

ESTUDIO ACÚSTICO DEL AUDITORIO NACIONAL DE MÚSICA DE MADRID: COMPARATIVA ENTRE SIMULACIÓN Y MEDICIONES

PACS: 43.55.Gx

Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J. I.
Deptº de Física Aplicada – ETS de Arquitectura de Valladolid (España)
E-mail: gvallejortega@yahoo.es; jignacio@arq.uva.es

ABSTRACT

This work presents the most excellent conclusions of the acoustic study made in Auditorio Nacional de Música, placed in the city of Madrid (Spain). This auditorium was built by the Spanish Architect José María García de Paredes in 1988. The acoustic consultant was Lothar Cremer. The work is developed in two parts: • Explanation of the acoustic simulation results: sound rays trajectories from the source to the receivers are analyzed and acoustic parameters have been evaluated. • Measurements results: acoustic measurements have been made and the results will be compared with the acoustic simulation.

RESUMEN

Este trabajo presenta las conclusiones más relevantes del estudio acústico realizado en el Auditorio Nacional de Música de Madrid (España). Esta obra fue construida por el arquitecto español José María García de Paredes en 1988, siendo el consultor Lothar Cremer su asesor acústico. El trabajo se desarrolla en dos partes: • Exposición de los resultados de la simulación acústica de la sala por ordenador utilizando el programa CATT Acoustic, que abarca un análisis geométrico de las trayectorias de los rayos sonoros fuente-receptor y una evaluación de los parámetros que definen su calidad acústica. • Exposición de los resultados de las mediciones acústicas realizadas en la sala, que serán comparados con los de la correspondiente simulación.

1. AUDITORIO NACIONAL DE MÚSICA

1.1 El arquitecto

José María García de Paredes nació en Sevilla en 1924 y murió en Madrid en 1990. Arquitecto por la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid (1950). Dentro de su producción, los auditorios constituyen un cuerpo propio de singular importancia; junto con el Auditorio Nacional de Música, proyectó y construyó más de una docena de grandes auditorios, destacando el Auditorio Manuel de Falla (Granada, 1978) y el Palau de la Música (Valencia, 1987).

1.2 La construcción

En 1982 el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte encargó a García de Paredes el proyecto para la construcción del Auditorio Nacional. El emplazamiento elegido fue un solar rectangular de 120m x 50m de ancho situado en la calle Príncipe de Vergara. La construcción dio comienzo en 1984, inaugurándose en 1988. En su interior el Auditorio Nacional alberga un amplio programa de instalaciones, destacando la sala sinfónica (2324 localidades), que será objeto de nuestro estudio, y la sala de música de cámara (692 localidades). Actualmente el edificio ejerce de sede de la Orquesta y el Coro Nacional.

2. ESTUDIO ACÚSTICO DEL AUDITORIO

2.1 Descripción general de la sala: dimensionado y aforo

La sala sinfónica del Auditorio Nacional tiene una capacidad de 2324 plazas. Su volumen es de unos 22.000m³, derivándose un volumen por persona de 9,5m³. Su geometría puede ser inscrita en un rectángulo de 62 x 36m de anchura, si bien con unas dimensiones que crecen orgánicamente hacia arriba, como muestran los planos de la figura 1.

