



## ANÁLISIS COMPARATIVO DE TRES SISTEMAS PARA LA MEDIDA DE RESPUESTAS IMPULSIVAS

L. Álvarez-Morales, M. Galindo-del-Pozo, T. Zamarreño-García, S. Girón-Borrero.

Universidad de Sevilla, Dpto. Física Aplicada II, ETS Arquitectura, IUACC, Avda. Reina Mercedes 2, 41012 Sevilla, Spain. Tel.: + 34 954556612. Fax: +34 954557892

{e-mails: [calvarez6@us.es](mailto:calvarez6@us.es), [mgalindo@us.es](mailto:mgalindo@us.es), [teofilo@us.es](mailto:teofilo@us.es), [sgiron@us.es](mailto:sgiron@us.es)}

### Resumen

La respuesta al impulso (RI), registrada en un punto de recepción cuando la fuente sonora emite desde la ubicación del emisor en un recinto, contiene toda la información necesaria para describir el comportamiento acústico del mismo entre ambas posiciones. Para caracterizar el recinto en su conjunto, es usual utilizar varias posiciones de emisión y de recepción. Los ordenadores actuales, conjugando hardware y software adecuados, permiten registrar, procesar y analizar de forma eficiente estas RIs según los criterios de la normativa internacional aplicable en cada caso.

Se presenta aquí un estudio comparativo ciego de tres sistemas para medidas acústicas de salas. Las comparaciones se han establecido a partir de las respuestas al impulso medidas en el salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla con cada uno de los tres equipos usando un mismo tipo de señal de excitación. Para ello, se han calculado los principales parámetros de salas recogidos en la norma UNE-EN-ISO 3382-1. Para cada parámetro calculado se han estudiado las diferencias encontradas tanto del valor promediado espacialmente por bandas de octava, como del promedio espectral en cada punto de recepción. Para una valoración de dichas diferencias se ha tomado como referencia el umbral diferencial.

**Palabras-clave:** respuesta al impulso, señales de barrido, parámetros acústicos de salas.

### Abstract

The room impulse response (RIR), recorded at a reception point when the sound source emits from the location of the emitter, contains all the information necessary to describe the acoustic behaviour within a room. In order to characterize the enclosure as a whole, several emission and reception positions are commonly used. Current computers, equipped with suitable hardware and software, enable these RIRs to be registered, processed and analysed in an efficient way in accordance with the criteria of the international standards applicable in each case.

This paper presents a blind comparative study of three systems for the measurement of room acoustics. Comparisons have been drawn up from the impulse responses measured in the auditorium of the School of Architecture of Seville with each of the three sets of equipment by means of the same type of excitation signal. To this end, the main parameters of room acoustics from standard ISO 3382-1 have been calculated. For each parameter calculated, the differences between both the spatially averaged value in octave bands and the spectral average at each reception point have been studied. In order to evaluate the differences found, the Just Noticeable Difference (JND), has been taken as a reference.

**Keywords:** impulse response, swept signals, room acoustic parameters.

**PACS no. 43.58 Gn, 43.58 Ta**

## 1 Introducción

El método de integración inversa de Schroeder [1] de la respuesta al impulso cuadrática, constituye la base de las técnicas de computación de acústica de salas. Con este procedimiento es posible calcular el tiempo de reverberación, los parámetros acústicos y otras características acústicas: funciones energía-tiempo (ETC), curva de decrecimiento de energía de Schroeder (EDC), índice de transmisión de la palabra (STI), etc...

Sin embargo la respuesta al impulso en una sala real no está libre de la influencia del ruido de fondo en todo el rango de frecuencias. Como consecuencia, las curvas de decrecimiento dependerán del límite superior de integración y del nivel de ruido. Se han propuesto diferentes métodos para corregir estos errores: en el *truncado iterativo* [2, 3], la respuesta al impulso es truncada en un determinado instante en que el ruido empieza a dominar, el cual es introducido en la curva de decaimiento de energía para estimar la relación señal-ruido; en el *método de sustracción* [4], se propone una técnica de compensación donde la contribución del ruido de fondo es sustraída de la curva de decrecimiento de energía. Otras técnicas más avanzadas han sido propuestas para aminorar los efectos del ruido de fondo, no sin cierta complejidad computacional y exigiendo tener datos a priori del decrecimiento de la señal, así Xiang [5] ha desarrollado una técnica de regresión no lineal para una estimación simultánea del nivel inicial, la pendiente y el ruido de fondo. También Morgan [6] ha cuantificado los efectos del ruido de fondo, del tiempo de truncado y del rango de evaluación en la precisión en la estimación del tiempo de reverberación, estableciendo unas guías prácticas para mejorar la estimación de la pendiente de ajuste en su determinación. Recientemente Huszty *et al.* [7] revisa el concepto de relación señal/ruido para respuestas impulsivas.

