

SIMULACIÓN ACÚSTICA DEL AUDITORIO MANUEL DE FALLA DE GRANADA

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 paper presents the most important findings of the acoustic study conducted in the Auditorium of Granada Manuel de Falla Centre (Spain). This work was built by the architect José María García de Paredes in 1978 and reopened in 1987, making it one of his most important and beloved works. In the context of the music spaces in Spain, its position is emblematic as it acts as a starting point in the modern conception of these spaces. The work explains the acoustic simulation results by computer: sound rays trajectories from the source to the receivers are analysed and acoustic parameters that define its sound quality have been evaluated using the software CATT Acoustic.

RESUMEN

Este trabajo presenta las conclusiones más relevantes del estudio acústico realizado en el Auditorio del Centro Manuel de Falla de Granada (España). Esta obra fue construida por el arquitecto José María García de Paredes en 1978 y reinaugurada en 1987, constituyendo una de sus realizaciones más importantes y queridas. En el contexto de los espacios musicales en España ocupa una posición emblemática, ya que ejerce de punto de arranque en cuanto a la moderna concepción de estos espacios. El trabajo expone los resultados de la simulación acústica de la sala por ordenador utilizando el programa CATT Acoustic, que abarca, por una parte, un análisis geométrico de las trayectorias de los rayos sonoros fuente-receptor y, por otra, una evaluación de los parámetros que definen su calidad acústica.

1. ESTUDIO ACÚSTICO DEL AUDITORIO

1.1 Dimensionado y aforo

El auditorio se encuentra en la planta baja del edificio. Como se muestra en la figura 1, su geometría es básicamente rectangular, con unas dimensiones de 50m x 21m en planta. La altura de techos oscila entre los 2,5m de los extremos de la sala a los 13m desde la parte más baja de la sala A (o mejor, zona A de la sala). El volumen de la sala es de unos **10.000m³**, derivándose un volumen por persona de 7,6m³. Con la modelización de la sala, considerando cajas de público, el volumen se queda en 9.140m³. La superficie de la planta, contando las dos galerías laterales simétricas que dan acceso a la zona A (cota 0,00), ronda los **1.300m²**, de los que **800m²** corresponderían a zona de audiencia. La disposición asimétrica del público determina en la sala tres configuraciones que denominaremos configuración total (aforo 1.311 localidades), configuración parcial A (aforo 897 localidades) y configuración parcial B (aforo 414 localidades). Las cortinas del escenario son las que ejercen de elementos separadores para cada una de ellas.

