

## **ANÁLISIS DE LA DISCREPANCIA ENTRE LAS MEDIDAS IN-SITU Y EL ESTUDIO POR SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE UN RECINTO SINGULAR**

PACS: 43.55.Gx

Capablo Lacambra, Jorge, Martínez Gómez, Francisco Javier; Monzón Chavarriás, Marta  
Grupo de Vibroacústica de la Universidad de Zaragoza  
C/ María de Luna s/n, Campus Universitario Río Ebro, Edificio Betancourt,  
50018 Zaragoza  
Tel: 976 762 162. Fax: 976 762 189  
E-Mail: [jorge@grupovac.org](mailto:jorge@grupovac.org); [fjmargo@unizar.es](mailto:fjmargo@unizar.es); [marta@grupovac.org](mailto:marta@grupovac.org)

### **ABSTRACT**

Software for calculation and simulation of the acoustic characteristics of singular spaces can help to develop projects and predict and solve the main problems concerning the acoustic performance of in these spaces. Nevertheless, the designer has to take into account the uncertainty associated to the results because of multiple factors.

In this publication, we compare the results obtained with the Odeon Room Acoustics simulation software with in-situ reverberation time measurements and room criteria for an auditorium.

### **RESUMEN**

Los programas de cálculo y simulación de las características acústicas para recintos singulares pueden ayudar a desarrollar proyectos y anticiparse a los principales problemas que pueden originarse en estos espacios. Sin embargo, existe cierta incertidumbre en los resultados obtenidos achacables a múltiples factores.

En esta publicación, se trata de analizar la diferencia entre los resultados obtenidos con la simulación con el programa Odeon Room Acoustics y medidas in-situ del tiempo de reverberación y de los criterios de sala de un auditorio.

## INTRODUCCIÓN

La aparición de programas informáticos de simulación acústica para recintos facilitan notablemente el trabajo del diseñador en lo referente al cálculo predictivo de los parámetros de recintos permitiéndole, esta capacidad de predicción al diseñador, conocer de forma anticipada un aproximación más o menos ajustada al comportamiento acústico real del recinto objeto de estudio

No obstante, estos programas deben, obviamente, utilizarse teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos por todo software de predicción y que en el caso que nos ocupa se deberá fundamentalmente a dos causas:

- a) Las hipótesis de cálculo sobre las que se basa el programa
- b) Las diferencias entre los valores teóricos y reales de los coeficientes de absorción de los elementos constructivos del recinto.

En relación a este último aspecto es importante señalar las discrepancias asociadas a otro tipo de factores inherentes a la ejecución de algunos acabados y elementos constructivos que pueden llegar a ocasionar importantes diferencias entre los resultados predichos y los reales.

En la presente comunicación se plantea un estudio preliminar de estos últimos factores en un auditorio destinado principalmente a conferencias (imagen 1) que tiene un aforo de 360 personas. Este estudio preliminar se desarrolla mediante el análisis del tiempo de reverberación calculado y medido in situ del recinto.



*Imagen 1. Vista panorámica del salón de actos objeto de estudio*

## MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN ACÚSTICA INICIAL DEL SALÓN DE ACTOS

El preproceso de los datos espaciales se realizó en AutoCad, importando posteriormente el modelo espacial del recinto al programa de simulación acústica Odeon Room Acoustics (imagen 2).