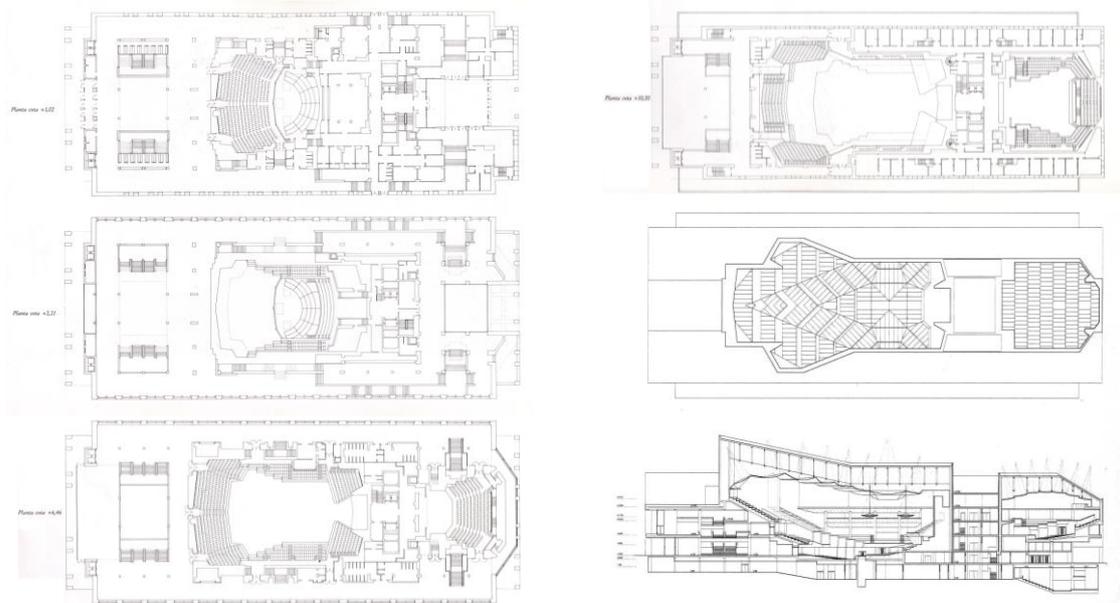


Figura 1.- Planos del Auditorio Nacional: cotas 1.02, 2.21 y 6.46; cota 10.20, techo y sección longitudinal

La figura 2 muestra el interior de la sala. La organización del espacio responde a un cuidadoso reparto del público en las distintas zonas de audiencia:



Figura 2.- Interior de la sala sinfónica del Auditorio Nacional

2.2 El asesoramiento en la fase de proyecto: Lothar Cremer

El Auditorio Nacional contó en la fase de proyecto con el asesoramiento acústico de Lothar Cremer y Thomas Fütterer, el ingeniero colaborador de Cremer. Desde el estudio de Cremer se enviaron cuatro informes entre 1982 y 1988, que son actualmente material inédito y recogen procedimientos de trabajo, propuestas de modificaciones a realizar por el arquitecto, así como cálculos de parámetros acústicos¹. El procedimiento de trabajo se traduce en:

- Estudio del comportamiento acústico de la sala con maqueta óptica
- Estudio gráfico de las reflexiones tempranas
- Cálculo previo del tiempo de reverberación