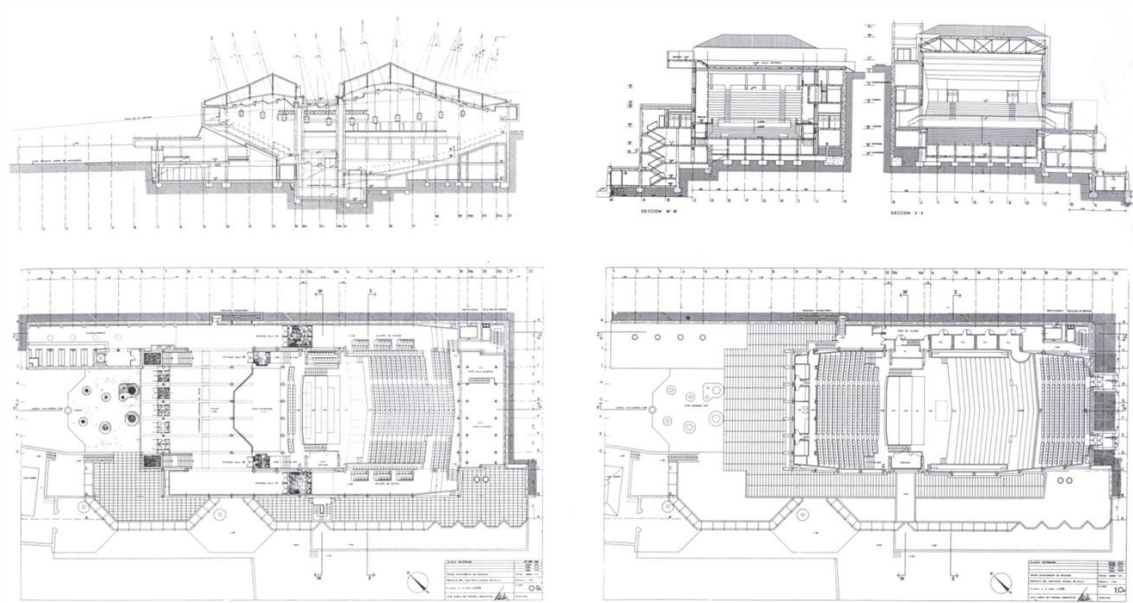


Figura 1.- Secciones longitudinal y transversal. Plantas (cota 0,00 abajo izda y 4,59 abajo dcha)

La disposición de las gradas respecto al escenario y su inclinación provocan una buena visibilidad desde cualquier parte de la zona de audiencia. En cada grada, el acceso a las localidades del público se realiza a través de dos pasillos simétricos.

1.2 Modelización y materiales

Aunque ha sido pensado para sala de conciertos, también se ha previsto su utilización para congresos, conferencias y teatro, por lo que se han escogido parámetros acústicos que caracterizan los recintos destinados a música, a palabra, y a ambas funciones. Para la simulación se ha realizado un modelo acústico partiendo de un dibujo de la sala en tres dimensiones, que nos caracteriza su geometría, usando el programa AUTOCAD y seguidamente se ha operado con el programa CATT Acoustic.

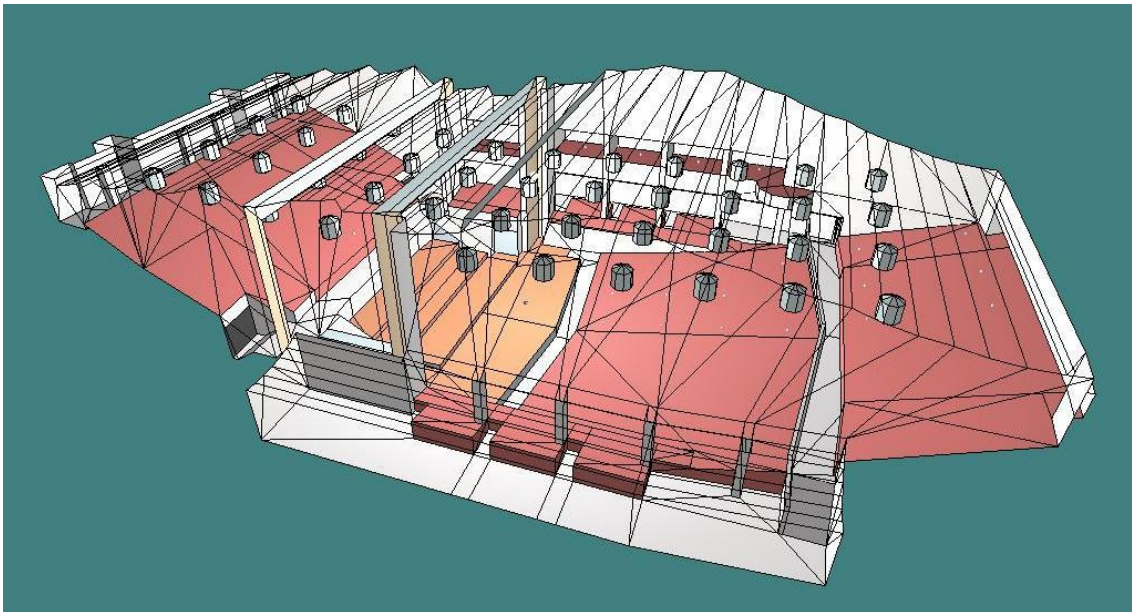


Figura 2.- Modelización de la sala

A partir de los planos se ha construido el modelo tridimensional para el estudio acústico (figura2), que se obtuvo importando del programa AutoCAD un total de 1808 caras 3D. En el proceso de simulación, al que después nos referiremos, se consiguió un 0,3% de rayos escapados, lográndose así un cierre prácticamente completo de la geometría del recinto.