Además de la adecuada relación señal-ruido, que puede influenciar notablemente el correcto cálculo de los parámetros, existen otras fuentes de error en la cadena experimental que pueden confluir en los resultados, produciendo falta de objetividad y reproducibilidad en las medidas.

Mencionamos a continuación algunos trabajos que se han ocupado de algunos de estos aspectos; por ejemplo, los dos *Round Robins* internacionales organizados con objeto de realizar una comparación de los algoritmos de sistemas de medida usando una respuesta al impulso sintetizada [8], o una real [9]. Asimismo, las características de la direccionalidad de la fuente en la dispersión de los resultados de los parámetros acústicos, han sido estudiadas por Arana *et al.* [10] cuantificando estas diferencias en términos de JNDs. Otros estudios también han analizado las incertidumbres en las medidas de acústica de salas relacionadas con el uso de diferentes transductores y su colocación [11-12].

De la misma forma otras investigaciones más recientes realizan una comparación de los resultados de los parámetros acústicos obtenidos con diferentes herramientas de software y hardware y entre diferentes métodos de medida (ruido estacionario interrumpido, señal impulsiva, barridos sinusoidales) como el realizado por Fausti *et al.* [13], o han centrado su estudio en el análisis de los resultados obtenidos con diferentes señales [14], o han analizado si las cuatro combinaciones de diferencias obtenidas entre los valores calculados de los parámetros acústicos (correspondientes a dos softwares de simulación) y a los resultados experimentales (con dos equipos comerciales diferentes) están dentro de un razonable rango de aceptabilidad [15].

El grupo de investigación de Acústica Aplicada del Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción (IUACC) de la Universidad de Sevilla, ha incorporado a lo largo de varios años,

diferentes sistemas de medidas, con diferentes prestaciones, para la evaluación de las características acústicas de los recintos, a través del análisis de la respuesta al impulso de la sala.

Ante la aparición de algunos valores anómalos para ciertos parámetros en alguna situación real, se decide acometer un multiprocesado con los diferentes sistemas, aprovechando las posibilidades (al menos teóricas) de intercambio de formatos entre ellos. Este proceso hace aparecer nuevos problemas por lo que se planifica un proceso riguroso de intercomparación en el que se limitan los factores externos que podrían tener influencia (recinto, posiciones de medida, transductores,...). El objetivo del presente trabajo es realizar una comparativa ciega de tres de ellos, utilizando el mismo tipo de señal de excitación en todos ellos y utilizando una misma sala piloto. Para lograrlo se ha optado por analizar las posibles diferencias entre los parámetros de sala más relevantes calculados a partir de la respuesta al impulso, registrada en varios puntos del recinto piloto. Además, hemos incorporado otros dos sistemas de medidas, que actuarán como sistemas de control, con los que se ha hecho algún procesado adicional pero no se han utilizado en las medidas.

## 2 Recinto y método experimental

Para realizar el estudio comparativo se ha elegido como recinto piloto el salón de actos de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla (ver Figura 1), por su fácil accesibilidad para realizar los ensayos y con el fin de eliminar la influencia de la sala en los procedimientos de medida y evaluación de resultados. Se trata esencialmente de una sala prismática de dimensiones aproximadas  $18 \times 24 \times 8$  m, con un estrado sobreelevado unos 80 cm. La zona de audiencia está ligeramente inclinada y alberga con una ligera pendiente en la zona de audiencia ocupada por 364 butacas, medianamente tapizadas, las paredes laterales y de fondo está terminadas con paneles de corcho oscuro de aproximadamente 3 cm de espesor y la pared anterior está cubierta por un pantalla de proyección microperforada. El techo, tras la estructura ligera metálica que se observa en la Figura 1, está enlucido.

Las medidas se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento normalizado de la norma UNE-EN-ISO 3382-1 [16], pues aunque el objetivo no es caracterizar la acústica de la sala, la comparación de los sistemas de medida se basa en confrontar los valores de los diferentes parámetros acústicos contenidos en los anexos informativos de la citada norma.



Figura 1 – Vista interior del salón de actos de la ETS de Arquitectura de Sevilla. A la derecha se observan las marcas de los puntos de ubicación de los receptores.

