

FUNCIÓN CARACTERÍSTICA DE LA RESPUESTA IMPULSIVA COMO HERRAMIENTA EVALUATIVA DE LA BONDAD DE LOS MODELOS ACÚSTICOS DE SALAS.

Salvador Cerdá¹, Rosa Cibrián², Jaume Segura³, Alicia Giménez¹

¹ Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de València
{e-mail: salcerjo@gmail.com, agimenez@fis.upv.es}

² Departamento de Fisiología, Universitat de València
{e-mail: rosa.m.cibrian@uv.es}

³ Departamento de Informática, Universitat de València
{e-mail: jsegura@uv.es}

Resumen

En anteriores trabajos definimos la función característica (FC) de una respuesta impulsiva (IR) como herramienta de análisis de las IRs de la sala estudiada. El objetivo era mostrar las diferencias entre dos IRs en una misma sala. Esta idea convierte a la FC como una herramienta de evaluación de un modelo acústico de una sala. Para mostrar esta capacidad de la FC, se han considerado varias salas modelizadas y ajustadas teniendo en cuenta el tiempo de reverberación por bandas de frecuencias. En general se observa que aunque el modelo esté muy bien ajustado, las FCs de las IR modelizadas no coinciden exactamente con las FC de las IR experimentales. Se valoran distintas causas de estas diferencias.

Palabras clave: respuesta al impulso, función característica, modelizado de salas

Abstract

In previous works, we defined the characteristic function (CF) of an impulsive response (IR) as an analysis tool for the IRs of the room studied. The objective was to show the differences between two IRs in the same room. This idea makes FC an evaluation tool for an acoustic model of a room. To show this capacity of CFs, several rooms have been considered, modeled and adjusted the reverberation time by frequency bands. In general, it is observed that although the model is very well adjusted, the CFs of the modeled IRs do not exactly coincide with the CFs of the experimental IRs. Different causes of these differences are assessed.

Keywords: impulse response, characteristic function, room modelling

PACS n° 43.55.-Ka.

Introducción

Hace unos años introdujimos la Función característica de una IR (FC) [1, 2]. Nuestro objetivo era tener una herramienta que nos permitiera comparar dos IRs. El hecho que la FC muestre una dependencia con la distancia a la fuente nos ha hecho estudiar en varios trabajos el origen de esa dependencia [2,3,4].

En este trabajo retomamos la idea original de utilizar la FC de una IR para evaluar la bondad de un modelo acústico de una sala. Para ello utilizamos la FC de dos maneras distintas. Por un lado, la

representación gráfica nos permite observar las diferencias entre dos IR fácilmente. Por otro lado, la introducción del *EDT característico* que hemos realizado en [4], permite evaluar la diferencia cuantitativamente.

La Función Característica de un respuesta impulsiva IR se define mediante la expresión:

$$f(m) = \text{Log}_{10} \left(\sum_{n=0}^N h^2(n) \cdot \left(\frac{m}{M} \right)^n \right) \quad m \in (0, M] \quad (1)$$

Si consideramos un modelo exponencial de decaimiento para la IR: $h^2(t) = k_e \cdot e^{-t/b}$

donde la constante de normalización es: $k_e = -1 + e^{\frac{1}{b}}$

La FC correspondiente viene dada por la expresión (2):

$$\text{FC}(x) = 10 \text{Log}_{10} \left(\frac{\left(-1 + e^{\frac{1}{b}} \right) x}{e^{\frac{1}{b}} - x} \right) \quad (2)$$

El parámetro “b” que se obtiene al ajustar la FC exponencial a una FC experimental es el *EDT característico* de la IR.

Modelo de una sala calibrado

Para ilustrar la utilidad de la FC como herramienta evaluadora de un modelo geométrico acústico de una sala, hemos considerado el modelo del Auditorio de Torrent. El Auditorio de Torrent tiene una forma hexagonal irregular (en forma de abanico + forma de abanico invertido) con una capacidad de audiencia de 606 personas. Tiene un volumen de 6430 m³, lo que proporciona una relación volumen / audiencia de 10.6 m³. El tiempo de reverberación a frecuencias medias, TR_{mid}, es de 1.87 s. Esta sala se utiliza para conferencias, congresos, todo tipo de conciertos, ópera y danza.

