

## ACÚSTICA DE UNA PISTA POLIDEPORTIVA MULTIUSOS CON CUBIERTA EN MEMBRANA TEXTIL TENSIONADA

PACS: 43.55.Ka

L. Álvarez, J. R. Barroso, M. Galindo, S. Girón, T. Zamarreño.  
Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC.  
Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain  
Tel.: +34 954 556 612; Fax: +34 954 557 892  
E-Mail: [calvarez6@us.es](mailto:calvarez6@us.es), [jrbarrosomoraes@gmail.com](mailto:jrbarrosomoraes@gmail.com), [mgalindo@us.es](mailto:mgalindo@us.es), [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es),  
[teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es).

### ABSTRACT

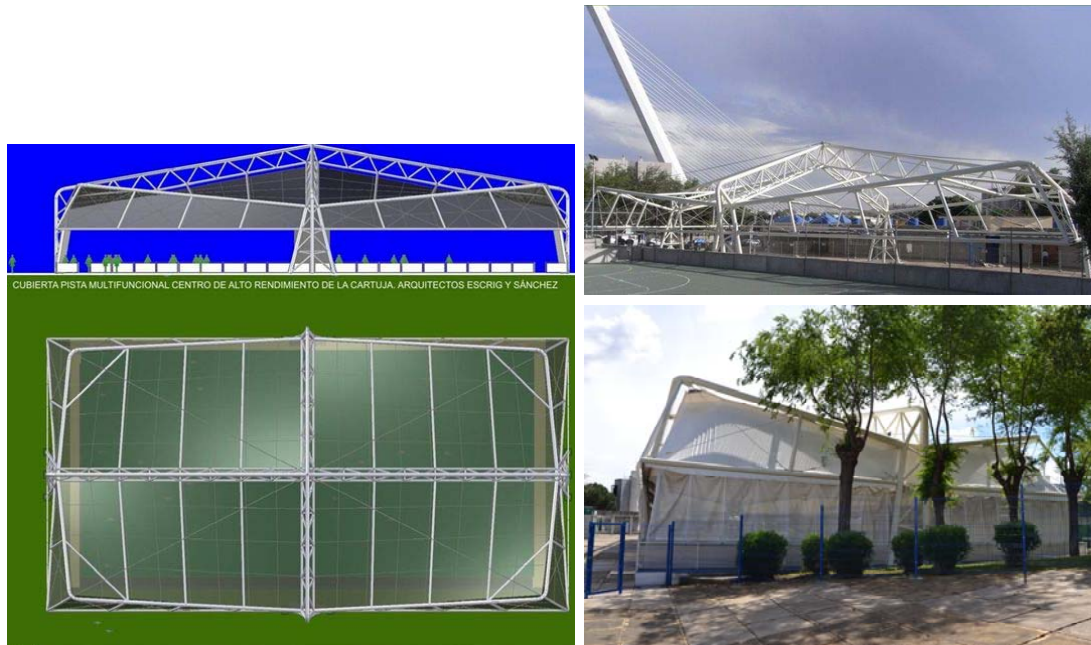
The acoustic study of a sports court of the High Performance Centre of La Cartuja (Seville) is presented. This is an area covered with a tensional textile structure. On-site measurements of impulse responses using sinusoidal sweeps and acoustic simulation with CATT-Acoustic are performed. In both cases, the spectral behaviour of each acoustic parameter value and its spatial distribution are analysed. The model used in the simulation is calibrated using an iterative process to adjust simulated reverberation times that differ by no more than 5% of those measured. Proposals are then made for the adaptation of the acoustic behaviour of the sports court.

### RESUMEN

Se presenta el estudio acústico de una pista polideportiva del Centro de Alto Rendimiento de La Cartuja (Sevilla). Se trata de un espacio cubierto con una estructura textil tensionada. Se ha realizado la medición in-situ de las respuestas al impulso mediante barridos sinusoidales y una simulación acústica con CATT-Acoustic. En ambos casos se analiza el comportamiento espectral de cada parámetro acústico y se valora su distribución espacial. El modelo utilizado en la simulación se ha calibrado, usando un procedimiento iterativo, de modo que los tiempos de reverberación simulados y medidos no difieran en más de un 5%. Finalmente se hacen propuestas de adecuación de su comportamiento acústico.

