

3D-MODELIZACIÓN Y SIMULACIÓN ACÚSTICA DE RECINTOS ESPAÑOLES DE GRAN CAPACIDAD. EVALUACIÓN DEL TR

PACs.: 43.55.Gx. 43.55.Ka

San Martín, Ricardo; Machín, Jorge; Arana, Miguel

Institución: Universidad Pública de Navarra. Laboratorio de Acústica. Dpto. de Física.

Dirección: Campus de Arrosadía, s/n. 31008.

Población: Pamplona. Navarra.

País: España

Tel: 948 169568

Fax: 948 169565

E-Mail: marana@unavarra.es

ABSTRACT

In this paper, the first results of auralizARTE Project, developed by the Acoustic Group at the Public University of Navarra, which consists of the 3D digitalization and later acoustic simulation of Spanish theaters and auditoriums are presented. The project aims to "X-ray" (based on simulated estimates and technical characteristics of each room) the current state of the national network of performance venues, providing a database with its sound quality can be assessed by auralizations. In this first phase, the findings regarding reverberation obtained in 63 rooms with more than 1000 seats are analyzed.

RESUMEN

En esta comunicación se presentan los primeros resultados del proyecto auralizARTE, desarrollado por el grupo de Acústica de la Universidad Pública de Navarra, que consiste en la digitalización 3D y posterior simulación acústica de teatros y auditorios españoles. El proyecto pretende "radiografiar", en base a estimaciones simuladas y a características técnicas de cada recinto, el estado actual de la red de recintos escénicos nacionales, proporcionando una base de datos con la que pueda evaluarse su calidad acústica mediante auralizaciones. En esta primera fase, se analizan los resultados obtenidos en un total de 63 recintos con aforo superior a 1000 espectadores, relativos a la evaluación de la reverberación.

INTRODUCCIÓN

Es de sobra conocido el profundo estudio realizado a lo largo de muchos años por Leo L. Beranek sobre la recopilación de las características acústicas de un gran número de recintos escénicos (salas de concierto y de ópera) distribuidos por todo el mundo. Se recopilan en su muy conocido libro "Concert and Opera Halls: How They Sound" [1]. Establece una clasificación desde Categoría A+ (Superior) hasta Categoría C (Aceptable) en función de la evaluación subjetiva de expertos musicales y público. En base a las características geométricas y acústicas de tales recintos se pueden encontrar relaciones entre algunos parámetros acústicos y la categorización

de los recintos, con el siempre difícil objetivo de correlacionar magnitudes acústicas objetivas y cualificaciones acústicas subjetivas.

A nivel español, la fundación SGAE (Sociedad General de Autores y Editores) tiene abierta una página web (MIRE: Mapa Informatizado de Recintos Escénicos [2]) donde se aporta información, bastante completa, sobre múltiples recintos escénicos españoles. Actualmente (15/08/2015) tal página incluye un total de 134 recintos escénicos con aforo superior a 1.000 asientos. En un estudio previo [3] se llevó a cabo un estudio comparativo entre diferentes características geométricas y acústicas de 16 de tales recintos con los de la base de datos del citado trabajo de Beranek. Por otra parte, en otro PFC [4] se modelizaron con el programa Odeon [5] 63 recintos, escogidos por ser los que en dicho momento constaban en la página MIRE como recintos escénicos con capacidad superior a 1.000 asientos. Sobre estos 63 recintos hemos llevado a cabo diversos análisis acústicos previos a su auralización. Se presentan en esta comunicación resultados preliminares, especialmente sobre las diferentes estrategias de evaluación que sobre la reverberación del local realiza el programa Odeon. Las características geométricas básicas de estos recintos se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Recintos escénicos analizados (AC: año de construcción: AUC: año de última reforma; L-A-H: longitud, anchura y altura máximas)

