

Calidad de salas para música clásica

Concert rooms' quality for classical music

S. Cerdá^(*), J. Segura^(**), A. Giménez^(*), R. Cibrián^(**)

RESUMEN

Encontrar un parámetro que permita establecer si una sala es buena para la representación orquestada de música clásica, es uno de los intereses básicos de la acústica de salas. Sin embargo, habitualmente las salas se caracterizan por los valores promedio de algunos parámetros acústicos. A partir de los valores óptimos mayoritariamente reconocidos, los especialistas consideran adecuada o no una sala para un cierto uso. En trabajos recientes hemos obtenido un modelo que permite clasificar una sala con respecto a la representación de música clásica, a partir del tiempo de reverberación (T30), el factor de energía lateral (LFC) y el envolvimiento del oyente (LEV). Con este modelo podemos determinar los mapas de calidad para salas. En este trabajo presentamos los mapas de calidad de cinco salas. A partir de los resultados obtenidos podemos inferir las reglas básicas que definen un buen diseño acústico.

SUMMARY

Finding a parameter which allows establishing if a concert room is good for orchestral classical music performances or not is one of the main interests in room acoustics. However, rooms are usually characterized by average values of some acoustic parameters. From the optimal values mostly recognized, specialists can consider a room adequate or not for a certain use. In recent works, we have obtained a model for classifying a room for classical music performances, from the reverberation time (T30), the lateral energy factor coefficient (LFC) and the listener envelopment (LEV). From this model, we can determine the quality maps for these rooms. In this paper, we show the quality maps for five rooms. From these results we can deduce some basic rules to define a good acoustic design.

343-9

Palabras clave: Calidad sonora; parámetros de salas; acústica de salas; diseño de salas.

Keywords: Sound quality; room parameters; room acoustics; room design.

^(*) Universidad Politécnica de Valencia (España).

^(**) Universidad de Valencia (España).

Persona de contacto/Corresponding author: cerdaj@uv.es (S. Cerdá)

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de salas, en las que la acústica debe tomarse en especial consideración, los modelos acústicos se ajustan para obtener los valores óptimos de los parámetros seleccionados. El gran número de parámetros usados tradicionalmente para determinar la calidad acústica ha dado lugar a diversas aproximaciones, de acuerdo con diferentes atributos básicos en consideración: la escuela de Gottingen (1) (2) (3) considera tres parámetros: el índice de correlación cruzada interaural (IACC), el tiempo de reverberación (RT), y la claridad (C). Yamamoto y Suzuki (4), incluyeron la fuerza acústica en sus estudios. Marshall y Barron (5) (6) optan principalmente por la impresión espacial medida por el factor de energía lateral (LF). Por su parte Bradley-Soulodre (7) (8) y Barron (9) han estudiado la influencia de la energía tardía mediante la fuerza lateral tardía (GLL) y la fracción lateral tardía (LLF).

Beranek (10) (11), reseña la importancia y las diferentes formas de medir el envolvimiento del oyente (LEV), aportando datos de diversas salas.

Aunque los parámetros acústicos se corresponden con determinadas cualidades (subjetivas) acústicas, no existe un único parámetro que sea definitivo para el diseño, de tal manera que correlacione con la calidad percibida de las salas (12). Sin embargo, diferentes autores han buscado modelos que combinen los parámetros acústicos estudiados para obtener una clasificación objetiva de salas que correlacione con el *ranking* subjetivo. Es obvia la importancia que supone para el diseño encontrar un modelo que permita correlacionar las medidas objetivas con la respuesta subjetiva.

La referencia más importante sobre la determinación de valores óptimos a partir de estudios psicoacústicos son los trabajos de Ando (13), sobre los valores "preferidos" (*preferred*) de los parámetros acústicos para distintos motivos musicales. En particular su teoría de la preferencia subjetiva (14) de los parámetros estadísticamente independientes. Estos parámetros estadísticamente independientes (la variación de cada uno no afecta al resto) son para Ando, el IACC, el tiempo de caída temprano (EDT), G y el tiempo entre el sonido directo y la primera reflexión principal (ITDG). Otro referente importante, Beranek (15), añade dos parámetros independientes a la selección de Ando, la relación de bajos (BR) y el índice de difusión de superficies (SDI) y utiliza una modificación de la teoría de Ando para

obtener un método objetivo de clasificación de salas.