### INTRODUCCIÓN

Desde hace unas décadas se viene estudiando el comportamiento acústico de materiales ligeros con objeto de incorporarlos como soluciones constructivas de diversos tipos de recintos. En particular, son habituales las estructuras textiles tensionadas para cubrir grandes espacios de forma temporal o semipermanente [1-4]. A este respecto en nuestro grupo de investigación se han realizado algunos trabajos de caracterización de estos espacios [5] que posteriormente dieron lugar a una tesis doctoral [6].



**Figura 1.** Vistas en planta y sección longitudinal de la pista multifuncional (izquierda). Estructura portante y cubiertas textiles montadas (derecha).

El Centro Especializado de Alto Rendimiento de Remo y Piragüismo de Sevilla (CEAR [7]), dependiente de la Consejería de Comercio, Turismo y Deporte de la Junta de Andalucía, cuenta entre sus instalaciones con una pista multifuncional, para uso de aquellos deportistas que son residentes del centro, durante las concentraciones de las federaciones, clubes y asociaciones deportivas.

Es una pista polideportiva cubierta, con cerramiento lateral removible, proyectada por los arquitectos Félix Escrig Pallarés y José Sánchez Sánchez [8] en enero del 2010 (Figura 1). Está formada por una estructura de acero en vuelo que solo apoya en el centro de los lados. Sobre esta se monta una carpa tensionada de un material compuesto de PVC (Precontraint 1002T) diseñado especialmente para aislamiento térmico y para el cerramiento lateral removible, otro compuesto de PVC perforado (Precontraint 392S). Ambos materiales son de la marca Serge Ferrari. El volumen es de  $7750 \text{ m}^3$  y su planta tiene una superficie de  $47 \times 25 \text{ m}^2$ .

## METODO EXPERIMENTAL

Las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento normalizado incluido en la norma UNE-EN-ISO 3382-1:2010 [9]. El recinto estaba desocupado y diáfano y con el cerramiento lateral cerrado. Se utilizaron dos posiciones de fuente situadas a 1,5 m sobre el nivel del suelo y siete puntos de recepción a 1,2 m sobre el nivel del suelo (ver Figura 2). Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo entre los  $16,2$  y  $18,6$  °C y la humedad relativa varió entre 55 y 60%. El nivel del ruido de fondo se registró promediando durante 5 minutos mediante un sonómetro integrador B&K 2231. El nivel sonoro continuo equivalente fue de 55 dBA y un valor de pico de 66,5 dBA.

En cada punto de recepción se registraron las respuestas al impulso (RI) obtenidas a partir de barridos de señales sinusoidales, en las que la frecuencia incrementa exponencialmente con el tiempo. El rango de frecuencias se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 125 y 4000 Hz, así como la duración del barrido, para conseguir una relación señal-ruido

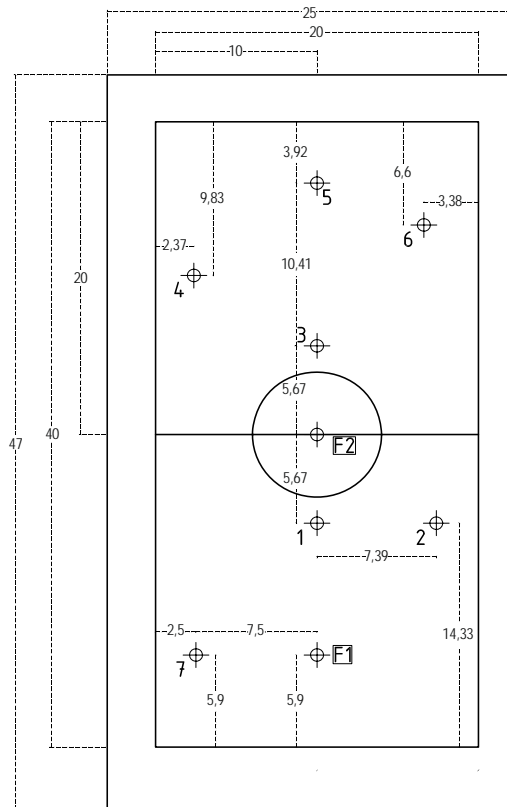


Figura 2. Planta, posiciones de fuente y de receptores. Distancias en metros.