Nº	Recinto	AC	AUR	Aforo	V, m ³	L, m	A, m	H, m
1	Teatro Principal. Zaragoza	1799	1987	1104	6942	34,7	18,0	19,7
2	Palau de la Música. Valencia	1832	1991	1226	15400	21,8	16,0	15,9
3	Gran Teatre del Liceu. Barcelona	1847	1999	2321	10916	37,2	24,0	18,8
4	Teatro Real. Madrid	1850	1997	1742	13843	45,1	30,3	26,4
5	Teatro de la Zarzuela. Madrid	1856	1998	1242	5739	32,7	21,2	14,2
6	Teatro Romea. Murcia	1862	1988	1204	4688	32,6	17,6	14,5
7	Teatro Calderón de la Barca. Valladolid	1864	1999	1115	8123	33,9	23,0	17,2
8	Teatro Miguel de Cervantes. Málaga	1870	1987	1058	7801	41,4	21,2	20,3
9	Teatro Arriaga. Bilbao	1890	1986	1502	6646	32,2	24,6	12,8
10	Teatro Campoamor. Oviedo	1892	1998	1440	8949	37,5	24,1	20,6
11	Teatro Jovellanos. Gijón	1899	1995	1202	7231	36,0	19,4	19,5
12	Teatro Apolo. Barcelona	1904	1993	1016	4034	28,5	24,0	9,9
13	Palau de la Música Catalana. Barcelona	1908	2004	2138	11018	53,3	24,1	17,6
14	Teatro Circo. Orihuela	1908	1996	1200	9206	39,3	35,8	18,1
15	Gran Teatro Falla. Cádiz	1910	1990	1214	9990	38,6	28,3	16,1
16	Teatro Olympia. Valencia	1915	1997	1055	6885	47,2	24,3	11,2
17	Teatre Victòria. Barcelona	1916	1992	1224	5588	35,4	22,3	13,1
18	Teatre Municipal El Jardí. Figueres	1917	1991	1057	7738	43,1	19,5	13,4
19	Teatro Principal Antzokia. Vitoria	1918	1992	1042	5927	26,2	19,0	16,0
20	Teatre Tívoli. Barcelona	1919		1640	7655	44,8	23,3	16,6
21	Teatro Lope de Vega. Madrid	1924	1997	1434	10501	38,0	26,6	18,1
22	Teatro Olimpia. Huesca	1925	2008	1159	4025	27,7	18,2	11,9
23	Teatro Villamarta. Jerez de la Frontera	1928	1996	1200	7522	29,0	22,8	14,6

