

VARIABILIDAD DEL PROMEDIADO ESPACIAL DE LA REVERBERACIÓN Y CLARIDAD EN LA CATEDRAL DE VALENCIA

Miguel Arana¹, Amaya Ezcurra¹, Ricardo San Martín¹, Alicia Giménez², Elena Díaz², Salvador Cerda², Rosa Cibrián³, Jaume Segura³

¹ Universidad Pública de Navarra.

{e-mail: marana@unavarra.es, aezcurra@unavarra.es, ricardo.sanmartin@unavarra.es}

² Universidad Politécnica de Valencia.

{e-mail: agimenez@fis.upv.es, eldaru@alumni.upv.es, salcerjo@gmail.com}

³ Universidad de Valencia.

{e-mail: rosa.m.cibrian@uv.es, jsegura@uv.es}

Resumen

ISO 3382-1:2009 especifica los métodos de medición del tiempo de reverberación y de otros parámetros acústicos en salas de espectáculos, así como el método para evaluar los datos y presentar el informe de ensayo. Para un recinto con 8 posiciones de micrófono, hemos analizado la variabilidad de los resultados en función de las posibles ubicaciones de los mismos, cumpliendo todas ellas (un total de 82944 variantes) los criterios establecidos por la norma. Si bien los resultados de las mediciones no se debieran promediar sobre la totalidad de las posiciones de micrófono en la sala, hemos analizado la variabilidad de los promedios, con referencia al JND del parámetro, para dos aspectos: reverberación y claridad del sonido percibido. Para el caso del local reverberante estudiado (Catedral de Valencia) los resultados promedios caracterizan con precisión al local en los aspectos subjetivos analizados.

Palabras clave: Reverberación, Claridad, ISO 3382.

Abstract

ISO 3382-1: 2009 specifies the methods for measuring reverberation time and other acoustic parameters in performance halls, as well as the method for evaluating data and presenting the test report. For an enclosure with eight microphone positions, the variability of the results based on their possible locations (82944 variants, all of them fulfilling the criteria established in the standard) have been analyzed. Although the results of the measurements should not be averaged over all the microphone positions in the room, the variability of the averages- with reference to the JND of the parameter, have been analyzed for two aspects: reverberation and clarity of the perceived sound. In the case of the studied reverberant room (Cathedral of Valencia), the average results accurately characterize the Cathedral in the subjective analyzed aspects.

Keywords: Reverberation, Clarity, ISO 3382.

PACS nº. 43.55.Mc, 43.55.Cs

1 Introducción

La Norma ISO 3382-1:2009 [1] “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos” introduce la manera de caracterizar una sala, indicando diferentes parámetros y la forma de calcularlos y representarlos. Aunque el tiempo de reverberación T_{30} es un indicador importante, también se reconocen otros parámetros relacionados con los niveles relativos de presión acústica, cocientes energéticos previos/tardíos, fracciones de energía lateral, funciones de intercorrelaciones binaurales y niveles de ruido de fondo. Estos son concretamente los parámetros siguientes: EDT, G, C_{80} , D_{50} , Ts, STI, indicados en los Anexos A y B de la Norma, no constituyendo una parte formal de las especificaciones de esta.

Así como los requerimientos del equipo de medición y señal son los mismos para todos los parámetros, el número de posiciones de fuente y de receptor a tomar cambia si se quiere medir el T_{30} o el resto de parámetros. Para el tiempo de reverberación T_{30} , se deben utilizar, al menos, dos posiciones de fuente. En cuanto a las posiciones de receptor, deben ser posiciones representativas de la totalidad del espacio. 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 los parámetros, se debería medir en 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 u 10 posiciones), tal y como indica la Tabla A.2 de la Norma.

La presentación de los resultados también difiere si se trata del T_{30} o del resto de parámetros: para el T_{30} , los resultados medidos para el rango de las posiciones de la fuente y de micrófono se pueden combinar, ya sea para zonas identificadas por separado, ya sea para el conjunto del recinto para obtener valores de promediado espacial. 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 los 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.