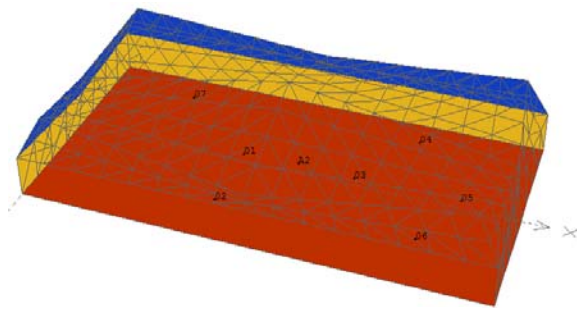


Figura 3. Modelo del recinto en el estado actual.

Tabla 1. Coeficientes de absorción (arriba) y scattering (abajo) de los materiales usados en la simulación.

Material	125	250	500	1000	2000	4000
PVC liso	0,55	0,30	0,10	0,05	0,05	0,05
PVC perforado	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Suelo	0,27	0,25	0,42	0,42	0,42	0,32
	0,10	0,15	0,20	0,15	0,30	0,35
	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

superior a 45 dB para las bandas de octava de interés. A partir de estas RI se derivan los valores de los parámetros acústicos.

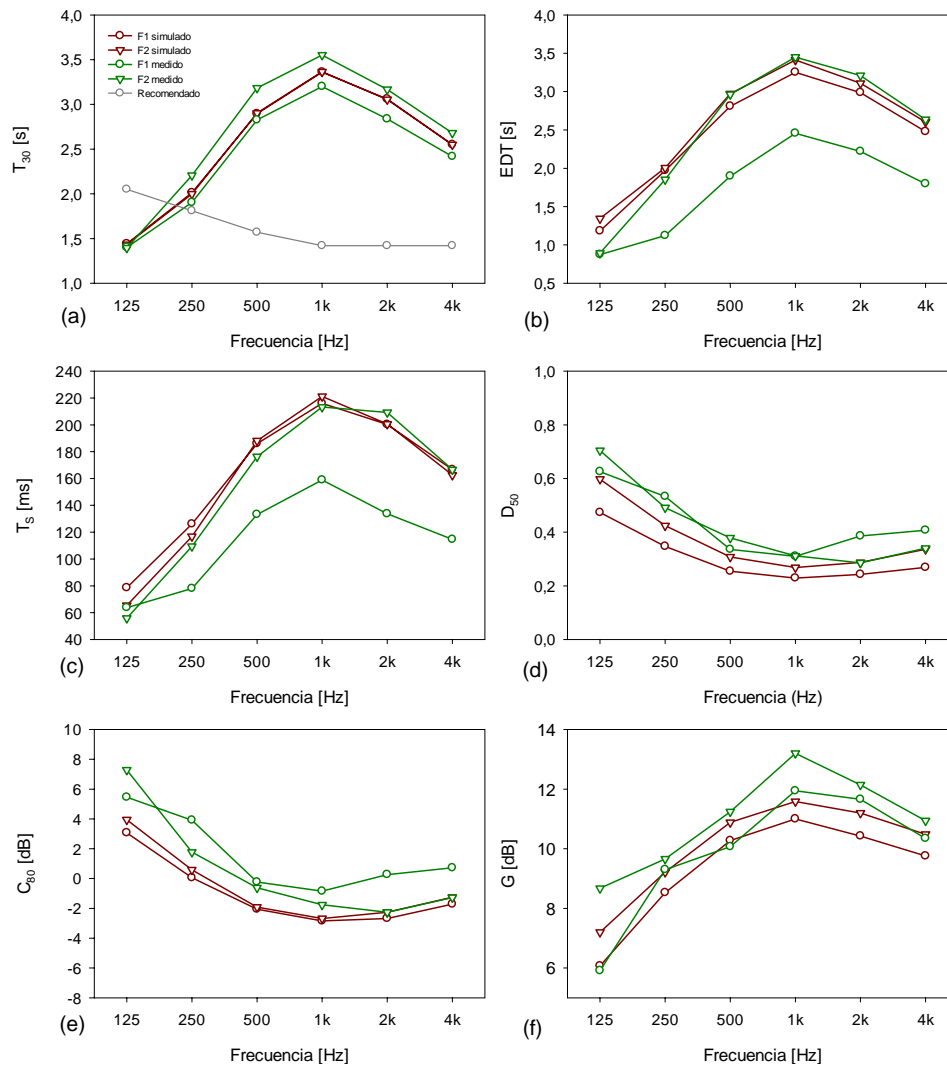
El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 [10] mediante una tarjeta de sonido VX Pocket v2 de Digigram. La señal generada alimenta al amplificador de potencia INTER-M 1000 y se reproduce en el recinto por una fuente omnidireccional AVM DO-12. La respuesta al impulso se captura con un micrófono multipatrón en su configuración omnidireccional (Audio-Technica AT4050/CM5), conectado a una fuente de polarización (ARTcessories).