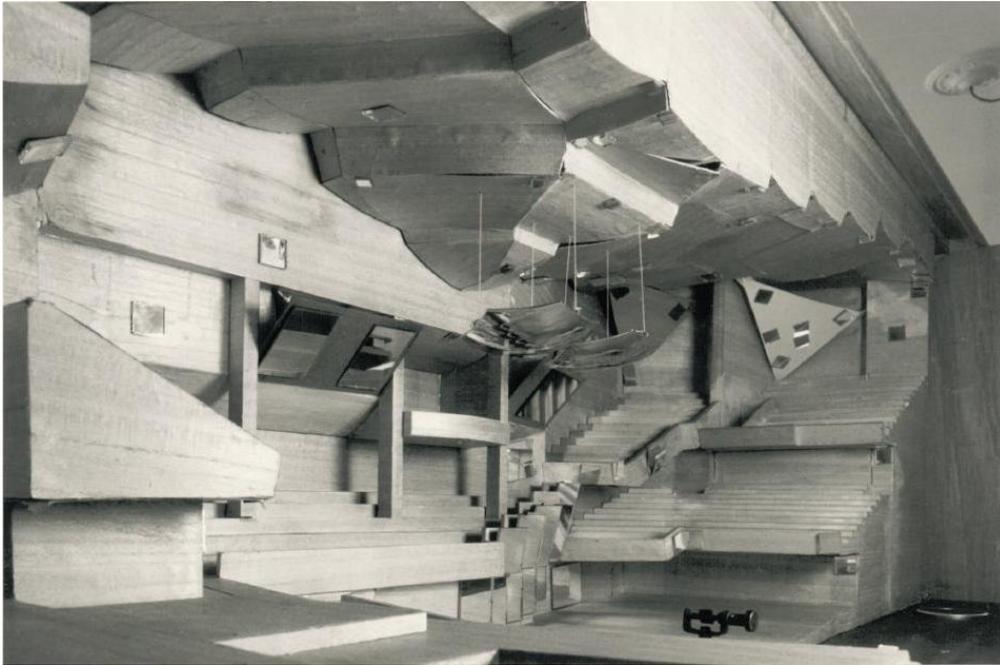


Figura 3.- Maqueta para test óptico: perspectiva desde la parte superior del escenario

En el estudio de Cremer trabajaban generalmente con maquetas de escala 1:50 con las que se realizaba un test óptico (figura 3). Este test usa el atributo de que el sonido a altas frecuencias es reflejado en las superficies de la misma manera que la luz en los espejos. Con un equipo láser colocado fuera de la maqueta se mandaba un rayo de luz a un pequeño espejo situado en el escenario. Con este espejo rotatorio el rayo de luz se dirigía a todas las superficies interiores de interés. Desde allí, era reflejada por pequeños espejos fijados a cualquier otra parte de la sala. Estos puntos de reflexión dan información de a qué lugares es reflejado el sonido proveniente de cierta superficie, pudiendo mostrarse cómo cambiando la inclinación de una superficie se podían conseguir las reflexiones necesarias en los lugares previstos y medir el tiempo de retardo.

Los test comenzaron en 1983, sugiriéndose a partir de sus resultados los siguientes cambios:

- Posición de los reflectores sobre el escenario para reforzar el sonido en esa zona y evitar ecos desde el techo.
- Evitar las paredes paralelas en el escenario para impedir la existencia de ecos flotantes
- Inclinación de las balaustradas de los anfiteatros, las galerías laterales y los balcones detrás de la orquesta para dar reflexiones a la audiencia del patio de butacas, como ya hizo Cremer en la Philharmonie de Berlín 25 años antes.
- Curvatura de los paneles del techo de las galerías laterales y de los balcones detrás de la orquesta para dar reflexiones al público de esas zonas.
- Colocación de paneles triangulares en los balcones laterales que flanquean el segundo anfiteatro para dar reflexiones a la audiencia de esas áreas.
- Colocación de material difusor en las paredes traseras del patio de butacas, del primer anfiteatro y de los asientos del coro para evitar ecos en zonas lejanas.

2.3 Modelización y materiales

Para la simulación se ha construido un modelo acústico (figura 4) partiendo de un dibujo de la sala en tres dimensiones, que nos caracteriza su geometría, usando el programa AUTOCAD y operando seguidamente con el programa CATT Acoustic. Se han obtenido un total de 1518 caras 3D y un 0% de rayos escapados, lográndose así un cierre completo del recinto.

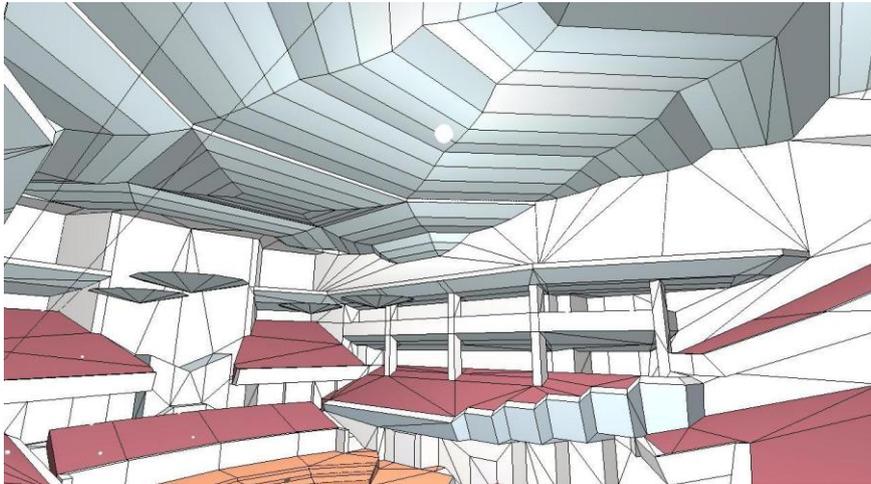


Figura 4. - Modelización de la sala donde se ha seccionado el complejo techo

El software marca la realización de algunas adaptaciones para el proceso de simulación:

