

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Optimización de costos para una obra de acondicionamiento acústico de la Iglesia del Seminario de Moncada”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:
D.Alberto Irurzun Ugalde

Tutor/a:
D.Francisco Javier Redondo Pastor

GANDIA, 2015

Resumen

La iglesia del seminario de Moncada en la provincia de Valencia, es un espacio acústico que en la actualidad requiere de una actuación de acondicionamiento acústico con el objetivo de que la voz pueda entenderse con claridad en homilías y diferentes celebraciones eclesíásticas.

Expuestos los principios acústicos que rigen la acústica de salas, hemos obtenido mediante simulación que el tiempo de reverberación es larguísimo y como consecuencia, los índices de inteligibilidad son muy deficientes.

Dado que dicha iglesia es un patrimonio que mayormente no se puede modificar, se estudian las posibilidades máximas de control de reverberación mediante paneles absorbentes, utilizando únicamente las superficies permitidas, llegando a la conclusión mediante simulación computacional que dicho control puede realizarse únicamente en parte, al no ser suficiente la superficie necesaria a cubrir, para lo cual utilizamos una combinación de dos materiales de diferente patrón de absorción espectral que ayuden a propagar el sonido y a mejorar en parte los índices de inteligibilidad.

Es por ello que para que la solución de acondicionamiento acústico sea satisfactoria se propone el uso de un sistema electroacústico que mejore los índices de inteligibilidad. Finalmente, presentamos diferentes soluciones acústicas y electroacústicas posibles con sus costes correspondientes.

Abstract

The Church of the Seminary of Moncada in the province of Valencia, is an acoustic space which currently requires a performance of acoustic conditioning with the aim that the voice can be clearly understood in homilies and different ecclesiastical celebrations.

Exposed the acoustic principles of rooms acoustics, we have obtained through computational simulation that the reverberation time is very long and as a result, levels of intelligibility are very poor.

Since this church is a heritage which mostly cannot be modified, we study possibilities with maximum control of reverberation using absorbent panels, only in the allowed surfaces, coming to the conclusion through computer simulation that acoustic control can only be performed partially, for not having enough surface necessary to cover. Consequently, we use a combination of two materials of different pattern of spectral absorption to help spread the sound and to improve partly the intelligibility index.

With the aim of completing this partial solution, we suggest a electroacoustic system that complements the acoustic correction in order to reach a good intelligibility index. Finally, we present different possible acoustic and electroacoustic solutions with their respective estimates.

Palabras clave: acondicionamiento acústico, inteligibilidad, tiempo de reverberación, materiales absorbentes, electroacústica.

Keywords: acoustic control, intelligibility, acoustic absorbers, reverberation time, electroacoustics.

Índice	Nº Pág.
Resumen	2
Índice	3
Introducción	
Presentación	4
Objetivos	5
Metodología	6
Etapas	7
Problemas	9
Cuerpo del trabajo	
1. Introducción teórica.	
1. a Comportamiento del sonido en una sala.	10
1. b Parámetros de calidad en acústica de salas.	13
1. c Los materiales: tipos y características.	15
2. Situación de inicio.	16
3. Análisis de resultados y posibles vías de mejora.	19
4. Simulaciones en CATT para la mejora del acondicionamiento acústico.	21
5. Materiales seleccionados para un coste óptimo y cumpliendo los requisitos de mejora simulados.	27
6. Resultados obtenidos. Mejoras propuestas.	35
Conclusiones	39
Bibliografía	40
Anexos	41

Introducción

Presentación

El seminario de Moncada, situado al norte de la capital de Valencia tiene una iglesia nombrada monumento de la humanidad, y cuyos responsables vieron conveniente buscar soluciones a los problemas acústicos que percibían. Se pusieron en contacto con responsables del departamento de física aplicada de la Universidad Politécnica de Valencia, con el objeto de que pudieran hallar las causas de dichas “anomalías” acústicas y pudieran presentar propuestas de mejora.

La principal preocupación de los responsables del seminario era la de poder escuchar con claridad la voz del predicador en las diferentes homilías y celebraciones eclesíásticas. Ellos ya tenían instalado un equipo electroacústico de tipo distribuido que ayudara en dicho cometido pero era a todas luces insuficiente.

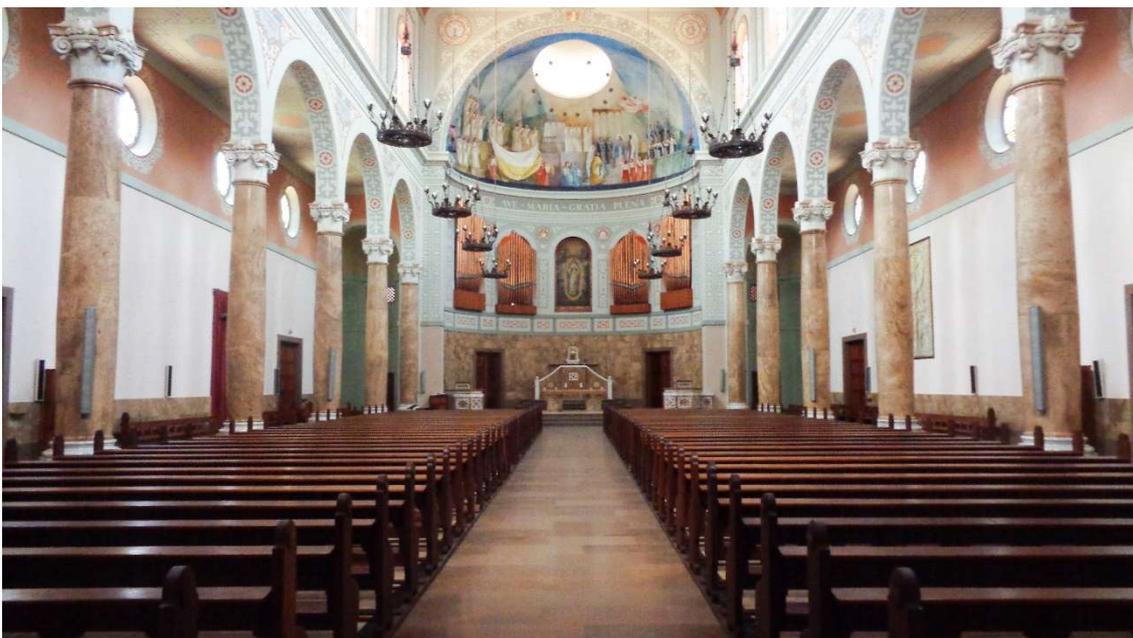


Fig. 1. Vista general de la iglesia del seminario de Moncada en Valencia.

La iglesia del seminario objeto de estudio, es una iglesia altamente reverberante, pues el tiempo de decaimiento de su reverberación podría llegar a los 8 segundos aproximadamente, teniendo en cuenta que su volumen es de unos 19.000 m³. Dicho tiempo de reverberación están lejos del llamado tiempo óptimo de reverberación (T_{op}) (ver fig.16) para ese tipo de salas y constituye uno de los factores más importantes a la hora de obtener una buena inteligibilidad (2). La

inteligibilidad es un parámetro que indica la claridad con la que se percibe la palabra y hoy en día se mide mediante parámetros como STI o RASTI.

En acústica, se realizan actuaciones de acondicionamiento acústico mediante el llamado control acústico. Este control acústico comprende entre otros la medida in-situ de los parámetros acústicos de dicha sala, para su posterior análisis.

Los responsables, entre ellos el profesor D. Javier Redondo, realizaron medidas acústicas y posteriormente modelizaron la iglesia mediante AutoCAD. Después insertaron dicho modelo en el software de simulación de acústica, CATT acoustics y propusieron una primera solución de acondicionamiento acústico.

Objetivos

El objetivo más general es el de trazar una metodología de trabajo para la resolución de este tipo problemas acústicos, utilizando herramientas del ámbito profesional como son CATT acoustics y EASE, siempre teniendo en cuenta los conceptos y leyes de la acústica de salas.

Por medio de este trabajo se pretende ofrecer soluciones de mejora de la calidad acústica mediante el uso de unas herramientas de análisis y simulación especializadas, proponiendo soluciones reales de acondicionamiento basadas en materiales acústicos e instalaciones de profesionales que el sector ofrece.

El trabajo se enfoca primeramente a analizar los parámetros acústicos obtenidos mediante la simulación acústica de la iglesia, obteniendo un modelo que genere unos resultados acordes a los obtenidos en la medida acústica real.

En el software de simulación (en nuestro caso CATT), se ensayan soluciones acústicas que comprenden materiales absorbentes principalmente, con unas características concretas de absorción y su ubicación. La ubicación es de importancia capital en este caso, ya que al tratarse de una iglesia declarada patrimonio mundial, en la mayoría de sus superficies no es posible por no estar permitido, colocar materiales que cubran las superficies originales.

Entre los objetivos planteados en el trabajo, en el principal se estudian soluciones acústicas que tengan en cuenta materiales acústicos de diferentes fabricantes, cuya colocación final permita un resultado final satisfactorio, todo ello al menor coste posible. Por ello, el objetivo final es una propuesta concreta de acondicionamiento acústico con un presupuesto concreto.

Para ello se comparan el modelo inicial, el cual no tiene acondicionamiento acústico alguno con un modelo que plantea una actuación de acondicionamiento acústico basado en una combinación de dos materiales acústicos diferentes, observándose las mejoras sobre todo en un control del tiempo de reverberación, en una equilibrada respuesta tonal y como consecuencia en una mejora de la inteligibilidad.

También se plantea el uso de un sistema electroacústico que ayude a conseguir un nivel de inteligibilidad satisfactorio. Para ello se trabaja con un software de simulación llamado EASE y que permite entre otros la obtención de un mapeo de inteligibilidad en diferentes puntos de la

audiencia. Se propone en este sentido una solución concreta: una marca y modelo de cajas acústicas que previamente hayan sido simuladas en EASE.

Metodología

La metodología utilizada para realizar la propuesta de acondicionamiento de la iglesia del seminario de Moncada es la siguiente:

- Se realiza una primera visita a la iglesia con los responsables del seminario de Moncada, donde se procede a realizar inspección visual y se realiza una serie de medidas acústicas "In situ".
- Se modeliza la iglesia mediante un programa de CAD y se definen todos los planos del modelo en 3D en formato 3Dcara.
- Se exporta dicho modelo al programa de simulación CATT acoustics. CATT trabaja con una definición de planos, a través de la definición de los vértices (puntos) de cada plano y para modelos que tienen una cierta complejidad como es el caso, se importan los modelos dibujados en CAD. Estos modelos tienen formato .dxf y se definen en CAD como cara3D.
- CATT acoustics se basa en la acústica geométrica. Para ello traza miles de rayos por octava y como resultado reconstruye un ecograma que recoge el conjunto de reflexiones en un punto de la sala, generado por una o varias fuentes, con unas características de directividad, respuesta en frecuencia, etc.
- Se genera la geometría de la iglesia en CATT y se solucionan aspectos como la fuga de rayos, debido principalmente a huecos existentes entre planos o a planos definidos al revés.
- Una vez el modelo en CATT presenta un bajo nivel de fuga de rayos, se procede a realizar la simulación. Se simulan las características acústicas en CATT y se interpretan los parámetros acústicos obtenidos. Se estudian las posibilidades de mejora atendiendo a las leyes de acústica que rigen las salas.
- Se realiza un estudio de mercado de materiales que ofrecen las empresas del sector, siempre con materiales que hayan sido caracterizados según ensayos que cumplan las normas. Se analizan diferentes opciones como paneles con velo acústico, paneles perforados o cortinas.(3)
- Se integra el material /materiales seleccionados en el modelo, en los espacios y planos definidos en el modelo y se vuelve a realizar una simulación. Dicha simulación incluye la auralización de los resultados obtenidos. Ello es posible gracias a que CATT realiza un ecograma a partir de la trayectoria que miles de rayos trazados realizan a los largo del recinto y de ahí construye la respuesta al impulso (IR).
- Se realizan las auralizaciones correspondientes, que CATT construye mediante convolución de IR obtenida con sonidos patrón grabados en sala anecoica.
- Se analizan los datos obtenidos de inteligibilidad (STI) y tiempos de reverberación en función de la frecuencia y vuelven a modificarse los materiales acústicos, su cantidad o su ubicación estudiando cada uno de los parámetros modificados por separado y viendo el efecto de cada uno de ellos en el resultado final.

- Cuando se considera que acústicamente hemos llegado a un resultado lo más satisfactorio posible, se diseña y se incide en el sistema electroacústico.
- Para ello utilizamos EASE, software de predicción acústica que nos permite incorporar características técnicas de cajas acústicas por medio de archivos estandarizados en formato .GLL y donde se ubican y orientan diferentes modelos de cajas acústicas. Se incide especialmente en la característica de directividad de las cajas, las cuales nos van a dar una mayor o menor cobertura en la zona de la audiencia y por lo tanto una mayor o menor inteligibilidad. Una cobertura excesiva empeorará la distancia crítica y generará más reflexiones, en cambio una cobertura pobre, generará niveles insuficientes y seguramente una respuesta tonal pobre, que incidirá en una baja inteligibilidad. Hay que hallar la cobertura horizontal adecuada.
- Se proponen presupuestos reales de acondicionamiento acústico y de sistemas electroacústicos facilitados por diferentes fabricantes y que lleven a similares resultados acústicos.