En un trabajo previo [2] se estudió la adecuación de los requerimientos de la Norma para un recinto de reducidas dimensiones, concretamente un auditorio con 375 asientos. Los resultados mostraron que el valor medio (para tres posiciones diferentes de fuente) de los parámetros EDT_m , T_{30m} , G_m y STI diferían menos de 1 jnd. Por el contrario, el valor medio de otros parámetros (C_{80m} , D_{50m} y T_{Sm}) diferían más de 1 jnd. La desviación estándar excedía el valor de 1 jnd para los parámetros EDT_m , C_{80m} , D_{50m} y G_m . Finalmente, para una selección aleatoria de 7 posiciones de medida (considerando un elevado número de variantes, aunque no todas) el valor medio del parámetro T_{30} ofrecía una confiabilidad ($P > 0,05$) en el rango de $T_{30m} \pm 0,5$ jnd. EDT_m también cumplía ese nivel de confianza.

2 Objetivo y diseño experimental

El objetivo del estudio es seguir profundizando, para diferentes tipos de locales, en la variabilidad del valor de los parámetros acústicos (especialmente, el tiempo de reverberación) y analizar la fiabilidad que su expresión aporta, como parámetro caracterizador de un local. En el presente trabajo se analiza un recinto fuertemente reverberante, cual es la Catedral de Valencia, España.

La metodología para la medición de parámetros acústicos y análisis de los mismos es de acuerdo a UNE-EN ISO 3382-1:2009. Se tomaron tres posiciones de fuente (dos en el ábside o cabecera; la otra en el púlpito. Todo ello de acuerdo con el apartado 4.3 de la norma [3], ya que son tales posiciones las

posiciones más usuales de la fuente) y 35 posiciones de micrófono en la nave central, cubriendo con precisión toda ella.

El método de medida utilizado para la emisión y medida de la caída energética (sweeps logarítmicos) ofrece resultados sumamente repetitivos; es por ello que se ha omitido la medida múltiple y posterior promediado del tiempo de reverberación en cada posición, tal como sugiere el apartado 5.2.2. de la norma [3]. La figura 1 muestra las posiciones de fuente (2) y receptores (35).

De acuerdo con la Norma, dada la ‘uniformidad’ del recinto, cuatro zonas serían suficientes (en nuestra opinión) para caracterizar el recinto. Por el aforo, se necesitarían más. Hemos decidido seleccionar ocho zonas separadas. La razón es la siguiente. El número de variaciones posible con los 35 receptores divididos en 8 zonas resulta ser de 82.944, cuando las 8 zonas comprenden los receptores indicados en la Tabla 1. Este número de variaciones es perfectamente manejable con programas tipo MATLAB®, por lo que evaluaremos todos los resultados promedios. Ello nos permitirá también analizar qué influencia posee la elección del receptor dentro de cada zona (limitados por el número de receptores escogido para cada zona, por supuesto), elección que no se concreta en la Norma.

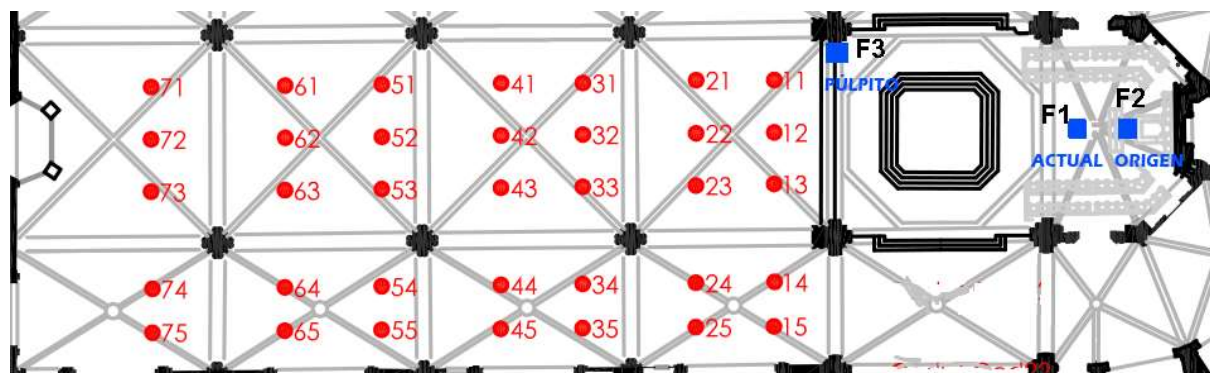


Figura 1 – Posiciones de fuentes y receptores.