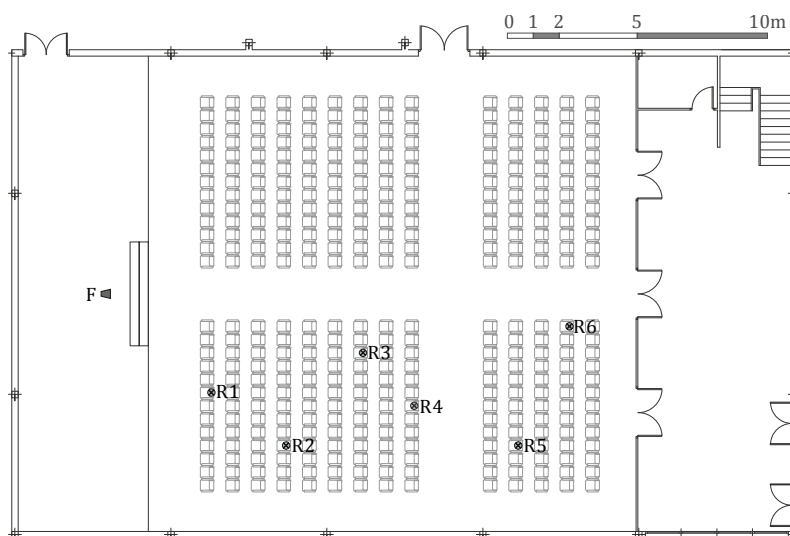


Figura 2 – Planta del recinto, en la que se muestran las posiciones de la fuente (F) y de los receptores (R1 a R6).

El recinto estaba desocupado. La fuente sonora (F en la Figura 2) se situó en una única posición, sobre el estrado, en el plano de simetría vertical longitudinal de la sala, a 1,5 m sobre el nivel del suelo. Se seleccionaron 6 puntos de recepción, ubicados en la zona de audiencia (ver Figuras 1 y 2), a 1,2 m sobre el nivel del suelo. Hay que indicar que para eliminar los posibles errores al reposicionar el micrófono, tanto en su ubicación como en su orientación, éste permaneció fijo en cada posición mientras, intercambiando las conexiones, se medía con los tres sistemas. Por supuesto tampoco se modificaron ni la posición ni la orientación de la fuente sonora. Se monitorizaron las condiciones ambientales durante el periodo de medida. La temperatura se mantuvo entre los 26,8 y 27,5 °C, y la humedad relativa varió entre el 46 y 47 %. El nivel del ruido de fondo no se registró, pero las condiciones no variaron en todo el proceso de medida. Además, la disposición del recinto dentro de la escuela, hace que la sala presente bajos niveles de ruido de fondo.

Como señales de excitación se utilizaron señales sinusoidales de barrido exponencial en frecuencia. El rango de barrido se ajustó para cubrir las bandas de octava comprendidas entre 63 y 8000 Hz. Así mismo se ajustó el tiempo de barrido y demás condiciones recomendadas por los desarrolladores

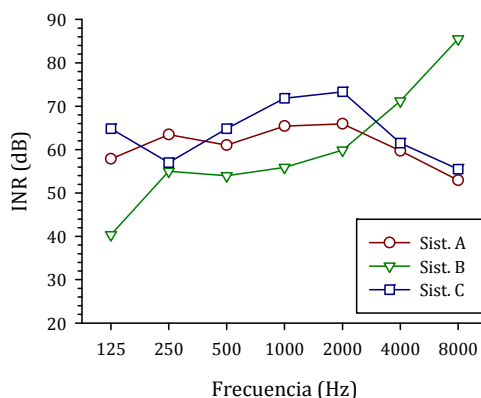


Figura 3 – Valores espectrales de la INR promediados espacialmente.