En la Figura 1, se observa la situación de las medidas realizadas. En este estudio, por simplificar los cálculos, únicamente hemos considerado las medidas realizadas en platea y en media sala (por simetría).

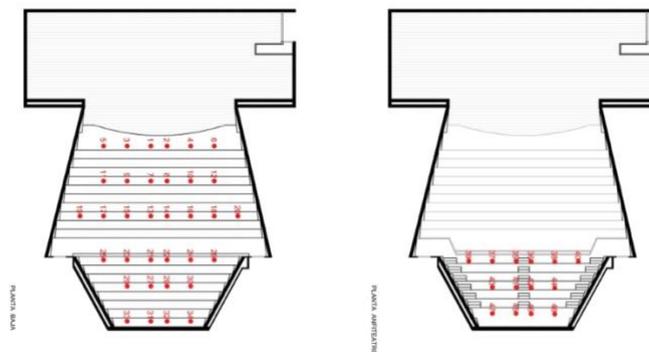


Figura 1. Situación de los puntos de medida en el Auditorio de Torrent.

El modelo geométrico fue realizado y depurado en AutoCad a partir de los planos que nos proporcionó la dirección del Auditorio. Para la modelización acústica utilizamos dos programas de simulación CATT-Acoustic v9.1a (build 1.03) / TUCT v2.0a:1.03 y Odeon 10.13 Combined. Se ha incluido, en ambos, los mismos materiales y características de absorción y dispersión, así como la característica de las fuentes y posición de los micrófonos. En ambos programas se ha considerado los parámetros que en las opciones intermedias proponen por defecto.

La Figura 2 muestra el promedio del TR30 en los 18 puntos medidos por frecuencia. Las barras de error corresponden a un 5% (JND del RT).

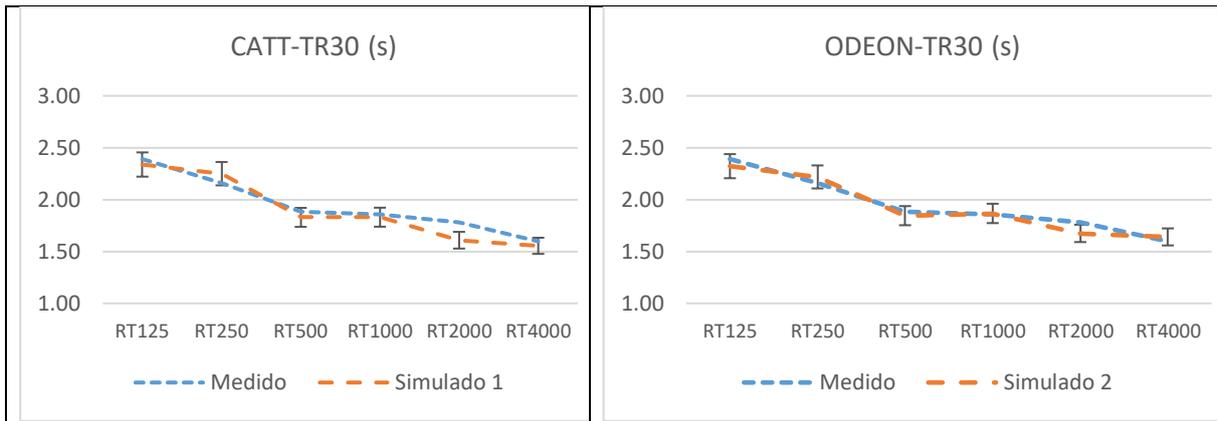


Figura 2. Promedio del TR30 en las simulaciones realizadas, respectivamente con CATT-Acoustic v9.(izquierda) y Odeon 10.13 Combined (derecha).

