tamaño y forma de la sala, es una forma práctica de acotar los cálculos.

La representación visual de las reflexiones se llama ecograma, podemos ver la figura 2.5 del anexo 1 donde se expone, así como también un esquema con los diferentes rayos sonoros del sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías. Podemos apreciar la evolución temporal de las reflexiones así como su nivel de presión sonora.

En una sala la forma más sencilla de lograr esta representación es produciendo un sonido fuerte y corto, como un golpe seco. Actualmente hay equipos de medida con técnicas TDS ("Time Delay Spectrometry") y MLS ("Maximum Length Sequence") con los que podemos obtener el ecograma o la curva ETC ("Energy-Time Curve"), con una precisión superior.

Si realizamos el análisis de esta curva en diferentes puntos de la sala podemos obtener mucha información sobre las características acústicas de la misma.

### **2.4.2 Acústica geométrica, las primeras reflexiones.**

Normalmente las reflexiones tempranas tienen un nivel de presión sonora más elevado que las contribuciones tardías, esto es debido a que tienen un orden más bajo, y se ven menos afectadas por la absorción de las superficies así como la atenuación de la onda por la distancia recorrida.

Estas primeras reflexiones son muy importantes, dependen de la forma de la sala y son diferentes en cada punto de la misma, por lo que serán las que mayormente definirán las características de la sala junto con el sonido directo.

Teóricamente para calcular el ecograma en un punto concreto de la sala debemos tratar los rayos sonoros como si de rayos de luz se tratase, considerando que las reflexiones sobre las superficies son especulares, por lo que verifican la ley de la reflexión.

La acústica geométrica está basada en esta hipótesis de reflexiones especulares, si bien cabe destacar que se trata de una aproximación, ya que solamente normalmente la reflexión especular no se da en su totalidad.

Se deben cumplir ciertas condiciones del recinto para que, en la práctica, haya una reflexión especular.

- Superficie poco reflectante y lisa.
- Grandes dimensiones (en comparación con la longitud de onda a analizar).

Si las dimensiones son iguales o menores a la longitud de onda que queremos analizar se produce difracción, debido a que la onda rodea la superficie y continúa propagándose.

En el caso de que la superficie tenga rugosidades de tamaño similar a la longitud de onda, se produce difusión, al haber una reflexión en múltiples direcciones.

Existen programas informáticos avanzados que tienen en consideración estos factores y consiguen una estimación más cercana a la que obtendríamos con una medición "in situ".

El estudio de las reflexiones tardías se realiza con la llamada acústica estadística, debido a que hay una gran concentración de reflexiones que aumenta temporalmente de forma cuadrática.

### **2.4.3 Ecos.**

El ser humano interpreta las reflexiones tempranas (hasta 50ms) como una extensión del sonido real, por lo que el cerebro no distingue estas reflexiones con el sonido directo. Este efecto es la ya mencionada reverberación, o cola reverberante.

De hecho, cuando se trata del habla, estas reflexiones ayudan a mejorar la inteligibilidad de la palabra y aumentan la sonoridad del mensaje.

En el caso de que el oyente escuche una reflexión a un volumen elevado con un retraso superior a los 50ms, el oído humano lo detectara como un sonido distinto, lo que afectara de forma muy negativa a la inteligibilidad del mensaje.

### **2.4.4 Modos propios de una sala.**

En una sala real, las ondas incidentes y reflejadas se combinan dando lugar a interferencias, algunas de ellas constructivas y otras destructivas, lo que genera ondas estacionarias, también denominadas "modos propios".

Los modos propios van asociados a una determinada frecuencia, que tiene cierta sonoridad según el punto de análisis. Gracias a la acústica ondulatoria, geométrica y estadística podemos realizar un estudio de los modos propios para analizar el comportamiento sonoro de cualquier sala.

Existen modos axiales, tangenciales y oblicuos y, aunque la cantidad de modos propios es ilimitada, su distribución en el eje frecuencial no lo es, y aumenta su densidad junto con la frecuencia.

La combinación de los modos propios provoca concentraciones puntuales de energía en ciertas frecuencias lo que conlleva aumentos de sonoridad en las frecuencias donde se acumulan más modos propios, cambiando la respuesta en frecuencia de la sala, lo que se denomina "Coloración". Esto es especialmente notable y molesto en salas pequeñas y a bajas frecuencias.

Ya que los modos propios son inevitables, la clave para la solución del problema es elegir unas dimensiones adecuadas para que la distribución de los modos sea relativamente uniforme. Esto se puede combinar con el tratamiento acústico de la sala

### **2.4.5 Campo directo y reverberante. Nivel total de presión sonora.**

Basándonos en la teoría estadística, la sonoridad total en un recinto será la suma del campo reverberado, que será constante en cualquier punto, y el sonido directo, que dependerá del punto en el que se ubique el oyente.

La componente directa disminuirá a medida que el oyente se aleja de la fuente y sin embargo, como ya hemos dicho antes, el campo reverberado se mantiene constante. Esta hipótesis de que el sonido reflejado es constante en cualquier punto se basa en la teoría estadística, que trata todas las reflexiones por igual, dando lugar a resultados poco exactos pero utilizando cálculos sencillos.

Se podrían delimitar dos zonas de la sala, una donde existe una predominancia del sonido reflejado y otra donde lo hace el sonido directo, la primera estará ubicada en la zona más alejada de la fuente y la segunda en la más cercana.

El nivel de sonido directo aumentará en 6dB cada vez que se acorte a la mitad la distancia a la fuente, los puntos donde predomine el sonido directo se asemejarán a una situación en espacio abierto.

Por otro lado los puntos donde predomine el campo reverberado serán los más alejados a la fuente y delimitarán una zona donde el nivel de presión sonora es constante.

En la figura 2.6 del anexo 1 podemos apreciar los niveles de sonido directo (LD) y sonido reflejado (LR), así como la curva de nivel total y el punto de inflexión de la misma.

### **2.4.6 El tiempo de reverberación.**

Para poder medir de forma efectiva el tiempo de reverberación de una sala, este se define como el tiempo que transcurre desde que el sonido se detiene hasta que el nivel de presión sonora cae 60 dB.

Cabe destacar que dicho tiempo de reverberación es distinto a cada frecuencia por lo que dicha medición deberá hacerse a diferentes frecuencias para obtener una medición adecuada, si bien en muchas ocasiones se hace la medición una frecuencia de referencia que suele ser 1 KHz. El tiempo de reverberación tiende a disminuir con la frecuencia, esto es debido a que los materiales (y el propio aire) tienen mayor absorción a frecuencias altas que a bajas.

Una sala con un tiempo de reverberación reducido se suele llamar una sala "sorda", como puede ser un estudio de grabación, por el contrario a un recinto con un tiempo de reverberación elevado se le pone el nombre de "vivo".

### **2.4.7 Inteligibilidad de la palabra: %ALCons y STI/RASTI.**

La comprensión de un mensaje oral depende principalmente de la interpretación correcta de las consonantes, y la inteligibilidad de la palabra se verá afectada (y por tanto la calidad acústica de la sala) tendrán parámetros distintos con el caso de una preparación acústica para fines musicales. Algunos fenómenos como el eco afectan negativamente en ambos casos.

En este apartado vamos a tratar el trabajo del investigador holandés V.M.A Peutz que inventó una fórmula para el cálculo de la inteligibilidad en una sala.

Su trabajo empezó con una serie de pruebas de audiencia donde realizó mediciones subjetivas y las analizó estadísticamente, para comprobar que porcentaje de pérdida de consonantes había en cada sala. Este porcentaje lo llamó %ALCons ("Articulation Loss of Consonants"). Lógicamente cuanto mayor es el valor, peor será el grado de inteligibilidad del recinto.

Una vez realizadas las mediciones y el análisis estadístico trabajó en una ley matemática a partir de los parámetros acústicos de los recintos analizados para ver la correlación que había entre dichos parámetros y las mediciones realizadas. Esta ley supone un gran avance en la construcción de recintos para la palabra, ya que nos permiten saber el grado de inteligibilidad de una sala (incluso en determinados puntos) antes de construirla.

Más adelante, gracias a la teoría estadística, Peutz consiguió hallar la forma de obtener el valor de %ALCons en un punto determinado de una sala solamente a partir del tiempo de reverberación y de la diferencia de niveles de presión sonora entre el campo reverberado y el campo directo.

En el anexo se presenta dicha ley de forma gráfica en la figura 2.7. %ALCons se obtiene a partir de de la diferencia de niveles LD-LR y el tiempo de reverberación. También podemos ver la tabla 2.1 donde se comparan los valores de %ALCons y STI con valores subjetivos.

## **2.4.8 El tiempo de reverberación y la inteligibilidad.**

Cuanto más tiempo de reverberación hay en una sala tenemos menos inteligibilidad de la palabra, ¿A que es debido esto?

Al hablar, las vocales tienen una duración y una sonoridad mayor que las consonantes, al mismo tiempo estas son más graves en comparación con las consonantes que son más agudas, por lo que una sala con mucha reverberación potenciará la duración (y por tanto el nivel sonoro) de las vocales, ya que, como hemos comentado antes, el tiempo de reverberación en frecuencias altas es menor que en frecuencias bajas.

Esto genera un conflicto debido a que la vocal, al prolongar su duración, se solapa temporalmente con la consonante que la sigue, por lo que esta simultaneidad junto con la diferencia de niveles y la diferencia espectral en frecuencia provoca un enmascaramiento de la consonante y dificulta su entendimiento.

En resumen, el grado de inteligibilidad de una sala depende primordialmente de la correcta percepción de las consonantes, por lo que el enmascaramiento provocado por una reverberación elevada resulta en detrimento de la calidad para la palabra de la sala.[3,6,7]

## **3. Materiales utilizados en el acondicionamiento acústico de salas.**

### **3.1 Introducción.**

Una vez se han definido las dimensiones de un recinto, uno de los principales responsables del sonido en una sala son los materiales elegidos para cubrir su superficie, que definirán en gran medida el tiempo de reverberación, así como otros parámetros como la difusión. La buena elección de estos materiales decidirá el éxito o fracaso en el diseño acústico de la sala.

En algunos casos, como en auditorios o salas de conciertos, además se deben estudiar las primeras reflexiones para obtener una buena difusión del sonido.

A lo largo de este tema se tratarán distintos materiales y elementos acústicos para el tratamiento de recintos, para lograr diferentes efectos deseados como son:

- La absorción del sonido que se consigue colocando materiales absorbentes en las paredes y techo, así como resonadores de bajas frecuencias.
- La difusión de sonido utilizando difusores para dividir de forma equitativa el sonido en muchas direcciones.
- La reflexión del sonido a la zona del público utilizando reflectores suele ser un recurso en salas de conciertos para aumentar la sonoridad en determinadas zonas.

### **3.2 Absorción del sonido.**

En una sala, la reducción de la presión sonora, ya sea en su propagación por el aire como al impactar en las superficies del recinto, es primordial para la calidad acústica de este. Esta reducción viene dada por los siguientes elementos.

- Los materiales absorbentes y resonadores.
- Las superficies que pueden vibrar, como los muebles, puertas, ventanas, etc.
- El aire
- Los elementos constructivos rígidos no porosos como las paredes o techo.

En el caso de salas de conciertos habría que añadir el público y las sillas, que serían de hecho el factor que provocaría mayor reducción sonora.

Es difícil determinar la absorción real que causarán los elementos absorbentes en una sala por construir, ya que no solamente dependen de sus propias características, sino que otros condicionantes, como el elemento constructivo donde se sitúa el material absorbente, afectan a su rendimiento.

#### **3.2.1 Absorción de los elementos constructivos rígidos.**

Los materiales constructivos son normalmente muy rígidos y con una porosidad muy baja, ambas características hacen que sean superficies con una absorción ínfima, por lo que si en una sala no hubiera ningún elemento absorbente o vibrante la reverberación sería muy alta. Esto es lo que ocurre por ejemplo en las cámaras reverberantes, normalmente con paredes de hormigón y sin ningún elemento absorbente, que permiten lograr tiempos de reverberación elevados.

En la tabla abajo expuesta podemos ver los coeficientes de absorción a diferentes frecuencias de los materiales más utilizados en la construcción. Como podemos ver estos son muy bajos, el material con más coeficiente de absorción es el pladur pintado, al ser el menos rígido de todos ellos y con una ligera porosidad.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Pladur	0.29	0.1	0.06	0.05	0.04	0.04
Hormigón pintado	0.1	0.05	0.06	0.07	0.09	0.08
Hormigón macizo	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04
Ladrillo enyesado	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04

Tabla 3.1 Absorción de materiales constructivos

### 3.2.2 Absorción del aire.

Habitualmente la absorción del aire es despreciada en salas pequeñas o medianas ya que el efecto que tiene es mínimo. Solo se considera para recintos de gran tamaño, a altas frecuencias (desde 2Khz) y con una humedad relativa muy baja (menor del 20%).

Gracias a la formula de Sabine completa podemos conocer el tiempo de reverberación para determinada frecuencia, conociendo la absorción del aire y el volumen de la sala.

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

### 3.2.3 Absorción de las superficies vibrantes.

Los elementos que pueden vibrar con el sonido como las puertas, ventanas, mobiliario fijado en las paredes, etc., conllevan cierta absorción que hay que tener en consideración.

Los elementos absorbentes normales la absorción se realiza mediante la disipación de energía, convirtiendo el sonido en calor, sin embargo cuando se trata una superficie vibrante cierta cantidad de esta energía pasa al exterior del recinto.

Se podría considerar que una ventana o una puerta abierta es un absorbente ya que en realidad la onda sonora que sale por la ventana no vuelve al recinto y el resultado equivalente es al de una absorción total. La expresión matemática del coeficiente de absorción de superficies vibrantes para una determinada frecuencia es la siguiente:

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

Esta fórmula es en realidad una aproximación que solo tiene validez cuando el denominador tiene un valor alto en comparación con el numerador. Si nos fijamos en la expresión, solo podemos obtener una expresión relativamente significativa en las bajas frecuencias ya que cuando la frecuencia aumente, el denominador también lo hará y por tanto el valor de la absorción será menor.

Cabe destacar que, cuando una pared vibra, aunque esto es beneficioso en términos de acondicionamiento acústico, esto puede suponer una pérdida del aislamiento acústico con el exterior.

### 3.2.4 Elementos absorbentes.

En este apartado hablaré de los elementos absorbentes comunes, existen absorbentes de determinadas frecuencias o rangos de frecuencias, llamados resonadores, que trataré más adelante.

La cantidad de absorción producida por la disipación de energía que provocan los diferentes elementos absorbentes, colocados en las superficies del recinto dependerá de diferentes factores, como la frecuencia y las características o diseño del material absorbente. Cada material tiene su grado de absorción en función de la frecuencia, que variará en gran medida entre unos y otros.

Por tanto, la selección del material absorbente así como su ubicación en el recinto serán claves para conseguir la acústica deseada. Normalmente la función principal de estos materiales es:

- Controlar el tiempo de reverberación
- Eliminación de ecos y resonancias.
- Reducir el nivel del campo reverberante en lugares ruidosos (bares, comercios, etc.).

Cabe destacar que en algunas ocasiones el coeficiente de absorción  $\alpha$  puede ser superior a 1, esto no significa que la energía absorbida es mayor que la incidente, lo cual no tiene sentido físico, sino que es debido a que la superficie efectiva del material es superior a la superficie real, debido a las formas que este tiene (formas de pequeñas pirámides por ejemplo).

El funcionamiento de estos elementos absorbentes es sencillo, estos se diseñan de manera que su superficie tiene muchos hendiduras o "canales" por donde las ondas sonoras entran impactando repetidas veces sobre las superficies de los mismos. La absorción se produce por dicho rozamiento transformando la energía sonora en calor, cuantos más hendiduras haya y más profundas sean mayor será la absorción. La absorción obtenida lógicamente también depende de la propia porosidad del material y sus características

Cuando incide en el material, parte de la onda sonora es reflejada y la otra entra en el material, se atenúa hasta llegar al final de la hendidura, después se refleja y vuelve a atenuarse mientras sale de la hendidura.

Este comportamiento del sonido sobre los materiales de estas características es igual en cualquier material poroso, aunque en menor medida, es por esto que a su vez estos elementos absorbentes también son muy porosos al mismo tiempo que tienen suficiente compacidad.

Normalmente este tipo de elementos acústicos están fabricados de los siguientes materiales:

- Lana de roca
- Lana de vidrio
- Espuma a base de resina de melanina
- Espuma de poliuretano

En el anexo 2 se pueden ver unas fotografías de diferentes elementos absorbentes fabricados con los distintos materiales mencionados (Figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5).