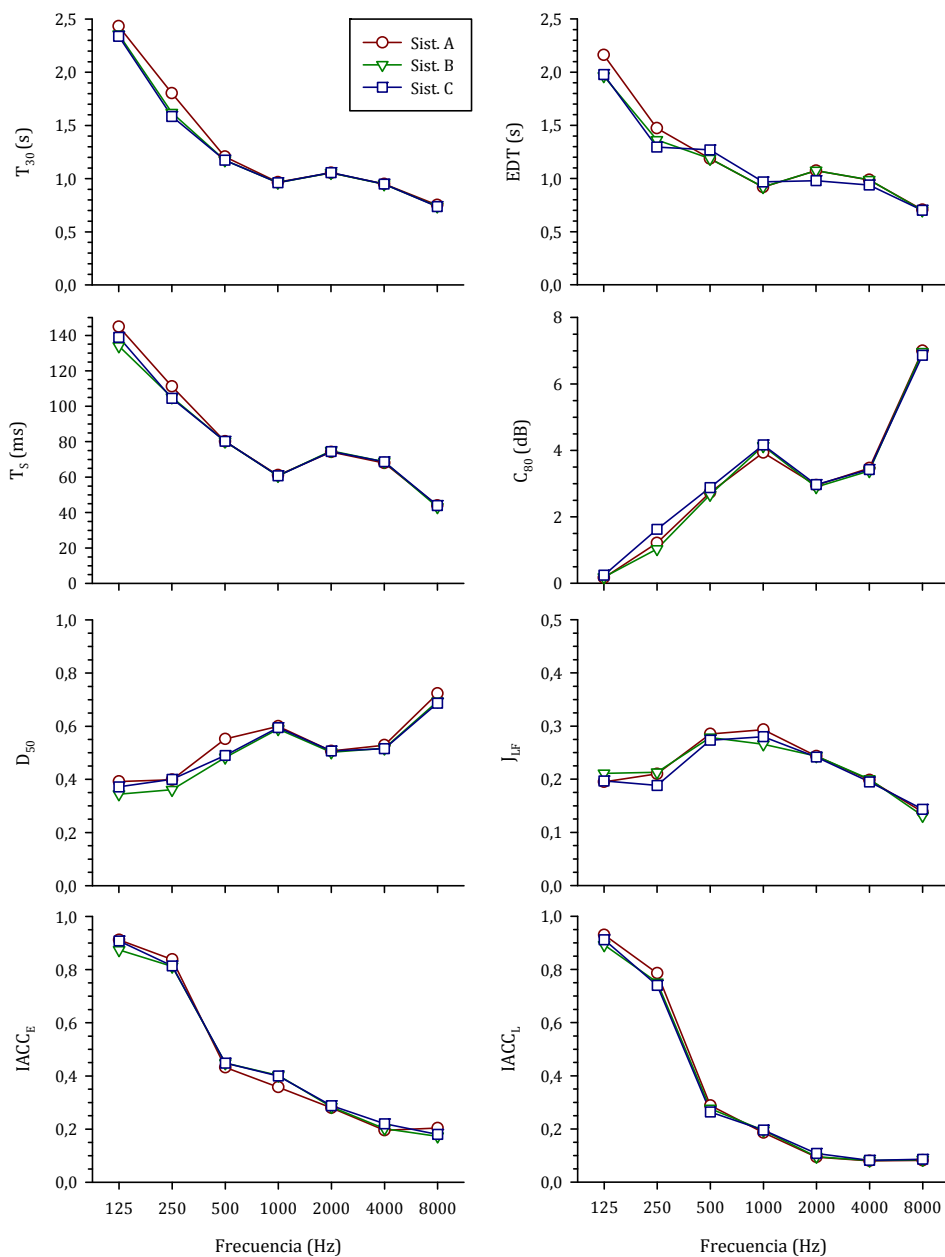


Figura 4 – Valores espectrales de los parámetros acústicos, promediados espacialmente, medidos y procesados con cada uno de los sistemas de medida.

respectivos. Se consiguieron relaciones señal-ruido impulsiva (INR) superiores a 45 dB para todas las bandas de octava de interés (ver Figura 3). Conviene observar, que para la obtención de INR apropiadas, los sistemas de medida analizados exigen al usuario una adecuada elección del tiempo de medida y del tratamiento del ruido de fondo, que si no son bien gestionados pueden dar lugar a notables diferencias entre los sistemas de medida incluso cuando el requisito de superar los 45 dB haya sido alcanzado en todas las bandas de octava. En general el sistema B es el que proporciona menores valores de INR.

El hardware común, constituyente de la cadena de medida, está constituido por el dispositivo USB de audio EDIROL UA-101 de Roland, que soporta varios canales de entrada y salida y es controlado por

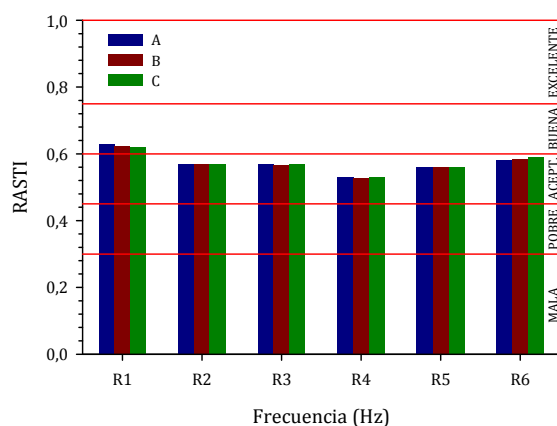


Figura 5 – Valores del índice RASTI obtenidos a partir de las RI con cada sistema y para cada receptor.