El proceso de generación, adquisición y análisis de la señal se llevó a cabo con el programa WinMLS2004 [10] mediante una tarjeta de

## ESTADO ACTUAL, CALIBRADO Y SIMULACIÓN

Una vez procesadas las RI, se generó el modelo 3D del recinto (ver Figura 3) para simular su comportamiento acústico con el software CATT-Acoustic v8h [11]. La simulación llevada a cabo se basa en un proceso de calibración en el que se ajustan los valores de los coeficientes de absorción y scattering de aquellos materiales que presentan mayor incertidumbre en dichos valores, que en este caso corresponde a los del PVC perforado. Como parámetro de calibración se ha utilizado el tiempo de reverberación, de forma que los valores simulados promediados espacialmente no difieran más de un 5% (un JND) de los medidos *in situ* [12]. El límite para estas diferencias está ampliamente aceptado [9]. En la Tabla 1 se presentan los valores de los coeficientes de absorción y de scattering de los materiales usados en la simulación.

En la Figura 4 se presentan los valores medidos y simulados para el tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), el tiempo de reverberación inicial (EDT), el tiempo central ( $T_s$ ), la definición ( $D_{50}$ ), la claridad ( $C_{80}$ ) y la fuerza sonora ( $G$ ), promediados espacialmente, para las dos posiciones de la fuente, frente a la frecuencia.



**Figura 4.** Comportamiento espectral de algunos parámetros acústicos promediados espacialmente, para cada una de las dos posiciones de la fuente.

El tiempo de reverberación muestra el comportamiento típico para este tipo de recintos [5]: valores muy bajos para la octava inferior asociados con la “transparencia acústica” de la lámina ligera tensionada. Los valores a medias y altas frecuencias, sin embargo, son excesivamente altos para los usos habituales, en los que consideramos fundamental la comunicación verbal (curva recomendada en Fig. 4(a)). Este efecto se muestra también en los parámetros EDT,  $T_s$  y G fundamentalmente. Así mismo, para los valores medidos, observamos un comportamiento que depende de la ubicación de la fuente sonora y que se pone claramente de manifiesto en los valores de EDT,  $T_s$  e incluso, en los de  $T_{30}$ . Cuando la fuente se sitúa en el centro de la pista (F2) el campo reverberado presenta un comportamiento más uniforme, como pone de manifiesto la valoración de la distribución espacial (Tabla 2). Los valores simulados sin embargo no muestran este comportamiento con tanta claridad y se aproximan bien, en general, a los medidos con la fuente en F2. Conviene señalar que los valores simulados de  $T_{30}$  se sitúan entre las curvas correspondientes a las dos posiciones de la fuente, ya que en la calibración se utilizaron los valores promedio correspondientes a ambas posiciones.

Para valorar la distribución espacial de estos parámetros se han calculado (Tabla 2) los valores de las desviaciones estándar para todos los parámetros analizados, para cada banda de octava, para cada una de las dos posiciones de fuente y, tanto para los valores medidos, como para los simulados. Se observa que los valores de las desviaciones correspondientes a las

**Tabla 2.** Dispersión de los valores de los diferentes parámetros, medidos y simulados, para cada una de las dos posiciones de la fuente (F1 y F2), para cada banda de octava, valorada mediante la desviación estándar.

