

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA
I.T. Telecomunicación (Sonido e Imagen)



**UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA**



**ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR DE GANDIA**

**“Acondicionamiento acústico del
comedor del Colegio Público Sant Pere
Apóstol. L'Alqueria de la Comtessa”**

TRABAJO FINAL DE CARRERA

**Autor/es:
ISABEL MARINA SÁNCHEZ TORMO**

**Director/es:
JESUS ALBA FERNANDEZ
ROMINA DEL REY TORMOS**

GANDIA, 2012

A mis padres Enrique y Maribel

AGRADECIMIENTOS

A todos los que me han aportado conocimientos y ánimos para que este proyecto se realizara con éxito.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN
 - 1.1 Problema y objetivo
 - 1.2 Descripción del proyecto

2. DESARROLLO TEORICO
 - 2.1 Teorías para el estudio del campo acústico en recintos
 - I. Teoría estadística
 - II. Teoría geométrica
 - III. Teoría ondulatoria
 - IV. Teoría psicoacustica

 - 2.2 Acondicionamiento acústico
 - 2.3 Absorción acústica

3. ESTUDIO DE LA SALA
 - 3.1 Descripción de la sala
 - 3.2 Descripción del equipamiento utilizado para la medida del TR
 - 3.3 Plano de la distribución de las fuentes y micrófonos
 - 3.4 Medida del TR
 - 3.5 Resultados de las medidas del tiempo de reverberación en la sala.

4. SIMULACIÓN
 - 4.1 Descripción del procedimiento seguido
 - 4.2 Resultados de la sala original con Catt Acoustic
 - 4.3 Propuesta:
 - 4.3.1 Descripción de los materiales introducidos
 - 4.3.2 Descripción de la posición y de la instalación de materiales
 - 4.3.3 Simulación

5. RESULTADOS FINALES

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS

7. BIBLIOGRAFÍA

ANEXO I: Tablas cálculo T30, T20

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema y objetivo.

Actualmente el nivel de ruido que soportan los niños en el comedor de los colegios es elevado, por la falta de un tratamiento acústico adecuado del recinto. En este proyecto se plantea el análisis de las condiciones acústicas en el comedor del Colegio Público Sant Pere Apóstol en L'Alquería de la Comtessa.

Se han realizado mediciones para comprobar la situación actual del recinto y así proponer soluciones al respecto que mejoren las condiciones acústicas de este. Utilizando materiales reciclados y novedosos, como son las cortinas acústicas, en fase de prueba.

1.2. Descripción del proyecto.

El proyecto propuesto ha consistido en el estudio acústico del comedor del colegio Sant Pere Apóstol. Para ello se ha medido el tiempo de reverberación que hay en el recinto en base a la norma ISO 3382. Una vez obtenidos los resultados del estudio acústico de la sala, se ha propuesto una solución al problema acústico que presenta esta. Para ello se ha hecho uso del software Catt Acoustics, que nos permite una simulación real de la acústica de la sala. En base a los resultados obtenidos, se ha creado una solución al problema, mediante este mismo programa, introduciendo materiales que nos proporcionan una respuesta acústica óptima en el recinto tratado.

2. DESARROLLO TEORICO

2.1. TEORIA PARA EL ESTUDIO DEL CAMPO ACÚSTICO EN RECINTOS

En el proceso de radiación y recepción del sonido, el recinto es el elemento más importante en la transmisión sonora. Pues la calidad acústica del recinto, influye directamente en el sonido percibido.

En referencia a la percepción auditiva, que la fuente sonora esté en un espacio ilimitado o en un recinto cerrado, puede hacer que los cambios en el campo acústico sean positivos o negativos.

La reverberación que acompaña a cada impulso en una señal irregular (palabras en nuestro caso) puede ser útil cuando la duración es la óptima, escuchándose con más claridad. Sin embargo, si la reverberación es grande, crea inteligibilidad en la palabra, empeorando la audición al tener menor calidad.

Por tanto, para poder hacer frente a los problemas que puede ocasionar la acústica de un recinto, existen varias teorías para su estudio.

I. Teoría estadística

Esta teoría permite entender los conceptos básicos de los procesos sonoros y obtener un modelo matemático.

La teoría estadística considera *'el campo sonoro como aquel que consta de un gran número de ondas reflejadas por las superficies interiores del recinto y dispersa en diferentes direcciones, a lo largo de las cuales se transfiere la energía sonora'*.

Cuando se generan ondas sonoras dentro de un recinto, estas se reflejan en sus superficies, perdiendo parte de su energía en cada reflexión. Esta pérdida de energía se debe al cambio de medio de la onda. Es decir, cuando una onda pasa de un medio a otro diferente, este último absorbe parte de su energía. Según el material o recubrimiento de la pared interior, este podrá absorber más o menos el sonido. De esta forma se determina la capacidad de absorción de los diferentes materiales, mediante el coeficiente de absorción sonora:

$$\alpha = \frac{I_a}{I_i}$$

α : Coeficiente de absorción sonora

I_a : Energía absorbida por el medio

I_i : Energía incidente sobre la superficie del medio

Si se supone que la absorción de energía sonora en los límites de un recinto se realiza de forma continua, a partir de la ley de conservación de la energía se puede afirmar que, la razón del decrecimiento de energía en un recinto, es la diferencia entre la energía radiada por la fuente por unidad de tiempo, y la energía absorbida en el tiempo:

$$V \frac{de}{dt} = W_o - W_a$$

V: volumen del recinto

e : densidad de energía sonora

W_o : Energía radiada por la fuente por unidad de tiempo

W_a : Energía absorbida por el recinto por unidad de tiempo

La energía sonora que existe en un recinto, se puede expresar como el producto de la energía por el volumen. Y la energía absorbida después de cada reflexión como $\alpha \cdot e \cdot V$

Incrementándose la pérdida total de energía, por el número de veces que tienen lugar reflexiones análogas por unidad de tiempo.

La pérdida de energía en la unidad de tiempo será:

$$W_a = \bar{\alpha} \cdot e \cdot V \cdot \frac{cS}{4V} = \frac{c\bar{\alpha}S}{4V} \cdot e \cdot V = \delta \cdot V \cdot e = \frac{cA}{4} \cdot e$$

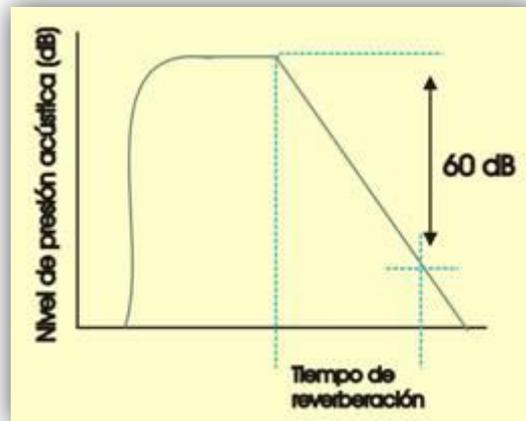
$\delta = \frac{c\bar{\alpha}S}{4V}$: Índice de decrecimiento de energía sonora

$\frac{1}{\delta}$: Constante de tiempo del proceso

A partir de la ecuación anterior podemos obtener la expresión para la densidad de la energía sonora:

$$e = \frac{4W_o}{c\bar{\alpha}S} (1 - e^{-\delta t})$$

Esta ecuación describe el 'proceso de crecimiento de la energía sonora en un recinto'. La cual se representa gráficamente de la siguiente forma:



*Proceso de crecimiento y disminución de la energía sonora en un recinto

El proceso de crecimiento de la energía sonora en un recinto es generalmente exponencial. A medida que transcurre el tiempo, el término exponencial disminuye aproximándose rápidamente a cero. Por lo que la densidad de energía se hace constante, es decir, densidad de energía en estado estacionario.

La siguiente expresión representa el equilibrio entre la energía radiada por la fuente y la absorbida por el recinto, cesando el crecimiento de energía:

$$e = \frac{4 W_o}{c \bar{\alpha} S} = e_o$$

e : Densidad de energía sonora

W_o : Energía radiada por la fuente por unidad de tiempo

$\bar{\alpha}$: Coeficiente medio de absorción sonora

S : Superficie del recinto

El proceso de crecimiento de la energía sonora en un recinto, se representa de forma que la densidad de la energía se expresara en una escala logarítmica sobre el eje vertical.

El proceso de disminución de la energía sonora en un recinto es conocido como *reverberación*, que es el fenómeno por el cual el sonido permanece en un espacio durante un tiempo determinado, tras cesar la fuente sonora. El tiempo que la señal necesita para reducirse hasta el umbral de audición es el *tiempo de reverberación*, que es utilizado en la teoría estadística como un factor que facilita la evaluación de las propiedades acústicas de un recinto.

El tiempo de reverberación, además de estar relacionado con los factores que caracterizan el recinto, también lo está con la densidad de energía inicial e_0 . Si este valor crece, más largo será el tiempo necesario para que el sonido caiga hasta el umbral de audición.

Wallace Walter Sabine (1868-1919) propuso el *tiempo de reverberación normalizado* 'T'. El cual se puede definir como el tiempo empleado por la energía sonora en un recinto para disminuir a 10^{-6} veces su valor original, (el equivalente a disminuir 60 dB el nivel de energía sonora)

$$t_R = \frac{0,162V}{A}$$

*Tiempo de reverberación. Fórmula de Sabine

t_R : Tiempo de reverberación

V: Volumen del recinto

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{0,m,j} + 4 \cdot \overline{m_m} \cdot V$$

$\alpha_{m,i}$: Coeficiente de absorción acústica medio de cada paramento.

S_i : Área de las superficies que conforman la sala(suelo, techo, paredes, ventanas, puertas, etc.), cuyo coeficiente de absorción es α_i (m^2).

$A_{o,m,j}$: Área de absorción acústica equivalente media de cada mueble fijo absorbente diferente (m^2)

$4 \cdot \overline{m_m} \cdot V$: Absorción acústica inducida por el aire del recinto, en función de su volumen. Este sumando solo se utiliza para recintos mayores a $250m^3$ y es despreciable para recintos más pequeños.

La formula de Eyring, se puede expresar como:

$$t_R = \frac{0,161V}{-S \ln (1 - \bar{\alpha})}$$

II. Teoría geométrica

En la teoría geométrica, el campo sonoro se considera una combinación de rayos que representan las ondas sonoras, a lo largo de los cuales se propaga la energía sonora.

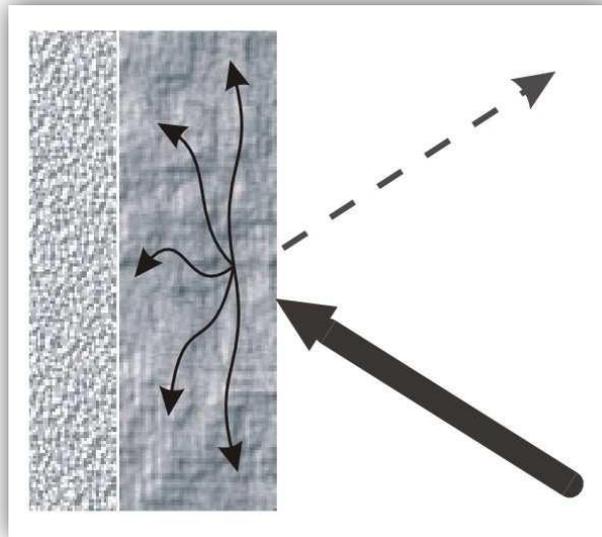
Esta teoría nos permite determinar los puntos de incidencia de las ondas sobre las superficies límites del recinto, así como las pérdidas de energía producidas por la absorción que ejercen los materiales que cubren la superficie del mismo.

Según el principio de Fermat, “las ondas se propagan desde la fuente al receptor recorriendo el camino más rápido, no el más corto. Pero si la velocidad de sonido es uniforme, el camino más rápido coincide con el más corto”. Es decir, en propagación libre sería una línea recta, fenómeno común en las salas, generándose rayos sonoros en diferentes direcciones. De esta forma, la potencia total generada por una fuente, se divide en partes, según los rayos sonoros generados. Sin tener necesariamente cantidades iguales de potencia.

Esta ley de propagación de la onda en línea recta, se ve alterada cuando la onda encuentra cambios en el medio a través del cual se propaga.

Cuando en el recorrido del rayo se sitúa un obstáculo, parte de la energía acústica incidente retorna, dando lugar al fenómeno de la *reflexión*.

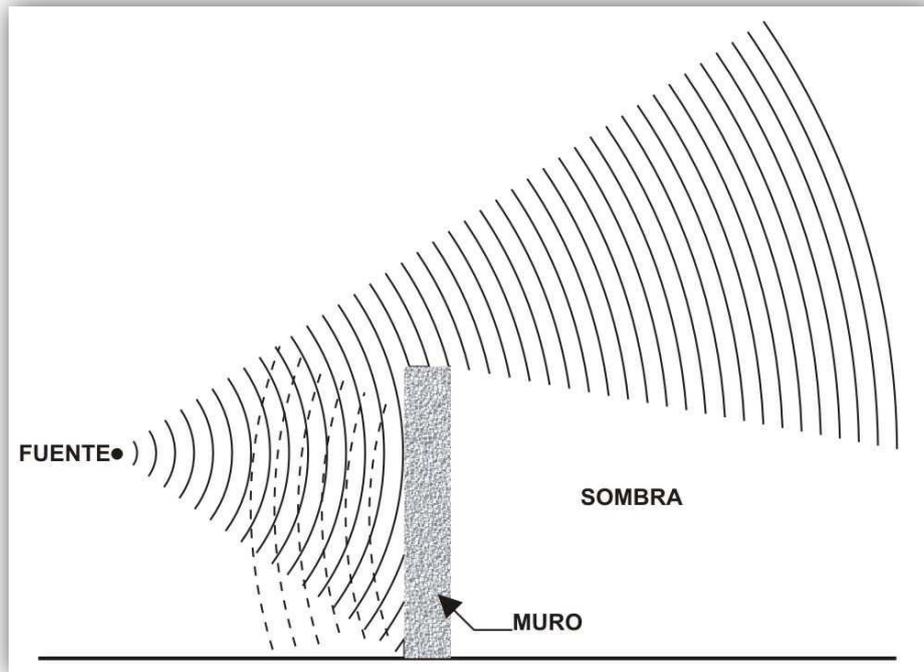
Si el obstáculo es pequeño, habrá otra onda que se propaga más allá del obstáculo en la dirección original.



*Reflexión

Si algunas ondas alcanzan la zona situada detrás del obstáculo, deben hacerlo redondeándolo, separándose por tanto de la propagación en línea recta. Produciéndose de esta forma el fenómeno de la *difracción*.

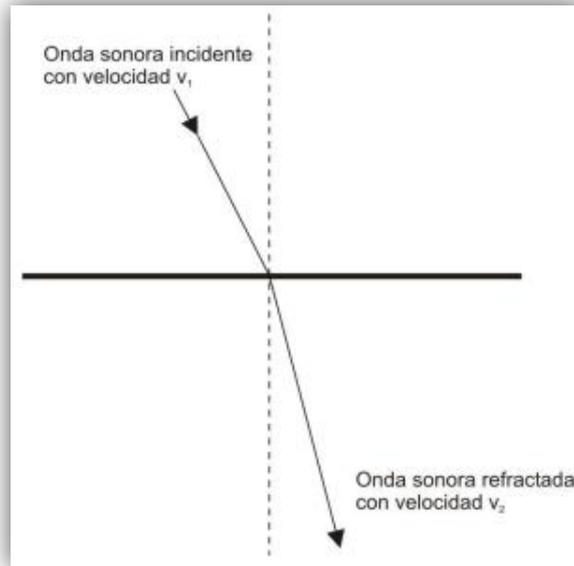
Si el obstáculo es bastante grande, las ondas sonoras se ven rechazadas en su totalidad por el obstáculo. A este comportamiento se le conoce como *sombra*. Los límites de la zona de sombra están determinados por rayos tangenciales, que partiendo de la fuente, alcanzan la periferia del obstáculo.



*Sombra

En acústica existe la dificultad de tratar con longitudes de ondas largas y cortas. Las longitudes de onda largas se curvan alrededor de la mayor parte de los obstáculos, y continúan avanzando, pero se reflejan especularmente en una superficie rugosa, como si esta estuviera pulida. Por otro lado, las ondas cortas pueden producir sombras, y se reflejan difusamente, en todas direcciones, por una superficie rugosa.

La Refracción se produce cuando existe un cambio de dirección en la onda sonora al pasar de un medio a otro con distintas propiedades mecánicas. Este cambio se produce por la variación que sufre la velocidad de la onda sonora.



*Esquema de refracción de una onda sonora

Haciendo uso del rayo sonoro y las reglas de la reflexión especular, podemos analizar el curso del sonido alrededor de una sala, mediante un *diagrama de rayos*.

En definitiva, la teoría geométrica, se utiliza para determinar puntos acústicamente conflictivos, como pueden ser focalizaciones de sonido. Esta teoría también es útil para calcular los retrasos relativos entre la señal directa y las reflexiones, y analizar el efecto de ecos o reflexiones problemáticas.

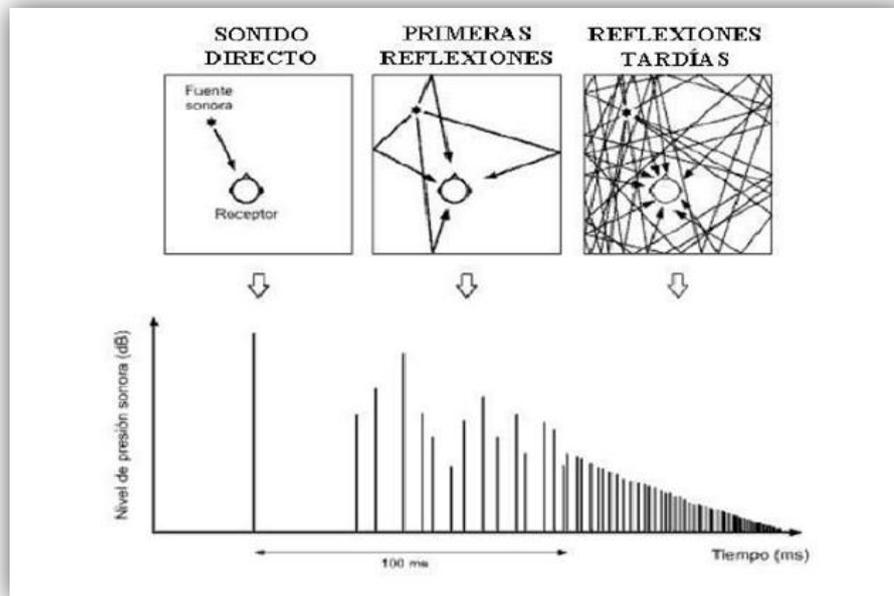
El *eco* es uno de los fenómenos más importantes dentro de las reflexiones acústicas.

Se puede decir que el eco es la primera reflexión perceptible por el oído humano. Esto ocurre para los rayos reflejados que tengan una diferencia de tiempo de vuelta al punto inicial, con el rayo directo mayor de 50ms, siendo este el tiempo de respuesta medio del oído humano.

Conociendo la velocidad del sonido podemos traducir este tiempo en la diferencia de caminos necesaria entre el sonido directo y la reflexión para producir esta diferencia de 50ms siendo la misma: $0,05s \cdot 340m/s = 17m$

Las primeras reflexiones existentes en un recinto se denominan reflexiones de primer orden. A su vez los rayos que se reflejan dos veces, es decir, en dos cerramientos distintos, serán reflexiones de segundo orden y así sucesivamente.

Los *ecogramas* consisten en la representación gráfica, nivel de presión respecto al tiempo, del sonido directo y las reflexiones de n-ésimo orden. Es la manera más común de hacer el estudio del eco.



*Obtención de un ecograma a partir del sonido directo y las reflexiones producidas en una sala

Cuando existe una repetición múltiple en un breve intervalo de tiempo, de un sonido generado por una fuente sonora, se le llama *eco flotante*. Suele aparecer cuando se sitúa la fuente entre dos superficies lisas, paralelas y muy reflectantes.