el software de cada uno de los sistemas ensayados. La señal generada por cada uno de éstos, a través del citado dispositivo, alimenta al amplificador de potencia B&K-2734 y se emite al recinto a través de la fuente omnidireccional dodecaédrica AVM DO-12. Las respuestas al impulso son capturadas mediante el micrófono multipatrón Audio-Technica AT4050/CM5, que permite elegir manualmente entre un patrón omnidireccional o de figura de ocho. Cuando se calculan parámetros relacionados con la impresión espacial que así lo requieren, se utilizó el simulador de torso tipo HMU III de Head Acoustic.

### 3 Comparativa de los sistemas de medida

El proceso planificado se ha estructurado en dos análisis diferentes. En primer lugar, las RI medidas con cada uno de los sistemas se han almacenado en el formato propio de cada uno de ellos y se han procesado para obtener los valores espectrales, en bandas de octava, de los parámetros acústicos y de las diferencias observadas entre los diferentes sistemas. Además se evaluarán los valores únicos, promediados espectralmente, siguiendo las recomendaciones de la norma ISO correspondiente, y normalmente utilizados como criterio de valoración acústica; así mismo se valoran las diferencias asociadas en términos de los valores umbrales de percepción (JND).

En segundo lugar las señales registradas se convertirán al formato universalmente aceptado para archivos de audio “wav”, común a todos ellos, con objeto de volver a procesar las señales registradas con cada sistema con los dos restantes, tras importarlas desde dicho formato y poder comparar así la intercambiabilidad de los diferentes algoritmos de computación. En algunas situaciones concretas se han procesado con otros dos sistemas que se han utilizado como sistemas de control en el procesado pero que no se utilizaron en el procedimiento de medida.

#### 3.1 Parámetros de sala obtenidos con cada sistema de medida

Con el fin de cuantificar el orden de magnitud de los parámetros acústicos de la sala, en la Figura 4 se muestran los valores espectrales, promediados espacialmente, para cada uno de los sistemas de medida, que hemos denominado A, B y C, para cada uno de los parámetros analizados: el tiempo de reverberación ( $T_{30}$ ), el tiempo de reverberación inicial (EDT), el tiempo central ( $T_S$ ), la claridad ( $C_{30}$ ), la definición ( $D_{50}$ ), la fracción de energía lateral precoz ( $J_{LF}$ ) y los coeficientes de correlación cruzada

interaural precoz ( $IACC_E$ ) y tardío ( $IACC_L$ ) [16]. Aunque los promedios espaciales obtenidos con cada uno de los sistemas son muy similares para todos los parámetros, se pueden apreciar ciertas diferencias, especialmente a bajas frecuencias, que se analizan con más detalle a continuación.