Tabla 1 – Receptores asignados a las 8 zonas.

Zona	Receptores	Zona	Receptores
1	11-12 -13-21-22-23	5	14-15-24-25
2	31-32-33-41-42-43	6	34-35-44-45
3	51-52-53-61-62-63	7	54-55-64-65
4	71-72-73	8	74-75

3 Resultados globales

Como hemos dicho, la presentación de resultados difiere si se trata del parámetro T_{30} o de otros. Para T_{30} se pueden combinar los resultados por fuentes y por posiciones para obtener valores de promediado espacial; también se pueden aportar promedios por zonas. La Tabla 2 muestra los resultados globales (considerando todos los receptores) para los parámetros EDT, T_{30} y C_{80} para cada posición de fuente.

Los valores promedios para las posiciones de fuente 1 y 2 son muy parecidos. Los de la fuente 3 son inferiores en los tiempos de reverberación. Los valores de C_{80} son, consecuentemente, superiores.

Tabla 2 – Resultados globales (valores medios) para las tres posiciones de fuente

Parámetro	Posición Fuente	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT, s	1	4,63	5,57	5,65	5,39	4,72	3,92	3,14	2,06
	2	4,80	5,61	5,61	5,26	4,77	3,97	3,14	2,02
	3	4,82	5,45	5,36	4,91	4,43	3,70	2,81	1,70
T ₃₀ , s	1	5,26	5,34	5,35	4,96	4,43	3,70	3,06	2,11
	2	5,07	5,47	5,43	5,11	4,53	3,79	3,11	2,05
	3	5,14	5,09	5,16	4,88	4,42	3,72	2,98	1,91
C ₈₀ , dB	1	-1,2	-4,5	-6,4	-8,1	-6,1	-4,5	-4,0	-1,5
	2	-3,1	-6,4	-8,4	-9,0	-8,1	-7,0	-5,5	-2,1
	3	-3,2	-6,6	-7,4	-5,5	-3,9	-3,1	-2,1	1,3

La desviación estándar de los resultados de las 35 medidas realizadas para cada posición de fuente nos informa sobre la variabilidad de los resultados para cada posición de fuente. Además, la relación entre tal desviación y el valor del *jnd* (just noticeable difference) nos informará sobre la magnitud de tal dispersión desde el punto de vista de la percepción subjetiva. El *jnd* lo evaluaremos como el 5% del valor promedio, para EDT y T₃₀ y con valor fijo de 1 dB para el C₈₀, valores asumidos en la bibliografía [4,5]. No obstante, para recintos tan reverberantes no son tan seguros esos valores. La propia norma establece (Tabla A.1 de [3]) esos valores para tiempos de reverberación entre 1 y 3 s y claridades de -2 a 10 dB. La siguiente tabla muestra tales resultados.

Tabla 3 – Dispersión de los resultados globales (St. Dev.) y *jnd* para las tres posiciones de fuente

Parámetro	Posición Fuente		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
EDT, s	1	St. Dev.	0,77	0,77	0,55	0,51	0,44	0,35	0,32	0,29
		<i>jnd</i>	0,23	0,28	0,28	0,27	0,24	0,20	0,16	0,10
	2	St. Dev.	1,22	0,71	0,60	0,52	0,42	0,34	0,32	0,22
		<i>jnd</i>	0,24	0,28	0,28	0,26	0,24	0,20	0,16	0,10
	3	St. Dev.	0,63	0,60	0,55	0,48	0,47	0,42	0,44	0,32
		<i>jnd</i>	0,24	0,27	0,27	0,25	0,22	0,18	0,14	0,09
T ₃₀ , s	1	St. Dev.	0,38	0,26	0,18	0,10	0,06	0,06	0,09	0,10
		<i>jnd</i>	0,26	0,27	0,27	0,25	0,22	0,19	0,15	0,11
	2	St. Dev.	1,11	0,46	0,36	0,23	0,21	0,16	0,16	0,12
		<i>jnd</i>	0,25	0,27	0,27	0,26	0,23	0,19	0,16	0,10
	3	St. Dev.	0,27	0,24	0,16	0,07	0,06	0,06	0,08	0,11
		<i>jnd</i>	0,26	0,25	0,26	0,24	0,22	0,19	0,15	0,10
C ₈₀ , dB	1	St. Dev.	2,6	2,5	1,8	2,8	2,8	2,8	2,5	2,7
		<i>jnd</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	St. Dev.	2,4	2,3	1,7	1,8	1,9	1,8	1,7	1,6
		<i>jnd</i>	1	1	1	1	1	1	1	1
	3	St. Dev.	2,7	2,1	3,5	3,9	3,2	3,3	3,4	2,6
		<i>jnd</i>	1	1	1	1	1	1	1	1