Para la simulación se han realizado ciertas adaptaciones, algunas marcadas por el software:

- a) Los trazos curvos de la **sección del techo** se descompusieron en trazos rectos, ya que el programa no admite líneas curvas; dada la precisión que tiene el diseño del techo se decidió descomponer cada trazo curvo en tres trazos rectos. La división en trazos rectos afectó por la misma razón a la sección de los **techos de las galerías laterales**.
- b) Siguiendo la línea de estudio marcada para cada una de las salas, el **público** ha sido modelizado por **cajas** de 80cm de altura en toda la sala, adaptando mínimamente la altura de los antepechos allí donde ha sido necesario.

En las zonas donde las escaleras separaban zonas de público a ambos lados de las mismas, éstas han sido incluidas también como cajas de público, dada su anchura y en la línea de lo recomendado por el software. También se han incluido como caja de público algunas zonas que lindaban por un lado con una zona de público y por la contraria con una pared o columna a una corta distancia. El área de audiencia considerada en la simulación ocupa una superficie de 815m².

- c) Las **lámparas** han sido modelizadas con 24 caras 3D cada una, considerando una base octogonal, acabadas en sus partes superior e inferior como pirámides 8 lados.
- d) Las **escaleras** han sido modelizadas como planos inclinados. Con el fin de evitar reflexiones significativas en estas superficies, se han considerado éstas altamente difusoras en todas las bandas de octava (50%).



Figura 3.- Paneles curvos del techo. Detalle.

Para García de Paredes, la elección de los materiales obedeció a la obtención de un equilibrio entre superficies reflectantes, difusoras y absorbentes, teniendo en cuenta el uso de la sala:

“Tan importante como la elección de la forma, fue la elección de los materiales de revestimiento... Por consiguiente, de acuerdo con los criterios de cierto número de expertos y de músicos se definió una reverberación de 1,85 segundos para la región de frecuencias medias (500 a 1000Hz), como la más adecuada a una sala de estas características.”¹

Por tanto, la búsqueda de un tiempo de reverberación de 1,85seg sirvió de partida para encontrar un equilibrio entre la absorción de los distintos materiales. Ello se pone de manifiesto en el diseño del techo, que por una parte refleja el sonido a las zonas de orquesta y audiencia. Está diseñado en pequeñas secciones convexas (figura 3), lo que contribuye también a la difusión del sonido, algo que se refuerza gracias a la presencia de los faroles poliédricos que en cuatro filas recorren la sala longitudinalmente. Además, las absorciones de estos paneles curvos del techo sirven, respecto a otros materiales, como elemento de equilibrio y así lo manifestaba Lothar Cremer:

“Ya que las butacas tapizadas y las ropas de los asistentes absorben más a las frecuencias medias y las altas, necesitábamos algunos factores de absorción para las bajas. Estos factores han sido obtenidos por los paneles convexos de madera curvada que parecen todos iguales por debajo pero que están “afinados” de diferente manera en su interior.”²

Damos a continuación las superficies de revestimiento responsables del acondicionamiento interno con sus absorciones en las bandas de octava de 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz y 4kHz³⁴, Se resume en la siguiente tabla:

MATERIALES	ABSORCIÓN	DIFUSIÓN
Madera barnizada pegada sobre el firme para el suelo del escenario	4 4 7 6 6 7	10 10 10 10 10 10
Madera pegada difusora para las escaleras de madera	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	10 10 10 10 10 10
Madera con cámara de aire difusora para el órgano	19 14 9 6 6 5	30 40 50 60 70 70
Yeso para paredes laterales	2 2 3 4 5 5	10 10 10 10 10 10
Hormigón para pilares, columnas y paredes de los laterales	2 2 3 4 5 5	10 10 10 10 10 10
Terrazo para el suelo de los laterales y pasillos de público	1 1 2 2 2 2	10 10 10 10 10 10
Terrazo difusor para las escaleras de terrazo	1 1 2 2 2 2	50 50 50 50 50 50
Cortinas del escenario	3 12 15 27 37 42	30 40 50 60 70 70
Zona de público ⁵	15 34 70 74 82 65 (6 11 29 36 44 44)	30 40 50 60 70 70
Escenario con músicos ⁶	10 21 41 65 75 71	30 40 50 60 70 70
Vidrio para los cristales de las cabinas	2 6 3 3 2 2	10 10 10 10 10 10
Vidrio difusor para las lámparas	18 6 4 3 2 2	30 40 50 60 70 70
Hierro para las puertas de salida de emergencia	2 3 3 4 2 3	10 10 10 10 10 10
Ventana para la pared bajo antepecho de las gradas laterales zona B	99 99 99 99 99 99	30 40 50 60 70 70