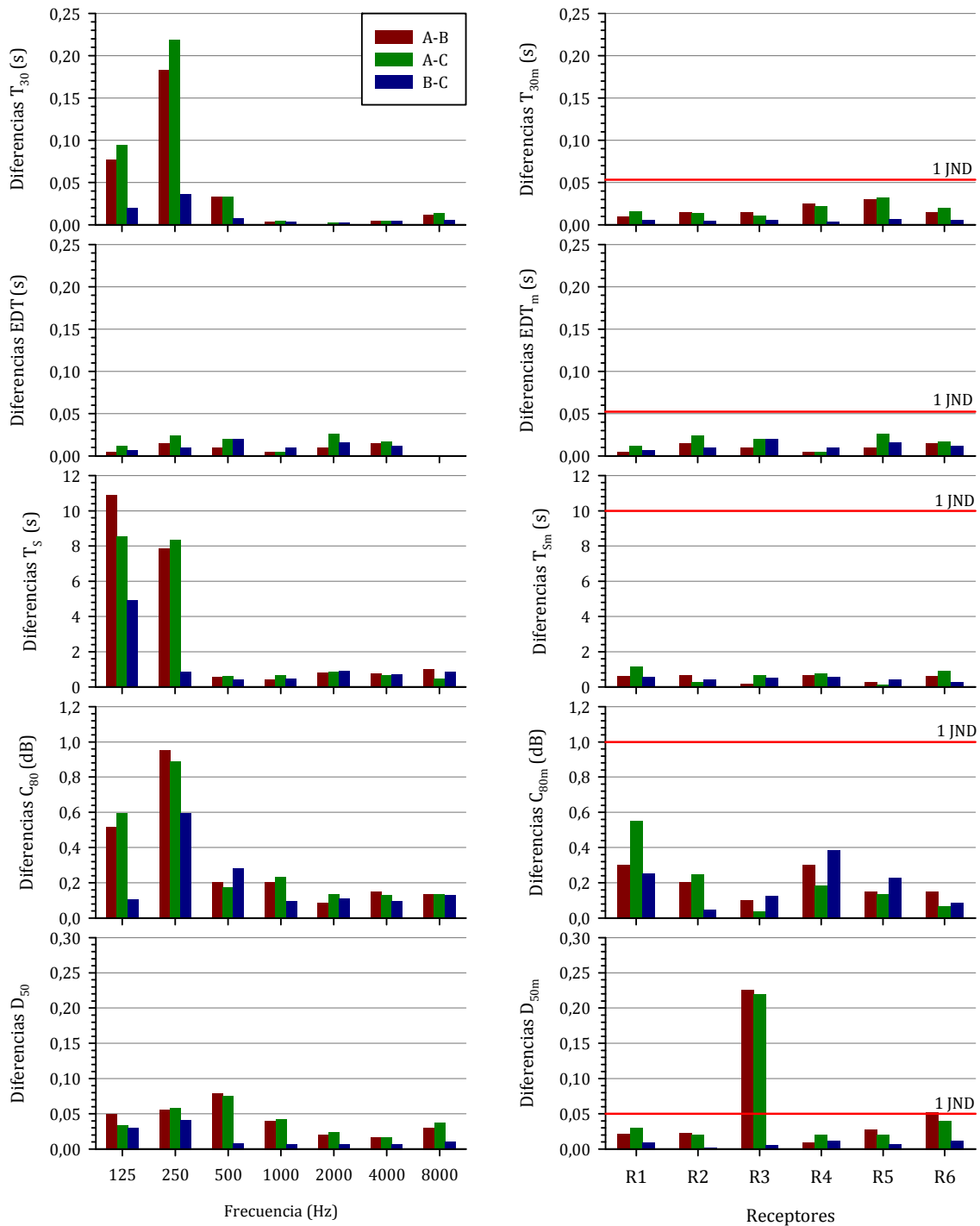


Figura 6 - Diferencias entre sistemas de medida (A; B y C) para  $T_{30}$ , EDT,  $T_S$ ,  $C_{80}$  y  $D_{50}$ . A la izquierda los valores espectrales, promediados espacialmente, y, a la derecha, los valores espectralmente promediados para cada receptor.