Etapas

- Se realizó una primera inspección visual y se realizaron una serie de medidas acústicas “In situ”.
- Se modelizó la iglesia mediante un programa de CAD.
- Se exportó dicho modelo al programa de simulación CATT acoustics. CATT trabaja con una definición de planos, y para modelos que tienen una cierta complejidad como es el caso, se importan los modelos dibujados en CAD. Estos modelos tienen formato .dxf y se definen en CAD como cara3D.
- Se simulan las características acústicas en CATT y se interpretan los parámetros acústicos obtenidos. Se estudian las posibilidades de mejora atendiendo a las leyes de acústica que rigen las salas.
- Se realiza un estudio de mercado de materiales que ofrecen las empresas del sector, siempre con materiales que hayan sido caracterizados según ensayos que cumplan las normas. Se analizan diferentes opciones como paneles con velo acústico, paneles perforados o cortinas.(3)
- Se integra el material /materiales seleccionados en el modelo, en los espacios y planos definidos en el modelo y se vuelve a realizar una simulación. Dicha simulación incluye la auralización de los resultados obtenidos. Ello es posible gracias a que CATT realiza un ecograma a partir de la trayectoria que miles de rayos trazados realizan a lo largo del recinto y de ahí construye la respuesta al impulso (IR).
- Se realizan las auralizaciones correspondientes, que CATT construye mediante convolución de IR obtenida con sonidos patrón grabados en sala anecoica.
- Se analizan los datos obtenidos de inteligibilidad (STI) y tiempos de reverberación en función de la frecuencia y vuelven a modificarse los materiales acústicos, su cantidad o su ubicación estudiando cada uno de los parámetros modificados por separado y viendo el efecto de cada uno de ellos en el resultado final.
- Cuando se considera que acústicamente hemos llegado a un resultado lo más satisfactorio posible, se diseña y se incide en el sistema electroacústico.
- Para ello utilizamos EASE, software de predicción acústica que nos permite incorporar características técnicas de cajas acústicas por medio de archivos estandarizados en formato .GLL y donde se ubican y orientan diferentes modelos de cajas acústicas. Se incide especialmente en la característica de directividad de las cajas, las cuales nos van a dar una mayor o menor cobertura en la zona de la audiencia y por lo tanto una mayor o menor inteligibilidad. Una cobertura excesiva empeorará la distancia crítica y generará más reflexiones, en cambio una cobertura pobre, generará niveles insuficientes y seguramente una respuesta tonal pobre, que incidirá en una baja inteligibilidad. Hay que hallar la cobertura horizontal adecuada.
- Se proponen presupuestos reales de acondicionamiento acústico y de sistemas electroacústicos facilitados por diferentes fabricantes y que lleven a similares resultados acústicos.

Problemas

A la hora de acometer un proyecto de esta complejidad, en el que se estudian los principios de la acústica, se aplican con herramientas computacionales de una cierta complejidad y se depende de la información de fabricantes del sector surgen los siguientes problemas y dificultades:

- El hecho de trabajar desde el ordenador personal con una versión de CATT acoustics algo desfasada, la 8.0 b en concreto en su versión demo, ha generado algunas limitaciones: la imposibilidad de realizar el mapeo de la inteligibilidad, la imposibilidad de generar diferentes fuentes a la vez con sus respectivos retardos y poder obtener resultados en diferentes puntos de la audiencia ha sido una limitación reseñable.
- En el caso particular del alumno, ha trabajado bajo Windows XP hasta que su ordenador dejó de funcionar y al pasar a Windows 10, no pudo abrir los archivos .GEO de Catt Y por lo tanto tuvo que volver a encontrar un viejo computador que trabajara bajo XP.
- Los fabricantes al ser consultados, no siempre facilitaron los precios de sus productos y menos los presupuestos de montaje de los mismos.
- Al utilizar el software EASE, no pude conseguir la versión completa, por lo tanto la simulación solamente pudo realizarse en la versión demo de EASE. Dicha versión no dejaba introducir altavoces de columna, sino solamente altavoces de techo y además no permitía introducir los archivos .GLL de la marca y modelo seleccionados por lo que no se pudo realizar un mapeo de niveles de inteligibilidad ni de distribución de niveles.

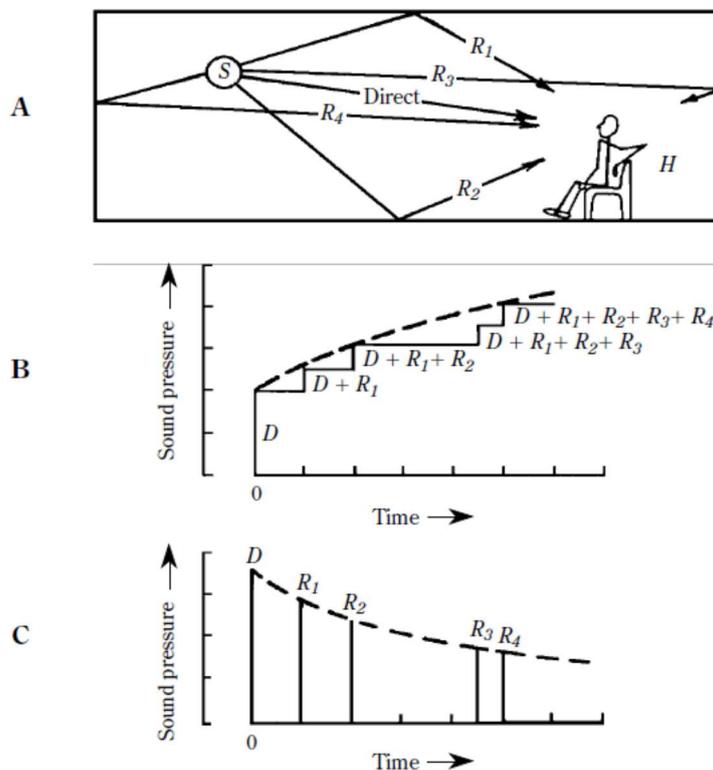
Cuerpo del trabajo

1. Introducción teórica.

1.1 Comportamiento del sonido en una sala.

Vamos a exponer las leyes de la acústica que rigen en una sala, ya que a la hora de realizar simulaciones computacionales, analizar parámetros y realizar análisis cualitativos vamos a referirnos a ellas constantemente.

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



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

Se define el tiempo de reverberación como el tiempo que transcurre desde cesa un sonido hasta que su nivel desciende 60 dB.

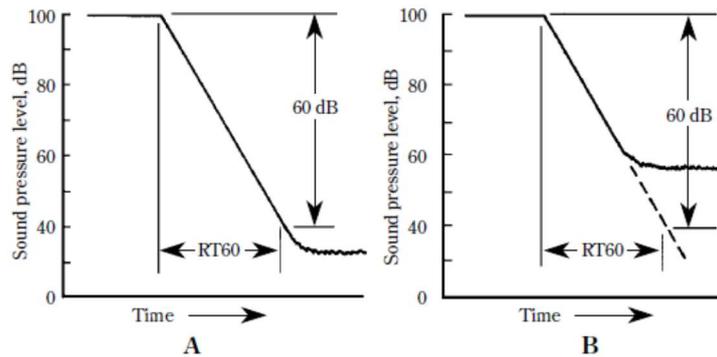


Fig. 3. Definición de tiempo de reverberación (A) y extrapolación realizada para su medida (B) (Everest, F. Alton).

Dicha medida no siempre es fácil de conseguir ya que al haber ruido de fondo el nivel sonoro de la fuente tiene que ser muy alto. Por ello se recurre a la extrapolación. En acústica es habitual hacer medidas de T-15, T-20 y T-30. Por ejemplo, en la medida T -30 se toma como referencia de tiempo el nivel -5 dB hasta el nivel -35 dB y el resultado de tiempo obtenido se multiplica por dos.

El tiempo de reverberación se puede medir por medio de la siguiente expresión que formuló W.C. Sabine, y constituye un cálculo aproximado que sustenta la *teoría estadística*. La fórmula es la siguiente:

$$RT = 0,16 * V/A \tag{1}$$

donde A es la absorción total y V es el volumen de la sala en m³. A su vez se define la absorción total como el conjunto de superficies que componen una sala, teniendo en cuenta el coeficiente medio de absorción de cada una de ellas:

$$A = \sum_{i=0}^n S_{i*} \alpha_i \tag{2}$$

donde α_i es el coef. medio de absorción de cada superficie.

Dicha fórmula nos hace comprender que cuanto más absorbente sean los materiales de una sala y más superficie tengamos de ellos, menor será el tiempo de reverberación.

Campo directo y campo reverberante

Al observar el comportamiento del sonido en una sala vemos que a cortas distancias se comporta como si estuviera al aire libre, esto es, el nivel de presión sonora NPS desciende 6 dB cada vez que nos alejamos de la fuente doblando la distancia (ley inversa al cuadrado) pero llegada una distancia, el nivel se mantiene y a partir de esa distancia no desciende más.

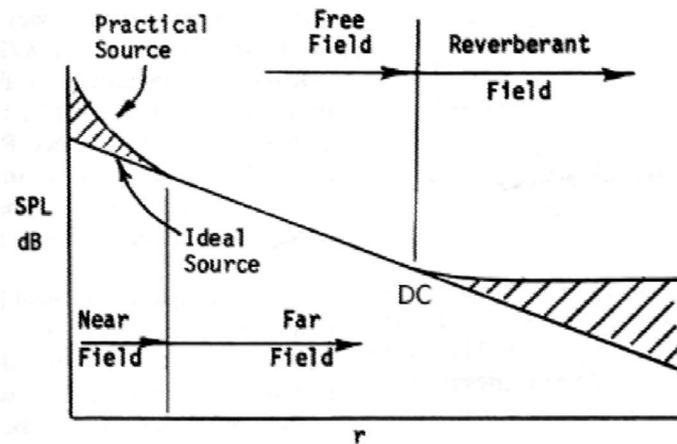


Fig. 4. Comportamiento del sonido con la distancia en una sala cerrada.

El campo Cercano es aquella zona o espacio geométrico muy próximo a la fuente donde se presentan alinealidades respecto de la atenuación del sonido en función de la distancia y exhibe efectos netamente reactivos (de almacenamiento de la energía).

El campo Lejano es aquel que se genera a partir de la distancia donde se comienza a cumplir la ley del cuadrado inverso a medida que el receptor se aleja de la fuente (-6dB por cada duplicación de la distancia para fuentes esféricas).

La zona donde predomina el sonido directo se denomina zona de campo directo. A dicha zona pertenecen los puntos más próximos a la fuente sonora y en ella el nivel de presión sonora, llamado nivel de campo directo LD, disminuye 6 dB cada vez que se dobla la distancia a la fuente. Es como si el receptor estuviese situado en el espacio libre.

La zona donde predomina el sonido reflejado recibe el nombre de zona de campo reverberante (es por ello que a dicho sonido también se le denomina sonido reverberante). A ella pertenecen los puntos más alejados de la fuente sonora. En esta zona, el nivel de presión sonora, denominado nivel de campo reverberante LR, se mantiene constante.

La distancia para la cual LD = LR se denomina distancia crítica Dc. Se puede demostrar que:

$$D_c = 0,14 \sqrt{QR} \quad (3)$$

donde:

Q = factor de directividad de la fuente sonora en la dirección considerada.

R = constante de la sala (en m²) = $\frac{St * \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$

St = superficie total de la sala (en m²)

$\bar{\alpha}$ = coeficiente medio de absorción de la sala.

Con todo ello podemos concluir que cuanto más pequeña sea la distancia crítica, más reverberante será la sala.

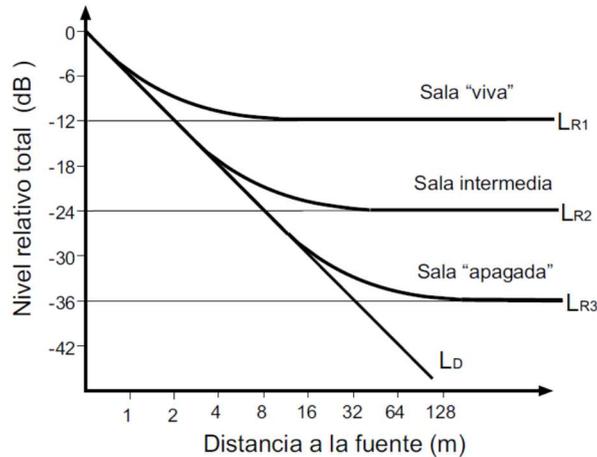


Fig. 5. Niveles relativos totales en diferentes tipos de salas (Antoni Carrión Isbert).

1.2 Parámetros de calidad en acústica de salas.

A la hora de realizar una valoración de la calidad acústica de una sala, se definen una serie parámetros objetivos en los que se fundamenta el diseño y control de la acústica de salas.

Exponemos los parámetros más relevantes de cara al trabajo que nos ocupa.

a) Parámetros relacionados con el tiempo de reverberación.

EDT "Early Decay Time", tiempo de reverberación calculado a partir de la interpolación del tiempo que transcurre desde el nivel 0 dB spl a -10 dB spl.

T-20, tiempo de reverberación calculado a partir de la interpolación del tiempo que transcurre desde el nivel -5 dB spl a -25 dB spl, y multiplicando por 3.

T-30, tiempo de reverberación calculado a partir de la interpolación del tiempo que transcurre desde el nivel -5 dB spl a -35 dB spl, y multiplicando por 2. Se considera una de las medidas más fiables.

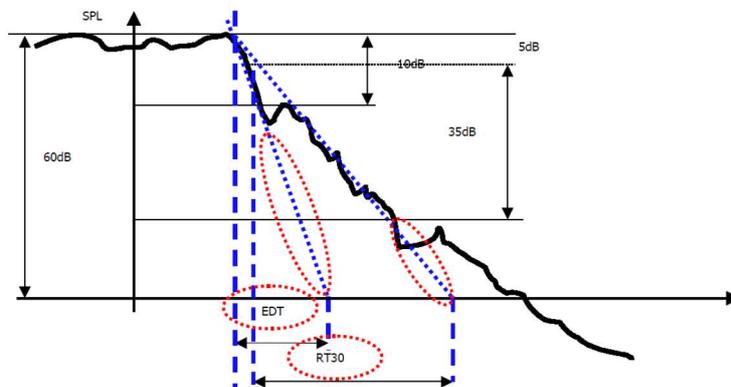


Fig. 6. Representación de criterios de medida de EDT y T30.

Claridad C50. La claridad de la voz, C_{50} es un parámetro relacionado con la inteligibilidad del mensaje oral. Compara la energía que llega del sonido en las primeras reflexiones con las que llegan más tarde y muestra el grado de separación entre los diferentes sonidos de un mensaje oral. Los valores recomendados en ingeniería acústica para el parámetro C_{50} están por encima de los 2 dB. Si el valor calculado de este parámetro está por debajo de los 2 dB, el mensaje oral emitido resultaría confuso.

Claridad C80. Claridad musical, para salas destinadas a música. Se define como el cociente entre la energía sonora recibida durante los 80 ms después de recibir el sonido directo (este incluido) y la energía que llega después de esos 80 ms. Se expresa en dB. Los valores se recomiendan que estén entre - 4 dB y 0 dB para música.

b) Parámetros relacionados con la inteligibilidad.

b1) %ALCons (“Articulation Loss of Consonants”) o Pérdida de articulación de consonantes.

