

Traducción libre de la Publicación "A Symphony Hall: L'Auditori Barcelona, Vol 19, nº4  
2012 del Building Acoustics realizada por Higini Arau-Puchades  
**BARCELONA SYMPHONY HALL: L'AUDITORI**

Higini Arau-Puchades,  
Arau Acustica,  
C/Travesera de Dalt 118.  
Barcelona (08024) Spain

**ABSTRACT:** Describiremos en este manuscrito muchas incidencias del diseño acústico de una sala moderna que se tuvo que diseñar al sistema antiguo por no existir aún ningún medio informático. Pero tuvimos la suerte de que durante la construcción, que se atrasó nueve años, fueron apareciendo algunos sistemas informáticos y pudimos revisar muchos aspectos del diseño, aunque no todos.

Un tema importante que tardamos muchos años en averiguar qué pasaba, fue el problema de que los músicos no se oían a si mismos. Cuestión esta que debatiremos con bastante profundidad.

## 1.GENERAL ACOUSTIC DESIGN

Esta sala fue diseñada con el objetivo de emular la acústica de tres salas de conciertos más famosas del mundo: Vienna Grosser Musikvereinssaal, Amsterdam Concertgebouw y Boston Symphony Hall.

El objetivo fue construir una versión moderna de una sala clásica. La sala tiene capacidad nominal de 2326 (máximo 2335) y es el hogar de la ciudad de Barcelona y Orquesta Nacional de Cataluña.

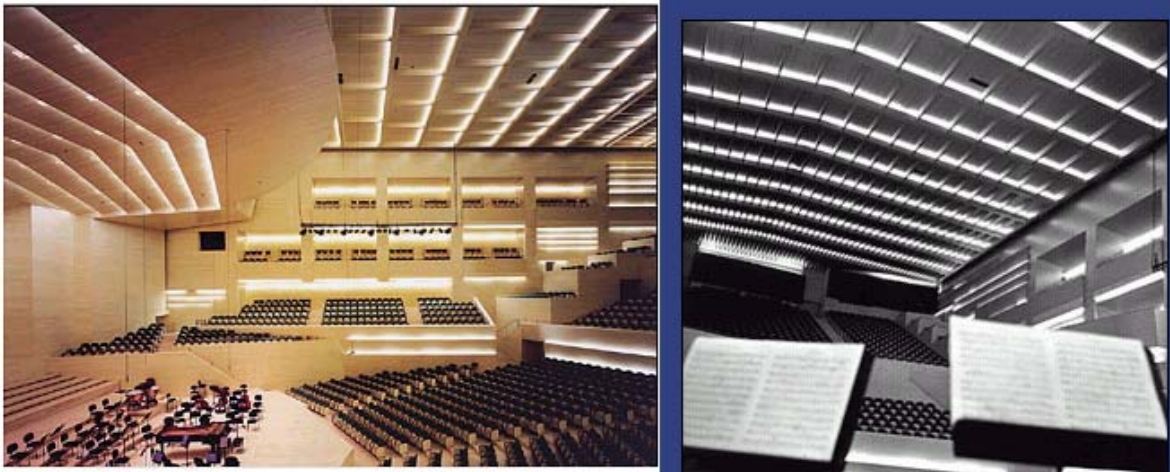


Figure 1: Barcelona Auditorium view

### 1) Floor shape

Cuando se diseñó el auditorio, [1], se decidió imitar en lo posible a las salas de referencia que son rectangulares, como el Musikverein Saal de Viena, Así pues la sección en planta puede verse en la figura 4. Todas las dimensiones de la planta obedecen a la proporción áurea de Fibonacci. Por lo cual la planta rectangular, desde el escenario obedece en primera aproximación, a la ley de oro de la geometría, entre otras cuestiones porque esta forma, aparte de dar una distribución muy adecuada de las frecuencias propias de la sala, suministra un ITDG y una energía lateral muy buena. Así pues tenemos:

La sala es rectangular con una longitud doble a su anchura. Tiene un ancho de casi 31.1m entre las paredes laterales, la altura del techo de la sala sobre el escenario es 19.3m. Hay una gran área de escenario: La plataforma de orquestal es 210 m<sup>2</sup> y el coro ocupa 60 m<sup>2</sup>. La platea se divide en tres secciones: los principales lugares, los centrales, con 594 asientos en el frente de la plataforma de orquesta y los asientos secundarios en dos terrazas a los lados del escenario a dos alturas diferentes que contienen 146 y 304 asientos cada una.

Los principales asientos están ligeramente escalonados. Más allá de los principales asientos hay dos terrazas elevadas, inclinadas, una es el anfiteatro (Tier) 1 y el otro el Anfiteatro (Tier) 2.

A ambos lados de estas terrazas hay dieciséis cajas (boxes) que contienen 10 a 18 asientos cada box colocadas en cada pared lateral, distribuidos en dos niveles en los puestos secundarios. Cada hilera tiene un máximo de 19 asientos cada uno.

**2) Hall volume evaluation for symphonic use**

La determinación del volumen de aire requerido para este uso sinfónico lo calculamos según la teoría de H.Arau , [2], [3], publicada en 1997 pero descubierta antes del 1988. El gráfico del dibujo muestra el valor de V para un  $T_{mid}$  próximo a 2s para sala llena con una área de ocupación  $S_A = 1628.2 \text{ m}^2$ , que equivale a un número de audiencia  $N=2326$  asientos. El volumen determinado, para un  $T_{mid} = 2.03 \text{ s}$ , es  $V = 24300 \text{ m}^3$ .