La Figura 3 muestra de forma gráfica, para cada banda de frecuencia y en cada posición de medida el error en valor absoluto entre medida y simulación para los dos programas utilizados. El error promedio de todas las frecuencias y todas las medidas es de 0.95 JNDs y de 0.68 JND, respectivamente, para la simulación con CATT y con ODEON.

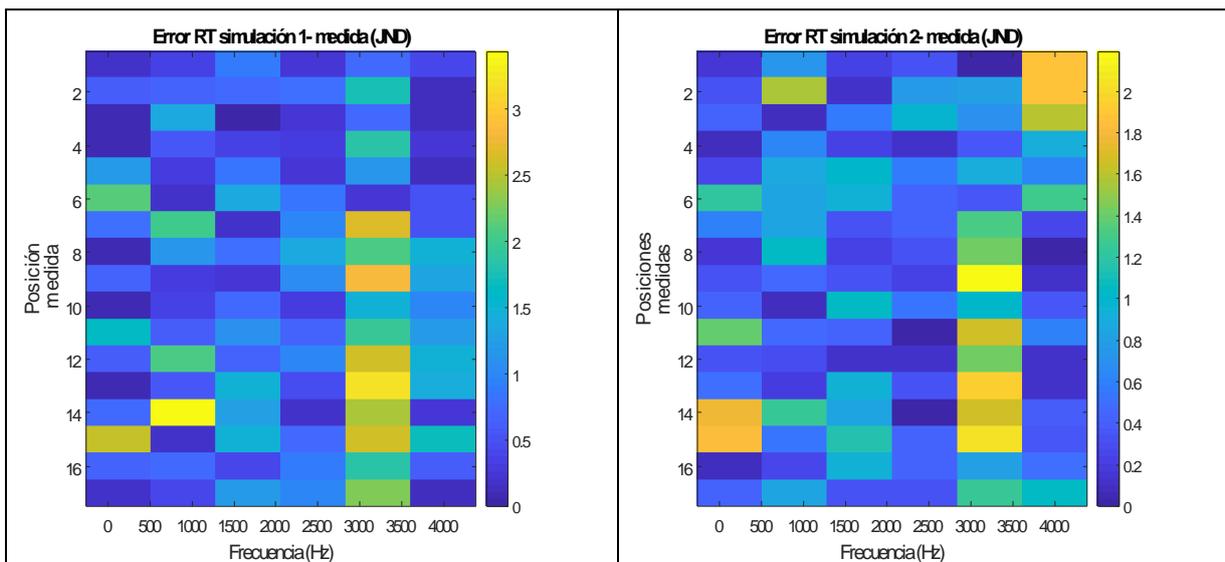


Figura 3. Diferencia en JNDs entre el RT30 medido y calculado para cada banda de frecuencias y posición, en las simulaciones realizadas, respectivamente con CATT-Acoustic v9.(izquierda) y Odeon 10.13 Combined (derecha).

Las Figuras 2 y 3 muestran que la calibración del RT en el modelo geométrico-acústico en ambos programas es muy buena, situándose las discrepancias en las mismas zonas y bandas de frecuencia, aunque ligeramente mejor en el caso de Odeon. Dado el objetivo de este trabajo no se valora la bondad del ajuste para otros parámetros.

Comparación de las funciones características medidas y simuladas

Los dos programas de simulación permiten exportar en formato *wav* las respuestas impulsivas para un micro omnidireccional. En el caso de CATT-Acoustic la exportación es directa. En el caso de Odeon hay que seleccionar que calcule la respuesta impulsiva en formato *Ambisonic (B-format)* [5,6] y después trabajar con el primer canal.

La Figura 4 presenta las envolventes de las FCs obtenidas con los dos programas de simulación comparadas con las obtenidas experimentalmente en el recinto estudiado.