Muestra las pérdidas de articulación en porcentaje, que es indicativo del grado de inteligibilidad. %ALCons en un punto dado se podía determinar, simplemente, a partir del conocimiento del tiempo de reverberación RT y de la diferencia entre los niveles de presión sonora de campo directo LD y decampo reverberante LR en dicho punto.

Habitualmente, el %ALCons se calcula en la banda de 2 kHz, por tratarse de la banda de máxima contribución a la inteligibilidad de la palabra.

Cuanto más cerca esté situado el receptor de la fuente sonora (LD-LR mayor), menor será el valor de %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad. Cuanto menor sea el RT, igualmente menor será el %ALCons, es decir, mayor inteligibilidad.

b2) STI (“Speech Transmission Index”) y RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”).

Es otro parámetro alternativo que permite cuantificar el grado de inteligibilidad de la palabra. Dicho parámetro, conceptualmente más complejo, se denomina STI (“Speech Transmission Index”) y su valor oscila entre 0 (inteligibilidad nula) y 1 (inteligibilidad total).

RASTI (“Rapid Speech Transmission Index”) es una versión simplificada del STI. Se recomienda que tenga un valor igual o mayor a 0,65 para una buena inteligibilidad de la palabra.

Habitualmente, el RASTI es el parámetro medido en recintos, debido a su rapidez de cálculo en relación con el STI.

Existe una muy buena correlación entre los valores de %ALCons y de STI / RASTI.

%ALCONS	STI / RASTI	VALORACIÓN SUBJETIVA
1,4% - 0%	0,88 - 1	Excelente
4,8% - 1,6%	0,66 - 0,86	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

Fig 7. Correspondencia entre STI/RASTI y %ALcons y valoración subjetiva de inteligibilidad (Antoni Carrión Isbert).

b3) Relación entre tiempo de reverberación e inteligibilidad.

Habría que definir muchos casos de psicoacústica que muestren el enmascaramiento temporal y frecuencial del oído humano, ya que es muy complejo aunque exponemos un ejemplo:

En una sala con un tiempo de reverberación alto, el decaimiento energético de una vocal emitida en la misma es apreciablemente más lento que su decaimiento propio (aquél que se observaría si la vocal se emitiese en el espacio libre). Tal hecho provoca un solapamiento temporal de la vocal con la consonante emitida inmediatamente después.

Además el grado de inteligibilidad está relacionado con las frecuencias más altas, de 2 a 4kHz, y el enmascaramiento de las mismas debido a un exceso de reverberación provoca una inevitable pérdida de inteligibilidad en la sala.

1.3 Los materiales: tipos y características.

Los materiales son la herramienta fundamental a la hora de realizar el control acústico. Distinguiremos tres tipos de materiales si los clasificamos en base a la función que realizan: materiales absorbentes, materiales reflectantes y materiales difusores.

El grado de absorción viene dado por el cociente entre la energía absorbida y la energía incidente en un material. Se conoce como el coeficiente de absorción α . El dato de coeficiente de absorción se da de forma normalizada, para las bandas de octava entre 125 Hz y 4 kHz o en su

caso en bandas de tercio de octava al menos para ese mismo rango. La norma más habitual utilizada para la caracterización de la absorción de los materiales es la UNE- EN ISO 354.

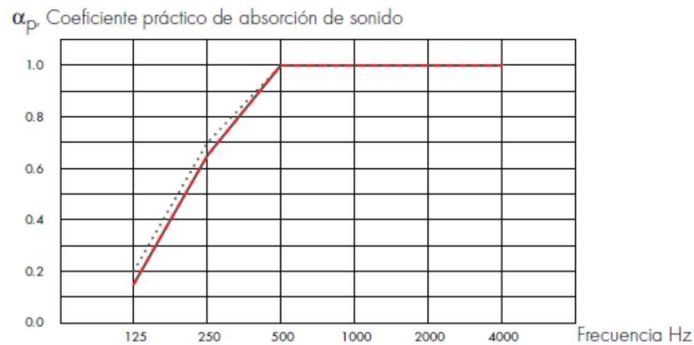


Fig. 8. Ejemplo de gráfica de absorción acústica.

La absorción tiene diferentes aplicaciones, las de eliminar ecos o reducir el nivel de reverberación entre otros.

Los materiales absorbentes pueden estar compuestos por materiales porosos o pueden ser resonadores. Entre los resonadores tenemos los de cavidad (tipo Helmholtz), entre los que se encuentran las placas perforadas, y por otro lado los de membrana.

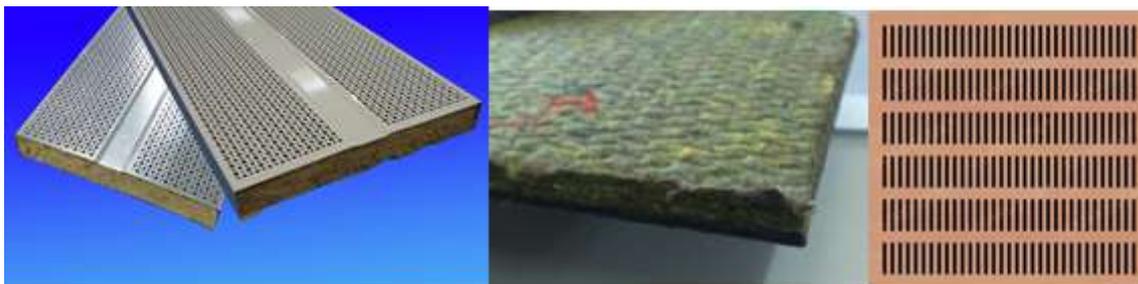


Fig. 9. Ejemplos de absorbente con perforaciones y poroso combinado, lana porosa y material con perforaciones respectivamente.

Los materiales reflectantes son materiales muy poco absorbentes con un coeficiente de absorción α muy bajo. Cumplen las leyes de la acústica geométrica. Se encuentran en materiales comunes como loseta, vidrio, mármol, hormigón pulido, etc. No se utilizan para hacer control acústico.

Los materiales difusores, son capaces de reorientar de forma uniforme la energía que se incide sobre ellos debido al fenómeno de difracción de los rayos ante obstáculos y aberturas. Los hay de tipo simple, y los hay de fase.

Entre las aplicaciones de los difusores está la de redistribuir los modos de una sala y eliminar ondas estacionarias.

Los difusores más habituales son los de fase, invención de Manfred R. Schroeder, donde encontramos unidimensionales QRD (Quadratic Residue Diffuser), cuyo diseño se basa en una serie de láminas de la misma dimensión y una mayor o menor cavidad, y bidimensionales QR, generan una muy buena difusión en todas las direcciones. También son de este tipo los difusores

MLS, los cuales tienen láminas de solamente dos profundidades y sus láminas siguen una secuencia MLS.



Fig. 10. Difusores de fase: QRD, QR y MLS respectivamente.

A continuación visualizamos un ejemplo práctico del efecto que produce una onda incidente en cada uno de estos tipos de material (absorbente, reflectante y absorbente):

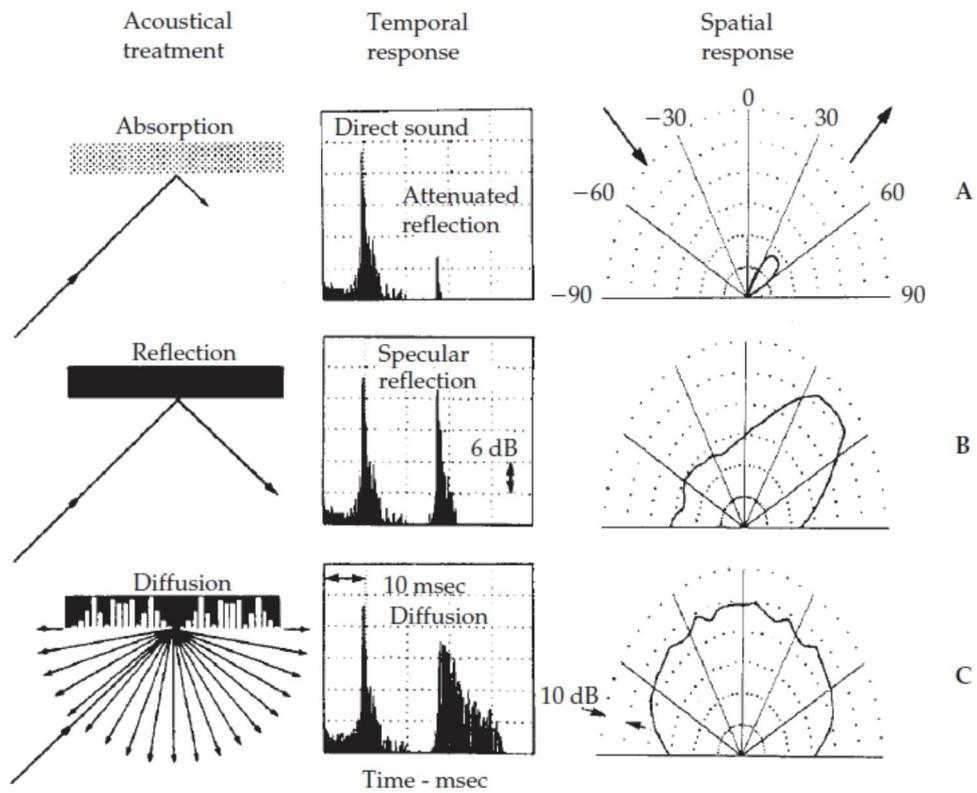


Fig. 11. Una comparación de las características físicas de tres tratamientos, mostrando la respuesta temporal y la respuesta espacial. (A) La absorción. (B) Reflexión. (C) Difusión. (D'Antonio, RPG Difusor Systems, Inc.)

2. Situación de inicio.

Partimos con un modelo en 3D de la iglesia ya definido, donde previamente responsables del departamento de física aplicada de la EPSG de Gandía han modelado en CAD y han definido previamente todos los planos (superficies) que componen dicho modelo (más de 500 en este caso) por medio de la herramienta 3D cara.

Nosotros hemos activado dicho modelo en CATT y hemos observado que había un pequeño problema de fuga de rayos, que generaba cerca del 10% de fugas. CATT nos indica que las fugas provienen de las dos puertas que dan a la iglesia por su lateral, lateral derecho si miramos de frente al altar. Dicho problema lo hemos solventado cambiando el icono “/” que define el orden de cada plano, de forma que el plano queda ahora cerrado desde el interior.

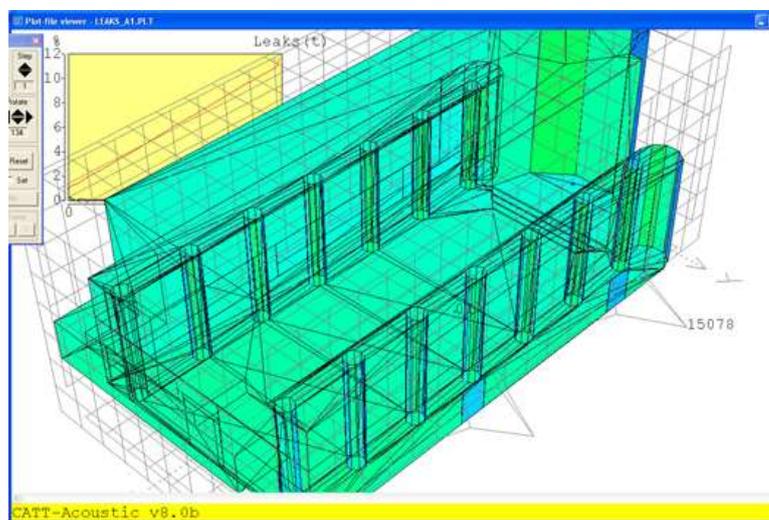


Fig. 12. Fuga de rayos en las dos puertas laterales. Fugas en torno al 10%(Archivo LEAKS).

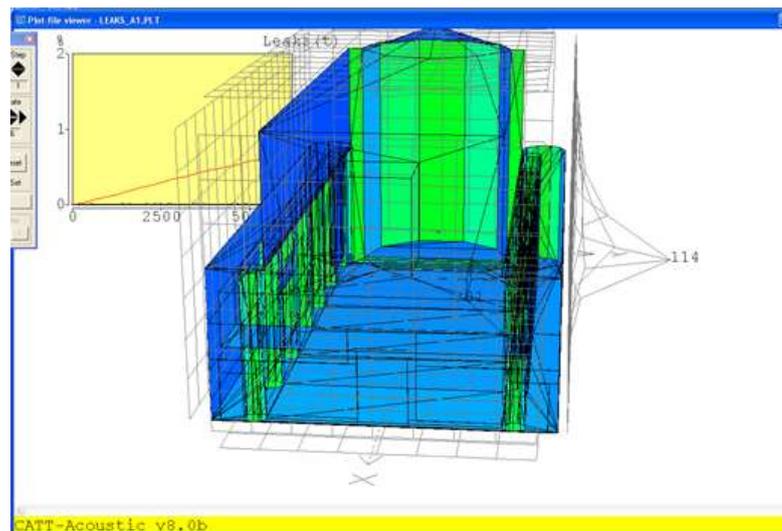


Fig13. Cantidad de fugas inferior a 1 % una vez solventada la definición de planos que componen las dos puertas laterales (archivo LEAKS).

Una vez que las fugas de rayos se mantienen en porcentajes los más bajos posibles, en este caso inferior al 1%, definimos una serie de parámetros que CATT solicita para poder realizar los

cálculos. Entre ellos, el número de rayos por octava a utilizar en la simulación, la cual es necesariamente igual o superior a 30.000 rayos/oct. y los resultados que obtenemos son los siguientes. Debemos subrayar que los resultados obtenidos son para una posición de fuente (simula posición del abad en una homilía) y diferentes posiciones de recepción (Mostramos los datos más relevantes):

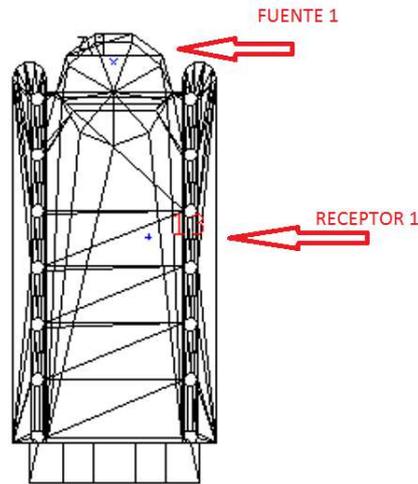


Fig. 14. Posición fuente 1 y receptor 1.