Se han sombreado las casillas en donde el valor de la desviación estándar es inferior al valor del *jnd*. Como era de esperar, el parámetro que presenta mayor ‘uniformidad’ de los tres es el T₃₀, al integrar durante mas tiempo la caída energética, máxime en locales reverberantes. Es destacable, por otra parte, la reducida dispersión de los tiempos de reverberación en las frecuencias medias para la posición de fuente 3.

Finalmente, resumiremos los resultados globales aportando, por zonas, el valor promedio de las frecuencias centrales de 500 Hz y 1 kHz, es decir los valores ‘mid’, para todas las combinaciones de fuentes, cual es también una expresión de los resultados recomendada por la norma.

Las tablas 4, 5 y 6 muestran tales resultados, aportando el valor promedio, rango de valores (mínimo y máximo), rango, en jnds y la desviación estándar.

Tabla 4 – Resultados para EDT_m (s) por zonas para las tres posiciones de fuente 1-2-3

Zona	Min	Max	Dif. (en jnd)	Promedio	St. Dev.
1	3,46	4,78	6,2	4,29	0,33
2	4,33	5,17	3,6	4,74	0,25
3	4,85	5,65	3,1	5,22	0,23
4	5,03	5,72	2,6	5,39	0,25
5	4,16	4,79	2,8	4,51	0,21
6	4,67	5,35	2,7	4,98	0,24
7	4,88	5,84	3,6	5,39	0,24
8	4,92	5,78	3,2	5,45	0,38

Tabla 5 – Resultados para T_{30m} (s) por zonas para las tres posiciones de fuente 1-2-3

Zona	Min	Max	Dif. (en jnd)	Promedio	St. Dev.
1	4,49	4,79	1,3	4,63	0,08
2	4,63	5,03	1,7	4,73	0,13
3	4,58	5,09	2,2	4,75	0,13
4	4,67	5,51	3,4	4,91	0,30
5	4,58	4,79	0,9	4,65	0,06
6	4,61	4,90	1,2	4,72	0,09
7	4,66	4,81	0,6	4,73	0,06
8	4,67	4,79	0,5	4,72	0,05

Tabla 6 – Resultados para C_{80m} (s) por zonas para las tres posiciones de fuente 1-2-3

Zona	Min	Max	Dif. (en jnd)	Promedio	St. Dev.
1	-7,1	-0,20	6,9	-3,79	2,4
2	-7,6	-2,45	5,2	-5,60	1,7
3	-9,9	-5,7	4,2	-7,78	1,3
4	-10,3	-6,65	3,7	-8,82	1,4
5	-9,1	-1,65	7,5	-5,47	2,8
6	-9,8	-4,65	5,2	-7,59	1,7
7	-11,2	-6,45	4,8	-9,50	1,7
8	-12,8	-8,85	3,9	-11,24	1,5

Tanto EDT como C_{80} poseen bastante mayor dispersión que T_{30} , este con resultados más uniformes y concentrados. Para T_{30} , se constata una zona (4) con elevada dispersión, aunque los valores promedio quedan todos (salvo dicha zona) dentro del rango de 1 jnd del valor promedio. Para el recinto estudiado con anterioridad, de geometría mucho más simple y con bastante menor tiempo de reverberación, los resultados permitieron diferenciar las zonas entre ellas [2].

4 Resultados poblacionales

Una cuestión a la que deseamos hacer una pequeña aportación es la siguiente. La norma ISO 3382 establece la división en zonas del recinto y la medida en puntos de tales zonas. No se concretan explícitamente ni las zonas ni el número de puntos por zona (sí que se concreta el número total de puntos en función del aforo), entendiendo que ello queda a criterio del equipo que diseña la medida para cumplir con la norma.