- Los trazos curvos de la **sección del techo** y de la planta circular de las lámparas se descompusieron en trazos rectos, ya que el programa no admite líneas curvas.
- El **público** ha sido modelizado por **cajas** de 80cm de altura. Se han incluido como cajas de público algunas escaleras que separaban una zona de audiencia de una pared o dos zonas de audiencia. Así, el área de audiencia ocupa una superficie de 1552m².

La elección de los materiales obedeció a la búsqueda de un equilibrio con el fin de conseguir un tiempo de reverberación adecuado. La finalidad de este auditorio es para música sinfónica, aunque también para música de cámara o recitales. Aunque no tenemos constancia de cuál fue el tiempo de reverberación buscado, dado que en el Auditorio Manuel de Falla de Granada fue de 1,85 s, se puede pensar aquí en 2 s para las frecuencias medias. Por la experiencia aportada en un gran número de simulaciones en esta sala y por la complejidad derivada de su geometría y de su gran volumen, se ha decidido dar a los materiales reflectantes una **difusión por defecto del 18%** para todas las bandas de frecuencia. La Tabla 1 muestra los materiales con su absorción y difusión en las bandas de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz²³⁴:

MATERIALES	ABSORCIÓN	DIFUSIÓN
Ladrillo macizo enfoscado para columnas, paredes y antepechos de los balcones	2 2 3 4 5 5	18 18 18 18 18 18
Acabado enfoscado con cámara de aire para los antepechos de las tribunas laterales	20 15 10 8 4 2	18 18 18 18 18 18
Linóleo para el suelo de la galería de la segunda planta	2 3 3 3 3 3	18 18 18 18 18 18
Zona de público (entre paréntesis absorción de las sillas no ocupadas)	34 67 84 86 86 74 (19 42 59 67 67 55)	30 40 50 60 70 70
Escenario con músicos 0,72 personas/m ²	10 21 41 65 75 71	30 40 50 60 70 70
Madera pegada para el suelo del escenario (sin músicos), pasillos y apoyabrazos de antepechos	4 4 7 6 6 7	18 18 18 18 18 18
Madera pegada difusora para todas las escaleras	4 4 7 6 6 7	50 50 50 50 50 50
Madera con cámara de aire para los paneles de los techos	19 14 9 6 6 5	18 18 18 18 18 18
Madera con cámara de aire difusora para el órgano y las lámparas	19 14 9 6 6 5	30 40 50 60 70 70
Madera sobre soporte metálico para las puertas de acceso del público	2 3 3 4 2 3	18 18 18 18 18 18
Hierro para las puertas del escenario	2 3 3 4 2 3	18 18 18 18 18 18

Tabla 1.- Materiales con su absorción y difusión en las bandas de octava

2.4 Simulación acústica

Supondremos una fuente omnidireccional A0 centrada en el ancho del escenario, a 5m del borde y 1,5m de altura sobre el mismo, que emite un nivel de presión sonora de 90 dB a 1m de distancia en todas las bandas de octava (125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz y 4 kHz). Se han colocado 52 receptores a un lado del plano de simetría xz, distribuidos en el patio de butacas, primer nivel (primer anfiteatro, tribuna lateral y tribuna detrás del escenario), segundo nivel (segundo anfiteatro, segundo anfiteatro lateral y galería lateral) y bancos del coro, como se muestra en la figura 5. Los cálculos se han realizado en sala ocupada, salvo indicación.