En trabajos anteriores (16) (17), estudiamos un amplio conjunto de salas de diferentes tipologías y tamaños. Nuestra hipótesis de trabajo es que todas las salas se pueden estudiar simplemente como un recinto tridimensional cerrado (de ahí la selección tan variada de salas y la realización de gran número de medidas en todas ellas). A partir de los parámetros medidos en las salas y mediante un análisis estadístico de reducción de datos, se obtuvo un conjunto ortogonal de tres factores: un factor podía escogerse como el RT, otro factor como el LFCE4, y el tercer factor el LEV calculado por el procedimiento de Beranek (10).

En el interesante trabajo de Ando (13), se presenta una compleja manera de obtener la predicción de la valoración subjetiva de una sala. Éste procedimiento fue estudiado y modificado por Beranek (10) a partir de consideraciones técnicas propias. Intentos semejantes de evaluación de salas a partir de los parámetros acústicos se pueden encontrar también en Barron (18), Higini (19) y en un trabajo anterior (20). En estas últimas referencias, se presenta un mecanismo que con la ayuda de gráficas que permiten evaluar los parámetros de las salas, proporciona un coeficiente de calidad global.

Paralelamente a nuestros trabajos sobre los parámetros objetivos medidos en salas (16) (17), hemos llevado a cabo extensas campañas de valoración subjetivas de salas mediante encuestas (21). A partir de los trabajos de reducción de parámetros y los resultados de las encuestas, hemos encontrado un modelo lineal dependiente de RT, LFCE4 y LEV (22) que correlaciona con el modelo de Ando. Este modelo al que hemos denominado de Ando-Beranek, nos ha permitido establecer un intervalo óptimo (22) del mismo comparando sus valores medios con las respuestas subjetivas de valoración global de salas.

En este trabajo, a partir del parámetro de Ando-Beranek (22), el criterio de calidad (22) y las medidas experimentales en diversas salas, hemos determinado la calidad acústica en diferentes localizaciones de una sala. Utilizando la técnica de estadística espacial denominada método de Kriging (23), hemos obtenido y representado los mapas del parámetro de Ando-Beranek para las salas. Estos mapas nos permiten concluir cuáles son los problemas que presentan las salas y en qué lugares ocurren. Combinándolo con los modelos de Barron (6) podemos extraer relaciones importantes para el diseño.

Tabla 1. Salas estudiadas: características

Sala	Id	Tipo	Uso	Año	Asientos	Nº de medidas	V(m³)	RT(s)
Auditorio de Castellón	H1	Rectangular	Conferencias, congresos, conciertos de todo tipo, ópera y danza.	2004	1.200	51	14.850	2,43
Auditorio de Ribarroja	H2	Rectangular	Teatro, ópera, danza y conciertos	1994	783	39	7.830	1,79
Teatro Principal de Valencia	H3	Herradura	Teatro, ópera, danza y conciertos	1832-1991	1.224	53	6.986	1,50
Auditori de Torrent	H4	Hexágono irregular (abanico + abanico invertido)	Conferencias, congresos, conciertos, ópera y danza	1997	606	48	6.430	1,87
Paraninfo de la Universidad Politécnica de Valencia	H5	Rectangular	Conferencias, congresos y conciertos solistas; orquesta de cámara y coro	1978	385	24	2.700	1,30

2. METODOLOGÍA

A partir de las medidas realizada en diferentes salas, según la norma ISO-3382 (24) y en la IEC 60268 (25), con un equipo compuesto por: un portátil con una tarjeta de sonido profesional (VxPocket v2), dos micrófonos G.R.A.S. Tipo 40 AK y sus correspondientes preamplificadores y alimentación (GRAS Tipo 26AK y GRAS 12AA), una etapa amplificadora M-1000, una fuente dodecaédrica DO12 y el software de captura y análisis de las señales WinMLS (26), se han obtenido las respuestas impulsivas en cada una de las salas consideradas, mediante ensayos con señal *sweep* sinusoidal logarítmico. Todas las medidas se realizaron con las salas vacías y la fuente situada en el centro del escenario. En cada medida se ha garantizado los niveles exigidos en la norma ISO-3382 que dan validez experimental a las mismas.

Las salas estudiadas y sus principales características se muestran en la Tabla 1. En esta tabla aparece también el número de medidas realizadas. Número muy superior al que propone la norma.