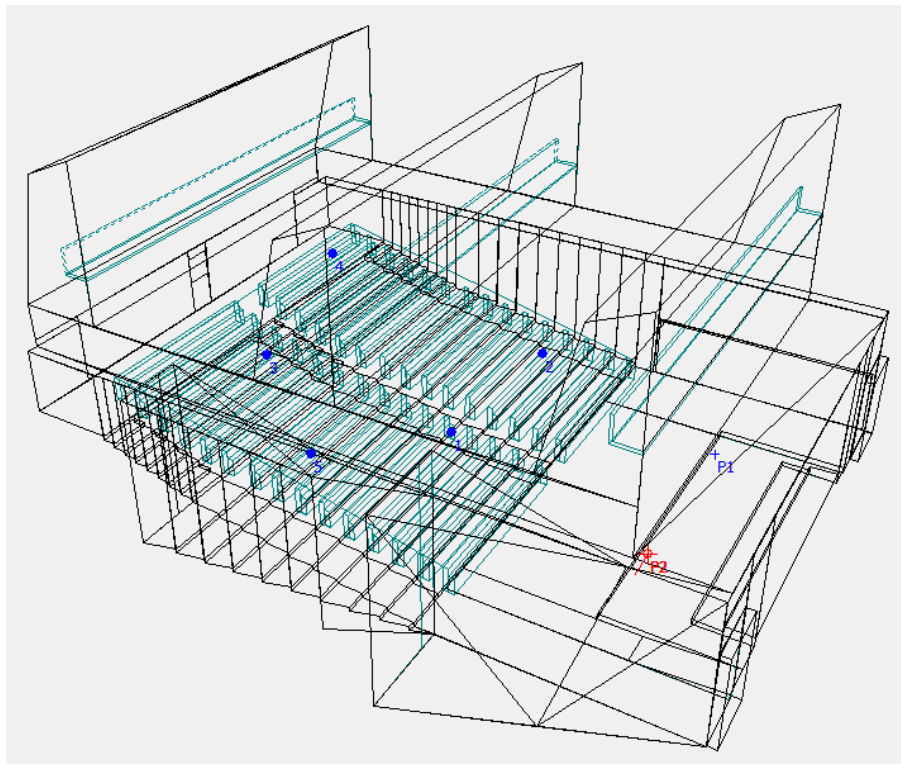


Imagen 2. Modelo en 3D del auditorio importado al programa Odeon Room Acoustics.

Los principales elementos constructivos y materiales de acabado de proyecto utilizados en la primera modelización del auditorio con sus respectivos coeficientes de absorción sonora en bandas de octava se muestran en la tabla 1.

Material	Coeficiente de absorción ( $\alpha_s$ )					
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
Madera contrachapada sobre listones fijos	0,3	0,3	0,2	0,15	0,13	0,1
Ventana doble, cristal de 2-3 mm, hueco de 10 mm	0,1	0,1	0,07	0,05	0,03	0,02
Podio hueco de madera	0,4	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15
Linóleo sobre suelo de madera	0,15	0,15	0,12	0,11	0,1	0,07
Bloques sólidos de cristal	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Hoja de cristal simple	0,08	0,08	0,04	0,03	0,03	0,02
Placa de yeso de 13 mm con 100 mm de cavidad	0,08	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02
Madera contrachapada de 1 cm de espesor	0,28	0,28	0,22	0,17	0,09	0,1
Techo perforado	0,45	0,45	0,7	0,9	0,55	0,5
Butacas	0,44	0,44	0,6	0,77	0,89	0,82

Tabla 1. Coeficiente de absorción de los principales revestimientos y elementos constructivos

Los valores del tiempo de reverberación que nos ofrece el programa de simulación se muestran en la tabla 2. Estos, corresponden al valor promedio de los tiempos de reverberación obtenidos en las dos simulaciones realizadas, una para cada posición de fuente.

Posición	Tiempo de reverberación (s)					
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	0,8	0,94	0,95	1,36	1,74	1,53
2	0,61	1,24	1,19	1,72	1,89	1,34
3	0,96	0,85	1,01	1,35	1,63	1,42
4	0,75	0,88	0,96	1,02	1,17	1,26
5	0,86	1,26	1,1	1,27	1,46	1,36
Promedio	0,8	1,05	1,05	1,35	1,58	1,38

*Tabla 2. Valores del tiempo de reverberación calculados con el programa informático.*

### MEDIDAS IN-SITU DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

Las medidas del tiempo de reverberación del recinto fueron realizadas según indica la parte 1 de la norma UNE-EN 3382 (Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos).

Para llevar a cabo estas medidas se utilizó el método de la señal de ruido interrumpida, lo que supone excitar acústicamente el auditorio con una fuente dodecaédrica omnidireccional y emplear una plataforma de adquisición de datos, en nuestro caso de dos canales, para medir el tiempo de reverberación.