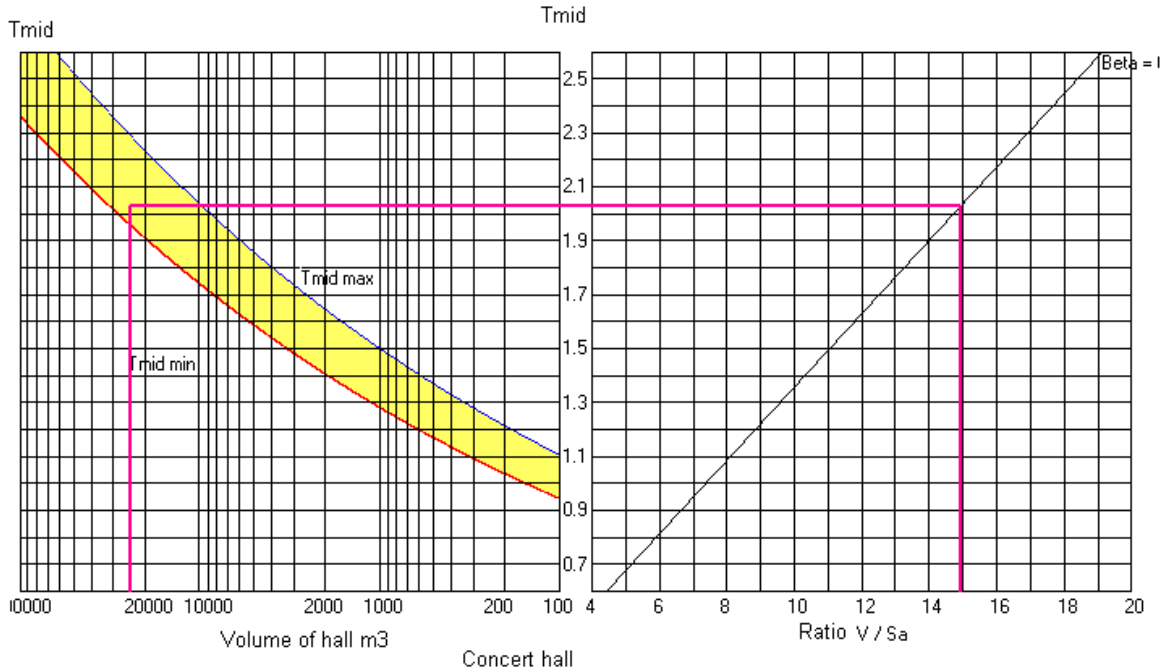


Figure 2: Volume predicted by Arau<sup>5</sup> to  $T_{MID} = 2.03 \text{ s}$  (occ.) for full hall

En el gráfico izquierdo de la figura 2, la curva en rojo, límite inferior de la zona sombreada en amarillo, indica los valores mínimos del  $T_{mid}$  que exige el criterio acústico para el caso de sala de concierto, que vale en este caso  $T_{mid} \text{ min} = 1,96 \text{ s}$ ; mientras que la curva superior coloreada en negro nos indica los valores máximos del  $T_{mid}$  que por criterio debe tener la sala es  $T_{mid} = 2,29 \text{ s}$

El  $T_{mid}$  óptimo que debe tener la sala para uso sinfónico es  $T_{mid} \text{ (óptimo)} = 0.9 T_{mid} \text{ max}$  que en nuestro caso es:  $T_{mid} = 2.06 \text{ s}$ . Por tanto el valor calculado es muy cercano al valor deseado por criterio acústico y opinamos que en la fase inicial de nuestro estudio este valor es suficiente. El gráfico derecho de la figura 2 es el que relaciona el  $T_{mid}$  con la razón volumen V y el área de audiencia  $S_A$ ,

La formula fundamental que relaciona todas las variables, es:

$$V / S_A = 7.361 T_{mid} \dots\dots\dots(1)$$

Determinado el volumen de aire ideal del recinto pasamos a definir el auditorio en 3D y definir los materiales que definen sus superficies y sus inclinaciones,

**3) Ceiling definition in main hall**

Ceiling acoustic design criteria:

Nosotros sabemos que las longitudes de onda del sonido emitido, deben ser pequeñas comparadas a las dimensiones de las superficies, dimensiones de la sala y de los obstáculos sobre los que incide el sonido. Si esto no se produjera así, entonces aparecerá el fenómeno de la difracción que es mucho más complicado de valorar y que puede alterar completamente la imagen del comportamiento del sonido en el recinto, [4]. Siguiendo este criterio nosotros diseñamos que la superficies individualizadas sobre la que choca el sonido deben cumplir que las dimensiones del plano que define sean superiores como mínimo  $l_{ij} > 3\lambda_0$ , donde  $\lambda_0$  es la mínima longitud de onda del sonido que precisamos tenga una reflexión especular sobre el plano que cumpla este requisito. Así tenemos que cualquier longitud de onda igual o menor que la escogida para incidir sobre cada plano considerado tendrá una reflexión especular adecuada. Mientras que si la longitud de onda del sonido  $\lambda$  es superior a la longitud de onda de onda  $\lambda_0$  de cada plano considerado entonces se producirá la difracción del sonido. Como el efecto de difracción es incalculable, y en aquella época menos, y sabiendo por otro lado que tener un poco difracción es adecuado, como presentimos ocurre en las salas de referencia citadas, obramos en consecuencia.

Hemos decidido definir los planos individualizados con una distribución de vigas transversales y longitudinales, siguiendo las longitudinales una variedad de la serie de Fibonacci, que antes hemos explicado,

Una colección de planos que van desde el inicio de la sala, junto al techo del escenario, hasta el fondo de la sala definiendo entre las vigas transversales y las longitudinales unos planos tipo que cubren las longitudes de onda que van aproximadamente desde 400 Hz hasta 4000 Hz y que van de mayor dimensión a menor dimensión al final de la sala. Estos planos parecen unos cofres en el techo.

Esta disposición de las vigas define así un hermoso artesanado, con grandes rectángulos cerca del escenario y pequeños cofres en la parte trasera de la sala. La rejilla de vigas, que definen los planos, armoniza la reflexión especular con la difracción producido por la separación entre las vigas y su profundidad. El principio de este techo acústico es proporcionar difracción, progresivamente desde la baja a la alta frecuencia. Desde la baja frecuencia que se produce en los grandes planos cerca del escenario, hasta que las altas frecuencias que se produce en los planos finales de la retícula del techo de la sala.

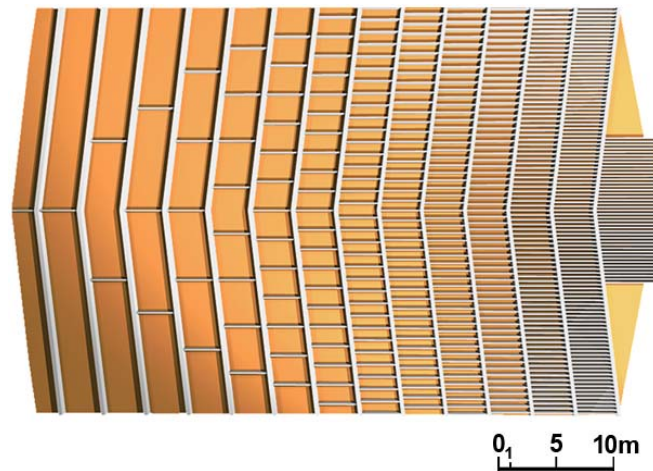


Figure 3: Definition of coffers of ceiling

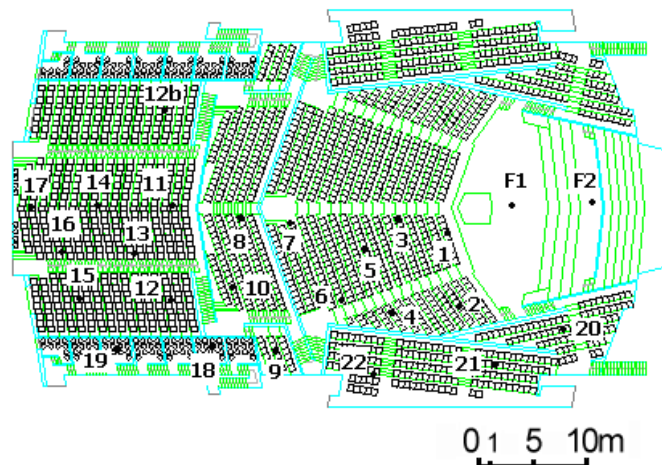
### Ceiling Definition

a) El techo del escenario está dividido en dos zonas. La primera de ellas, sobre el escenario, se inclina a partir de una altura de 11,1 m por encima del escenario y asciende hasta 15,2 m; tomando de de referencia de alturas la plataforma del escenario.