1.3 Simulación acústica

Supondremos una fuente omnidireccional A0 centrada en el ancho del escenario, a 2m del borde y 1,5m de altura sobre el mismo, que emite un nivel de presión sonora de 90dB a 1m de distancia en todas las bandas de octava (125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz y 4kHz). Además se han colocado 39 receptores (figura 4) a un lado del plano de simetría xz, distribuidos en la zona A (gradas, lateral y palcos), en el escenario (palcos) y en la zona B.

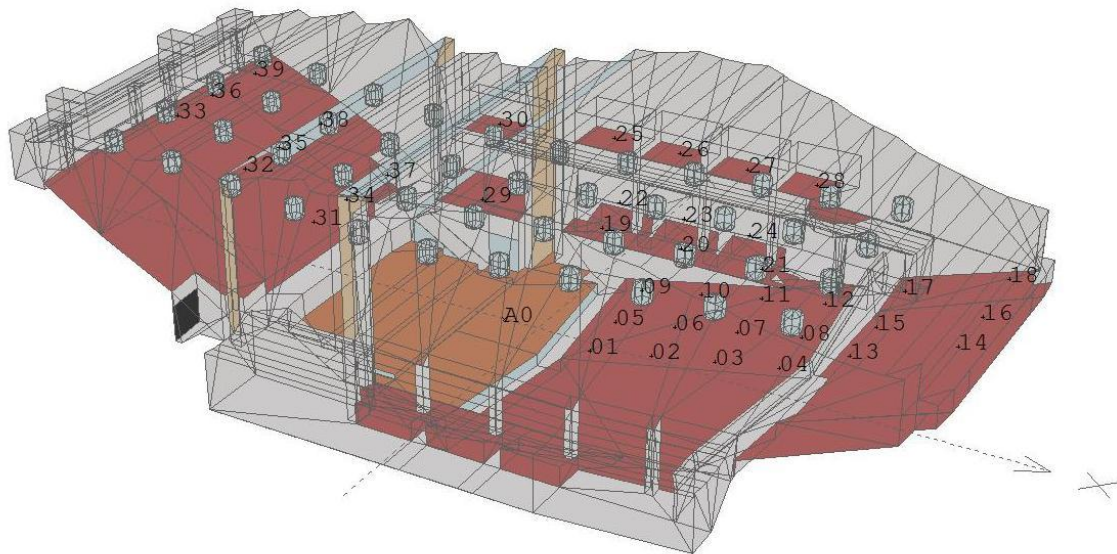


Figura 4.- Posición de fuente y receptores en la zona de audiencia

El auditorio ha sido simulado a sala llena, con y sin lámparas con el fin de comprobar la efectividad de las mismas como difusores. Por su interés para el resultado de algunos parámetros también se ha simulado a sala vacía. Consideraremos como base la simulación realizada a sala llena con lámparas.

Los datos proporcionados 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.

1.3.1 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, de dónde provienen, cómo están repartidas en cada intervalo temporal (0-20ms, 20-50ms, 50-80ms y 80-150ms) y la secuencia de intensidades de las mismas, asegurándonos de la ausencia de ecos. Se ha examinado cómo cambia el ecograma entre receptor y receptor a lo largo de las direcciones axiales (x, y) del auditorio, con y sin faroles poliédricos. Las conclusiones son las siguientes:

- El número de reflexiones en las distintas partes de la sala es desigual, si bien el nivel sonoro SPL se sitúa por encima de 69dB en todas las bandas de frecuencia.

Las localidades más beneficiadas están situadas en la grada baja y primeras filas de la grada alta de la zona A; también las localidades de las galerías laterales reciben un elevado número de reflexiones, con un equilibrio entre las que provienen del techo y paredes. Cremer valoró como “excepcionalmente buenas las localidades junto a las paredes de las galerías laterales”⁷. Aunque hay excepciones significativas, en el resto de la sala el número de reflexiones desciende.