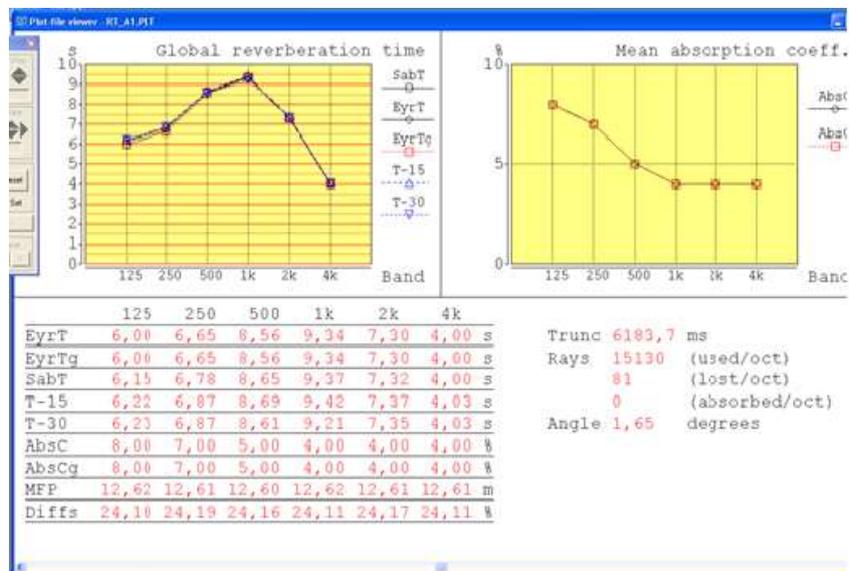


Fig. 15. Datos de los tiempos de decaimiento obtenidos inicialmente sin material de acondicionamiento.



Fig. 16. Ecograma obtenido en CATT inicialmente sin acondicionamiento.

Como observamos los tiempos de decaimiento o tiempo de reverberación son muy largos, superiores a 9 segundos para la banda de 1kHz, y además, la uniformidad tonal de la reverberación es alterada por una presencia exagerada de frecuencias medias en la misma.

Por otra parte, los valores de inteligibilidad obtenidos para una posición del receptor 1, son los siguientes. Los valores de inteligibilidad se dan mediante el parámetro STI (Speech Transmission Index).

REC 1	Value (%)	With background noise
RASTI	23,1 (BAD)	23,1 (BAD)
STIuser	29,6 (BAD/POOR)	28,6 (BAD)

f (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
TI [%]	25,6	22	20,4	23,6	34,7	52,7

Fig. 17. Valores de STI y RASTI obtenidos en CATT para posición de recepción 1 sin acondicionamiento.

Observamos que el mismo programa en su escala de inteligibilidad (STI) define como malo (BAD) el nivel de STI. Este es un parámetro clave para definir la claridad con la que se perciben las palabras de un orador. Como sabemos, el tiempo de reverberación así como su contenido espectral equilibrado tienen una influencia muy grande en la valoración global del STI, por lo que incidiremos en su disminución y adecuación.

Cabe mencionar que la distancia crítica con estas características es muy baja, y que por lo tanto, los datos obtenidos en diferentes puntos de la audiencia de la sala serán similares. Esto es, nos encontramos en campo reverberante en la mayoría de posiciones de la sala. Exponemos un mapa de distribución de niveles obtenido.

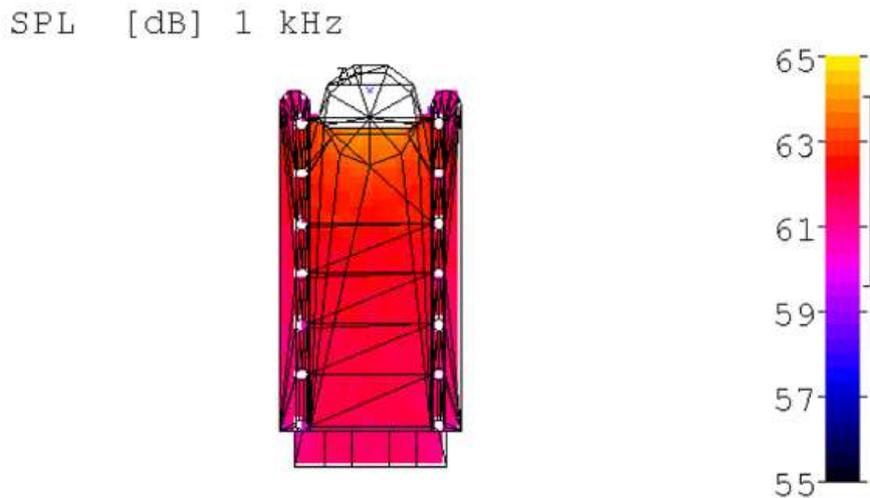


Fig. 18. Distribución de niveles SPL para 1kHz.

Como vemos, las diferencias de nivel entre los puntos más cercanos y lejanos a la fuente sonora no llegan a los 6 dB, de lo cual deducimos también que no hace falta que la fuente sonora genere grandes niveles de presión con el objeto de proyectar los sonidos hasta las últimas filas de la audiencia.

De esta distribución de niveles (vemos que tiene una caída inferior a 6dB), podemos decir mirando a la figura 5 que se trata de una sala “muy viva” y que la distancia crítica es muy corta.

Procedemos también a obtener la respuesta al impulso de la sala con estas características para realizar las auralizaciones correspondientes (anexo X), y confirmamos la sensación sonora obtenida al realizar la visita a dicha iglesia: un tiempo de decaimiento muy largo y muy denso en frecuencias medias que enmascaran el entendimiento de las palabras siguientes cuando se habla con cadencia o con un ritmo incluso lento.

3. Análisis de resultados y posibles vías de mejora.

La iglesia del seminario de Moncada parte con unas características de inteligibilidad de la palabra pobre, con una cantidad de reflexiones muy cuantiosas debido también a la cantidad de columnas y una reverberación muy larga, con una acumulación de reflexiones importante en la gama de frecuencias medias (centrada en 1kHz). Todo ello hace que las palabras no puedan entenderse incluso en posiciones cercanas a la fuente sonora.

Si acudimos a obtener referencias del tiempo óptimo de reverberación, $T_{60}(x)$, para una sala de estas características, esto es, una iglesia o templo con un volumen de unos 18.000 m³, concluimos que estamos muy lejos de dichos valores.

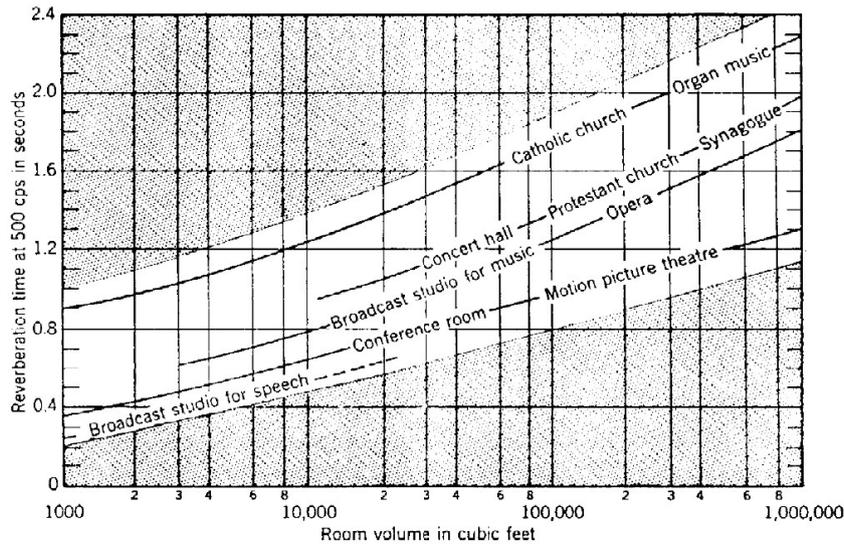


Fig. 13.25. Optimum reverberation times for rooms of various volumes and uses. (Compiled from the literature and from the experience of Bolt Beranek and Newman, Consultants in Acoustics.)

Fig. 19. Tiempos óptimos de reverberación. Autor: Leo L. Beranek "Acoustics".

La tabla de tiempos óptimos de reverberación está en pies cúbicos por lo que en la tabla miraremos un volumen de $18.000 \text{ m}^3 = 635.664 \text{ cubic feet}$ y obtenemos para una iglesia católica unos valores de 2,2 segundos aproximadamente. Nosotros estamos lejos de esos valores, podríamos hacer un primer cálculo aproximado de la superficie que necesitaríamos cubrir con material acústico absorbente para llegar a dichos valores. Para ello hacemos uso de la fórmula de Sabine (ver fórmula (1)) para cálculo del tiempo de reverberación.

Procedemos a realizar un cálculo básico para saber qué superficie haría falta tratar para poder bajar a ese tiempo óptimo de 2,2 segundos. Aplicamos la fórmula (1) a nuestro caso:

$$2,2 = 0,16 * 18000/A$$

$$A = (5700 - x) * 0,08 + x * 0,9$$

Hemos considerado que el material acústico tiene un coeficiente de absorción de 0,9, esto es, muy absorbente. Por el contrario hemos considerado, obteniendo los datos en Catt, que las superficies sin tratar tienen aproximadamente un coeficiente de absorción de 0,08, esto es, muy bajo.

Al despejar las dos ecuaciones obtenemos que nuestra incógnita "x" da un valor de superficie en m^2 de:

$$x = 1040,36 \text{ m}^2$$

Es por ello, que la limitación de espacio para instalar material acústico absorbente nos impedirá llegar a valores óptimos de tiempos de reverberación y limitará en parte, como veremos más adelante la obtención de unos buenos niveles de inteligibilidad.

Según autores de la ingeniería acústica como Philip Newell, para comenzar a bajar notablemente el RT de una sala, hay que cubrir con material absorbente al menos con el 20% de la superficie total de la sala (conocida como “the 20% rule”). Esta regla es un cálculo básico para hacer un cálculo rápido y aproximado.

Si lo aplicamos a nuestro caso, la superficie total de la sala es de unos 5700 m² de superficie. Hablaríamos entonces de cubrir unos 1140m², eso sí, para una reducción notable. Todo ello, en un cálculo muy básico. Por ahora, la superficie que nos proponemos cubrir al sumar las diferentes superficies según Catt es de unos 500 m². Esta limitación viene dada porque al tratarse de una iglesia declarada patrimonio mundial, la mayoría de sus superficies como el techo tallado en madera o las paredes con pinturas, no pueden ser cubiertas con material acústico.

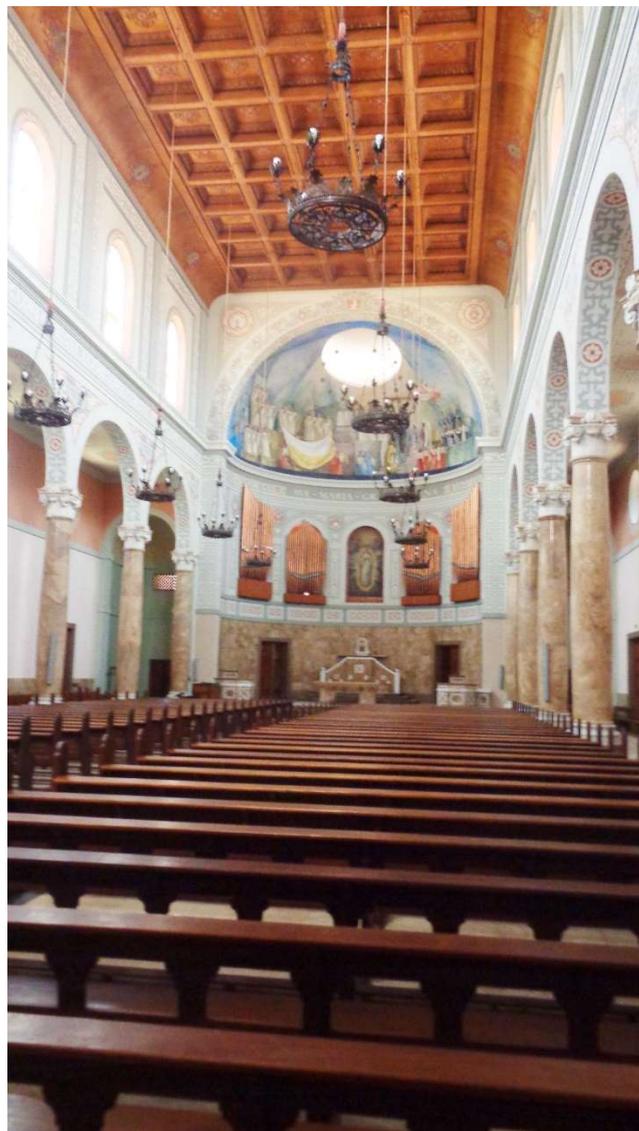


Fig. 20. Adornos y diferentes revestimientos en las superficies de la iglesia.

Por ello, prácticamente las únicas superficies en donde se puede realizar la actuación de acondicionamiento acústico son en las paredes inferiores y fondo trasero inferior (ver figura 18 en color azul) ya que en el resto, parte alta de columnas, paredes superiores hay diferentes

pinturas, adornos etc. y el techo está revestido en madera con molduras que generan una estructura de paneles.

