

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/265698921>

# Proyecto de rehabilitación acústica de la Antigua Real Fábrica de Tabacos de Sevilla

Chapter · October 2011

CITATIONS

0

READS

106

6 authors, including:



**Teófilo Zamarreño**  
Universidad de Sevilla

44 PUBLICATIONS 362 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Juan J. Sendra**  
Universidad de Sevilla

42 PUBLICATIONS 363 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Miguel Galindo**  
Universidad de Sevilla

32 PUBLICATIONS 244 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Angel Luis Leon-Rodriguez**  
Universidad de Sevilla

40 PUBLICATIONS 211 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



ACÚSTICA Y REALIDAD VIRTUAL EN LAS CATEDRALES ESPAÑOLAS: INNOVACIÓN ESTRATÉGICA APLICADA AL PATRIMONIO INMATERIAL HACIA UNA IDENTIDAD CULTURAL EUROPEA [View project](#)



EFFICACIA: Energy Efficiency improvement in Social Housing of Andalusia [View project](#)



Seminario

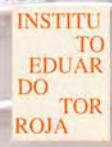
# Rehabilitación Acústica en la Edificación

## Soluciones y casos prácticos

Seminario Satélite TECNIACÚSTICA 2011 Cáceres

25 de Octubre de 2011

Organizan



Esta publicación recoge las ponencias presentadas en el Seminario satélite al Congreso TECNIACÚSTICA 2011 CÁCERES "Rehabilitación Acústica en la Edificación. Soluciones y casos prácticos".

El seminario está organizado por la Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas del Ministerio de Fomento, la Sociedad Española de Acústica -SEA-, la Asociación Española para la Calidad Acústica -AECOR-, el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja CSIC, el Laboratorio de Acústica de la Universidad de Extremadura e INTROMAC.

#### **COMITÉ TÉCNICO DE LA JORNADA:**

Luis Vega Catalán, Ana Delgado Portela. Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas. Ministerio de Fomento

Antonio Pérez López, Antonio Calvo Manzano. Sociedad Española de Acústica.

José Antonio Tenorio Ríos, M<sup>a</sup> Teresa Carrascal García, Amelia Romero Fernández. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja

Julián Domínguez Huerta; Juan Frías Pierrard. AECOR

Juan Miguel Barrigón Morillas, Valentín Gómez Escobar. Laboratorio de Acústica de la Universidad de Extremadura

José María Ávila Macías, Manuel Martín Castizo. INTROMAC

#### **DIRECCIÓN Y COORDINACIÓN**

Ana Delgado Portela.

Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas. Ministerio de Fomento.

Sociedad Española de Acústica.

M<sup>a</sup> Teresa Carrascal García

Belén Casla Herguedas

Unidad de Calidad en la Edificación

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja

Primera Edición, octubre 2011.

ISBN 978-84-87985-21-8

© de los textos: Los autores

## Presentación

---

A raíz de la obligatoriedad de aplicación del Documento Básico de Protección frente al ruido, del Código Técnico de la Edificación, desde el 24 de abril de 2009, han sido muchas las indicaciones, en el ámbito de la edificación, sobre la importancia que supone abordar el tratamiento acústico de los edificios que van a ser sometidos a una rehabilitación o en los que van a hacerse actuaciones tendentes a mejorar su confort.

Es evidente que el conjunto inmobiliario de nuestras ciudades, además de precisar de un mantenimiento, en muchas ocasiones, necesita reparaciones, adaptaciones o reestructuraciones de cierta envergadura. En este sentido, al abordar la rehabilitación de un edificio, no se trataría de hacer una simple reposición al estado inicial del mismo, sino de repararlo introduciendo las mejoras necesarias en todos los aspectos, seguridad, habitabilidad y funcionalidad.

El objeto del seminario es presentar las modificaciones que pueden introducirse en la rehabilitación de los edificios para mejorar sus condiciones acústicas, teniendo en cuenta los puntos de vista de la Administración, los organismos y entidades colaboradoras con la misma, los técnicos implicados y el sector de la edificación.

El carácter del seminario es esencialmente didáctico y se trata de transmitir al sector en general, y particularmente a los técnicos, la idea de que, aun no siendo obligatoria la reglamentación acústica existente – DB HR – en obras de rehabilitación, excepto cuando se trata de rehabilitación integral, siempre que se realice alguna actuación en un edificio existente pueden mejorarse las condiciones acústicas de éste, proporcionándole más confort acústico tal y como está demandando la sociedad actualmente.

En primer lugar, la Administración y sus colaboradores han expuesto, de una forma generalizada, la importancia de que en la rehabilitación de los edificios se consideren todos los aspectos acústicos que influyen en la mejora de los mismos, desde la fase de proyecto hasta la de ejecución, indicando los diferentes niveles de intervención posibles y los tratamientos, tanto de los elementos constructivos, como de las uniones entre ellos, considerando las soluciones del conjunto del edificio.

Los fabricantes de productos en general y los de materiales aislantes han explicado las soluciones técnicas concretas para cumplir el objetivo perseguido, de manera que se posibilite la consecución del fin perseguido, y que se inculque, principalmente a los técnicos, la idea de que pueden hacerse bastantes cosas para optimizar las soluciones acústicas dentro de lo económicamente razonable.

Además, se han mostrado algunos de los casos prácticos que ya existen, presentados por compañeros que han explicado las diferentes situaciones que se han encontrado en edificios ya construidos y las actuaciones que se han llevado a cabo en ellos de cara a mejorar sus condiciones acústicas.

Por último, se ha celebrado una Mesa redonda, moderada por Julián Domínguez Huerta, de AECOR, en la que han participado Luis Vega, de la Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas del Ministerio de Fomento; Esther Gamero, de la Junta de Extremadura; Rocío Clemente, del Colegio Oficial de Arquitectos de Cáceres; Francisco Galán, del Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de la Edificación de Cáceres; Ana Delgado, de la Sociedad Española de Acústica; Juan Frías, de la Asociación Española para la Calidad Acústica, José Antonio Tenorio, del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, José Luis Pedrera, del Laboratorio de Acústica de la Universidad de Extremadura y Manuel Martín, de INTROMAC.

## Índice

---

<b>1</b>	<b>Intervención acústica en edificios existentes</b>	<b>5</b>
	Luis Vega Catalán; Ana Delgado Portela. Secretaría de Estado de Vivienda y Actuaciones Urbanas. Ministerio de Fomento.	
<b>2</b>	<b>La rehabilitación en proyecto</b>	<b>12</b>
	M <sup>a</sup> Teresa Carrascal García; Amelia Romero Fernández; Belén Casla Herguedas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. CSIC.	
<b>3</b>	<b>Ejecución y puesta en obra en las actuaciones de rehabilitación</b>	<b>35</b>
	Julián Domínguez Huerta; Juan Frías Pierrard. Aecor - Asociación Española para la Calidad Acústica.	
<b>4</b>	<b>Soluciones constructivas para rehabilitación acústica</b>	
<b>4.1</b>	<b>Soluciones con productos multicapa y espumas de PE para la Rehabilitación Acústica</b>	<b>63</b>
	José Angel Gamallo Pinel. AECOR – Asociación Española para la Calidad Acústica.	
<b>4.2</b>	<b>Soluciones con lanas minerales</b>	<b>72</b>
	Fernando Peinado Hernández; Carlos Rodero Antúnez. AFELMA - Asociación de fabricantes españoles de lanas minerales aislantes.	
<b>4.3</b>	<b>Soluciones que aportan mejoras acústicas en rehabilitación</b>	<b>83</b>
	Yago Massó Moreu. ANDIMAT - Asociación Nacional de Fabricantes de Materiales Aislantes.	
<b>4.4</b>	<b>Criterios de mejora acústica de cerramientos de huecos en las actuaciones de rehabilitación.</b>	<b>91</b>
	Inés Gómez Arroyo; Pablo Martín Hernanz; Miguel Mateos Vizueté. ASEFAVE. Asociación Española de Fabricantes de Fachadas Ligeras y Ventanas. Tecnalia Research & Innovation.	
<b>4.5</b>	<b>Rehabilitación acústica de viviendas con sistemas de placa de yeso laminado</b>	<b>105</b>
	Joan Recasens Cortina; Alberto Calvo Jerónimo. ATEDY – Asociación de Fabricantes de Yeso. Sección PYL.	
<b>4.6</b>	<b>Soluciones cerámicas para la rehabilitación acústica</b>	<b>113</b>
	Elena Santiago Monedero; Ana Ribas Sangüesa; José Luis Valenciano Estévez HISPALYT - Asociación Española de Fabricantes de Ladrillos y Tejas de Arcilla Cocida.	