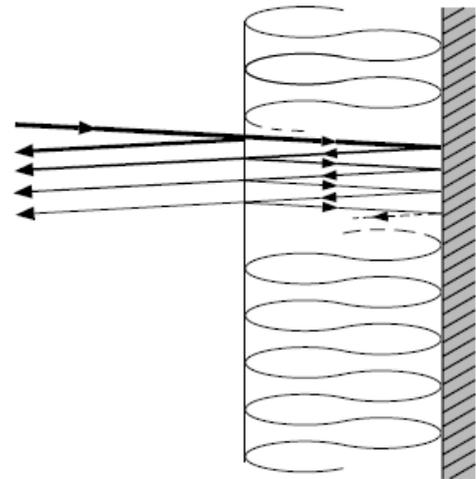


Fig 3.1 Diseño de un elemento absorbente

### 3.2.5 Resonadores.

Los elementos absorbentes normales colocados en las superficies del recinto tienen una absorción muy pequeña a bajas frecuencias, y aunque separándolos de la pared se obtiene un rendimiento un poco mejor en estas frecuencias, normalmente estos absorbentes se combinan con los resonadores, para obtener una absorción más elevada en estas frecuencias.

Los resonadores (o también llamados absorbentes selectivos) tienen la capacidad de reducir ciertas frecuencias concretas con mayor eficiencia, tienen una o varias frecuencias de resonancia a las cuales actúan, por lo que la absorción de dicho material tiene un valor máximo a dichas frecuencias. Los resonadores se utilizan principalmente para reducir el tiempo de reverberación en frecuencias bajas, ya que los elementos absorbentes normales no son capaces de obtener valores altos de absorción a estas frecuencias.

Si bien los resonadores se pueden colocar de forma independiente, normalmente son un complemento de los elementos absorbentes.

Principalmente hay cuatro tipos de resonadores:

- De membrana o diafragmático
- De cavidad simple (Helmholtz)
- De cavidad múltiple (Helmholtz) a base de paneles perforados o ranurados
- De cavidad múltiple (Helmholtz) a base de listones.

### 3.3 Difusión del sonido.

La difusión del sonido en un recinto cerrado se consigue con elementos difusores, que están especialmente diseñados para esta función. Al incidir la onda sobre ellos estos la dispersan en muchas direcciones distintas de forma uniforme.

En la figura 3.6 del anexo 2 se puede ver cómo reacciona una onda incidente cuando impacta en los diferentes tipos de materiales: Un elemento absorbente, un material reflectante y un difusor.

En el caso del elemento absorbente, la energía reflejada es considerablemente menor a la incidente. Cuando la onda incide en el material reflectante, se puede observar que prácticamente toda la energía que incide se refleja. Por último, cuando la onda acústica incide en el difusor, la energía reflejada es considerable y se distribuye uniformemente en todas las direcciones posibles.

Una difusión del sonido adecuada es importante principalmente en salas de conciertos, aunque también lo es en los estudios de grabación, principalmente en las salas de escucha, en la parte trasera de la sala.

#### 3.3.1 Difusores poli cilíndricos.

Los difusores poli cilíndricos son un conjunto de superficies planas, normalmente de madera, que tienen una forma convexa que están colocadas secuencialmente, y tienen un radio de curvatura menor de 5 metros.

Si este radio fuera superior a 5 metros el material ya no actuaría como difusor sino como reflector, por el contrario si este es inferior a 5 metros el sonido reflejado ya no está concentrado debido a que la zona de cobertura aumenta. Se puede ver el diseño en la figura 3.7 del anexo 2.

### 3.3.2 Difusores de Schroeder

Los difusores de Schroeder son difusores selectivos que actúan solo en un rango de frecuencias concretas. Se basan en la teoría de Manfred R.Schroeder. y en diferentes secuencias matemáticas, son llaman RPG.

Los diferentes tipos de difusores RPG más importantes son:

- Los difusores MLS
- Los difusores QRD
- Los difusores PRD [1,2,3]

## 4. Diseño de una sala de grabación.

### 4.1. Tiempo de Reverberación deseado.

El tiempo de reverberación adecuado en una sala depende de muchos factores, lo más importante a considerar es el uso que se le va a dar a la misma. En nuestro caso se trata de una sala de grabación con muchos propósitos diferentes (grabación de voces, percusión, instrumentos de viento, de cuerda, etc.), es decir una sala de grabación que es principalmente para la música pero también para la palabra. La solución óptima debería ser un tiempo de reverberación intermedio pero, ¿Cuál sería el tiempo de reverberación ideal para cada caso?

Hay muchos estudios acerca de este tema, sobre todo para auditorios y salas de conciertos. Hemos leído los diferentes estudios y vamos ahora a analizar cuál sería, según estos estudios, un tiempo de reverberación óptimo en nuestra sala. Cabe recordar que el tiempo de reverberación ideal de una sala es un valor subjetivo a juicio del oyente, y hay muchos estudios con propuestas diferentes acerca de este tema.

Según unos estudios de la BBC en el libro "Guide to acoustic practice", el tiempo de reverberación típico de los estudios de grabación, según el volumen de la sala, serían los indicados según la gráfica de la figura 4.1.1

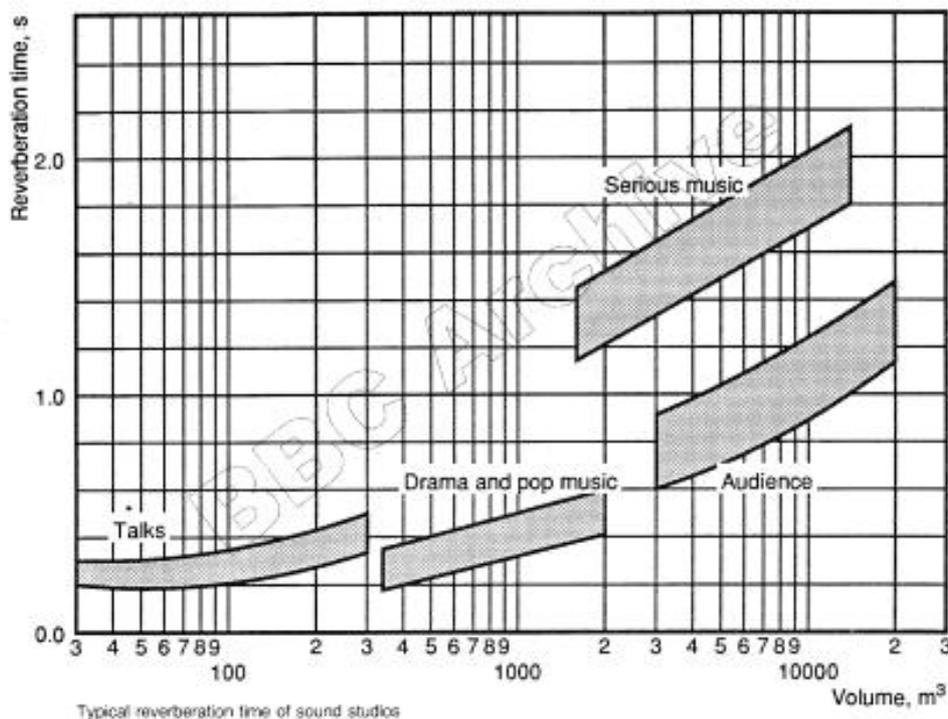


Fig. 4.1.1 Estudio del tiempo de reverberación deseado realizado por la BBC.

Ya que nuestra sala será de un volumen que rondará los 100m<sup>3</sup>, según este estudio nuestra sala debería tener un tiempo de reverberación aproximadamente entre 0,2 y 0,35 segundos suponiendo que nuestra sala estuviera destinada a grabación de voces.

Ya que por regla general una sala dedicada a la voz requiere un tiempo de reverberación menor que una sala destinada a la música, y nuestro objetivo principal es conseguir una buena respuesta para las grabaciones musicales, posiblemente sería un buen valor el límite superior de esta gráfica, es decir 0,35 segundos.

Antes de precipitarnos y tomar una decisión acerca del tiempo de reverberación adecuado para nuestra sala, que afectara a la construcción y a la elección de los materiales que conformarán el acabado en nuestra sala de grabación, vamos a analizar otros estudios, para comparar gráficas y concluir lo que podría ser un buen tiempo de reverberación para nuestra sala de grabación.

Otro estudio que consideramos interesante, es el realizado por L.L Beranek, en el que analiza el tiempo de reverberación óptimo en función del volumen de una sala, para habitaciones con diferentes propósitos. En la gráfica de la figura 4.1.2 podemos observar los tiempos de reverberación óptimos según L.L Beranek.

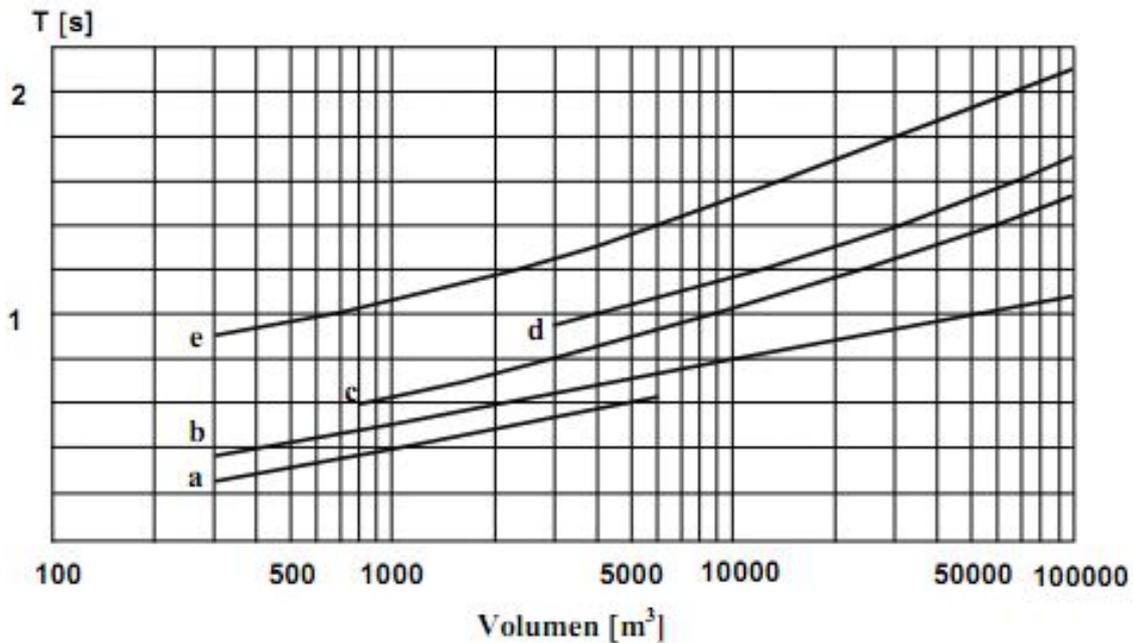


Fig. 4.1.2 Tiempos de reverberación óptimos en función del volumen de la sala. (a) Estudios de radiodifusión para voz. (b) Salas de conferencias (c) Estudios de radiodifusión para música (d) Salas de conciertos (e) Iglesias.

Nuestro caso podría considerarse bastante similar a un estudio de radiodifusión para música, ya que las necesidades de esos estudios para captar la música serán similares a las nuestras.

Desgraciadamente los estudios realizados por L.L Beranek son para salas de un tamaño mucho mayor a las nuestras y lo único que podemos obtener es una estimación siguiendo las curvas que él propone hasta llegar a los 100m<sup>3</sup>. Realizando esta aproximación podemos ver la gráfica que quedaría (Fig. 4.1.3).

Por lo que, según esta aproximación, nuestro tiempo de reverberación óptimo para una sala de grabación de voz y música estaría en un punto intermedio entre 0,18 y 0,36 segundos.

Comparando esta aproximación del estudio de L.L. Beranek y los estudios realizados por la BBC para estudios de grabación de voz podríamos concluir que un tiempo de reverberación óptimo para nuestra sala de grabación podría estar entre 0,30 y 0,35 segundos. Teniendo en consideración que nuestra sala será una sala de grabación mixta.

Por último podríamos destacar que una opción interesante sería acondicionar la sala con un tiempo de reverberación ligeramente superior al propuesto, para finalmente ajustar el tiempo de reverberación de la sala con paneles absorbentes. Ya que, si con la construcción y materiales propuestos, finalmente la sala resultara demasiado sorda, no resultaría viable deshacer el acondicionamiento realizado.[5,8]

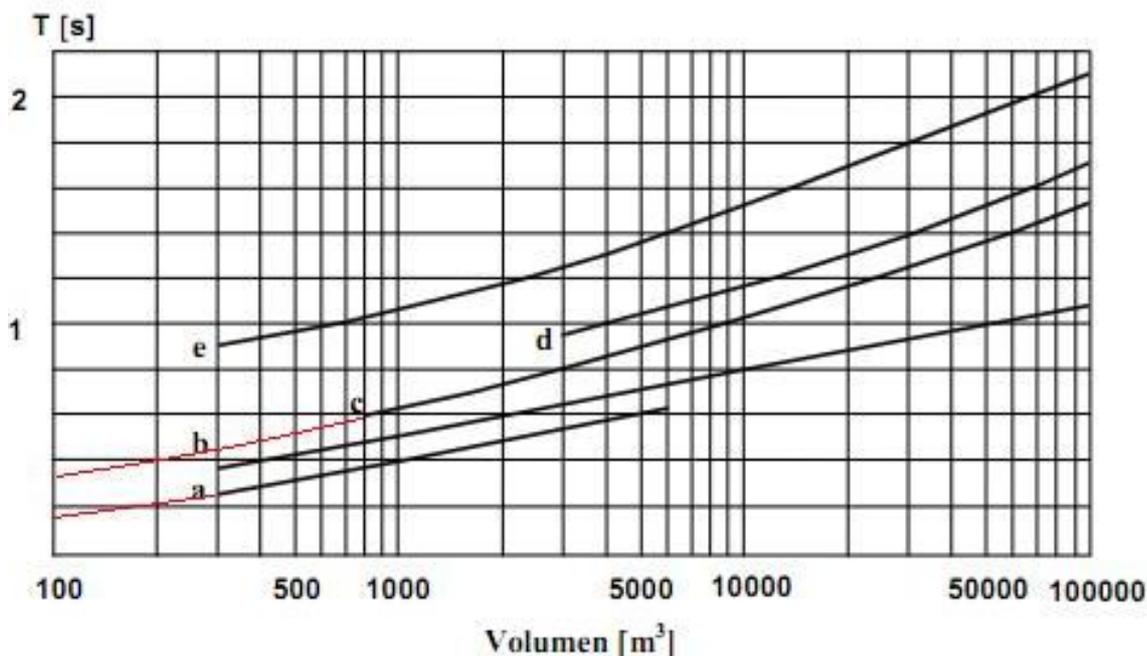


Fig. 4.1.3 Tiempos de reverberación óptimos en función del volumen de la sala. (a) Estudios de radiodifusión para voz. (b) Salas de conferencias (c) Estudios de radiodifusión para música (d) Salas de conciertos (e) Iglesias.

## 4.2 Materiales constructivos en techo, paredes y suelo. Absorción y características.

En este proyecto recopilaremos información de diferentes estudios realizados sobre los coeficientes de absorción de los diferentes materiales que podríamos utilizar en nuestra sala de grabación, para después analizar, simular y elegir la combinación más adecuada de los mismos. Lo ideal sería encontrar los coeficientes de absorción y difusión en las especificaciones de los fabricantes de los materiales, esto es posible en los materiales cuya finalidad es el acondicionamiento acústico, ya que los fabricantes han realizado dichos estudios y están a disposición del público, pero salvo en estos casos, al tratarse de materiales comunes de construcción y no específicos para el tratamiento acústico de salas, resulta complicado encontrar información al respecto. Por tanto, en estos casos nos basaremos en la información que nos proporcionan diferentes estudios que hemos encontrado sobre dichos materiales comunes en el tratamiento de salas.

Tendremos en consideración un presupuesto determinado para el acondicionamiento de la sala de grabación, ya que se trata de un proyecto real con un presupuesto determinado. Así que además de analizar los materiales idóneos para nuestra sala, contemplaremos su coste a la hora de decidir que materiales se utilizarán en el proyecto.