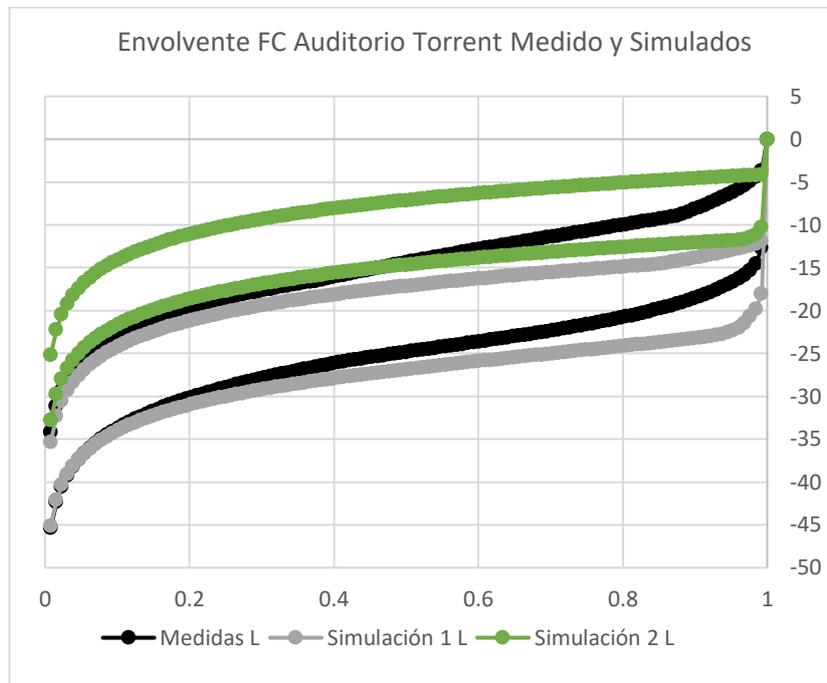


Figura 4. Envolventes de las FCs: simulaciones (1L: CATT-Acoustics 2L: Odeon) y medidas experimentalmente en el Auditorio de Torrent

Se aprecia que, aunque hay intersecciones entre las zonas que las envolventes definen, el software de simulación 1 produce FCs con valores inferiores mientras que el software de simulación 2 produce FCs superiores. De hecho, ambas simulaciones no tienen una zona común, pero la simulación con Odeon ofrece mayor solapamiento con las FC medidas.

Si se ajusta un modelo exponencial para obtener el **EDT característico** [4] el parámetro “b” obtenido de la ec. 2 presenta los valores que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. EDT característico para las IR simuladas y medidas, considerando un modelo exponencial de decaimiento de la energía. Relación entre los valores medidos y simulados

b_e medidas	b_e simulación 1	b_e simulación 2	b_e med/sim 1	b_e med/sim 2
30	3	3	10,0	10,0
30	3	3	10,0	10,0
40	5	5	8,0	8,0
47	5	6	9,4	7,8
70	6	9	11,7	7,8
50	7	9	7,1	5,6
80	9	10	8,9	8,0
115	9	11	12,8	10,5
88	11	12	8,0	7,3
75	12	13	6,3	5,8
128	14	15	9,1	8,5
174	14	17	12,4	10,2
164	19	16	8,6	10,3
202	19	18	10,6	11,2
197	19	18	10,4	10,9
336	33	18	10,2	18,7
338	36	31	9,4	10,9

Se aprecia que el EDT característico es similar en ambas simulaciones, pero hay un factor aproximadamente 10 entre las medidas y las simulaciones, en promedio 9,6 para la simulación con CATT-Acoustic y 9,5 para la simulación con Odeon. Como las envolventes de las FCs de las simulaciones eran disjuntas, esto sirve para mostrar que lo que hace el EDT característico es ajustar la parte de la FC próxima a 1. Es decir, lo que corresponde a la energía de las primeras reflexiones. Ambas simulaciones adolecen pues de defectos en las primeras reflexiones. La Figura 5 muestra la caída energética (dB) de la IR normalizada para una medida y sus correspondientes simulaciones.