<b>5</b>	<b>Casos prácticos de rehabilitación de edificios</b>	
<b>5.1</b>	<b>Rehabilitación acústica a ruido exterior en vivienda social: un caso práctico</b>	<b>126</b>
	Rafael Suárez Medina. Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla.	
<b>5.2</b>	<b>Rehabilitación acústica: mejora continua</b>	<b>140</b>
	Xavier Ventura. Grupo Restaura.	
<b>5.3</b>	<b>Proyecto de rehabilitación acústica de la Antigua Real Fábrica de Tabacos de Sevilla</b>	<b>153</b>
	Teófilo Zamarreño; J.J. Sendra; M. Galindo; A.L. León; C. Ramírez-Balas; A. Alonso. Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, E. T. S. de Arquitectura, Universidad de Sevilla.	

### 5.3 Proyecto de Rehabilitación Acústica de la Antigua Real Fábrica de Tabacos de Sevilla

T. Zamarreño; J.J. Sendra; M. Galindo; A.L. León; C. Ramírez-Balas; A. Alonso.  
Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción, E. T. S. de Arquitectura,  
Universidad de Sevilla, Av. Reina Mercedes, 2, 41012 – Sevilla.  
[teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es)

#### 1. INTRODUCCIÓN

La Antigua Real Fábrica de Tabacos, actual sede central de la Universidad de Sevilla, es una de las construcciones industriales más importantes de las edificadas en Europa en el siglo XVIII. Ocupa una superficie en planta de 185×147 m<sup>2</sup> (Figura 1) y consta de dos plantas con amplias terrazas, que debieron servir para el secado del tabaco, y ocho lucernarios barrocos en su cubierta que permiten el paso de la luz a las galerías de la planta principal. Su proyecto original se debe a un ingeniero militar, Ignacio Sala, aunque el principal director de sus obras fue otro ingeniero militar, Sebastian van der Borch, a quien se debe el núcleo fundamental del edificio y sus partes más representativas: la crujía de la fachada principal, los patios, las galerías y gran parte del foso; la doble escalera monumental debió ser trazada también por van der Borch [1],[2],[3]. Es en esta fábrica de tabacos donde trabajaba la cigarrera Carmen, universalmente conocida gracias a la novela homónima de Prosper Mérimée y a la ópera de Georges Bizet, cuyo libreto se inspira en la novela (Figura 2).

La decisión de trasladar la sede de la Universidad de Sevilla a la Antigua Real Fábrica de Tabacos se produjo años después de la Guerra Civil, decisión adoptada mediante Decreto de la Presidencia del Gobierno. La adaptación del edificio a la nueva sede fue realizada por los arquitectos Delgado Roig, Balbontín Orta y Toro Buiza. La Facultad de Derecho fue inaugurada



**Figura 1.** Vista panorámica de la Antigua Real Fábrica de Tabacos de Sevilla.

por el entonces ministro Joaquín Ruiz-Giménez en 1954, siendo Rector Carlos García Oviedo. Un año después el cardenal Bueno Monreal bendijo la nueva Facultad de Ciencias, siendo Rector Juan Manzano y Manzano, y en 1956 se instalaba provisionalmente la Facultad de Filosofía y Letras, siendo Rector José Hernández Díaz.



**Figura 2.** Las cigarreras en la Fábrica de Tabacos, vistas por Constatin Meunier en 1883.

Actualmente se está acometiendo un Plan Director para el edificio, tras el traslado de la Facultad de Derecho a una nueva sede, con el fin de recuperar y poner en valor el carácter patrimonial del edificio, manteniendo los usos administrativo y docente. Uno de los objetivos de este plan es mejorar la funcionalidad de las diferentes estancias, lo que incluye el aspecto acústico. De ahí el encargo hecho por la Universidad de Sevilla a nuestro grupo de investigación para hacer propuestas de acondicionamiento acústico *respetuosas con el carácter patrimonial* del edificio. El objetivo de esta ponencia es presentar la metodología desarrollada y resultados previos que han servido de base para la toma de decisiones, desde un punto de vista acústico, en la elaboración del citado Plan Director. Cuando finalice dicho plan tendremos ocasión de comprobar hasta qué punto se han alcanzado los objetivos del proyecto de rehabilitación acústica del edificio.

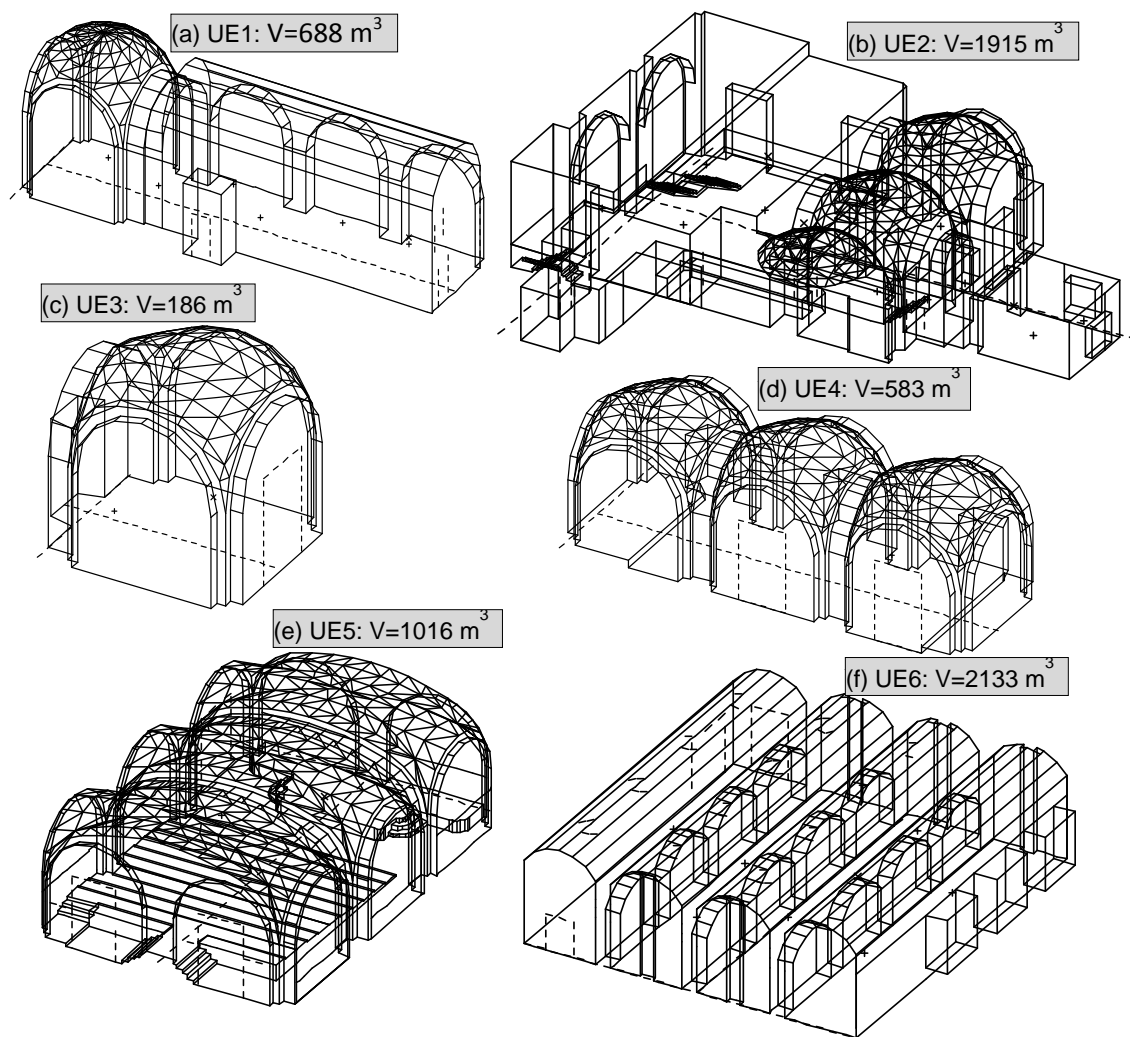
## 2. METODOLOGÍA

Para la realización del estudio acústico, dado el tamaño del edificio, la multiplicidad de recintos de diferente geometría y la diversidad de usos posibles de éstos, se definieron una serie de unidades espaciales (UE) tipo como muestra representativa de todas las existentes en el estado previo, y que sirvieran de base para configurar las nuevas unidades de uso tras la rehabilitación del edificio. Este proceso se realizó en estrecha coordinación y siguiendo las directrices de los técnicos responsables del Plan Director.