No existe un criterio teórico para la elección del punto (o puntos) que se toma(n) para caracterizar la zona. Para resolver esta cuestión, se requeriría un estudio con varios puntos de la zona a fin de ver la dispersión o caracterizar la zona por promediado de todos esos puntos. Ello implicaría (curiosamente) resolver el mismo problema del recinto para cada zona, lo cual resulta un problema recurrente. De otra forma, una pregunta razonable es la siguiente, ¿tendrá una significativa influencia la selección de los puntos de medida dentro de cada zona en la expresión final de la reverberación del recinto?

En el caso estudiado, a la pregunta planteada se le puede dar una respuesta ‘exacta’ más que estadística. Podríamos decir (entiéndase metafóricamente) que se pueden aportar los datos de la población, más que la inferencia de los datos muestrales. En el estudio realizado se han tomado 35 puntos de medida y considerado 8 zonas diferenciadas, con 6 receptores en tres zonas, 4 receptores en tres zonas, 3 receptores en una zona y 2 receptores en otra zona. La cuestión es ¿qué diferencias podrían darse en función del receptor concreto que se hubiera escogido para cada zona? Puede darse una respuesta de inferencia estadística, pero puede darse una respuesta ‘exacta’, evaluando todas las posibles variantes de selección de los puntos de medida, como se lleva a cabo a continuación.

Para la posición de fuente 1 (F1), los resultados para las 35 posiciones aportan los valores: $\mu(T_{30m}) = 4,70$ s, $jnd = 0,23$ s y σ (St.Dev.) = 0,07 s. Los valores mínimo y máximo son, respectivamente, 4,49 s y 4,85 s. Para estos dos parámetros de media y desviación, la función de densidad de probabilidad normal viene dada por la Fig. 2.

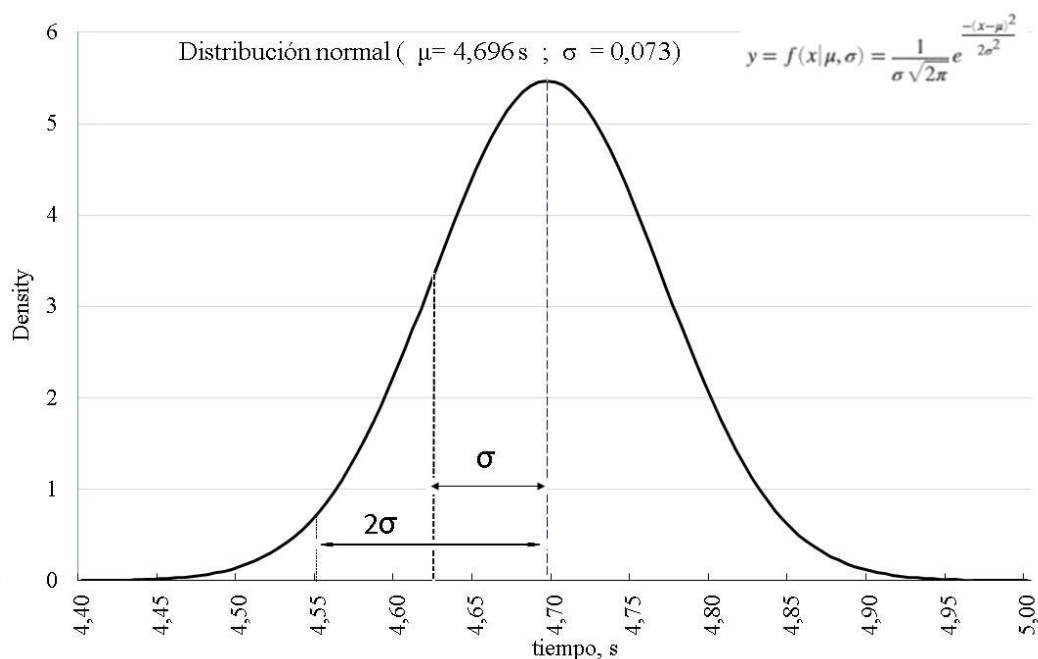


Figura 2 – Función de densidad de probabilidad normal para $\mu(T_{30m}) = 4,70$ y $\sigma = 0,07$

Por otro lado, podemos plantear los resultados que se obtienen cuando se seleccionan 8 puntos (uno de cada zona) pero escogidos al azar entre los puntos medidos dentro de cada zona. Es decir, las variaciones existentes para 8 puntos tomados de 6, 6, 6, 4, 4, 4, 3 y 2 formas posibles. Ello da un total de 82.944 casos. El cálculo de tales variaciones es sumamente rápido en MATLAB®, por lo que podemos obtener no una inferencia sino todos los posibles resultados, producto de la selección al azar del punto dentro de cada zona (limitados, claro está, a los puntos seleccionados en esta experiencia).