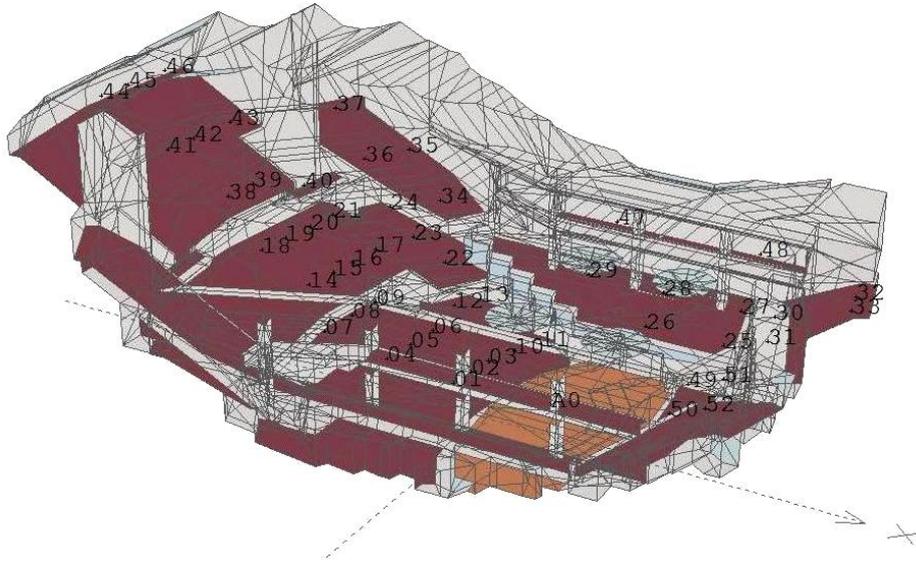


Figura 5.- Posición de fuente y receptores en el área de audiencia

Los datos proporcionados por la simulación los clasificaremos en dos apartados:

- Análisis geométrico: trayectorias de rayos sonoros fuente-receptor.
- Resultados de los parámetros acústicos: SPL, G, RT, BR, Br, C₈₀, LF y RASTI

2.4.1 Análisis geométrico: resultados por receptor

Se han analizado las trayectorias de los rayos de emisión desde la fuente a los receptores, considerando las reflexiones de orden menor o igual que tres (ecograma). Se ha estudiado para cada receptor la continuidad de las reflexiones, su procedencia, reparto temporal y secuencia de intensidades, asegurándonos de la no existencia de ecos; se ha examinado cómo cambia el ecograma entre receptor y receptor a lo largo de las direcciones axiales del auditorio. Las conclusiones son:

- El número de reflexiones en las distintas partes de la sala es desigual, siendo la zona más beneficiada el patio de butacas; en menor medida, el segundo anfiteatro capta reflexiones, que contribuyen a aumentar el nivel sonoro de estas localidades, las más alejadas del escenario. En el resto del auditorio, el número de reflexiones es generalmente bajo o desigual.
- Con respecto a la procedencia de las reflexiones, se detecta una gran participación de las paredes y los antepechos en las reflexiones del patio de butacas. El techo de la sala interviene con gran eficacia en los bancos del coro y en la zona central del primer anfiteatro, disminuyendo su eficacia en el resto de las zonas. Los paneles curvos de los techos de las tribunas laterales, tribunas traseras y galerías laterales participan en las reflexiones en esas localidades, cumpliendo allí su cometido.
- Las lámparas tienen una participación discreta en las reflexiones de las zonas próximas: primeras filas del patio de butacas, bancos del coro, tribunas laterales y galerías laterales. Las lámparas no serían suficientes para cubrir todas las reflexiones cenitales al escenario, con lo que habría una gran parte que vendrían directamente del techo. Teniendo en cuenta la altura de éste, habría desfases superiores a 27m entre el sonido directo y el sonido reflejado en el escenario.
- Se detecta un posible eco en el receptor 38 del segundo anfiteatro por la captación de una reflexión de orden 2 procedente de la pared trasera y techo de la tribuna trasera, que es reforzada por tres reflexiones de orden 3 procedentes de las paredes laterales (o columna) y del techo (figura 6).