Finalmente ese estudio se limitó a seis unidades espaciales, cuyos volúmenes y codificación aparecen en la figura 3, adaptadas a los usos que a continuación se detallan:

- UE1: Modelo “bóveda de cañón” (Figura 3.a). Nuevo uso: administrativo (despachos, sala de reuniones y archivo).
- UE2: Zona de cafetería actual (Figura 3.b). Nuevo uso: nueva cafetería y dos comedores.
- UE3: Modelo “bóveda vaída tipo” (Figura 3.c). Nuevo uso: administrativo (despachos) y docente (aulas).





**Figura 3.** Modelos 3D de las unidades espaciales tipo seleccionadas para implementar el estudio con indicación de sus volúmenes. No están a la misma escala

- UE4: Modelo “tren de bóvedas vaídas” (Figura 3.d). Nuevo uso: docente (aulas, en un caso con dos bóvedas y en otro con tres) o administrativo (despachos).
- UE5: Modelo “bóveda de arista años 50” (Figura 3.e). Nuevo uso: administrativo (dos disposiciones diferentes para despachos, área de trabajo y circulaciones) o docente (con dos aulas, una mayor abarcando dos módulos y otra menor con uno, en un caso con dos bóvedas y en otro con tres).
- UE6: Modelo “tren de bóvedas de cañón” (Figura 3.f). Nuevo uso: administrativo (despachos y áreas de trabajo).

Las paredes de esas unidades espaciales son normalmente gruesas, masivas y están enlucidas; por tanto, son claramente reflectantes. Los suelos son de mármol. Las bóvedas, de diversos tipos según las distintas unidades espaciales, también están enlucidas y son asimismo reflectantes. Las puertas son generalmente de madera, de gran formato, de una o dos hojas y pesadas. Cuando hay cerramientos acristalados, como por ejemplo en la UE5, suelen ser ligeros y grandes, con vidrios montados sobre perfilera metálica.

A partir de estas unidades básicas, se han elaborado hasta trece modelos diferentes de nuevas unidades de uso, y, para cada una de ellas, se han simulado al menos dos hipótesis diferentes de terminaciones. Ello implica la evaluación de casi una treintena de modelos acústicos para controlar el acondicionamiento acústico en el marco del Plan Director citado.

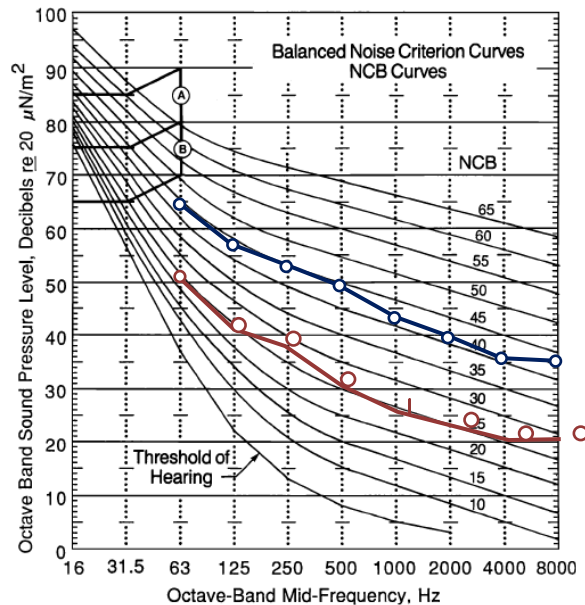
## 2.1. Medidas experimentales

Una de las ventajas que se tiene, en general, en los procesos de rehabilitación es la disponibilidad de los espacios para poder realizar medidas en el estado actual. Ello facilitará cuantificar la magnitud del problema para alcanzar los objetivos pretendidos. Para realizar las medidas, se ha optado por seguir el procedimiento normalizado recogido en la norma ISO 3382-1 [4], llevándolas a cabo en cinco de las seis unidades espaciales objeto de estudio (no se midió en la UE2, por haberse iniciado ya las obras de reforma). Los espacios estaban desocupados (tan sólo estaba presente el equipo técnico, compuesto por 2 personas) y, en general, sin mobiliario significativo, pues había sido retirado previamente.

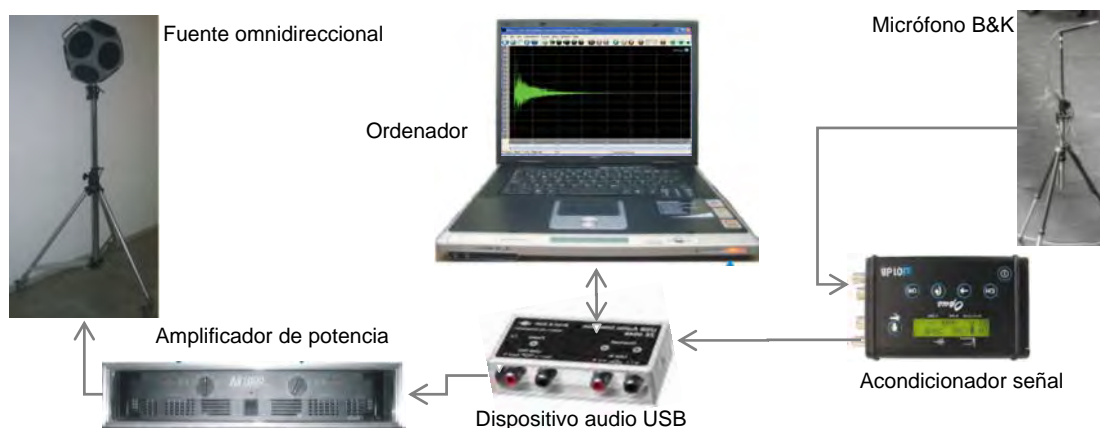
En cada una de las unidades se han utilizado dos posiciones de fuente, colocándola en cada caso a 1,60 m sobre el nivel del suelo. Para cada posición de la fuente se han utilizado entre 3 (para el módulo más pequeño) y 7 (para los mayores) posiciones de micrófono, situándolo a 1,20 m sobre el suelo.

Las condiciones ambientales se monitorizaron durante el periodo de medida (una mañana), tomando al menos dos registros en cada uno de los espacios, uno al principio y otro al final de la medida. La temperatura se mantuvo en el intervalo 25-28 °C y la humedad relativa varió entre el 45% y el 58% durante todo el proceso de toma de datos.

También se midió el espectro del ruido de fondo en el interior, promediando durante 5 minutos, con el analizador SVAN 958. En la Figura 4 se muestran, superpuestos sobre las curvas NCB [5], los espectros máximo y mínimo registrados. El mínimo corresponde a la UE1, la más protegida; todas las demás unidades presentan un comportamiento más parecido al máximo, de modo que, salvo para la citada UE1, que se puede valorar como NCB-30, el ruido de fondo en las demás se valora como NCB-45. Se ha de remarcar que, como ya hemos



**Figura 4.** Espectros medidos del ruido de fondo (máximo y mínimo) valorados sobre las curvas NCB.



**Figura 5.** Esquema del sistema de medida.

indicado, habían comenzado las obras de reforma en la UE2 y el ruido generado en ésta es la causa principal de los altos niveles medidos en el resto de recintos. Durante el uso normal es de esperar que el espectro se acerque más a la valoración NCB-30 tras la rehabilitación, si se cuidan las posibles fuentes internas.

Los valores de los parámetros acústicos se han derivado de las respuestas al impulso (RI) registradas en cada uno de los recintos. Éstas se han obtenido excitando el espacio con señales sinusoidales de barrido exponencial en frecuencia. Tanto el rango de frecuencia, como la duración de cada barrido, se ajustaron para adaptarse a las condiciones del entorno a fin de tener RI de calidad adecuada. En concreto la relación señal/ruido para las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4000 Hz ha sido superior a 45 dB.

Todo el proceso de generación de la señal, registro de la respuesta y análisis de la misma, se ha realizado mediante el sistema DIRAC 4.1 [6] instalado en un ordenador portátil. La entrada-salida de la señal al ordenador se ha hecho a través del dispositivo de sonido USB ZE-0948 de Brüel&Kjaer. La señal generada alimentaba el amplificador INTER-M 1000, para ser reproducida por una fuente omnidireccional DO12. La respuesta al impulso en cada posición de recepción era captada por el micrófono omnidireccional B&K 4165, con el preamplificador B&K 2669, conectado mediante el acondicionador de señal OPUS de 01dB a la entrada del dispositivo USB ZE-0948. En la Figura 5 se muestra el esquema del equipo de medida.