24	Teatro Coliseum. Madrid	1932	2001	1451	12705	37,7	29,3	25,0
25	Teatro Nuevo Apolo. Madrid	1932	1988	1275	8472	45,3	16,5	24,9
26	Teatro Gayarre. Pamplona	1932	1999	1063	4888	25,9	21,7	15,4
27	Sala Capitol. Madrid	1933	1994	1373	10203	32,9	30,9	18,7
28	Teatro Gran Vía. Madrid	1944		1020	4652	29,7	18,4	11,7
29	Cine-Teatro Filarmónica. Oviedo	1944	2004	1221	6663	29,5	23,0	17,4
30	Teatro Principal. Requena	1945	1995	1432	6826	44,4	22,5	10,8
31	Teatro Avenida. SD de la Calzada	1951		1103	3037	28,4	22,8	9,3
32	Sala Teobaldo Power. La Orotava	1953	1990	1002	5013	34,6	21,2	14,2
33	Teatro Cine Montecarlo. Buñol	1953	1988	1032	5692	41,7	17,3	11,1
34	Teatre Municipal La Faràndula. Sabadell	1955	2001	1069	8462	43,0	26,5	17,0
35	Teatro del IES Universidad Laboral. Gijón	1956		1331	7801	32,6	31,1	18,1
36	Teatro del Parque de Atracciones. Madrid	1969	1999	2533	13811	46,0	82,4	11,6
37	Sala Magna. Auditorio. Palma de Mallorca	1969		1739	10750	42,2	25,1	21,2
38	Auditorio. Palacio de Congresos. Madrid	1970		1909	14623	44,6	54,6	16,8
39	Auditorio Manuel de Falla. Granada	1978	1987	1313	11730	52,5	27,0	19,3
40	Teatre La Passió - Olesa de Montserrat	1987		1499	13293	42,3	56,6	13,3
41	Auditorio Nacional de Música. Madrid	1988		2324	29279	39,0	28,0	18,8
42	Sala Ángel Brage. Santiago de Compostela	1989		1030	8940	42,1	26,4	12,0
43	Sala Argenta. Santander	1991		1642	31003	61,8	41,7	29,9
44	Sala García Lorca. Granada	1992		1999	11218	38,9	54,4	11,6
45	Sala Mozart. Zaragoza	1994		1992	23311	59,2	46,2	20,4
46	Sala Narciso Yepes. Murcia	1995		1838	12574	42,7	52,3	18,2
47	Sala Santiago. Santiago de Compostela	1995		1580	22424	72,6	36,7	13,2
48	Auditorio Municipal. Puertollano	1995		1118	9232	38,8	19,9	19,6
49	Sala Alfredo Kraus. Las Palmas de GC	1997		1646	17322	55,4	35,3	19,1
50	Auditorio I, Pal. de Cong. Valencia	1998		1481	10051	37,3	33,4	14,0
51	Sala Sinfónica - L'Auditori - Barcelona	1999		2203	20538	55,8	32,9	20,5
52	Auditorio Euskalduna. Bilbao	1999		2165	26333	57,9	34,0	25,3
53	Auditorio Príncipe Felipe. Oviedo	1999		1504	15345	47,8	28,8	19,6
54	Auditorio Kursaal. San Sebastián	1999		1806	14148	51,0	27,8	18,4
55	Teatro Auditorio. San Lorenzo del Escorial	2000		1065	6841	36,3	27,2	16,1
56	Auditorio de la Univ. Carlos III. Leganés	2001		1050	11653	44,2	31,9	21,0
57	Centro de las AE y de la música. Salamanca	2002		1434	11394	43,0	26,4	15,8
58	Sala Principal, Auditorio. León	2002		1150	11901	55,3	25,1	14,6
59	Sala Buero Vallejo. Guadalajara	2002		1003	9377	43,8	28,0	13,3
60	Baluart. Pamplona	2003		1568	15887	53,1	29,8	19,1
61	Teatro Auditorio. Roquetas de Mar	2004		1305	10607	41,5	36,3	16,4

62	Auditorio Pilar Bardem. Rivas Vaciamadrid	2005		1008	7377	27,8	51,0	15,5
63	Pal. de Cong. Expo Aragón. Zaragoza	2008		1443	10283	49,7	31,6	12,5

EVOLUCIÓN TEMPORAL DE VOLÚMENES Y AFOROS.

A lo largo de los años se ha producido una evolución musical, tanto sinfónica como operística. Tal evolución ha estado íntimamente influida por los recintos disponibles para su representación, influyendo cada una de ellas en la otra. Hemos querido representar la evolución histórica de los recintos escénicos, tanto en los internacionales como en los españoles, con el objetivo de observar (si se produce) alguna tendencia. La figura 1 muestra la evolución temporal tanto de los aforos como de los volúmenes de los recintos españoles. La figura 2 muestra la evolución temporal tanto de los aforos como de los volúmenes de los recintos internacionales analizados en la referencia [1]. En estas gráficas, no se ha escalado el eje "y" para no distorsionar las mismas.