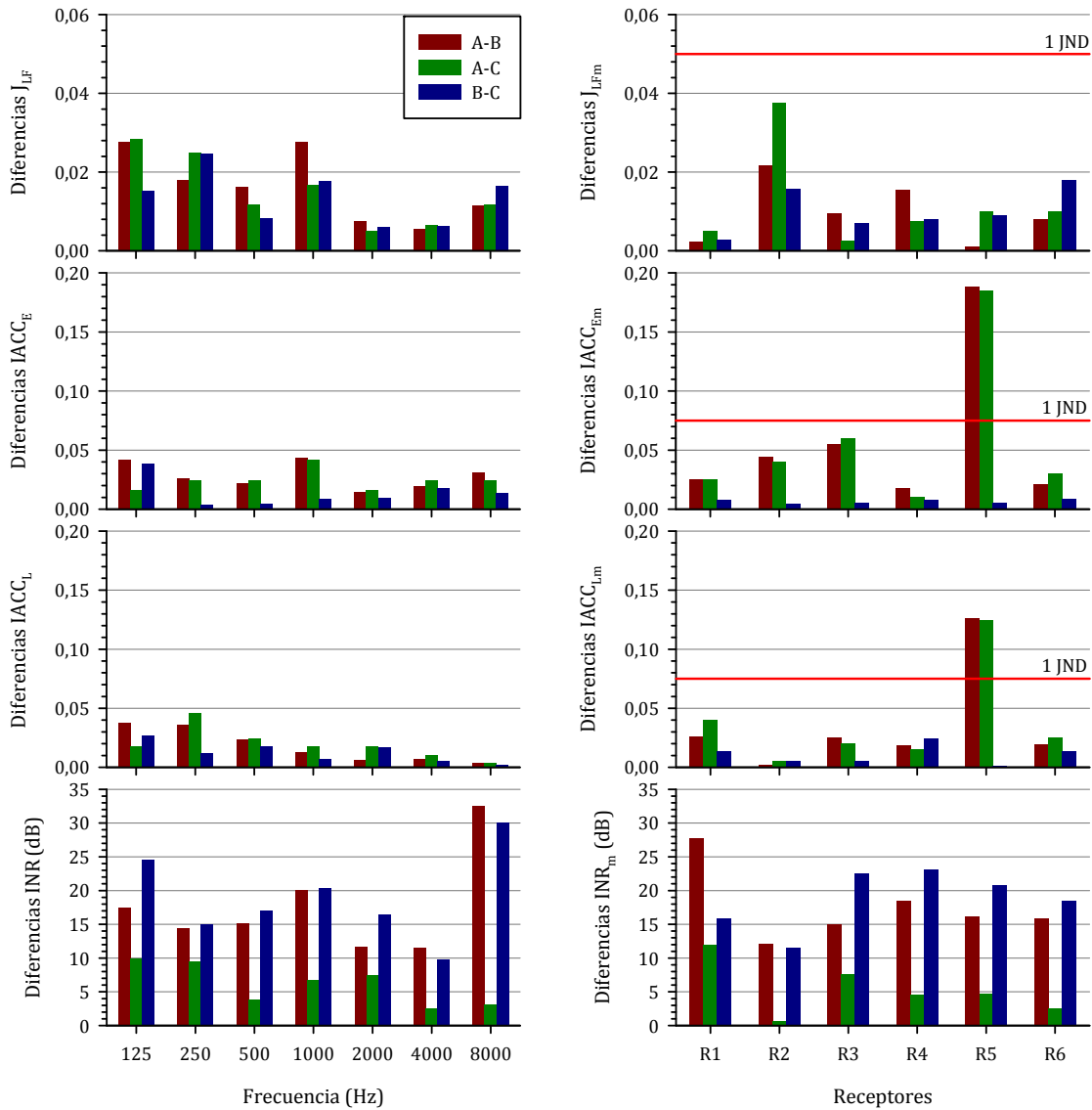


Figura 6 (cont.) – Diferencias entre sistemas de medida (A; B y C) para  $J_{LF}$ ,  $IACC_E$ ,  $IACC_L$  e INR. A la izquierda los valores espectrales, promediados espacialmente, y, a la derecha, los valores espectralmente promediados para cada receptor.

En la Figura 5 se muestran los valores del índice RASTI (*rapid speech transmission index*) obtenidos a partir de las RI registradas, por tanto no se considera el efecto del ruido de fondo aunque se considera despreciable. En este caso los valores son prácticamente idénticos por lo que no se hace un análisis específico de las diferencias.

En la columna de la izquierda de la Figura 6 se presenta un estudio de los valores absolutos de las diferencias espectrales obtenidas para cada parámetro, con cada sistema de medida, cuando se promedian espacialmente. Además se presentan los valores absolutos de las diferencias para las INR obtenidas.



Cuando analizamos las diferencias de los valores promediados espacialmente frente a la frecuencia podemos observar que éstas son menores cuando se comparan los sistemas B y C. Ambos sistemas tratan de forma similar el cálculo de la INR, aun cuando el valor numérico de la misma difiere en uno y otro sistema. Además, los parámetros relacionados con la reverberación y la claridad del sonido percibida (que analizan la relación entre energía precoz y tardía), presentan mayores diferencias en las bajas frecuencias. En cualquier caso todos los sistemas presentan diferencias muy pequeñas, por lo que permitirían evaluar acústicamente la sala de igual forma como ya habíamos indicado.

Puesto que para valorar cada posición del receptor la ISO [16] establece un promedio espectral para cada uno de los parámetros y asocia un valor de discriminación a cada uno de ellos, el JND (*just noticeable difference*), se ha realizado un análisis de las diferencias de estos índices promediados espectralmente para cada uno de los receptores, en términos de los respectivos JND. El valor absoluto de las diferencias para cada parámetro de sala no supera dicho valor, a excepción de la definición (receptor 3) y los parámetros relacionados con la impresión espacial (receptor 5). Esta diferencia es atribuible a la medida realizada con el sistema A y estimamos que está relacionada con la detección de la llegada del sonido directo, pues la diferencia encontrada es significativa con respecto a los otros dos sistemas en todas las bandas de octava cuando examinamos ambos receptores. Por motivos de espacio