## 2.2. Modelos 3D y proceso de calibración

Se ha elaborado un modelo 3D de cada una de las unidades medidas y se ha simulado el campo acústico en el interior de las mismas mediante el software CattAcoustic v-8.0k [7]. Los resultados simulados se comparan con los medidos con el fin de confirmar que, tras el proceso de calibración de los modelos a partir del tiempo de reverberación [8], los valores obtenidos para el resto de los parámetros son simulados con suficiente precisión. Esto nos permi-

tirá calificar el comportamiento acústico del recinto con suficiente grado de aproximación, a partir de las simulaciones realizadas, para frecuencias  $f > 4f_s$ , donde  $f_s$  es la denominada frecuencia de Schröder, que depende del volumen del recinto ( $V$ ) y del tiempo de reverberación del mismo ( $T$ ), que se puede calcular mediante la expresión:

$$f_s = \sqrt{\frac{c^3 T}{8,8V}} \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}}$$

El proceso de calibración mencionado implica ajustar los coeficientes de absorción y dispersión para los materiales cuyos datos son más inciertos, de manera que los valores del tiempo de reverberación simulados coincidan con los que se midieron in situ, promediados espacialmente. El software utilizado dispone de un algoritmo interactivo que facilita este proceso sin necesidad de realizar una simulación completa. El modelo calibrado se da por aceptable cuando los valores simulados difieren menos de 1 JND (Just Noticeable Difference, 5% en el caso de  $T$ ) respecto de los medidos, para cada una de las bandas de octava de interés. Esas diferencias se mantuvieron, en general, inferiores al 3%.

Tras comprobar la validez de los modelos 3D elaborados para las unidades espaciales medidas, se han implementado los modelos 3D de las nuevas unidades espaciales previstas en el proceso de rehabilitación contemplado en el Plan Director: en unos casos se trata de las mismas unidades con varias propuestas de ocupación espacial, en otros de nuevas unidades obtenidas por agregación o fragmentación de las preexistentes. En todos ellos se han contemplado, para cada unidad, esencialmente dos propuestas de acondicionamiento acústico: una en la que se tratan sólo los cerramientos verticales y otra en la que, además, se añade un tratamiento específico para las bóvedas. En total se han evaluado unos 30 modelos diferentes. En cualquier caso, dado el carácter patrimonial del edificio, la intervención, y por tanto las soluciones de acondicionamiento propuestas, deben de ser compatibles con ese carácter, por lo que las decisiones se han tomado de acuerdo con las sugerencias de los arquitectos responsables del Plan de Director.

La elaboración de modelos 3D de las nuevas unidades espaciales permite predecir los valores de sus parámetros acústicos después de la rehabilitación, y comparar las diferentes hipótesis que se han barajado para cada una de esas unidades, con el fin de facilitar la toma de decisiones en la selección de los tratamientos más adecuados, en función del uso al que se van a destinar y de su coste.

### 3. RESULTADOS

En esta sección se aplica la metodología descrita a una unidad espacial significativa contemplada en la intervención, la denominada UE5, para obtener tanto los datos experimentales como los simulados, en el estado inicial y en las propuestas de intervención analizadas. En la



**Figura 6.** Vistas interiores de la UE5: hacia el estrado y el fondo, arriba; y hacia los laterales, abajo.

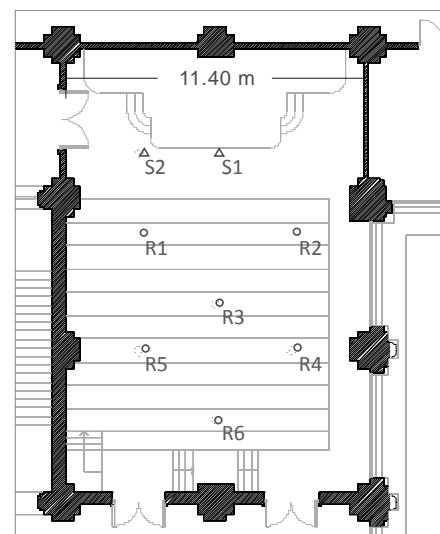
Figura 6 se muestran diversas vistas interiores de la misma que nos ayudan a configurar una imagen del espacio y en la Figura 7 aparece un esquema de la planta con indicación de las posiciones de la fuente (S1 y S2) y de los receptores (R), utilizadas tanto en las medidas *in situ* como en la simulación.

El anterior uso de esta unidad espacial era docente, en concreto, era el aula 9 de la antigua Facultad de Derecho. Su superficie interior total es de unos 754 m<sup>2</sup> y su volumen es, aproximadamente, 1000 m<sup>3</sup>. A partir de ella se han recreado y simulado tres unidades diferentes con usos distintos que se presentan más adelante.

### 3.1. Medidas experimentales en estado previo

Uno de los indicadores de la calidad de los registros de las respuestas al impulso es la relación señal/ruido impulsiva. En la Figura 8 se ha representado el valor medio espectral y la dispersión (valorada por la desviación estándar) de esta relación para los registros realizados en la UE5. Podemos observar que, para todas las bandas de octava de interés, tiene un valor superior a los 45 dB, lo que permite una evaluación fiable del  $T_{30}$ .

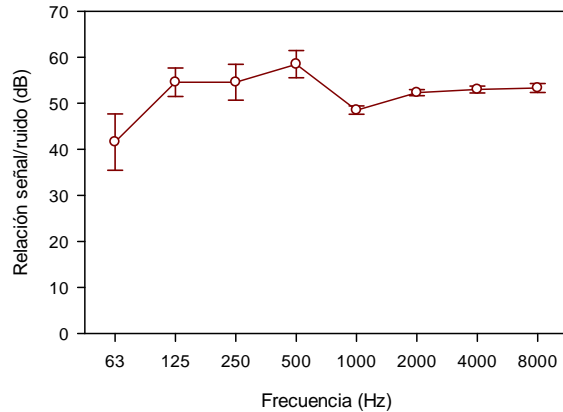
En la Figura 9 se muestra una respuesta al impulso típica registrada en el recinto, la correspondiente a



**Figura 7.** Planta de la UE5, con indicación de las posiciones de la fuente y de los receptores.

la posición de la fuente S2 y del receptor R3, y la curva de caída, o integral de Schröder, asociada, filtrada para la banda de octava de 1 kHz.

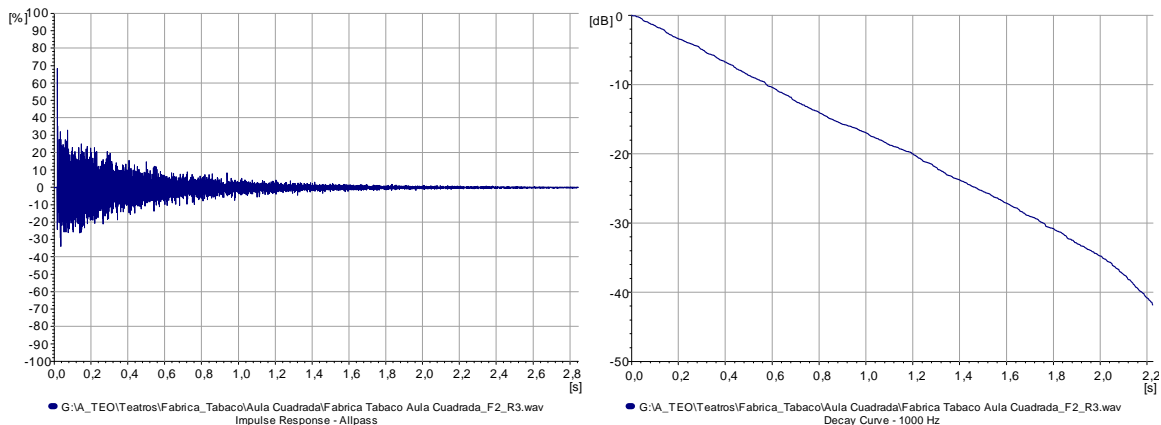
La Tabla 1 muestra los valores promedio de  $T_{30}$  utilizados en el proceso de calibración del modelo, así como la diferencia relativa porcentual entre éstos y los simulados con el modelo calibrado. Podemos observar que, para todas las bandas de octava, esta diferencia es menor que el 3%. Así mismo se muestran estos valores promedio (columna *Med.*) para las dos posiciones de la fuente, y la desviación estándar asociada (columna *SD* adyacente), como medida de la dispersión espacial, del tiempo de caída inicial (*EDT*), de la definición ( $D_{50}$ ) y del tiempo central ( $T_s$ ). Se han seleccionado estos parámetros porque se relacionan subjetivamente con el uso docente al que se destinaba el aula. Para una mejor visualización, estos datos se presentan de forma gráfica en la Figura 10.