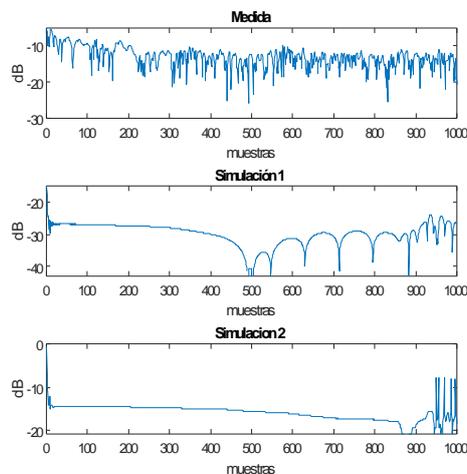


Figura 5. Caída energética en una IR experimental, y en las dos simulaciones con CATT-Acoustic y Odeon.

Se puede concluir de estos resultados que las IR simuladas, aunque estén ajustadas al TR30 con una precisión muy buena, muestran una deficiencia de componentes al inicio de las mismas en los dos programas de simulación usados. Cabe esperar que esta deficiencia energética cause, en auralizaciones, efectos perceptivos importantes.

La Figura 6 muestra la HRTF (Head-related transfer function), utilizada habitualmente en las auralizaciones, así como la BRIR (Binaural Room Impulsive Responses) experimental obtenida para el punto indicado en la Figura 5.

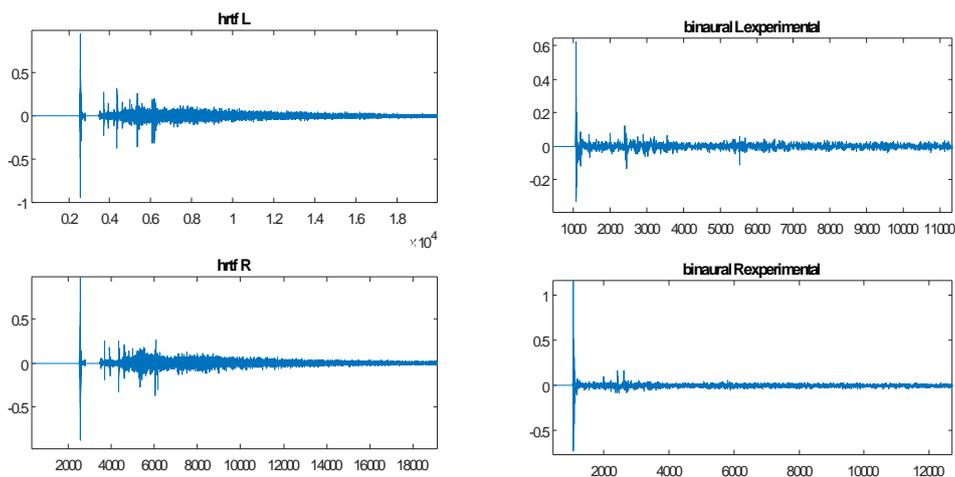


Figura 6. HRTF (Head-related transfer function) de una simulación para un punto próximo a la fuente en la que se aprecia el defecto de reflexiones que produce un EDT característico muy bajo. Y BRIR (Binaural Room Impulsive Responses) obtenida en dicho punto experimentalmente.

El análisis de EDT por frecuencia, muestra que, en este caso, los resultados no discrepan tanto como cuando se analiza la IR globalmente (Tabla 2 y Figura 7) .

Tabla 2. Error relativo medio en el EDT característico por frecuencias en las dos simulaciones.

Frecuencia	ER medio (%) Simulación 1	ER medio (%) Simulación 2
125 Hz	29%	37%
250 Hz	51%	48%
500 Hz	21%	29%
1000 Hz	65%	49%
2000 Hz	47%	43%
4000 Hz	54%	53%