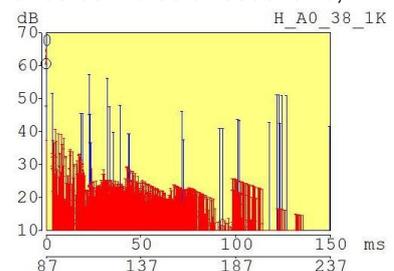


Figura 6.- Ecograma del rec 38

2.4.2 Resultados de los parámetros acústicos

- *Nivel de presión Sonora SPL y Sonoridad G*

Aunque el valor promedio del nivel de presión sonora SPL para los receptores supera los 70 dB en todas las frecuencias, los valores SPL resultan diferentes según la zona del auditorio que tratemos. Así, los valores SPL en algunos asientos del segundo anfiteatro, de los balcones laterales del segundo anfiteatro o bajo un balcón (receptor 24 del primer anfiteatro) tienen valores más bajos en algunas frecuencias, llegando a los 66dB.

El promedio de la sonoridad G en sala vacía para los receptores en las frecuencias medias es $G_{mid} = 3,9 \text{ dB}$, situándose en el margen inferior que recomienda la bibliografía⁵. Teniendo en cuenta las dimensiones de la sala, puede ser considerado un buen resultado.

- *Tiempo de reverberación RT*

La figura 7 muestra tabla y gráficas de los distintos valores del tiempo de reverberación, unos obtenidos mediante su fórmula (Sabine y Eyring), otros calculados a partir de la geometría de la sala con sus superficies de revestimiento, como los del T-15 y T-30.

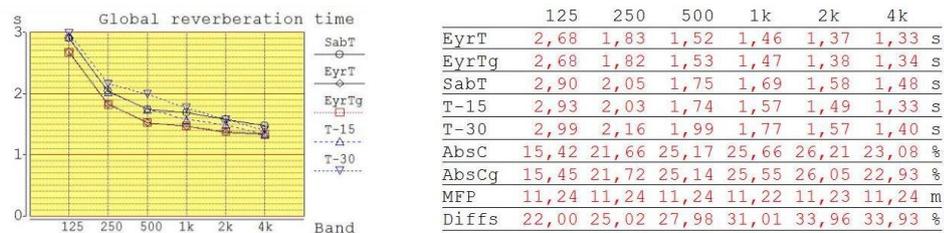


Figura 7.- Tabla y gráficas de los valores calculados del Tiempo de Reverberación

Los resultados muestran una buena correspondencia entre todos los valores calculados del tiempo de reverberación para todas las frecuencias, que se traduce en una similar fluctuación en el paso de una banda de frecuencia a la contigua, lo que se ha conseguido aplicando los mencionados coeficientes de difusión por defecto. Tomando la estimación del descriptor T-30 se obtiene $RT_{mid}=1,88\text{seg}$, valor que estaría en buena sintonía con las pretensiones del arquitecto y del asesor acústico, posibilitando un uso óptimo de la sala para música sinfónica. Cabe destacar el alto valor obtenido en la banda de 125Hz, resultado que se justifica por la baja absorción de las sillas a esa frecuencia. La calidez musical BR y el brillo Br toman los valores $BR = 1,37$, $Br = 0,79$, con lo que la sala daría una alta respuesta en graves y algo baja en agudos.

Se ha realizado además un estudio del tiempo de reverberación en sala vacía, considerando la absorción de las butacas sin público y el escenario sin músicos. Utilizando el descriptor T-30, se obtiene $RT_{mid}=2,29\text{seg}$, apto para los ensayos de orquesta.

- *Claridad musical C_{80}*

El valor promedio de la claridad musical C_{80} para los 52 receptores en las bandas de 500Hz, 1kHz and 2kHz, es $C_{80}(3) = 4,3 \text{ dB}$ (2,0 dB en sala vacía), más elevados de lo recomendado por la bibliografía⁵ para una sala de uso musical, lo que se relaciona con la falta de reflexiones posteriores a 80ms detectadas en los ecogramas de varios receptores.