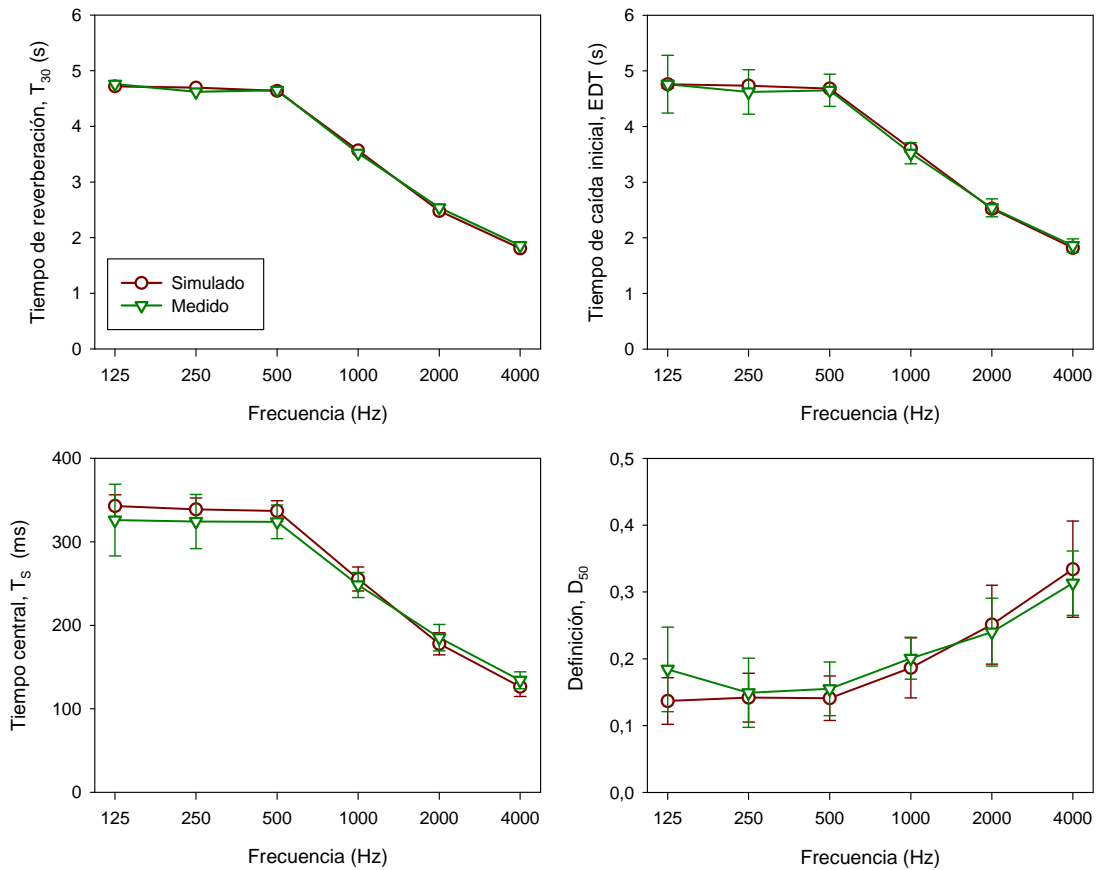
**Figura 8.** Comportamiento espectral promedio y dispersión espacial (valorada por la desviación estándar) de la relación señal /ruido impulsiva para los registros realizados en la UE5.

**Tabla 1.** Parámetros acústicos promediados espacialmente, medidos (*Med.*) y simulados (*Sim.*), para cada banda de octava, y las correspondientes desviaciones estándar (*SD*) para describir la dispersión espacial. La columna *Dif.* contiene las diferencias porcentuales relativas entre los valores medidos y simulados de  $T_{30}$ .

Frec. (Hz)	$T_{30}$ (s)			EDT (s)				$D_{50}$				$T_s$ (ms)			
	Med.	Sim.	Dif. (%)	Med.	SD	Sim.	SD	Med.	SD	Sim.	SD	Med.	SD	Sim.	SD
125	4,76	4,72	0,88	4,76	0,52	4,76	0,07	0,18	0,06	0,14	0,03	325,9	42,9	342,8	13,4
250	4,62	4,70	1,64	4,62	0,40	4,73	0,06	0,15	0,05	0,14	0,04	324,3	32,5	338,7	13,9
500	4,65	4,64	0,25	4,65	0,29	4,68	0,05	0,16	0,04	0,14	0,03	323,9	20,1	336,9	12,3
1000	3,52	3,57	1,35	3,52	0,19	3,60	0,06	0,20	0,03	0,19	0,04	248,3	14,9	255,5	14,4
2000	2,54	2,48	2,33	2,54	0,16	2,52	0,07	0,24	0,05	0,25	0,06	185,3	15,9	177,8	13,3
4000	1,86	1,81	2,87	1,86	0,12	1,82	0,04	0,31	0,05	0,33	0,07	134,1	10,0	126,5	11,8



**Figura 9.** Respuesta al impulso típica y curva de caída correspondiente a la banda de octava de 1 kHz

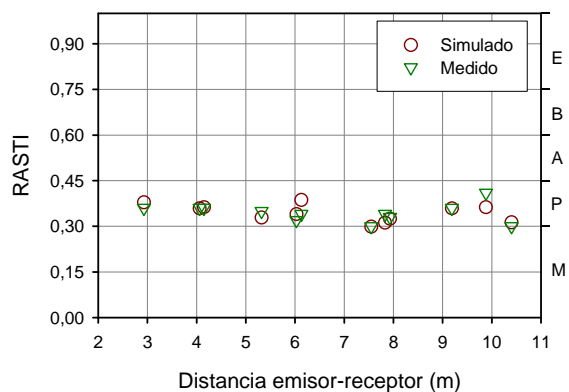


**Figura 10.** Comportamiento espectral de los valores promediados espacialmente de los parámetros acústicos, medidos y simulados, en el estado actual en la unidad espacial UE5. La dispersión espacial se valora mediante la desviación estándar indicada por las barras de error.

En la Figura 11 se ha representado el valor del índice *RASTI* frente a la distancia emisor-receptor. Los valores medidos se han derivado a partir de las respuestas al impulso sin calibrar, es decir, las mismas que se han utilizado para obtener el resto de los parámetros. Ello se ha hecho así porque, en todos los casos, predomina el efecto de la reverberación sobre el del ruido de fondo durante el uso habitual del recinto, sin la presencia de las obras. La escala de la derecha califica cualitativamente la inteligibilidad en función del rango de valores del índice *RASTI*: M, “*mala*”, P, “*pobre*”, A, “*aceptable*”, B, “*buena*” y E, “*excelente*”.

A partir de los datos de la Tabla 1, representados en la Figura 10, podemos realizar las siguientes observaciones:

- Los valores del tiempo de reverberación son bastante elevados a todas las frecuencias, lo que califica al espacio como claramente reverberante.
- Tiempos de reverberación medidos a bajas frecuencias en torno a 4,5-5 s,



**Figura 11.** Valores del índice *RASTI*, medidos y simulados, frente a la distancia fuente-receptor.

de 4-4,5 s a medias frecuencias y 2-2,5 s a altas frecuencias, todos ellos con la sala vacía; valores muy alejados de los recomendables: entre 0,9 y 1,0 s para las frecuencias medias y con la sala vacía.

- Los valores de *EDT* son muy similares a los de  $T_{30}$ , aunque la dispersión espacial es sensiblemente mayor, sobre todo a bajas y medias frecuencias.
- Valores del tiempo central (indicador de la nitidez del sonido) muy altos: en torno a 325 ms para las frecuencias bajas, de 250-325 ms para las frecuencias medias y de 135-185 ms para frecuencias altas. Estos valores están en consonancia con los tiempos de reverberación medidos.
- Para aumentar la nitidez del sonido habría que reducir los valores del tiempo central de las frecuencias medias a valores del orden de 100 ms.
- Valores de la definición ( $D_{50}$ ) bajos: entre 0,15 y 0,20 para las bajas y medias frecuencias, subiendo a altas frecuencias a 0,25-0,30.
- Habría que aumentar considerablemente los valores de la definición, para alcanzar el rango 0,60-0,70, aproximadamente.
- Como consecuencia de todo lo anterior, los valores de la inteligibilidad, medidos a través del índice RASTI, son bajos, entre 0,30-0,40 para todos los puntos, lo que es indicador de una inteligibilidad “pobre”.
- Habría que aumentar los valores del RASTI al rango 0,60-0,75 para que esa inteligibilidad pueda ser calificada, al menos, como “buena”.
- Los valores de todas las variables medidas indican la absoluta necesidad de aumentar la absorción sonora del recinto, principalmente con la inclusión de revestimientos absorbentes en las paredes (donde no haya grandes cristalerías) y bóvedas. El revestimiento de corcho de las paredes probablemente se puso en su día con fines acústicos, pero resulta evidente que, con el montaje realizado, solo a altas frecuencias se nota su presencia.