Vamos a centrarnos primero en describir y analizar los diferentes materiales que podríamos utilizar en la construcción de los acabados de nuestra sala, para finalmente acotar las posibilidades en nuestro diseño y realizar algunas simulaciones que nos guíen a la solución más adecuada. Después estudiaremos los materiales de acondicionamiento acústico que podríamos necesitar en nuestra sala de grabación.

Ya que hemos encontrado mucha información del fabricante sobre diferentes materiales acústicos para techos, empezaremos analizando estos.

Analizaremos dos soluciones acústicas de dos fabricantes diferentes para techos: Sonar dB 40 de Rockfon y Acustished de Isover. Ambos vienen presentados en bloques de 600mm x 600mm para ser colocados en un falso techo desmontable.

**Sonar dB 40 de Rockfon:** Es un Panel acústico de lana de roca de 30mm de espesor, que además de tener unos coeficientes de absorción elevados, también nos ofrece aislamiento acústico, lo cual resulta interesante. En la figura 4.2.1 podemos observar el coeficiente de absorción en las diferentes frecuencias y el coeficiente de absorción global, así como el NRC (0,90) y la clase de absorción (A). Este material supondría un coste de 15€/m2.

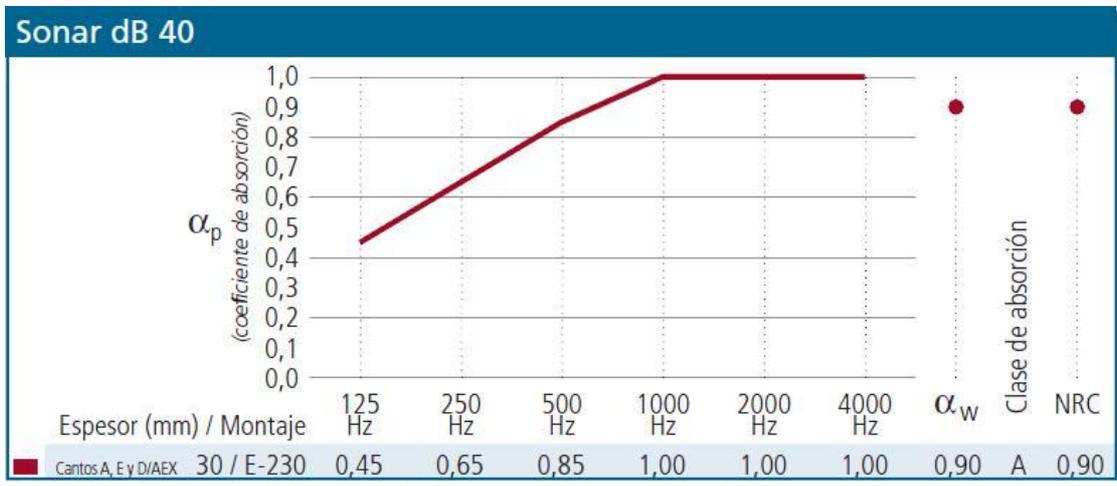


Fig. 4.2.1 Coeficiente de absorción por frecuencias del elemento absorbente Sonar dB 40

**Acustished de Isover:** Es un panel acústico de lana de roca, que nos ofrece unas características también muy interesantes, se comporta de manera similar al material expuesto anteriormente, en este caso disponemos de dos espesores diferentes, 50mm y 80mm. Como podemos comprobar en la figura, la versión de 80mm, además de tener mejor coeficiente de absorción global, nos ofrece mejor absorción acústica a bajas frecuencia, factor a tener en consideración. Tanto la versión de 50mm como la de 80mm nos ofrecen unas características un poco mejores que el material Sonar 40db, aunque también es superior el precio, quedándose en 18€/m2 y 24€/m2 respectivamente.

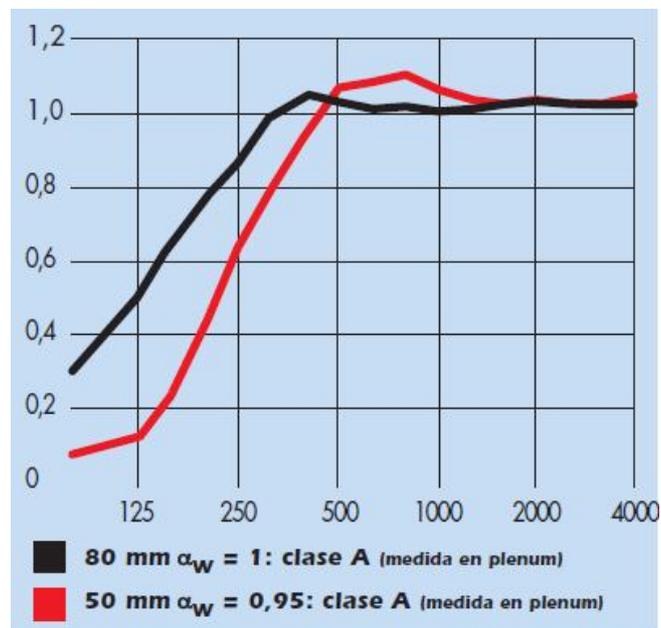


Fig. 4.2.2 Coeficiente de absorción por frecuencias del elemento absorbente Acustished de Isover.

Con respecto a los materiales posibles para el suelo, vamos primero a explicar la insonorización que se realizará, ya que esta afectará en cierta medida a la absorción final del material dispuesto en la última capa.

Para la insonorización del suelo se ha propuesto construir un suelo flotante, con montantes de madera cada 60 cm, entre los cuales se colocará lana de roca. Encima de estos se pondrán dos tablas de madera de densidad media (DM) de 19mm de espesor, entre las cuales se dispondrá una lámina elastométrica (M.A.D de Danosa).

Por tanto el material que coloquemos en última instancia estará encima de un tablero de madera de 19mm de espesor, las diferentes opciones que contemplamos para el suelo son: Parquet y moqueta.

Vamos a analizar ambos materiales, la utilización de uno u otro dependerá bastante de la elección de los materiales en paredes y techo, para que, entre otros parámetros, el tiempo de reverberación final sea el deseado. Podemos ver los coeficientes de absorción de ambos materiales, así como de todos los materiales que contemplaremos en este apartado, en la tabla expuesta al final del mismo.

**Suelo laminado:** Es un material de madera pero con acabados plásticos, poco absorbente especialmente a bajas frecuencias. Es un material muy utilizado en los suelos de los estudios de grabación, tiene sentido utilizarlo ya que proporciona cierto brillo y calidez, siempre que sea compensado con una mayor absorción en paredes y techo, con la disposición de moqueta u otro material absorbente.

**Moqueta:** Es un material relativamente absorbente. Es quizás una buena opción para el suelo si queremos tener una sala muy sorda y no disponemos de presupuesto para utilizar materiales absorbentes auxiliares o específicos.

Por último analizaremos los materiales de las paredes, deberemos tener en consideración las puertas y los visores, ya que estos influirán en el sonido de la sala.

Como podemos observar en el plano del estudio, a la sala principal de grabación dan dos puertas de cristal laminado, ambas de tamaño 1,5 m x 2 m. Debido a que el análisis de la influencia de estas cristaleras puede ser complicado simular, vamos a tenerlo en cuenta de una forma más teórica, asumiendo que influirá generando un mayor tiempo de reverberación debido a su pequeña absorción, comparándola con los posibles materiales que utilizaremos en las paredes.

Vamos por tanto a describir los posibles materiales para las paredes que serán: Pladur (pintado), moqueta y friso. En el apartado siguiente consideraremos los elementos absorbentes.

**Pladur:** Material con el que se realizará la insonorización, resultaría un acabado económico si bien no muy eficiente en cuanto al acondicionamiento acústico se refiere, una solución interesante podría ser combinar un acabado de pladur pintado con elementos absorbentes en las paredes. Combinado con un techo absorbente podría darnos un resultado óptimo y económico.

**Moqueta:** Es un material relativamente absorbente, una buena solución para cubrir las paredes si tenemos un suelo poco absorbente y un techo muy absorbente. Esto nos llevaría a un tiempo de reverberación bastante corto, bueno para una sala de grabación con usos mixtos.

**Friso:** Es un material poco absorbente, debería combinarse con otro material más absorbente como por ejemplo la moqueta o elementos absorbentes. Una posible disposición podría ser colocando en la mitad inferior de la pared friso y en la mitad superior moqueta, con un techo absorbente y un suelo que podría ser de moqueta o parquet, dependiendo del tiempo de reverberación y el brillo de la sala que deseemos obtener. Es una solución más costosa económicamente.

### 4.3 Elementos de acondicionamiento acústico.

Incluso cuando las medidas de la sala y los materiales sean adecuados, es posible que necesitemos algún elemento de acondicionamiento acústico para un mejor resultado final. En este caso trataremos con los paneles absorbentes, las trampas de graves y los difusores.

Analizaremos diferentes productos y fabricantes y estudiaremos cual debería ser la colocación de los diferentes elementos en la sala.

En primer lugar están **los paneles absorbentes**, que pueden resultar una solución rápida y práctica para reducir el tiempo de reverberación de la sala, permitiéndonos tener un mayor control sobre el sonido final. Si bien lo mejor sería evitar tener que utilizar estos paneles por su mayor coste económico en el proyecto, no está de más analizar las posibilidades que nos ofrecen ya que, aunque hagamos simulaciones, es posible que al final la sala quede demasiado sorda o con demasiada reverberación y haya que realizar ajustes. Quizás sería mejor realizar una construcción no demasiado sorda para después acabar de ajustar el tiempo de reverberación algunos paneles absorbentes.

Vamos a analizar tres paneles de diferentes marcas: EZ Foam Pyramidal de EZacoustics, EZ Foam Wedges de EZacoustics y Studiofoam Metro de Auralex.

**EZ Foam Pyramidal** es un panel acústico que tiene un patrón en forma de pirámides alineadas. Existen 2 modelos con diferentes medidas, donde las pirámides pueden tener 5 cm o 10 cm de altura obteniendo un NRC de 0,70 y 0,95 respectivamente.

Vienen en cajas de 12 y 6 unidades (según el modelo sea de 5 o 10cm respectivamente) con unas dimensiones por unidad de 60 x 60 x 5 (o 10) cm.

El precio del conjunto es de 175€, el mismo para las dos versiones del producto.

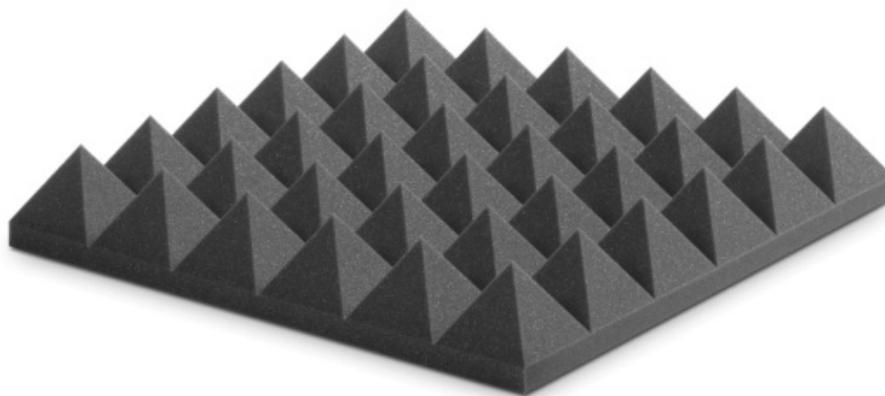


Fig. 4.3.1 Elemento absorbente EZ Foam Pyramidal

Se puede colocar en diferentes zonas, según las necesidades de la sala. Un buen lugar de colocación serían las paredes, a la altura de los oídos. Distribuidos de forma uniforme en todas las paredes. Se pegan en las paredes y/o techos mediante el adhesivo EZ adhesive.

**EZ Foam Wedges** es un panel acústico que tiene un patrón lineal en forma de sierra. Existen 2 modelos con diferentes medidas, donde la sierra puede tener 5 cm o 10 cm de altura obteniendo un NRC de 0,65 y 0,90 respectivamente.

Viene dispuesto en cajas de 12 y 6 unidades (según el modelo sea de 5 o 10cm respectivamente) con unas dimensiones por unidad de 60 x 60 x 5 (o 10) cm.

El precio de la caja es de 149€, igual en las dos versiones del producto.



Fig 4.3.2 Elemento absorbente EZ Foam Wedges

Es un producto muy similar al EZ Foam Pyramidal, se puede colocar en diferentes zonas, según las necesidades de la sala. Como ya hemos comentado con anterioridad, un buen lugar de colocación serían las paredes, a la altura de los oídos.

**Studiofoam Metro** es una solución acústica que actúa como absorbente acústico y a la vez como difusor. Su forma está diseñada para que cada parte del panel absorba diferentes frecuencias, consiguiendo una absorción más uniforme y logrando el efecto de difusión en el sonido que es reflejado, creando un sonido más natural. Existen dos versiones del producto diferentes, la versión de 2" y la de 4", obteniendo un NRC de 0,70 y 1,10 respectivamente.

Viene dispuesto en cajas de 12 y 6 unidades (según el modelo) con unas dimensiones por unidad de 60 x 60 x 5 cm. El precio de la caja es de 392,74€ para ambas versiones del producto.

Como se puede comprobar es un producto con unas mejoras notables con respecto a los dos anteriores, pero con un precio mucho más elevado también.

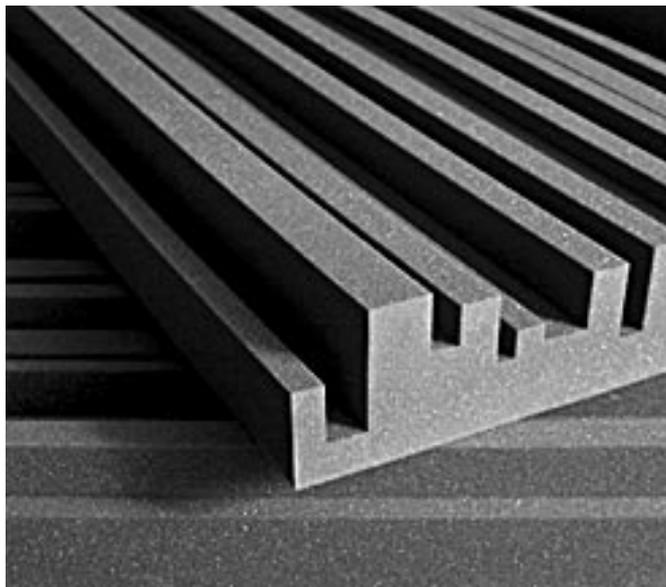


Fig. 4.3.3 Elemento absorbente Studiofoam Metro.

Su disposición sería similar a la comentada para los paneles acústicos anteriores, si bien este producto podría merecer la pena si lo colocamos en una sala de escucha, debido a la mejor y más uniforme absorción y a sus propiedades como difusor.

Las **trampas de graves** son una solución acústica que nace de la necesidad de controlar los modos propios en las bajas frecuencias, que es donde resultan problemáticos. Como comentaba anteriormente, incluso con un buen acabado y una sala con dimensiones óptimas para evitar los modos propios, estos elementos acústicos pueden ser de gran utilidad.

También es importante considerar que, para la grabación de algunos instrumentos determinados, como un bajo acústico, sería necesario reforzar la zona de grabación de este instrumento con una unidad móvil, para evitar resonancias y mejorar la acústica. Sobre todo si se trata de una grabación en vivo donde la grabación de todos los instrumentos se realiza en la misma sala.

Por tanto analizaremos tres productos de diferentes fabricantes, EZ Foam Bass Trap de Ezacoustics, DST LENRD Bass Trap de Auralex y CornerFill Cube de Auralex:

**EZ Foam Bass Trap de Ezacoustics** son unas trampas de graves que tienen forma de triángulo ya que están diseñadas para ser encajadas en esquinas de 90 grados. Tienen una altura de 60 centímetros y una profundidad de 30 cm. Se instalan pegadas a la pared con un adhesivo a base de agua o Velcro. Su precio es de 132€ la caja en la que se incluyen 4 unidades de este material.