Parám.	Fuen.	Medidas <i>in situ</i>						Simulación CATT-Acoustic						
		125	250	500	1000	2000	4000	125	250	500	1000	2000	4000	
T <sub>30</sub> (s)	F1	0,09	0,12	0,19	0,13	0,11	0,09	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	F2	0,11	0,09	0,05	0,06	0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
EDT (s)	F1	0,30	0,07	0,45	0,56	0,58	0,42	0,10	0,06	0,11	0,08	0,11	0,06	0,06
	F2	0,30	0,39	0,32	0,24	0,19	0,20	0,06	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08
T <sub>s</sub> (ms)	F1	15,91	7,57	14,32	23,07	20,23	20,04	17,05	19,81	21,55	21,80	21,47	23,14	
	F2	8,13	32,55	27,03	16,89	20,48	21,26	15,51	19,27	21,35	21,97	22,16	21,82	
D <sub>50</sub>	F1	0,16	0,08	0,07	0,12	0,13	0,14	0,15	0,13	0,11	0,09	0,10	0,11	
	F2	0,09	0,12	0,10	0,08	0,07	0,10	0,09	0,10	0,08	0,07	0,08	0,09	
C <sub>80</sub> (dB)	F1	3,25	1,27	1,70	2,39	2,27	2,57	2,14	2,14	2,11	2,02	2,06	2,20	
	F2	2,00	2,72	1,62	0,67	0,98	1,18	1,25	1,10	1,11	1,10	1,15	1,26	
G (dB)	F1	3,85	3,31	3,98	1,46	3,75	2,10	1,83	1,33	0,98	0,84	0,87	1,21	
	F2	4,55	4,60	2,52	3,06	3,96	3,44	1,75	1,37	1,18	1,11	1,17	1,25	

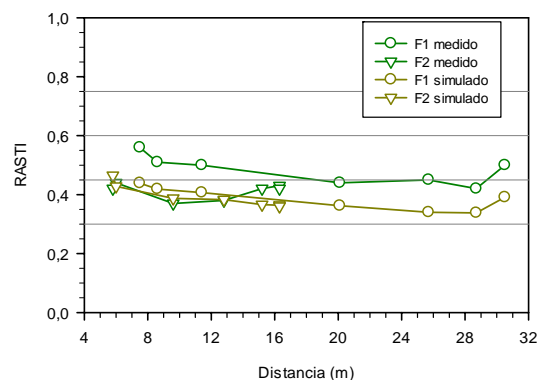
simulaciones son del mismo orden, o menores, que las encontradas en las medidas experimentales. Además, las desviaciones superan, para cada parámetro, frecuencia, fuente, medida *in situ* y simulado, más de un JND, por lo que en diferentes puntos de la pista la sensación percibida será distinta.

En la Figura 5 se evalúa la inteligibilidad del recinto frente a la distancia mediante el índice RASTI para los valores medidos y simulados, en este caso con un ruido de fondo similar al medido *in situ* (NCB=48). La coincidencia entre ambos valores es alta para la fuente F2, con una inteligibilidad que se puede calificar como *pobre*. Para la fuente F1 hay una diferencia de 0,1, con una mayor inteligibilidad para los valores medidos *in situ*, que supone un salto cualitativo en su calificación que llega a ser *acceptable*.

## PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN

Para tratar de paliar las deficiencias acústicas señaladas, se han propuesto y simulado diferentes opciones de intervención con el fin de corregirlas. La primera opción consiste en incorporar baffles acústicos a lo largo de todo el perímetro de la carpa (ver Figura 6(a)). Se han utilizado 120 baffles acústicos (Eurobaffles de la marca Isover), de 1.200x600x50 mm, cuyo coeficiente de absorción acústica, evaluado para la simulación a partir de la absorción unitaria facilitada por el fabricante, se especifica en la Tabla 3. La segunda opción supone añadir a la distribución anterior una doble hilera en el centro de la carpa que supone incorporar 78 baffles adicionales (Figura 6(b)). La tercera propuesta consiste, exclusivamente, en reemplazar el textil usado en los cerramientos más verticales de la cubierta (en verde en la Figura 6 (c)) por un textil acústico absorbente (Batyline HM de Ferrari, que lleva incorporado una capa de 5 cm de lana de roca), cuyo coeficiente de absorción acústica se muestra en la Tabla 3.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento espectral por bandas de octava de los parámetros acústicos estudiados ya citados anteriormente. En ella se comparan los valores simulados para el estado actual con los esperados tras la aplicación de cada una de las tres intervenciones de mejora acústica citadas. Este análisis se ha restringido a la posición de la fuente F2.