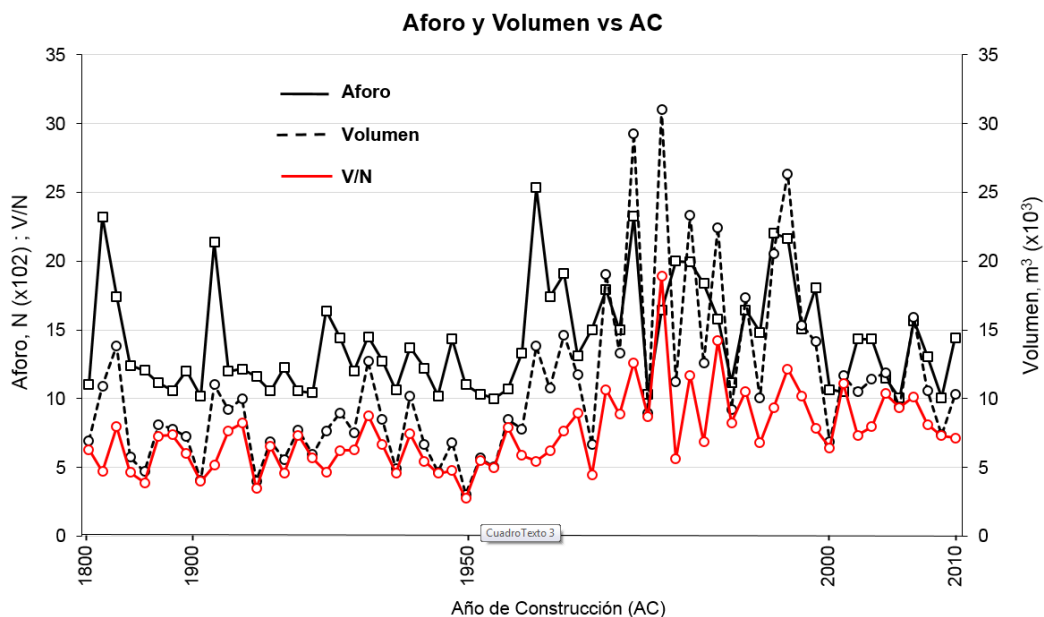


Fig. 1. Aforo, Volumen y V/N (m^3/per) versus año de construcción en recintos españoles

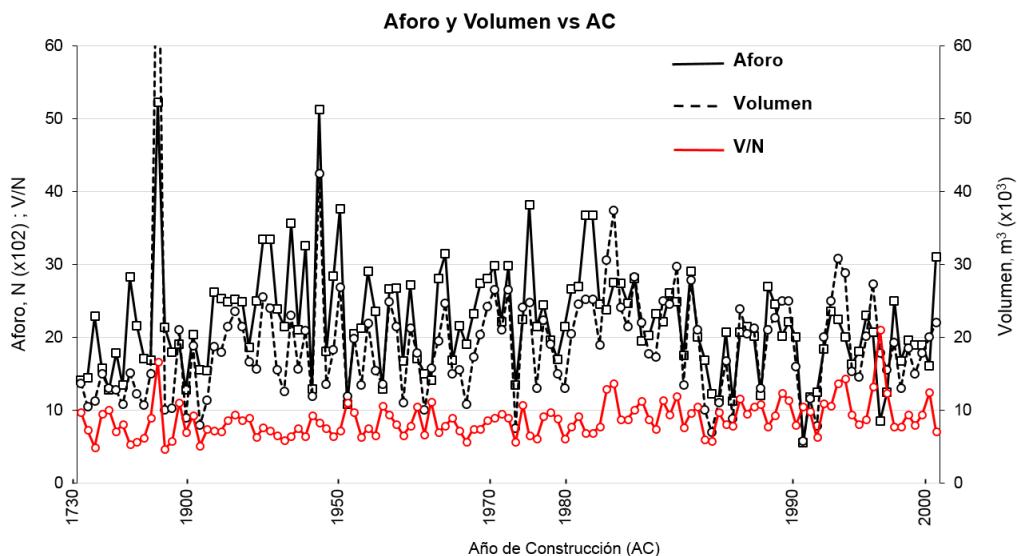


Fig. 2. Aforo, Volumen y V/N (m^3/per) versus año de construcción en recintos internacionales

El volumen promedio de los recintos españoles analizados es de 10.884 m³ con desviación estándar de 5.951 m³. Los correspondientes valores para los recintos internacionales analizados son, respectivamente, 19.041 m³ y 8.902 m³. Una primera conclusión es que los volúmenes de los recintos escénicos internacionales (su valor promedio) analizados casi duplica al valor de los recintos escénicos españoles. Por otra parte, respecto a los aforos, el valor promedio de los recintos españoles es de 1.426, siendo de 2.205 para los internacionales. El volumen por persona promedio para los recintos españoles es de 7,43 m³/persona. El correspondiente a los recintos internacionales es de 8,72 m³/persona.