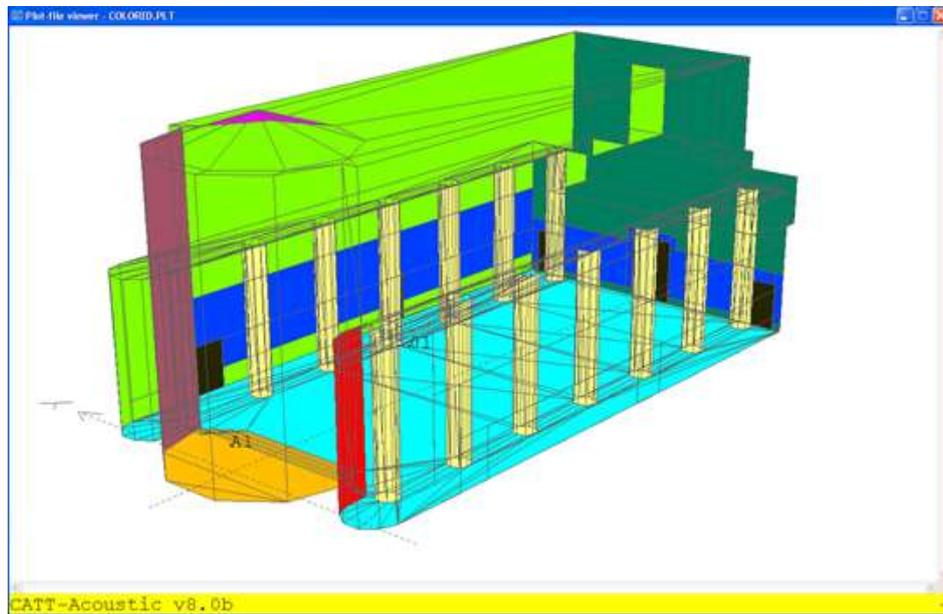


Fig. 21. Modelo Catt en 3D del seminario de Moncada donde se muestran en azul las superficies posibles de revestir con material acústico.

4. Simulaciones en CATT para la mejora del acondicionamiento acústico.

Los responsables del departamento de física aplicada realizaron una primera propuesta de acondicionamiento eligiendo un material absorbente, especialmente en frecuencias medias. El material elegido es el modelo M1 Ideaperfo de Ideatec (ver Anexo x), la cual es una empresa del sector acústico situada en Novelda (Alicante). Dicho material, consiste en planchas perforadas de 243 por 60 centímetros y con una plancha trasera de lana de roca de 4 cm, genera los siguientes resultados de absorción acústica:

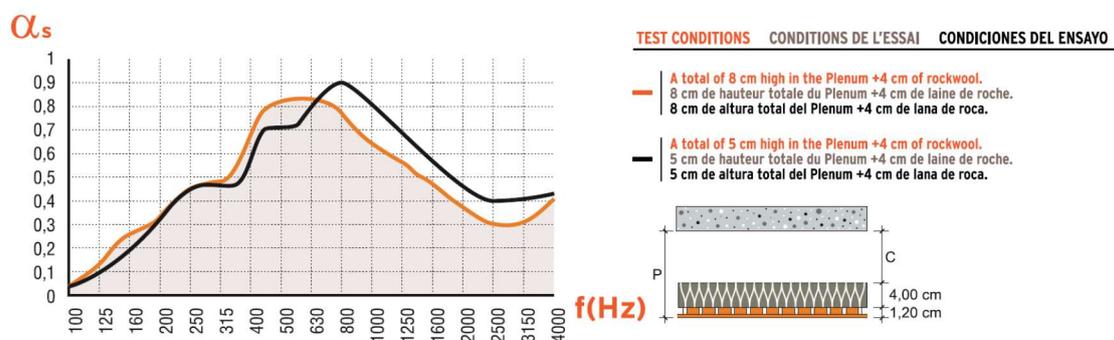


Fig. 22. Características acústicas de IdeaperfoM1. Fuente: Ideatec.

Para nuestra aplicación es interesante que tenga una cámara plenum total de 5 cm y así absorba especialmente en torno a 1kHz. Dicho material genera un coeficiente medio de absorción de $\alpha = 0,60$.

Insertamos las características de dicho material de absorción en el archivo .GEO de Catt acoustics con el objeto de realizar una nueva simulación y observar las mejoras obtenidas en cuanto a los parámetros anteriormente descritos.

El resultado obtenido es el siguiente, donde observamos que el tiempo de reverberación ha descendido a la mitad, y el contenido espectral de las reflexiones ha descendido como era de suponer en torno a 1kHz. También se observa cual es la absorción que generan el conjunto de materiales de la sala, con clara predominancia del material acústico M1 (en comparación al resultado obtenido a la absorción sin materiales acústicos).



Fig. 23. Tiempos de reverberación obtenidos con la inclusión de material acústico M1 Ideaperfo de Ideatec.

El ecograma obtenido para la misma posición de receptor es la siguiente:

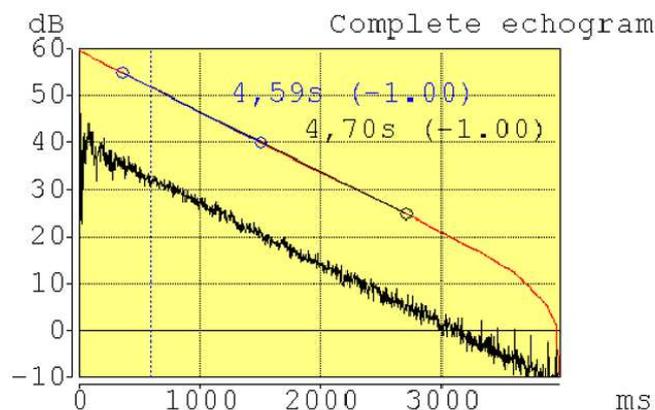


Fig. 24. Ecograma con la inclusión del material M1 Ideaperfo.

El material absorbente ha contribuido a bajar el valor T-30 de 9,42 segundos a 4,70 segundos, lo cual supone una bajada del tiempo de reverberación a la mitad aproximadamente. De todas formas, estos valores obtenidos quedan lejos de los tiempos óptimos de reverberación propuestos por Leo L. Beranek.

Mencionamos otro parámetro muy importante que hemos medido antes de introducir el material absorbente, se trata del índice de inteligibilidad. Vemos los valores STI obtenidos en la siguiente tabla.

REC 1						
	Value (%)	With background noise				
RASTI	28,6 (BAD)	28,6 (BAD)				
STIuser	33,5 (POOR)	32,5 (POOR)				

f (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
TI [%]	26,2	29,2	28,9	31,1	29	36,2

Fig. 25. Tabla de valores obtenidos para STI en posición REC1.

Vemos que al introducir el material M1 hemos mejorado cuatro puntos porcentuales en el STI, aunque estamos todavía en unos valores pobres. Hemos pasado de una mala inteligibilidad a una inteligibilidad pobre.

Ya que el coeficiente medio de absorción utilizado en el material M1 Ideaperfo es de $\alpha=0,60$ se podría pensar en insertar un material cercano a la absorción total, como por ejemplo un material con un coeficiente $\alpha=0,85$ a $0,90$ con el objetivo de absorber mucho más en la misma superficie en m^2 , ya que como hemos citado anteriormente, no podemos utilizar una mayor superficie por tratarse de un monumento declarado patrimonio mundial.

Debemos puntualizar en dicho caso que la absorción tiene un cierto efecto en esas distancias: desde el altar a las últimas filas hay algo más de 40 metros. Si introduyéramos un material en todo el largo de las paredes de la iglesia muy absorbente para las frecuencias más altas, 4kHz y 8kHz entre otras (que son las que más sufren la atenuación por absorción(x)), no dejaríamos que el sonido en esas frecuencias llegara a las últimas filas de la audiencia con lo cual obtendríamos una respuesta tonal empobrecida que dificultaría la inteligibilidad de la palabra y de matices sonoros de música sinfónica o coros de voces.

Por ello, el material M1 es muy adecuado, sobre todo en la primera mitad de la sala, ayudando a que las frecuencias de la banda de octava de 1kHz se atenúen fuertemente pero que además las frecuencias más agudas puedan llegar a las últimas filas de la audiencia.

Una vez lleguen los sonidos a las últimas filas, interesaría una fuerte absorción de los sonidos para que no reflejen en las superficies del fondo de la iglesia y generen ecos y reflexiones que empobrezcan el entendimiento de la palabra.

Por ello, realizamos una propuesta de acondicionamiento acústico donde desde el altar donde se sitúa la fuente sonora, hasta aproximadamente a la mitad de la audiencia, el material utilizado tenga la característica del M1 Ideaperfo de Ideatec, y desde la mitad hasta las paredes del fondo de la iglesia, se utilice un material con un alto índice de absorción para todas las frecuencias, con un coeficiente de absorción medio muy alto. De esta manera en las primeras filas habrá una fuerte absorción de frecuencias medias y al fondo de la iglesia una absorción muy fuerte en general.

Queremos analizar también si este segundo material más absorbente puede ayudar a mejorar el STI.

Proponemos como segundo material acústico, un material genérico que en las bandas de octava normalizadas tenga la siguiente característica, característica muy similar a la que encontraremos en modelos de diferentes fabricantes:

f (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
α	0,4	0,9	0,99	0,99	0,9	0,6

Figura 26. Tabla coef. de absorción de material genérico.

Las superficies (los llamados *planos* en Catt) tratadas con dicho material, serán las siguientes:

LADO	Nº DE PLANO	SUPERFICIE (M2)	MATERIAL
L	552	13,1	1
L	553	71,4	1
L	554	31,7	1
L	555	33,1	2
R	561	13,1	1
R	562	71,4	1
R	563	32,7	1
R	564	33,1	2
L	575	2,6	2
L	576	2,4	2
L	577	26,3	2
L	578	0,7	2
C	579	2,1	2
R	580	2,6	2
R	581	24,1	2
R	582	3,0	2
R	583	2,0	2
L	593	54,3	2
R	594	54,3	2

Fig. 27. La tabla muestra los planos revestidos de cada material absorbente 1 y 2. Lados L,R vistos desde la audiencia.

La suma de las superficies del material 1, M1 de Ideatec es de 233,48 m² y la suma de las superficies del material 2 (por ahora genérico) es de 240,42 m².

Podemos ver en la figura, de forma coloreada, la ubicación de cada material.

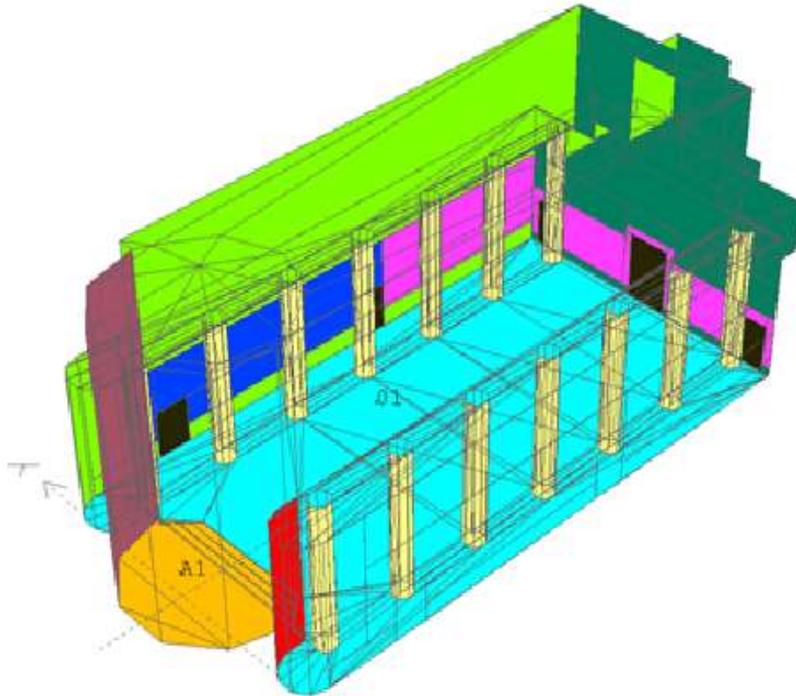


Fig.28. En color azul el material M1 y en color lila el material 2.

Con estos datos, volvemos a realizar la simulación en Catt acoustics, y los datos obtenidos se muestran en las figuras siguientes:

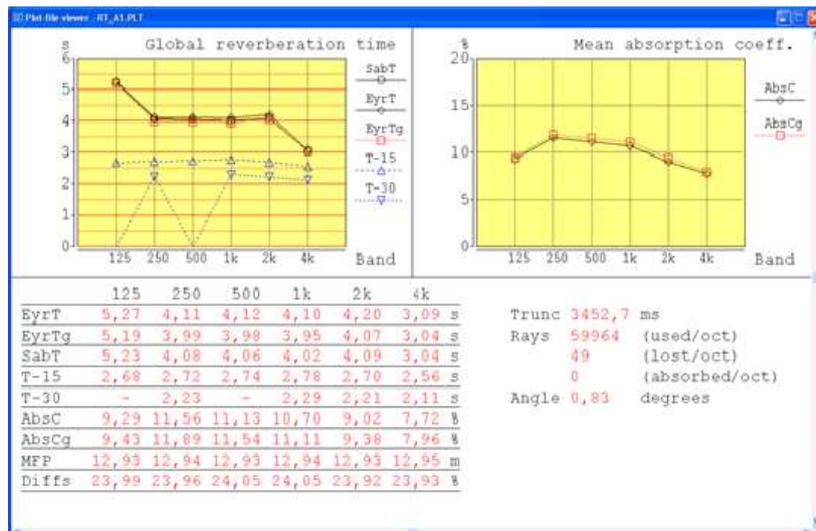


Fig. 29. Parámetros obtenidos con 2 materiales acústicos diferentes.

Si lo comparamos con los datos obtenidos para revestimiento con un único material, observamos que el tiempo de reverberación por ejemplo según cálculo de T Sabine solamente baja un pequeño porcentaje, de 4,29 s. a 4,02 segundos, es una pequeña mejora. Sin embargo, si observamos los gráficos del tiempo de reverberación en función de la frecuencia, en el caso de 2 materiales se suaviza, sobre todo en torno a 2kHz, lo cual se traduce en una respuesta espectral más uniforme.

Al observar los niveles de inteligibilidad, estos son los valores obtenidos, recordemos que en la posición de receptor 1:

REC 1		
	Value (%)	With background noise
RASTI	30,1 (BAD/POOR)	30,1 (BAD/POOR)
STIuser	34,9 (POOR)	33,6 (POOR)

f (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
TI [%]	27,9	30,4	31	30,8	31,1	38,3

Fig. 30. Tabla de valores obtenidos para STI en posición REC1 al introducir los dos materiales absorbentes.

Hemos mejorado el índice de inteligibilidad en un punto porcentual aproximadamente, y seguimos teniendo un STI considerado deficiente.