**Figura 5.** Valores del índice RASTI medidos y simulados, para las dos posiciones de la fuente, frente a la distancia fuente receptor en el estado inicial.

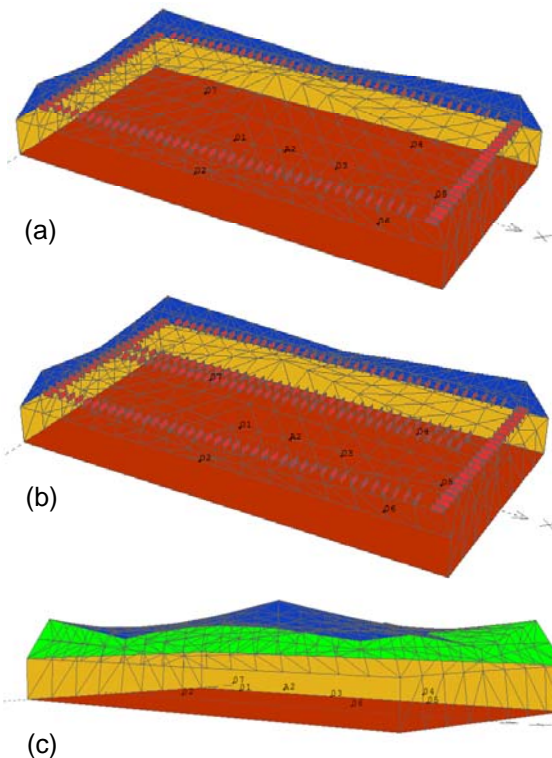
Las dos primeras opciones se pueden implementar sin actuar esencialmente sobre la cubierta actual. Hay que tener en cuenta que en su diseño los arquitectos han incorporado otras exigencias como por ejemplo la transparencia parcial para conseguir un ambiente luminoso adecuado en el interior. Observamos que la primera opción (baffles sólo en el perímetro), consigue reducir el tiempo de reverberación a frecuencias medias y altas (aunque no lo suficiente), pero deja invariante la zona de baja frecuencia. La ampliación del número de baffles y su colocación en el centro del recinto, aumenta notablemente esa eficacia en el mismo rango de frecuencias. Finalmente la tercera opción, respetando esencialmente el comportamiento de la cubierta desde el punto de vista luminoso, al suprimir parte de la superficie de la membrana absorbente de bajas frecuencias y sustituirla por otro textil con comportamiento absorbente de altas frecuencias (Tabla 3), permite obtener una curva tonal más próxima a la recomendada.

Un efecto similar se observa sobre los valores de EDT y  $T_s$  consiguiéndose un comportamiento espectral más suave y uniforme. También los valores de la definición y de la claridad se ven sustancialmente mejorados; alcanzando los mejores valores con la tercera opción: la que actúa directamente sobre parte de la cubierta.

En lo que se refiere al parámetro G, se produce una sucesiva disminución de los valores a frecuencias medias y altas. La opción 3 permite aumentar este valor ligeramente para la banda de 125 Hz. En todo caso, incluso en esta situación los valores de G son bastante altos y su comportamiento con la frecuencia más suave.

Aunque no se incluyen en las gráficas los valores de la desviación estándar para valorar la dispersión espacial, se ha observado que ésta no se modifica sustancialmente con las intervenciones planteadas. A modo de ejemplo en la Tabla 4, se muestran los valores de dichas desviaciones, para cada banda de octava, correspondientes al parámetro EDT.