3. MODELO DE ANDO-BERANEK DE SALAS

El modelo de Ando (13) consiste en encontrar una función [1]:

$$[1] \quad S = \sum_{i=1}^N S_i$$

En la que $S_i = -a_i |x_i|^{3/2}$ son funciones que permiten determinar la preferencia subjetiva para cada parámetro objetivo, seleccionado. Los parámetros que Beranek (15) selecciona siguiendo el modelo de Ando son:

- | | | | |
|----|---------------------------------------|------------------------------|--|
| 1. | $x_1 = IACC_{E3}$ | $a_1 = 1,45$ | |
| 2. | $x_2 = \log(ITDG / ITDG_{pref})$ | $a_2 = 1,42$
$a_2 = 1,11$ | si $x_2 \geq 0$
si $x_2 \leq 0$ |
| 3. | $x_3 = G_{mid} - (G_{mid})_{pref} dB$ | $a_3 = 0,04$
$a_3 = 0,07$ | si $G_{mid} < 4,0$
si $G_{mid} > 5,5$ |
| 4. | $x_4 = \log(EDT / EDT_{pref})$ | $a_4 = 9$
$a_4 = 12$ | si $EDT < 2,0$
si $EDT > 2,3$ |
| 5. | $x_5 = \log(BR / BR_{pref})$ | $a_5 = 10$ | si $RT > 2,2$ sec |

Y los valores preferidos son:

- $ITDG_{pref} \leq 20ms$
- $(G_{mid})_{pref} \in [4,0 - 5,5]$
- $EDT_{pref} \in [2,0 - 2,3]$
- $BR_{pref} (1,1 - 1,25)$ si $RT > 2,2$
- $BR_{pref} (1,1 - 1,45)$ si $RT < 1,8$
- Interpolado para RT en (1,8; 2,2)

En nuestro trabajo (22) mostramos la posibilidad de definir una función de Ando en la que las componentes S_i , no se suman directamente, sino que se suman con diferentes pesos de tal manera que la función obtenida [2], correlaciona con una combinación lineal de los parámetros RT, LFC_{E4} y LEV. De esta forma conseguimos tener una expresión lineal de tres parámetros de la sala que estadísticamente aportará gran parte de la información contenida en las funciones S_i si la correlación es alta [2].

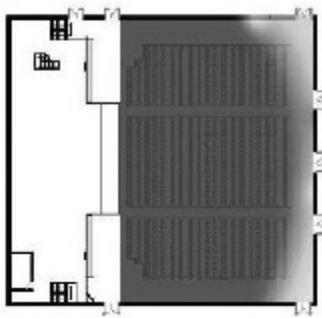
$$[2] \quad S_\alpha = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i$$

En (22), la combinación obtenida, a la que se ha denominado modelo de Ando-Beranek es [3]:

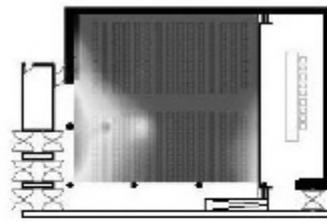
$$[3] \quad S_{AB} = -1,49 + 0,36RT_{mid} + 2,76LFC_{E4} - 0,19LEV$$

(r = 0,97)

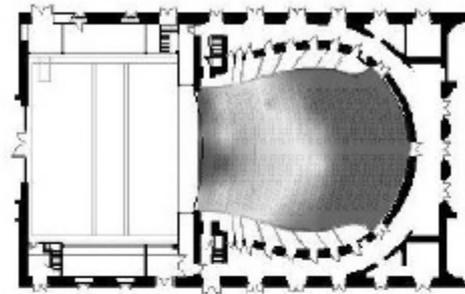
Este modelo se ha obtenido utilizando un nivel de significación $\alpha = 0,05$. A partir del cálculo de este parámetro con los valores promedio de las salas en las que teníamos encuestas, y el resultado de las



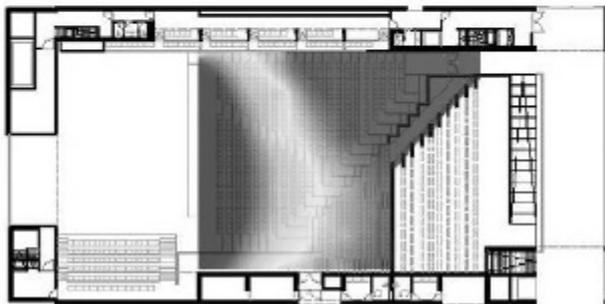
H2)



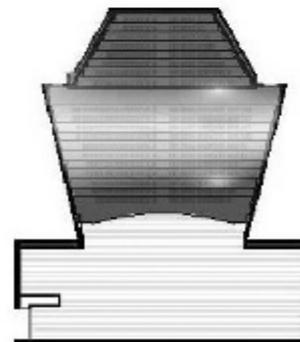
H5)