- Las superficies que más intervienen en las reflexiones en toda la sala son las paredes laterales, tanto de los graderíos como del escenario, y el techo. En la zona A cabe destacar, a mayores, la contribución de la pared trasera del escenario, así como de los antepechos y las paredes de las galerías laterales.

El techo proporciona, en ausencia de lámparas, reflexiones directas a 28 de los 39 receptores. El motivo de esta consideración está en el cambio del diseño del techo entre los proyectos de 1978 y 1986. En el trazado de rayos realizado por el arquitecto⁸ que se hace para el proyecto de 1978 se ve claramente la intención de que, en ausencia de lámparas, lleguen reflexiones directas a todos los receptores situados en las gradas de las zonas A y B, así como a los posicionados en la parte externa de las galerías laterales. En la propuesta de 1986⁹ (figura 1, sección longitudinal), no contando con trazado de rayos, esta intención no se muestra tan explícita; con la simulación se puede decir que, en ausencia de lámparas, no llegan reflexiones a once receptores, ocho de ellos situados en las zonas A y B, y en el exterior de la galería lateral.

- La presencia de las lámparas intercepta reflexiones de primer orden provenientes del techo que, en su ausencia, llegarían a los receptores 6, 16, 36 y 39; además se han detectado choques de rayos sonoros con las lámparas (reflexiones de orden superior), cumpliendo éstas así su función difusora.
- Los techos curvos de las galerías laterales participan, solos o en colaboración sobre todo con las paredes de las galerías, en las reflexiones de las localidades situadas en el interior de las mismas (receptores 22, 23 y 24), cumpliendo así su cometido.
- Los receptores 32, 35 y 38 de la zona B captan dos reflexiones de primer orden retrasadas aproximadamente 100ms, que proceden de los antepechos de la grada superior de la zona A (figura 5). Teniendo en cuenta que en todos ellos hay reflexiones intermedias entre éstas y el sonido directo (el retraso se reduce a 50ms como máximo con una pérdida global de 8dB), **entendemos que no se percibirían como ecos.**

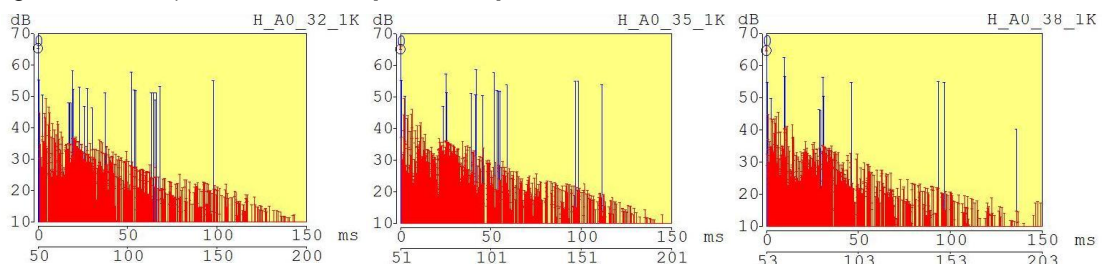


Figura 5.- Ecograma de los receptores 32, 35 y 38

1.3.2 Resultados de los parámetros acústicos

- Nivel de presión sonora SPL y Sonoridad G

La figura 6 muestra los niveles de presión sonora SPL y de sonoridad G a 1kHz. Los niveles de presión sonora SPL obtenidos en los 39 receptores son muy satisfactorios ya que, incluso en las últimas filas de la zona A (receptores 14 y 16), que es donde se obtienen los valores más bajos, se superan los **69dB** para todas las bandas de frecuencia.