En el tramo inicial del escenario desde la pared, el Arquitecto diseñó unos segmentos en diente perfil de sierra de aproximadamente 2m. Este escenario fue diseñado por el Arquitecto en 1997, en sustitución a otro anterior. Fue revisado por nosotros con programa de simulación llamado Epidaure, mediante el cual no supimos detectar ningún problema.

b) El techo de la sala principal es horizontal, pero compartimentada por medio de 14 vigas transversales, definiendo 15 espacios en el techo de 3,15 m de ancho. Las vigas transversales tienen una sección romboidal con una profundidad de 40 cm y ancho de 30 cm en la base y 40 cm en la parte superior. Todas las vigas transversales desembocan a dos vigas longitudinales, en ambos lados del techo, por lo que estas vigas no tocan a las paredes laterales.

Las vigas transversales se extienden a las paredes laterales, pero están unidos a las vigas longitudinales que se extienden a toda la longitud de la sala. Las vigas longitudinales discurren entre vigas transversales, que tienen una profundidad de 30 cm y tienen una sección romboidal con un ancho de 10 cm en la base y 20 cm en la parte superior.



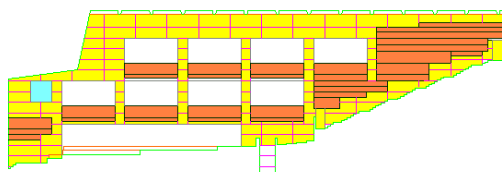
**Figure 4:** Barcelona Auditorium Concert Hall in plan. The numbers indicate the measurement points. F1 and F2 are source positions.

#### 4) WALL DEFINITION

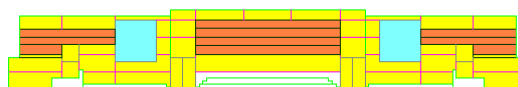
Las paredes laterales son una combinación precisa de superficies verticales e inclinadas para proporcionar buenas reflexiones a la zona del público pero, al mismo tiempo, teniendo cuidado de evitar ecos y reflexiones largo camino. Los planos de las paredes siguen el mismo criterio de reflexión – difracción que hemos indicado para el techo. Vemos que en este caso la altura de los planos inclinados decrece con la altura respecto al suelo. Ver figuras 5,6,7. Las paredes laterales que rodean el escenario producen un sonido reflexiones a la planta principal.

La sala suministra intimidad y reflexiones laterales tempranas típicas de una sala rectangular, reflexiones que se complementan con las de las paredes de las terrazas laterales y boxes.

Una característica importante del diseño es la ausencia balcones, típicos de las salas clásicas. En nuestro diseño los balcones están integrados en las paredes laterales, a modo de ventanas, Esto fue elegido con el objeto de obtener una distribución de la absorción más uniforme en el recinto, creando un espacio más Sabínico. Además, de conseguir una difracción óptima de las paredes laterales sin perder reflexiones especulares necesarias para obtener una buena energía lateral. Las paredes laterales de zonas planas que alternan con zonas inclinadas, cada vez más frecuentes hacia las paredes laterales finales y la del fondo de la sala.



**Figure 5:** Sidewall elevation. Inclined walls are brown, vertical planes yellow, balconies white and windows blue.



**Figure 6:** Rear wall elevation. Inclined walls are brown, vertical planes yellow and windows blue.

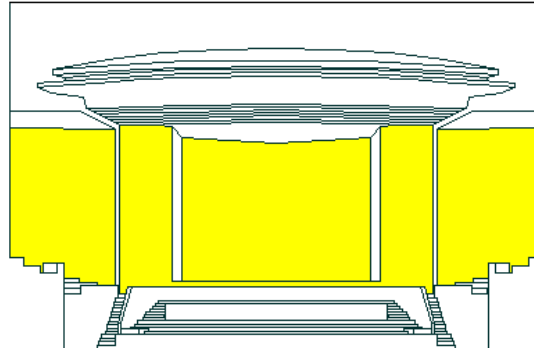


Figure 7: Transverse section through the stage.

Nuestra pretensión fue conseguir que el recinto con butacas sin audiencia produzca una sensación sonora de reverberación, (especialmente cuando en la sala sólo hay músicos en el escenario), que sea parecida a la sensación sonora que se percibe cuando las butacas están ocupadas. Dabemos resaltar que en el Musikvereinsaal de Viena, las condiciones acústicas muy distintas entre sala ocupada y desocupada, lo cual dificulta los ensayos de los músicos.

La sala fue concebida como Sala de Conciertos Sinfónicos. Pero la Propiedad también deseó que el Auditorio se dejara preparado para efectuar conferencias y música amplificada.

La sala de Conciertos, para uso Sinfónico, no tiene ninguna absorción adicional que se deba incluir. Pero para los otros usos descritos es necesario colocar una absorción adicional.

En uso sinfónico todas las superficies, paredes, techo y suelos son de madera, excepto que en el suelo existen unas butacas tapizadas. Ésta es la única absorción que existe.

Para el caso de conferencia y usos amplificados se utilizan cortinas desplegadas, o no, en las paredes.

El ruido de fondo en el interior de la sala tiene que ser muy bajo, cuando el sistema de aire acondicionado está en funcionamiento. Tiene que cumplir el criterio NC-15. Todo el edificio está flotando sobre resortes elásticos de caucho que nos aíslan de las vibraciones del tren y del metro. Eliminado con ello el ruido estructural que se transmite vía sólida.

### Architectural and technical details [8]

**Uses:** symphonic music, recitals and conferences. Ceiling: 20-mm to 35-mm plywood covered with fine erable with airspace behind. Side, front and rear walls: 25-mm plywood fixed to wall with a hard and elastic filling up material. Floor: Maple parquet fixed over rigid floor. Carpet: none. Stage floor: 45-mm maple over plywood over deep airspace. Stage height: 0.85 m. Added absorptive material: (Only in reinforced music and conferences) Velvet curtains covering the side and the rear walls and also the back stage wall. Seating: Special designed, rigid seat back, front of seat back upholstered; top of the seat-bottom upholstered; underseat, wood linear perforated Helmholtz resonator.