Si observamos la distribución de niveles de presión en la sala, concluimos que es más amplia que sin materiales, y similar a la distribución de SPL que para un material. Cabe recordar que a mayor distancia crítica D, mayor margen en dB tiene la distribución de niveles, esto es, mayor diferencia de niveles habrá entre diferentes posiciones de la audiencia.

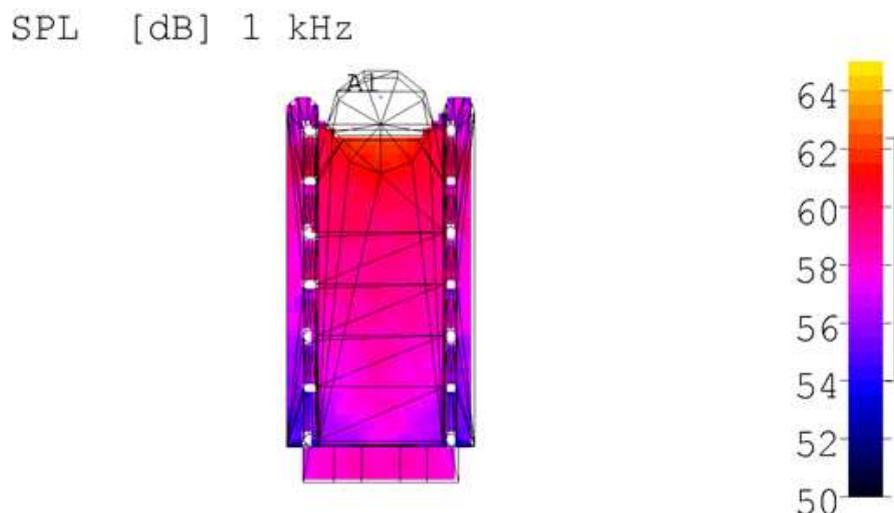


Fig. 31. Distribución de SPL en caso de acondicionar la iglesia con dos materiales.

Hemos obtenido anteriormente y sin materiales de acondicionamiento acústico,

$$\text{Sin materiales } 64 - 59,4 = 4,6 \text{ dB}$$

En cambio al añadir materiales de acondicionamiento, los resultados cambian a una mayor caída en dB spl de campo libre,

$$\text{Con 1 material: } 62,4 - 54,4 = 8 \text{ dB.}$$

$$\text{Con 2 materiales: } 62,4 - 54 = 8,4 \text{ dB.}$$

Vemos que la diferencia es notable al comparar la iglesia sin material, comparada a cuando tiene 1 o 2 materiales. En cambio, la diferencia es de un pequeño matiz entre un único material y dos materiales distintos.

También podemos comparar el parámetro de claridad C80, en el que vemos una vez más que prácticamente no hay diferencias al comparar un único material y dos materiales (mostrar distribución).

5. Materiales seleccionados para un coste óptimo y cumpliendo los requisitos de mejora simulados.

Para poder elegir los materiales y poder plantear una obra de acondicionamiento acústico hemos acudido a fabricantes nacionales y/o distribuidores nacionales, los cuales ofrecen en sus respectivas webs información detallada sobre datos técnicos de absorción en la mayoría de casos.

Nos disponemos a encontrar en cada fabricante, materiales acústicos que tengan características iguales o similares a las que necesitamos según los datos de simulación que hemos obtenido en Catt acoustics.

Como hemos comentado anteriormente, el fabricante para cada producto realiza una caracterización para poder obtener una gráfica de absorción en función de la frecuencia, bien por bandas de octava o bien por tercios de octava.

Recordamos cual es la característica de absorción que necesitamos:

Material 1. Para la primera parte de la iglesia, en donde queremos un material acústico que absorba fuertemente en frecuencias medias, en torno a 1kHz, en forma de campana.

Material 2. Para la parte del fondo de la iglesia, con una fuerte absorción en la mayoría de frecuencias, al menos en frecuencias medias y agudas.

Exponemos a continuación la propuesta seleccionada para diferentes fabricantes. Adelantamos que en algunos fabricantes no hemos encontrado un material que tenga una fuerte absorción en frecuencias medias (en torno a 1 kHz), en forma de campana, con lo cual hemos seleccionado únicamente el material que tiene una fuerte absorción para frecuencias medias y agudas.

Todos estos materiales consisten en paneles de diferentes acabados, bien del tipo absorbente poroso bien con perforaciones, tipo Helmholtz. De todas formas quisiéramos mencionar la opción de realizar el acondicionamiento con cortinas acústicas.

La mayoría de fabricantes de cortinas acústicas que hemos encontrado son extranjeros y a la hora de solicitarles precios, nos han contestado que hacen presupuestos a medida. Por otra parte, después de ver las características de absorción de todas ellas, no hemos encontrado ningún modelo que tenga una característica de absorción en forma de campana, centrada en frecuencias medias (material 1). Solamente hemos encontrado cortinas que cumplen las curvas para nuestro material 2. Finalmente, otra razón para no elegir cortinas acústicas es que el aspecto funcional no contrapesa el aspecto estético, es decir, las cortinas son menos estéticas que los paneles y además en este caso no sacaríamos provecho de su apertura y cierre ya que siempre tendrían que estar estiradas y nunca plegadas.

Fabricantes y materiales seleccionados

Ideatec

Empresa situada en Novelda (Alicante), ofrece cantidad de soluciones de acondicionamiento acústico con unos acabados variados en texturas, colores, etc.

Para material 1 hemos elegido el ya mencionado M1 Ideaperfo cuya característica de absorción exponemos a continuación:

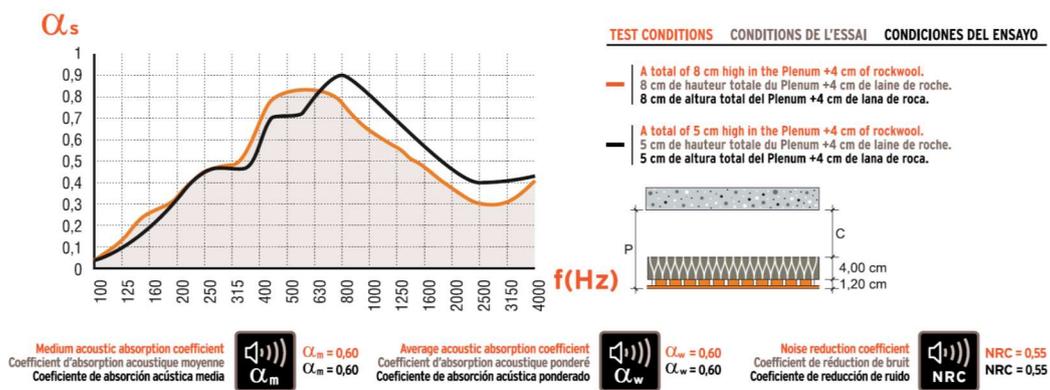


Fig. 32. Curva de absorción de M1 Ideaperfo. El coef. medio de absorción es de $\alpha=0,6$.

En nuestro caso realizamos un montaje con un hueco de 5 cm (trazado en negro) para generar la absorción en torno a 800 Hz. Las planchas para colocación en pared tienen unas dimensiones de 2430mm por 600mm que puede instalarse machihembrado (ver anexo 1).

Como material 2 hemos elegido unas planchas perforadas de un modelo llamado Pro8. Su característica de absorción es la siguiente, donde vemos que tiene un fuerte índice de absorción a frecuencias medias y altas.

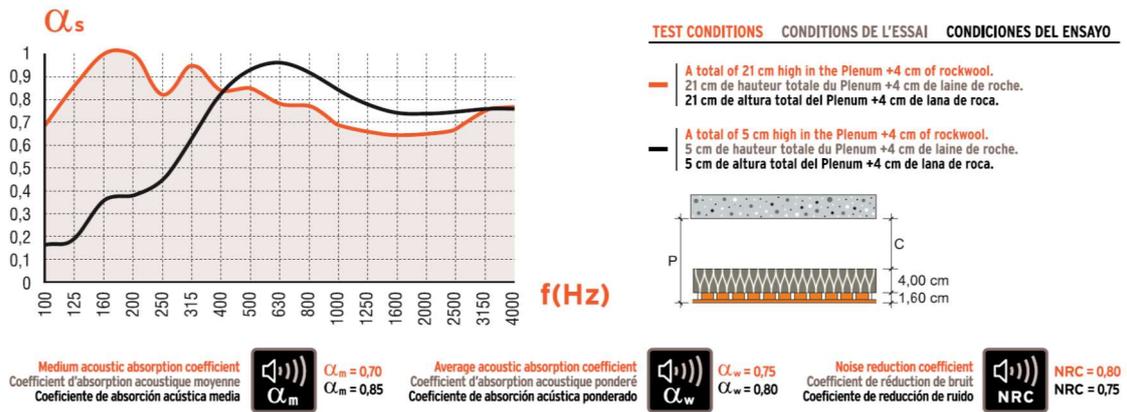


Fig. 33. Curva de absorción de Pro 8. El coef. medio de absorción es de $\alpha=0,85$.

Nosotros lo colocaremos con una altura total de plenum de 5 cm (línea negra), de esta manera se absorben fuertemente frecuencias medias y agudas. Las planchas tienen unas dimensiones de 2430 mm por 1600mm. Las perforaciones del material así como sus medidas son las siguientes:

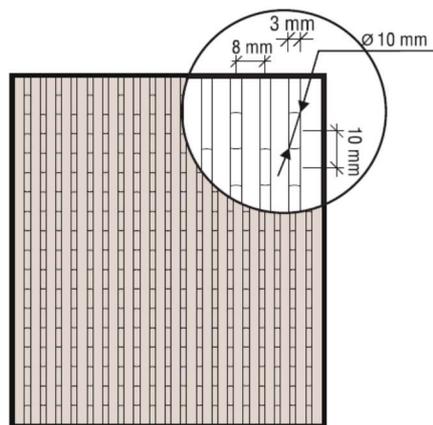


Fig. 34. Detalle de perforaciones en el material Pro 8.

Acústica integral

Es un fabricante español que ofrece materiales de aislamiento y acondicionamiento acústico, y equipamiento más específico como puertas y visores acústicos.

Para material 1, elegimos *Acustideco*, una plancha compuesta de revestimiento de fibra de poliéster acabado con tejido para revestimiento en instalaciones verticales. Viene en planchas de 1200mm por 2700mm. Su característica de absorción es la siguiente:

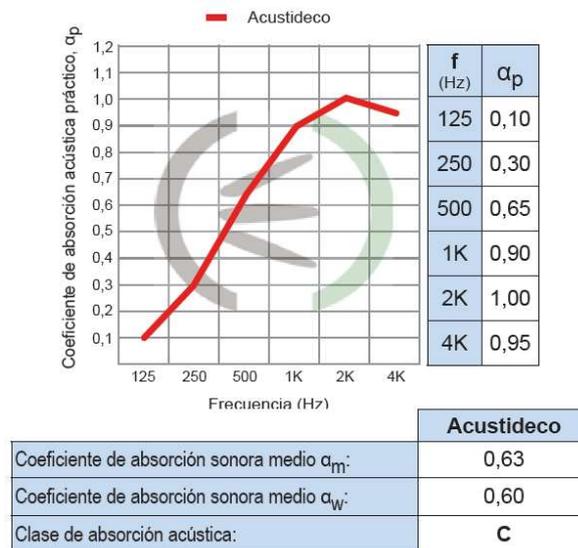


Fig. 35. Curva de absorción de Acustideco. El coef. medio de absorción es de $\alpha=0,63$.

El elegido como material 2 es el llamado *Acustisón 50 A*, que consiste en un galvanizado prelacado muy resistente revestido de lana de roca de 50mm y 70 kg/m² y acabado con velo negro. El galvanizado contiene perforaciones de cuatro diámetros diferentes. Las planchas se sirven en medidas 350 mm por 2500mm o 3000mm. Su característica de absorción es la siguiente:

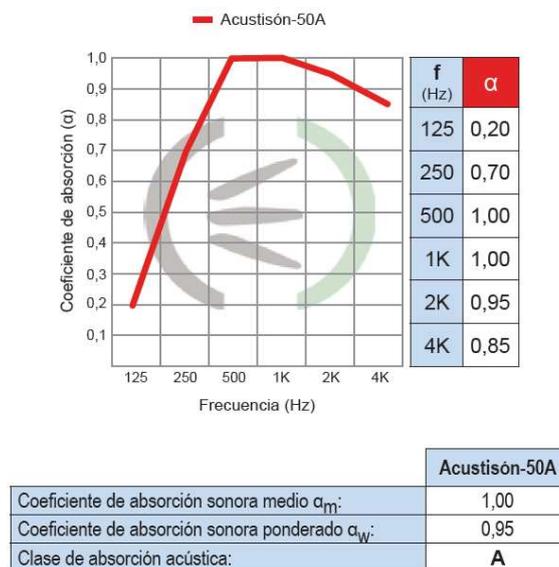
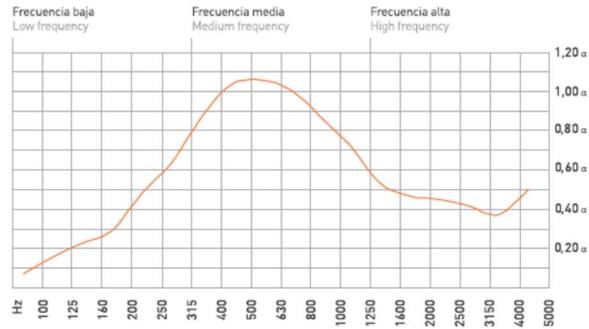


Fig. 36. Curva de absorción de Acustisón 50A. El coef. medio de absorción es de $\alpha=1$.

Spigoacustic

Spigoacustic de Spigogroup, es un distribuidor de materiales de acondicionamiento acústico que tiene su sede en Logroño La Rioja) y que trabaja mucho con madera y con absorción mediante perforación.

Como material 1, hemos seleccionado el material llamado FS [42-16-32], el cual consiste en panel MDF y contrachapado, revestidos con velo negro absorbente en su parte trasera y con acabados en melamina y madera natural entre otros. Contiene perforaciones. Para paredes las medidas de las planchas son de 2400mm por 300mm y se colocan mediante rastreles de madera y grapas de fijación.