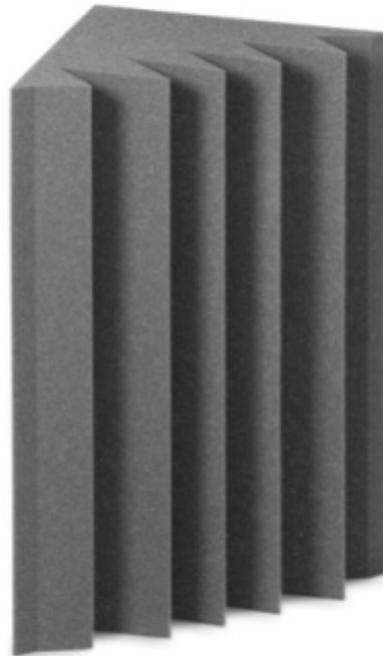


Fig. 4.3.4 Trampa de graves EZ Foam Bass Trap de Ezacoustics.

Posiblemente un buen lugar de colocación en nuestra sala de grabación podrían ser las 4 esquinas superiores de la sala.

**DST LENRD Bass Trap de Auralex** es un modelo similar al caso anterior, estas trampas de graves tienen una forma triangular y están diseñadas para colocarse en esquinas de 90 grados. Tienen una altura de 61 centímetros y se instalan pegadas a la pared con el adhesivo Tubetak Pro de Auralex.

Tienen un NRC estimado de 1,20 y su precio es de 162,76€ la caja en la que se incluyen 4 unidades de este material.

Un buen lugar de colocación en nuestra sala de grabación, igual que en el caso anterior, podrían ser las 4 esquinas superiores de la sala.



Fig. 4.3.5 Trampa de graves DST LENRD Bass Trap de Auralex.

**CornerFill Cube** son unas trampas de graves que tienen forma de cubo y están diseñadas principalmente para colocarse en esquinas triédricas. Tienen unas dimensiones de 30x30x30 centímetros y se instalan pegadas a la pared con el adhesivo Tube Tak Pro o FoamTak de Auralex.

Tienen un precio de 65,10€ la caja en la que se incluyen 2 unidades.

Son una solución estética alternativa si queremos un diseño llamativo y diferente en nuestro estudio.



Fig. 4.3.6 Trampa de graves CornerFill Cube de Auralex.

Por último, la **difusión** del sonido en un recinto se consigue mediante la colocación de elementos expresamente diseñados para dispersar de forma uniforme y en múltiples direcciones la energía sonora que incide sobre los mismos.

Gracias a estos elementos el campo reverberante se percibe dentro de la zona por igual desde todas las direcciones del espacio, lo que contribuirá a crear un sonido altamente envolvente y aumentará el grado de impresión espacial existente.

En una sala de grabación puede ser importante la colocación de difusores en las zonas de grabación de determinados instrumentos, como la batería, que necesitan de una especial atención en cuanto a acústica se refiere.

En este caso compararemos tres productos de Auralex: Quadratec Difussor, Wave Prism y KeyPac Star 4.

El **Quadratec Difussor** está basado en el modelo de residuo cuadrático (QRD) bidimensional. Este difusor consiste en una serie de ranuras paralelas de forma rectangular, de diferente profundidad y de igual anchura. La frecuencia máxima para la cual produce difusión del sonido es inversamente proporcional a el ancho de las ranuras, así como la frecuencia mínima disminuye a medida que aumenta la profundidad.

Están fabricados en madera de bambú, con un peso reducido que permite colgarlo de falsos techos o paredes con una sujeción sencilla.



Fig. 4.3.7 Elemento difusor Quadratec Difussor.

Vienen en packs de 2 unidades con unas dimensiones por unidad de 60,3 x 60,3 x 10,4 cm. Su precio es de 568.21€.

**Wave Prism** es un difusor acústico birradial, Se basa en una combinación de dos difusores QRD a 90 grados de cruce, lo cual le da un campo de difusión semiesférico.

Su frecuencia mínima es dada por la mayor profundidad y la máxima por la menor distancia entre celdas, se pueden hacer fractales (micro difusores dentro de las celdas).

Gracias a este elemento acústico podemos eliminar flutter echoes y otras anomalías acústicas sin reducir la propia energía del espacio.

Es un difusor ideal para su colocación en techos y zonas de campo de difusión muy anchas. También está fabricado en madera de bambú, con un peso reducido.

Viene en un pack de 2 unidades con unas dimensiones por unidad de 60,3 x 60,3 x 7,6 cm. Su precio es de 441€.



Fig. 4.3.8 Elemento difusor Waves Prism.

**KeyPac Star 4** es un difusor móvil que nos da la posibilidad de adecuar nuestra sala rápidamente dependiendo del tipo de grabación a realizar, si necesitamos un carácter más seco y controlado puede resultar una solución interesante. Son cubiertas de absorción finas perforadas de madera de bambú.

Vienen en cajas de 4 Paneles con unas dimensiones por unidad de 60,3 x 60,3 x 1,5 cm. Su precio es de 400,92€ la caja.

Su colocación puede resultar útil en casos en los que necesitemos mayor absorción y difusión, como a la hora de grabar una bajo acústico o un instrumento de cuerda o viento.



Fig. 4.3.9 Elemento difusor KeyPac Star 4.

## 5. Resultados.

Una vez expuesta la teoría necesaria para abordar el diseño de la sala de grabación, así como los materiales y elementos acústicos necesarios para el acondicionamiento. Procedo a realizar las simulaciones pertinentes para:

- Determinar las dimensiones óptimas de la sala para una distribución uniforme del nivel de presión sonora en la misma.
- Determinar los materiales constructivos y los elementos acústicos adecuados para la obtención del tiempo de reverberación deseado.
- Determinar el valor de la inteligibilidad a la palabra STI obtenida en dichas simulaciones.

### 5.1 Control de los modos propios: Ratios de la sala.

Para este proyecto he decidido diseñar una sala rectangular, para aprovechar al máximo el espacio disponible, pero esto también facilitará el poder calcular mediante simulaciones los diferentes parámetros, como el tiempo de reverberación y el grado de inteligibilidad STI en CATT Acoustic. Así como para poder calcular los modos propios de la sala, simular y determinar las dimensiones adecuadas dentro de las posibilidades de nuestro local actual. Creo que es vital tener en consideración los modos propios para evitar resonancias y/o colorear el sonido, sobretodo en bajas frecuencias. Por tanto las dimensiones de la sala vendrán determinadas por las opciones que nos dé el local y el estudio de los modos propios en las diferentes dimensiones que sean posibles.

En la figura 5.1.1 del anexo 3 se puede ver un plano del local, como se puede intuir la distribución dispuesta ha sido pensada para poder conseguir una sala de grabación lo más grande posible, y disponer además de otra sala secundaria de grabación para locuciones y dos salas de escucha.

En este proyecto me centrare en la sala de grabación principal, que es la que considero más importante tanto para este proyecto como para el estudio de grabación.

Por tanto, teniendo en cuenta el espacio requerido para la insonorización, las dimensiones máximas que podría tener la sala de grabación serian de 6,5 x 5,5 x 3 metros.

Cabe mencionar que estas dimensiones máximas estarían condicionando en cierta medida la insonorización, ya que el trasdosado auto portante estaría dispuesto con solo 4 centímetros de distancia desde la pared, siendo recomendable dejar 6 centímetros. Por lo que hay cierto margen para probar con diferentes proporciones ya que no utilizar las dimensiones máximas supone una mejora sin coste económico en la insonorización, y por tanto no es simplemente espacio perdido.

Teniendo en cuenta esto, las dimensiones mínimas admisibles serían 6,2x5,2x2,5 metros, en el caso de la altura mínima será el nivel permisible mínimo por ley para este tipo de actividad.

En la tabla 5.1 podemos ver las ecuaciones de las diferentes recomendaciones, como la recomendación de Bolt, EBU y IEC, así como algunos ratios propuestos por estas recomendaciones, en este proyecto debo intentar conseguir un ratio óptimo que cumpla con estas recomendaciones y que permita aprovechar al máximo la sala.

Si ninguno de estos ratios se puede aplicar a las medidas de nuestra sala, deberemos encontrar un ratio que cumpla las tres especificaciones, haciendo uso de las fórmulas de estas, creando un ratio especialmente diseñado a las necesidades del proyecto.

## Ratios de la sala para una respuesta modal favorable

Los ratios se distribuirán de la forma 1:x:y. La altura (z) está normalizada a 1

<b>Recomendación de Bolt</b>	$2 < x + y < 4$ $3/2(x-1) < y-1 < 3(x-1)$							
<b>Recomendación de EBU</b>	$x < 3z, y < 3z$ $1.1x/z \leq y/z \leq (4.5x/z) - 4$							
<b>Recomendación de IEC</b>	$x/z \leq y/z \leq \min(4, (5x/z) - 4)$							
<b>Ratios de Bolt</b>		H	W	L		Bolt?	EBU?	IEC?
Sala	A	1.00	1.14	1.39		Si	No	Si
Sala	B	1.00	1.28	1.54		Si	Si	Si
Sala	C	1.00	1.60	2.33		Si	Si	Si
<b>Ratios de Louden</b>		H	W	L				
Sala	D	1.00	1.40	1.90		Si	Si	Si
Sala	E	1.00	1.30	1.90		Si	No	Si
Sala	F	1.00	1.50	2.50		Si	Si	Si
<b>Ratios de Boner</b>		H	W	L				
Sala	G	1.00	1.26	1.59		Si	Si	Si
<b>Nuestro ratio</b>		H	W	L				
Sala	H	1.00	1.58	1.91		Si	Si	Si

Tabla 5.1 Ratios de la sala para una respuesta modal favorable.

Teniendo en consideración las dimensiones máximas y mínimas propuestas, Los ratios propuestos en las diferentes recomendaciones no nos sirven, nuestra sala tiene unas proporciones bastante diferentes, así que necesitamos probar diferentes ratios hasta encontrar el adecuado. Esta tarea resulta más sencilla gracias al mapa de calor de este estudio, expuesto a en el anexo 3 en la figura 5.1.2, donde podemos ver rápida y eficazmente las diferentes proporciones adecuadas según estos estudios.

En el gráfico, cuanto más oscura sea la zona en el mapa de calor, menor será la resonancia en frecuencias graves, y por tanto, será un mejor ratio para nuestra sala.

Sabiendo esto es más fácil aplicar las fórmulas ya que podemos restringir los ratios que no nos servirán. Si nos fijamos en la tabla podemos ver un ratio personalizado que cumple con las tres especificaciones y está dentro de los límites de las dimensiones del local propuestas.

El ratio es de 1:1.58:1.91 y, como he dicho antes, cumple con las especificaciones tanto de IEC, Bolt y EBU. Por lo que resulta una configuración óptima dado el hecho de estar en una sala rectangular

Este ratio se corresponde con unas dimensiones de 3.3 metros de alto, 6.3 metros de largo y 5.2 de ancho. Con lo que se obtiene un volumen aproximado de 108,2m<sup>3</sup> y una buena respuesta modal.

### 5.1.1 Simulación de los modos propios a bajas frecuencias.

Una vez expuesta la solución teórica, paso a realizar la simulación de dichos modos propios mediante Excel de dichas dimensiones de la sala, gracias a una herramienta que nos brinda la web <http://www.studiotips.com/> para comprobar que las dimensiones propuestas anteriormente son válidas.

En este cálculo he analizado los modos axiales y tangenciales hasta una frecuencia de 300 Hz, que es la zona frecuencial que se considera problemática.

Se podría decir que una distribución homogénea de modos axiales, en teoría es aquella en la que todos sus modos están separados entre sí no menos de su frecuencia incrementada un 5%.

Abajo podemos ver la tabla 5.2 con los modos propios para las dimensiones elegidas.

#### Modos axiales y tangenciales

<b>Largo:</b>	6.3	m.
<b>Ancho:</b>	5.2	m.
<b>Alto:</b>	3.3	m.
<b>Vel. Sonido:</b>	345.8	m/s.
<b>Temp. de sala:</b>	24	° C
<b>Long. máx. paredes 8,6 metros para cálculo hasta 300 Hz.</b>		
<b>Resonancia baja:</b>	30.3	Hz.
<b>Modos propios:</b>	223.5	Hz.
<b>Banda transición:</b>	1118	Hz.
<b>Tiempo reverberación:</b>	0.33	s.

Modo	Largo	5%	Ancho	5%	Alto	5%
<b>1</b>	27	28.77	33	34.86	<b>52</b>	55.02
<b>2</b>	<b>55</b>	57.65	67	69.83	105	110.04
<b>3</b>	82	86.42	100	104.69	157	165.06
<b>4</b>	110	115.29	133	139.65	210	220.08
<b>5</b>	137	144.06	166	174.51	262	275.1
<b>6</b>	165	172.94	200	209.48		
<b>7</b>	192	201.71	233	244.34		
<b>8</b>	220	230.58	266	279.3		
<b>9</b>	247	259.35	299	314.16		
<b>10</b>	274	288.12				

Tabla 5.2 Modos Propios

Como se observa en la tabla 5.2 solo hay un conflicto entre los modos propios, entre las frecuencias 52 Hz y 55 Hz donde se juntan por muy poquito dos modos propios, como se marca en negrita en la tabla.

Por lo demás la distribución de nivel de presión sonora se puede considerar bastante uniforme, por lo que, tratándose de una sala rectangular, supone un logro bastante importante.

En la figura 5.1.2 se hace una presentación gráfica de la distribución de los modos donde se puede comprobar de forma visual el resultado de la simulación.

Una distribución uniforme del nivel de presión sonora en la sala es importante para, en primer lugar, evitar resonancias indeseables, y en segundo lugar conseguir fidelidad en la respuesta en frecuencia de las grabaciones, evitando que el sonido natural de los instrumentos cambie.

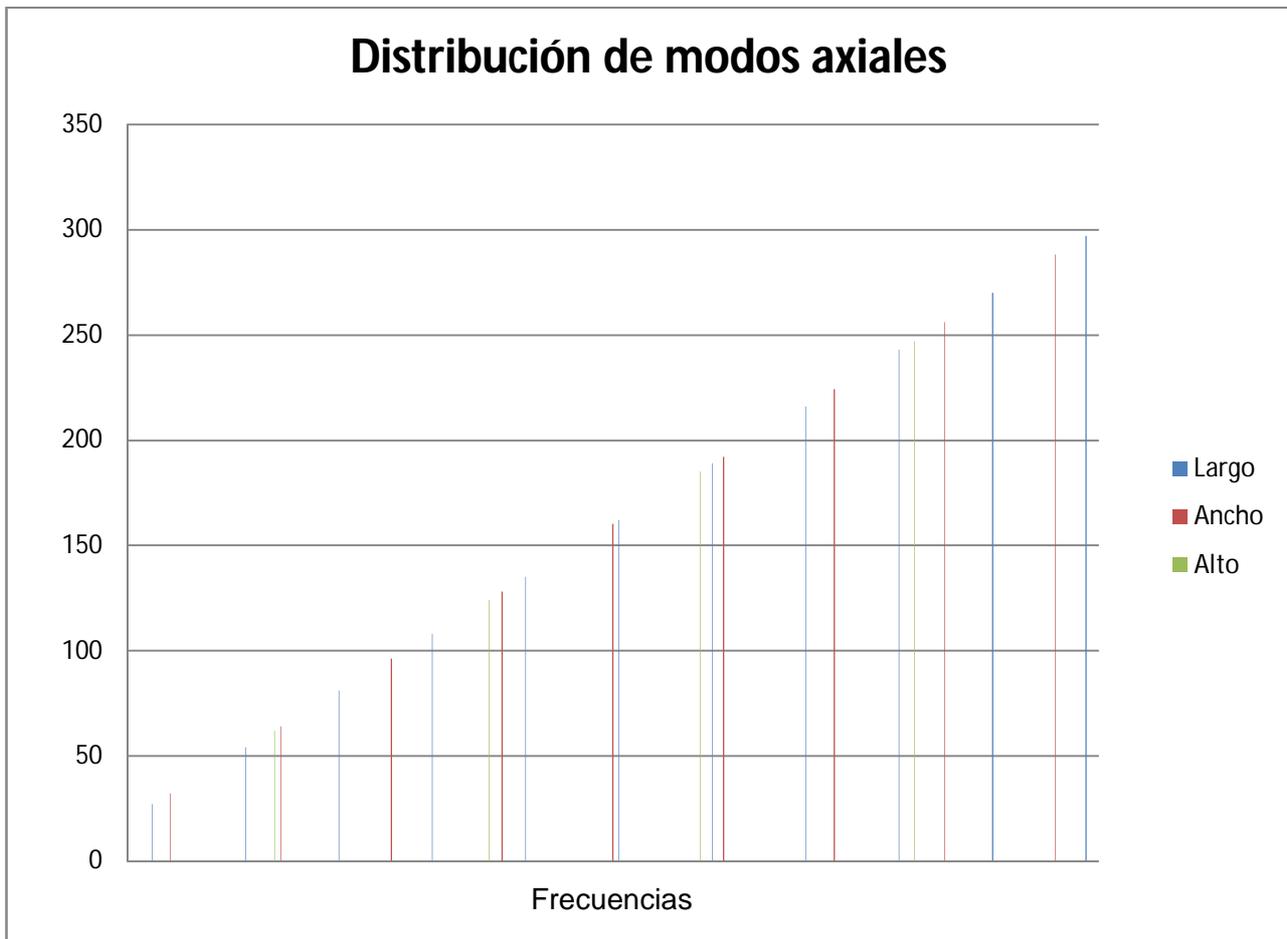


Fig. 5.1.2 Distribución de los Modos Propios

## 5.2 Acondicionamiento acústico de la sala de grabación.

A la hora de realizar y valorar las simulaciones para el acondicionamiento acústico de la sala debo referirme a la información y conclusiones obtenidas en apartados anteriores sobre:

- El tiempo de reverberación óptimo, entre 0,30 y 0,35 segundos.
- Valores óptimos de la inteligibilidad de la palabra STI.
- Las dimensiones del recinto: 6,3m de ancho, 5,2m de largo y 3,3m de alto.
- El volumen de la sala: 108,2m<sup>3</sup>.
- La absorción de los materiales constructivos descritos en el apartado 4.2.
- La absorción de los elementos absorbentes seleccionados en el apartado 4.3.