**Usos:** Música sinfónica, recitales y conferencias. **Techo:** 20 mm de madera contrachapada de 35 mm cubierto con arce bien con el espacio aéreo atrás. **Lateral, frontal y posterior paredes:** madera contrachapada de 25 mm fijada a la pared con un material duro y poco elástico en el dorso. **Suelo:** parquet de arce fija sobre suelo rígido. Alfombra: ninguno. **Escenario:** 45 mm de arce madera contrachapada y una cavidad de aire en el dorso. Altura del escenario: 0,85 m.

**Adicional absorción:** (Sólo en la música reforzado y conferencias) cortinas de terciopelo que cubre las paredes laterales, las paredes traseras y también la pared detrás del escenario. Se despliegan todas o parcialmente según sea la actividad a desarrollar. **Asientos:** Diseñado arquitectónicamente y acústicamente para esta ocasión, asiento rígido atrás, Delante del asiento está tapizado de tela sobre espuma, El bajo asiento es de madera con un resonador lineal de Helmholtz.

$V = 24298 \text{ m}^3$ , Volumen  
 $S_A = 1628 \text{ m}^2$ , Superficie de Audiencia  
 $S_c = 60 \text{ m}^2$ , Superficie de coro  
 $S_o = 210 \text{ m}^2$ , Superficie del escenario  
 $S_T = 1891 \text{ m}^2$ , Superficie total  
 $N = 2326$ , Numero asientos  
 $H = 15.75 \text{ m}$ , average room height, measured from main floor to ceiling in the part of the main-floor audience area not covered by balconies.  
 $H_{\text{max}} = 19.4 \text{ m}$  measured from floor in stalls to main ceiling,  
 $W = 31.1 \text{ m}$ , average width measured between side walls  
 $L = 40.3 \text{ m}$ , average room length  
 $D = 41.2 \text{ m}$ , distance from the front of stage to the most remote listener  
 $SD = 15.26 \text{ m}$ , average stage depth  
 $SW = 15.3 \text{ m}$ , average stage width.  
 $SH = 13.15 \text{ m}$ , mean ceiling height above the stage area.  
 $V/S_T = 12.85 \text{ m}$ , Ratio volumen /area total  
 $V/S_A = 14.99 \text{ m}$ , Ratio volumen/ area audiencia  
 $V/N = 10.45 \text{ m}^3$ , Ratio volumen /numero asientos  
 $S_A/N = 0.697 \text{ m}^2$ , Ratio Area audiencia /numero audiencia  
 $H/W = 0.5$   
 $L/W = 1.29$   
 $T_{\text{MID}} = 2.06 \text{ s}$  (occ.), Reverberation Time occupied mid frequency  
 $EDT_{\text{MID}} = 2.4 \text{ s}$  (unocc.), Early decay Time unoccupied mid frequency  
 $EDT_{\text{MID unocc.}}/T_{\text{MID occ.}} = 1.17$   
 $C_{80 \text{ MID}} = -0.5 \text{ dB}$  (occ.), Music Clarity  
 $BR(\text{occ.}) = 1.18$ , Bass Ratio o warthm  
 $LEF(\text{unocc.}) > 0.20$ , Lateral Fraction  
 $ITDG = 19.5 \text{ ms}$ , Interval Time delay Gap  
 $G_{\text{MID}}(\text{unocc.}) = 3.5 \text{ dB}$ , Strengt unoccupied  
 $ST1 = -14.2 \text{ dB}$ , Early Support on satage  
**Conferences and Electroacoustical Music**  
 $T_{\text{MID}} = 1.3 \text{ s}$  (occ.)                       $RASTI > 0.6$  (occ.)

• **MODEL TESTS**

En la primera fase del diseño acústico (1989-1990), M. Barron probó un modelo a escala 1:50 del diseño inicial.

La prueba con modelo acústico nos fue muy útil para conocer con mayor exactitud lo que era bueno y malo en el diseño, dado que no teníamos otro método mejor de valorar las cuestiones que estábamos tratando, Ya que la informática estaba a punto de aparecer pero aún no había aparecido. La prueba del modelo fue muy valiosa para el análisis de reflexiones anómalas y ecos, aunque con este procedimiento no se determinaba claramente qué pared, o paredes, eran las que provocaban el problema.

Entre que se entregó el proyecto, realizado sin ninguna intervención de la informática, ni para usos acústicos ni arquitectónicos. Después del 1995 empezó a introducirse, lentamente, los sistemas informáticos y la generación de programas, Primero en MS2 y después en Windows.

Así comenzó un programa de cálculo nuestro, que le llamamos Acoustic Salas y otro que se llamaba Epidauro. Gracias a ellos pudimos ir reformando el proyecto poco a poco, hasta el 1999 que se inauguró.

Nuestro programa doméstico, no es un programa comercial, y actualmente calcula las siguientes magnitudes:

1. Análisis de las reflexiones acústicas, o estudios de los caminos entre la fuente sonora y el receptor.

Estos estudios incluyen el análisis de los planos de reflexión, con determinación de los puntos de intersección en cada plano y determinación del retardo temporal de reflexiones. Estudio de la inclinación

óptima de cada superficie del recinto. Puede ser determinada con la información dada con el fin de evitar las reflexiones anómalas.

2. Analisis de los siguientes parametros acusticos de calidad

- Impulse response: echogram and reflection analysis.
- Reverberation Time (RT) in octave bands.
- Early Decay Time (EDT) in octave bands.
- Bass Ratio, or warmth, BR
- Brilliance Br
- Definition index (D<sub>50</sub>) in octave bands.
- Clarity Index (C<sub>80</sub>) in octave bands.
- Clarty Index (C<sub>50</sub>) in octaves
- Total loudness level G
- Intelligibility index (STI o RASTI).

Pero en aquellos años de 1990 a 1997 sólo podíamos realizar con nuestro programa el punto 1.

3. MEASUREMENT METHODOLOGY AND SYSTEM

The experimental procedure was carried out according to the ISO 3382-1, [4], [5], 1987 and 2007 respectively, where monophonic impulse responses were measured using sweep signals in the 125-4000 Hz octave band range. For each source – microphone couple impulse response measurements were carried out from which the following parameters were obtained:

Parameter

Reverberation Time, T30

Early Decay Time, EDT

Index Clarity C80

Strength G

Support objective of Stage ST1.