COEFICIENTE MEDIO DE ABSORCIÓN

Frecuencia baja. $\bar{\alpha} = 0,308$

Frecuencia media. $\bar{\alpha} = 0,895$

Frecuencia alta. $\bar{\alpha} = 0,448$

Fig. 37. Curva de absorción del material FS de Spigoacustic.

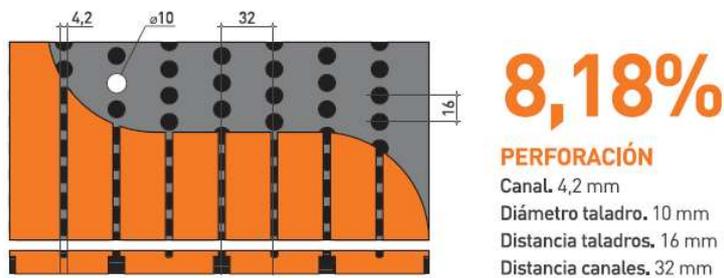
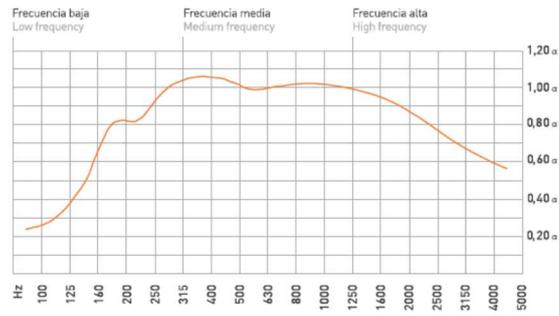


Fig. 38. Porcentaje de perforación y datos de taladros de perforación en material FS.

Como material 2, hemos elegido el material llamado CS [42-16-32], el cual también consiste en una placa perforada, de MDF y contrachapado, revestidos con velo negro absorbente en su parte trasera y con acabados en melamina y madera natural, pero con diferente característica de perforación. Las medidas y el tipo de instalación es igual al modelo FS.



COEFICIENTE MEDIO DE ABSORCIÓN

Frecuencia baja. $\bar{\alpha} = 0,533$
 Frecuencia media. $\bar{\alpha} = 0,900$
 Frecuencia alta. $\bar{\alpha} = 0,683$

Fig. 39. Curva de absorción del material CS de Spigoacustic.

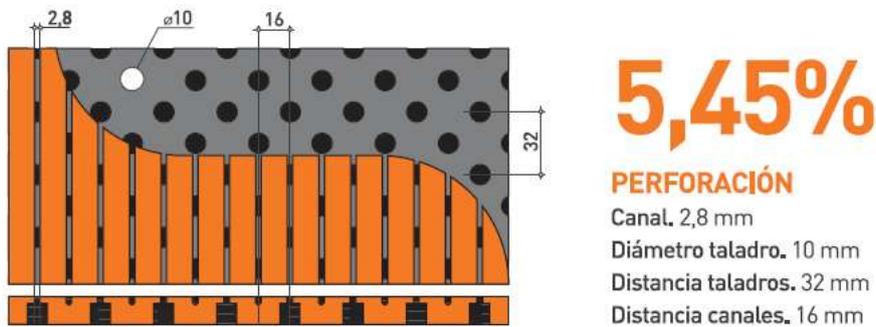


Fig. 40. Porcentaje de perforación y datos de taladros de perforación en material CS.

Rockfon

Rockfon de Rockwool, es la división de materiales de acondicionamiento acústico de Rockwool, conocido fabricante danés de materiales de aislamiento acústico como la lana de roca. En su catálogo cuentan únicamente con dos materiales con la misma característica acústica, pero con diferente acabado. Se llama VertiQ y VertiQmetal. El vertiQ está pensado para interiores y el VertiQmetal, tiene acabado en galvanizado lacado, mucho más resistente para lugares más expuestos a humedad, contacto físico, etc. como piscinas, polideportivos, etc. hemos descartado el VertiQmetal porque su distribuidor nos ha adelantado que es mucho más caro.

De esta forma, la solución de Rockfon, nos permite realizar el acondicionamiento acústico de un solo material, simulado anteriormente. En este caso, el material es más absorbente en la mayoría de frecuencias comparando con el M1 de Ideatec. Consiste en paneles de absorción mediante lana de roca, su cara visible tiene un revestimiento de tejido duradero y contravelo en su cara posterior. Sus medidas para pared son de 2700 mm por 1200 mm y su instalación habitual es el sistema T, aunque puede colocarse sin junta vista a un coste adicional.

Su característica de absorción es la siguiente:

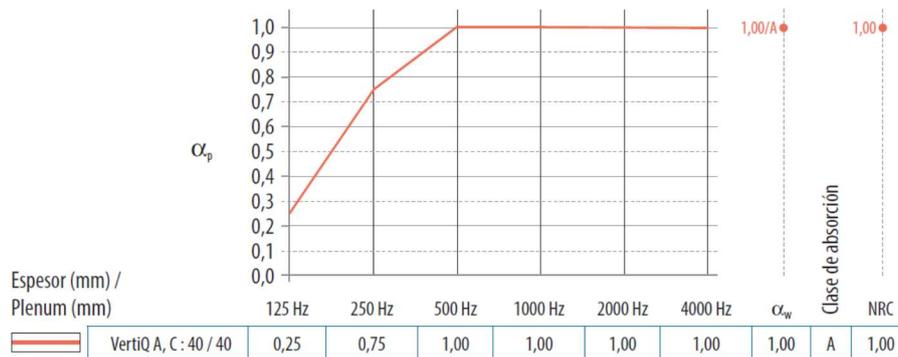


Fig. 41. Característica de absorción de VertiQ de Rockfon.

Ecophon

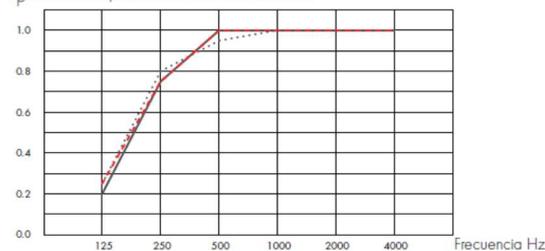
Ecophon de Saint Gobain, es la división para acondicionamiento acústico del fabricante internacional Saint Gobain, y que presenta análogamente a Rockfon, un único material que absorbe totalmente en casi toda la banda de frecuencias normalizadas (125Hz -4kHz). El material se llama Ecophon Akusto™ Wall C y se utiliza como absorbente de pared. A nivel de montaje tiene la perfilera oculta y sus cantos biselados forman una ranura entre los paneles. Las medidas de los paneles son de 2700mm por 600mm. Los paneles están fabricados en lana de vidrio de alta densidad y su cara trasera revestida en tisú de vidrio. Hemos elegido el acabado en superficie tintada Akutex FT ya que permite limpieza semanal con detergente alcalino. Su característica de absorción es la siguiente:

Absorción de sonido:

Resultados de ensayo de absorción acústica según EN ISO 354.

Clasificación conforme a EN ISO 11654, y evaluación de valores de Coeficiente de Reducción de Ruido (NRC) y Media de Absorción del Sonido (SAA) según ASTM C 423.

α_p Coeficiente práctico de absorción de sonido



... Akusto Wall C Akutex FT 40 mm, 43 mm o.d.s.

— Akusto Wall C Texona 40 mm, 43 mm o.d.s.

--- Akusto Wall C Super G 40 mm, 43 mm o.d.s.

o.d.s = g.t.s. = grosor total del sistema

	Gr mm	g.t.s. mm	α_p Coeficiente práctico de absorción de sonido					α_w	Clase de absorción de
			125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz		
Akutex FT	40	43	0,25	0,80	0,95	1,00	1,00	1,00	A
Texona	40	43	0,20	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	A
Super G	40	43	0,25	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00	A

Fig. 42. Característica de absorción de Ecophon Akusto™ Wall C.

A partir de este estudio, nos planteamos complementar la mejora acústica con el apoyo de un sistema electroacústico. El sistema electroacústico en sí no mejorará la acústica de la sala pero si puede contribuir en la mejora de alguno de sus parámetros

6. Resultados obtenidos. Propuesta de mejora.

Al haber realizado la propuesta con materiales de diferentes fabricantes, hemos querido reflejar los resultados obtenidos para posición 1 y 5 de receptor, siempre con una misma fuente y para todos estos casos, comparando el modelo genérico con los materiales reales de los fabricantes:

Con dos materiales de acondicionamiento, el M1 más uno genérico.

Con dos materiales del fabricante Ideatec.

Con dos materiales del fabricante acústica integral.

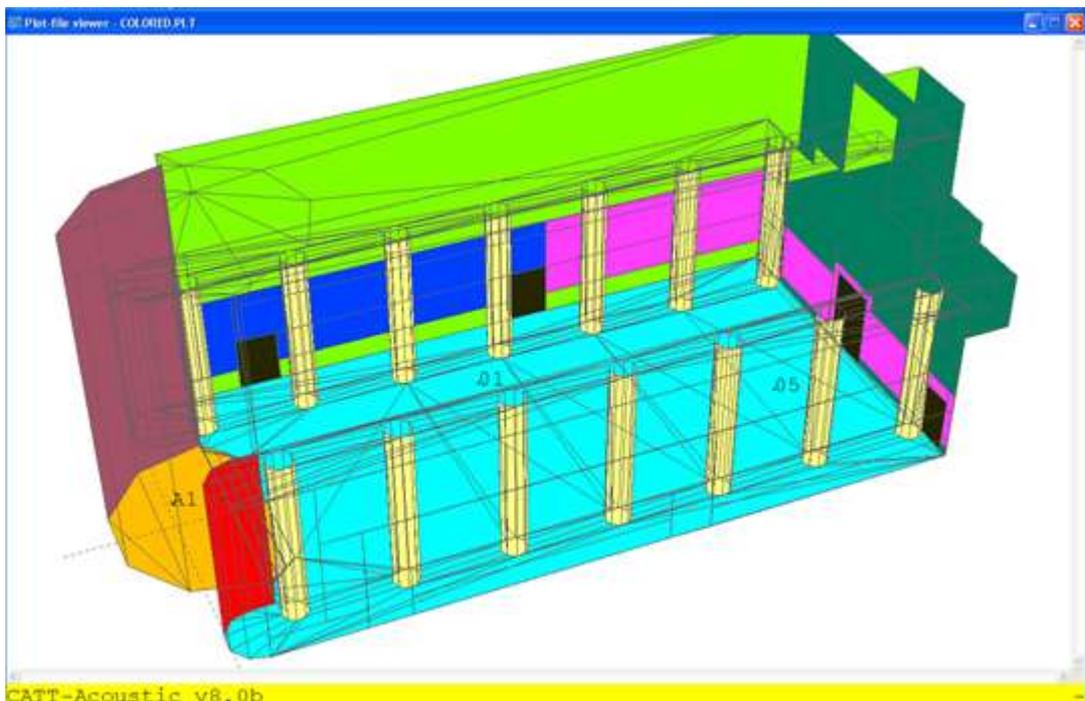


Fig. 43. Posición de receptor 1 (Rec. 1) a distancia media desde el altar y receptor 5 (Rec. 5) al fondo de la iglesia.

Estos son los resultados de inteligibilidad:

2 mat. genéric

REC 1		
	Value (%)	With background noise
RASTI	30,1 (BAD/POOR)	30,1 (BAD/POOR)
STI user	34,9 (POOR)	33,6 (POOR)

REC 5		
	Value (%)	With background noise
RASTI	31,9 (POOR)	31,9 (POOR)
STI user	35,5 (POOR)	33,8 (POOR)

IDEATEC

REC 1		
	Value (%)	With background noise
RASTI	30,3 (BAD/POOR)	30,3 (BAD/POOR)
STI user	34,3 (POOR)	33,2 (POOR)

REC 5		
	Value (%)	With background noise
RASTI	31,3 (POOR)	31,3 (POOR)
STI user	34,1 (POOR)	32,6 (POOR)

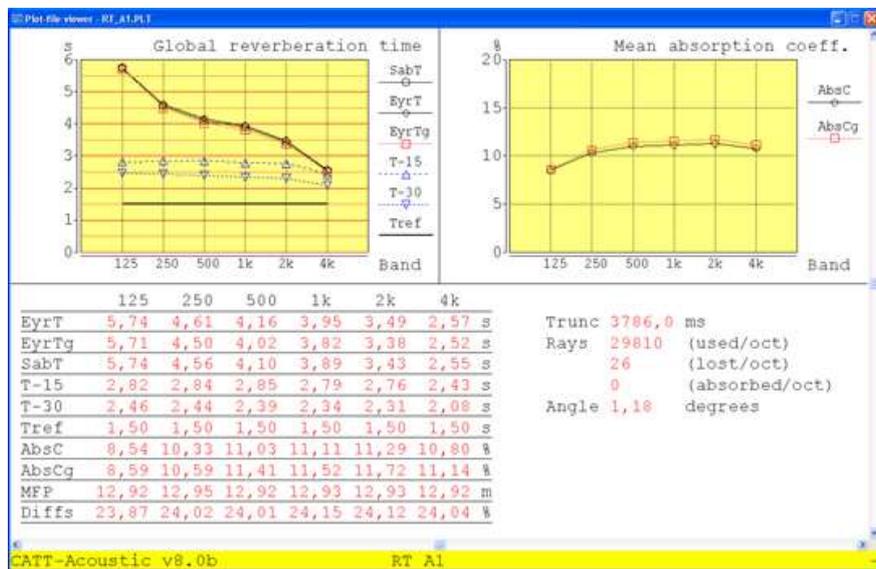
AC INTEGRAL

REC 1		
	Value (%)	With background noise
RASTI	32,5 (POOR)	32,4 (POOR)
STI user	36,0 (POOR)	34,8 (POOR)

REC 5		
	Value (%)	With background noise
RASTI	32,3 (POOR)	32,2 (POOR)
STI user	35,4 (POOR)	34,0 (POOR)

Estos son los valores más relevantes de tiempos reverberación para materiales genéricos, IDEATEC y Acústica Integral respectivamente:





Vemos que los resultados obtenidos son similares a los obtenidos con el material ideado como genérico. En ese sentido, podemos decir que hemos hecho unas propuestas que cumplen dicho modelo. El problema es que no conseguimos llegar a niveles STI en torno al 65%, ni a 2 o más dB de claridad, debido a que tampoco conseguimos bajar a 2,2 de tiempo de reverberación. La limitación, como hemos comentado anteriormente viene dada porque no podemos revestir más superficies en la iglesia.

