

## VARIACIÓN ESPACIAL DEL PARÁMETRO $T_{30}$ Y SU INFLUENCIA EN LA CARACTERIZACIÓN DE UNA SALA.

PACS: 43.55.Cs

Arregui, A.; Machín, J.; San Martín, R.; Arana, M.  
Universidad Pública de Navarra. Departamento de Física.  
Campus de Arrosadía. 31006. Pamplona. Spain  
Tel.: 948 169568  
Fax: 948 169565  
E-mail: marana@unavarra.es

### ABSTRACT

The ISO 3382-1 standard establishes the guidelines concerning both the numbers of source and receiver positions to be used in order to characterize special rooms. The standard allows the spatial average for the parameter  $T_{30}$ . Nevertheless-and depending of the spatial variability of the results, the uncertainty of the result (or level of confidence) can be different. In this paper the spatial variance is analyzed from measurements carried out in all seats (375) of the new auditorium at the Navarre Music Conservatory (Pamplona, Spain). Measurements were carried out for three different source positions.

### RESUMEN

La norma ISO-3382 establece las directrices para caracterizar una sala de espectáculos, fijando un número de receptores según la capacidad de la sala. La norma permite el promediado espacial para el parámetro  $T_{30}$ . Sin embargo, dependiendo de la variabilidad espacial (desviación estándar) de los resultados, la incertidumbre del resultado ó nivel de confianza del mismo puede ser diferente. En la presente comunicación se analiza tal variabilidad espacial tras medir dicho parámetro en todos los asientos (375) del nuevo Auditorio del Conservatorio Superior de Música de Pamplona. Tales medidas se han realizado con tres posiciones diferentes de fuente.

### 1. INTRODUCCIÓN.

La Norma ISO 3382-1:2009 "Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos" [1] especifica los métodos de medición del tiempo de reverberación y de otros parámetros acústicos en salas de espectáculos. Describe el procedimiento de medición, la instrumentación requerida y el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo. Aunque el tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ) es el indicador más importante, también se reconocen otros parámetros relacionados con los niveles relativos de presión acústica, cocientes

energéticos próximos/tardíos, fracciones de energía lateral y funciones de correlación cruzada inter-aural. Estos son concretamente los parámetros: EDT, G,  $C_{80}$ ,  $D_{50}$ ,  $T_s$ , STI,  $J_{LF}$ ,  $J_{LFC}$ ,  $IACC_s$  y  $ST_s$ , indicados en los Anexos A, B y C de la Norma, siendo tales anexos informativos, no constituyendo una parte formal de las especificaciones de la misma.

Así como los requerimientos del equipo de medición son los mismos para todos los parámetros, el número de posiciones de fuente y de receptor cambia si se quiere medir el tiempo de reverberación o el resto de parámetros. Para el tiempo de reverberación se deben utilizar, al menos, dos posiciones de fuente. En cuanto a las posiciones de receptor, deben ser posiciones representativas de la totalidad del recinto. Si las partes de este se comunican razonablemente igual las unas con las otras, bastarán tres o cuatro posiciones de receptor. Para el resto de parámetros se deberá medir con al menos 3 posiciones de fuente. El número de posiciones de receptor variará en función del número de asientos del auditorio (oscilando entre 6, 8 ó 10 posiciones), tal y como indica la Tabla A.2 de la Norma. La presentación de los resultados también difiere si se trata del tiempo de reverberación o del resto de parámetros: para el tiempo de reverberación, los resultados medidos (para el rango de posiciones de fuente y de micrófono utilizadas) se pueden combinar, ya sea para zonas identificadas por separado, ya sea para el conjunto del recinto a fin de obtener valores de promediado espacial. Tal promediado se obtiene calculando la media de los tiempos de reverberación individuales para todas las posiciones independientes de fuente y de micrófono. Para el resto de parámetros, la Norma dice que "no se deberían promediar" sobre la totalidad de las posiciones de micrófono de una sala, porque estas magnitudes describen las condiciones acústicas locales.