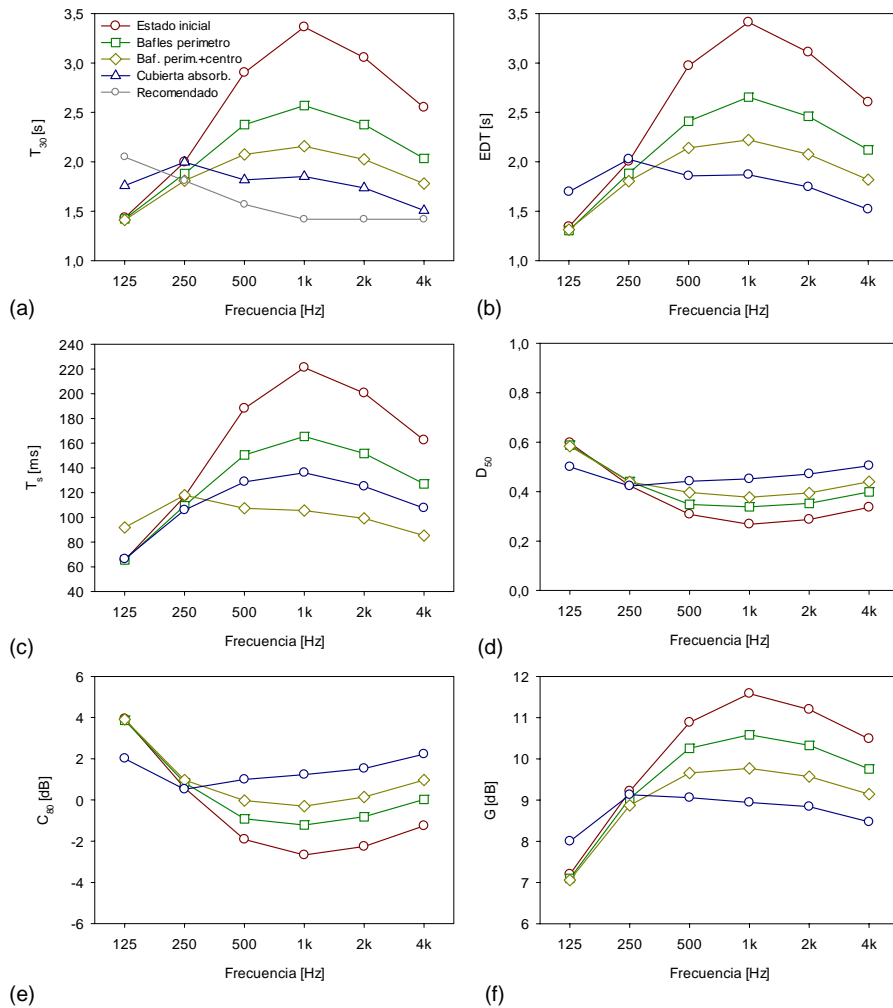
Con objeto de caracterizar globalmente el campo acústico del recinto en la Tabla 5 se muestran los valores promediados en frecuencia, de acuerdo con [9], y espacialmente, obtenidos para los parámetros acústicos estudiados en la situación real y las diferentes simulaciones.



**Figura 6.** Modelos con las mejoras propuestas: (a) ubicación de baffles en el perímetro, (b) en el perímetro y en el centro y (c) modificación parcial de la cubierta (en verde).

**Tabla 3.** Coeficientes de absorción acústica de los materiales utilizados en las diferentes intervenciones.

Material	125	250	500	1000	2000	4000
Eurobaffles Isover	0,21	0,27	0,66	0,83	0,83	0,83
Batyline HM	0,10	0,30	0,76	0,98	0,98	0,98



**Figura 7.** Comportamiento espectral simulado de los parámetros acústicos: (a) tiempo de reverberación, (b) tiempo de reverberación inicial, (c) tiempo central, (d) definición, (e) claridad y (f) fuerza sonora, para el estado actual y las diferentes propuestas de intervención.

Los resultados de los diferentes parámetros ponen de manifiesto por un lado de nuevo la validez de la simulación realizada con el proceso de calibración descrito y por otro cómo la intervención de actuación sobre parte de la membrana de la cubierta es la que supondría la mejor adecuación acústica del recinto.

### CONCLUSIONES

Se presenta el estudio acústico de una pista polideportiva del Centro Especializado de Alto Rendimiento de Remo y Piragüismo de Sevilla. Las medidas realizadas in situ han puesto de manifiesto que su comportamiento acústico es típico de espacios cubiertos con estructuras textiles tensionadas: con valores de  $T$  muy pequeños a bajas frecuencias y excesivamente altos a medias y altas, resultando acústicamente no adecuado para los usos a los que se destina.