Dicha situación nos da pie a plantear una solución que además de todo lo anterior, diseñemos un sistema electroacústico.

La iglesia del seminario de Moncada ya contaba con un sistema electroacústico para utilizar en sus homilías con el objetivo de mejorar la inteligibilidad de la palabra. También es cierto que la ubicación de sus cajas acústicas de columna, habituales en este tipo de instalaciones fijas, están colocadas en una forma desordenada, seguramente en un número excesivo y combinando diferentes marcas y modelos.



Fig. 44. Detalle de colocación de las cajas acústicas de columna en la iglesia.

Tampoco hemos podido comprobar si el equipamiento estaba ajustado en cuanto a retardos, niveles, respuesta en frecuencia y cobertura.

Nosotros vamos a analizar los parámetros más influyentes en cuanto a mejora de inteligibilidad se refiere y vamos a proponer un modelo de cajas acústicas, un número de cajas, y una ubicación y orientación para las mismas.

Nuestras condiciones acústicas nos dan una idea del sistema electroacústico que necesitamos:

- Como hemos visto en la distribución de niveles, antes de pasar a campo reverberante la fuente sonora desciende un máximo de 8,4 dB por lo cual no necesitamos un equipo electroacústico que tenga una gran potencia, sino unos 10 dB de amplificación para compensar esta caída.
- La inteligibilidad mejorará si utilizamos un sistema distribuido de cajas acústicas a lo largo de la iglesia. La distancia promedio del conjunto altavoz-audiencia definirá la relación del sonido directo al sonido reflejado, lo que nos lleva a introducir el menor número de cajas acústicas que cubran la zona de audiencia.
- La cobertura de las cajas acústicas de tipo columna, su factor de directividad, puede tener una influencia notable en la inteligibilidad: Si es demasiado amplia, las reflexiones aumentan y la inteligibilidad empeora. En cambio si su cobertura fuera demasiado estrecha, no habría problemas de reflexiones sino una falta de cobertura de la audiencia.

Para ayudar en el cálculo de la cobertura y distribución de cajas, es recomendable acudir a software de simulación como EASE.

Vamos a realizar una propuesta de diseño del sistema electroacústico que abarca las características anteriormente expuestas.

Colocación y número de altavoces de columna.

Como hemos mencionado, la iglesia de Moncada ya tenía instalado un sistema electroacústico donde observamos una colocación incorrecta del mismo: hay altavoces de columna colocados en las paredes de la misma y otros altavoces de columna también colocados en algunas columnas.



Fig. 45. Puntos donde están colocados los altavoces de columna. Algunos en columna y la mayoría en las paredes.

En principio, debemos asegurarnos de que las personas sentadas en los bancos de la iglesia perciban la voz con la mayor claridad posible. Por ello proponemos la colocación de los altavoces de columna únicamente en las columnas, eliminando todos los altavoces que están en las paredes. De esta manera la distancia promedio entre fuente-receptor disminuye y tenemos un mejor aprovechamiento del sonido directo frente al reflejado (mayor aprovechamiento del campo cercano).

En cuanto al número de altavoces, colocaremos 6 altavoces en cada lado (uno por columna) y colocaremos dos altavoces, uno a cada lado, en el coro. Con lo cual completaremos catorce altavoces de columna en total. La distribución de los altavoces queda de la siguiente manera:

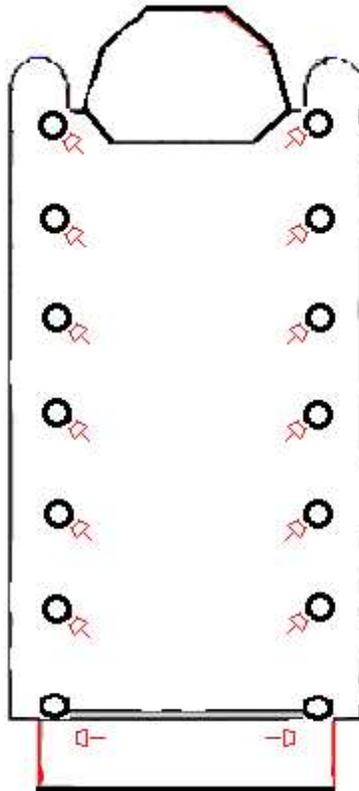


Fig. 46. Propuesta de colocación de los altavoces de columna (en color rojo) en columnas.

Direccionamiento y cobertura de los altavoces de columna

El direccionamiento de los altavoces tiene que ser de forma que cubra la audiencia con el conjunto de altavoces planteados. Su eje central (frontal de su cobertura 0°) debiera apuntar a la diagonal del pasillo central, formando aproximadamente 45° con el pasillo lateral.

La altura de colocación, será en función de la altura del oído y debe coincidir con la mitad de la columna del altavoz. Esta altura de parte central del altavoz puede ser de 1,5m aproximadamente (audiencia sentada y de pie).

La cobertura del altavoz depende de cada modelo y fabricante, es un dato que se da en horizontalmente y verticalmente en grados y conforma el llamado factor de directividad Q del altavoz, relacionado directamente con la distancia crítica anteriormente mencionada.

Debemos tener en cuenta que no siempre una mayor cobertura será mejor al cubrir una mayor audiencia, ya que empeoraremos el valor de distancia crítica y tendremos unas reflexiones mayores y por lo tanto unos niveles de STI. Debemos elegir una cobertura horizontal que sea la mínima necesaria, en torno a 90° y una cobertura vertical lo menor posible, ya que no la necesitamos.

Por otra parte, si analizamos las características de altavoces de columna, tendremos en cuenta que a columna más larga, con más altavoces en su interior, aumentará la cobertura horizontal y

disminuirá la vertical. Estas columnas cumplen los principios acústicos de los llamados “line array”.

Entre los muchos fabricantes y modelos existentes, hacemos alguna propuesta que coincida con nuestras necesidades.

Ajustes de ganancia, ecualización (eq) y retardo.

El conjunto de altavoces que compone el sistema electroacústico debe ajustarse sobre todo en tres aspectos:

- Ganancia de amplificación adecuada para que no haya realimentación con micrófono ni el nivel o distribución de niveles sea insuficiente.
- Ecualización. Debemos ajustar el ecualizador de salida a los altavoces para que compense la respuesta acústica y para que se refuercen frecuencias que ayuden a entender la voz.
- Retardo. El ajuste de retardos entre diferentes cajas es necesario ya que si no, los sonidos de los altavoces más lejanos llegan más tarde, pudiendo producir enmascaramientos que dificultaran una buena inteligibilidad. La referencia para calcular retardos tiene que ser el altar o lugar donde se encuentra la primera columna de altavoces (las más cercanas al altar) y a partir de ahí calcular la diferencia del tiempo de llegada del resto de altavoces según la distancia.

Propuesta concreta de sistema electroacústico

Hemos elegido unos altavoces de columna de la marca TOA, en concreto el modelo SR-H2S el cual tiene una cobertura horizontal de 90º y vertical de 20º. El modelo es el siguiente:

Rated Power	Continuous program: 180 W
Impedance	8 Ω
SPL (1W/1m)	90 dB
Frequency Range (-10dB)	90 – 17,000 Hz (when using optional Digital processor)
Directivity Angle	Horizontal: 90°, Vertical: 20° (within the range of speaker height)
Speaker component	7 cm (2.8") cone-type x 9
Colour	White
Dimensions mm	84 (W) x 663.4 (H) x 115 (D)mm (3.31" x 26.12" x 4.53")
Weight (kg)	4.2 kg



Fig 47. Características más relevantes del altavoz de columna TOA SR-H2S

Con este modelo, a pesar de ser económicamente costoso, nos aseguramos la cobertura horizontal justa, y un control de cobertura vertical muy controlado, para que el sonido no se expanda fuera de la zona de audiencia.

Conclusiones

- Tras haber realizado diferentes simulaciones mediante Catt acoustics, software de simulación y predicción acústico, se confirma la necesidad de realizar un proyecto de acondicionamiento acústico en la iglesia del seminario de Moncada, ya que los tiempos de reverberación son muy largos, en torno a 9 segundos y los tiempos óptimos de reverberación aconsejan unos tiempos en torno a 2,5 segundos para ese tipo y volumen de sala.
- La inclusión de diferentes materiales absorbentes acústicos ayudan a bajar los tiempos de reverberación en torno a 4 segundos, con el matiz de que se usan dos materiales con una curva de absorción diferente con el objetivo de que las frecuencias medias –agudas puedan llegar a las últimas filas por ejemplo para la reproducción de música sinfónica o coros.
- La inclusión de estos materiales, mejora el índice de inteligibilidad STI desde valores muy deficientes a deficientes. Se hace necesario el uso de más metros cuadrados de superficie para colocar los materiales absorbentes y así poder pasar a unos niveles de inteligibilidad aceptables pero no es posible, ya que la iglesia es un patrimonio que no se puede modificar en la mayoría de sus superficies.
- Se hace necesario el uso de un sistema electroacústico además del acondicionamiento acústico propuesto anteriormente para llegar a valores aceptables de STI. Ese equipo debe ajustarse adecuadamente para que su inclusión no interfiera negativamente. Deben ajustarse ángulos de direccionamiento, ganancia de amplificación, ecualización y retardos.
- Se han estudiado materiales acústicos absorbentes, y no todos los fabricantes tienen materiales con una característica de absorción en forma de campana en frecuencias medias. Por ello, en algunos casos hemos propuesto soluciones utilizando un único material.
- Los fabricantes de materiales no han colaborado mucho a la hora de presupuestar equipamientos concretos, aunque sí para dar información técnica y precios individuales de equipos, con lo cual obtener presupuestos finales ha sido imposible.
- Ha sido complicado trabajar con una versión demo de Catt, donde ha habido limitaciones, como no poder simular un conjunto de altavoces de columna y su mapeo de inteligibilidad. Al intentar trabajar con EASE ha ocurrido que con la versión demo las limitaciones han sido todavía mayores, al no poder obtener tampoco un mapeo de inteligibilidad con unas cajas concretas.
- Las auralizaciones obtenidas en Catt no siempre han dado una idea real de la acústica obtenida al realizar las simulaciones, por ello no ha podido ser una guía valiosa a nivel de percepción auditiva.
- Se presenta una propuesta real para solucionar el problema de la falta de inteligibilidad en la iglesia de Moncada, con distintas alternativas para sus responsables.
- Nos hubiera gustado contar con una versión completa de EASE para poder importar los archivos .dxf desde AutoCAD y así realizar un mapeo de inteligibilidad y de distribución de niveles utilizando los archivos .GLL de los altavoces de columna elegidos TOA sr-s2h.

- Podemos decir que unos altavoces mal colocados, mal direccionados, mal ajustados (retardos principalmente) y mal elegidos (control de directividad principalmente) pueden perjudicar notablemente los niveles de inteligibilidad, dando al traste con todo el esfuerzo realizado a nivel de acondicionamiento acústico y viceversa, por lo cual vale la pena invertir en un buen sistema electroacústico. La inversión del equipo puede suponer una quinta parte del presupuesto total.
- El presupuesto total puede ascender a unos 70.000 €+ IVA, aunque esta cantidad es finalmente orientativa y conviene que los responsables del seminario, vuelvan a solicitar presupuestos a estos mismos fabricantes y puedan ajustar los precios.

Bibliografía

- [1] M. Recuero López, *Ingeniería acústica. Madrid (Spain)*: Paraninfo, 2000.
- [2] Don Davis & Eugene Patronis, *Sound System Engineering*.3th edition. Elsevier, 2006.
- [3] Antoni Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions UPC, 1998.
- [4] F. Alton Everest, *Master handbook of acoustics*.5th edition. McGraw-Hill, 2009.
- [5] Clemente Tribaldos, *Sonido Profesional*.4ª edición. Paraninfo, 1996.
- [6] Philip Newell, *Recording Studio Design*. 2nd edition. Elsevier, 2008.p 186 .Chapter 6.8.

Anexos

Anexo i. Resultados obtenidos mediante simulación en Catt acoustics.

Anexo ii. Presupuestos de fabricantes de materiales acústicos.

Anexo iii. Catálogo de materiales acústicos absorbentes y listado de precios.

Anexo iv. Catálogo de fabricantes de cajas acústicas de formato columna.

Anexo v. Recopilatorio de todos los archivos en CATT obtenidos al trabajar el proyecto.

Anexo v. Fotografías de la iglesia del seminario de Moncada.

Agradecimientos

A Angel Ugalde Pérez, mi abuelo, pionero de las telecomunicaciones, por ser un crack y dejarnos la cultura de la electrónica y telecomunicaciones.

A Mariví, tanto sacrificio y paciencia conmigo, tiene el cielo ganado, hemos hecho el grado a medias. A Sofi y Leti, porque me acepten como soy.

A mi madre Aratxa, a mi padre Luis, por dejarme destripar todos los aparatos desde pequeño y dejar fluir mi insaciable curiosidad con gran paciencia, y por tantas cosas!

A mi hermano Koldo, por tener un hermano que siempre fue y es referente en lo bueno. A mi hermana Lore, porque lo emocional es lo primero. A mis sobrinas Kaia, Unat y Lea son adorables.

A los profesores de imagen y sonido del instituto Tartanga, todo el apoyo que me habéis dado es fundamental para haber llegado hasta aquí. Espero poder compartir esta alegría muchos años.

A mis excompañeros de la ESCIVI, no me olvido de vosotros, me habéis visto crecer y volar.

A todos los profesores y compañeros del master de acústica en la EPSG de Gandía, por permitirme disfrutar de la acústica y de la vida!

A la gente de secretaría de la EPSG, sois simplemente un ejemplo de equipo de trabajo.

A Javier Redondo, un referente para mí con quien conviví y tanto nos aportó a todos los niveles en el master,, por estar ahí.

A Paco Castells, por tu humanidad cuanto la necesité y a Víctor Sánchez, por inculcarme la vocación a la acústica con tanta alegría y ser tan cercano.

A muchos profesores de la EPSG, Jose Ignacio del dpto.. de comunicaciones, y mucho más.

A los dulzaineros de Giroarte, a Iñaki su líder, me fui y volveré, mientras os tengo presentes.

A toda la gente que en el día a día, en los pequeños detalles, nunca dudó en ayudarme.