Para analizar si los requerimientos que la Norma ISO 3382-1:2009 establece son los más adecuados, se ha procedido a la caracterización del auditorio del Conservatorio Superior de Música de Navarra, en Pamplona, con una capacidad de 375 butacas [2]. Se realizaron medidas con 3 posiciones de fuente y 375 posiciones de micrófono (en todas y cada una de las butacas) para los parámetros monoaurales. Para parámetros binaurales y de energía lateral, las mediciones se realizaron con una posición central de fuente y 375 posiciones de micrófono (una por cada butaca). El objetivo del presente trabajo es (a partir del análisis de tan exhaustiva campaña de medidas) aclarar si tiene sentido hablar de la caracterización de una sala mediante un único valor, así como evaluar si los requerimientos en cuanto a posiciones de fuente y micrófono que establece la Norma son escasos, demasiado estrictos o justos, al menos para el caso del auditorio a estudio.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los dispositivos experimentales utilizados en las medidas fueron acordes con los requerimientos de la norma. Un PC Toshiba provisto de interface de audio Digidesign VX con software WinMLS 2004 Professional, amplificador Electro-Voice Q44-II (2x450W), altavoz dodecaédrico DO12, fuente de alimentación de ocho canales Norsonic tipo 335, micrófonos GRAS 40AC omnidireccionales, termómetro, higrómetro y cableado tipo LEMO con conectores SpeakOn. Como señal de excitación, se utilizaron sweeps de 20 s de duración.

El auditorio (Fig. 1) tiene un volumen de 4.414 m<sup>3</sup> y capacidad para 375 personas. El área de audiencia se divide en dos partes, platea (273 asientos) y palcos (102 asientos). Ambas están separadas por un pasillo de 2 metros de ancho. Para las medidas, la fuente dodecaédrica se colocó en tres posiciones diferentes del escenario (Fig. 2) a una altura de 1.5 m. Los micrófonos se colocaron, en el centro de cada asiento, a altura de 1.2 m sobre el suelo.

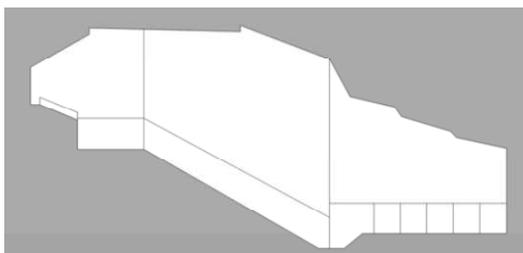


Fig. 1: Perfil e interior del auditorio.

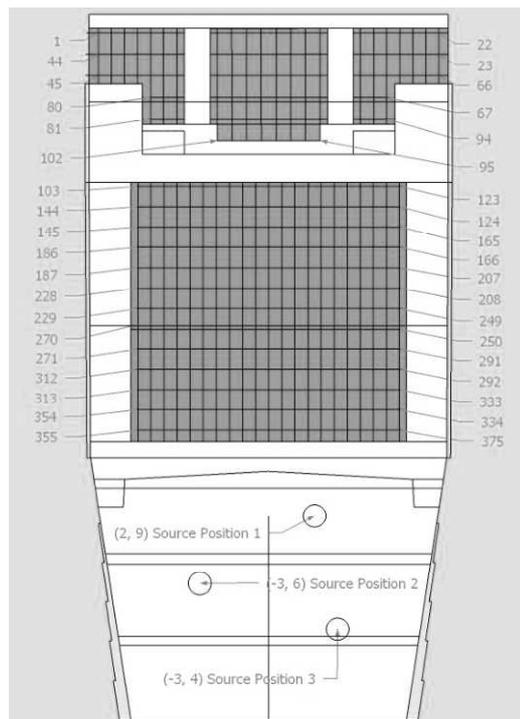


Fig. 2: Disposición de fuentes y receptores

### 3.- RESULTADOS

#### 3.1 Resultados Globales.

La Tabla 1 muestra la media y desviación estándar (poblacional) de las 375 butacas, por cada posición de altavoz (SP). Cuando en SP aparezca más de un número, quiere decir que el resultado expuesto es la media de las posiciones que indica. Por ejemplo: Source Pos: 2\_3 quiere decir que se promedia para cada butaca el valor obtenido con el altavoz en la posición 2 y en la posición 3.

Tabla 1.- medias y desviaciones poblacionales para el tiempo de reverberación,  $T_{30}$ .