Como se aprecia en la imagen 2, se utilizaron cinco puntos de receptor y dos de fuente, resultando un total de diez posiciones de medida.

Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.

Posición	Tiempo de reverberación (s)					
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	1,27	1,16	1,35	1,54	1,56	1,48
2	1,43	1,26	1,32	1,55	1,64	1,63
3	1,1	1,24	1,29	1,5	1,55	1,51
4	1,34	1,19	1,34	1,5	1,6	1,55
5	1,44	1,25	1,32	1,52	1,56	1,49
Promedio	1,34	1,22	1,32	1,52	1,58	1,54

*Tabla 3. Valores del tiempo de reverberación obtenido en las medidas in-situ.*

La diferencia entre los valores obtenidos en las medidas in-situ y en la simulación inicial del auditorio, en bandas de octava, se muestra en la tabla 4.

Frecuencia (Hz)	Variación (%)
63	40,3
125	13,9
250	20,5
500	11,2
1000	0
2000	10,4

*Tabla 4. Variación porcentual de los valores de TR medido y calculado inicialmente.*

Tomaremos como criterio inicial aproximativo que, para este tipo de recintos, las variaciones entre las medidas in-situ y la simulación del tiempo de reverberación en torno al 10 % se

atribuyen a factores de carácter constructivo y/o variaciones en los acabados, así como, al error intrínseco al método de cálculo del software.

En la tabla 4, puede apreciarse sin embargo, que en las bandas de octava de 63 y 250 Hz esta diferencia es notablemente superior, por lo que, en una segunda fase se procedió al ajuste del modelo, tomando en consideración que las características acústicas de proyecto de los materiales y sistemas utilizadas para la simulación inicial difiere de las correspondientes a los materiales y sistemas reales instalados.

## AJUSTE DEL MODELO

Como se menciona anteriormente, las bandas de frecuencia que presentan una mayor desviación de los tiempos de reverberación obtenidos en la simulación respecto de los medidos in-situ son las de 63 y 250 Hz. Por este motivo, y para acotar el procedimiento de ajuste, se determinan los materiales que mayor influencia tienen en dichas bandas.

En el gráfico 1, se puede apreciar que estos materiales son los correspondientes al techo perforado, las butacas así como el sistema de tarima (madera sobre listones fijos).

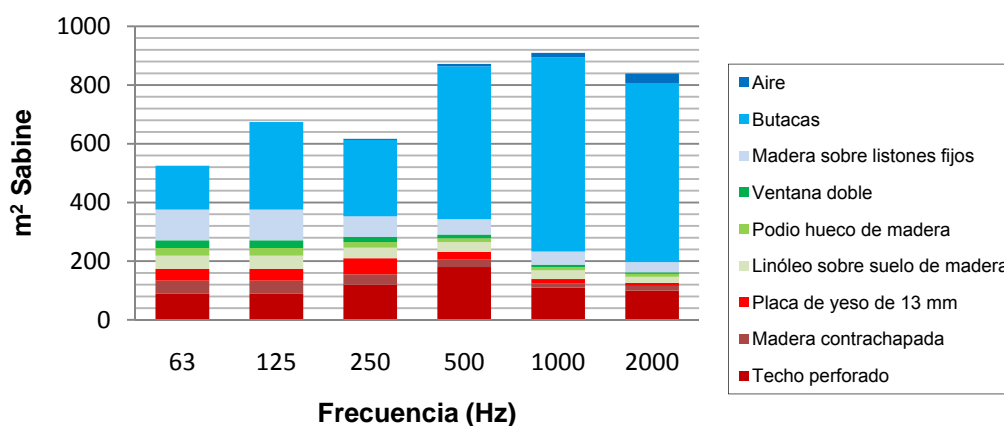


Gráfico 1. Área de absorción sonora equivalente en bandas de frecuencia.