Each source Fi, i =1, 2, located on different places on the stage. The measurements were carried out for each individual source for all receiver points 1 to 21 placed in the audience area and were subsequently averaged. In relation source F1.

To analyze the effects of the ST1stage support the measurements were performed at several points on the stage depending of year measurement. When determining the ST1, the microphone should be situated a distance of 1m and at 1.2m in height (see figure 25). There were chairs and music stands located on the stage.

Equipment used:

WinMLS 2000

WinMLS 2004

Microphone Bruel & Kjaer 4942

Preamplifier of microphone Bruel & Kjaer 2690

Sound Card digigram vxpocket v2

Omni power sound source BRÜEL & KJAER model 4296

Power Amplifier Brüel & Kjaer model 2716, 300 W.

4. ACOUSTICAL PERFORMANCE OF HALL

• VALUES ALL ACOUSTIC MAGNITUDES MEASURED

Todas las magnitudes medidas en 1999 para asientos deocupados RTunocc están dados en la Tabla 1

Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	T <sub>low</sub>	T <sub>mid</sub>	T <sub>high</sub>
RT Barcelona (unoc.)	2,75	2,64	2,35	2,41	2,55	2,40	2.65	2.38	2.47
<b>RT Barcelona (occ.)</b>	2.45	2.30	2.09	2.03	2.02	2.00	2.37	2.06	2.01
Frequency (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	EDT <sub>mid</sub>		
EDT Barcelona (unoc.)	2.30	2.25	2,33	2.40	2.51	2.30	2.38		
<b>EDT Barcelona (occ.)</b>	2.05	1.96	2.07	2.02	2.104	1.92	2.04		
Average (occupied)			Bass Ratio(T <sub>low</sub> / T <sub>mid</sub> )			Brilliance(T <sub>high</sub> / T <sub>mid</sub> )			
<b>Barcelona</b>			<b>1.18</b>			<b>0.97</b>			
Frequency (HZ)	125	250	500	1000	2000	4000	G <sub>low</sub>	G <sub>mid</sub>	
G Barcelona (unoc)	4.29	4.12	3.52	3.61	3.92	3.62	4.20	3.56	

Traducción libre de la Publicación "A Symphony Hall: L'Auditori Barcelona, Vol 19, nº4 2012 del Building Acoustics realizada por Higiní Arau-Puchades

<b>G Barcelona (occ.)</b>	3.47	3.16	2.67	2.37	2.68	2.39	3.32	2.52
<b>Frequency Hz</b>	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>	<b>C<sub>80mid</sub></b>	
<b>C<sub>80</sub> Barcelona (unoc.)</b>	-3.04	-1.51	-0.24	-0,25	-0.7	-0.45	-0.47	
<b>C<sub>80</sub> Barcelona (occ.)</b>	-2.39	-0.73	0.42	0.72	0.30	0.58	0.57	
				<b>ST<sub>Early</sub> (dB)</b>				
<b>Barcelona year 2001</b>				-14.2				

Table 1: Tabla de valores determinados para sala no ocupada y ocupada.

Vemos que el resultado del RT<sub>occ</sub> para las frecuencias medias T<sub>mid</sub> de la tabla 1 coincide prácticamente al valor del T<sub>mid</sub> calculado antes del diseño definitivo mostrado en la figura 1.

In " the occupied values have been obtained from the expression using the experimental test values obtained in a reverberant room of The incremental absorption values between occupied and unoccupied seats were:

Los valores de los distintas magnitudes acústicas para sala ocupada ("L'Auditori" ), se obtuvieron a partir de las de las expresiones (2) a (5), El coeficiente incremental, de la absorción de las butacas, se obtuvo de la medición del coeficiente de absorción en sala reverberante ISO 354, con butacas ocupadas y butacas vacías. La diferencia de valores  $\alpha_{occ}$  y  $\alpha_{unocc}$  es el valor incremental  $\Delta\alpha$ . El ensayo se realizó en el " Laboratori General d'Assaigs i Investigacions"

	<b>125</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>1000</b>	<b>2000</b>	<b>4000</b>
<b>Incremental absorption <math>\Delta\alpha</math></b>	0.130	0.136	0.129	0.187	0.244	0.201

Table 2: Incremental absorption values  $\Delta\alpha$  between unoccupied and occupied seats in Barcelona hall

A partir de estos valores experimentales de una muestra de 16 butacas determinados en un laboratorio de ensayos aplicamos las siguientes fórmulas dadas por John S. Bradley [6] ecuaciones (3) a (5) y H.Arau [3] ecuación (2), que valen:

$$RT_{occ} = RT_{unoc} / \{1 + (6.14 S_A \Delta\alpha RT_{unoc} / V)\} \dots\dots\dots(2),$$

$$EDT_{occ} = EDT_{unoc} \{RT_{occ} / RT_{unoc}\} \dots\dots\dots(3),$$

$$C80_{occ} = C80_{unoc} + 13 \log \{RT_{unoc} / RT_{occ}\} \dots\dots\dots(4),$$

$$G_{occ} = G_{unoc} - 16 \log \{RT_{unoc} / RT_{occ}\} \dots\dots\dots(5).$$

donde V es el volumen de aire del Auditorio.

En el apendice 1 demostraremos la ecuación (2).

El comportamiento de los valores medidos de C<sub>80</sub> en frecuencias medias con sala no ocupada es comparada con los valores esperados de la teoría revisada de Barron-Lee [7] usando el T<sub>mid</sub> de la sala desocupada en la Figura 9

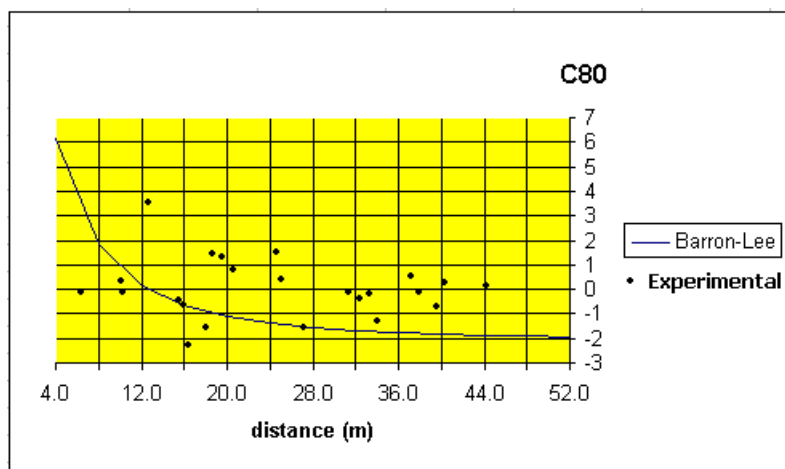


Figure 8: Measured C<sub>80</sub> (unocc.)mid versus Barron-Lee theory



Comparando las frecuencias medias de los valores de G determinados con los calculados según la teoría revisada de Barron, usando el valor medio Tmid (desocupado), vemos en la Figura 10 una excelente concordancia entre teoría y experimento.