Par.	T30																	
	125		250		500		1 k		2 k		4 k		8 k		MID			
SP	$\mu$	$\sigma$	max	min														
1	1,56	0,07	1,79	0,05	1,79	0,04	2,05	0,03	2,38	0,02	2,54	0,03	1,95	0,03	1,92	0,03	1,99	1,84
2	1,53	0,07	1,77	0,05	1,79	0,04	2,04	0,03	2,37	0,02	2,51	0,02	1,91	0,02	1,91	0,02	2,00	1,84
3	1,55	0,07	1,78	0,06	1,79	0,04	2,04	0,03	2,38	0,02	2,53	0,02	1,95	0,03	1,91	0,03	2,01	1,84
1_2	1,54	0,05	1,78	0,04	1,79	0,03	2,04	0,02	2,38	0,02	2,53	0,02	1,93	0,02	1,92	0,02	1,96	1,87
1_3	1,55	0,05	1,78	0,04	1,79	0,03	2,04	0,02	2,38	0,02	2,54	0,02	1,95	0,02	1,92	0,02	1,98	1,86
2_3	1,54	0,05	1,77	0,04	1,79	0,03	2,04	0,02	2,37	0,02	2,52	0,01	1,93	0,02	1,91	0,02	1,98	1,87
1_2_3	1,55	0,04	1,78	0,03	1,79	0,02	2,04	0,02	2,38	0,01	2,53	0,01	1,94	0,02	1,92	0,02	1,97	1,87

Observando los valores de las medias, se comprueba que los resultados para el parámetro  $T_{30}$  son prácticamente idénticos (diferencias de una pequeña fracción del jnd correspondiente) para todas las bandas de frecuencia, independientemente de la fuente o combinación de ellas que se elija. Analizando por frecuencias, las centrales (500, 1000 y 2000 Hz) son las que menos se diferencian (diferencia máxima de 0,01 segundos). La banda donde se obtiene una mayor diferencia es la de 8 kHz, en la que el máximo y mínimo valor se obtiene con las posiciones de fuente 1 y 2, respectivamente, cuya diferencia es de 0,04 segundos. Este valor es, todavía, inferior a medio jnd, es decir, imperceptible por el oído humano. Para el valor medio (MID, promedio de las bandas de 500 y 1000 Hz) los resultados oscilan entre 1,91 y 1,92 segundos

dependiendo de la fuente elegida. Las desviaciones estándar disminuyen cuando el número de posiciones de fuentes utilizadas se incrementa. La banda de 125 Hz es la que presenta mayores desviaciones.

Asumiendo que valores cuya diferencia es inferior a un jnd del valor del parámetro son indistinguibles, podemos concluir que para el tiempo de reverberación (en cualquier banda de octava), el resultado de la media de las 375 butacas sería el mismo tanto con una, como con dos y tres posiciones de fuente.

### 3.2 Variabilidad Espacial

La norma establece que, una vez realizadas las medidas del tiempo de reverberación en los puntos de las zonas que se han considerado representativas, se evalúe el promedio aritmético de los valores obtenidos, bien por bandas de frecuencia, bien para el parámetro  $T_{mid}$ . Teniendo en cuenta que nuestras medidas son exhaustivas, postularemos como *valor real* (al menos, el de mayor consistencia) para el tiempo de reverberación de nuestro local el promedio aritmético de las 375 butacas, para 3 posiciones de fuente ya que es el que toma en cuenta todos los valores. Tal valor es la media poblacional  $\mu$ .

#### 3.2.1 $T_{mid}$

Tomando las posiciones de fuente 1, 2 y 3 por separado, el porcentaje de receptores ( $N=375$ ) cuyo valor del  $T_{mid}$  se encuentra dentro de  $\mu \pm 0,5$  jnd es del 93, 95 y 95%, respectivamente. Incluso para las posiciones de fuente donde se dan las mayores diferencias (posiciones de fuente 1 y 3) ningún receptor se diferencia en más de 1 jnd. Este resultado muestra la gran homogeneidad espacial de tal parámetro, independientemente de la posición de fuente seleccionada. Asumiendo como indistinguibles diferencias inferiores a 1 jnd, se concluye que (al menos para nuestro local a estudio) el valor del  $T_{mid}$  es *idéntico* en todas las butacas.