ANÁLISIS DE LOS DIFERENTES T_R EVALUADOS POR ODEON

Odeon presenta dos métodos de cálculo de la caída energética en una sala (EDC, Energy-time Decay Curve):

1. Quick Estimate (disponible desde el menú Material List).

Este es el método más rápido. Permite una rápida evaluación del efecto que produce el cambio de materiales y debiera ser usado únicamente como una herramienta para resultados preliminares.

2. Global Estimate. Ofrece resultados más preciso que el anterior.

Quick Estimate.

Este método estima un coeficiente de absorción medio, el cual se introduce en las fórmulas de cálculo (Sabine, Eyring o Arau-Puchades) para dar una estimación del tiempo de reverberación. En vez de tomar, simplemente, las áreas de las diferentes superficies y multiplicarlas por los correspondientes coeficientes de absorción (para obtener la absorción total de la sala) Odeon lanza *partículas* (rayos) desde la fuente, asumiendo condiciones difusas (y, por tanto, reflejándolas en direcciones aleatorias) llevando una cuenta de cuántas veces chocan con cada superficie. Las superficies con mayor frecuencia de choques conllevan un mayor peso en el coeficiente de absorción medio global de la sala. Las superficies que no son detectadas en el proceso del trazado de rayos son excluidas en todos los cálculos y las superficies que son golpeadas por ambas caras se incluyen dos veces en los cálculos. El coeficiente de absorción medio viene dado por:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i S_i \alpha_i}{\sum_i S_i} \quad [1]$$

Donde S_i y α_i son, respectivamente, el área y coeficiente de absorción de la i -ésima superficie de la sala. El coeficiente de absorción media modificado tal como lo experimenta el trazado de rayos es:

$$\bar{\alpha}_i = \frac{\sum_i H_i \alpha_i}{\sum_i H_i} \quad [2]$$

Donde H_i es el número de choques con la i -ésima superficie de la sala. Odeon introduce ambos coeficientes de absorción en las fórmulas de Sabine y Eyring para calcular los tiempos de reverberación. El valor clásico (Ec. 1) se utiliza para obtener los tiempos de reverberación denominados como T_r de Sabine y de Eyring mientras que el modificado (Ec. 2) se utiliza para obtener los tiempos de reverberación denominados T_r de Sabine y Eyring *modificados*. Los cálculos de T_r requieren un valor para el volumen de la sala, valor que Odeon estima a partir del *recorrido libre medio* experimentado por el trazado de rayos, usando la conocida relación:

$$l = \frac{4V}{S} \quad [3]$$

Donde S es la superficie total activa de la sala. En las últimas versiones del programa, el proceso de trazado de rayos seguido para estimar el volumen de la sala asume coeficientes de scattering unidad para todas las superficies (no los coeficientes de scattering utilizados en la *lista*

de materiales) puesto que la fórmula del recorrido libre medio (Ec. 3) está basada en hipótesis de campo difuso. El valor de S usado es la suma de las áreas de las superficies definidas como *no transparentes*, teniendo en cuenta si una, otra o (por supuesto) ninguna de las caras de una superficie son visibles dentro de la sala.

Criterio de Convergencia.

Con respecto al *criterio de convergencia*, un cierto número de rayos deben emitirse y ser seguidos por la sala para obtener una estimación estable. Se continúa radiando rayos en direcciones aleatorias hasta que el valor del tiempo de reverberación se mantiene dentro del 1% para, al menos, 50 rayos. Al final de la ejecución, se almacena el dato de cuantas veces cada superficie ha sido golpeada por los rayos. Entonces, si se asignan nuevos materiales a las superficies, los tiempos de reverberación se pueden recalcular instantáneamente, sin necesidad de repetir el trazado de rayos.

Global Estimate.