Las focalizaciones se producen cuando una superficie reflectante agrupa una gran parte de los rayos sonoros en una zona o punto determinado.

Se deben evitar, a no ser que sean intencionadas, para redirigir una cantidad de rayos a una zona concreta.

III. Teoría ondulatoria

Se puede considerar el volumen de aire existente en una sala, como un sistema vibratorio complejo, formado por una combinación de multitud de sistemas simples. La teoría ondulatoria se basa en la naturaleza ondulatoria del sonido, para caracterizar el campo sonoro en el interior de un recinto, mediante la resolución de la *ecuación de ondas*.

El espacio de un recinto se comporta como un sistema vibratorio excitado mediante la señal de la fuente sonora. El estudio de este proceso ondulatorio permite comprender la forma en la que estas ondas influyen en las propiedades acústicas del recinto.

Las soluciones de la ecuación de ondas se denominan *modos propios* y se producen a la *frecuencia de resonancia*. Tanto los modos propios como su frecuencia de resonancia dependen de la geometría y de las dimensiones de la sala.

$$\left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

*Ecuación de ondas

En una sala hay infinitos modos, localizados en distintas frecuencias y cuya densidad aumenta con las mismas. La distribución de estos modos en frecuencias, dependerá de las características del recinto y deberá ser lo más uniforme posible, para evitar la coloración del sonido.

El fenómeno de la coloración, se produce cuando hay una concentración de modos en la banda estrecha de frecuencias. Pero, a partir de la frecuencia máxima esta coloración del sonido no será apreciable, ya que la densidad de los modos aumenta con la frecuencia.

IV. Teoría psicoacústica

La conexión entre el estímulo acústico y la vivencia sonora es comúnmente complicada, no solo por la complejidad de la señal acústica, sino también por las peculiaridades con las que el oído humano procesa la audición. La teoría psicoacústica estudia la percepción del sonido desde la percepción sonora subjetiva y describe la manera en que se perciben las cualidades del sonido, la percepción del espacio a través del sonido, el fenómeno del enmascaramiento, etc.

La investigación de los efectos subjetivos de los campos sonoros puede realizarse de varias formas. Una de ellas sería juzgando la calidad acústica de la sala por personas apropiadas, como músicos u otros oyentes experimentados. La otra forma sería sintetizando los campos sonoros, con parámetros suficientemente definidos, en cámaras anecoicas y juzgándolos subjetivamente.

La manera en que el ser humano percibe el sonido depende del hecho físico de que cuenta con dos oídos. La *escucha binaural* es la responsable de la percepción de la dirección del sonido, por eso el oído tiene ese conducto que lo lleva al caracol o también conocido como viruelita.

Las necesidades de los recintos deben ser el punto de partida para una medida de la calidad sonora de la palabra o de la música, no pudiendo ser idénticas para todos los recintos. Para conseguir una buena calidad de transmisión de palabra, se exige claridad e inteligibilidad. Mientras que para escuchar música se requieren condiciones diferentes, que suponen menos claridad, pero mejor sonoridad.

Por lo que, un recinto de palabra, como el que nos ocupa en este proyecto, deberá tener un tiempo de reverberación (TR) más corto que uno pensado para la audición musical.

Si un local destinado a la palabra tiene un tiempo de reverberación alto, el oyente percibirá a la vez el sonido directo de una sílaba y las reflexiones procedentes de la sílaba anterior con un elevado nivel, lo que puede producir confusión. Un tiempo de reverberación corto, hace que las sílabas aparezcan claras y distintas. Además de elevar el sonido directo de las sílabas en relación con el sonido reverberado, facilitando la inteligibilidad de las palabras, enfatizando las sílabas individuales.

En este tipo de recintos, destinados a la oratoria, además de cumplir las características anteriores, se debe exigir otra condición a solo transmitir correctamente el color tonal de la palabra.

2.2 Acondicionamiento acústico

El acondicionamiento acústico consiste en mejorar la calidad acústica de los recintos, centrándose en el sonido generado y percibido en el mismo.

Está directamente relacionado con la reverberación del recinto y esta, a su vez, con la absorción acústica de este, como se puede apreciar en la expresión formulada por Sabine:

$$t_R = \frac{0,162V}{A}$$

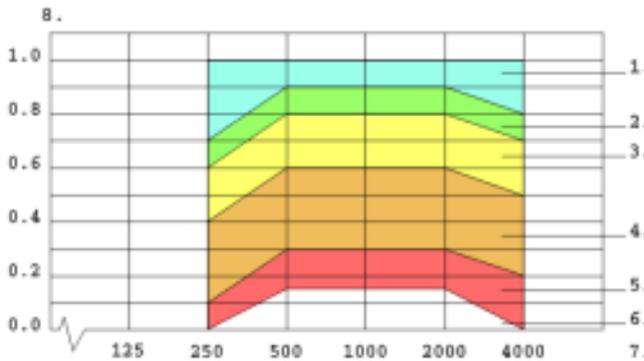
*Tiempo de reverberación. Fórmula de Sabine

Además, el acondicionamiento acústico también está íntimamente relacionado con los materiales que forman parte del recinto a estudiar. En nuestro caso, nos hemos centrado en un novedoso material, las cortinas acústicas.

2.3 Absorción acústica

Según la norma EN ISO 11654, existen varios tipos de absorción acústica, dependiendo del grado de absorción sonora.

En la gráfica que aparece a continuación, se pueden visualizar claramente la clasificación de los absorbentes, dependiendo de su índice de absorción:



1. Absorción de clase A
2. Absorción de clase B
3. Absorción de clase C
4. Absorción de clase D
5. Absorción de clase E
6. Sin clasificar
7. Frecuencia (Hz)
8. Coeficiente de absorción práctico α_p

La clase de absorción A, es la que tiene mayor grado de absorción. Y la clase E, es la que posee la absorción más baja.

La disminución de la reverberación, la eliminación de ecos y focalizaciones y la atenuación de resonancias requiere, como única solución en la mayoría de los casos, el aumento de la absorción acústica.

3. ESTUDIO DE LA SALA

Cuando la energía acústica reflejada tarda mucho en extinguirse o en hacerse inaudible, las nuevas palabras se mezclan con las anteriores, que aún no se han extinguido, lo que genera una mala inteligibilidad y por tanto, un deficiente confort acústico. El objetivo de este proyecto es resolver el problema que genera el elevado tiempo de reverberación que existe en el comedor del Colegio Público Sant Pere Apóstol en L'Alquería de la Comtessa. Para ello, se ha hecho un estudio de las características del lugar basándonos en la norma UNE-EN ISO 3382.

3.1. Descripción de la sala

La sala estudiada es del comedor de un colegio público. Su forma rectangular, con 8,89m de largo, 6,70m de ancho y 2,82m de alto.

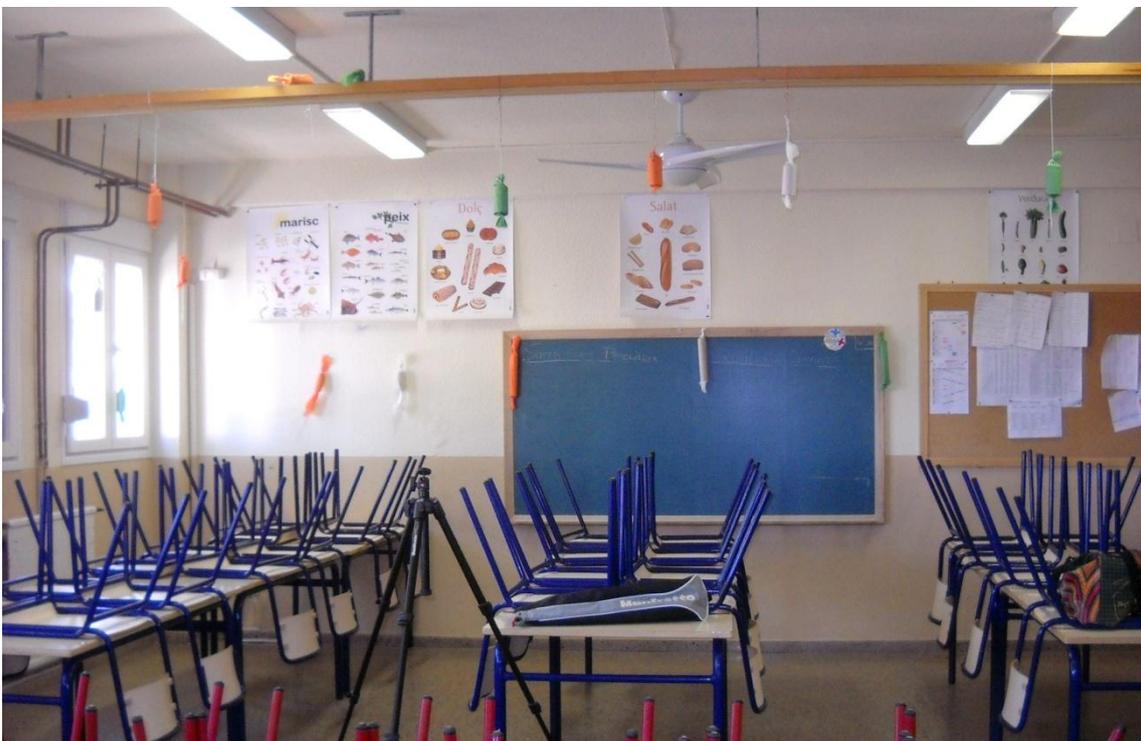
Una pared lateral comunica con el exterior del edificio a través de 6 ventanas de 1x1m. En la pared frontal existe otra ventana que también comunica con el exterior. En el lateral izquierdo de la sala, se encuentra una puerta de acceso a la cocina y junto a ella, una ventana tipo *guillotina* de 1,60x1,20m, que también comunica con la cocina del colegio. En el interior se encuentran 7 mesas de 1,40x0,75m, 3 mesas de 0,55x1,10m, 4 mesas de 0,50x1,20m y una mesa redonda de 1m de diámetro. En la parte frontal hay un mueble de 2,40x1,25m y en el lateral un armario de 0,58x1m.



*Entrada colegio público Sant Pere Apóstol, en L'Alqueria de la Comtessa.



*Pared frontal del comedor



*Pared trasera del comedor



*Pared izquierda del comedor. Acceso a la cocina del colegio público Sant Pere Apóstol

3.2. Descripción del equipamiento utilizado para la medida del TR

- Fuente acústica BRUEL 4224:

El tipo 4224 es una fuente sonora portátil, diseñada específicamente para las medidas constructivas de la acústica, tales como reducción de índice de ruido, de aislamiento de la fachada, reverberación y absorción.



* Fuente acústica BRUEL 4224

- Sonómetro 2270:

Este tipo de sonómetro es un instrumento portátil diseñado para acoger una amplia gama de aplicaciones de medición del sonido y vibración.

Sus aplicaciones abarcan desde la evaluación del ruido ambiental y hasta el control de calidad industrial y estudio de productos y salas.



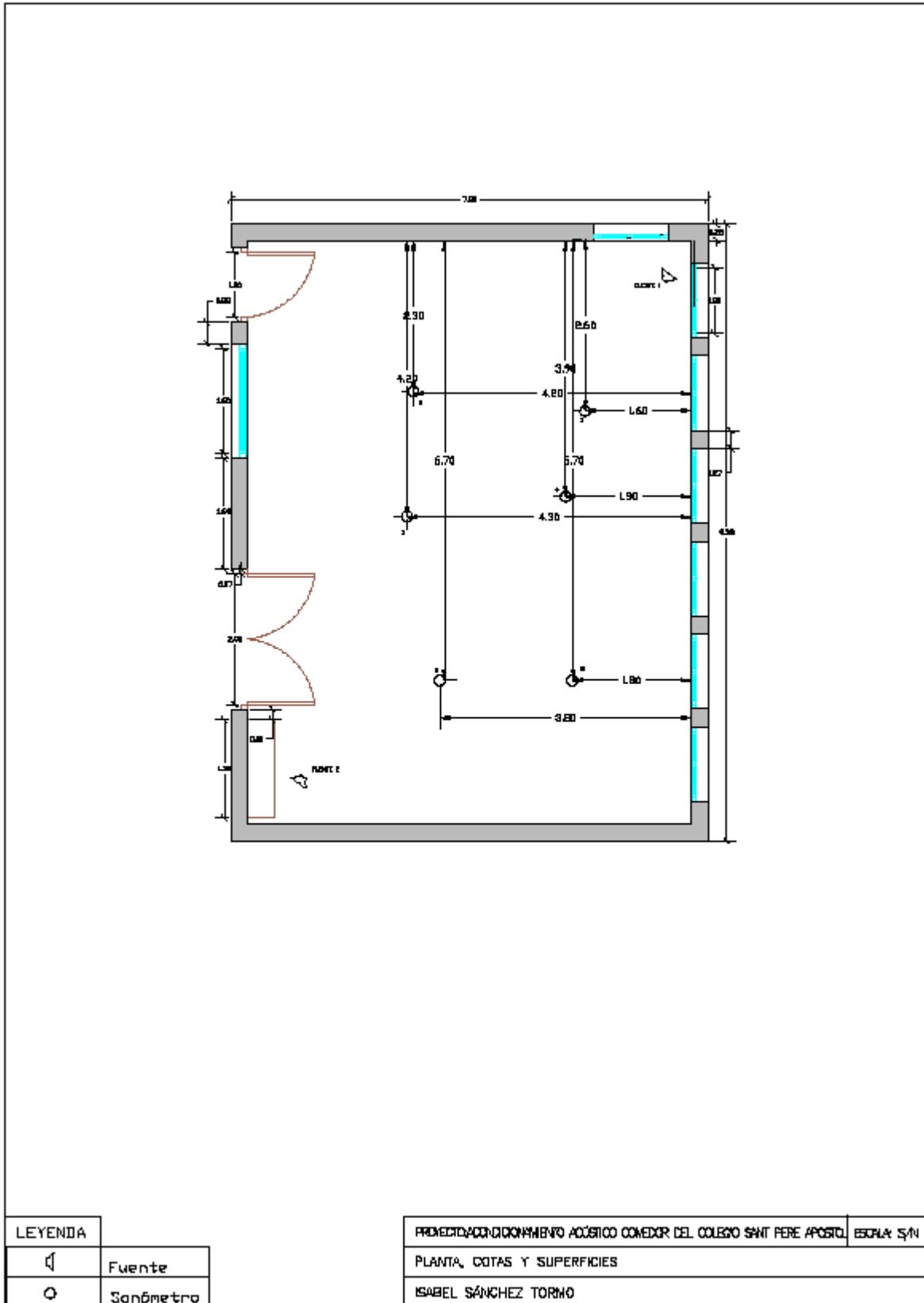
*Sonómetro 2270

3.3 Plano de la distribución de las fuentes y micrófonos

En la tabla se muestra la posición exacta del sonómetro, en las 6 medidas realizadas por cada posición de fuente, respecto a la pared frontal y la pared derecha del mismo. Para poder observar con mayor claridad la distribución del material utilizado en la medida del TR, se ha realizado un plano del comedor del Colegio Público Sant Pere Apóstol, donde se observa claramente la localización de las fuentes, así como la distribución de los sonómetros.

Posición sonómetro	X	Y
1	1,6	2,6
2	4,2	2,3
3	4,3	4,2
4	1,9	3,9
5	1,8	6,7
6	3,8	6,7

*Posición de los micrófonos, respecto de la pared frontal (Y) y la pared lateral derecha (X)



3.4 Medida del TR (procedimiento)

El primer paso para medir correctamente, es calibrar el sonómetro y ajustar todas las variables que necesitamos para la medida del tiempo de reverberación.

En el momento de la medida del TR en la sala, solo había 2 personas en ella. El método utilizado fue el de 'Ruido Interrumpido', con 3 caídas por medida, con un tiempo de caída máximo de 3 segundos. Este método permite obtener curvas de decrecimiento, las cuales expresan el decrecimiento del nivel de presión acústica en un recinto en función del tiempo, una vez que la fuente sonora deja de emitir.

El estudio se ha hecho con frecuencias comprendidas entre 80Hz y 8KHz, en tercios de octava. El generador utilizado era interno y la excitación emitida 'ruido rosa'.

La fuente era omnidireccional, al igual que el micrófono. El registro se hizo con una pendiente de 45°, con un promedio exponencial T30 (30dB) y promedio lineal T20 (20dB).

La combinación de fuente y micro fue de 12 posiciones. Una posición de fuente, por cada 6 posiciones de micro. Con un total de 2 posiciones de fuente y 12 posiciones de micro, evitando siempre situaciones simétricas.

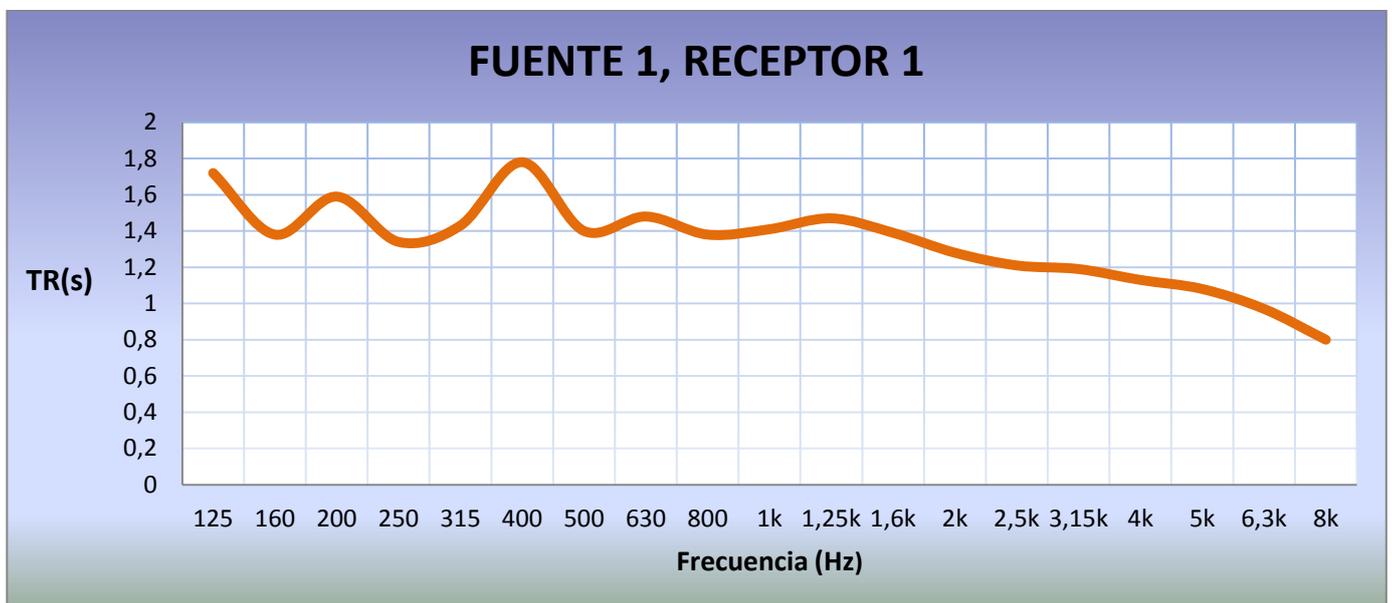
Al realizar las medidas se comprueba que son válidas observando la tabla de espectro del sonómetro. Donde aparecen los valores del Tiempo de Reverberación para cada frecuencia y comprobando de esta forma si la medida es buena o no lo es.

3.5 Resultados de las medidas del tiempo de reverberación en la sala.

Tras la realización de las medidas del tiempo de reverberación (TR) en el comedor del colegio Sant Pere Apóstol, se han obtenido los datos del TR en función de la frecuencia captados por el sonómetro en sus diferentes posiciones.