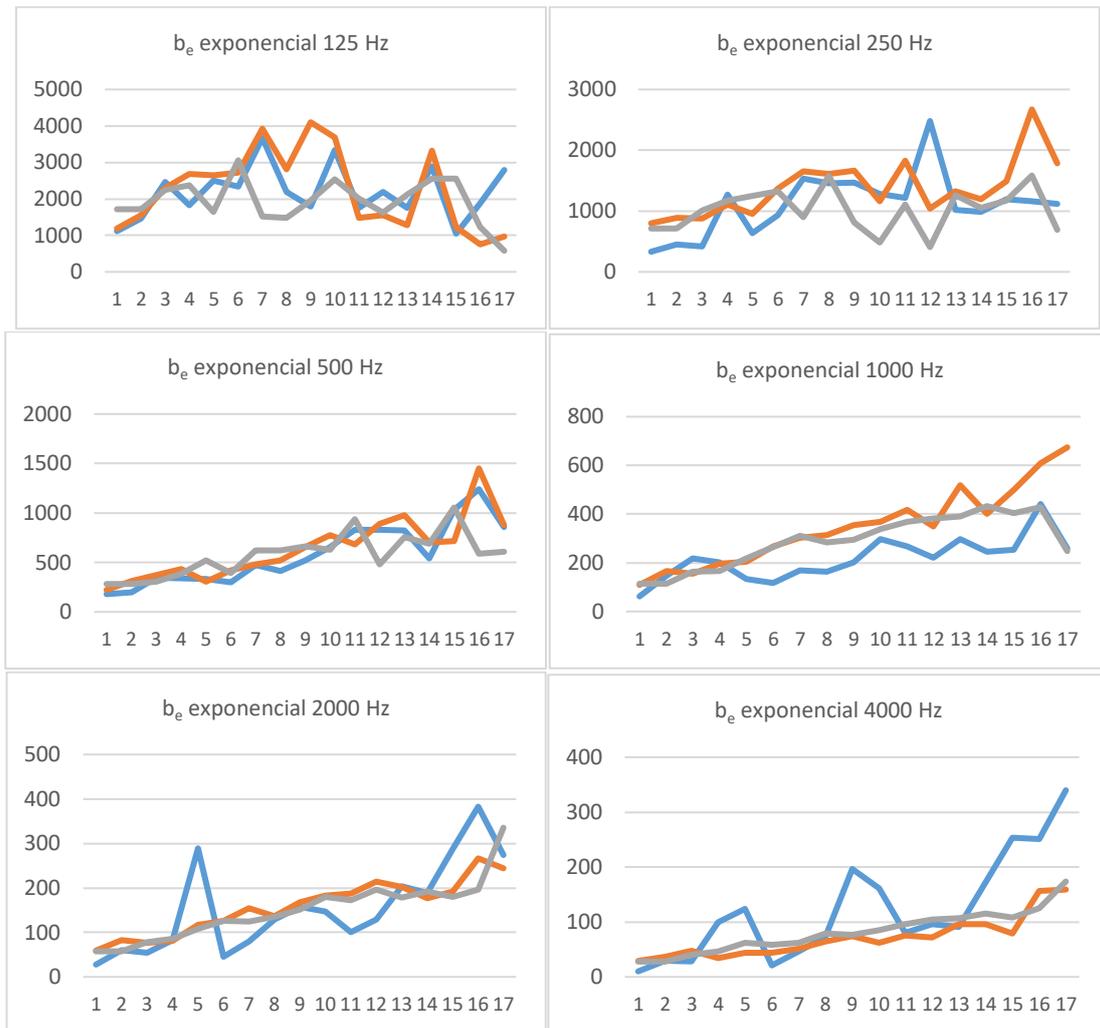


Figura 7. Valores de b_e en el modelo de decaimiento exponencial de la energía, asociado al EDT característico, por bandas de frecuencias (en azul, los valores medidos experimentalmente, en naranja la simulación realizada con CATT-Acoustic y en gris la realizada con Odeon, en los 17 puntos analizados

La falta de componentes en la IR detectados al estudiar el EDT característico (global) la atribuimos al proceso de filtrado digital. Como muestra la figura 8, en la IR global normalizada, se aprecia que, tras el sonido directo que genera el programa de simulación, hay una disminución de energía que vuelve a aumentar cuando llegan las siguientes reflexiones. Cuando se filtra la señal, utilizando los filtros de octava que proporciona la función de MATLAB *fdesign.octave*, el sonido directo se comporta como una delta de Dirac y genera un aumento de energía que suple la que el programa de simulación, en ninguno de los dos casos, ha generado.