En estas simulaciones no vamos a considerar la difusión de los materiales, debido a que la gran mayoría de fabricantes no ponen a disposición del público estos datos.

Con esta información he diseñado el recinto anteriormente descrito en el programa de simulación CATT Acoustic para obtener las primeras simulaciones. En la figura 5.2.1 se pueden ver los planos de la sala.

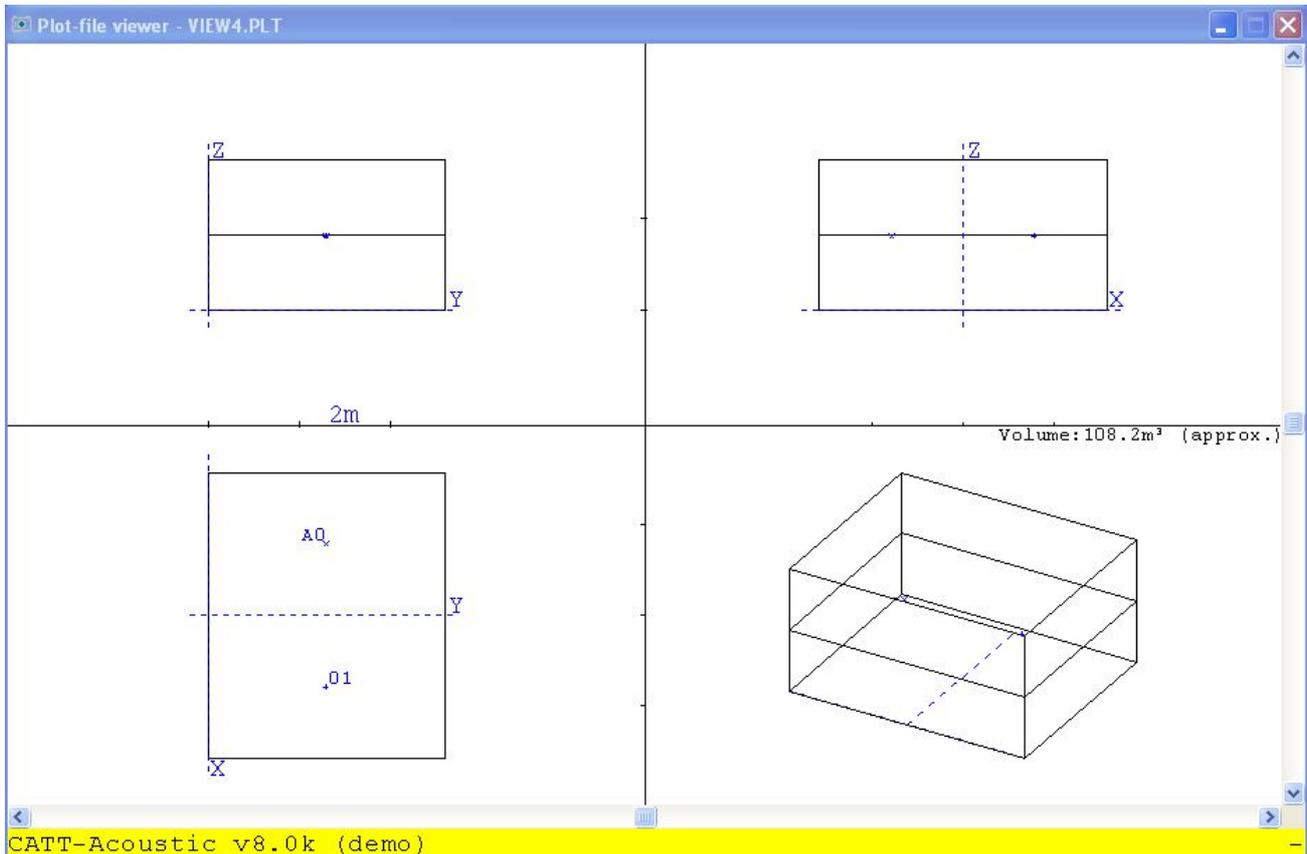


Fig. 5.2.1 Planos de la sala de grabación objeto de estudio.

Una vez realizado el diseño de la sala, y después de realizar algunas simulaciones con diferentes materiales en paredes, suelo y techo, fui descartando las propuestas que menos satisfacían las necesidades del proyecto, hasta quedarme con tres.

Algunas configuraciones también han sido descartadas por motivos estéticos (Moqueta en el suelo), por motivos económicos, así como por exceso o falta absorción de los materiales.

- 1) Suelo: Laminado/Parquet, Pared: Pladur, Techo: Sonar 40db.
- 2) Suelo: Laminado/Parquet, Pared: Pladur con elementos absorbentes, Techo: Sonar 40db.
- 3) Suelo: Laminado/Parquet, Pared: Pladur+Moqueta Techo: Sonar 40db.

Antes de analizar las simulaciones realizadas hay que tener en consideración que CATT Acoustic es un programa diseñado para simular teatros, auditorios y en general salas con volúmenes muy superiores al estudiado en este proyecto. Por lo que los resultados deben considerarse como estimaciones que pueden no ser muy cercanas a las que se pudieran medir "in situ".

También debo indicar que algunos materiales como el Sonar 40 dB tienen en algunas frecuencias coeficientes de absorción superiores a 1, que el programa CATT Acoustic no admite, por lo que deben ser rebajados a 0,99.

Por otro lado, para la simulación no se han tenido en cuenta las puertas de vidrio, para simplificar el proceso, ya que teniendo en cuenta que estas ocupan solamente  $3\text{m}^2$  de superficie, el efecto que tendrán sobre las simulaciones se puede considerar despreciable.

Para determinar la validez de cada propuesta me basare principalmente en el tiempo de reverberación de Sabine, aunque también consideraré el valor STI de la inteligibilidad de la palabra.

### 5.2.1 Primera propuesta: Absorbente en el techo.

La primera propuesta es la más sencilla y económica, el suelo, paredes y techo estarían compuestos de los siguientes materiales:

- Suelo: Laminado/Parquet
- Pared: Placa de yeso laminado pintada.
- Techo: Sonar 40dB

Como podemos ver en la gráfica abajo expuesta, el tiempo de reverberación obtenido es un poco más elevado que el propuesto inicialmente. **RTSabine** = 0,468s / **RTEyring** = 0,405s

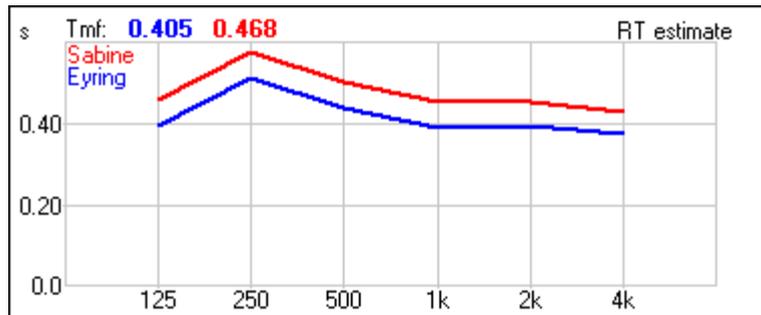


Fig. 5.2.2 Tiempo de reverberación de Sabine y Eyring

El tiempo de reverberación, si bien es superior al deseado, tampoco es excesivamente alto teniendo en consideración el volumen de la sala. Esto es debido al gran poder de absorción del falso techo Sonar 40db.

Probablemente este exceso de reverberación se podría solucionar colocando algún elemento absorbente en las paredes, así como trapas de graves.

Para corroborar nuestra simulación vamos a calcular el tiempo de reverberación de Sabine utilizando la fórmula simplificada de Sabine, sin tener en cuenta la absorción del aire:

$$RT = \frac{0,161 V}{A_{tot} * a} \text{ seg.}$$

Para realizar el cálculo de la fórmula de Sabine primero necesitamos calcular la superficie total del recinto así como la absorción global, también necesitaremos el valor del volumen.

La superficie total del recinto la podemos calcular rápidamente, multiplicando las dimensiones de cada superficie y sumándolas.

$$A_{tot} = 32,76 * 2 + 20,80 * 2 + 17,16 * 2 = 141,44 \text{ m.}$$

Por otro lado deberemos calcular la absorción total de los materiales, para el cálculo de la fórmula de Sabine obtendremos la absorción global de los materiales en todas las frecuencias. Después calcularemos la absorción media de toda la superficie del recinto, que será distinta según la cantidad de superficie que ocupe cada material en la sala.

$$\text{Parquet} = \frac{0,04 + 0,04 + 0,07 + 0,06 + 0,06 + 0,07}{6} = 0,06$$

$$\text{Pladur} = \frac{0,29 + 0,10 + 0,06 + 0,05 + 0,04 + 0,04}{6} = 0,10$$

$$\text{Sonar 40dB} = 0,85$$

En el caso del material Sonar 40dB, la absorción global nos la da el fabricante.

Una vez ya tenemos los coeficientes de absorción de cada material podemos calcular la absorción global del recinto.

$$a_{tot} = \frac{a1 * A1 + a2 * A2 + a3 * A3}{A_{tot}}$$

$$a_{tot} = \frac{0,06 * 32,76 + 0,10 * (20,80 * 2 + 17,16 * 2) + 0,85 * 32,76}{141,44} = 0,26$$

Este resultado de absorción concuerda con el resultado de absorción de las simulaciones que es de 0,25.

Una vez tenemos el volumen, la superficie total de la sala y la absorción global, podemos calcular el tiempo de reverberación.

$$RT = \frac{0,161 * 108,2}{141,44 * 0,26} = 0,466\text{seg.}$$

El tiempo de reverberación de Sabine obtenido utilizando cálculos matemáticos es muy similar al tiempo de reverberación estimado que nos da el programa de simulación.

$$RT_{Sabine} = 0,468 \approx 0,466 \approx 0,47\text{seg.}$$

Por otro lado, según las simulaciones, la inteligibilidad de la palabra es excelente, con un valor STI = 0,86. Como se puede ver en la figura 5.2.3 mostrada en el anexo 3.

A pesar de la buena inteligibilidad esta propuesta se descarta al tener un tiempo de reverberación mayor del deseado para una sala de grabación musical.

### 5.2.2 Segunda Propuesta: Absorbente en techo y paredes.

La segunda propuesta es la más versátil, el suelo, paredes y techo estarían compuestos de los siguientes materiales.

Suelo: Laminado/Parquet

Pared: Placa de yeso laminado pintada y elementos absorbentes.

Techo: Sonar 40db.

Para la realización de esta simulación colocaremos 18 m<sup>2</sup> de material absorbente Ez Acoustic Piramidal (NRC = 0,95), que ha sido distribuido uniformemente por las paredes del recinto, a media altura, en forma de cuadrados de 60 x 60cm.

Como se puede ver en la gráfica, el tiempo de reverberación obtenido en la simulación esta dentro del tiempo de reverberación deseado para nuestros propósitos.  $RT_{Sabine} = 0,326\text{s}$  /  $RT_{Eyring} = 0,261\text{s}$

Alternativamente se podría colocar más o menos material absorbente después de hacer la medición real para lograr el tiempo de reverberación deseado con mayor exactitud.

Viendo la curva de el tiempo de reverberación también se podrían colocar trampas de graves para atenuar las frecuencias graves, donde el tiempo de reverberación es un poco más elevado.

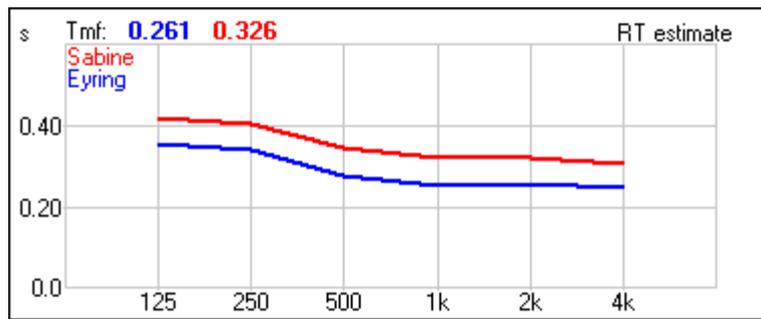


Fig. 5.2.4 Tiempo de reverberación de Sabine y Eyring

De nuevo vamos a realizar el cálculo matemático para la obtención del tiempo de reverberación de Sabine. Para ello primero calculamos la absorción global:

$$a_{tot} = \frac{0,06 * 32,76 + 0,10 * (16,30 * 2 + 12,66 * 2) + 0,85 * 32,76 + 0,95 * 18}{141,44} = 0,36$$

En este caso el valor de la absorción también es muy similar al obtenido en la simulación que es de 0,359.

Como ya calculamos la superficie total en el apartado anterior podemos calcular el tiempo de reverberación de Sabine aplicando la fórmula.

$$RT = \frac{0,161 * 108,2}{141,44 * 0,36} = 0,331 \text{seg.}$$

El resultado es similar al tiempo de reverberación de Sabine obtenido en la simulación:

$$RT_{Sabine} = 0,326 \approx 0,331 \approx 0,33 \text{seg.}$$

Por otro lado la inteligibilidad de la palabra es excelente, con un valor STI = 0,85. Como se puede ver en la figura 5.2.5 mostrada en el anexo 3.

Por tanto esta propuesta parece muy viable, ya nos da mucha versatilidad a la hora de cambiar el acondicionamiento final de la sala simplemente añadiendo o quitando superficie de material absorbente.

### 5.2.3 Tercera Propuesta: Absorbente en el techo y moqueta en las paredes.

La tercera propuesta es posiblemente la menos estética, el suelo, paredes y techo estarían compuestos de los siguientes materiales:

Suelo: Laminado/Parquet

Pared: Placa de yeso laminado pintada y moqueta.

Techo: Sonar 40db.

En esta simulación la superficie de la pared estaría cubierta de moqueta y pladur en proporciones iguales, colocando tiras horizontales de 1m de moqueta sobre el pladur, que es el elemento constructivo base.

En este caso el tiempo de reverberación obtenido es muy similar a la segunda propuesta, también está dentro del tiempo de reverberación deseado para nuestros propósitos, aunque la respuesta en frecuencia del tiempo de reverberación es diferente. **RTSabine** = 0,364s / **RTEyring** = 0,300s

Como se observa en la gráfica de la figura 5.2.5 en este caso la atenuación es mucho más alta en las altas frecuencias que en las bajas frecuencias, por lo que habría que colocar trampas de graves para reducir el tiempo de reverberación en las bajas frecuencias y así evitar, entre otras cosas, posibles problemas de modos propios así como una respuesta sonora opaca y con poco brillo.