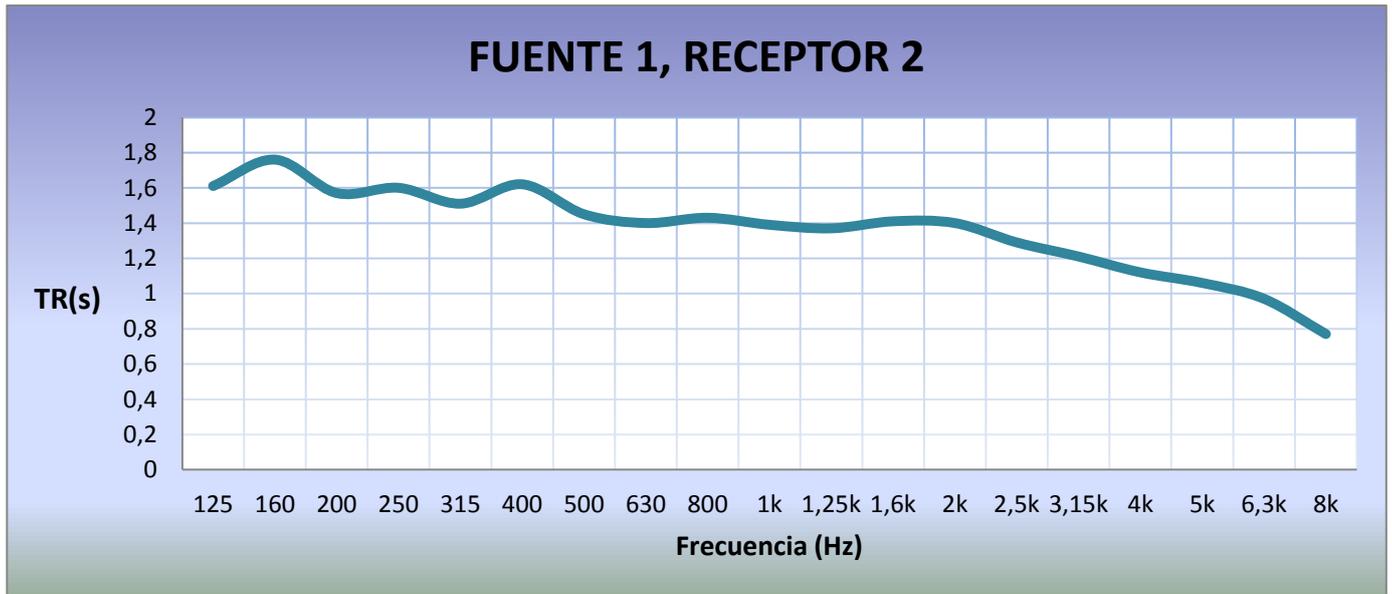
Para el análisis de los datos nos hemos centrado en el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en caer de -5 a -35dB. A este tiempo se le conoce como T30. Para poder hacer más cómodo el análisis de los datos obtenidos tras las medidas en el recinto, se han realizado gráficas que representan los datos obtenidos en cada una de las 6 posiciones distribuidas por la sala del sonómetro, para cada fuente sonora.

En primer lugar se muestran las 6 gráficas que representan los resultados de las medidas captadas en cada posición de sonómetro, con la primera fuente.

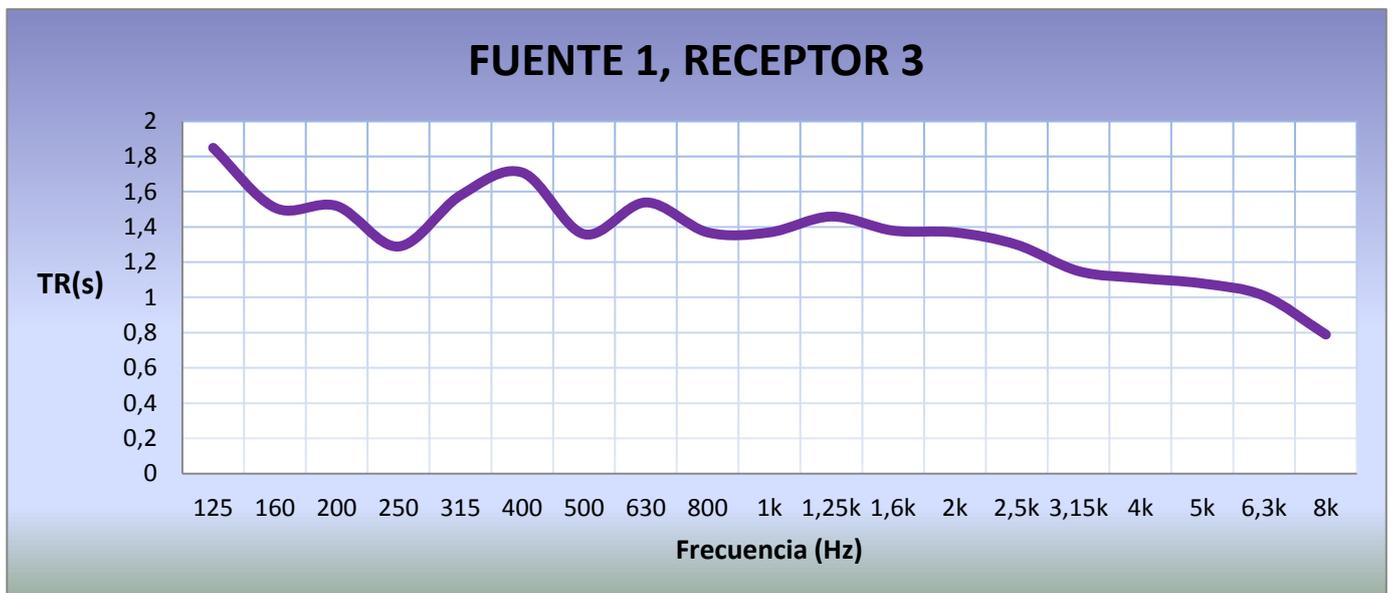


*TR captado por el sonómetro en la posición 1 y la fuente 1

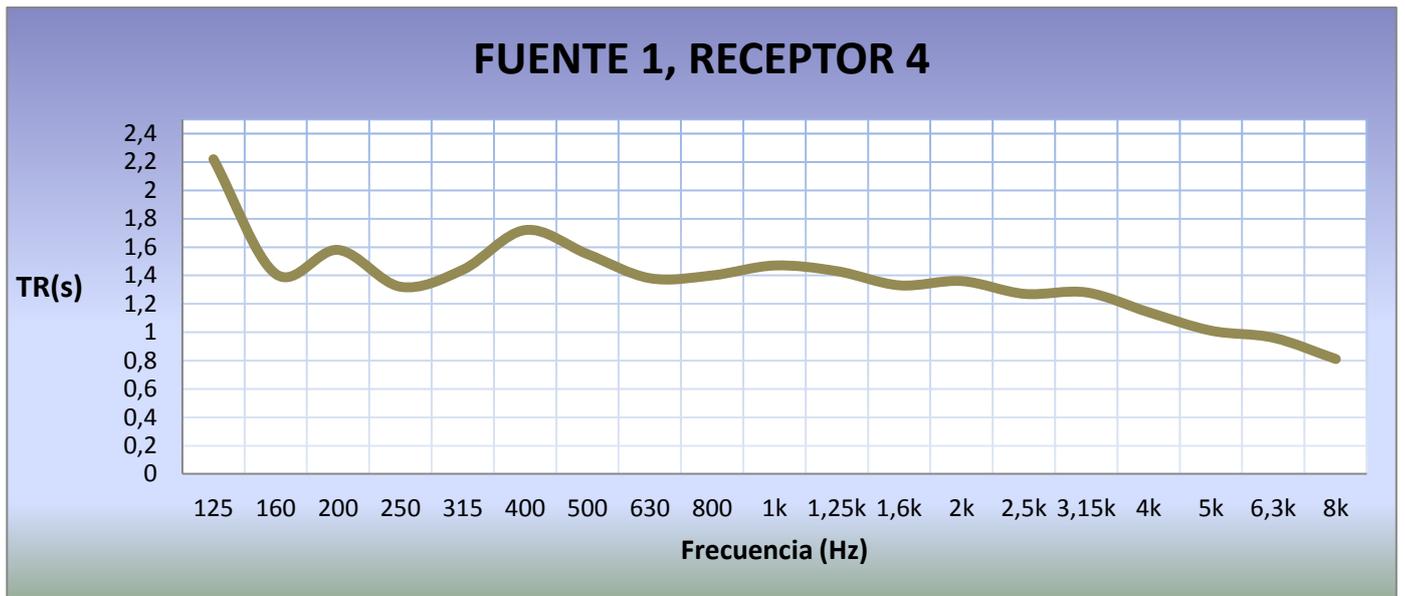
En la gráfica anterior, así como en las siguientes, tanto para la fuente en posición 1 como en posición 2, se aprecia claramente la tendencia que existe en el TR de la sala a disminuir conforme aumenta la frecuencia. No obstante, esta es una sala en la que no existen diferencias muy abruptas del TR entre las frecuencias, y muestra un comportamiento de tendencia lineal en las frecuencias centrales.



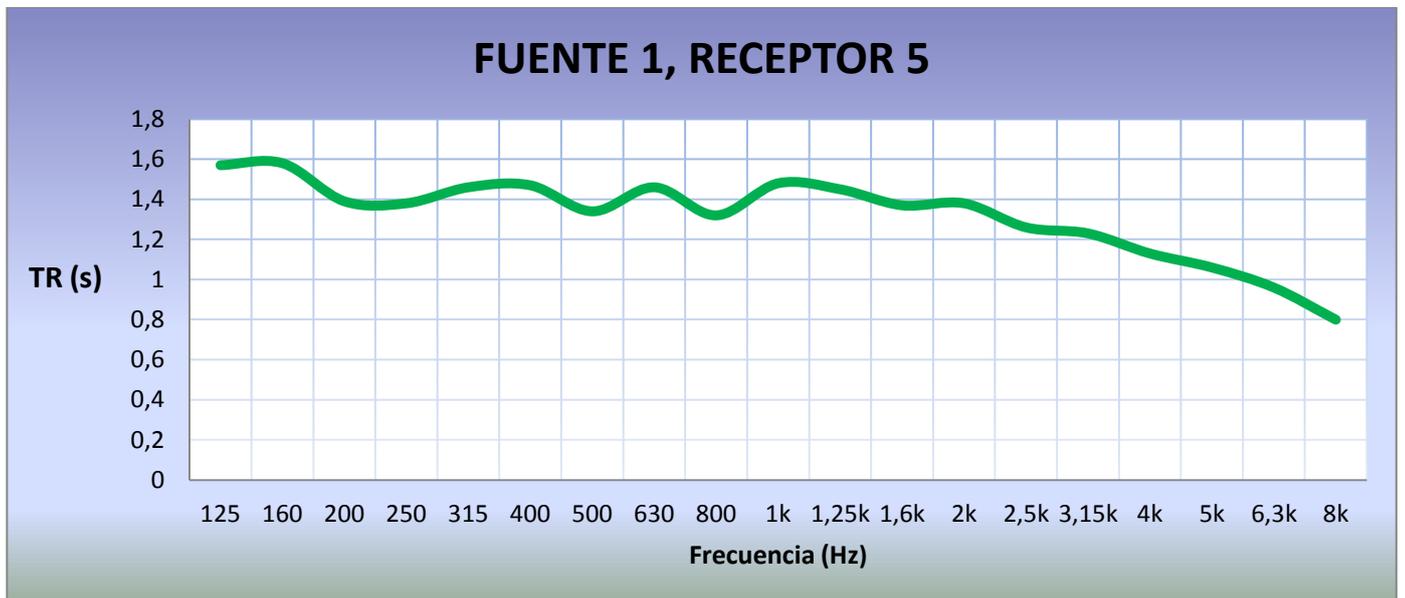
*TR captado por el sonómetro en la posición 2 y la fuente 1



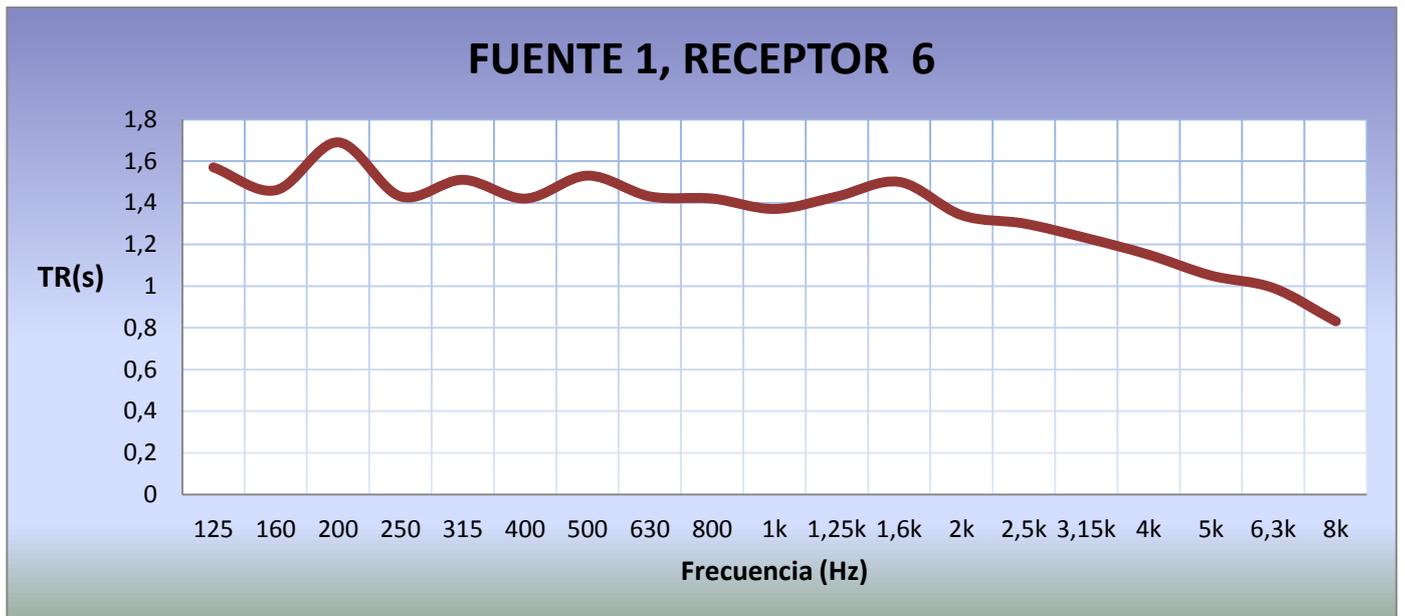
*TR captado por el sonómetro en la posición 3 y la fuente 1



*TR captado por el sonómetro en la posición 4 y la fuente 1

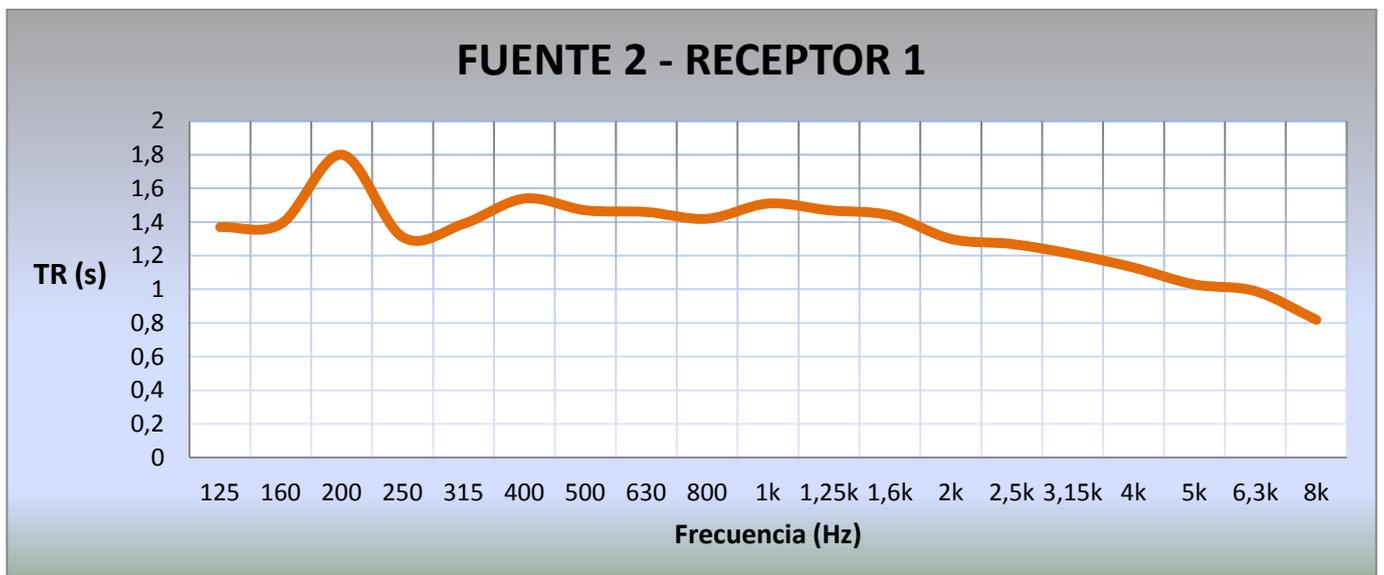


*TR captado por el sonómetro en la posición 5 y la fuente 1



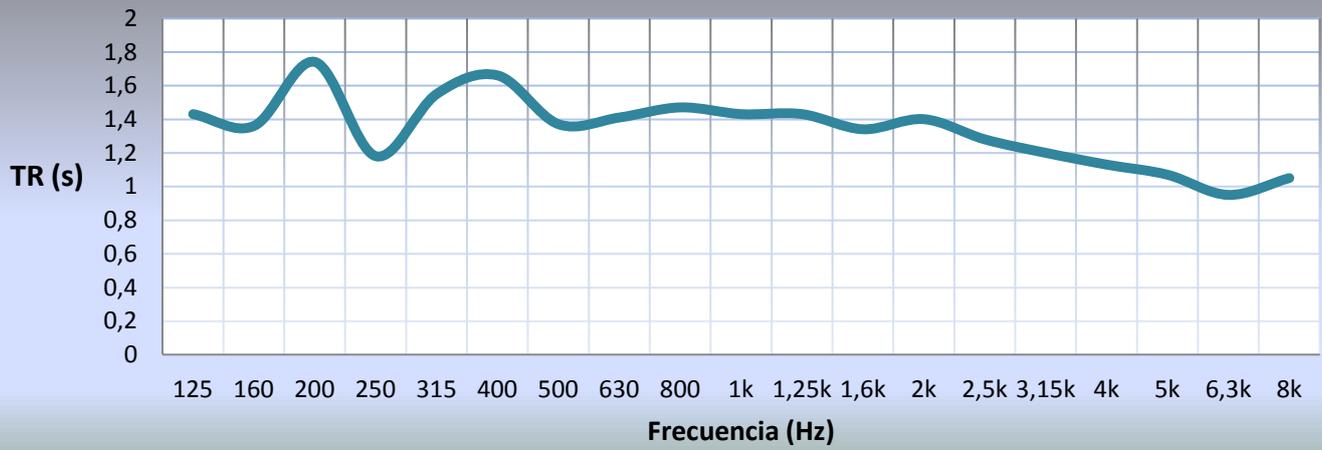
*TR captado por el sonómetro en la posición 6 y la fuente 1

A continuación se muestran las 6 gráficas que representan los resultados de las medidas captadas en cada posición de sonómetro, con la segunda posición de fuente.