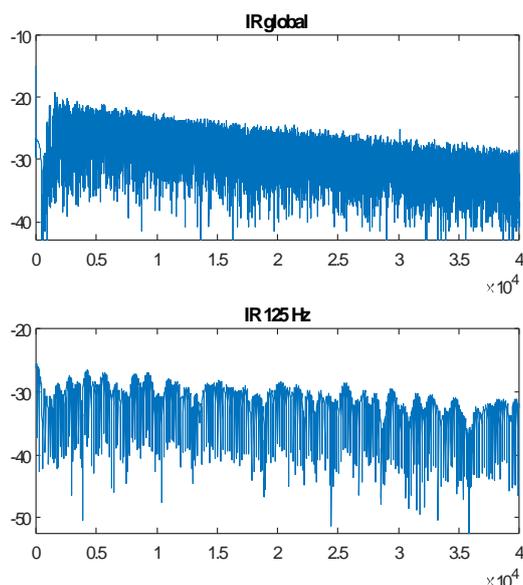


Figura 8. IR global e IR para la banda de 125 Hz. Nótese el diferente comportamiento en el inicio de la IR.

Conclusiones

En este trabajo se ha estudiado el EDT característico [4] de las respuestas impulsivas omnidireccionales en el auditorio de Torrent, tanto para las medidas experimentales y las simuladas utilizando dos programas de simulación (CATT-Acoustic y ODEON Combined). Se ha encontrado grandes discrepancias en el análisis global de las IR que se atenúan al realizar el análisis por frecuencias.

Aunque los resultados que se presentan corresponden exclusivamente a una sala, permiten ilustrar la capacidad de la FC para detectar deficiencias en las IRs generadas por el software habitual de simulación, incluso en modelos bien ajustado en el RT30, no solo en promedio, sino también punto a punto y por frecuencias.

El origen de las discrepancias en este caso provienen de un intervalo temporal entre lo que corresponde a la llegada del sonido directo y las siguientes reflexiones, en las que el contenido energético es muy deficiente. Esto seguramente está causado porque el tiempo de reverberación no es muy grande y los fenómenos ondulatorios no se tienen en cuenta en la simulación.

Agradecimientos

Este estudio ha sido subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través de los proyectos de investigación BIA2012-36896 y BIA2016-76957-C3-3-R. Asimismo agradecemos al Auditori de Torrent, Valencia, su colaboración en el proceso de medida.

Bibliografía

1. Cerdá, S. Segura, J. Planells, A. Cibrián, R. Gigante, J.A. Giménez, A. Función característica de una sala: Un primer estudio. 48º Congreso Español de Acústica -TECNIACÚSTICA® 2017. A Coruña.

2. Cerdá-Jordá, Salvador; Giménez-Pérez, Alicia; Cibrián, Rosa; Segura-García, Jaume; Girón, Sara. Characteristic Function in a Room: Definition, Properties and use as analysis tool. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings, InterNoise19, Madrid, Spain, pages 4999-5997, pp. 5889-5898(10)
3. Salvador Cerdá Jordá, Rosa Cibrián Ortiz de Anda Jaume Segura García, Alicia Giménez Pérez. Dependencia de la función característica de una sala con la distancia a la fuente sonora. XI Congreso Iberoamericano de Acústica, X Congreso Ibérico de Acústica y 49º Congreso Español de Acústica - Tecniacustica'18-. Cádiz, octubre 2018
4. Salvador Cerdá Jordá, Rosa Cibrián Ortiz de Anda Jaume Segura García, Alicia Giménez Pérez. Función característica de la respuesta impulsiva de una sala. Modelo de decaimiento de la energía. XI Congreso Ibérico de Acústica. TECNIACÚSTICA 2020 y 51º Congreso Español de Acústica.
5. Arteaga, Daniel. (2015). Introduction to Ambisonics. Technical report.
6. M. A. Gerzon, "Ambisonics in Multichannel Broadcasting and Video," J. Audio Eng. Soc., vol. 33, no. 11, pp. 859-871, (1985 November.).