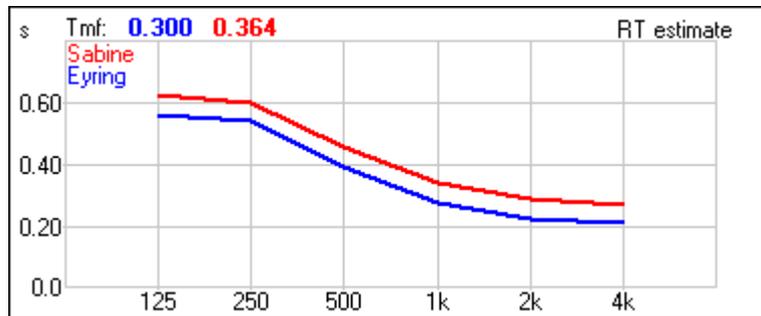


Fig. 5.2.5 Tiempo de reverberación de Sabine y Eyring

Por otro lado, si bien se podría alterar la superficie cubierta de moqueta, no es un proceso tan sencillo como el encontrado en la segunda propuesta, al mismo tiempo estéticamente no es la solución más adecuada.

Para calcular el tiempo de reverberación de Sabine necesitamos conocer la absorción media de la moqueta.

$$\text{Moqueta} = \frac{0,02 + 0,06 + 0,14 + 0,37 + 0,60 + 0,65}{6} = 0,31$$

Una vez obtenida la absorción media de la moqueta procedemos a calcular *atot*

$$\text{atot} = \frac{0,06 * 32,76 + 0,10 * (20,80 + 17,16) + 0,31 * (20,80 + 17,16) + 0,85 * 32,76}{141,44} = 0,33$$

$$RT = \frac{0,161 * 108,2}{141,44 * 0,33} = 0,384\text{seg.}$$

En este último caso el cálculo matemático no resulta tan exacto al resultado de la simulación. Esto es debido a que CATT acoustics no tiene en tanta consideración las bajas frecuencias a la hora de hacer la estimación del RTSabine.

La inteligibilidad de la palabra es también excelente, con un valor STI = 0,85. Como se puede ver en la figura 5.2.6 mostrada en el anexo 3.

Por tanto, esta sería una opción a considerar, aunque dada la inexactitud que proporciona el programa CATT Acoustic para salas pequeñas, es más seguro realizar la propuesta número 2 ya que en caso de no lograr el tiempo de reverberación que predicen las simulaciones podríamos solucionarlo rápidamente.

### 5.3 Propuesta Elegida: Absorbente en el techo y paredes.

Desde mi punto de vista, la segunda propuesta sería la opción más adecuada para las necesidades del proyecto, dado que el tiempo de reverberación es óptimo y además fácilmente adaptable si finalmente las mediciones revelan un tiempo de reverberación diferente al estimado.

El tiempo de reverberación obtenido tanto en las simulaciones como con los cálculos matemáticos es:

$$RT_{Sabine} = 0,326 \approx 0,331 \approx 0,33\text{seg.}$$

Por otro lado, el análisis del grado de inteligibilidad STI da un resultado de excelente, como se puede ver en la figura 5.2.4 del anexo 3, con un  $STI=0,85$ . Lo cual nos brindará una excelente calidad de grabación para locuciones además de para propósitos musicales.

Me pareció de interés añadir una última simulación donde se presenta la espacialidad de la sala, si bien la medida más importante a considerar es el tiempo de reverberación, también existen otros parámetros que nos pueden ayudar como el IACC, es decir el coeficiente de correlación cruzada interaural, que calcula la espacialidad de la sala, mide la diferencia que hay entre los sonidos que llegarían desde el oído derecho e izquierdo del oyente. Donde un valor igual a 0 ocurriría cuando la espacialidad es nula e igual a 1 cuando es máxima.

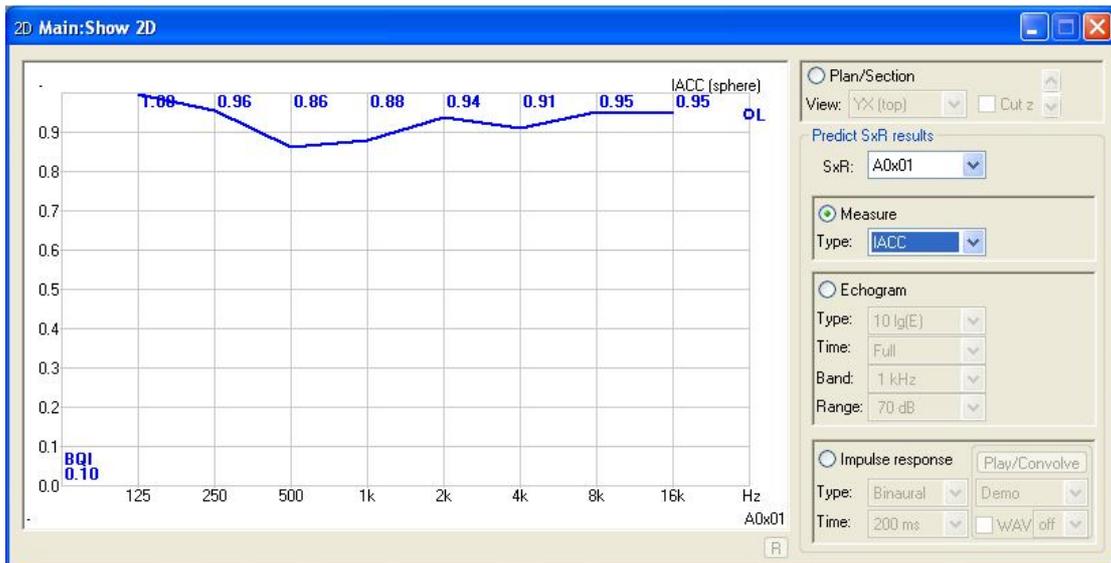


Fig. 5.2.7 Coeficiente de correlación interaural.

Se puede ver la posición del receptor con respecto a la fuente en la figura 5.2.1, y por lo que podemos ver en la gráfica de la figura 5.2.7 el valor de IACC es bastante alto en todas las frecuencias por lo que parece un resultado bastante favorable.

## 6. Conclusiones.

El objetivo principal de este proyecto es el diseño de una sala de grabación con unas condiciones acústicas adecuadas para las grabaciones musicales, por lo que había que controlar el tiempo de reverberación así como lograr una distribución uniforme del nivel de presión sonora.

Se debía lidiar con las limitaciones de las dimensiones del local donde la sala de grabación se iba a ubicar. En el apartado 5.1 se simula con éxito unas dimensiones de 6,3m de ancho, 5,2m de largo y 3,3m de alto, (partiendo de unas dimensiones máximas de 6,5x5,5x3m), obteniendo una respuesta modal buena, sobre todo teniendo en consideración que se trata de una sala rectangular relativamente pequeña.

Por otro lado, se ha estudiado el tiempo de reverberación óptimo para un estudio de grabación, y después de investigar las características de los elementos absorbentes disponibles en el mercado, así como los coeficientes de absorción de los materiales utilizados, se ha logrado conseguir el tiempo de reverberación propuesto mediante las simulaciones de CATT Acoustic y los cálculos matemáticos.

$$RT_{Sabine} = 0,33\text{seg.}$$

Si bien no era un objetivo principal en el proyecto, también se ha logrado una excelente inteligibilidad para la palabra con un valor de STI = 0,85. Esto ha sido posible gracias a una elección correcta del tiempo de reverberación, para que la sala de grabación fuera apta tanto para grabaciones musicales como para locuciones en off.

Por tanto el resultado del proyecto ha sido muy positivo, logrando todos los objetivos principales y secundarios que se habían propuesto al inicio del mismo.

En los ficheros anexos del proyecto se pueden ver diversas fotografías de la sala de grabación terminada, así como otras de la sala de control. La configuración final en la práctica se realizó con otro material absorbente, se substituyó el material absorbente EZacoustic Piramidal por el t.akustik SA-N30, por motivos económicos.

# Anexo 1

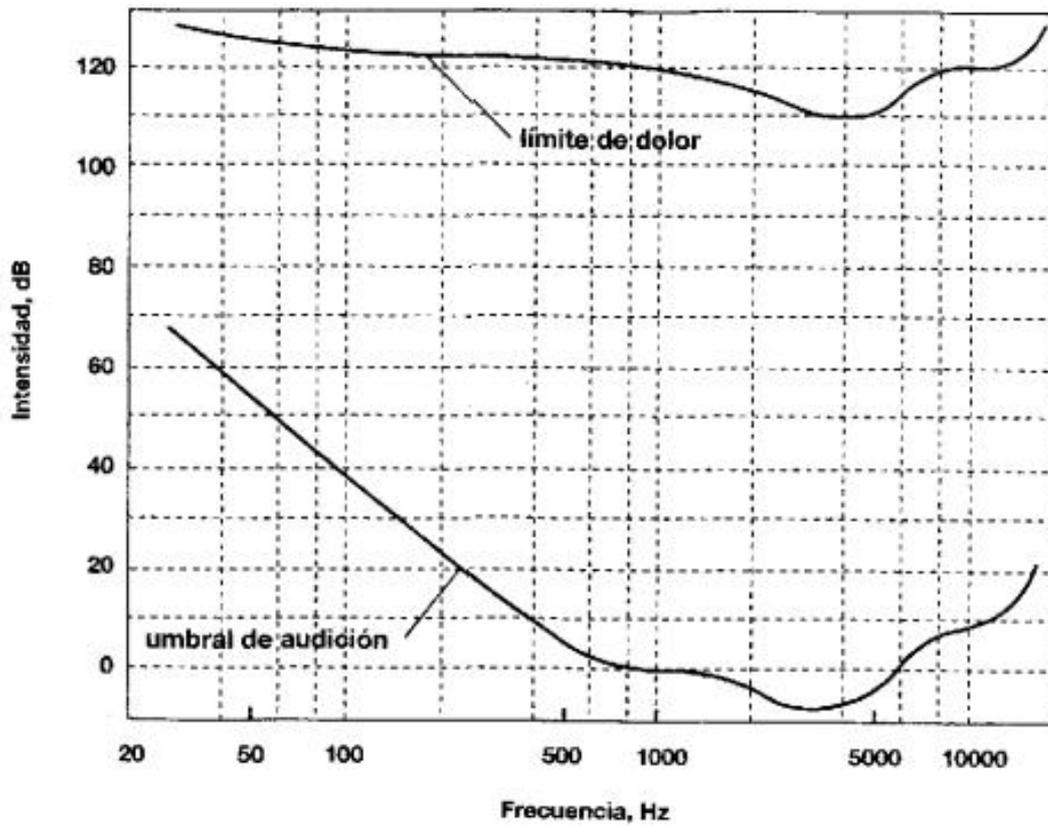


Fig. 2.1 Umbral de audición

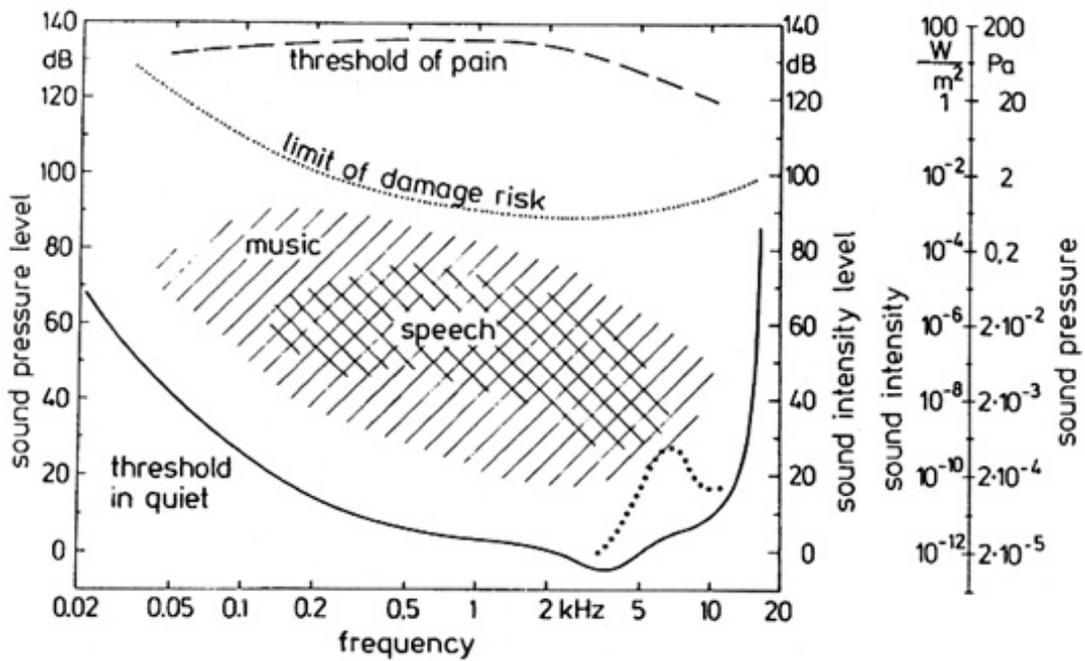


Fig. 2.2. Nivel SPL de emisión de la música y la palabra

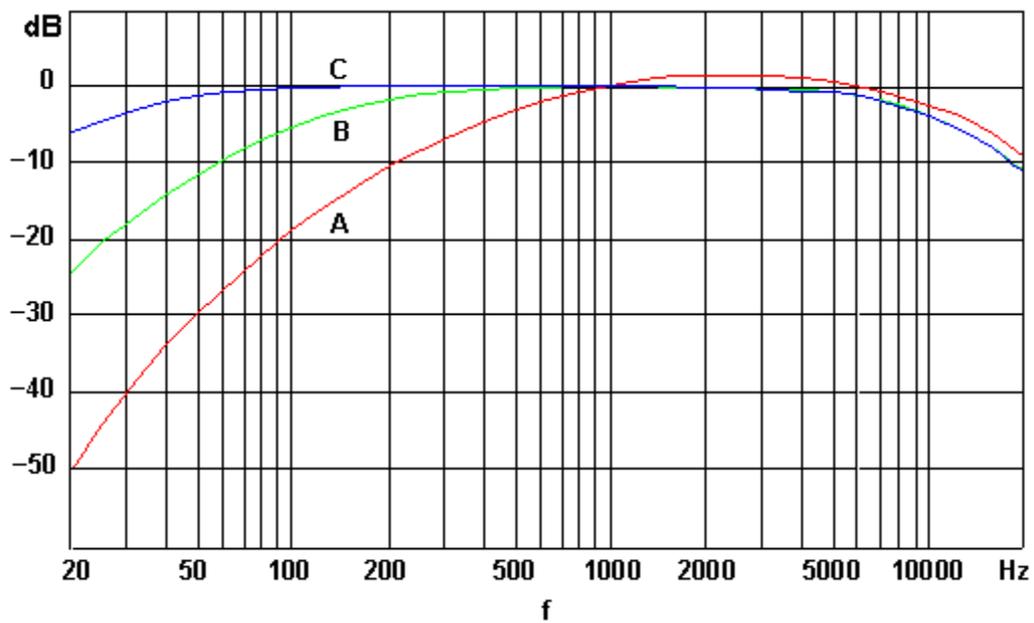


Fig. 2.3. Red de ponderación A, B y C.