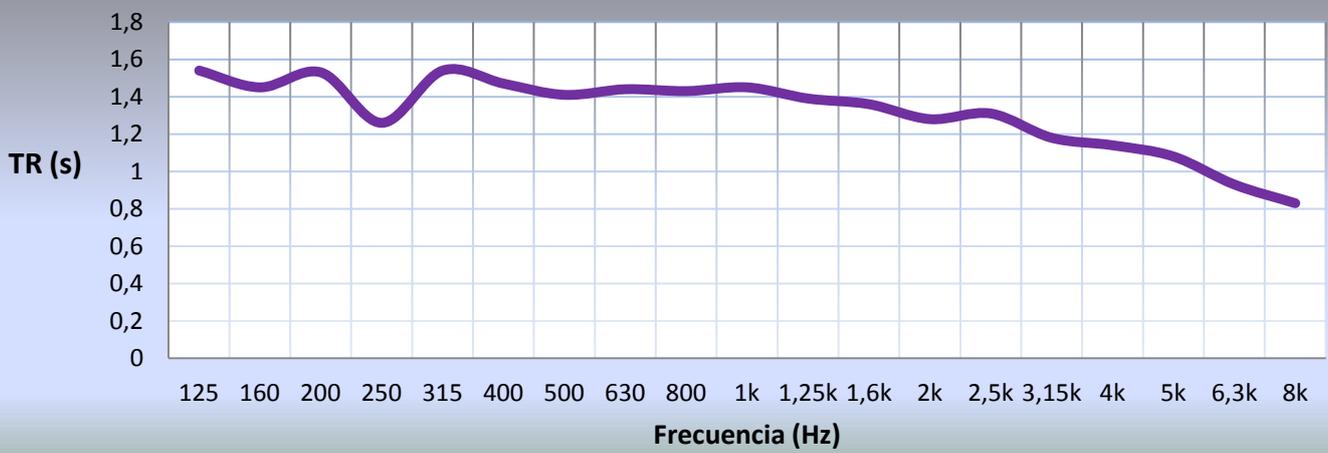
*TR captado por el sonómetro en la posición 1 y la fuente 2

FUENTE 2 - RECEPTOR 2

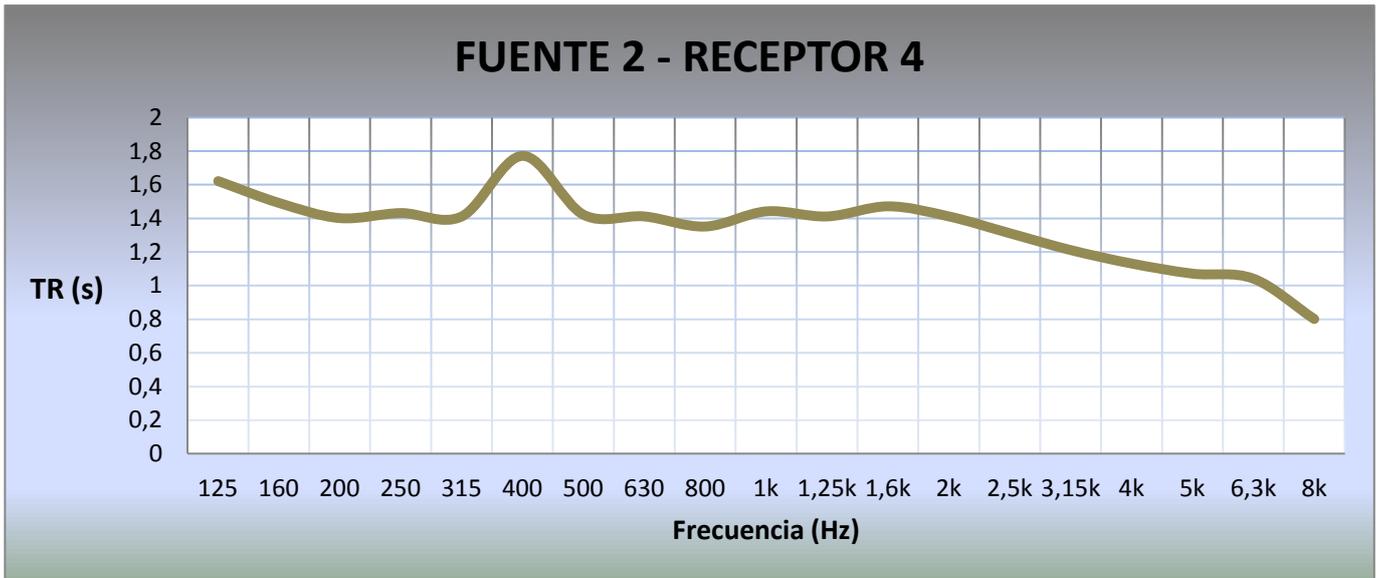


*TR captado por el sonómetro en la posición 2 y la fuente 2

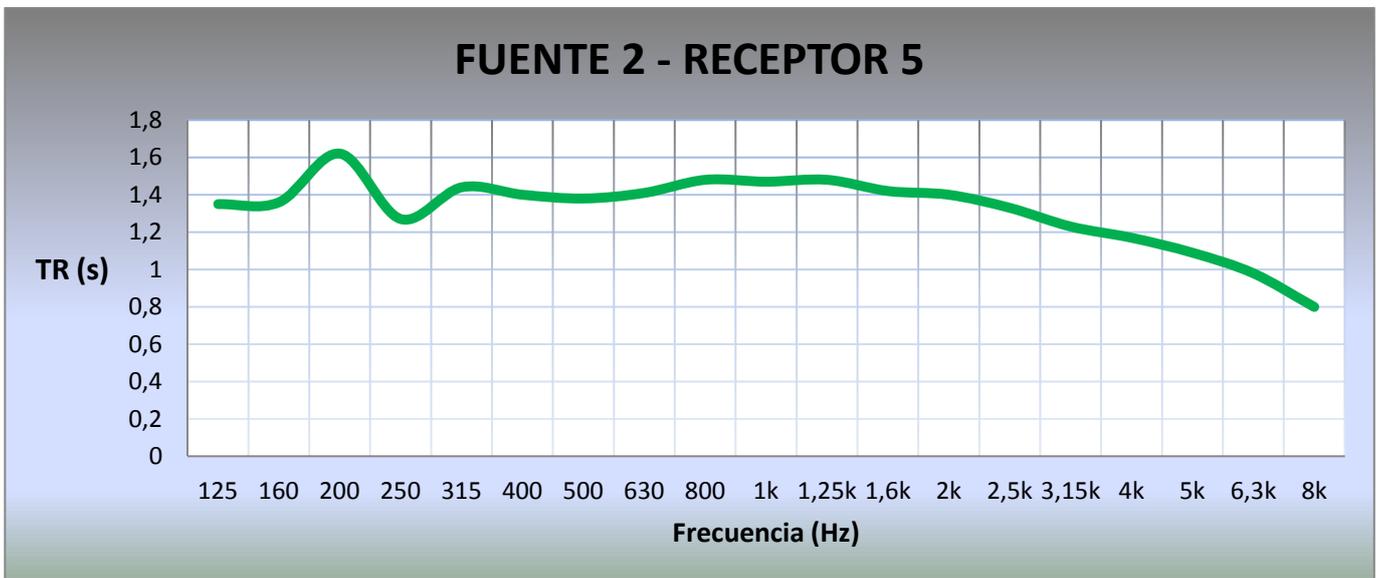
FUENTE 2 - RECEPTOR 3



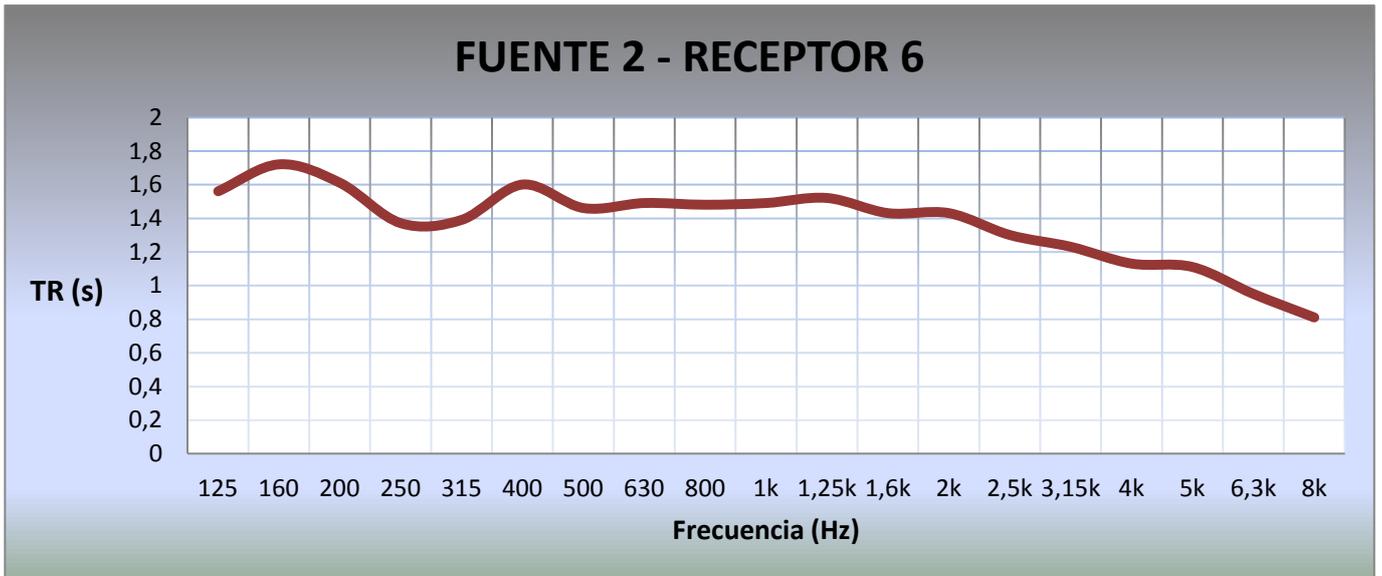
*TR captado por el sonómetro en la posición 3 y la fuente 2



*TR captado por el sonómetro en la posición 4 y la fuente 2



*TR captado por el sonómetro en la posición 5 y la fuente 2



*TR captado por el sonómetro en la posición 6 y la fuente 2

Tras visualizar las 12 gráficas con los datos obtenidos 'in situ' del TR para cada frecuencia, se comprueba, que el TR medio para cada posición de sonómetro y fuente, oscila alrededor de los 1,4 segundos. En concreto, para cada posición de fuente, se ha obtenido un promedio de TR entre las frecuencias 400 y 2500 Hz, en tercios de octava. Para la fuente 1 se ha obtenido un TR promedio de 1,42 segundos, y para la fuente 2 se ha obtenido un TR promedio de 1,43s (mirar ANEXO).

Por tanto, como ya se ha comentado y se ha visto en las gráficas, el tiempo de reverberación que tiene el comedor del colegio Sant Pere Apóstol es de 1,4 segundos. Tiempo que no cumple las especificaciones del Código Técnico de la Edificación, el cual indica un tiempo de reverberación óptimo en comedores y restaurantes menor a 0,9s.

4. SIMULACIÓN

4.1 Descripción del procedimiento seguido

Para la simulación de la sala se ha utilizado un simulador acústico que permite el diseño de salas y su posterior análisis, llamado Catt Acoustic. Permite de forma virtual, estudiar el comportamiento acústico de la sala, antes de introducir nuevos materiales, o incluso construirla. Permite reproducir sonidos, cuyo comportamiento en la sala, se puede apreciar perfectamente gracias a un mapa de rayos. Aunque el diseño de las salas se puede importar desde CAD, en este caso el diseño se ha realizado íntegramente en Catt Acoustic.

El objetivo de la simulación, es crear una sala con el mismo volumen y superficie que la original y conseguir el mismo tiempo de reverberación, para cada una de las frecuencias que utilizada Catt, obtenido 'in situ'. De esta forma, se consigue una simulación realista del espacio a tratar.

En este caso, para poder conseguir con la simulación el TR de la sala original, se ha creado un material específico, cuyos coeficientes de absorción se han obtenido utilizando la fórmula de Sabine:

$$t_R = \frac{0,162V}{A}$$

*Tiempo de reverberación. Fórmula de Sabine

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i + \sum_{j=1}^N A_{O,m,j} + 4 \cdot \overline{m_m} \cdot V$$

Puesto que no es relevante el mobiliario ni la absorción acústica inducida por el aire del recinto, despreciable para recintos menores que 250m³, la fórmula se queda de la siguiente forma:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i$$

Sabiendo que :

$$V=168\text{m}^3$$

$$S_{\text{total}} = 157,04\text{m}^2$$

se obtiene :

$$t_R = \frac{0,162 \cdot V}{A} \rightarrow A = \frac{0,162 \cdot V}{t_R} \rightarrow \bar{\alpha} = \frac{0,162 \cdot V}{S \cdot t_R}$$

↑

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_{m,i} \cdot S_i$$

$$\bar{\alpha} = \frac{0,162 \cdot 168}{157,04 \cdot t_R (125,250,500,1k,2k,4k)}$$

Obteniendo:

f	125	250	500	1k	2k	4k
$\bar{\alpha}$	0,10	0,13	0,12	0,12	0,12	0,15
CATT	10	13	12	12	12	15

*Coeficientes de absorción del material utilizado para la simulación de la sala

El material que recubre el recinto en la simulación, es el que tiene estos coeficientes de absorción. Para trabajar en Catt Acoustic, los coeficientes de absorción se multiplican por 100, por esto viene reflejado de esa forma en la tabla superior.

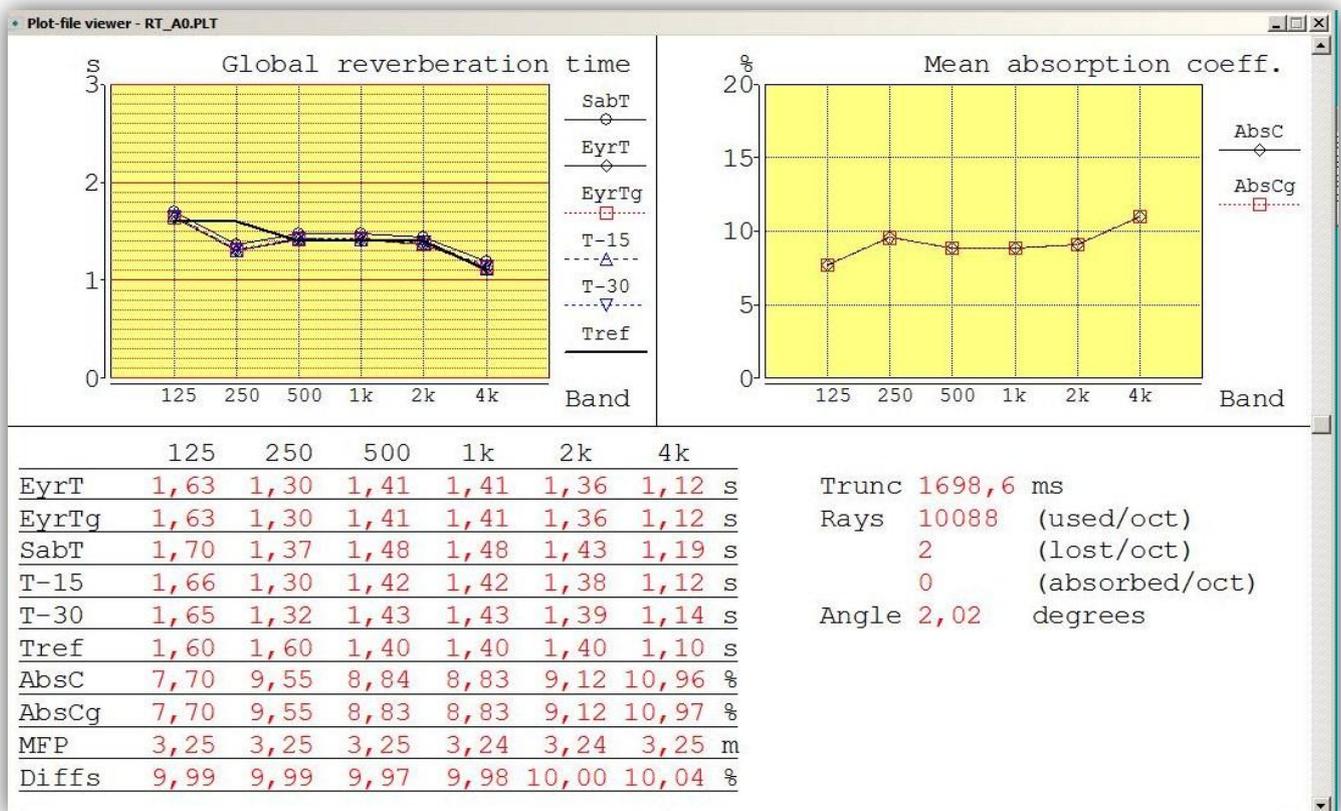
Para precisar un poco más en la simulación, puesto que el suelo es de mármol, se ha mantenido este material, debido a la poca o casi nula absorción que aporta a la sala. Siendo su coeficiente de absorción:

f	125	250	500	1k	2k	4k
$\bar{\alpha}$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
CATT	1	1	1	1	2	1

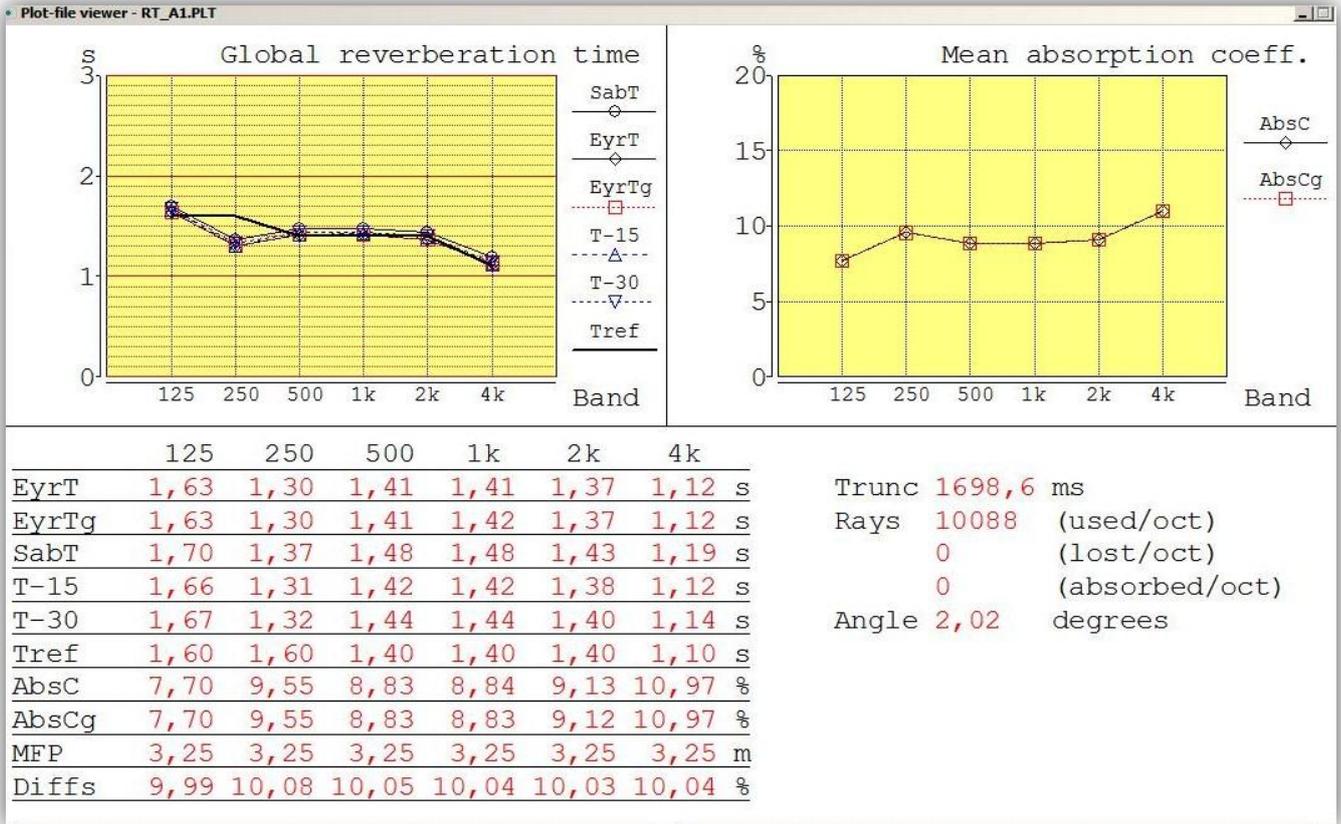
*Coeficientes de absorción del mármol

4.2 Resultados de la sala original con Catt Acoustic

A continuación se muestran las capturas de pantalla obtenidas tras la simulación de la sala original, donde se pueden ver los resultados del tiempo de reverberación obtenidos para cada posición de fuente.



*Datos del TR mostrados por el Catt Acoustics tras simular la fuente 1



*Datos del TR mostrados por el Catt Acoustics tras simular la fuente 2

En la primera imagen se muestran los datos obtenidos del tiempo de reverberación tras simular la fuente 1. En la segunda imagen se muestran los resultados obtenidos para la fuente 2.