H3)



H1)



H4)

1. Representación del parámetro S_{AB} de calidad en 5 salas: H1) Auditorio de Castellón, H2) Auditorio de Ribarroja, H3) Teatro Principal de Valencia, H4) Auditorio de Torrent y H5) Paraninfo UPV.

encuestas (21), hemos obtenido que las salas con mejor calificación subjetiva cumplen la relación (22) [4]:

$$[4] \quad -\frac{1}{3} \leq S_{AB} \leq 0$$

4. MAPAS DE CALIDAD PARA MÚSICA CLÁSICA

Las salas seleccionadas para este estudio presentan una diversidad, tanto en forma como en volumen, como podemos observar en la Tabla 1. En el caso del Auditorio de Ribarroja, del Paraninfo de la UPV y del Auditorio de Castellón, son rectangulares pero con una diferencia considerable en volumen y número de butacas. El Auditorio de Torrent tiene una forma hexagonal irregular y el Teatro Principal de Valencia la tiene de herradura. Todas estas peculiaridades influyen en la configuración de las características acústicas de cada una de las salas, por lo que la percepción subjetiva en cada una de ellas será diferente.

Nuestro propósito es obtener de manera gráfica una representación espacial de los niveles de calidad de percepción subjetiva obtenidos con el modelo de Ando-Beraneck (22). Para ello, hemos aplicado una técnica de estadística espacial (Kriging) en la determinación de la calidad subjetiva S_{AB} en las plateas de las diferentes salas. Para ello, hemos usado un ajuste de la superfi-

cie de tendencia que configuran los puntos de medida mediante mínimos cuadrados generalizados, utilizando una función exponencial para evaluar la covariancia del ajuste (23) (27). Este método de interpolación proporciona también una estimación del error cometido. El promedio de los errores relativos obtenidos en cada mapa de calidad de las 5 salas analizadas está comprendido entre un 1 y un 5 %.

La aplicación de esta técnica al conjunto de resultados obtenidos a partir de las mediciones de los parámetros objetivos RT_{mid} , LFC_{E4} y LEV , nos permite obtener representaciones como las que se observan en la Figura 1.

En la representación de la Figura 1, cada una de estas salas tiene una calidad acústica diferente. De acuerdo con el criterio establecido por la expresión [4] que establece un criterio de calidad para la percepción subjetiva según S_{AB} , y según lo que se aprecia en cada uno de los casos de la Figura 1, las salas H1), H3) y H4) serían las únicas que presentan cierta calidad de percepción subjetiva (zonas claras en las figuras). Aunque se ha optado por representar en claro las regiones óptimas y en oscuro las que no satisfacen la condición óptima, se tiene el siguiente comportamiento general:

- En aquellas posiciones en las que S_{AB} tenga un valor por encima de cero se

percibe un LEV en defecto que está relacionado con una falta de G_{Late} .

- En las zonas con un $S_{AB} < -0,33$, se tiene un LEV (*listener envelopment*) en exceso lo cual también se relaciona con un exceso de fuerza tardía (G_{Late}) en estas posiciones.

De esta manera, esta aplicación nos puede ser útil para determinar las localidades mejor ubicadas o por otra parte puede servir como criterio para el diseño y mejora de salas.

5. ASPECTOS DE DISEÑO Y MEJORA

En esta sección vamos a discutir algunos ejemplos sobre la aplicación del modelo de Ando-Beraneck encontrado. Como vemos en el modelo intervienen las siguientes características de la sala: RT, LFC, $IACC_L$ y G_{late} .

5.1. La sala óptima

En esta sección vamos a estudiar un caso de aplicación particular del modelo de Ando-Beraneck. Corresponde a fijar de antemano $LFC_{E4} = 0,25$ e $IACC_{L3} = 0,15$ y determinar el tiempo de reverberación correspondiente a un $G_{late} = 0$ con un valor de $S_{AB} = 0$. Estos valores corresponden a los óptimos de LFC e $IACC_L$ que aparecen en (28). Por otro lado elegimos $G_{late} = 0$ para tomar como referencia en la parte más alejada del escenario ese valor. Como el G_{late} varía con la distancia, al tomar S_{AB} en el extremo más bajo del intervalo óptimo buscamos tener garantizado que en toda la sala se satisfice la condición [4]. De esta manera el RT que debería tener la sala corresponde a 1,85s Como hemos fijado que $G_{late} = 0$ en el punto más alejado de la sala, si consideramos el modelo de Barron de la energía tardía (6) [5]:

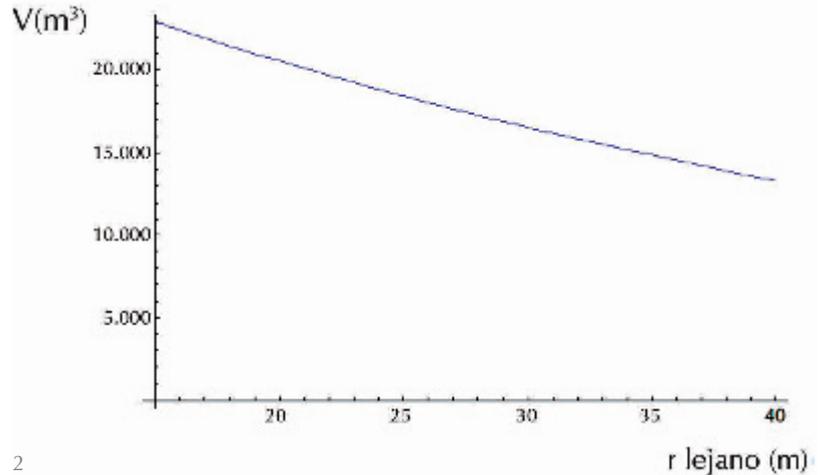
$$[5] \quad 0 = 10 \log \left[\frac{31200T}{V} \right] - \frac{4,82}{T} - \frac{0,174r_{lejano}}{T}$$

Podemos obtener el volumen correspondiente si fijamos también la distancia del punto más lejano de la sala al centro del escenario r_{lejano} [6] (Figura 2).

$$[6] \quad V_{sala_optima} = \frac{57720}{10^{\frac{482}{185} + \frac{0,174r_{lejano}}{925}}}$$

5.2. El volumen óptimo para un T dado según el modelo de Barron

Para evaluar desde el punto de vista del diseño acústico de salas de conciertos para música clásica, vamos a considerar algunas aproximaciones básicas de la acústica de salas.



2

En primer lugar consideramos la expresión clásica del tiempo de reverberación de Sabine [7]:

$$[7] \quad T = 0,161 \frac{V}{A}$$

En la relación [4], intervienen como datos de la sala T, LFC, $IACC_L$, los cuales los vamos a considerar como parámetros de diseño. Si aplicamos el criterio de calidad llegamos a las siguientes desigualdades para G_{late} [8]:

$$[8] \quad -\frac{694}{57} + \frac{72}{19}T + \frac{552}{19}LFC - 20 \log(1 - IACCL) \geq \geq G_{late} \geq -\frac{298}{19} + \frac{72}{19}T + \frac{552}{19}LFC - 20 \log(1 - IACCL)$$

Con el fin de comparar con un modelo teórico hemos utilizado el modelo de Barron (6). En este modelo se considera que la energía se puede calcular como sonido directo, temprano y tardío y con ello, el valor de la fuerza acústica tardía (G_{late}) vendrá dado por [9]:

$$[9] \quad G_{late}(r) = 10 \log \left[\frac{31200T}{V} \right] - \frac{4,82}{T} - \frac{0,174r}{T}$$

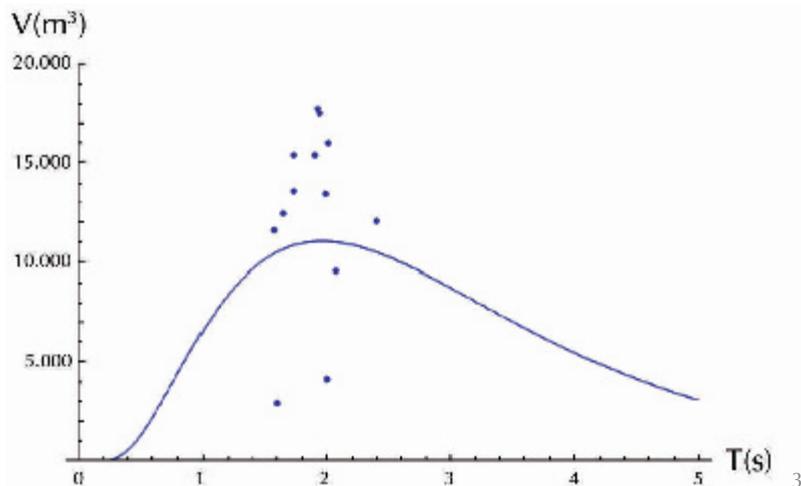
De la relación de calidad obtenida, conseguimos un intervalo de variación para G_{late} óptimo ($G_{late,min}$, $G_{late,max}$).