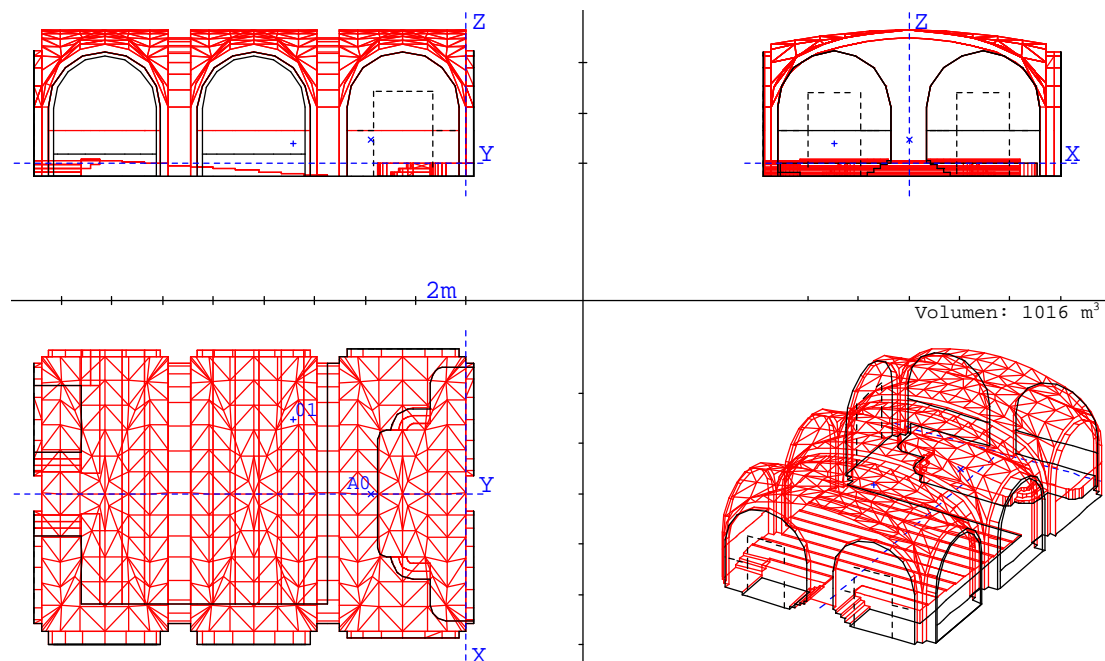
### 3.2. Resultados simulados en el estado actual

El modelo tridimensional elaborado para simular las condiciones del estado actual se muestra en la Figura 12 y, en la Tabla 2, se aportan los datos de los principales materiales utilizados en el modelo: superficie y coeficientes de absorción de cada uno de ellos. Los valores de los coeficientes de absorción y dispersión de materiales usuales se pueden encontrar en [9],

**Tabla 2.-** Superficies y coeficientes de absorción de los materiales utilizados en el modelo de la UE5.

Material	Superficie (m <sup>2</sup> )	Coeficientes de absorción (%)					
		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Superficies enlucidas	379,5	1	1	1	1	3	5
Suelo de mármol	225,5	1	1	1	1	2	2
Panel de corcho pegado	58,4	28	32	32	40	46	46
Panel madera	33,4	18	12	10	9	8	7
Ventanal de vidrio	35,2	18	6	4	3	2	2
Puerta de madera	21,7	14	10	6	8	10	10
<b>S<sub>TOTAL</sub> =</b>	<b>753,6</b>						





**Figura 12.** Modelo de la unida espacial UE5 implementado para simular el estado actual.

[10], [11]. En este caso, para todas las superficies se utilizó un valor del coeficiente de dispersión de 10%. La frecuencia de Schröder de este modelo es 137 Hz, lo que indica que los resultados simulados son fiables a partir de la banda de octava de 500 Hz.

Los valores simulados de los parámetros acústicos, promediados espacialmente, aparecen en la Tabla 1 en las columnas epigrafiadas *Sim.* y los de las correspondientes desviaciones estándar, para valorar la dispersión espacial, en las columnas adyacentes tituladas *SD*. Estos valores se comparan gráficamente con los medidos *in situ* en la Figura 10. Esta información pone de manifiesto que los valores medidos y simulados muestran diferencias menores de 1 JND tanto para *EDT*, como para *T<sub>S</sub>* y *D<sub>50</sub>*. La dispersión espacial es muy similar, salvo en las frecuencias más bajas, donde la dispersión de los valores medidos es mayor que la de los simulados.

En la Figura 11 se comparan, a su vez, los valores del índice RASTI frente a la distancia emisor-receptor. Podemos observar que los valores medidos y simulados son muy similares para todos los puntos, casi independientes de la distancia y que, como ya observamos al comentar los datos experimentales, permiten calificar la inteligibilidad del espacio como “*pobre*”.

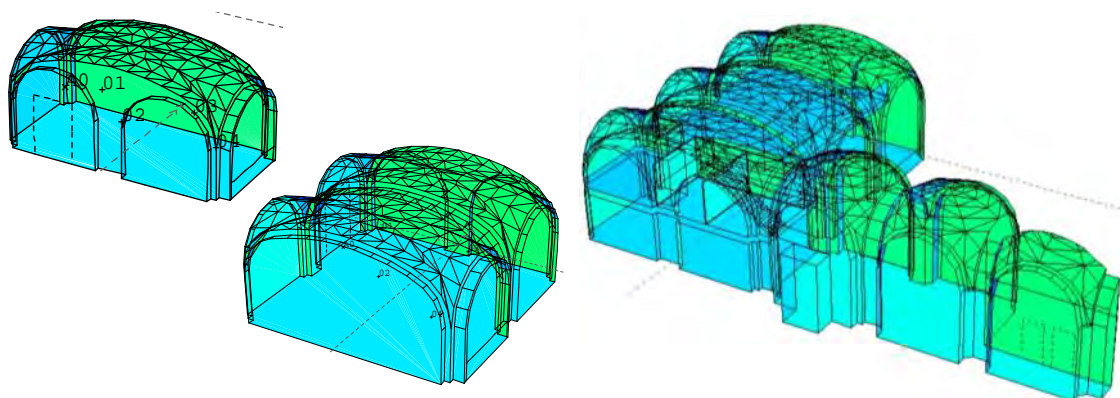
A partir de la información presentada, podemos concluir que el modelo implementado, una vez calibrado siguiendo el procedimiento descrito, permite calcular con suficiente precisión los parámetros acústicos que califican el comportamiento acústico del recinto en relación al uso del mismo.

### 3.3. Resultados simulados en el estado reformado

El proyecto de rehabilitación contempla la división de esta unidad espacial en otras dos con un uso también docente (Figura 13.a y 13.b) y la constitución de una tercera (Figura 13.c), por agregación de espacios adicionales, con un uso administrativo, en la que además se construye una entreplanta, de modo que se configuran dos subespacios acústicamente diferenciados (planta baja y planta alta) que se han analizado de forma separada.


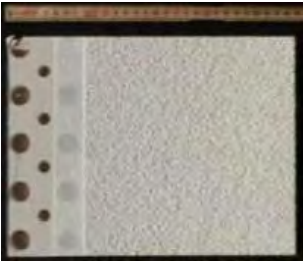
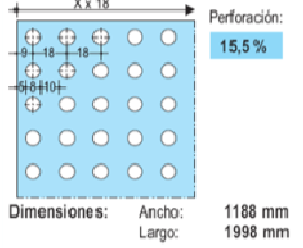
Para cada una de estas tres unidades espaciales, se han simulado dos opciones de acondicionamiento: en la primera (hipótesis 1) se tratan las paredes laterales con un panel de yeso perforado, trasdosado con lana de roca (producto comercial Knauf STO) y terminado con revestimiento poroso (STO Silent); en la segunda (hipótesis 2), además, se tratan las bóvedas con BASWAPHON 407, un producto con terminación porosa y que se puede aplicar con facilidad sobre bóvedas y cúpulas. En el caso de la unidad de la Figura 13.c el falso techo de la entreplanta es perforado y registrable (Knauf Cleaneo). Los valores de los coeficientes de absorción utilizados en el proceso de simulación se han tomado de los datos técnicos del fabricante y de la bibliografía habitual ya citada, [9], [10] y [11]. En la Tabla 3 se muestran algunos datos técnicos y los valores de los coeficientes de absorción acústico de los tratamientos utilizados en las simulaciones, extraídos de las hojas técnicas de los fabricantes. Los de dispersión que se indican han sido estimados a partir de los factores geométricos.