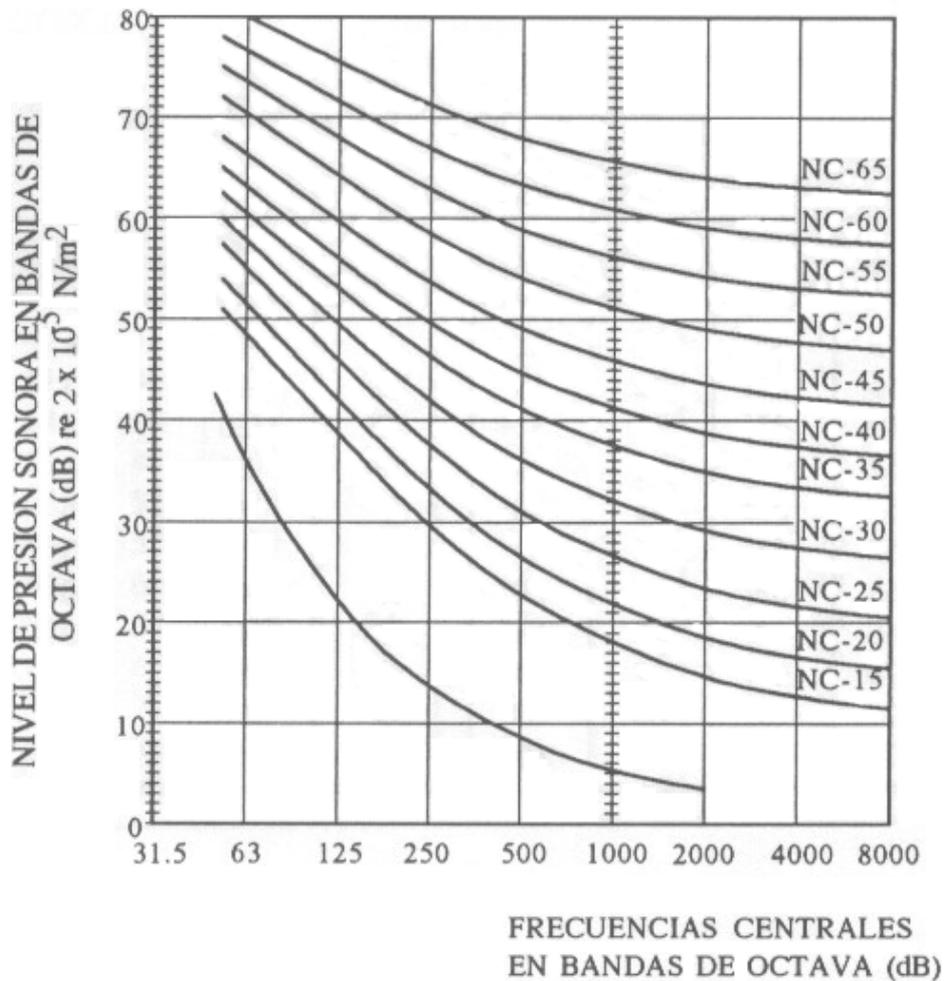


Fig. 2.4 Curvas NC

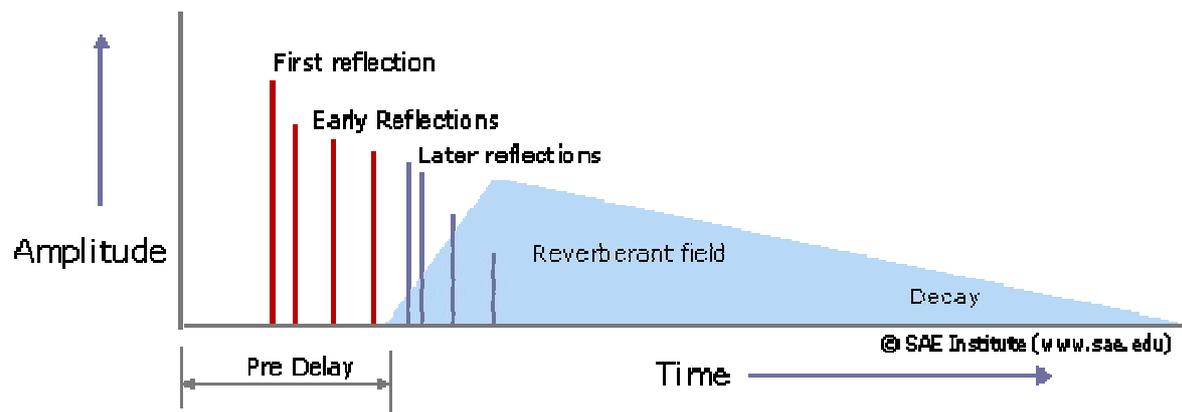


Fig. 2.5 Reflexiones tempranas y tardías.

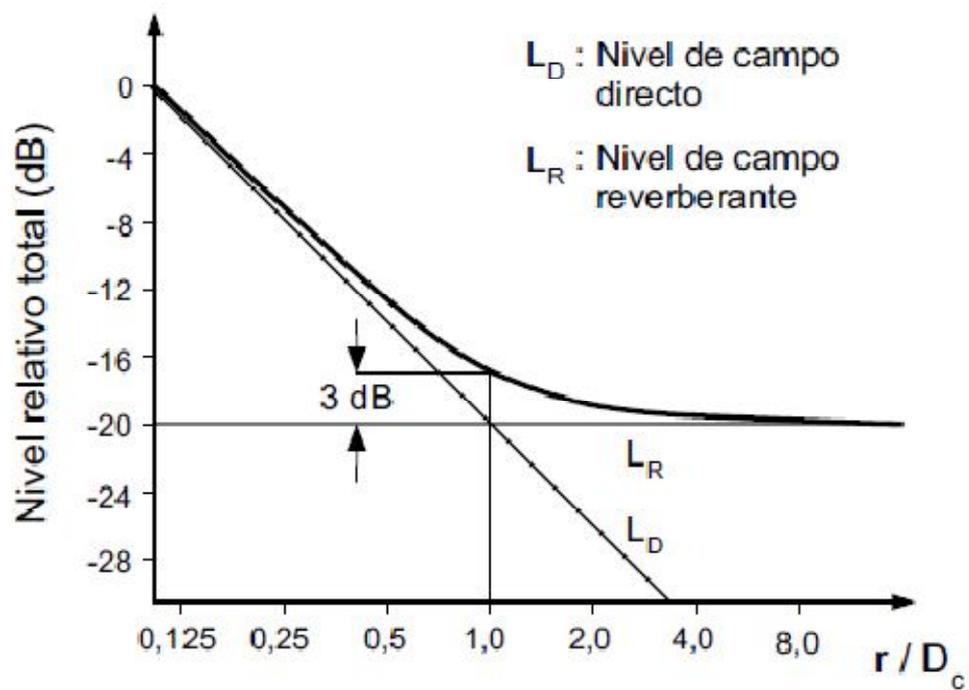


Fig. 2.6 Campo directo y reverberante

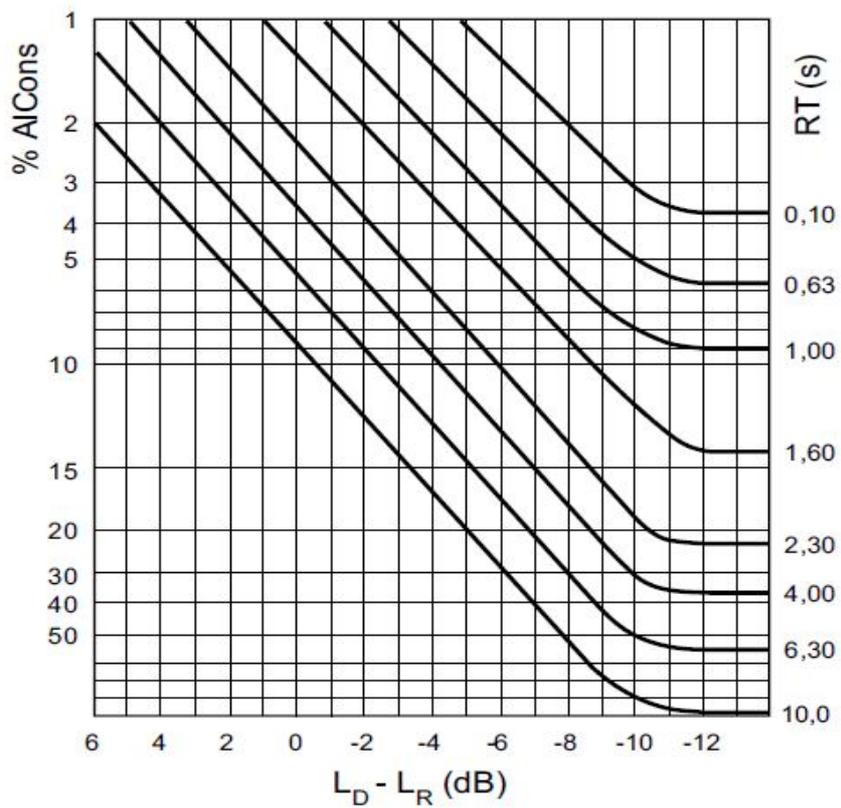


Fig 2.7. %ALCons

%ALCons	STI/RASTI	Valoración Subjetiva
1,4% - 0%	0,84 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,65 - 0,83	Buena
11,4% - 5,3%	0,50 - 0,64	Aceptable
24,2% - 12%	0,36 - 0,49	Pobre
46,5% - 27%	0,24 - 0,34	Mala.

Tabla 2.2 %ALCons, STI y Valoración subjetiva del grado de inteligibilidad de una sal

## Anexo 2

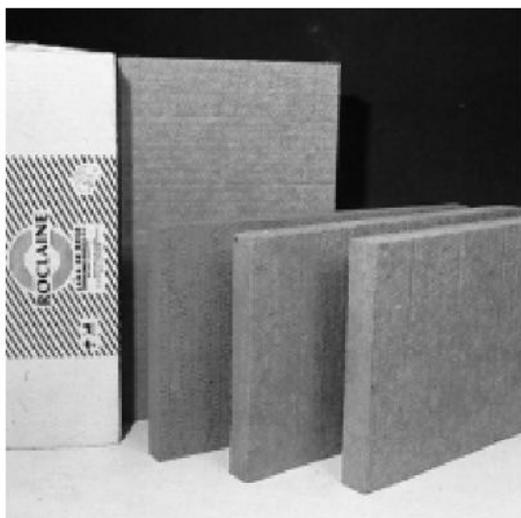


Fig 3.2 Material absorbente a base de lana mineral

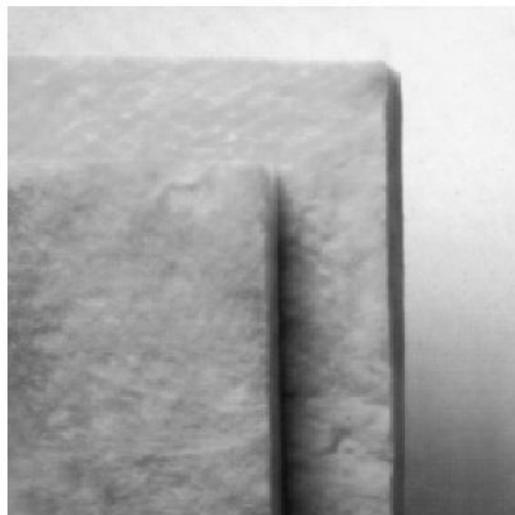


Fig 3.3 Material absorbente a base de lana de vidrio.

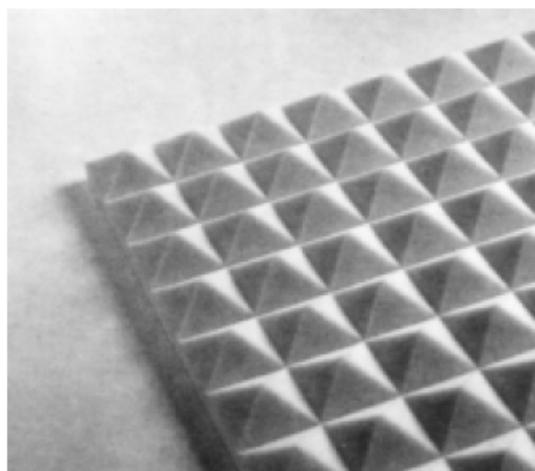


Fig 3.4 Material absorbente a base de espuma de resina de melamina



Fig 3.5 Material absorbente a base de espuma de poliuretano

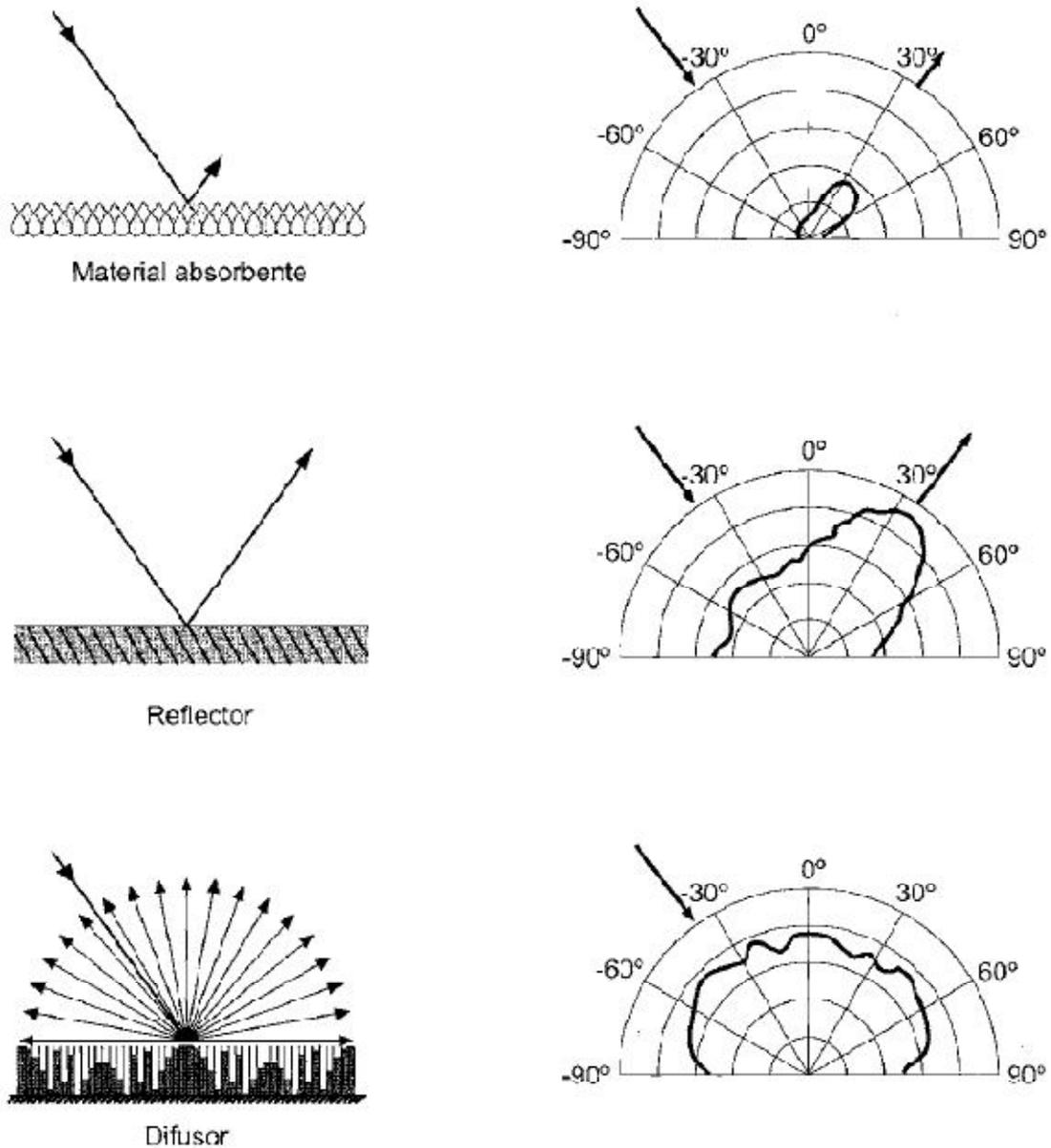


Fig. 3.6 Respuesta de la onda sonora a diferentes tipos de materiales.