Para analizar los resultados nos centramos en lo obtenido en T30.

En la siguiente tabla se muestra el resultado del tiempo de reverberación obtenido en la simulación con Catt Acoustics de la sala original. Se indican los valores en bandas de octava, que es el margen de frecuencias con las que trabaja el programa, para cada una de las fuentes sonoras.

f	125	250	500	1k	2k	4k	Promedio
Fuente 1	1,65	1,32	1,43	1,43	1,4	1,14	1,4
Fuente 2	1,66	1,32	1,43	1,43	1,4	1,14	1,4
Promedio	1,66	1,32	1,43	1,43	1,4	1,14	1,4

Como se ve, el tiempo de reverberación promedio, nos da 1,40s de tiempo de reverberación en la sala. Que es exactamente el mismo tiempo que se obtuvo en las medidas 'in situ' en el recinto original. Por lo que la simulación es correcta.

Puesto que el TR del comedor del colegio debería ser menor a 0,9 segundos, se debe conseguir reducir el tiempo de reverberación 0,5s.

Para ello, será necesario introducir materiales absorbentes dentro del recinto, para poder reducir el tiempo de reverberación hasta el tiempo óptimo que viene reflejado en el Código Técnico de la Edificación.

4.3 Propuesta

Para solucionar el exceso del tiempo de reverberación en el comedor, se propone introducir materiales absorbentes acústicos novedosos, concretamente cortinas acústicas.

4.3.1 Descripción de los materiales introducidos

Las cortinas acústicas suponen un gran avance dentro de los materiales absorbentes de energía. La elección de este material como solución radica en su buena respuesta a la absorción de energía sonora, en su fácil instalación y en su bajo coste.

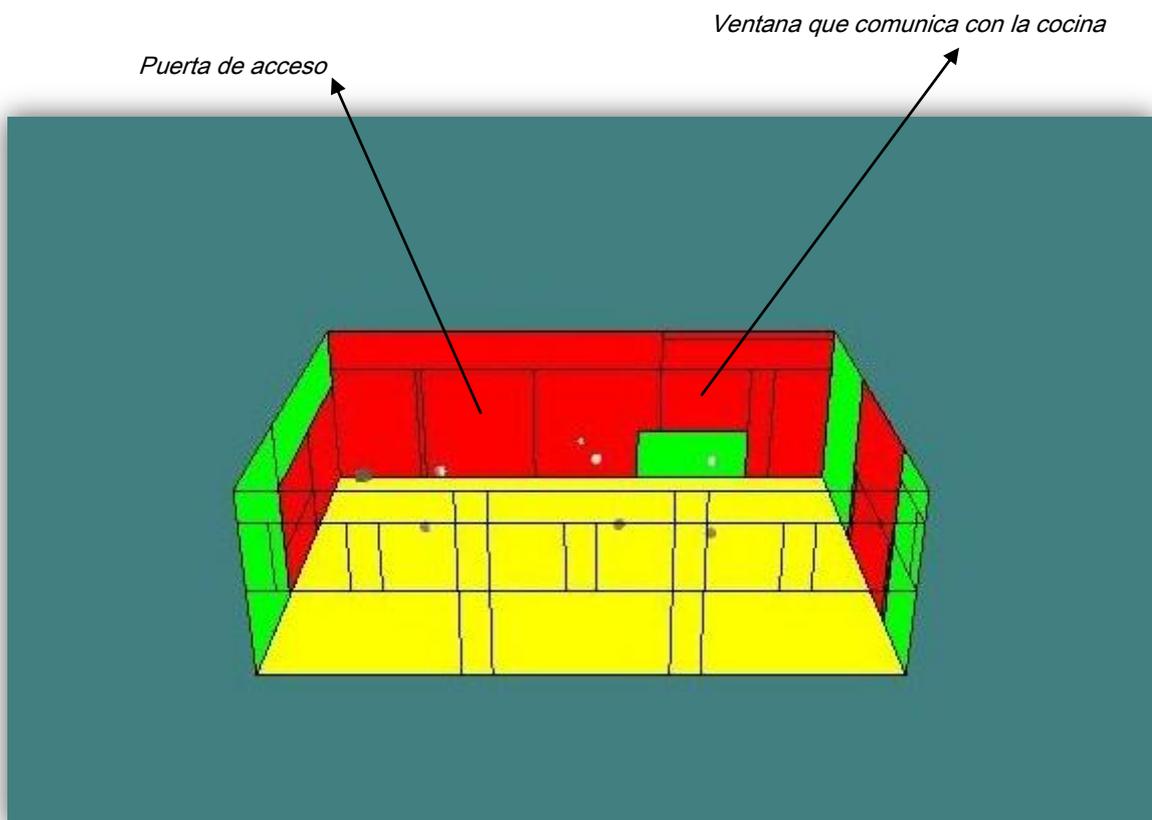
4.3.2 Descripción de la posición y de la instalación de materiales

Para la colocación de las cortinas, hay que tener en cuenta la distribución del mobiliario, así como evitar entorpecer la actividad que en el comedor se realiza.

Existe un problema en esta sala, y es que la instalación de gas está distribuida por toda la zona del techo, por lo que la colocación de las cortinas no puede ser aleatoria.

La elección de la situación del material se ha hecho en referencia a este problema, y a los elementos que existen dentro de la sala y que no se pueden cubrir con las cortinas, como es el caso del acceso al comedor o a la cocina. A continuación se van a mostrar cada uno de los cerramientos que forman la sala, realizado con Catt Acoustics.

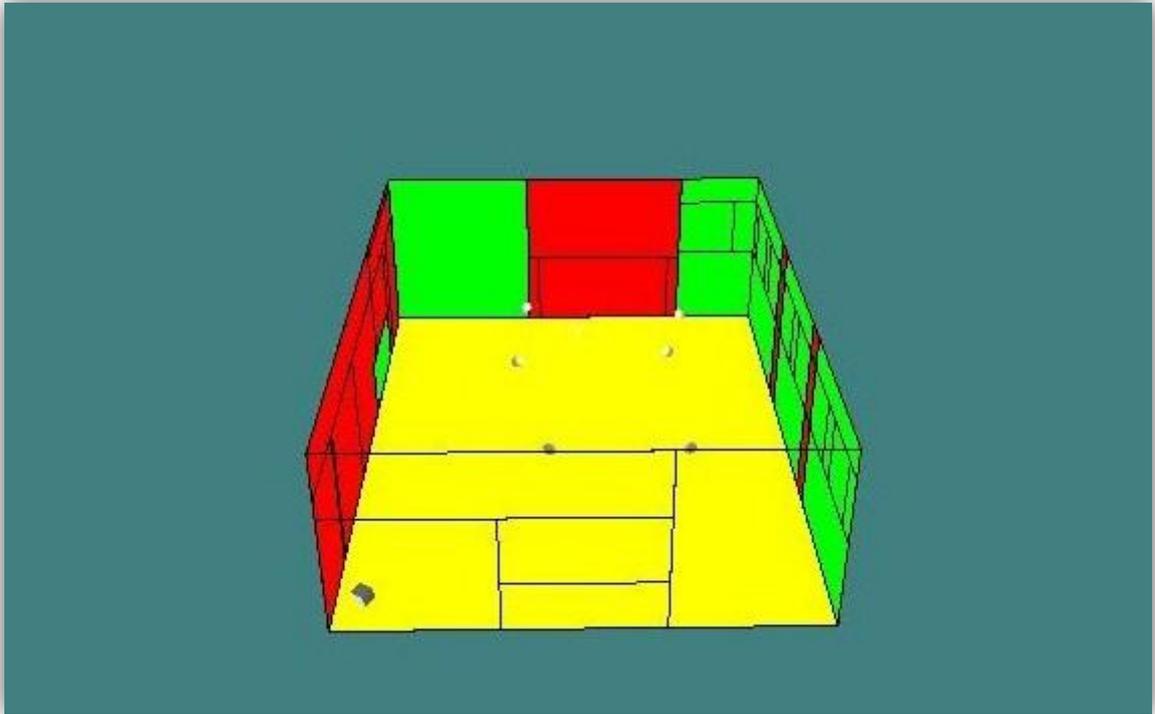
- El color rojo representa el material creado para simular la sala
- El color amarillo representa el mármol del suelo
- El color verde representa la cortina acústica



*Pared izquierda. Donde se sitúa la puerta de entrada y el acceso a la cocina.
Superficie de cortina 1,8m²

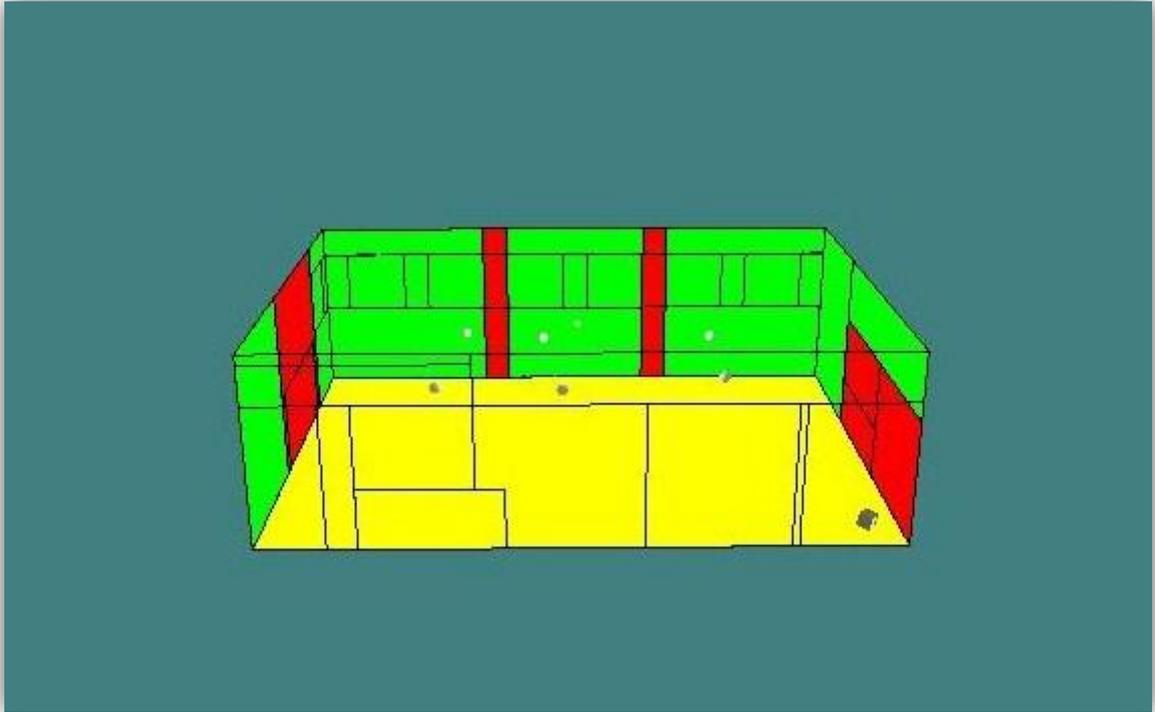
En la imagen superior se muestra la pared donde se sitúa la puerta de acceso al comedor y la cocina. En esta parte del comedor existen numerosos elementos que impiden la colocación de material, como son los accesos al comedor, a la cocina y un armario.

Pero, a pesar de esto, se ha podido colocar un trozo de cortina, en la parte inferior de una encimera colocada bajo la ventana que comunica con la cocina. Cubriendo una zona, originalmente inutilizada, pero creándose de esta forma un espacio donde poder almacenar o guardar objetos.



*Pared frontal. Superficie de cortina 11m²

En esta parte del comedor, se han podido aprovechar una gran zona de pared inutilizada, así como el espacio que ocupa la única ventana que hay en esta pared. En la parte central no se ha podido colocar nada de material absorbente, puesto que el espacio está ocupado por un gran televisor y una estantería.



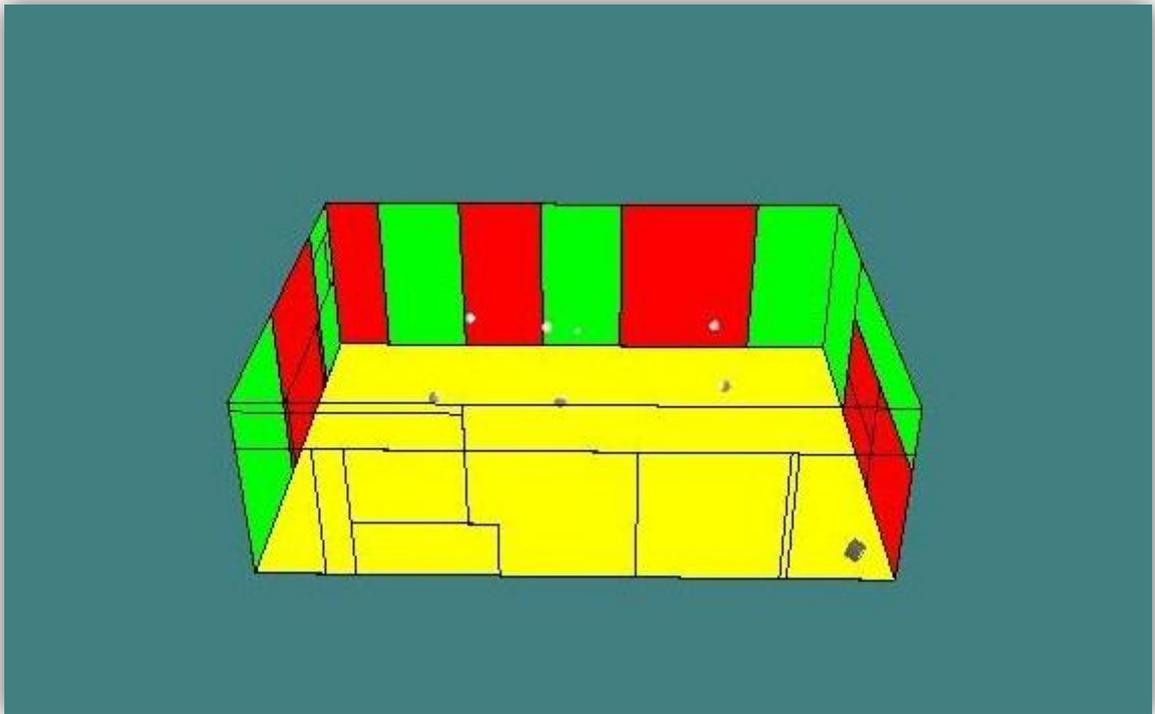
*Pared derecha. Ventanas que comunican con el exterior. Superficie de cortina 22,73 m²

En esta parte de la sala es donde más superficie de material absorbente se puede instalar. En la primera imagen, se ve como se ha cubierto prácticamente toda la pared con cortinas, dejando solo dos trozos sin colocar debido al problema de las instalaciones que existen en el comedor. Esta colocación del material da muy buen resultado en las simulaciones, puesto que con esta disposición de las cortinas se consigue disminuir de forma considerable el TR de la sala.

Sin embargo, en esta pared están situadas todas las ventanas, que dan acceso a la calle y aportan luz del exterior al recinto. Cubrir estos puntos de luz suele ser un problema, puesto que el tipo de material absorbente, es muy grueso y opaco, lo que va a impedir la entrada de luz del exterior. Para compensar este problema se plantean dos soluciones. La primera es colocar las cortinas conforme se ve en la primera imagen, pero corriéndolas un poco, de forma que se permita que entre algo de luz por cada una de las ventanas. Aunque el material no responde de la misma manera cuando está extendido totalmente que cuando está plegado, puede compensarse esta disminución de la

absorción por corrimiento de cortinas, con la absorción que ejercen las personas que están ocupando el recinto en ese momento.

La otra solución sería colocar las cortinas tal y como se muestra a continuación.

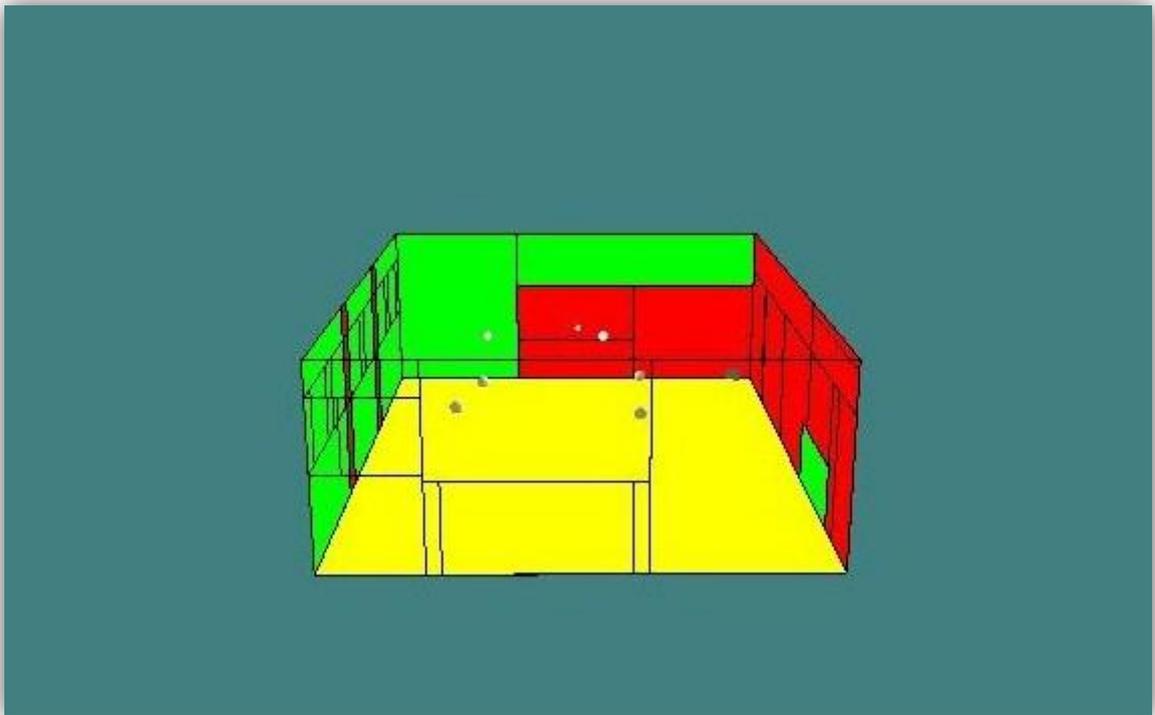


*Pared derecha. Ventanas que comunican con el exterior. Superficie de cortina 12m²

De esta forma, hay menos superficie de material absorbente, pero solo se cubren 3 de las 6 ventanas que hay en la pared derecha de la sala. De esta forma el TR que se obtiene en la sala vacía es de 0,94s. Está por encima de lo que nos marca el Código Técnico de la Edificación , que es 0,9s, pero pueden compensarse esos 0,04s superiores al objetivo, cuando el comedor esté ocupado por personas, cuya absorción podrá compensar esos segundos de más en el tiempo de reverberación.

Aunque se han planteado varias opciones para esta pared del recinto, se utilizara como solución principal la primera, mediante la cual se obtiene un TR < 0,9s y permite instalar de mayor superficie de material absorbente.

Por último, en la pared posterior de la sala, también existen dos grandes zonas donde colocar cómodamente y sin que estorbe, material absorbente. Las únicas zonas donde no se han podido colocar cortinas en esta pared, han sido los lugares donde se encuentra la pizarra y un tablón de corcho, así como en las partes inferiores a estos dos objetos.