Este intervalo se puede combinar con la expresión de Barron para la energía tardía para obtener una estimación del volumen. Solo necesitamos introducir un nuevo parámetro que es la distancia mínima de las butacas al centro de la fuente. A esa distancia es donde el G_{late} será máximo y por tanto nos permitirá deducir el volumen correspondiente mediante la fórmula [10]:

$$[10] \quad V_{op,max} = \frac{31200T}{10^{\frac{G_{late,max} + \frac{4,82}{T} + \frac{0,174r_{min}}{T}}{10}}}$$

La variación de G_{late} según el modelo de Barron con la distancia es muy pequeña ($-0,174 / T$ dB/m). Esto implica que si se cumple la condición para la distancia

2. Volumen óptimo para música clásica en función de la distancia del punto más lejano al centro del escenario.



3. Volumen óptimo según el modelo estudiado, para distintos tiempos de reverberación. Los puntos corresponden a las salas estudiadas en (6).

mínima, también se cumpla para la distancia máxima de la sala. El intervalo $[G_{late,min}/G_{late,max}]$, siempre tiene una amplitud de 3,51 dB. Lo que supone que si se cumple la condición para la distancia mínima, la distancia máxima admitida es de [11]:

$$[11] \quad d_{max} \approx 20T$$

Sin embargo, pudiera ocurrir que el problema a considerar fuese a la máxima distancia en la sala se obtuviera el $G_{late,min}$. Entonces la fórmula a utilizar para el volumen es [12]:

$$[12] \quad V_{op,min} = \frac{31200T}{10 \frac{G_{late,max} + \frac{4,82}{T} + \frac{0,174r_{min}}{T}}{10}}$$

Como ejemplo, consideremos ahora como valores de diseño los siguientes:

$$T = 2,5 \text{ s}, \text{ LFC} = 0,2 \text{ y } \text{IACCL} = 0,15.$$

Estos valores proporcionan un intervalo óptimo para la fuerza tardía:

$$G_{late} (1,01 - 4,52)$$

Si consideramos una distancia mínima de 8m encontramos que el volumen de la sala ha de ser de 15.544m³. Además tenemos garantizado el intervalo óptimo de energía tardía hasta una distancia a la fuente de 50 m, claramente suficiente.

En la Figura 3 mostramos la curva del volumen óptimo para distintos tiempos de reverberación según el modelo.

Se observa que a medida que el tiempo de reverberación aumenta, el volumen disminuye. Esto sugiere que la aplicación del modelo de Barron y la condición de calidad está limitada a cierto intervalo de tiempos de reverberación. Los puntos que se muestran en la Figura 3 corresponden a las 16 salas estudiadas en (6) (se ha excluido el *Royal Albert Hall* que tiene un volumen de 86.650m³). El rango de tiempos de reverberación que estudió están comprendidos entre 1,34 y 3s, con un valor medio de las 17 salas de 1,92s. El propio Barron argumenta que el modelo funciona en salas razonablemente difusas (6) y existen otros resultados de salas de conciertos que no siguen el modelo (29) (30) (31) (32) (33).

Aunque los resultados anteriores muestran las limitaciones de la aplicación del modelo de Barron y la condición de calidad, vamos a estudiar a continuación qué consecuencias tiene sobre una posible actuación para la mejora de las salas estudiadas y cuyos mapas de calidad se muestran en la Figura 1.

En la Tabla 2, mostramos los parámetros promedios medidos así como el volumen de las cinco salas estudiadas. Además incluimos la distancia mínima al centro del escenario correspondiente a la primera fila de butacas, y la máxima para el diseño sobre el mínimo G_{late} óptimo en la parte trasera. En la tabla mostramos los nuevos tiempos de reverberación que deberían tener las salas para que en toda la audiencia se tuviera la condición óptima [4] si se cumple la ley de Barron. Como se ve, en todos los casos los tiempos de reverberación deberían ser menores. Salvo en el caso del Auditorio de Castellón, los tiempos de reverberación no parecen muy adecuados para la música clásica en cuanto a la reverberación preferida (10). La explicación de este hecho es que, como se dijo anteriormente, no siempre se cumple la ley de Barron. En las salas cuyo volumen es bastante menor al óptimo por la ley de Barron $V_{opt,max}$, la fuerza medida suele ser inferior a la predicha (32) (33) y por eso lo que se debería hacer es aumentar la energía tardía, especialmente en los lugares más alejados.