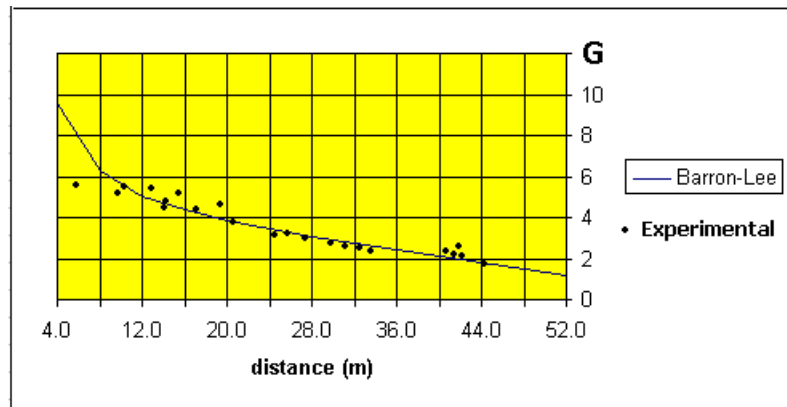


Figure 9: Measured G (unocc.)mid versus Barron-Lee Theory

### 5. ANALYSIS OF THE BARCELONA STAGE PROBLEM: ST1 Support ST<sub>Early</sub>

El ST<sub>Early</sub>, o ST1, es usado como un descriptor de las condiciones acústicas de un escenario. Este sistema pretende averiguar si los miembros de una orquesta se oyen a si mismos y a los otros.

Este método de medición fue elaborado por A.S. Gade (1989) y fue incorporado en la norma ISO 3382.

Esta magnitud es medida a 1 m de la fuente y a 1.5m del suelo. Se analizan los valores del ST1 a las frecuencias de octava entre 250 y 2000 Hz, y se promedian para dar un solo valor. Normalmente los puntos analizados corresponden a tres posiciones del escenario, hallando como resultado final su valor medio [4].

Como conclusión de nuestras mediciones, nosotros que los valores obtenidos del Sopot de Escenario, era comparable al de los mejores auditorios como el Musikvereinsaal.

Sin embargo unos 2 o 3 años después de su inauguración algunas voces de los músicos indicaban que entre ellos no se oían y ni siquiera cada uno. Esto no lo podíamos entender que la medición efectuada esra el síntoma de un escenario excelente y que los músicos se quejaban.

Primero en el 2008 conseguí de Arquitectura unos planos en DGG y empecé analizar el techo del escenario con mi sistema doméstico informático. En la figura 10 mostramos una vista 3D de la sección longitudinal del escenario. El área de músicos es 210 m<sup>2</sup> sin incluir el área de coro.

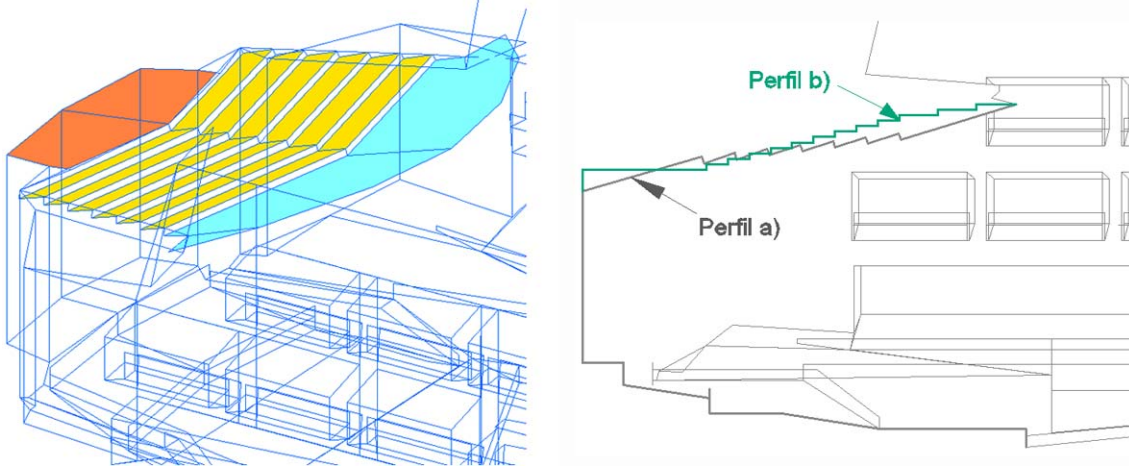


Figure 10 - 3D-View and detail of longitudinal section on stage

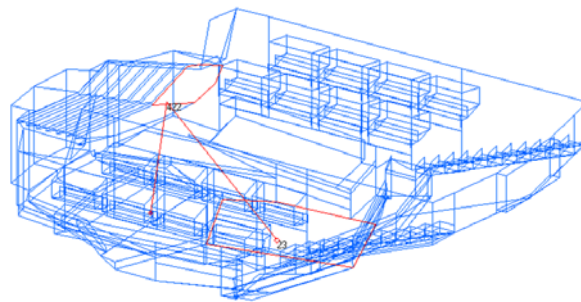


Figure 11 - Example of acoustic ways on stage explored

La altura media del techo con respecto a la plataforma del escenario es de 13,8 m. La altura mínima del techo de la figura 11 (a partir de la zona amarilla) es de 12,5 m. La altura máxima es de 15,25 m (en la última zona azul). El volumen ficticio de la zona orquesta es  $V = 2,660 \text{ m}^3$ , que corresponde, de acuerdo con Gade [9] para una  $ST_{\text{Early}} = -14,5 \text{ dB}$ , un valor que está cerca de lo que se encontró experimentalmente en 2001

En los años 2006-2007, iniciamos nuestra investigación por medio de cálculos de trazado de rayos.. En la figura 3 se puede observar que existen muchas reflexiones, pero éstas no pueden volver al músico. Por tanto, observamos que el músico no puede oírse a sí mismo.

Posteriormente, se realizó un análisis en profundidad de manera acústica con muchas pruebas ( $\approx 100$ ), que se muestra en las figuras 12 y 13.

Las emisiones de los músicos de la zona roja hacia el techo vuelven al escenario, en 1ª, 2ª y 3ª reflexión. Pero el sonido emitido desde la zona verde y azul nunca retorna al escenario. Ningún rayo sonoro vuelve al músico que lo había emitido ni tampoco a los músicos vecinos ni en primera, segunda y tercera reflexión dentro de los 100 ms indicados por Gade.