- *Eficiencia lateral LF*

El valor porcentual medio (sala vacía) de la eficiencia lateral LF en las bandas de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz y 1 kHz es $LF(4) = 19,1$, que estaría en sintonía con lo recomendado⁵. No obstante, cabe destacar la irregularidad de los valores obtenidos en los receptores, a veces muy diferente incluso estando contiguos, como se ha verificado en los ecogramas.

- **RASTI**

El RASTI supera el valor porcentual de 50 en todos los receptores, **siendo el valor medio de 59**. Estos resultados dan a la sala una categoría de “aceptable”, incluso “buena” en cuanto a la inteligibilidad de la palabra. Éste es un dato sorprendente al obtenerse en una sala con un tiempo de reverberación de 1,88 s que se ajusta a recintos destinados a música sinfónica. Así, la sala podría ser usada también para conferencias y congresos, y nos invita a revisar si valores aceptables de RASTI son compatibles con valores elevados del tiempo de reverberación. El valor del RASTI en sala vacía es 52.

2.5 Mediciones acústicas

Durante dos días se llevaron a cabo mediciones en la Sala Sinfónica del Auditorio Nacional, que fueron realizadas en condiciones de sala vacía y escenario sin músicos, aunque éste se encontraba con sillas, atriles y algunos instrumentos de percusión⁶. Para aproximar las condiciones de simulación en sala vacía, los receptores fueron colocados a una altura de 1,2 m en las 52 las posiciones de recepción. La fuente omnidireccional fue colocada a 5 m del borde del escenario centrada en el mismo; el ruido emitido teóricamente era ruido rosa, si bien se midió por bandas de octava el nivel de presión sonora L_{eq} durante 15 seg a 1 m de distancia de la fuente, colocando el sonómetro a 4 m del borde del escenario y centrado en el mismo; pese a realizarse la medición en el interior de la sala, y por tanto en presencia de campo reverberante, se entendió que a 1 m de distancia el campo directo es predominante.

De los parámetros citados en el apartado 2.4.2 fueron medidos: tiempo de reverberación (T-30, T-20 y EDT), C_{80} , G y RASTI. Se obtuvieron valores en cada punto de la sala, calculándose los valores globales como media aritmética de las 52 posiciones; éstos se recogen en la tabla 2:

Bandas de frecuencia/Hz	125	250	500	1000	2000	4000
EDT/s	2,16	2,11	2,03	2,00	1,87	1,46
RT (T-20)/s	2,30	2,14	2,17	2,13	1,98	1,64
RT (T-30)/s	2,33	2,17	2,17	2,15	2,00	1,67
C_{80} /dB	-1,4	-0,4	0,6	1,0	1,4	2,7
G/dB	1,7	3,1	2,5	3,9	2,8	2,1
RASTI/%	50					

Tabla 2.- Valores globales medidos de los parámetros en la sala sinfónica vacía

Análisis de resultados

- **Tiempo de reverberación RT:** cabe destacar la coherencia de los valores medidos de los parámetros que dan cuenta de la reverberación de la sala. Tomando como base el descriptor T-30 se obtienen los valores **$RT_{mid} = 2,16$ s**, $RT_{high} = 1,90$ s, $RT_{low} = 2,25$ s ($RT_{mid} = 2,29$ s, $RT_{high} = 1,84$ s, $RT_{low} = 3,40$ s en la simulación a sala vacía). La correspondencia entre los valores RT simulados y medidos es muy buena en las frecuencias medias y agudas, estando las diferencias sobre 1 jnd (“just noticeable difference”)⁷, siendo muy superior en las agudas, lo que se explica por los valores de absorción de las sillas introducidos en la simulación para las frecuencias graves.
- **Sonoridad G:** el valor promediado en las frecuencias medias es **$G_{mid} = 3,2$ dB**, siendo muy próximos a los obtenidos en la simulación (inferior a 1 jnd), donde se obtuvo $G_{mid} = 3,9$ dB.
- **Claridad musical C_{80} :** el valor global $C_{80}(3)$ medido es en promedio **$C_{80}(3) = 1,0$ dB**. En la simulación a sala vacía el valor obtenido era $C_{80}(3) = 2,0$ dB, lo que muestra una concordancia de resultados muy satisfactoria (1 jnd), siendo muy similar la tendencia de fluctuación de los valores medidos y simulados entre las bandas de octava. Ambos valores $C_{80}(3)$, simulado y medido, se sitúan por encima de lo recomendado por la bibliografía⁵.