Si tomamos los valores del  $T_{mid}$  promediados con dos posiciones de fuente, el porcentaje de receptores ( $N=375$ ) cuyo valor del  $T_{mid}$  se encuentra dentro de  $\mu \pm 0,5$  jnd es del 99, 98 y 99%, para los pares de posiciones de fuente 1-2, 1-3 y 2-3, respectivamente. Por supuesto, ninguna diferencia llega a superar 1 jnd. Las diferencias entre los resultados obtenidos con promediado de dos fuentes y con el valor *real* (promedio de las tres fuentes) es imperceptible.

#### 3.2.2 Tiempo de reverberación en bandas de octava.

En la banda de octava de 125 Hz es donde se producen las mayores variaciones espaciales, tal como muestra la desviación estándar de la Tabla 1. La figura 3 muestra la variación espacial para el promediado de las posiciones de fuente 1-2. El 48% de los receptores difieren más de 1 jnd del valor de  $\mu$ . Como era de esperar, el promediado con 3 fuentes (1-2-3) disminuye la variabilidad espacial y son el 35% de las butacas las que se diferencian en más de 1 jnd del valor de  $\mu$  (Fig. 4). Las grandes diferencias entre zonas invitan a cuestionar la posibilidad de dar un solo valor del tiempo de reverberación en 125 Hz para toda la sala.

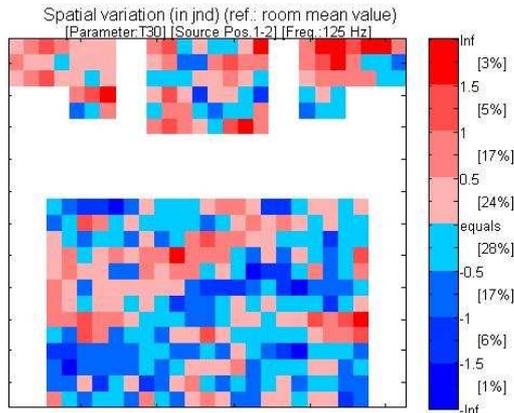


Fig.3. Posición 1-2,  $T_{125\text{ Hz}}$

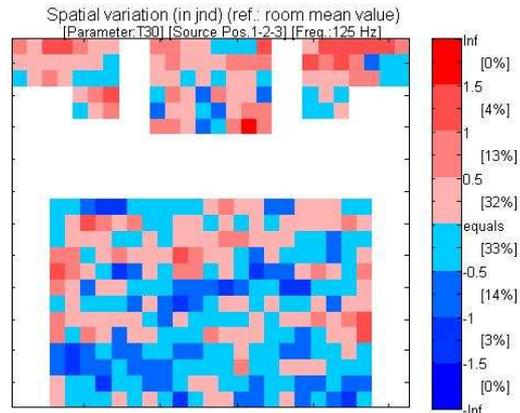


Fig.4. Posición 1-2-3,  $T_{125\text{ Hz}}$

#### 4. ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LOS DATOS.

Se ha analizado la distribución de los datos para todas las frecuencias y posiciones de fuente. Se ha llevado a cabo mediante el test de Lilliefors, implementado en matlab. Solo de una parte minoritaria de los datos podemos decir que sigan una distribución normal. No hemos observado ningún patrón en los resultados, por lo que no podemos asociar a ninguna frecuencia o posición en concreto la normalidad. Como ejemplo, los resultados de  $T_{mid}$  en posición de fuente 1-2 y 1-3 son iguales en media y desviación estándar. Sin embargo, como vemos (Fig. 5) en los siguientes gráficos de probabilidad (calculado con Minitab mediante el método Anderson-Darling) el p-valor indica que solamente la primera es una distribución normal.