Examinando nuestros datos observamos que el techo tiene varios defectos. El primero quizás de construcción, puesto que en sentido transversal tiene una ligera doble pendiente en V. lo que motiva que el sonido emitido desde la zona verde se refleje sobre los anfiteatros laterales. Por otro lado el segundo defecto es que el techo correspondiente de la zona azul del escenario, o sea la zona donde esencialmente están los músicos de cuerda y el director, tiene un quiebro bastante profundo en la dirección longitudinal, posiblemente creado para mejorar la visión del escenario desde el anfiteatro 2. En este caso el sonido de los músicos emitido desde la zona azul también siempre está condenado a ir a platea, pero nunca al escenario.

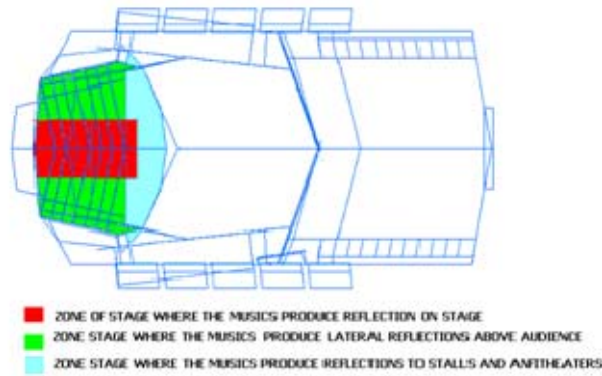


Figure 12 - Areas of the stage where the reflections from the ceiling reached the

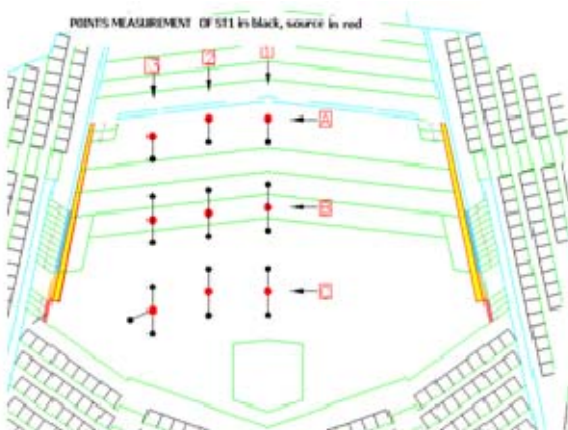


Figure 13 - Measurement points. The source position is IJ is the black point que está en la intersección de las filas A, B, C y las columnas marcadas de 1, 2 y 3. La notación IJ – F indicates a receiver point 1m in front of the source and IJ-B is a receiver point 1m behind the source. And IJ-F is a receiver point 1m lateral of the source.

Después de completar los cálculos de trazado de rayos, realizamos un conjunto de mediciones de STearly en los puntos, la mitad simétrica del escenario, como se muestra en la figura 15. La fuente sonora fue un dodecaedro omnidireccional y el receptor un micrófono a una altura de 1,2 m. situado en cada punto del escenario indicado en la figuras 13 y 14.

La separación entre la fuente sonora, colocada en cada punto de IJ, y el micrófono era de 1m, sea hacia delante F o bien hacia atrás detrás B tal como se indica en la figura 14. Los puntos de medición IJ fueron distribuidos sobre el escenario a lo largo del eje longitudinal. Debido a la naturaleza simétrica del escenario y de la sala, las mediciones se hicieron en sólo la mitad del área del escenario. Finalmente, en las figuras 14 y 15 se muestran los resultados obtenidos por zonas. Se obtuvo un valor medio de STearly = -14,8 dB. Como podemos ver en los valores distribuidos por zonas, tenemos STearly = -11,4 dB en la zona de los instrumentos de percusión, y para STearly = -17,8 dB en la zona de cuerdas y del director. El valor medio determinado del ST1 es muy similar al valor medio STearly en el Concertgebouw de Amsterdam [8].

ST1 by octaves from 250 to 2000 Hz

Sources Point	250	500	1000	2000	ST1 averaged	ST1 averaged zone
1A-F	-11.5	-11.6	-7.4	-6.5	-9.25	-11.47
2A-F	-10.2	-8.3	-8.5	-14.1	-10.28	
3A-F	-14.5	-17.7	-17.3	-10	-14.88	
1B-B	-14.7	-14.2	-11.8	-15.4	-14.03	-15.05
2B-B	-15.9	-17.9	-17.2	-17.1	-17.03	
3B-B	-13.9	-14.3	-15.1	-13.1	-14.10	
1B-F	-13.7	-15.2	-17.6	-11.5	-14.50	-13.53
2B-F	-16.9	-14.8	-10.3	-12.3	-13.58	
3B-F	-16.4	-10.4	-8.6	-14.7	-12.53	
1C-B	-16.5	-14.4	-16.8	-13.2	-15.23	-16.86
2C-B	-19	-20.2	-20.7	-16	-18.98	
3C-B	-17	-16.5	-15.5	-16.5	-16.38	
1C-F	-19.7	-17.3	-14.3	-14.6	-16.48	-17.22
2C-F	-17.1	-16.6	-17.5	-18.1	-17.33	
3C-F	-16.3	-18.1	-18	-19	-17.85	
3C-L	-16.2	-16.9	-15.5	-11.1	-14.93	-14.83
averaged overall on stage						

Figure 14 - Measurement results

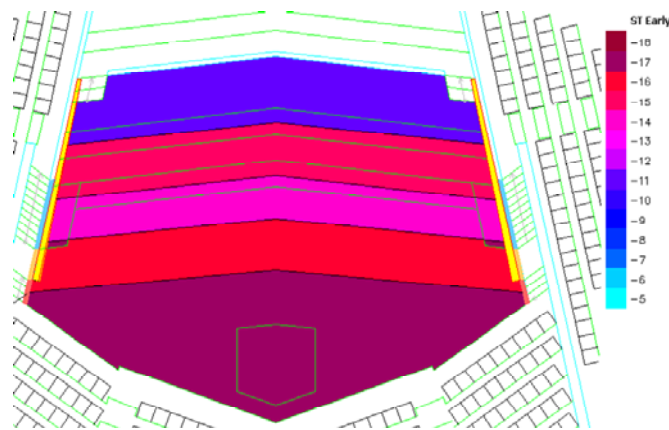


Figure 15 - ST<sub>early</sub> by zones on stage

Hemos encontrado que los valores obtenidos ST<sub>early</sub> siguen las incidencias geométricas del techo del escenario. El techo color azul tiene un fuerte aumento de la pendiente, por decisión arquitectónica, de modo que los espectadores sentados en los balcones laterales superiores pueden disfrutar de buena visión del escenario. Esta decisión de diseño, y otras análogas, produce resultados acústicos indeseados en el ST<sub>1</sub> en el escenario.