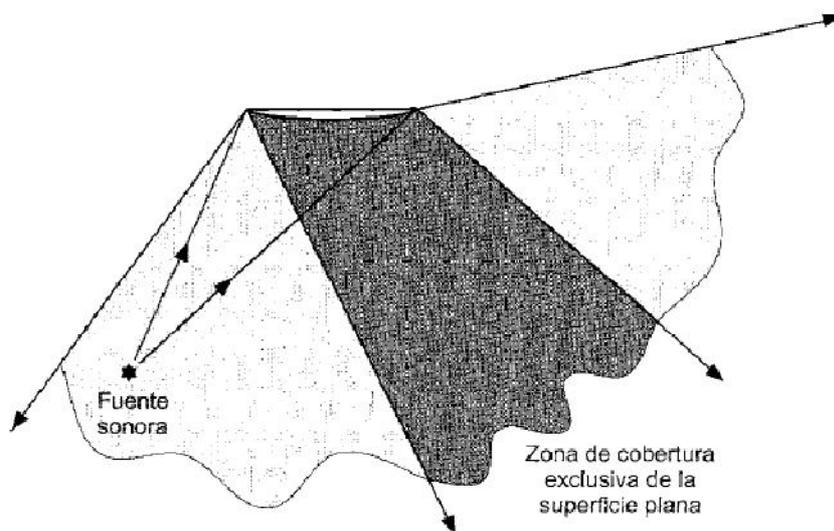


Fig. 3.7 Difusor Poli cilíndrico

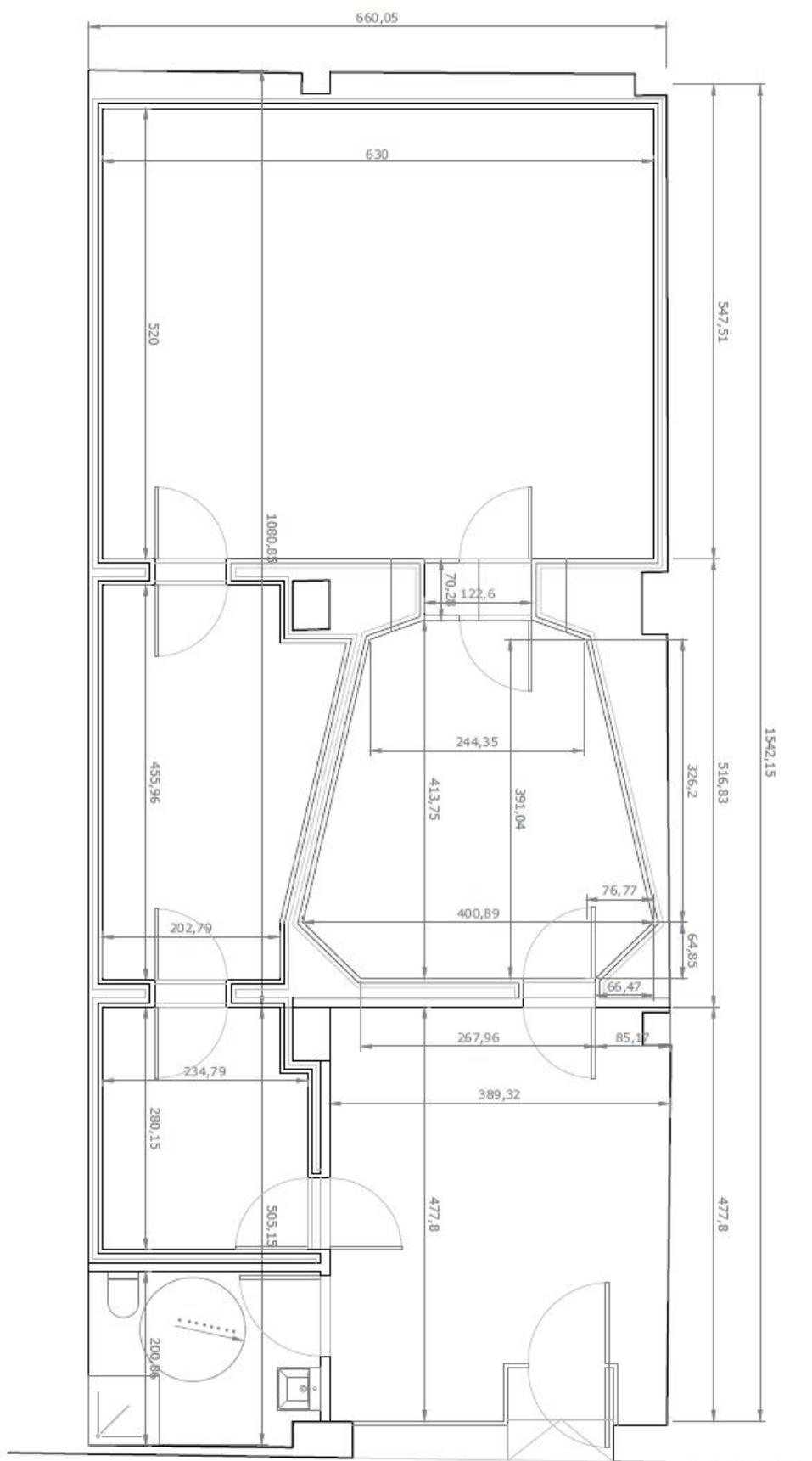


Fig 5.1.1 Plano completo del local.

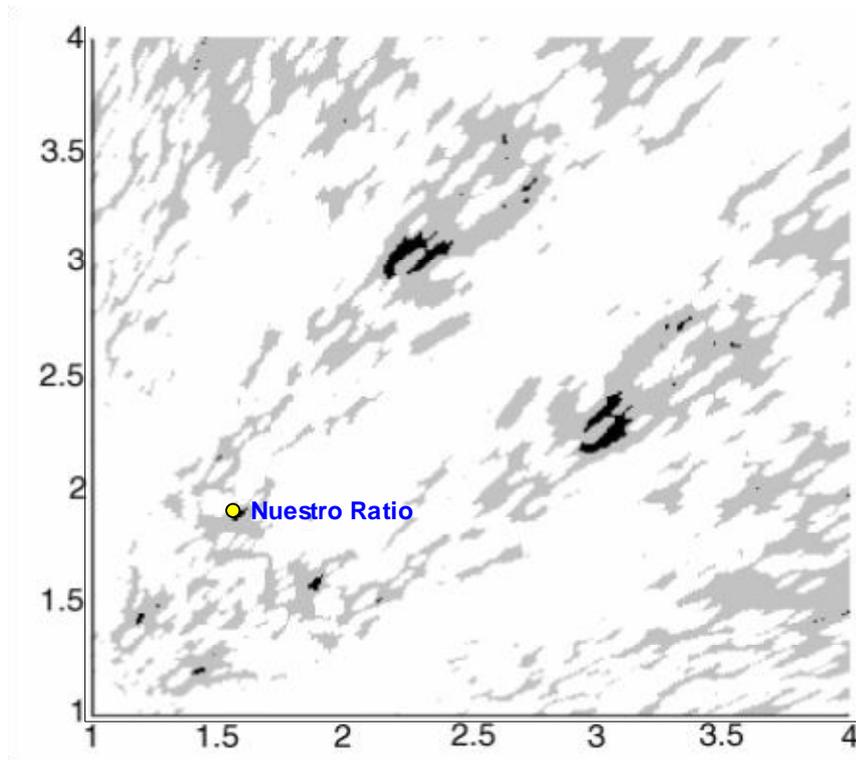


Fig. 5.1.2 Mapa de calor de ratios de tamaño de sala para una mínima resonancia a bajas frecuencias

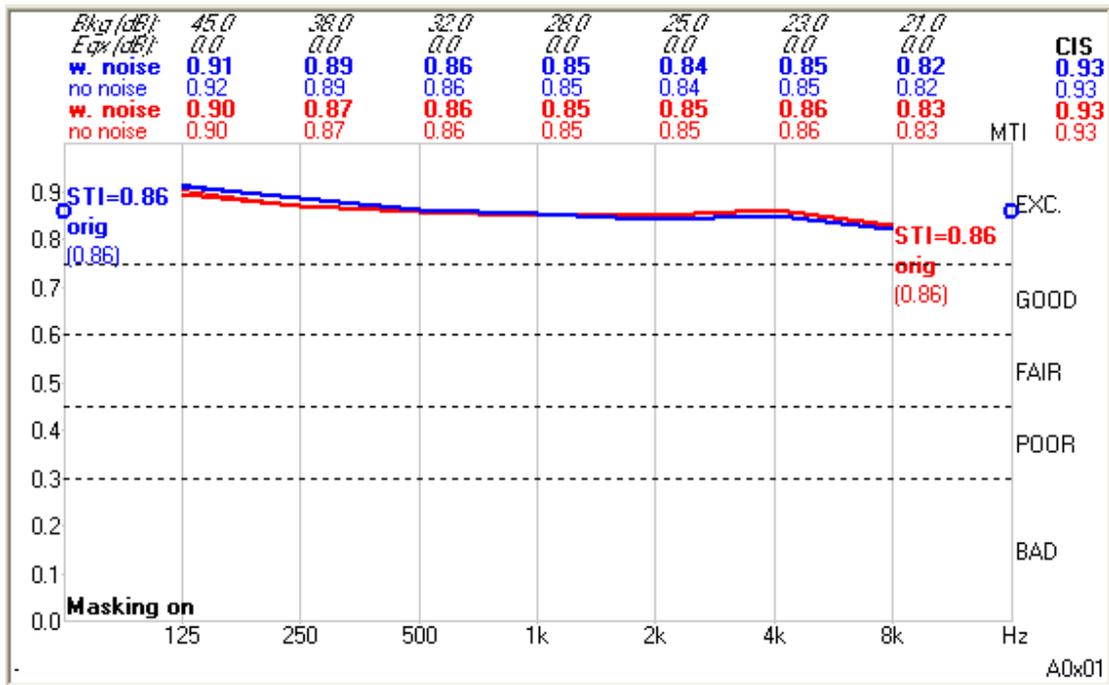


Fig. 5.2.3 Inteligibilidad de la palabra STI de la propuesta 1.

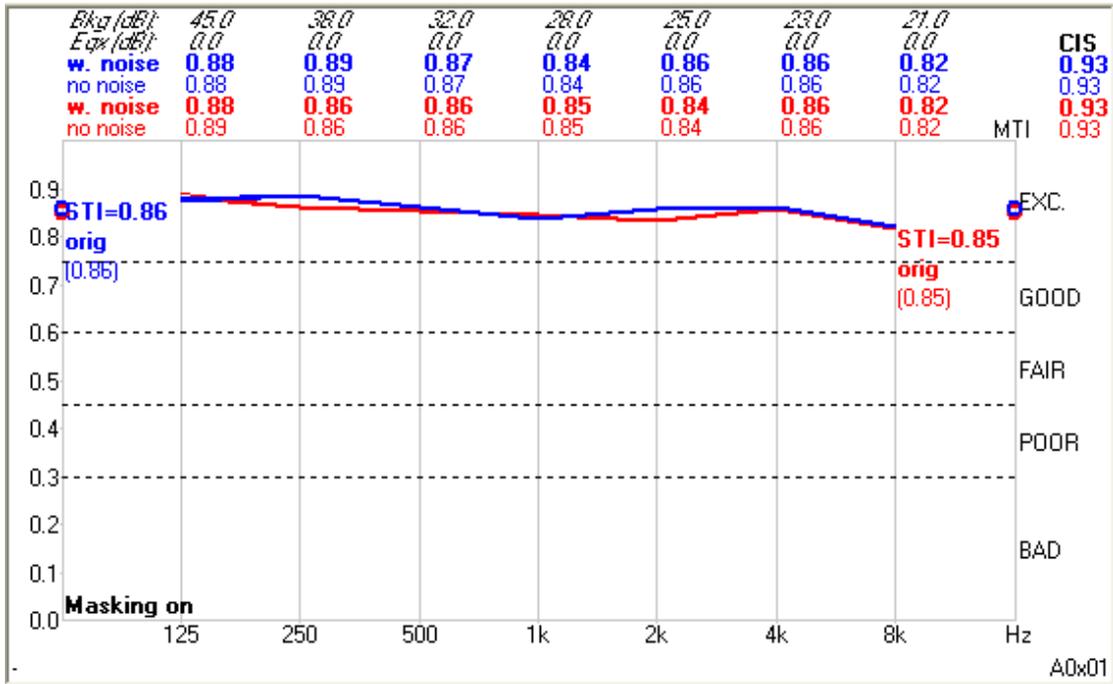


Fig. 5.2.5 Inteligibilidad de la palabra STI de la propuesta 2.

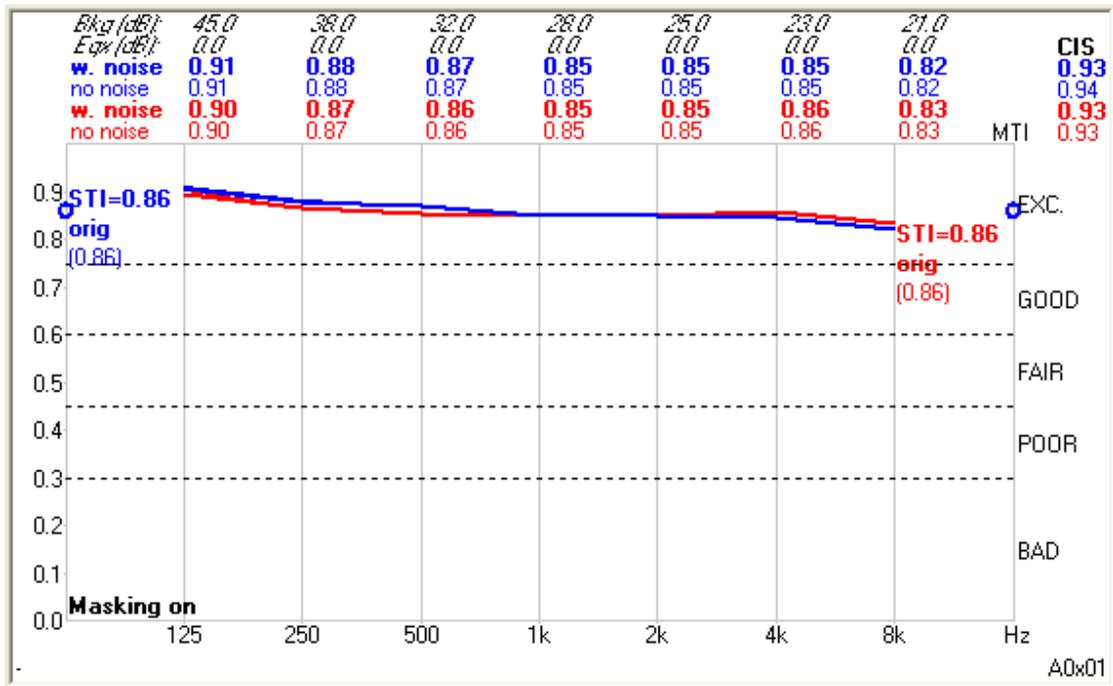


Fig. 5.2.7 Inteligibilidad de la palabra STI de la propuesta 2.

# Bibliografía

- [1] Alton Everest, F. 2001. *The Master Handbook of Acoustics*, Nueva York: McGraw-Hill.
- [2] Basso, Gustavo. 2001. *Análisis Espectral, La transformada de Fourier en la Música*. La plata: Ed. Al Margen.
- [3] Carrión, A. 1998. *Diseño Acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña.
- [4] Fechner, G. 1860. *Elements of psychophysics*. Nueva York: Holt, Rinehart and Winston.
- [5] Fowler Dip, R.J.A. 1990. *Guide to acoustic practice*. Londres: British Broadcasting Corporation.
- [6] Mendez, Antonio M. 1994. *Acústica Arquitectónica*. Buenos Aires: UMSA.
- [7] Miyara, Federico. 2006. *Acústica y Sistemas de Sonido*. Bogotá: UNR Editora.
- [8] Tribaldos, Clemente. 1993. *Sonido Profesional*. Madrid: Editorial Paraninfo.

## Referencias

### Capítulo 2

- Fig. 2.1: Magallanes, C. 2001. Recurso web de la Universidad Nacional de San Luis. <<http://biblioteca.unsl.edu.ar/website/baea/prof-cs/numero14/index.html>>
- Fig. 2.2: Maggiolo, D. Apuntes de Acústica Musical. Recurso web de la Escuela Universitaria de Música de la República de Uruguay. <<http://www.eumus.edu.uy/docentes/maggiolo/acuapu/umb.html>>
- Fig. 2.3: Miyara, F. Niveles Sonoros. Recurso web de la Universidad Nacional de Rosario. <<http://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>>
- Fig. 2.4: Arribas, J.I. Índices de Valoración de Ruido. Recurso web de la Universidad de Valladolid. <[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_04\\_05/io6/public\\_html/Indice.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_04_05/io6/public_html/Indice.html)>
- Fig. 2.5: Reverberation. Recurso web del SAE Institute. <[http://www.sae.edu/reference\\_material/audio/pages/Reverb.htm](http://www.sae.edu/reference_material/audio/pages/Reverb.htm)>
- Fig. 2.6 y 2.7: Carrión, A. 1998. *Diseño Acústico de espacios arquitectónicos*. Barcelona: Universidad politécnica de Cataluña.

### Capítulo 3

- Fig. 3.2 y 3.3: Cortesía de Cristalería Española, S.A.
- Fig. 3.4 y 3.5: Cortesía de Macco, S.L
- Fig. 3.1, 3.6 y 3.7: Carrión (1998).

### Capítulo 4

- Fig 4.2.1, 4.2.2 y 4.2.3: Fowler Dip, R.J.A. 1990. Guide to acoustic practice. British Broadcasting Corporation, Londres.
- Fig. 4.3.1: Cortesía de Rockfon, S.A
- Fig. 4.3.2: Cortesía de Isover, S.A.
- Fig. 4.4.1, 4.4.2, 4.4.4: Cortesía de EZacoustic, S.A.
- Fig. 4.4.3, 4.4.5, 4.4.6, 4.4.7, 4.4.8 y 4.4.9: Cortesía de Auralex, S.A.
- Fig. 4.5.1, 4.5.2, 4.5.3, 4.5.4 y 4.5.5: Gráficos generados mediante la simulación en CATT Acoustic.