## SIMULACIÓN ACÚSTICA AJUSTADA DEL SALÓN DE ACTOS

Revisando y modificando los datos de los coeficientes de absorción de los materiales reales instalados correspondientes a las zonas más sensibles, respecto a los valores de proyecto, se obtuvieron en la simulación ajustada del recinto los tiempos de reverberación mostrados en la tabla 5.

Posición	Tiempo de reverberación (s)					
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
1	1,08	0,96	1,05	1,36	1,74	1,53
2	1,02	1,2	0,96	1,72	1,89	1,34
3	1,29	0,9	1,11	1,35	1,63	1,42
4	1,03	0,92	1,04	1,02	1,17	1,26
5	1,44	1,27	1,48	1,27	1,46	1,36
Promedio	1,17	1,05	1,12	1,34	1,58	1,38

Tabla 5. Valores del tiempo de reverberación obtenidos en la simulación realizada con valores modificadosl.

En la tabla 6 aparecen reflejadas las variaciones porcentuales entre el tiempo de reverberación medido in-situ y el obtenido en la simulación definitiva. Dicha variación se sitúa de manera razonable, a nuestro entender, en torno al 10 %, en la totalidad del espectro analizado por lo que según el criterio adoptado, pueden atribuirse parte de estas diferencias a distintos factores que van a ser enumerados en el siguiente apartado.

Frecuencia (Hz)	Variación (%)
63	12,6
125	13,9
250	15,5
500	10,5
1000	0
2000	10,4

Tabla 6. Variación porcentual de los valores de TR medido y de la simulación final.

Otros parámetros relacionados con el acondicionamiento acústico obtenidos tanto en la simulación final ajustada como en las medidas in-situ pueden apreciarse en la tabla 7. En ella aparecen los valores promedio de todas las posiciones en las que se tomaron medidas.

Parámetro		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz
EDT (s)	Simulación	1,03	1,4	1,13	1,13	1,17	1,19
	In-situ	0,92	1,21	1,43	1,48	1,3	1,35
C <sub>80</sub> (dB)	Simulación	4,1	0,6	-0,4	0,2	-1	-2,3
	In-situ	4,03	1,05	-0,28	0,24	-0,88	-1,56
D <sub>50</sub> (%)	Simulación	0,57	0,41	0,33	0,34	0,3	0,27
	In-situ	0,54	0,42	0,38	0,42	0,33	0,36

Tabla 7. Comparativa de los criterios de sala calculados por simulación y medidos in-situ.

## ANÁLISIS DE LOS FACTORES Y DETALLES CONSTRUCTIVOS QUE INFLUYEN EN EL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

A pesar de llevar a cabo una modelización razonablemente precisa en lo que concierne a geometría del recinto y a las características acústicas de sistemas y materiales, parece acertado concluir que un porcentaje indeterminado de las divergencias obtenidas pueden ser atribuidos a variaciones proyecto/ejecución de carácter constructivo.

En nuestro recinto podemos diferenciar cuatro tipologías diferenciadas de variaciones proyecto/ejecución:

1.- Elementos decorativos o de instalaciones no modelizados, tales como los que aparecen en las imágenes 3 y 4, y que pueden absorber el sonido en mayor o menor medida.



Imágenes 3 y 4. BIE y pantalla principal del salón de actos.

2.- Elementos de gran superficie respecto a su espesor instalados de forma modular susceptibles de producir efecto membrana. A determinadas frecuencias de excitación, dependiendo del volumen de aire existente tras dicho elemento, de la modularidad y de la densidad superficial del material, pueden entrar en resonancia y absorber parte de la energía sonora incidente. Por lo tanto, como el programa de simulación únicamente tiene en cuenta la naturaleza material del revestimiento, o en caso de tener en cuenta dicho efecto puede variar la modularidad o el volumen de aire respecto del patrón tomado, existirá un error achacable a este factor.

Acabados superficiales en los que puede aparecer este fenómeno son las láminas de madera que recubren las paredes (imagen 5), los cristales de las ventanas (imagen 6), las placas de yeso laminado instalados en el techo (imagen 7) y el contrachapado del suelo y de la tarima (imágenes 8 y 9).