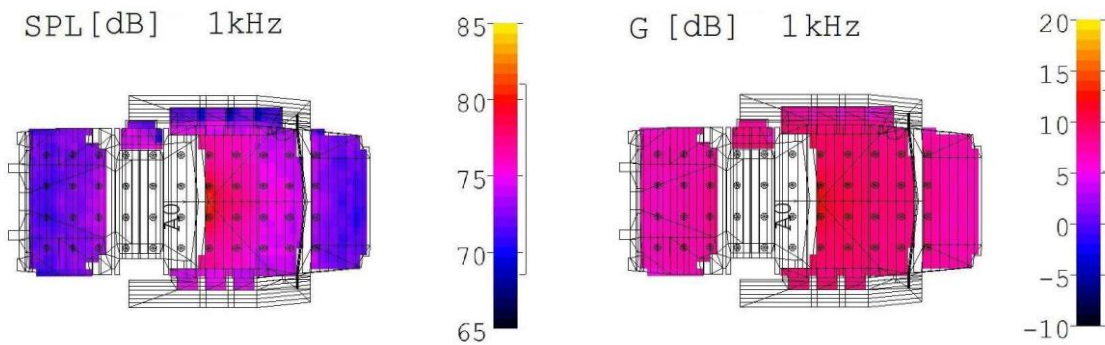


Figura 6.- Valores del Nivel de presión sonora SPL y de la sonoridad G en la banda de 1kHz

El valor promedio de la sonoridad G a sala vacía en las frecuencias medias para los receptores es $G_{mid} = 8,7dB$, situándose por encima de lo recomendado por la bibliografía¹⁰. En sala llena el valor de la sonoridad G_{mid} en frecuencias medias se reduce a 4,7, lo que da una pista sobre la diferencia de comportamiento de la sala en las dos situaciones.

- Tiempo de reverberación RT

En la figura 7 se muestran tabla y gráficas de los valores de los distintos tiempos de reverberación, unos obtenidos mediante su fórmula correspondiente, como los de Sabine y Eyring, otros calculados a partir de la geometría de la sala con sus superficies de revestimiento, como el T-15 y T-30:

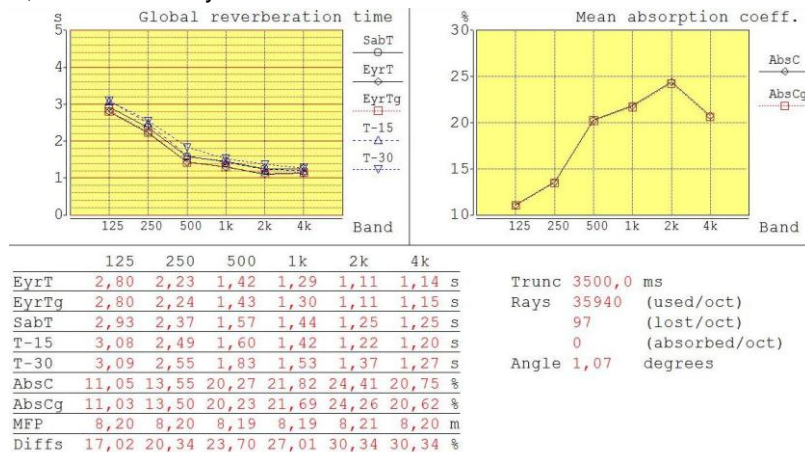


Figura 7.- Tabla y gráficas de los valores del Tiempo de Reverberación

Los resultados muestran una correspondencia razonablemente buena entre todos los valores calculados del tiempo de reverberación para todas las frecuencias, fluctuando en el paso de una banda de frecuencia a la contigua con similar tendencia. El valor promediado para las frecuencias medias RT_{mid} con el descriptor T-15 es 1,51seg, y con T-30 es 1,68seg. La fórmula de Sabine arroja un resultado de 1,51seg, coincidiendo con el T-15. Dado que el manual del software considera los valores dados por el descriptor T-30 como la mejor estimación del tiempo de reverberación, tomaremos como referencia el T-30, con lo que tendríamos $RT_{mid}=1,68seg$.

Aún estando por debajo de las pretensiones del arquitecto y del asesor acústico, este resultado posibilita un uso óptimo de la sala para música de cámara, encontrándose en el límite inferior para la música sinfónica. Para el uso de la palabra, el tiempo de reverberación resultaría, en principio, algo elevado.

Asimismo se ha realizado un estudio del tiempo de reverberación a sala vacía, considerando la absorción de las butacas sin público y el escenario sin músicos. Utilizando el descriptor T-30, se obtiene un tiempo de reverberación para las frecuencias medias $RT_{mid}=2,85\text{seg}$, excesivamente alto y problemático para los ensayos de orquesta; ello se justifica por la diferencia de absorción que presentan las butacas ocupadas y vacías.