Las frecuencias de Schröder de la unidad espacial de la Figura 13.a, para cada una de las hipótesis de revestimientos, son  $f_{S1}=101$  Hz para la primera hipótesis y  $f_{S2}=83$  Hz para la segunda, lo que indica que los resultados serán fiables a partir de las bandas de octava de 500 y 250 Hz, respectivamente. Para el espacio de la Figura 13.b estos valores son, respectivamente, 83 y 60 Hz, por lo que las simulaciones serán fiables a partir de la banda de 250 Hz. Para la unidad de la Figura 13.c son 65 y 35 Hz, lo que supone resultados admisibles para las bandas de octava a partir de 250 y 125 de Hz, respectivamente.



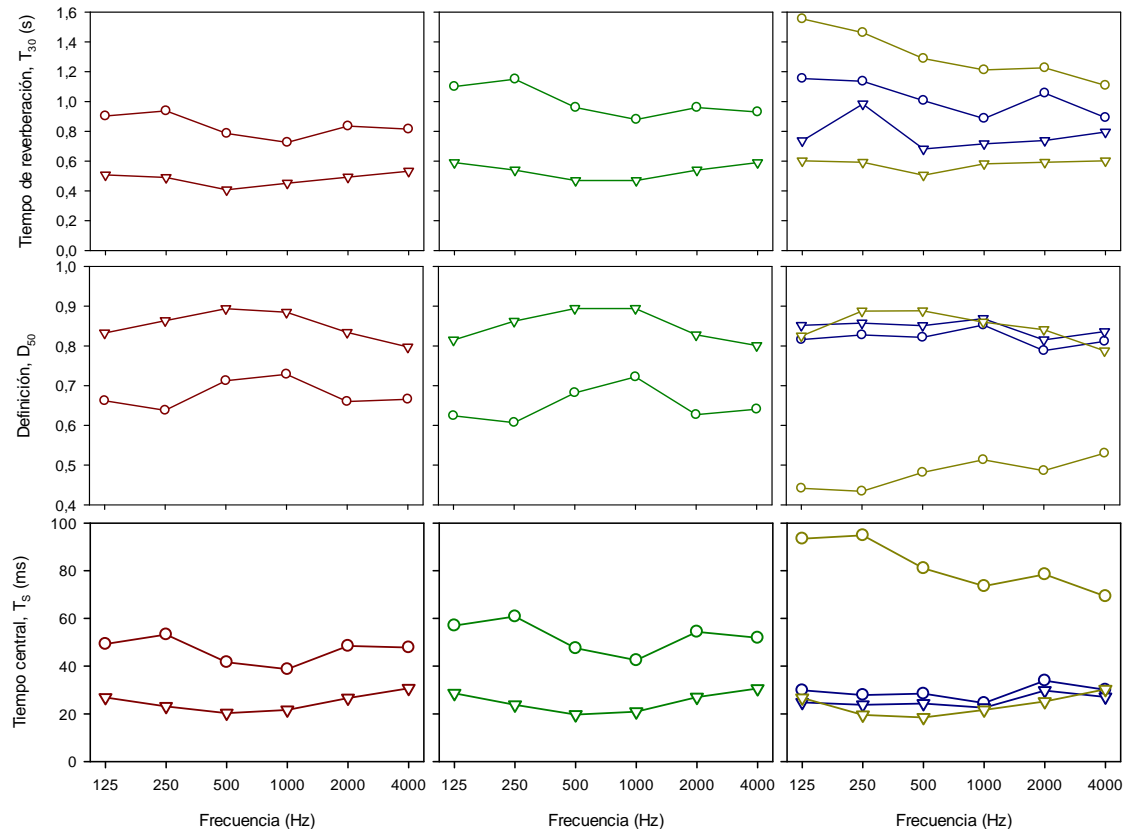
**Figura 13.** Modelos 3D para las tres unidades conformadas tomando como base la unidad inicial UE5.

**Tabla 3.** Descripción y características acústicas de los materiales propuestos para la corrección acústica.

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	COEFICIENTES: <ABSORCIÓN><DISPERSIÓN>
<b>BASWAPHON</b>		
Este sistema permite obtener un acabado con superficie muy lisa similar a un enlucido de yeso.	El sistema se compone de 2 elementos: - Material poroso de lana mineral adherido directamente sobre el elemento soporte con un espesor de 30 - 65 mm. - Capa de acabado micro-poroso BASWAPHON 407 con varias posibilidades de terminación (pueden aplicarse varias capas) con un espesor total de 2,5 – 3,5 mm.	<57 82 77 65 63 49><10 10 10 10 10 10> 
<b>KNAUF STO</b>		
Placa de yeso laminado perforada. Alma de yeso con fibra de vidrio y cartón en sus dos caras. Posee un velo de fibra de vidrio en su dorso. Clasificación al fuego M-1. Nuevo borde FF para facilitar y agilizar el tratamiento de juntas. Las placas se suministran con velo blanco.	- Placa perforada con un espesor de 12,5 mm y perforaciones circulares con diámetros de 12/20/46 mm. - Tiras de placas de yeso laminado (4 tiras longitudinales en cada placa) de 18 mm de espesor y 60 mm de anchura. - Hueco entre tiras relleno de lana mineral de 20 mm de espesor. Cara oculta con lámina de aluminio que cierra de manera estanca. - Acabado con revestimiento poroso STOSILENT	<62 60 72 74 58 53><10 15 15 20 20 20> 
<b>KNAUF CLEANEO</b>		
Placa de yeso laminado con perforaciones circulares. Alma de yeso con fibra de vidrio y cartón en sus dos caras. Velo de fibra de vidrio en su dorso.	- Están compuestas de una placa perforada con un espesor de 12,5 mm. - Perforaciones circulares 8 mm y densidad de perforación del 15,5 %.	<67 94 76 80 55 64><10 10 10 10 10 10> 

El comportamiento espectral promediado espacialmente de los parámetros acústicos, para cada una de las unidades y para cada una de las hipótesis de revestimientos, se muestra en la Figura 14. No se han incluido las barras verticales para valorar la dispersión espacial por razones de claridad y porque, además, son del mismo orden de magnitud que las del estado actual. Los valores del índice RASTI aparecen en la Figura 15 para cada una de las unidades y para las dos hipótesis de tratamientos analizadas.

En el caso de la unidad de la Figura 13.a observamos que el tiempo de reverberación, si se aplica el tratamiento de la hipótesis 1, se sitúa ligeramente por encima de los 0,7 s que fija el DB HR: protección frente al ruido del Código Técnico de la Edificación CTE [12] para aulas y salas de conferencias con volumen inferior a los 350 m<sup>3</sup>, como es el caso; si se aplican los tratamientos de la hipótesis 2, los valores de  $T_{30}$  son del orden de 0,5 s. La definición pasa desde un valor comprendido entre 0,65 y 0,70, en el caso de aplicar la hipótesis 1, hasta el comprendido entre 0,80 y 0,85 para la hipótesis 2. Para la hipótesis 1 el tiempo central está comprendido entre los 40 y los 50 ms, mientras que si se utilizan los revestimientos de la hipótesis 2, el intervalo se reduce hasta los 30-40 ms. En cuanto al índice RASTI, en ambos casos los valores se sitúan alrededor de 0,75 en todos los puntos, con valores sólo ligeramente más altos en el caso de aplicar los tratamientos de la hipótesis 2. En definitiva, salvo