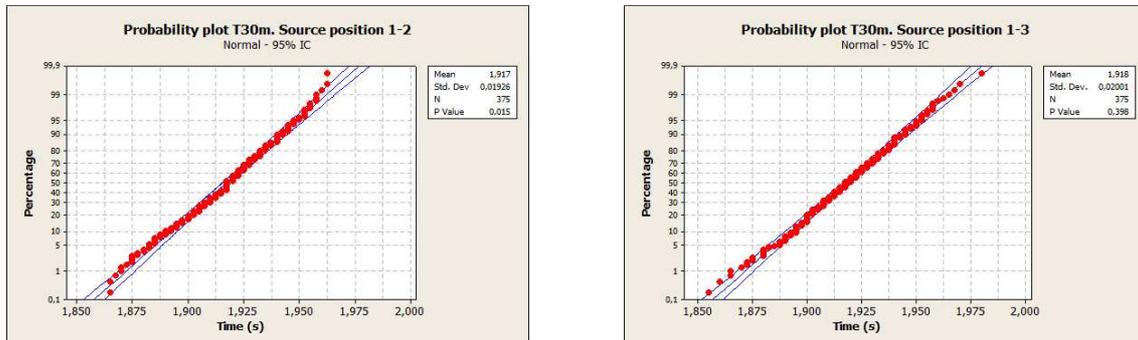


Fig. 5. Distribución de los resultados para las posiciones 1-2 y 1-3

#### 5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Nuestro enfoque en este punto será el de analizar la fiabilidad estadística de la caracterización de una sala siguiendo estrictamente las recomendaciones de la norma ISO-3382. Dado que disponemos de la totalidad de los datos de la población, podemos utilizarlos para simular un elevado número de combinaciones que signifiquen posibles caracterizaciones distintas de la misma sala. De acuerdo con el apartado 4 del anexo A ("posiciones de medida") se ha dividido el área de la audiencia en 7 sectores, 4 en la platea y 3 en los palcos. De acuerdo con el apartado 4.3 del citado anexo, se han eliminado todos los asientos que distaran menos de 2 m de los puntos de medida de un sector adyacente, así como los asientos que distaran menos de 1 m de las paredes. Con esta eliminación el número de asientos se reduce a 286. La figura 6 muestra los 7 sectores y los asientos eliminados.

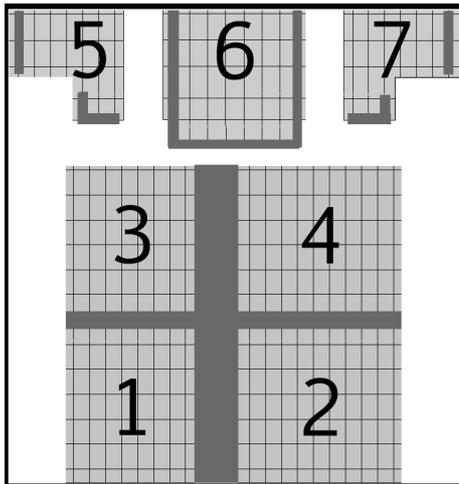


Fig. 6. División en sectores (7)

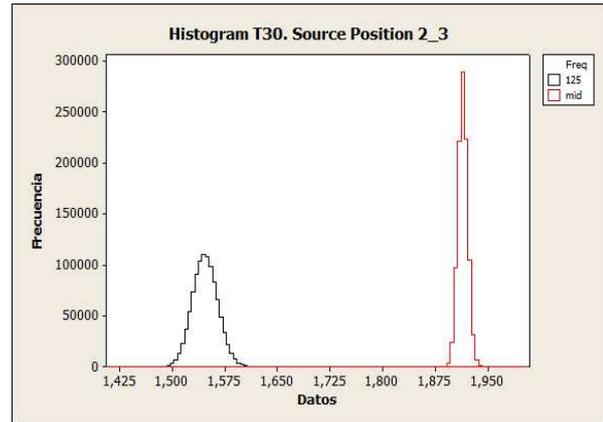


Fig. 7: Histograma de frecuencias para  $10^6$  muestras

La norma establece que se seleccione un punto de cada sector y se calcule el promedio aritmético de los 7 valores obtenidos. Ello resulta válido tanto para el  $T_{mid}$  como para el tiempo de reverberación en bandas de octava. Nada se dice sobre el punto a seleccionar dentro de cada sector, salvo las restricciones anteriormente expresadas de distancia entre ellos y a paredes. A fin de analizar la variabilidad (o error muestral) de los resultados, hemos procedido de la manera siguiente. Hemos seleccionado, aleatoriamente, un receptor en cada sector. con los siete valores, hemos obtenido su promedio aritmético, con lo que obtenemos una caracterización del local, de acuerdo con lo establecido por la norma. Esta operación la hemos repetido un millón de veces, con lo que disponemos de un millón de posibles valores para el tiempo de reverberación del local. Aunque se trata de una muestra elevada, es un porcentaje muy reducido del total de posibilidades. A continuación analizaremos la distribución obtenida y el nivel de confianza del resultado. Como la norma establece que dos posiciones de fuente pueden ser suficientes, realizaremos el estudio para los tres pares de posiciones de fuente (1-2, 1-3 y 2-3) así como para la combinación 1-2-3 (cuyo resultado venimos denominando como valor *real*). La figura 7 muestra el histograma de frecuencias para  $T_{mid}$  y  $T_{125\text{ Hz}}$ , y posición de fuente 1-2.