*Pared posterior. Superficie de cortina 10,78m²

4.3.3 Simulación

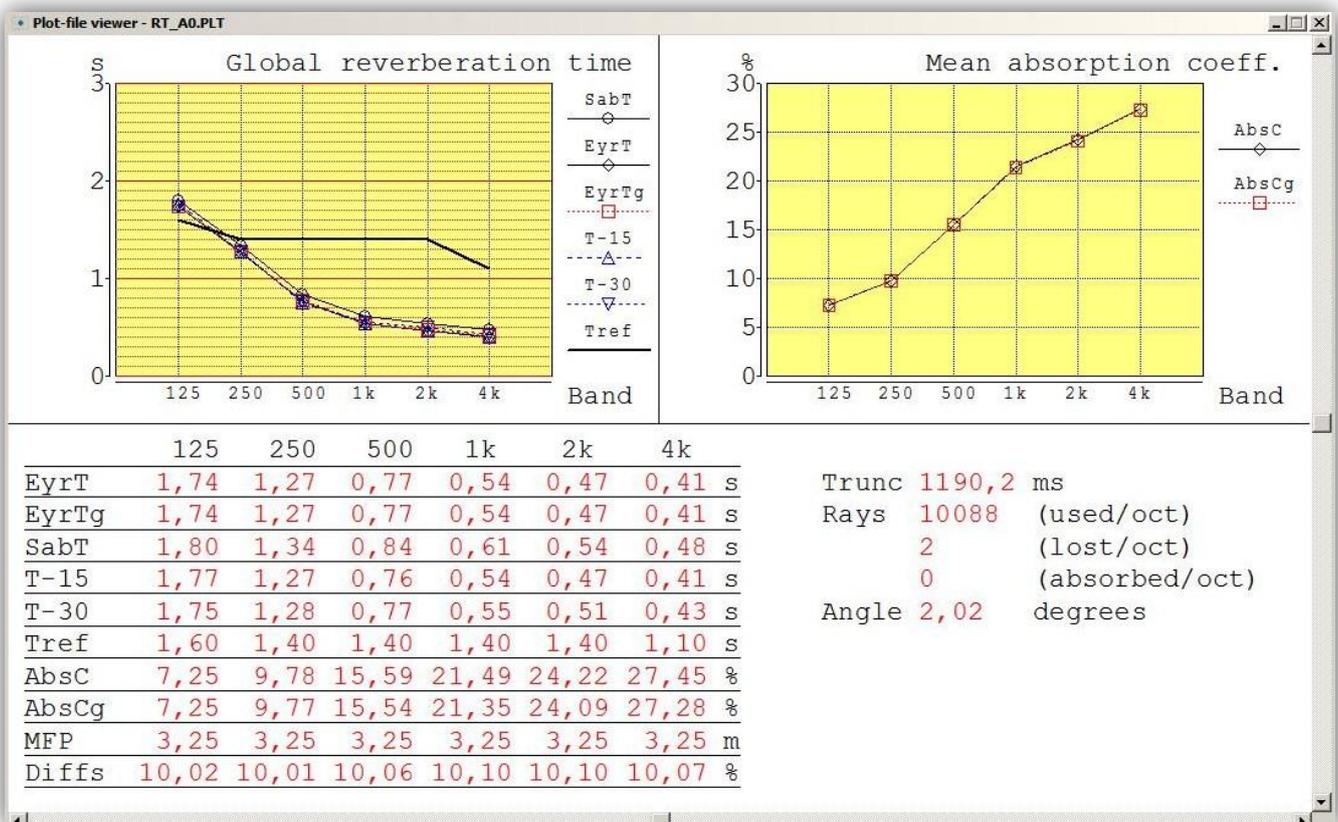
Para la simulación de la sala con las cortinas acústicas, se han barajado varias posibilidades. Tras ver los coeficientes de absorción de las diferentes cortinas, la inclinación fue por la cortina que presentaba el coeficiente de absorción total más elevado. Sin embargo, a medida que se colocaba el material en el recinto, los datos del tiempo de reverberación obtenidos eran peores. Esto se debe a que esta cortina (T1), tiene un coeficiente de absorción muy elevado a altas frecuencias, pero prácticamente nulo a bajas frecuencias.

Puesto que en el recinto original, el TR no presenta cambios muy abruptos entre bajas y altas frecuencias, esta cortina, aunque con un coeficiente de absorción levemente mayor que la otra, no respondía bien en esta sala. Sin embargo, al realizar la simulación con la cortina T2, que tiene un coeficiente de absorción un poco más bajo, pero más equilibrado en todas las frecuencias, obtuve mejor respuesta en esta sala.

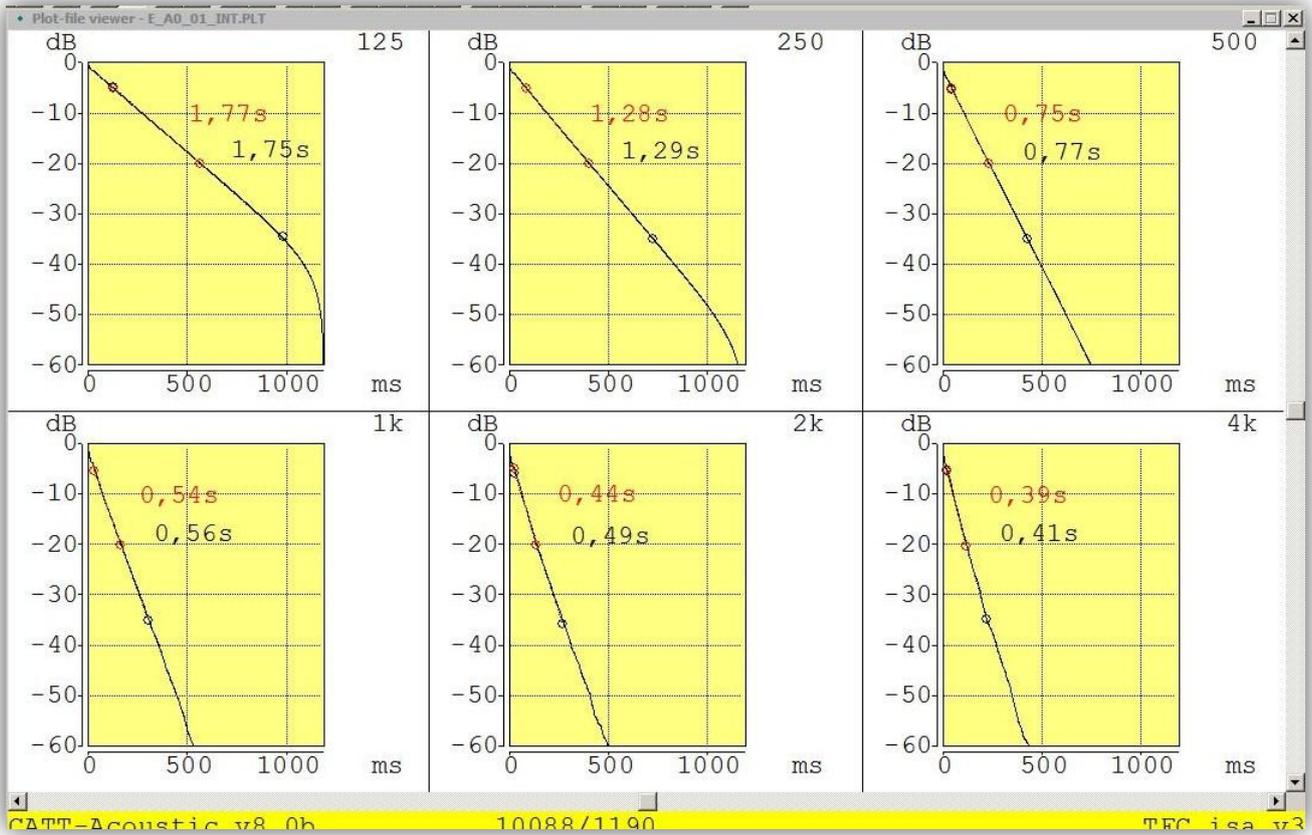
f	125	250	500	1K	2K	4K	Promedio
T1	0,05	0,15	0,42	0,68	0,80	0,91	0,63
T2	0,08	0,14	0,42	0,68	0,79	0,88	0,62

*Coeficientes de absorción de las dos cortinas utilizadas para la simulación

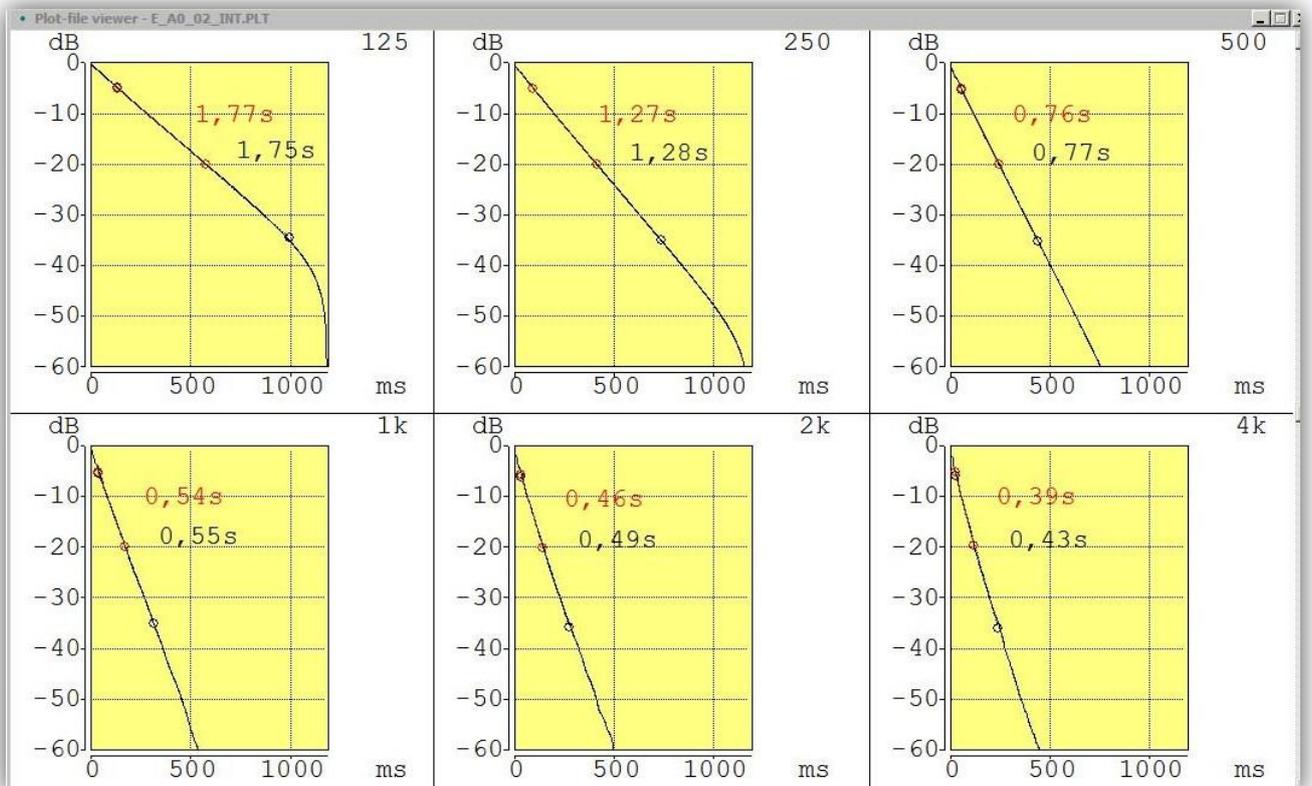
A continuación se van a mostrar los datos obtenidos de la simulación la sala, tras introducir la cortina T2.



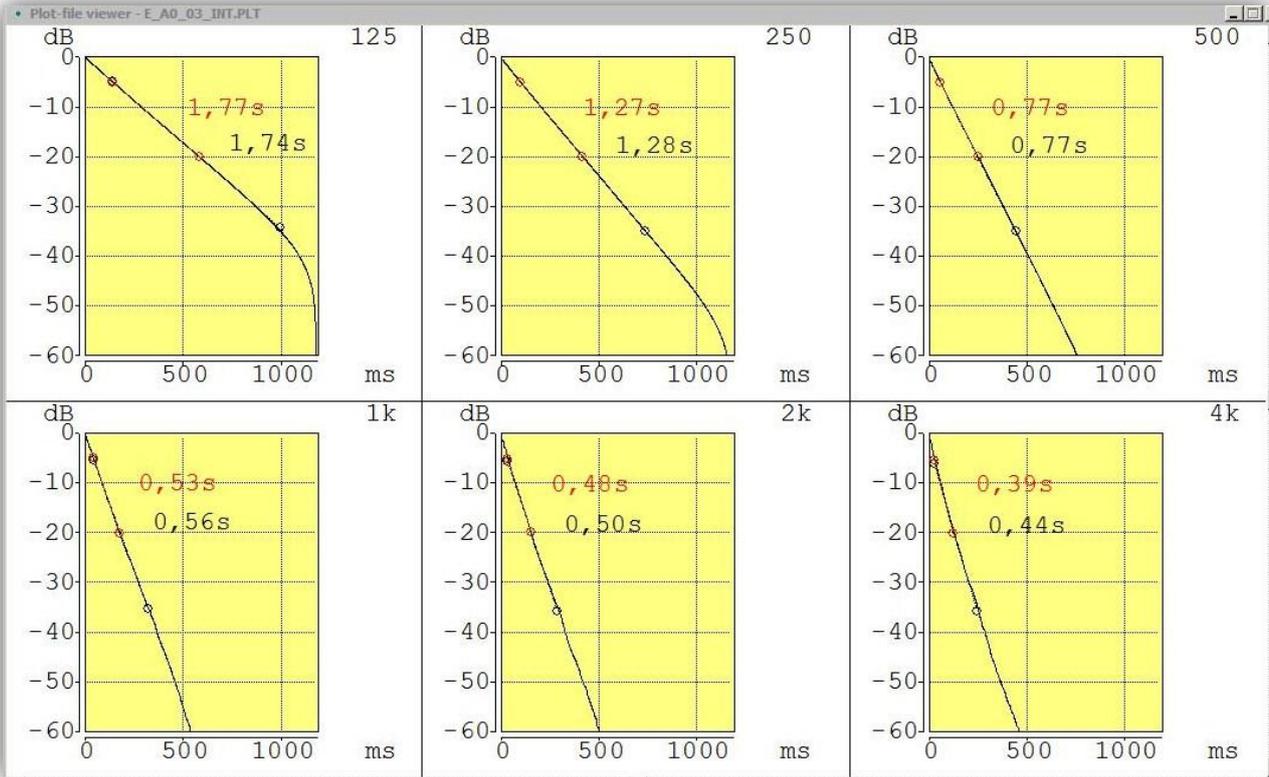
*TR obtenido tras la simulación de la fuente omnidireccional 1, en la sala con cortinas acústicas.



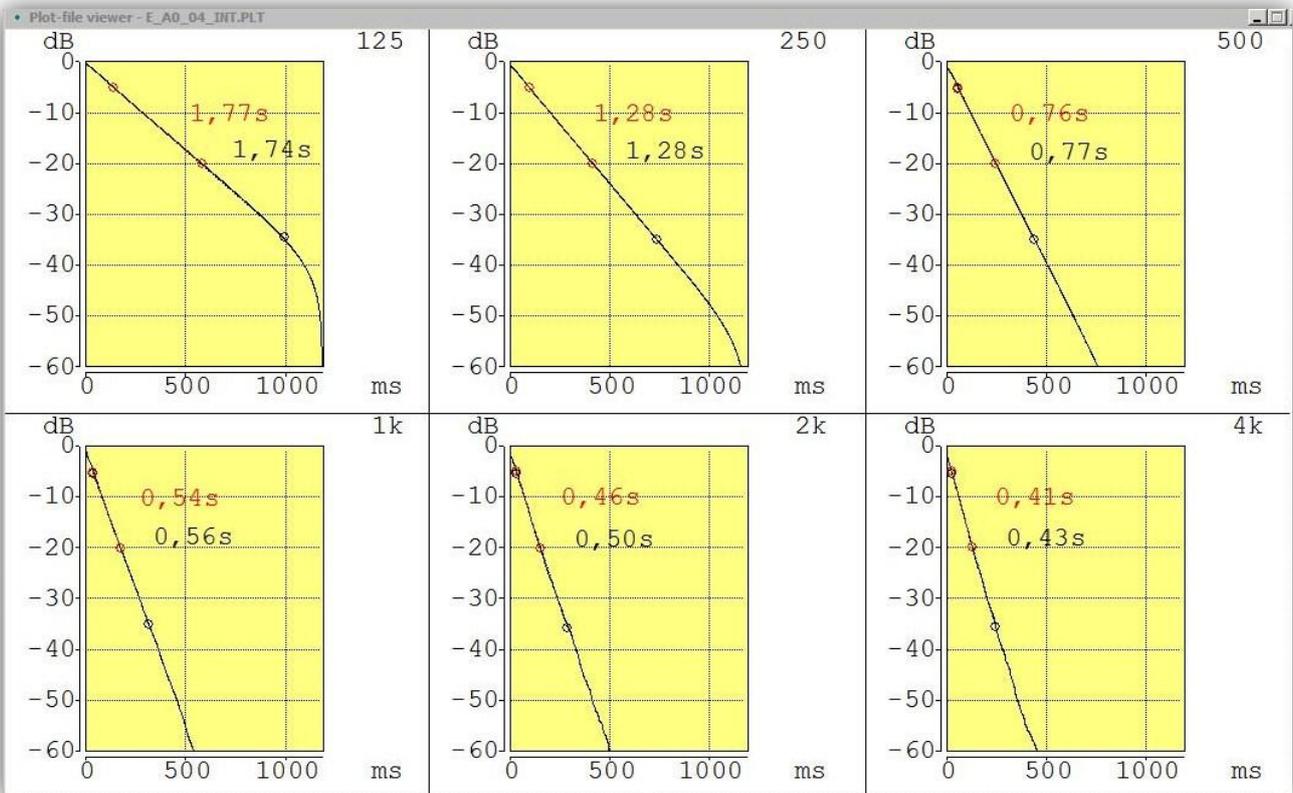
*TR captado por el sonómetro en posición 1, en función de la frecuencia



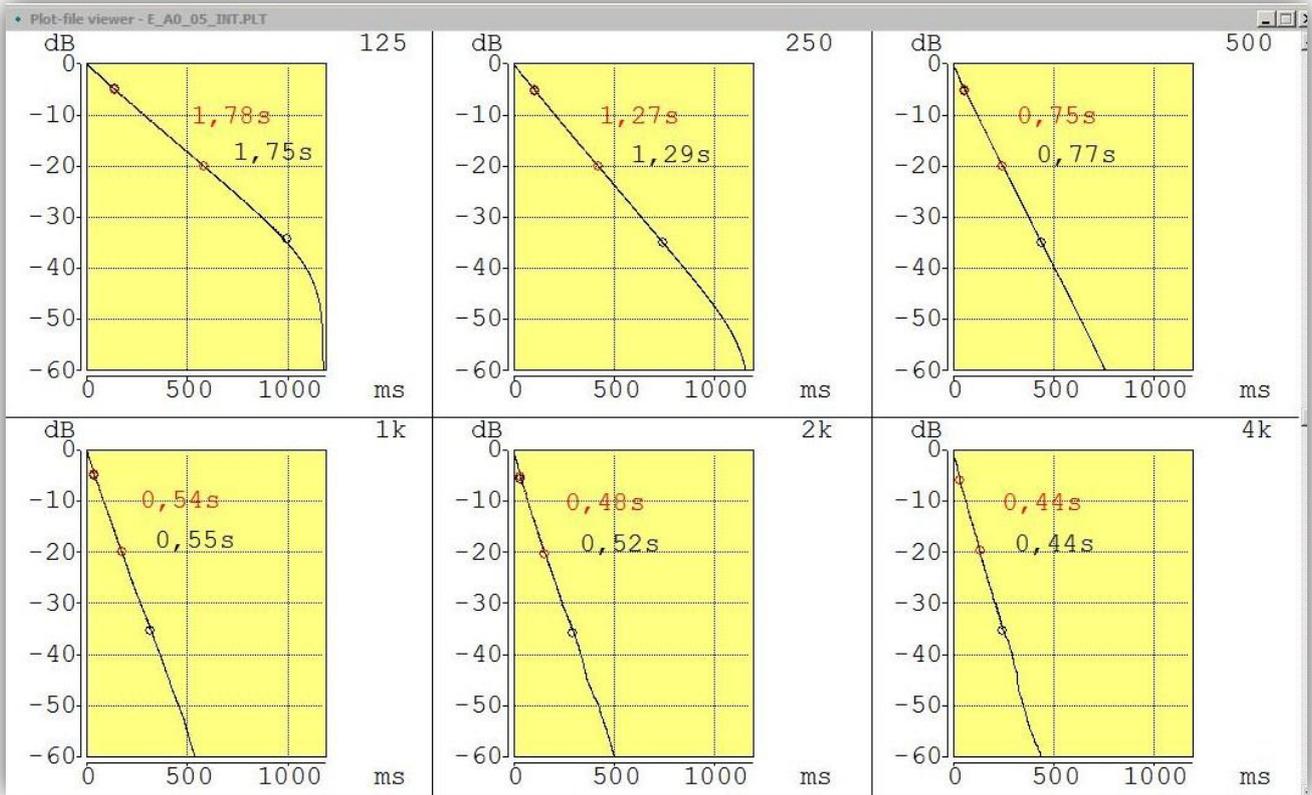
*TR captado por el sonómetro en posición 2, en función de la frecuencia