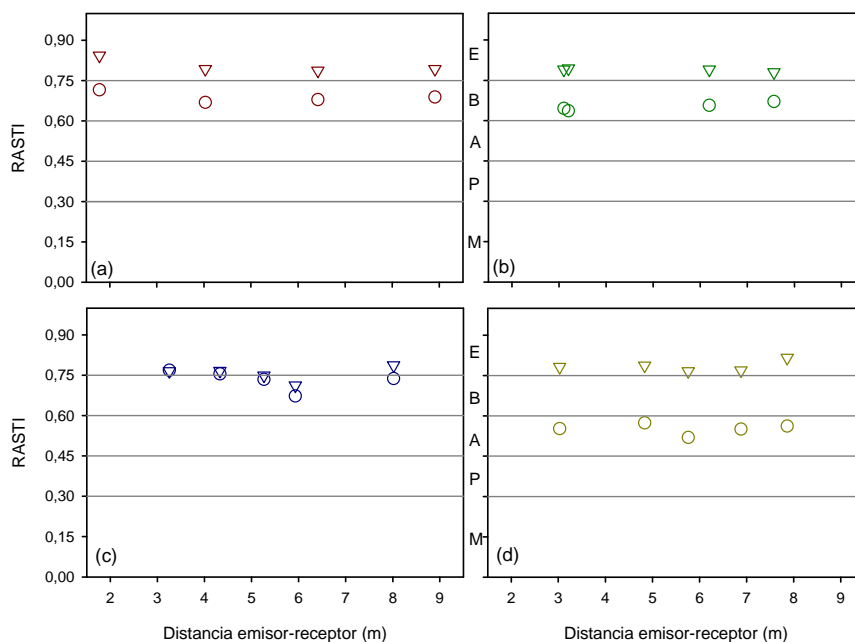


**Figura 14.** Valores espectrales de los parámetros acústicos simulados, promediados espacialmente, en las tres unidades propuestas en la rehabilitación. Arriba: unidad UE5(a); en medio: unidad UE5(b); Abajo: unidad UE5(c), en azul la planta baja y en amarillo la alta. (O) Hipótesis-1, (∇) Hipótesis-2.

el tiempo de reverberación, que es ligeramente superior al deseable, los demás parámetros adquieren valores aceptables aplicando sólo el tratamiento definido como hipótesis 1.

En el caso de la unidad de la Figura 13.b, observamos que el tiempo de reverberación, si se aplica el tratamiento de la hipótesis 1, se sitúa ligeramente por encima de 1 s. Hemos de señalar que, en este caso, el volumen supera los 350 m<sup>3</sup>, por lo que su tiempo de reverberación no queda limitado por el DB HR del CTE. Si se aplican los tratamientos de la hipótesis 2, los valores de  $T_{30}$  son del orden de 0,6 s. La definición pasa desde un valor comprendido entre 0,60 y 0,65, en el caso de aplicar la hipótesis 1, hasta estar comprendido entre 0,80 y 0,85 para la hipótesis 2. Para la hipótesis 1 el tiempo central está comprendido entre los 50 y los 60 ms, mientras que si se utilizan los revestimientos de la hipótesis 2, el intervalo se reduce hasta los 20-30 ms. En cuanto al índice RASTI, en ambos casos los valores se sitúan alrededor de 0,75 en todos los puntos, con valores algo más altos en el caso de aplicar los tratamientos de la hipótesis 2. En este caso los resultados para  $T_{30}$  son ligeramente elevados y, dado el volumen del recinto, sería recomendable aplicar los tratamientos de la hipótesis 2, pues la mejora en el resto de los parámetros es notoria.

En el caso de la unidad de la Figura 13.c, observamos que existe un comportamiento acústico muy diferente en los dos subespacios que configuran el recinto propiciados por la inser-



**Figura 15.** Índice RASTI simulado, frente a la distancia emisor-receptor, en las tres unidades propuestas en la rehabilitación: (a) unidad UE5(a); (b) unidad UE5(b); (c) planta baja unidad UE5(c); (d) planta alta unidad UE5(c). (O) Hipótesis-1, (∇) Hipótesis-2.

ción de la entreplanta. Por eso se presentan separadamente los resultados para cada uno de ellos. La planta baja, con la hipótesis 1 tiene un  $T_{30}$  algo elevado: entre 1 y 1,2 s, para el uso que se le va a dar, mientras que si se aplican los tratamientos sugeridos en la hipótesis 2, este valor desciende a 0,8 s, perfectamente asumible. En la planta alta el cambio es más radical: en la condiciones de la hipótesis 1 los valores de  $T_{30}$  se sitúan entre 1,2 y 1,5 s, que resultan demasiado elevados para el uso pretendido, mientras que si se tratan las bóvedas, como se contempla en la hipótesis 2, este valor se reduce hasta 0,6 s, que ya se sitúa en el rango aceptable. En cuanto a los valores de  $D_{50}$ , en la planta baja apenas hay diferencia entre los valores simulados bajo las condiciones de las hipótesis 1 y 2; en ambos casos estos valores son del orden de 0,85, adecuados para el uso previsto. Los cambios son mucho más significativos para la planta alta si se aplican los tratamientos de la hipótesis 2; en tal caso los valores pasan del rango 0,45-0,50 hasta situarse en el comprendido entre 0,85 y 0,90, de modo que se alcanzan ya los valores deseados. Finalmente, los valores del tiempo central, para la planta baja, independientemente de la hipótesis aplicada, son del orden de 25 ms, mientras que para la planta alta, si consideramos la hipótesis 1 se sitúan en el rango 75-95 ms, algo elevado, mientras que al aplicar la hipótesis 2, estos valores descienden hasta los 30 ms, que son mucho más aceptables.

Buscar la compatibilidad entre una selección de tratamientos superficiales visualmente adecuados, que no alteren el valor patrimonial del edificio, y un comportamiento acústico efectivo ha sido el modo de proceder en el proyecto de rehabilitación acústica, pero se ha de señalar que uno de los inconvenientes que tienen estos tratamientos es que su terminación es micro-

porosa; de modo que cualquier pintura que se aplique puede reducir drásticamente la eficacia de los mismos como absorbente acústico, por lo que, si por razones de mantenimiento, se introduce esta terminación final puede alterar significativamente el comportamiento acústico.

#### **4. CONCLUSIONES**

Se ha presentado la metodología utilizada para asesorar el proceso de rehabilitación de la Antigua Real Fábrica de Tabacos de Sevilla, sede de la Universidad de Sevilla, dentro del Plan Director que se está llevando a cabo con el fin de restaurar el valor patrimonial de este emblemático edificio sevillano, escenario donde se desarrolla parte de la ópera Carmen. El proceso de calibración de los modelos informáticos realizados para las unidades en su estado actual, ha permitido obtener información del máximo interés para utilizarla en los modelos de las unidades espaciales contempladas en el proceso de rehabilitación, conformadas, en su mayoría, por agregación o subdivisión de las anteriores.

Hemos de señalar que el confort acústico ha sido una de las deficiencias ampliamente detectadas en etapas previas, principalmente para el uso docente del edificio.

Finalmente se ha utilizado una de las unidades espaciales incluidas en el proyecto de acondicionamiento acústico para mostrar la aplicación de la metodología y los resultados obtenidos. El análisis realizado ha estado guiado por dos criterios fundamentales: los usos docente y administrativo exigen aplicar unos tratamientos superficiales que den lugar a unas buenas condiciones acústicas tras la rehabilitación, y la intervención ha de ser absolutamente respetuosa con el carácter patrimonial del edificio.

#### **Agradecimientos**

Este proyecto ha sido financiado por la Universidad de Sevilla.

#### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] T. Falcón: *El patrimonio monumental*. En: T. Falcón, J. Bernal, E. Valdivieso, M. J. Sanz, "Universidad de Sevilla. Patrimonio monumental y artístico", Secretariado de Publicaciones, Universidad de Sevilla, pp. 27-61, 2001.
- [2] J. M. Rodríguez Gordillo: *Historia de la Real Fábrica de Tabacos de Sevilla*, Fundación Focus Abengoa, Sevilla, 2005.
- [3] J. Morales Sánchez: *Arquitectura y proyecto en la Sevilla del siglo XVII. La Fábrica de Tabaco*, Fundación Focus Abengoa, Sevilla, 1991.
- [4] UNE-EN ISO 3382-1 (2010): *Acústica – Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos*.
- [5] L. L. Beranek: *Balanced noise-criterion (BNC) curves*. J. Acoust. Soc. Am. 86(2) (1989) 650-664
- [6] DIRAC room acoustic software, user manual v4.0, Brüel&Kjaer.

- [7] CATT-Acoustic v.8 user's manual. Room Acoustics Prediction and Desktop Auralization, CATT, 2010.
- [8] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón: Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches. *J. Acoust. Soc. Am.* 126(3), pp. 1207-1218, 2009.
- [9] M. Vorländer: *Auralization, fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*, Springer-Verlag, Berlin, 2008.
- [10] T. J. Cox, P. D'Antonio: *Acoustic absorbers and diffusers. Theory, design and application*. Spon, London, 2004.
- [11] Physikalisch-Technische Bundesanstalt. <http://www.ptb.de/en/org/1/16/163/datenbank.htm> (visitada el 12/10/2011).
- [12] Disponible en <http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/> (visitada el 12/10/2011).