Como vemos en las tablas 2 y 3 siguientes, la diferencia entre el valor de la media muestral máxima y mínima es menor que 1 jnd (la diferencia máxima son 0,07s) para  $T_{mid}$ . Sin embargo, para el  $T_{125\text{ Hz}}$ , los valores no son tan parecidos, y la diferencia máxima entre valores es de 0,16 s ( 2jnd). Las frecuencias de 250 y 500 Hz también tienen una diferencia máxima mayor a 1 jnd. En cambio, las bandas de 1, 2 y 4 kHz no lo superan.

Tabla 2.-Resultados para muestra de  $10^6$  valores.

	Fuente		$10^6$
$\bar{x}$ ( $T_{mid}$ (s))	1_2	min	1,88
		máx	1,95
		Diferencia	0,07
$\bar{x}$ ( $T_{125\text{ Hz}}$ (s))	1_2	min	1,47
		máx	1,63
		Diferencia	0,16

Tabla 3.- Porcentaje de medidas dentro de  $\mu \pm 0,5$  jnd (muestra:  $10^6$ )

Freq	125	250	500	1000	2000	4000	8000	mid
min	1,51	1,73	1,75	1,99	2,31	2,46	1,88	1,87
max	1,59	1,81	1,84	2,09	2,43	2,58	1,98	1,96
%meas.	97,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Para el  $T_{mid}$  en posición de fuente 2-3, del millón de medidas realizadas, podemos concluir que para la frecuencia más desfavorable (125 Hz), el 97% de las mismas se encuentran dentro del rango  $\mu \pm 0,5$  jnd. En la frecuencia de 250 Hz el porcentaje es ya del 99,9% y para los valores en el resto de frecuencias (500, 1000, 2000, 4000 y 8000Hz) están comprendidas en su totalidad dentro de  $\mu \pm 0,5$  jnd.

Todos estos datos se han obtenido de manera experimental, es decir, dado que tenemos los datos de la totalidad de la población, se han generado 1 millón de medidas diferentes y hemos estudiado su distribución. En el siguiente apartado se procede a contrastar éstos datos con los obtenidos mediante herramientas estadísticas. En este caso utilizaremos el cálculo del error muestral para comprobar que su cálculo teórico del coincide con el error obtenido experimentalmente.

## 6. ERROR TEÓRICO

La estadística permite, al hacer la media de un muestreo  $\bar{x}$ , conocer el error  $e$  que se está cometiendo con respecto a la media poblacional  $\mu$ , dado por la expresión (1).

$$(\bar{x} \pm e) = \bar{x} \pm \left( k \sqrt{\sum \frac{N_h^2 N_h - n_h S_h^2}{N^2 N_h n_h}} \right) \quad (1)$$

donde:

- $\bar{x}$  es la media muestral.
- $e$  es la máxima diferencia (valor absoluto) entre la media muestral  $\bar{x}$  y la poblacional  $\mu$ .
- $S_h$  es la desviación estándar en cada sector  $h$  ( $h=1,2,\dots,7$ ).
- $N$  es la población (286).
- $N_h$  es la población en el sector  $h$ .
- $n_h$  es el número de muestras requerido en cada sector  $h$ . Imponemos que  $n_h=1$ .
- $k = 2,81$ . Para distribución normal, implica un 99,5% de nivel de confianza.

El valor de  $k$  es conocido para distribución normal. Caso que los datos no siguieran una distribución normal, se debería averiguar el tipo de distribución. También se puede aplicar la desigualdad de Chebychev para hallar  $k$  con cualquier tipo de distribución, aunque los resultados obtenidos no serían tan precisos. El tipo de fórmula que aplicamos para nuestro cálculo se denomina "Cálculo teórico de  $e$  por estratos mediante afijación simple" (el mismo número de muestras por estrato) [3].

La tabla 4 resume los resultados obtenidos para el tiempo de reverberación (mid y 125 Hz)

Tabla 4. Resultados experimentales para la muestra ( $10^6$ ) y niveles de confianza.