Aunque el programa puede hacerse más eficiente, mostramos uno en forma de bucle múltiple por resultar más claro.

```

for f=1:8
    N=0;
    for z1=1:6
        for z2=1:6
            for z3=1:6
                for z4=1:3
                    for z5=1:4
                        for z6=1:4
                            for z7=1:4
                                for z8=1:2
                                    N=N+1;
                                    VB(N,1)=z1;VB(N,2)=z2;VB(N,3)=z3;VB(N,4)=z4;
                                    VB(N,5)=z5;VB(N,6)=z6;VB(N,7)=z7;VB(N,8)=z8;

VB(N,8+f)=(B1(z1,f)+B2(z2,f)+B3(z3,f)+B4(z4,f)+B5(z5,f)+.....
            B6(z6,f)+B7(z7,f)+B8(z8,f))/8;
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
for i=1:N
    VB(i,17)=(VB(i,12)+VB(i,13))/2;
end
for j=1:9
    ESTB(1,j)=mean(VB(:,j+8));
    ESTB(2,j)=std(VB(:,j+8));
    ESTB(3,j)=0.05*ESTB(1,j);
    ESTB(4,j)=min(VB(:,j+8));
    ESTB(5,j)=max(VB(:,j+8));
end

```

Se parte de las 8 matrices con los resultados de los puntos medidos (T en bandas de octava). Al final se obtienen los valores estadísticos. Aunque son 82.944 posibilidades, el cálculo se ejecuta en unos 5 s. Se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7 – Resultados finales para la población (T_{30} , s)

Frec, Hz	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k	T_{30m}
Mean	5,29	5,34	5,39	4,97	4,45	3,71	3,08	2,13	4,71
St. Dev.	0,12	0,08	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
<i>jnd</i>	0,26	0,27	0,27	0,25	0,22	0,19	0,15	0,11	0,24
min	4,89	5,10	5,21	4,85	4,41	3,68	3,04	2,12	4,64
max	5,71	5,63	5,57	5,07	4,49	3,74	3,11	2,15	4,76

Como se ve, los resultados son muy uniformes. Se han ‘contraído’ claramente frente a los estadísticos anteriores, correspondientes a los 35 puntos. La desviación estándar ha pasado de 0,07 a 0,02 s; al valor mínimo ha pasado de 4,49 a 4,64 s; el valor máximo, de 4,85 a 4,76 s. De hecho, más del 99% de los resultados diferirán menos de 1 *jnd*. La Fig. 3 muestra la distribución de los datos (utilizando la herramienta ‘distribution fitter’ en MATLAB®) para los T_{30} en bandas de octava desde 125 Hz hasta 4 kHz, así como para el T_{30m} (promedio de 500 y 1000 Hz). Como se ve claramente (comparando con la Fig. 2) la distribución se estrecha muy notablemente. Ello implica que la expresión del resultado mediante el promedio de los valores de los puntos en las distintas zonas ofrece un resultado dentro de ± 1 *jnd* en más del 99% de los casos, a excepción de 125 y 250 Hz.