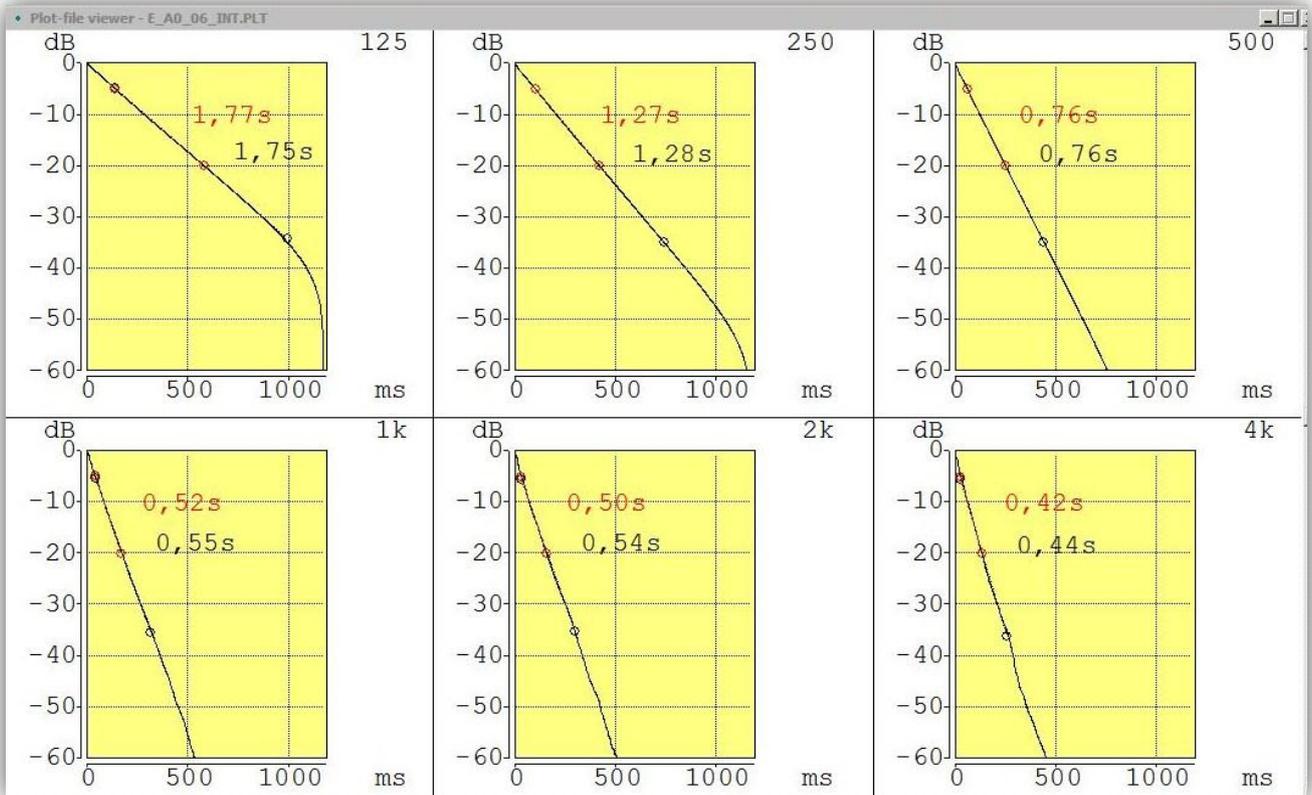
*TR captado por el sonómetro en posición 3, en función de la frecuencia



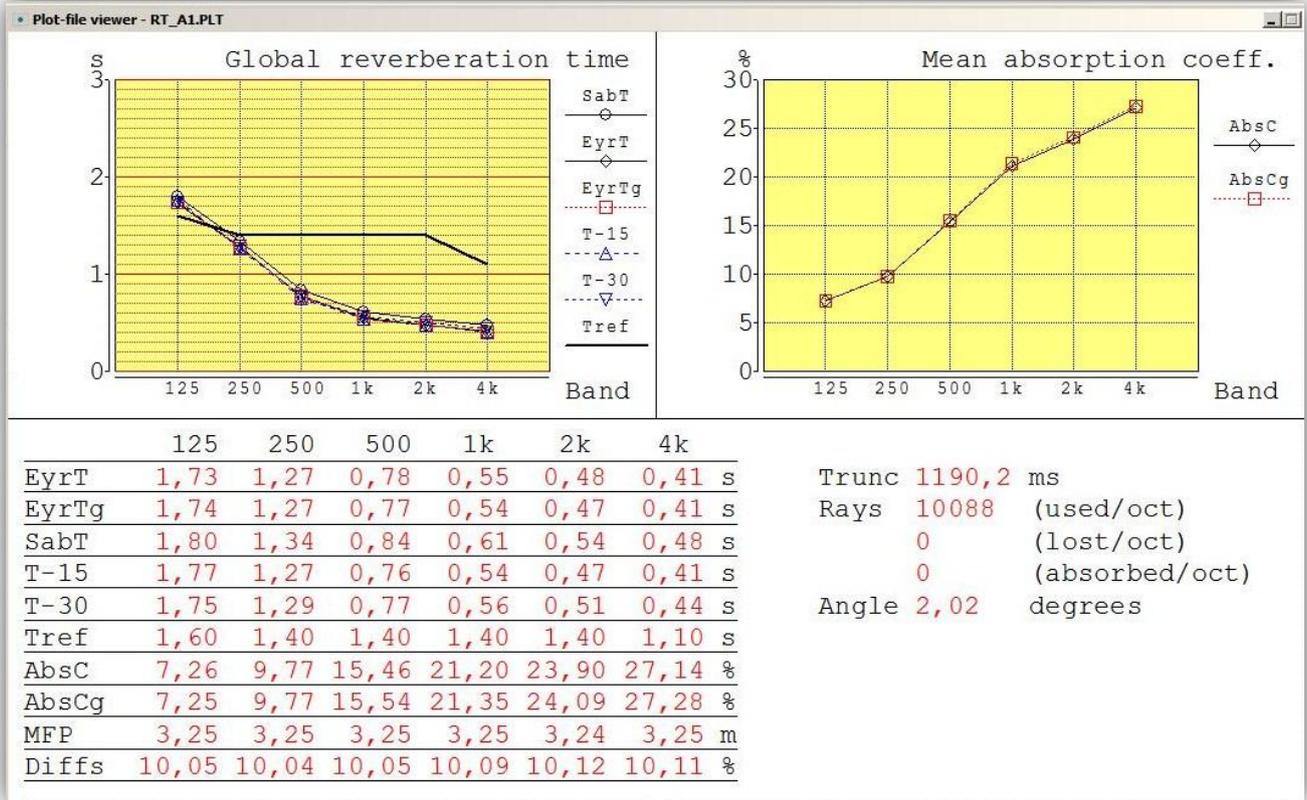
*TR captado por el sonómetro en posición 4, en función de la frecuencia



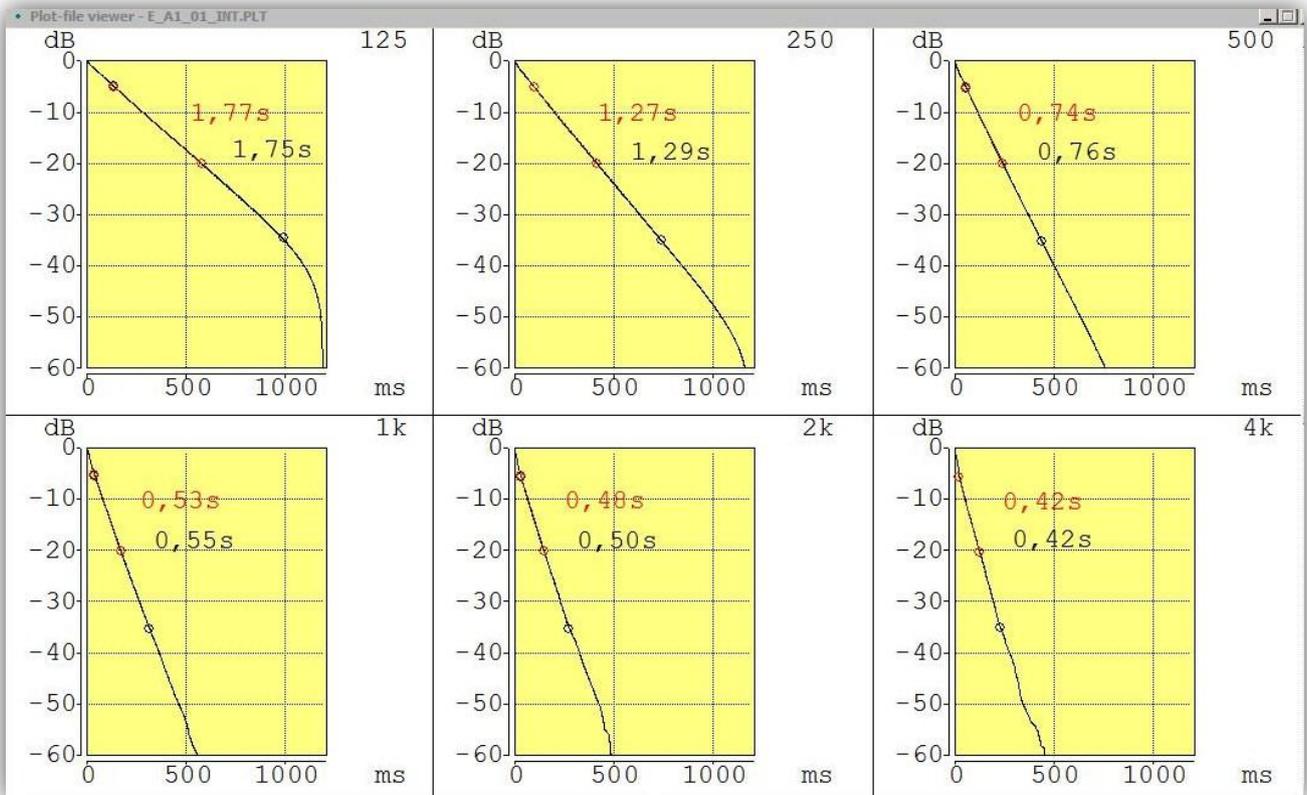
*TR captado por el sonómetro en posición 5, en función de la frecuencia



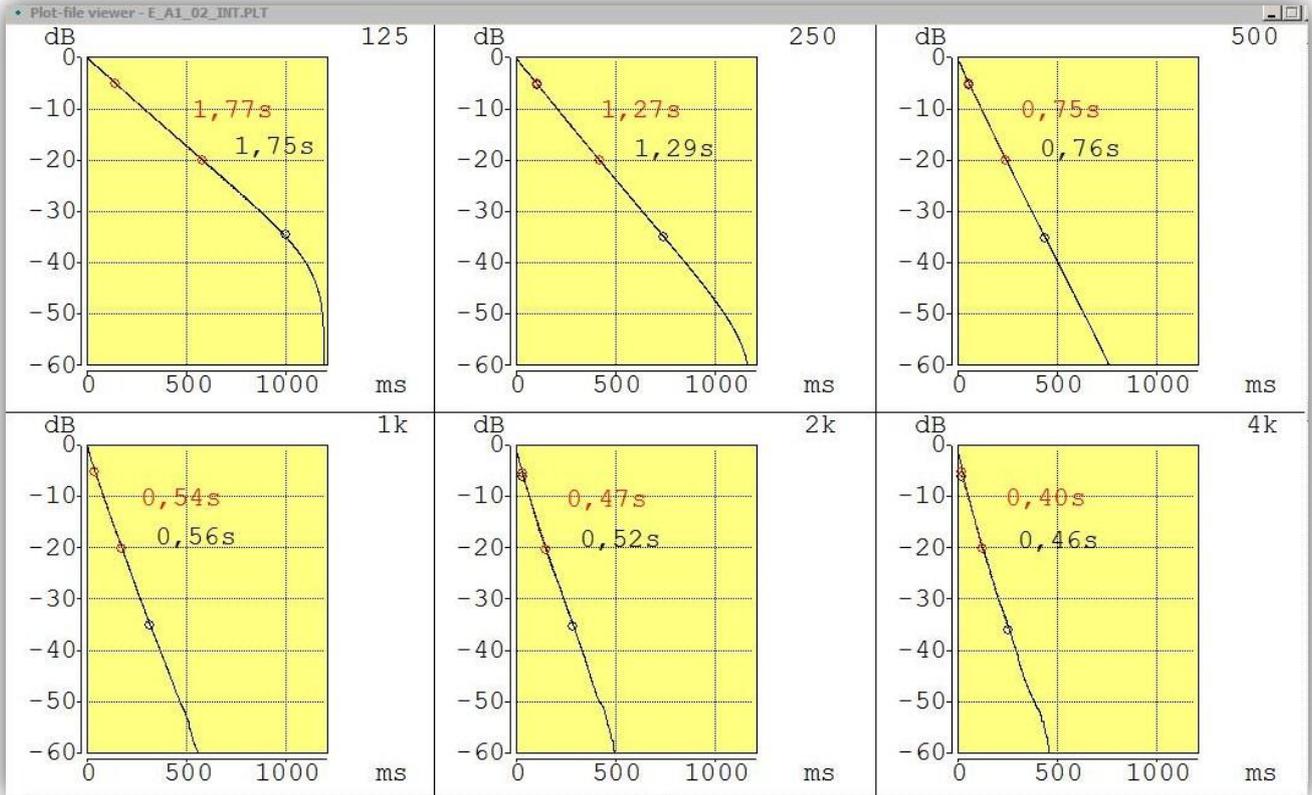
*TR captado por el sonómetro en posición 6, en función de la frecuencia



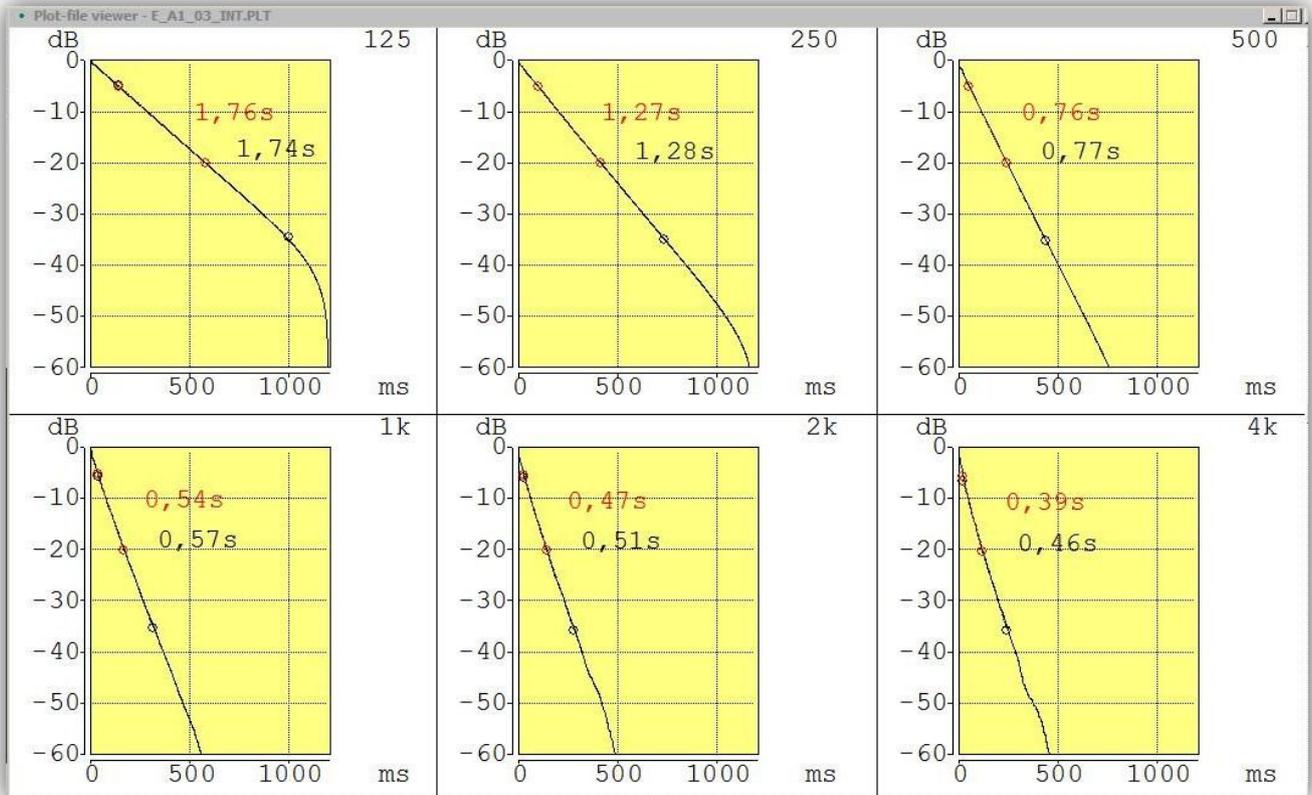
*TR obtenido tras la simulación de la fuente omnidireccional 2, en la sala con cortinas acústicas.