- *RASTI*: el promedio medido tiene un valor de 50, mientras que en la simulación a sala vacía su valor es 52. Por tanto, los valores están muy próximos entre sí. El valor mejoraría a sala llena, lo que corrobora lo dicho en la simulación, que la sala podría ser utilizada en congresos y conferencias.
- *Ruido de fondo*: las curvas NC para caracterizar el nivel de ruido de fondo de la sala se obtuvieron con el sistema de aire acondicionado desactivado. La tabla 3 se muestra los valores promedio del nivel de presión sonora medido en 8 posiciones en bandas de octava entre 31,5 Hz y 8 kHz, así como el nivel global ponderado A:

Bandas de freq/Hz	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	dBA
Nivel de presión sonora/dB	51,5	44,1	31,6	24,7	20,4	17,6	13,2	11,8	12,2	24,6

Tabla 3.- Valores del ruido de fondo con el sistema de aire acondicionado desactivado

Sin el sistema de aire acondicionado activado la sala tendría un nivel de ruido de fondo global inferior a 25dBA; los valores por bandas cumplirían el criterio de la curva NC-20.

CONCLUSIONES

1.- El contacto del arquitecto con el asesor acústico Lothar Cremer es fundamental para entender el resultado final del auditorio. Ello se hace especialmente patente en el tratamiento de la acústica geométrica a partir del trabajo con maqueta óptica, en la disposición del público en terrazas y en la inclinación de los antepechos de las mismas.

2.- El análisis de los ecogramas muestra que el número de reflexiones en las distintas partes de la sala es desigual, siendo la zona más beneficiada el patio de butacas merced a las reflexiones provenientes de las paredes y los antepechos. El techo participa en las reflexiones sobre los bancos del coro y la zona central del primer anfiteatro, si bien su eficacia es desigual en el conjunto de la sala. Los paneles de los techos de las tribunas laterales, tribunas traseras y galerías laterales cumplen allí su cometido, mientras que las lámparas participan, si bien discretamente, en reflexiones sobre zonas próximas al escenario. Se detecta un posible eco en el receptor 38 del segundo anfiteatro.

3.- Se ha simulado la sala con el programa CATT Acoustic. Los resultados son:

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR DE SIMULACIÓN
Nivel de presión sonora SPL	> 69dB, salvo en las zonas ya señaladas
Sonoridad G_{mid}	3,9 dB (sala vacía)
Tiempo de reverberación RT_{mid}	1,88 s
Calidez acústica BR	1,37
Brillo Br	0,79
Claridad musical $C_{80}(3)$	4,3 dB
Eficiencia Lateral LF (4)	19,1 (sala vacía)
RASTI	59

4.- Se ha obtenido un acuerdo muy satisfactorio entre los valores simulados y medidos en sala vacía, lo que refuerza la fiabilidad de las simulaciones realizadas.

¹ Los informes de Lothar Cremer han sido facilitados por Ignacio García Pedrosa, arquitecto colaborador de García de Paredes en el Auditorio Nacional. Agradecemos al estudio Paredes-Pedrosa su colaboración por la aportación de este material.

² CATT-Acoustic v8.0 *User's Manual*, SPECTRA D' Sign Kopiering AB, Gothenburg, 2002.

³ Beranek, L. *Concert & Opera Halls. How they sound*, A.S.A., New York, 1996.

⁴ Mediciones de absorción de diferentes sillas a cargo de la consultora acústica García BBM. Material inédito. Agradecemos a Vicente Mestre (García BBM) el suministro de este material.

⁵ Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona (España), 1998.

⁶ Agradecemos a Cristian Mondaca Marino su ayuda y asesoramiento en la realización de estas mediciones.

⁷ Cox, T.J. et al., "The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria", *Acustica*, 79, 1993, 27-41