Este método estima los tiempos de reverberación T_{20} y T_{30} usando el método de Schröder [6] y el recorrido libre medio, generando estimaciones de la curva de caída. Los rayos se emiten desde la fuente en direcciones aleatorias y se reflejan utilizando el '*vector based scattering method*'. Odeon registra la pérdida de energía de cada rayo en función del tiempo, originada tanto por la absorción de las superficies de la sala como por el aire. Sumando sobre un gran número de rayos, se obtiene la función de decaimiento energético. Todo resulta análogo a la conocida curva de caída de Schröder excepto que, en este caso, no se evalúa para un receptor específico. Este proceso de suma se puede llevar a cabo con tantos rayos como se desee.

Evaluación de los resultados.

Se derivan los resultados cuando las curvas de caída se alisan. Por lo general, los valores del T_{30} son mayores que los del T_{20} . Si los resultados son los opuestos, es muy probable que el número de rayos usados fuera insuficiente y conviene recalcular (opción disponible en la parte inferior como *Recalculate*). Asimismo, si los valores aportados para el T_r son *.**, la longitud de la respuesta al impulso (*Impulse Response Length*) definida en la configuración de la sala (*Room Setup*) es demasiado corta para obtener los parámetros de la reverberación.

Análisis de métodos en los recintos modelizados.

En los recintos españoles modelizados que se han utilizado en este Proyecto, se han obtenido los resultados del tiempo de reverberación por diferentes vías. Nos centraremos en el parámetro T_{30} (Sabine y Eyring) para el análisis que sigue.

En primer lugar, se han obtenido los T_{30} tanto por el método Quick Estimate como por el método Global Estimate, es decir se dispone de los valores T_{30} Sabine, T_{30} Eyring, T_{30} Sabine modificado y T_{30} Eyring modificado, a los que denominaremos, respectivamente, $T_{30,S}$, $T_{30,E}$, $T_{30,Sm}$ y $T_{30,Em}$. Incluiremos, asimismo el tiempo de reverberación evaluado mediante el método Global Estimate, T_{30GE} .

Por otra parte, también se dispone del valor del T_{30} en un receptor central de la sala, obtenido como respuesta al impulso en tal receptor. Lo denominaremos como $T_{30,Rcentral}$. Finalmente, se obtuvieron los T_{30} en mallas de receptores ubicadas en la audiencia con la precisión (aproximada) de un receptor en cada asiento. A estos valores, promediados para todos los receptores de la malla, les denominaremos $T_{30,Max}$.

Previo a la comparación de los resultados para intentar contestar a la pregunta de cuál es la fiabilidad de los resultados ofrecidos por los diferentes métodos, uno debiera conocer cuál es el resultado *exacto*, es decir, el resultado *experimental* preciso. Obviamente, no se dispone de tales datos, amén de ser también discutible la precisión-incertidumbre de los resultados experimentales. Por tanto, el análisis se hará sobre los resultados obtenidos por el programa

(con diferentes métodos) y los diferentes criterios para evaluar el tiempo de reverberación de una sala.

Asumiremos como valor más representativo del tiempo de reverberación de una sala el promediado sobre toda la malla de receptores, es decir, $T_{30, \text{Mav}}$. Compararemos el resto de descriptores del tiempo de reverberación con este valor, para cada sala.

Dispersión global

Calculando la dispersión (desviación estándar de la variable $T_{30,i}$ respecto al *valor verdadero* $T_{30 \text{Mav}}$) para los 63 recintos modelizados, obtenemos la siguiente gráfica (Fig. 3):