La calidez musical BR y el brillo Br toman valores $BR \approx 1,68$, $Br \approx 0,79$, por lo que la sala produce una respuesta excesiva en las frecuencias graves, resultado que se justifica por la baja absorción de las sillas en esas frecuencias, y una respuesta algo baja en las agudas.

- Claridad musical C_{80}

C_{80} [dB] 1kHz

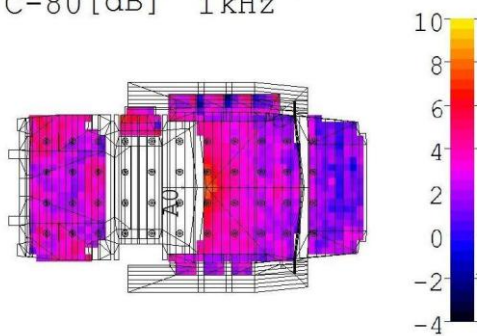


Figura 8.- C_{80} en la banda de 1kHz

La figura 8 muestra los valores de la Claridad musical C_{80} a la frecuencia de 1kHz. El promedio en los treinta y nueve receptores en las tres bandas de frecuencia de 500Hz, 1kHz y 2kHz, arroja un resultado $C_{80}(3) = 3,9\text{dB}$, más elevado de lo recomendado por la bibliografía¹⁰ para una sala a la que se pretende dar un uso musical, lo que se relaciona directamente con la falta de reflexiones posteriores a 80ms detectadas en los ecogramas de varios receptores.

- Eficiencia lateral LF

LF [%] 1kHz

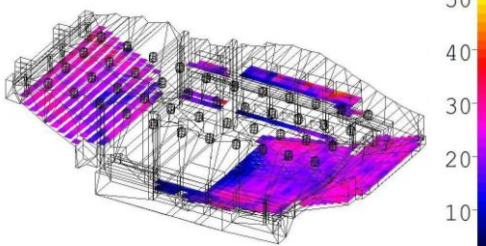


Figura 9.- LF en la banda de 1kHz

La figura 10 muestra los valores en sala vacía de la Eficiencia lateral LF en la banda de 1kHz. El valor porcentual medio en las bandas 125Hz, 250Hz, 500Hz y 1kHz para los receptores es $LF(4) = 22,4$, situándose por encima del valor mínimo de 19 en la mayoría de los asientos del público. Esto da idea de que debido al alto número de reflexiones laterales, la impresión espacial del sonido es buena, lo que es favorecido por la geometría rectangular de la sala.

No obstante, cabe destacar cierta irregularidad de los valores obtenidos, que están relacionados con la fracción de energía lateral que reciben cada uno de los receptores, a veces muy diferente incluso estando contiguos, como se ha verificado en los ecogramas. Asimismo se aprecian algunos valores por debajo de 19 en zonas las galerías laterales y palcos de la zona A, debido a que no todas las reflexiones proporcionadas por las paredes son percibidas desde esas posiciones como laterales.

- RASTI

La figura 10 muestra los valores de RASTI en la zona de audiencia. En casi todos los puntos se supera el valor porcentual de 50. La gráfica proporciona los valores para los treinta y nueve receptores, siendo el valor medio de 58, que cataloga a la sala de una inteligibilidad "aceptable", por lo que podría ser usada también para conferencias y congresos.