*Imágenes 5, 6 y 7. Elementos constructivos en los que puede producirse efecto membrana.*



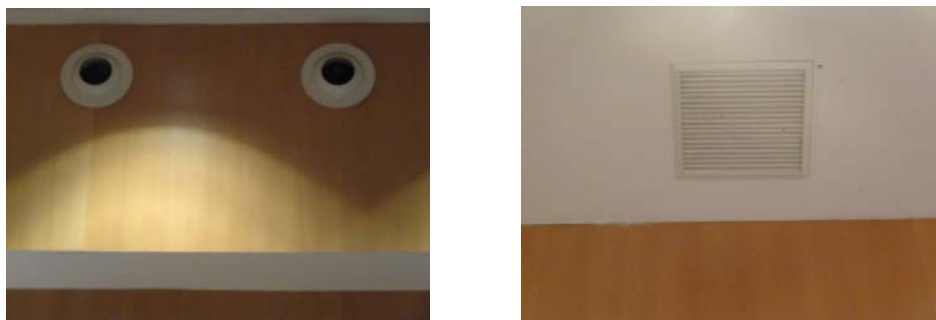
*Imágenes 8 y 9. Contrachapado del suelo y de la tarima.*

3.- Elementos no caracterizados acústicamente en proyecto, o cuyos datos no han podido ser conseguidos, tales como las butacas (imagen 10) o las puertas cortafuegos (imagen 11). Especial importancia tiene el caso de las butacas en este tipo de recintos dada la influencia que tiene el área de absorción sonora equivalente de las mismas sobre el recinto globalmente considerado.



*Imágenes 10 y 11. Butacas y puertas cortafuegos del salón de actos.*

4.- Aberturas en los cerramientos por los que puede transmitirse el sonido al exterior. Suele ser común en este tipo de recintos aberturas para los conductos de ventilación y refrigeración (imágenes 12 y 13).



*Imágenes 12 y 13. Aberturas en los revestimientos del salón de actos.*

En cualquier caso la determinación experimental de las características acústicas de todos los elementos mencionados excedía al alcance del estudio preliminar.

Conviene precisar que el presente estudio tiene carácter preliminar, siendo una primera fase de un estudio más ambicioso que abarcará otros recintos, así como el análisis de la sensibilidad frente a los aspectos considerados de diversos parámetros acústicos de sala.

## **CONCLUSIONES**

Con lo expuesto en esta publicación se ha pretendido, a partir de un estudio preliminar, evaluar las posibles causas de las desviaciones entre los resultados obtenidos mediante un software de predicción y los valores del tiempo de reverberación medidos in-situ.

A partir del análisis realizado para un recinto concreto, podemos llegar a la conclusión de que, tal y como cabía prever, existen, además de las incertidumbres asociadas al método de cálculo, una serie de factores y condicionantes relativos a la ejecución de los acabados del recinto y a su geometría que pueden originar variaciones significativas entre los valores proyectados y los reales.

Los valores de las características acústicas de materiales y sistemas utilizados en los proyectos, deberían ser objeto de una atención más detallada y documentada.

Para concluir, decir que las discrepancias entre los aspectos constructivos proyectados y los ejecutados, así como los cambios de materiales y sistemas respecto de los prescritos en proyecto, pueden ocasionar importantes variaciones de las prestaciones acústicas finales en recintos en los que la calidad acústica influye de manera determinante sobre la funcionalidad del espacio.

## **REFERENCIAS**

- Arau, Higinio. ABC DE LA ACÚSTICA ARQUITECTÓNICA. Ediciones Ceac, Barcelona, 1999.
- Recuero López, Manuel. ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO. Paraninfo S. A. Madrid, 2001.
- Aenor. UNE-EN 3382 MEDICIÓN DE PARÁMETROS ACÚSTICOS EN RECINTOS. PARTE 1: SALAS DE ESPECTÁCULOS.
- ODEON ROOM ACOUSTICS VERSION 10 USER MANUAL.