	Fuente	Distr. Normal	$\bar{x}$	Extremo	$10^6$	$10^6$ (99,5%)	$2^*e$ Teórico (99,5%)
$T_{mid}(s)$	2_3	Sí	$\bar{x}$ min	1,88	1,88	1,90	0,04
			$\bar{x}$ máx	1,96	1,95	1,93	
			Diferencia	0,08	0,07	0,04	
$T_{125\text{ Hz}}(s)$	2_3	Sí	$\bar{x}$ min	1,46	1,47	1,50	0,10
			$\bar{x}$ máx	1,65	1,63	1,60	
			Diferencia	0,19	0,16	0,10	

La columna "Extremo" utiliza los datos poblacionales de las 286 butacas.

- Extremo ( $\bar{x}$  min): Se promedian las butacas con menor valor en cada sector.
- Extremo ( $\bar{x}$  max): Se promedian las butacas con mayor valor en cada sector.

La columna  $10^6$  utiliza los datos de una simulación de 1 millón de muestras (cada muestra es el promedio de 7 valores, uno por sector).

- $10^6$  ( $\bar{x}$  min): Del millón de muestras, se toma el resultado mínimo
- $10^6$  ( $\bar{x}$  max): Del millón de muestras, se toma el resultado máximo

La columna  $10^6$  (99,5%) utiliza los datos de la simulación anterior, quitando los 2500 valores mayores (0,25%) y los 2500 valores menores (0,25%). De esta manera podemos comparar los resultados con los de la siguiente columna (error muestral al 99,5% de confianza)

- $10^6$  ( $\bar{x}$  min): De las 995000 muestras obtenidas, se toma el resultado mínimo
- $10^6$  ( $\bar{x}$  max): De las 995000 muestras obtenidas, se toma el resultado máximo

*e* Teórico (99,5%): El error máximo admisible es la diferencia máxima entre la media muestral  $\bar{x}$  y la media poblacional  $\mu$ . Como no se puede garantizar que el 100% de las veces que tomemos una muestra ocurra que la estimación esté dentro de  $\mu \pm e$ , hemos de contentarnos con fijar un nivel de confianza (en este caso 99,5%). Como era de esperar, la diferencia entre el máximo y mínimo del 99,5% del millón generado coincide con el valor del error muestral. Como conclusión, con una única muestra de 7 butacas (una por cada sector) podemos caracterizar correctamente el auditorio para el parámetro  $T_{mid}$  al 99,5% de confianza. Sin embargo, para ese mismo nivel de confianza, el error para  $T_{125\text{ Hz}}$  sería de  $\mu \pm 0,05$  y siendo el jnd(en este caso) de 0,08 segundos, no podríamos asegurar obtener una media válida con dicho nivel de confianza.

## CONCLUSIONES

A partir de medidas exhaustivas (todos los asientos) en un auditorio de tamaño medio, se ha determinado la variabilidad espacial del tiempo de reverberación. Tal variabilidad resulta, en general, reducida, especialmente si consideramos el parámetro  $T_{mid}$ . Es más, no resulta determinante la posición(es) de fuente(s) seleccionada, asumiendo como indistinguibles diferencias inferiores a 1 jnd. Tal conclusión no es cierta, sin embargo, para todas las bandas de octava. La conclusión más importante es que el valor obtenido para el parámetro del tiempo de reverberación,  $T_{mid}$ , es suficientemente preciso (con nivel de confianza del 99,5%) cuando se selecciona aleatoriamente un punto de medida por sector (para dos posiciones de fuente) y se promedia aritméticamente los resultados. No obstante, tal conclusión no es válida para la banda de 125 Hz.

## REFERENCIAS

- [1] International Standard Organization (2009). ISO 3382-1:2009(E) Acoustics-Measurement of room acoustic parameters. Part1: Performance spaces.
- [2] Arana, M., Martin, R.S., Machin, J., Arregui, A., Accuracy in the acoustical parameters evaluation according to ISO-3382, ICA2013, Montreal, Canada. art. no. 015005 (2013)
- [3] Grande Esteban, Ildefonso; Abascal Fernández, Elena. Fundamentos y Técnicas de Investigación Comercial. Editorial ESIC. Madrid. 2003.