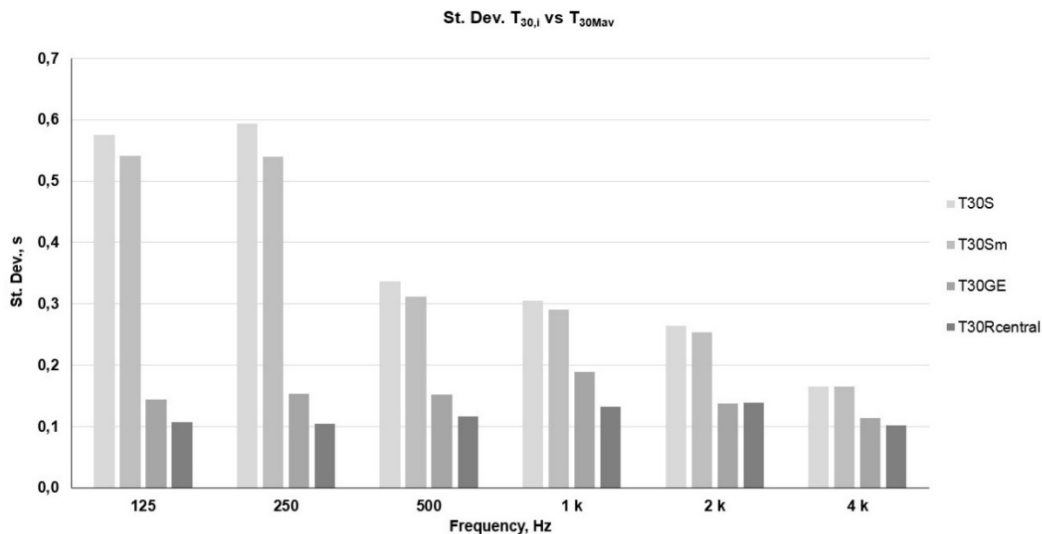


Fig. 3 Relación estimadores Quick Estimate, Global Estimate y Receptor Central

Como se observa claramente, los estimadores del Quick Estimate ($T_{30,S}$ y $T_{30,Sm}$) son peor estimadores que el Global Estimate (T_{30GE}) y el $T_{30Rcentral}$, especialmente en bajas frecuencias (125 y 250 Hz). Los otros dos estimadores afinan mucho mejor el tiempo de reverberación. Además, las desviaciones son muy elevadas. La siguiente tabla (Tabla 2) muestra, por frecuencias, los valores promedios de los $T_{30, \text{Mav}}$ de todas las salas, las desviaciones estándar de los descriptores y tales desviaciones expresadas en número de veces el jnd (*just noticeable difference*) del valor promedio, es decir, 5 % del valor.

Tabla 2 Valores promedios de los $T_{30, \text{Mav}}$, desviaciones estándar de los descriptores (en segundos) y desviaciones expresadas en número de veces el jnd del valor promedio

Freq., Hz	125	250	500	1 k	2 k	4 k
$\bar{T}_{30 \text{Mav}}$, s	1,99	2,04	1,80	1,63	1,50	1,24
St.Dev. T_{30S} , s	0,57	0,59	0,34	0,30	0,26	0,17
jnd _s	5,8	5,8	3,7	3,8	3,5	2,7
St.Dev. T_{30Sm} , s	0,54	0,54	0,31	0,29	0,25	0,16
jnd _s	5,4	5,3	3,5	3,6	3,4	2,6
St.Dev. T_{30GE} , s	0,14	0,15	0,15	0,19	0,14	0,11
jnd _s	1,5	1,5	1,7	2,3	1,8	1,8
St.Dev. $T_{30Rcentral}$, s	0,11	0,10	0,12	0,13	0,14	0,10
jnd _s	1,1	1,0	1,3	1,6	1,8	1,6

Nuestra conclusión sobre los resultados obtenidos es la siguiente. La mayor desviación de los estimadores $T_{30,S}$ y $T_{30,Sm}$ debe ser atribuida a que las hipótesis de campo difuso no se cumplen adecuadamente (suponiendo que el descriptor $T_{30, \text{Mav}}$ es el valor más preciso). Por otra parte, el

propio procedimiento de estimación para el T_{30GE} (tal como se explica en el manual) es, realmente, parecido al promedio llevado a cabo para el cálculo del T_{30Mav} .

Valores individuales.