Tabla 2. Características de las salas estudiadas y nuevos tiempos de reverberación según modelo de Barron.

Sala	LFC _{E4}	IACCL	V(m³)	R _{min} (m)	R _{max} (m)	T _{min} (s)	T _{max} (s)	RT(s)
H1	0,26	0,11	14850	7	27	1,48	1,96	2,43
H2	0,25	0,13	7830	8	28	1,03	1,05	1,79
H3	0,19	0,19	6986	7	26	0,82	0,86	1,50
H4	0,25	0,13	6430	7	27	0,90	0,93	1,87
H5	0,35	0,17	2700	5	20	0,79	0,81	1,30

5.3. El análisis de los mapas de calidad y el parámetro S_{AB}

Aunque en el apartado anterior hemos estudiado los efectos de la ley de Barron independientemente de si para la sala tiene validez o no, los resultados obtenidos demuestran que ese tipo de análisis no es el más adecuado para salas pequeñas: es decir salas de volúmenes inferiores a los estudiados en (6). En este apartado analizamos sala a sala el mapa de calidad y el parámetro de calidad.

En las salas H1, H3 y H4 se tienen tres zonas con el siguiente comportamiento: $S_{AB} < -0,33$, $S_{AB} > 0$ y [4] (en claro en la Figura 1). Como RT, LFC e IACCL no varían mucho en una sala, la variación de S_{AB} es debida a G_{late} . Por tanto si se quiere mejorar las salas se ha de pensar en la redistribución de la energía tardía en las mismas.

En las salas H2 y H5 hay un exceso de energía tardía en toda la sala. Así, habría que disminuirla. Si bien reducir la reverberación, sugerido por la aplicación de la ley de Barron, no parece adecuado, un aumento de la difusión podría permitir la disminución requerida.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio de la preferencia y la calidad en el diseño de salas a partir de la teoría de Ando-Beraneck presentada por los autores en (22). A partir de medidas experimentales y aplicando este modelo se delimitó el intervalo de preferencia (S_{AB}) de las salas dedicadas a conciertos de música clásica.

Este modelo se ha aplicado a cinco salas utilizando las medidas experimentales y un método de estadística espacial (Kriging),

para obtener los mapas de calidad acústica en estas salas. Con estos mapas nos es posible delimitar delimitando las zonas de mayor calidad en cada una de las salas estudiadas.

A continuación se ha hecho un análisis de la aplicación del modelo en el diseño y mejora de salas. En cuanto al diseño, se ha hecho uso de la teoría de Barron para delimitar el intervalo óptimo de Glate y asociarlo a variables de diseño de nuevas salas como es el volumen para una reverberación dada. Sin embargo, la mejora de salas ya establecidas hace necesario considerar un balance de la energía tardía en determinadas zonas, por lo que la toma de decisiones se ha de realizar sobre los mapas de calidad anteriores.

Los análisis realizados con la ley de Barron permiten inferir que su aplicación es interesante en el primer estadio del diseño. En el que si fijamos la reverberación nos proporciona el volumen adecuado de la sala, sabiendo que proporciona volúmenes más grandes que los habituales en las salas de nuestros estudios (32) (33). Para los tiempos de reverberación alrededor de 2 segundos, los volúmenes que proporciona están alrededor de los 15.000 m³.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto de investigación BIA2008-05485. Los autores también quieren agradecer al profesor Michael Vorländer del *Institut für Technische Akustik* de la RWTH-Aachen, su apoyo en la realización de este trabajo durante la estancia realizada en su laboratorio y a la UVEG la beca UV-INV_EPDI12-67818 para la estancia en Aquisgrán (Alemania) con el equipo investigador.

REFERENCIAS

- (1) Gottlob, D. (1973). Vergleich Objektiver Akustischer Parameter mit Ergebnissen Subjektiver Untersuchungen aus Konzertsälen Thesis, Gottingen.
- (2) Schroeder, M.R., Gottlob D., Siebrasse K.F. (1974). Comparative study of European concert halls. *J. Acoust. Soc. Am.* 56(4): 1195-1201.
- (3) Schroeder, M.R. et al. (1974). Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *J. Acoust. Soc. Am.* 56(4): 1195-1201.
- (4) Yamamoto, T., Suzuki, F. (1976). Multivariate analysis of subjective measures for sound in rooms and the physical values of room acoustics. *J. Acoust. Soc. Jpn.* 32: 599-605 [in Japanese].
- (5) Marshall, L.G. (1994). An Acoustics Measurement Program for Evaluating Auditoriums Based on the Early/Late Sound Energy Ratio. *J. Acoust. Soc. Am.* 96(4): 2251-2261.
- (6) Barron, M., Lee, L.J. (1988). Energy Relations in Concert Auditoriums I. *J. Acoust. Soc. Am.* 84(2): 618-628.
- (7) Bradley, J.S., Soulodre, G.A. (1995). The Influence of Late Arriving Energy on Spatial Impression. *J. Acoust. Soc. Am.* 97(4): 2263-2271.