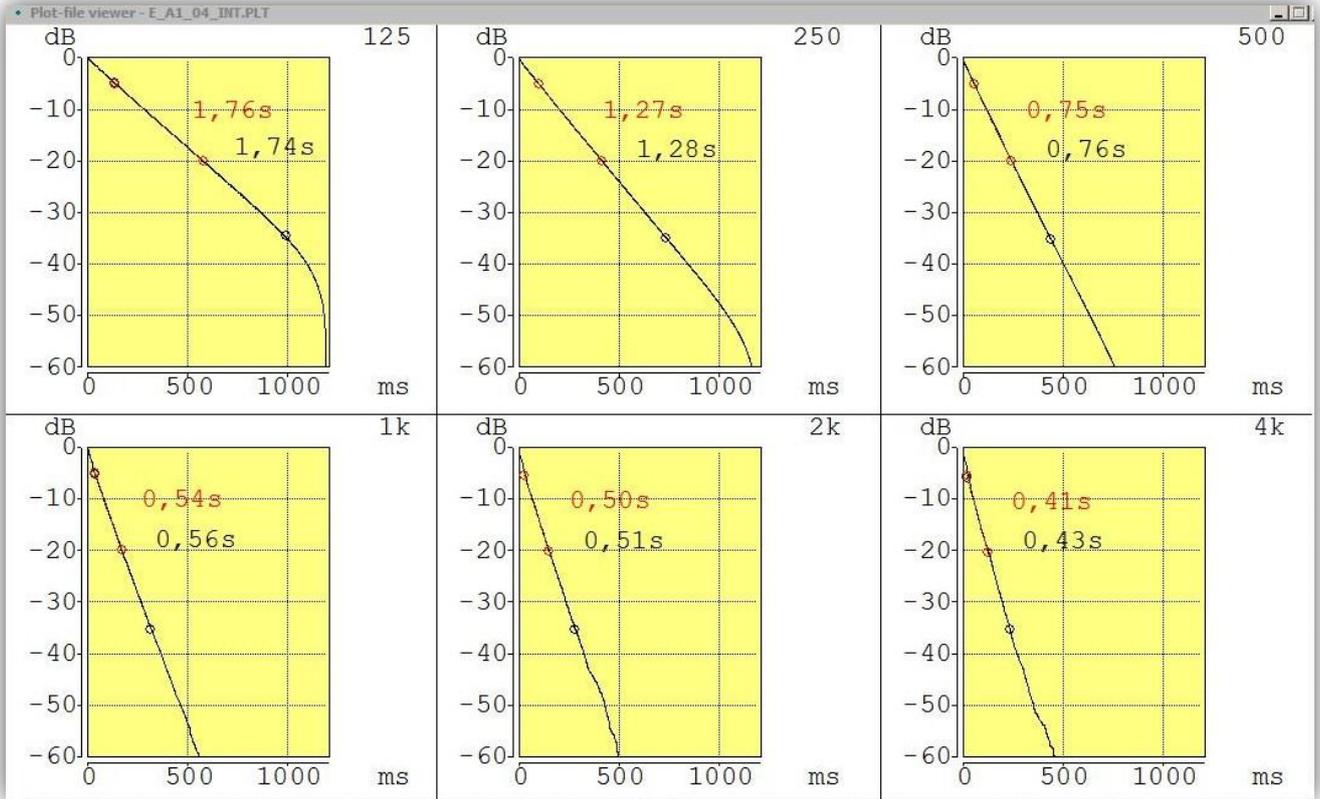
*TR captado por el sonómetro en posición 1, en función de la frecuencia



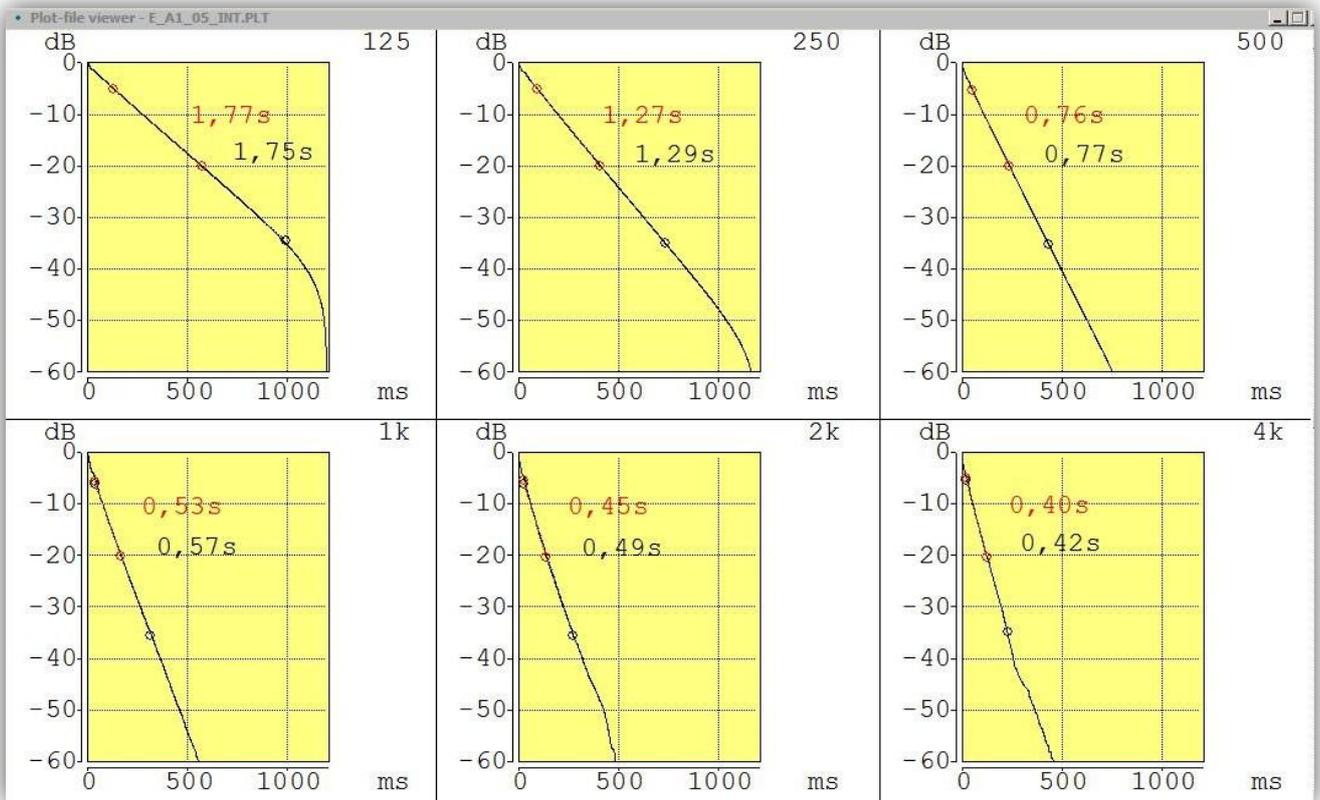
*TR captado por el sonómetro en posición 2, en función de la frecuencia.



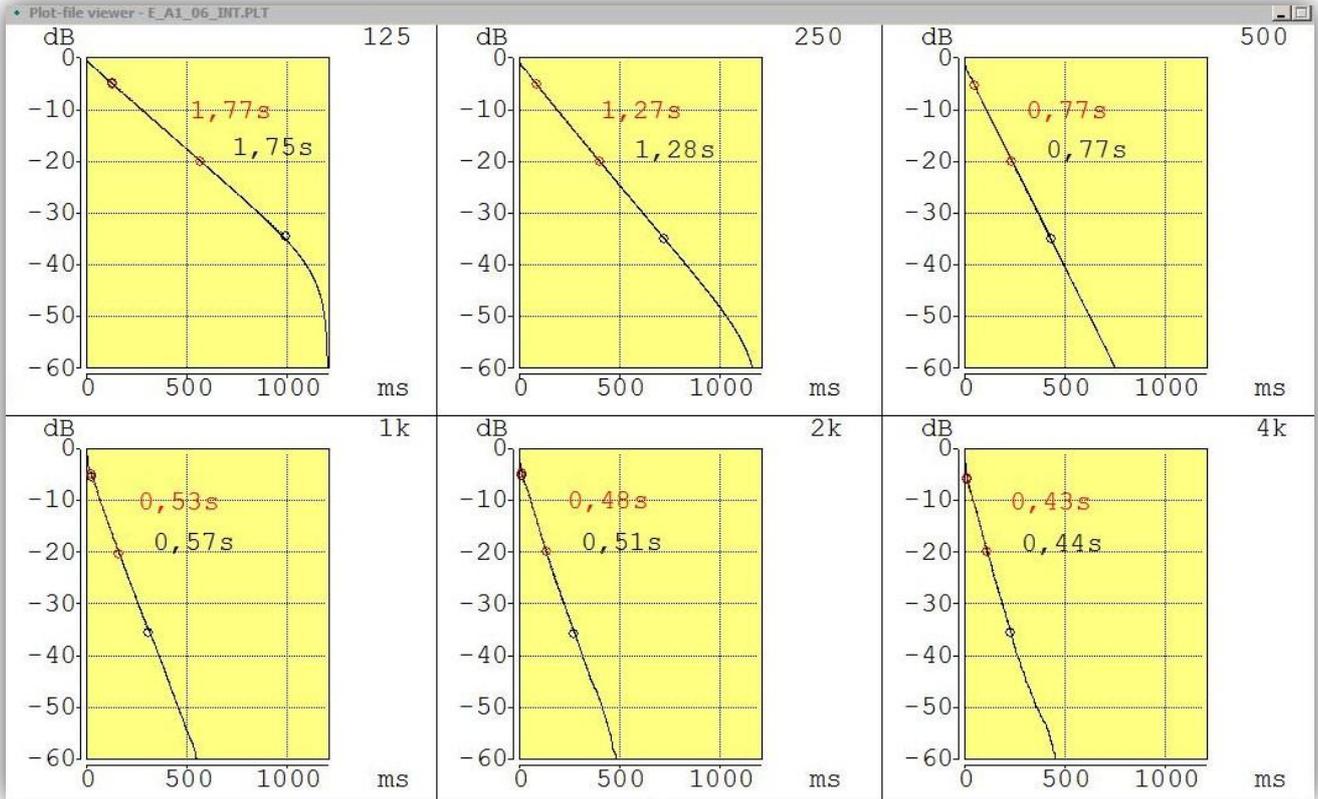
*TR captado por el sonómetro en posición 3, en función de la frecuencia



*TR captado por el sonómetro en posición 4, en función de la frecuencia



*TR captado por el sonómetro en posición 5, en función de la frecuencia



*TR captado por el sonómetro en posición 6, en función de la frecuencia

5. RESULTADOS FINALES

En las imágenes superiores se ven los resultados del TR obtenidos introducir las cortinas acústica en la sala. Como se ve el TR ha disminuido considerablemente respecto del TR obtenido en la sala original. Si nos detenemos en las gráficas que muestran el tiempo de reverberación global obtenido, para cada una de las posiciones de la fuente omnidireccional, se ve una clara diferencia del TR de referencia, el cual refleja la respuesta en la sala sin material absorbente, con la línea que representa el TR obtenido tras la incorporación de la cortina acústica.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	PROMEDIO
FUENTE 1	1,75	1,28	0,77	0,55	0,51	0,43	0,88
FUENTE 2	1,75	1,29	0,77	0,56	0,51	0,44	0,89
PROMEDIO	1,75	1,29	0,77	0,56	0,51	0,44	0,88

*TR total obtenido tras la simulación del comedor con 46,3m² de cortina acústica

Como viene reflejado en la tabla anterior, se ha conseguido disminuir el tiempo de reverberación de la sala 0,52s, tras la colocación de las cortinas acústicas. Obteniendo un tiempo de reverberación final de 0,88 segundos.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS

Como se ha podido comprobar, tras la simulación de la sala original, el recinto tiene un tiempo de reverberación elevado, en especial a frecuencias bajas y medias, donde el valor para el mismo se encuentra alrededor de 1,4 segundos. Según las exigencias del código técnico respecto a los tiempos de reverberación, en restaurantes y comedores vacíos, el TR debe ser menor a 0,9 segundos.

Para encontrar una solución y corregir el elevado tiempo de reverberación, se ha optado por elegir un material novedoso, las cortinas acústicas. Y se ha podido comprobar que, tras introducción de 46,3m² de material absorbente distribuido por la sala, se ha logrado obtener un tiempo de reverberación de 0,88s. Cumpliéndose de esta forma el objetivo del proyecto, que era conseguir un TR menos a 0,9s.

Pero esto no es todo, además de comprobar la buena respuesta del textil acústico en el recinto estudiado, existen más ventajas por las que supone un gran avance utilizar este tipo de material.

Utilizar cortinas acústicas es una elección acertada como alternativa a la común realización de obras, que suponen un alto coste y mayor tiempo de instalación de material absorbente.

Si nos centramos en cifras, para poder apreciarlo mejor, sabemos que la obra que supondría solucionar el problema acústico de este comedor, rondaría la cantidad de los 1500euros. Sin embargo, utilizando cortinas acústicas, la cifra que se tendría que invertir sería alrededor de 350 euros más mano de obra, cantidad mucho menor que si se tuviera que hacer una obra.

	MATERIAL	EUROS
Cortinas	46,3 m ²	282,9
Riel simple	20,66 m	65,3
Coste total	-----	348,2

*Coste total del material siendo: 18,33 euros por cada 3m² de cortina y 3,16 euros por 1 metro de riel simple

Asimismo, la instalación de cortinas acústicas, además de suponer una inversión menor, resultan mucho más cómodas y más rápidas de colocar. En este caso, el tiempo dedicado a la instalación de las cortinas sería de unas pocas horas. Sin embargo, la realización de una obra para colocar materiales absorbentes en el recinto, supondría días de trabajo, incluso se tendría que prever su realización cuando el comedor estuviera inactivo durante un tiempo. Al contrario que las cortinas, cuya colocación se podría realizar en cualquier momento del día, en el que el comedor estuviera vacío.

La utilización de las cortinas acústicas ha supuesto un éxito en la realización de este proyecto, puesto que han solucionado el problema original del elevado tiempo de reverberación del comedor, incluso consiguiendo bajar el TR máximo que exige la norma en 0,02s. Además, se ha demostrado que la utilización de este material supone ventajas económicas y de instalación, proporcionando una solución accesible en sectores, como el de la educación, que no disponen de presupuestos elevados para solucionar este tipo de problemas. Este tipo de instalaciones puede suponer una puerta de acceso a soluciones de problemas acústicos para comercios, empresas, restaurantes e incluso particulares.

8. BIBLIOGRAFÍA

- RODRÍGUEZ ,F. J. ; DE LA FUENTE, J.; DÍAZ, C. : *Guía acústica de la construcción*. Segunda edición: Septiembre 2008
- RECUERO, M.: *acondicionamiento acústico*. 2001
- RECUERO, M.; GIL, C.: *Acústica arquitectónica*. Segunda edición 1993
- Apuntes ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA. UPV 2008
- Alonso Moral, Jesus: *Revista de Psicodidáctica nº09*. UNIVERSIDAD DEL PAÍS VASCO. 1999
- Código Técnico de la Edificación
- M.I. Vara Lorenzo, E. Sukia Arruabarrena. *Acondicionamiento acústico*
<<http://aholab.ehu.es/users/imanol/akustika/lkasleLanak/Acondicionamiento%20acustico/index.html>>
- UVA. *Práctica acondicionamiento*.
<http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_02_03/Acustica_arquitectonica/practica/ACONDICIONAMIENTO.HTM>
- EUMUS. *Acústica arquitectónica 2006*
<<http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza//acustica/apuntes/acuarq/acuarq.html>>
- Mercedes Regueiro. *CATT-Acoustic*. Edición 5 Julio 2011
<<http://www.enllave.es/ruido/programa/pro/catt.html>>
- Pablo Montes. *Acondicionamiento y aislamiento acústico*. Edición 28 Noviembre 2010.
<<http://acusticarquitectonicaymedioambiental.blogspot.com.es/2010/11/acondicionamiento-y-aislamiento.html>>
- www.comersan.com

ANEXO : Tablas cálculo T30, T20

POSICIÓN 1. FUENTE T30							
Frecuencia (Hz)	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 4	MIC 5	MIC 6	PROMEDIO
125	1,72	1,61	1,85	2,22	1,57	1,57	1,76
160	1,38	1,76	1,51	1,41	1,58	1,46	1,52
200	1,59	1,57	1,52	1,58	1,39	1,69	1,56
250	1,34	1,60	1,29	1,32	1,38	1,43	1,39
315	1,43	1,51	1,58	1,44	1,46	1,51	1,49
400	1,78	1,62	1,71	1,72	1,47	1,42	1,62
500	1,40	1,45	1,36	1,55	1,34	1,53	1,44
630	1,48	1,40	1,54	1,38	1,46	1,43	1,45
800	1,38	1,43	1,37	1,40	1,32	1,42	1,39
1000	1,41	1,39	1,37	1,47	1,48	1,37	1,42
1250	1,47	1,37	1,46	1,43	1,45	1,43	1,44
1600	1,39	1,41	1,38	1,33	1,37	1,50	1,40
2000	1,28	1,40	1,37	1,36	1,38	1,34	1,36
2500	1,21	1,29	1,30	1,27	1,26	1,30	1,27
3150	1,19	1,21	1,15	1,28	1,23	1,23	1,22
4000	1,13	1,12	1,11	1,14	1,13	1,15	1,13
5000	1,08	1,06	1,08	1,01	1,06	1,05	1,06
6300	0,97	0,97	1,01	0,96	0,96	0,99	0,98
8000	0,80	0,77	0,79	0,81	0,80	0,83	0,80
PROMEDIO							1,42

POSICIÓN 2. FUENTE T30							
Frecuencia (Hz)	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 4	MIC 5	MIC 6	PROMEDIO
125	1,37	1,43	1,54	1,62	1,35	1,56	1,48
160	1,39	1,36	1,45	1,49	1,36	1,72	1,46
200	1,80	1,74	1,53	1,40	1,62	1,61	1,62
250	1,31	1,18	1,26	1,43	1,27	1,37	1,30
315	1,39	1,55	1,54	1,41	1,44	1,39	1,45
400	1,54	1,66	1,47	1,77	1,40	1,60	1,57
500	1,47	1,37	1,41	1,42	1,38	1,46	1,42
630	1,46	1,41	1,44	1,41	1,41	1,49	1,44
800	1,42	1,47	1,43	1,35	1,48	1,48	1,44
1000	1,51	1,43	1,45	1,44	1,47	1,49	1,47
1250	1,47	1,43	1,39	1,41	1,48	1,52	1,45
1600	1,44	1,34	1,36	1,47	1,42	1,43	1,41
2000	1,30	1,40	1,28	1,41	1,40	1,43	1,37
2500	1,27	1,28	1,31	1,31	1,33	1,30	1,30
3150	1,21	1,20	1,18	1,21	1,23	1,23	1,21
4000	1,13	1,13	1,14	1,13	1,17	1,13	1,14
5000	1,03	1,07	1,08	1,07	1,09	1,11	1,08
6300	0,99	0,95	0,93	1,04	0,98	0,95	0,97
8000	0,82	1,05	0,83	0,80	0,80	0,81	0,85
PROMEDIO							1,43

POSICIÓN 1. FUENTE T20							
Frecuencia (Hz)	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 4	MIC 5	MIC 6	PROMEDIO
125	1,56	1,67	1,91	2,1	1,63	1,77	1,77
160	1,38	1,55	1,56	1,36	1,65	1,51	1,50
200	1,54	1,65	1,87	1,84	1,41	1,7	1,67
250	1,51	1,5	1,37	1,32	1,27	1,31	1,38
315	1,19	1,63	1,55	1,48	1,51	1,44	1,47
400	1,64	1,89	1,77	1,59	1,66	1,44	1,67
500	1,45	1,61	1,4	1,54	1,37	1,56	1,49
630	1,6	1,5	1,48	1,32	1,62	1,46	1,50
800	1,38	1,44	1,39	1,38	1,37	1,34	1,38
1000	1,4	1,45	1,38	1,46	1,61	1,59	1,48
1250	1,48	1,37	1,49	1,37	1,54	1,44	1,45
1600	1,36	1,44	1,37	1,34	1,29	1,53	1,39
2000	1,25	1,4	1,36	1,42	1,36	1,36	1,36
2500	1,17	1,22	1,23	1,28	1,24	1,26	1,23
3150	1,2	1,23	1,12	1,3	1,27	1,22	1,22
4000	1,11	1,07	1,12	1,12	1,09	1,11	1,10
5000	1,08	1,05	1,09	0,96	1,08	1,06	1,05
6300	0,92	0,98	0,93	0,96	0,94	0,92	0,94
8000	0,74	0,77	0,79	0,81	0,8	0,83	0,79
PROMEDIO							1,44

POSICIÓN 2. FUENTE T20							
Frecuencia (Hz)	MIC 1	MIC 2	MIC 3	MIC 4	MIC 5	MIC 6	PROMEDIO
125	1,37	1,54	1,44	1,81	1,24	1,88	1,55
160	1,37	1,36	1,57	1,47	1,14	1,43	1,39
200	1,92	1,78	1,31	1,18	1,64	1,79	1,60
250	1,22	1,23	1,2	1,51	1,32	1,49	1,33
315	1,45	1,25	1,49	1,4	1,46	1,28	1,39
400	1,58	1,73	1,36	1,44	1,42	1,58	1,52
500	1,62	1,34	1,39	1,35	1,42	1,45	1,43
630	1,48	1,43	1,49	1,47	1,47	1,7	1,51
800	1,58	1,47	1,51	1,28	1,58	1,51	1,49
1000	1,51	1,46	1,4	1,41	1,36	1,52	1,44
1250	1,49	1,44	1,36	1,3	1,4	1,57	1,43
1600	1,57	1,4	1,39	1,45	1,5	1,35	1,44
2000	1,33	1,42	1,38	1,3	1,4	1,41	1,37
2500	1,28	1,32	1,35	1,29	1,39	1,28	1,32
3150	1,17	1,26	1,21	1,23	1,25	1,26	1,23
4000	1,12	1,14	1,15	1,15	1,19	1,11	1,14
5000	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,16	1,09
6300	0,97	0,93	0,95	1,01	0,98	0,95	0,97
8000	0,82	0,82	0,83	0,8	0,8	0,81	0,81
PROMEDIO							1,44