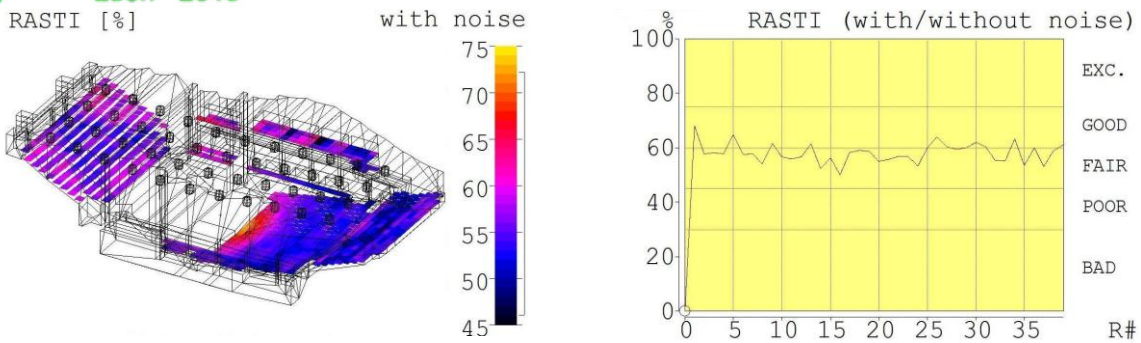


Figura 11.- Valores y gráfica de RASTI en la zona de audiencia.

2. CONCLUSIONES

- 1.- García de Paredes experimentó una larga evolución en la realización de este auditorio, centrándose inicialmente en la búsqueda de un aforo, de un tiempo de reverberación y de una geometría.
- 2.- El contacto del arquitecto con Lothar Cremer es fundamental para entender el resultado final. Ello se hace especialmente patente en la evolución del techo en su concepto, en su forma y en su función. La acústica geométrica se trata con especial cuidado en el proyecto que desembocó en la construcción de 1978.
- 3.- El techo proyectado en 1986 proporciona, en ausencia de lámparas, reflexiones directas a 29 de los 39 receptores. La presencia de las lámparas intercepta esas reflexiones en 4 receptores; además se han detectado choques con las lámparas por reflexiones múltiples, cumpliendo éstas así su función difusora.
- 4.- No se ha detectado la presencia de ecos en ninguno de los receptores estudiados.
- 5.- La sala goza de buena visibilidad en toda la zona de audiencia merced al diseño de las gradas. Ni la visión ni el sonido directo son obstruidos por el espectador situado delante.
- 6.- Se ha simulado la sala con el programa CATT Acoustic. Los resultados obtenidos son:

PARÁMETRO ACÚSTICO	VALOR DE SIMULACIÓN
Nivel de presión sonora SPL	> 69dB en todas las localidades
Sonoridad G_{mid}	8,7 dB (sala vacía)
Tiempo de reverberación RT_{mid}	1,68 seg
Calidez acústica BR	1,68
Brillo Br	0,79
Claridad musical $C_{80}(3)$	3,9 dB
Eficiencia Lateral LF (4)	22,4 (sala vacía)
RASTI (%)	58

¹ García de Paredes, J.M; García de Paredes, A. Auditorio Manuel de Falla, Granada, 1975-1978. Colegio de Arquitectos de Almería, Almería (España), 1995.

² Cremer, L. "Medios acústicos en el Auditorio Manuel de Falla". Revista Arquitectura N° 215 Noviembre-Diciembre 1978, pág 74.

³ CATT-Acoustic v8.0 *User's Manual*, SPECTRA D' Sign Kopiering AB, Gothenburg, 2002.

⁴ Beranek, L. *Concert & Opera Halls. How They Sound*, A.S.A., New York, 1996.

⁵ Valores para sillas ocupadas y entre paréntesis para sillas vacías. Las sillas son de la marca Castelli. La empresa consultora García BBM, a la que mostramos nuestro agradecimiento, nos ha proporcionado su absorción por butaca:

- Ocupada: < 8 18 37 39 43 34>
- Vacía: < 3 6 15 19 23 23>

Para deducir la absorción por metro cuadrado se ha considerado que la densidad de ocupación es de 1,9 personas/m².

⁶ Consideramos una baja densidad de músicos en el escenario por debajo de 1 persona/m².

⁷ Cremer, L. "Medios acústicos en el Auditorio Manuel de Falla". Obra citada.

⁸ Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J. I. "Estudio acústico del Auditorio Manuel de Falla de Granada: evolución del proyecto de construcción". Actas del Congreso Tecniaústica, 2010. Ver figura 8.

⁹ Vallejo Ortega, G.; Sánchez Rivera, J. I. "Estudio acústico del Auditorio Manuel de Falla de Granada: evolución del proyecto de construcción". Actas del Congreso Tecniaústica, 2010. Comparar figuras 8 y 13.

¹⁰ Carrión Isbert, A. *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona (España), 1998.