Estas medidas han permitido la calibración de un modelo 3D para la simulación del campo acústico interior y comparar los resultados de la

**Tabla 4.** Dispersión de los valores del EDT simulado en el estado inicial y con las diferentes propuestas, para la posición de fuente F2, para cada banda de octava, valorada mediante la desviación estándar.

<i>Simulación</i>	125	250	500	1000	2000	4000
Estado inicial	0,06	0,09	0,08	0,08	0,09	0,08
Propuesta 1	0,09	0,09	0,08	0,07	0,05	0,06
Propuesta 2	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08
Propuesta 3	0,09	0,07	0,11	0,10	0,08	0,08

**Tabla 5.** Valores de los parámetros acústicos promediados espacial y espectralmente, obtenidos con la fuente ubicada en la posición F2.

<i>Simulación</i>	<i>Medido inicial</i>	<i>Intervalo deseado</i>	<i>Simulado inicial</i>	<i>Simulado propuesta-1</i>	<i>Simulado propuesta-2</i>	<i>Simulado propuesta-3</i>
T <sub>30</sub> [s]	3,37	1,50 – 1,80	3,13	2,47	2,12	1,84
EDT [s]	3,21	1,50 – 1,80	3,19	2,53	2,18	1,86
T <sub>s</sub> [ms]	194,79	≤ 120	204,67	158,03	132,42	106,46
D <sub>50</sub>	0,35	≥ 0,40	0,29	0,34	0,39	0,45
C <sub>80</sub> [dB]	-1,19	≥ 0	-2,29	-1,06	-0,16	1,11
G [dB]	12,22	≥ 5	11,24	10,42	9,71	9,00
STI	0,48	≥ 0,45	0,46	0,49	0,52	0,54

misma con los valores de los parámetros medidos in situ. Este modelo, convenientemente modificado, se ha utilizado para valorar la eficacia de tres posibles intervenciones con el fin de mejorar el pobre comportamiento acústico que presenta.

El estudio ha puesto de manifiesto que la consideración del acondicionamiento acústico en la fase de diseño, (pues se propone aquí como corrección óptima la modificación parcial de la cubierta) siempre es la más eficaz (y probablemente la más económica, aunque este aspecto no se ha valorado) que cualquier intervención a posteriori, que además puede presentar el inconveniente de adulterar otras prestaciones funcionales del espacio.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración de los arquitectos responsables del proyecto.

#### REFERENCIAS

- [1] D. J. Croome, "Acoustic design for flexible membrane structures". Appl. Acoust. 18, 399-433, (1985).
- [2] Z. Sü, S. Yilmazer, "The acoustical performance analysis of Bilkent Amphitheater: Proposal for acoustical renovation". Architect. Science Rev., 49(2), 167-178, (2006).
- [3] María Blanes Company, Begoña Francés Gisbert, "Textiles para aislamiento y acondicionamiento acústico". Noticias CAAT Valencia, Enero, 10-13, (2008).
- [4] J. Kang, H. V. Fuchs, "Predicting the absorption of open weave textiles and micro-perforated membranes backed by an air space". J. Sound Vib. 220(5), 905-920, (2010).
- [5] T. Zamarreño, J. Algaba, F. Maya, J. E. Ballesteros, "Acústica de estructuras textiles tensionadas". TecniAcústica 1993 Valladolid, Actas del Congreso, 263-266, (1993).
- [6] F. Maya, "Comportamiento acústico de espacios cubiertos con estructuras textiles". Tesis Doctoral, Universidad de Sevilla, (2000).
- [7] CEAR <http://www.andalucia.org/turismo-y-deporte/sevilla/centro-especializado-de-alto-rendimiento-de-remo-y-piraguismo/> (visitada el 20 de julio de 2011).
- [8] <http://www.performance-starbooks.com/> (visitada el 20 de julio de 2011).
- [9] UNE-EN-ISO 3382-1:2010, "Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1 salas de espectáculos".
- [10] WinMLS2004, Reference documentation, Morset Sound Development.
- [11] CATT-Acoustic v8h, user's manual. *Room acoustics prediction and walkthrough auralization*. CATT, Gothenburg, Sweden (2008).
- [12] M. Galindo, T. Zamarreño, S. Girón, "Acoustic simulations of Mudejar-Gothic churches". J. Acoust. Soc. Am. 126, 1207-1218, (2009).