Para concluir este apartado, presentaremos la gráfica (Figura 4) de las desviaciones para cada uno de los recintos, de cada estimador frente al T_{30Mav} y para la banda de frecuencia de 1 kHz. Los recintos están ordenados por orden creciente de desviación del $T_{30Rcentral}$ y se expresan en % de desviación. Tal gráfica vuelve a corroborar los mejores ajustes de los estimadores T_{30GE} y $T_{30Rcentral}$, así como el similar comportamiento de los estimadores $T_{30,S}$ y $T_{30,Sm}$, mucho peor estimadores, a su vez, que los anteriores.

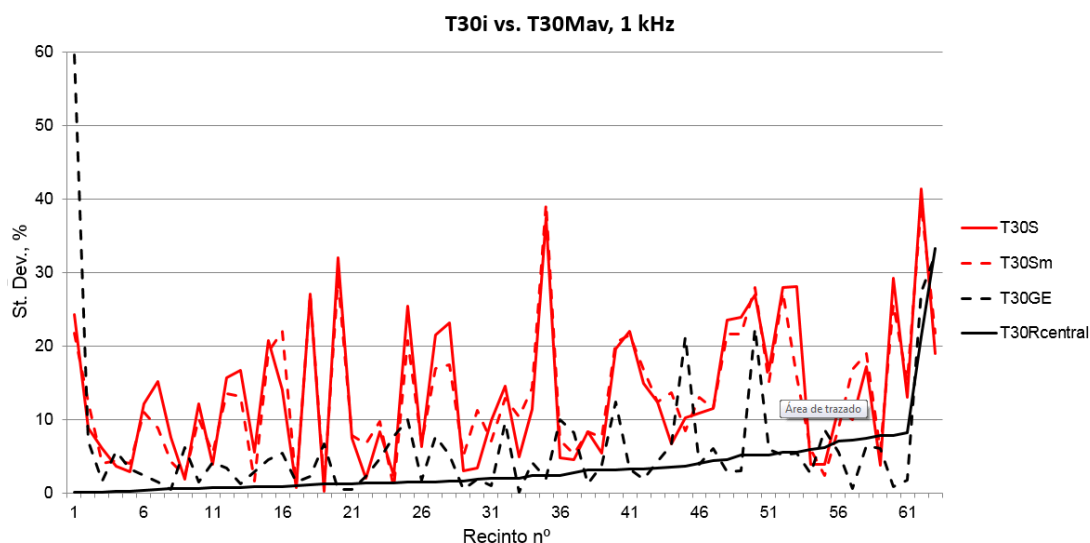


Fig. 4 Desviaciones de los estimadores, para cada sala, en la banda de 1 KHz

CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo la modelización de 63 recintos escénicos españoles con aforo superior a 1.000 personas con el programa Odeon, como paso previo a la auralización de los mismos. De los diferentes métodos que utiliza este programa para evaluar la reverberación del local (y asumiendo como valor más preciso el valor promedio de los puntos del mallado de receptores con precisión de un asiento) hemos observado que el valor obtenido del tiempo de reverberación para un punto central del mallado resulta el más preciso para valorar la reverberación del local. La estrategia utilizada por el método 'global estimate' (si bien menos precisa en sus resultados que el procedimiento anterior) mejora notablemente los resultados aportados por las estrategias del 'quick estimate' (básica y modificada)

REFERENCIAS

- [1] Leo L. Beranek, *Concert Halls and Opera Houses: How They Sound*, Springer, N.Y. 2004
- [2] <http://www.mirem.net/web/mireinicio.php>
- [3] Laura Ruiz Domínguez, *Comparación de resultados obtenidos mediante procedimientos experimentales y computacionales en la caracterización acústica de recintos*, PFC, Laboratorio de Acústica, Dpto. de Física, UPNA. Abril, 2015
- [4] Juan Cetina Panzano, *Teatros y auditorios de gran capacidad. Características técnicas y acústicas*, PFC, Laboratorio de Acústica, Dpto. de Física, UPNA. Febrero, 2015
- [5] ODEON: *room acoustics program*. User manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions. 2015
- [6] Schroeder M.R., *New method of measuring reverberation time*, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 37(3), 409-412, 1965.