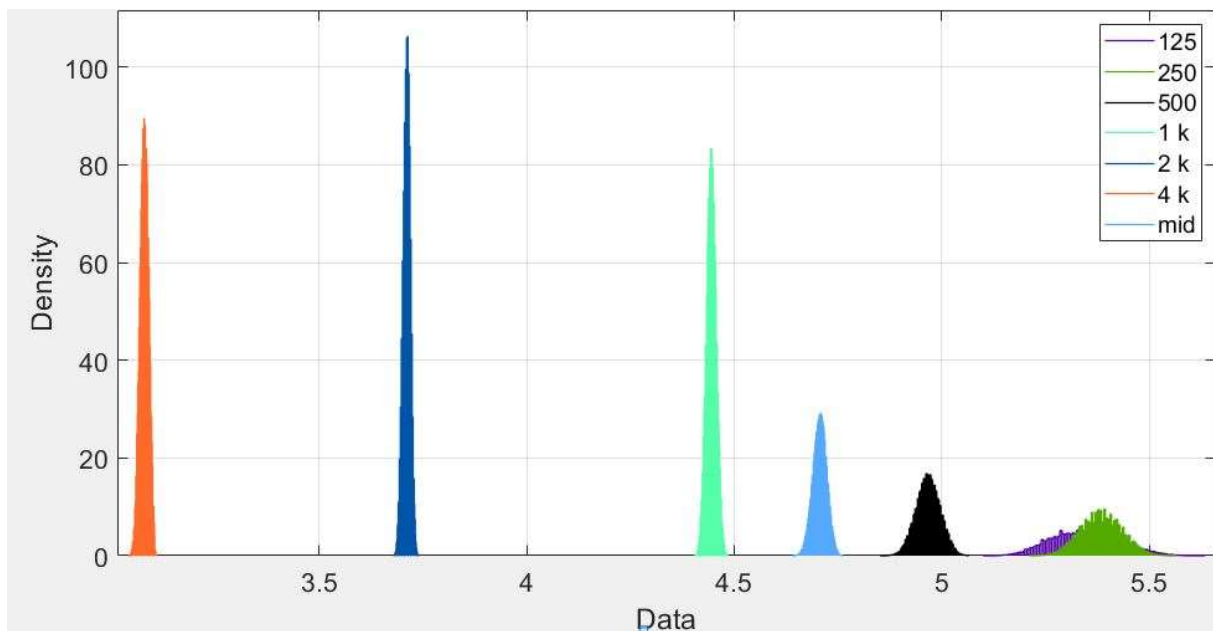


Figura 3 – ‘Distribution fitter’ para T_{30} en bandas de octava en posición 1 de la fuente (n=82.944)

La elección del punto dentro de la zona no es influyente para la valoración **conjunta** del tiempo de reverberación para la caracterización de un local, adoptando la metodología o estrategia de la norma. Por supuesto, la reverberación en un punto concreto (incluso en una zona) puede diferir más de 1 *jnd* del resultado promedio, pero el resultado promedio es un indicador del local razonablemente satisfactorio y consistente, a la vista de los resultados. También es cierto que el local concreto es muy reverberante. Llevaremos a cabo estudios similares en locales menos reverberantes.

5 Conclusiones

Para un local reverberante (nave central de la Catedral de Valencia) se tomaron medidas de reverberación y claridad utilizando 3 posiciones de fuente y 35 puntos de medida. Tras dividir el espacio en 8 zonas (con varios puntos de medida en cada zona) se ha utilizado la norma ISO 3382 para expresar los resultados. La expresión de los resultados por zonas muestra bastante uniformidad, pero se observan diferencias significativas (≥ 1 *jnd*) en una de las ocho zonas. El análisis importante se ha enfocado en estudiar la influencia de la selección concreta del punto de medida en cada zona. En vez de llevar a cabo inferencias estadísticas, se ha calculado los promedios que ofrecen las 82.944 variantes de selección posibles. El resultado es que la elección del punto dentro de la zona no es influyente para la valoración conjunta del tiempo de reverberación para la caracterización del local, adoptando la metodología o estrategia de la norma.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través del proyecto de Investigación I+D+I con referencia BIA2016-76957-C3-2-R.

Referencias

- [1] ISO 3382-1:2009(E) Acoustics-Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. International Standard Organization (2009).
- [2] Arana, M.; San Martín, R.; Machin, J.; Arregui, A. Accuracy in the acoustical parameters evaluation according to ISO-3382. Proceedings of Meetings on Acoustics. ICA 2013. Montreal, Canada (2013)
- [3] UNE-EN ISO 3382-1:2009 “Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: Salas de espectáculos”. Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR (2010)
- [4] Bork I., “A comparison of room simulation software – the 2nd round robin on room acoustical computer simulation”, *Acta Acustica united with Acustica* 86, 943-956, 2000.
- [5] Cox T.J., Davies W.J., Lam Y.W., “The sensitivity of listeners to early sound field changes in auditoria”, *Acustica* 79, 27-41, 1993.