En la figura 10 perfil b) tenemos la solución al problema. Hemos subido 1m el perfil del techo del escenario y hemos seccionado este perfil con planos paralelos al escenario repartidos cada uno de ellos aproximadamente los mas cercanos al organo son aproximadamente de 1m y lo que van desde las cuerdas al director son de 2m.

**NOTA:** Siempre habíamos pensado que este valor medio ST<sub>1</sub>, medido en el escenario, era bueno y que los músicos estaban equivocados en sus valoraciones subjetivas, porque creíamos que los criterios de Gade eran más exactos por obedecer criterios científicos, además pertenecientes a una norma ISO. A partir del mes de Abril 2009 empezamos a entender este problema. Descubrimos que el criterio de Gade no es nada exacto.

### A. Findings:

1. En mediciones del ST<sub>early</sub> en el Auditorio de Barcelona efectuado en 2006-07 hallando el valor promedio de 17 puntos en el escenario era similar a la media de los tres puntos determinada en 2001. Estos dos resultados promedio para ST<sub>early</sub> son equivalentes a las de las salas de conciertos con mejor reputación del mundo. Pero la sensación acústica era tal que los músicos no podían escuchar las reflexiones de su propio conjunto ni incluso de su mismo sonido.

2. En la sala de conciertos de Barcelona, los valores mostrados el Stearly del escenario en las figuras 18 y 19 revelan que los instrumentos de cuerda y zona del director son los puntos más débiles. En Barcelona hay una buena correlación entre la incidencia de la geometría del techo con la acústica del escenario.

3. El sistema de medición propuesto por Gade no permite descubrir si un escenario es acústicamente adecuado. Observamos que podemos obtener un buen valor medio comparable a los mejores recintos, pero todavía tener una mala sensación acústica en el escenario. Hemos determinado que la medida STearly no tiene en cuenta la directividad de origen ni la dirección de la reflexión del sonido y no tiene en cuenta ni el efecto del eco flutter ni la focalización del sonido. Como resultado, de esta experimentación es que podemos tener una muy mala audición del sonido en un escenario pero a cambio tener unas mediciones excelentes.

4. Las mediciones efectuadas tradicionalmente en tres posiciones del escenario y hallando el valor medio [5] como indica la norma; no es suficiente o es mejorable. Es preferible hacer numerosas mediciones de ST1, o STearly, a lo largo del escenario en sentido longitudinal, que a lo mejor nos permite advertir la anomalía que tiene el techo del escenario de Barcelona. El conocimiento del ST1 por zonas permite como en nuestro caso determinar la causa del problema. Por esto estamos en contra de la estandarización del uso del valor medio.

## 6. CONCLUSIONS

L'Auditori de Barcelona fue diseñado antes del 1990 pero su construcción fue culminada en 1999. Esto quiere decir que su proyecto fue realizado sin medios informáticos, pero como la obra duró bastantes años por motivos económicos, y fue revisado con medios informáticos primero bastante elementales y posteriormente algo más sofisticados. Hemos efectuado una descripción bastante detallada de su diseño y de su variedad con relación a las existente de mayor renombre. Finalmente hemos efectuado las mediciones de la sala que vemos que cumple con satisfacción, respecto al criterio acústico, la mayoría de parámetros acústicos. Sus valores son comparables a las de las mejores salas de mayor reputación que hemos indicado anteriormente. No obstante hubo un problema acústico en el escenario que nos ha costado prácticamente diez años en determinar. Pues los valores medios determinados según el criterio de Gade siempre han sido buenos y se han correspondido prácticamente iguales a los de las mejores salas pero sus músicos nunca se oían a si mismos. Posiblemente este sea un error bastante común en muchas salas, pero que al ser la mayoría de menor tamaño pasa el problema un poco desapercibido. No obstante las salas surround tan frecuentes ahora, porque gustan a los Arquitectos, seguro también que los resultados del ST1 deben ser muy pobres. También es importante decir que resulta muy complicado averiguar cómo debe diseñarse la zona del escenario para que cumpla con una acústica adecuada. También vemos que siendo el criterio de Gade el único sistema de medir y evaluar si la acústica del escenario es buena o no, éste a veces no puede o no sabe esclarecer este problema. Por tanto creemos humildemente que debe abrirse una nueva línea de investigación que complete la tan fatigosa e importante investigación desarrollada por A.C.Gade desde el año 1989.

### APENDICE I:

Sean las ecuaciones las bien conocidas fórmulas de Beranek y Kosten:

$$T_{occ} = 0.16 V / (S_A \alpha_{occ} + S_R \alpha_R) \dots \dots \dots (I.1)$$

$$T_{unocc} = 0.16 V / (S_A \alpha_{unocc} + S_R \alpha_R) \dots \dots \dots (I.2)$$

A partir de ambas ecuaciones se deduce :

$$S_A (\alpha_{occ} - \alpha_{unocc}) = (0.16 V / T_{occ}) - (0.16 V / T_{unoc}) \dots \dots \dots (I.3),$$

$$S_A \Delta \alpha / 0.16 V = (1/T_{occ}) - (1/T_{unocc}) \dots \dots \dots (I.4),$$

Obteniéndose finalmente la siguiente expresión:

$$T_{occ} = T_{unoc} / \{1 + 6.14 \Delta \alpha S_A T_{unoc} / V\} \dots \dots \dots (I.5),$$

## 7. REFERENCES

1. H.Arau, (2002) Proceedings of the Institute of Acoustics, Imperial College London, 19-21 July, 2002.
2. M. Barron, (1993) Auditorium acoustics and architectural design. E&FN Spon, London.
3. ISODIS 3382: "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters" 1997.
4. ISODIS 3382: "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters" 2007.
4. H. Arau (1999) ABC de la Acústica Arquitectónica, CEAC (Barcelona), p.268, formula (7.102),(1).
5. H. Arau (1997). Variation of the Reverberation Time of places of public assembly with audience size. Building Acoustics, **4**, nº 2, 87-97.
6. J.S. Bradley (1991) A comparison of three classical concert halls. J. Acoust. Soc. Am. **89**, 1176-1192.
7. M. Barron and L-J.Lee (1988) Energy Relations in Concert Auditoria I, J.Acoust. Soc. Am. **84**, 618-628.
8. J.S. Bradley (1991) A comparison of three classical concert halls. J. Acoust. Soc. Am. **89**, 1176-1192.
9. L.L.Beranek (1996) How They Sound: Concert and Opera Halls. Acoust. Soc. Am. (New York).
10. Acoustics for Choirs and Orchestra platform. A.C.Gade. issued by Royal Swedish Academy of Music nº52,1986.