- (8) Bradley, J.S., Soulodre, G.A. (1995). Objective Measures of Listener Envelopment. *J. Acoust. Soc. Am.* 98(5): 2590-2597.
- (9) Barron, M. (2001). Late Lateral Energy Fractions and the Envelopment Question in Concert Halls, *Applied Acoustics*. 62(2): 185-202.
- (10) Beranek, L.L. (2008). Concert Hall Acoustics-2008. *J Audio Eng. Soc.* 56(7/8): 532-544.
- (11) Beranek, L.L. (2010) *Listener Envelopment LEV, Strength G and Reverberation Time RT in Concert Halls*. Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA.
- (12) Bradley, J.S. (2011). Review of objective room acoustics measures and future needs, *Applied Acoustics*, 72(10): 713-720.
- (13) Ando, Y. (1985). *Concert hall acoustics*. Berlin: Springer.
- (14) Ando, Y. (1983). Calculation of subjective preference at each seat in a concert hall. *J. Acoust. Soc. Am.* 74: 873-887.
- (15) Beranek, L.L. (1996). Concert halls and opera houses: How they sound?. *J. Acoust. Soc. Am.* Woodbury, NY.
- (16) Cerdá, S., Gimenez, A., Romero, J., Cibrian, R.M., Miralles, J.L. (2009). Room Acoustical Parameters: a Factor Analysis Approach. *Applied Acoustics*. 70(1): 97-109.
- (17) Cerdá, S., Giménez, A., Romero, J., Cibrián, R.M. (2011). A Factor Analysis Approach To Determining A Small Number Of Parameters For Characterising Halls. *Acta Acustica united with Acustica*. 97(3): 441-452.
- (18) Barron, M. (1993) *Auditorium Acoustics and Architectural Design* (EFN Spon, Londres).
- (19) Arau, H. (1999) *ABC de la Acústica Arquitectónica* (CEAC. Barcelona).
- (20) Giménez, A., Marín, A., Sanchis, A., Romero, J. (1997). *Subjective Parameters of musical Rooms*, presented at Auditorium conference. Auditorium design at the millenium. Institute of Acoustics of U.K, Belfast.
- (21) Gimenez, A., Cibrian, R.M., Giron, S., Zamarreño, T., Sendra, J.J., Vela, A., Daumal, F. (2011). Questionnaire Survey to Qualify the Acoustics of Spanish Concert Halls. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(6): 949-965.
- (22) Cerdá, S., Giménez, A., Cibrián, R. (2012). An Objective Scheme for Ranking Halls and Obtaining Criteria for Improvements and Design. *JAES*, 60(6): 419-430.
- (23) Krige, D.G. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa* 52(6): 119-139.
- (24) ISO 3382:1997(E), Second edition 1997-06-15, Acoustics - Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- (25) IEC 60268 - Sound system equipment. International Electrotechnical Commission.
- (26) L. Morset. (2004). WinMLS 2004 - User manual.
- (27) Hornik, K. (2011). The R statistical software. <http://cran.r-project.org>
- (28) Beranek, L.L. (2004). *Concert Halls and Opera Houses: Music, Acoustics, and Architecture*. Springer, New York.
- (29) Barron, M. (1996). Loudness in concert halls. *Acustica*. 82: 21-9.
- (30) Barron, M. (1995). Interpretation of early decay times in concert auditoria. *Acustica*. 81: 320-31.
- (31) Vorländer, M. (1995). Revised relation between the sound power and the average sound pressure level in rooms and consequences for acoustic measurements. *Acustica*. 81: 332-43.
- (32) Aretz, M., Orlowski, R. (2009). Sound strength and reverberation time in small concert halls. *Applied Acoustics*. 70: 1099-1110.
- (33) Segura, J., Cerdá, S., Giménez, A., Montell, R., Barba, A., Cibrián, R. (2011). *Análisis mediante estadística espacial de la distribución de diversos parámetros de salas*. 42º Congreso Nacional De Acústica Encuentro Ibérico De Acústica.

* * *