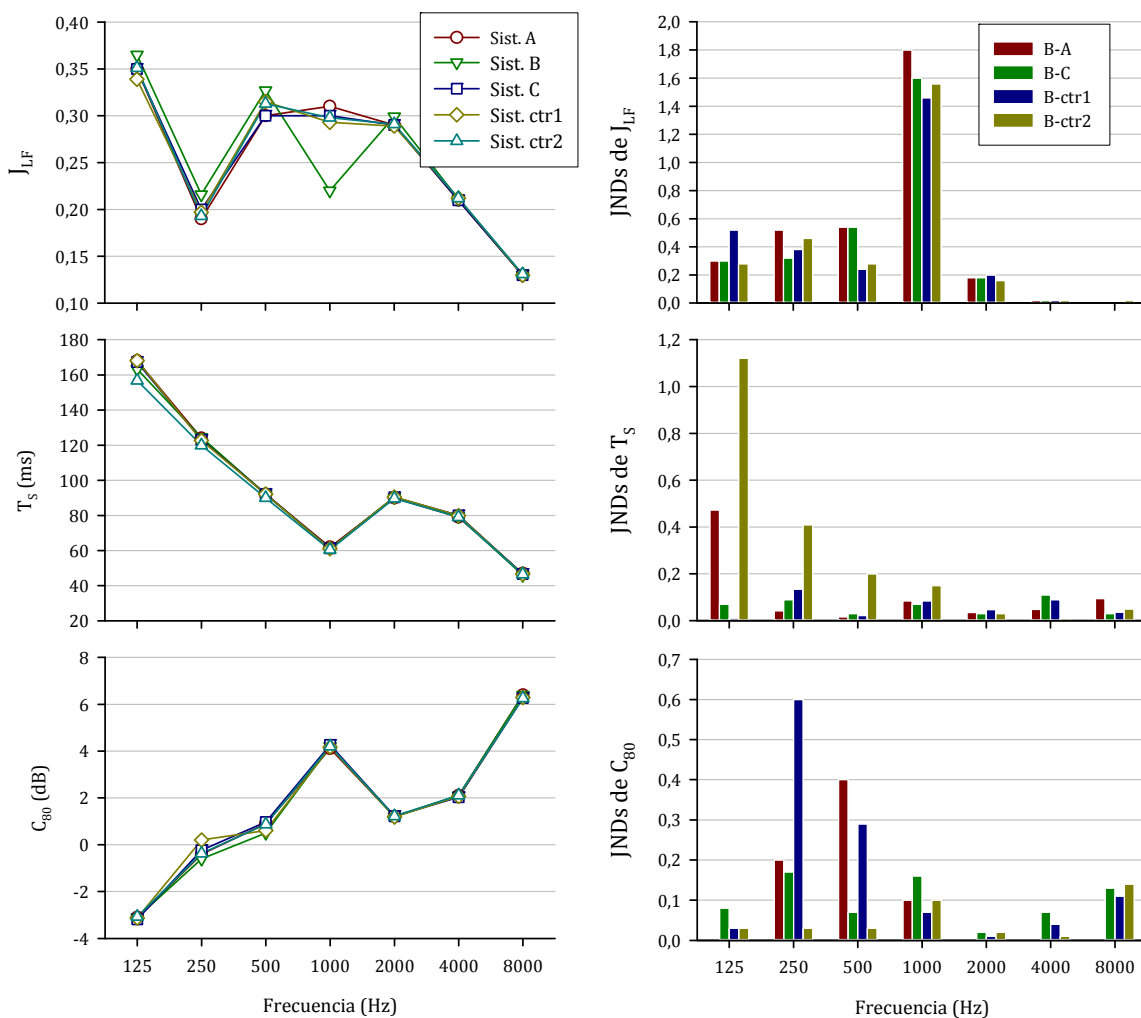


Figura 7 – Comparación de parámetros calculados a partir de las RI medidas en el punto R4. A la izquierda los valores espectrales, y, a la derecha, las diferencias, en términos de los respectivos JND por bandas de octava.

este análisis pormenorizado no ha sido incluido aquí.

### 3.2 Análisis cruzado utilizando formato común de intercambio de archivos

Puesto que todos los sistemas permiten exportar al formato universal de audio “wav”, además de otros formatos ampliamente aceptados en este ámbito, se planteó un análisis cruzado entre ellos en el que la señal registrada con cada uno es exportada a dicho formato (con resolución de 16 y 32 bits) y procesada con los otros dos. Los resultados obtenidos para todas las combinaciones posibles, de la mayoría de los parámetros acústicos, para ambas resoluciones, son muy similares a los obtenidos con cada uno de ellos de forma independiente, presentando en todo caso diferencias muy inferiores al valor de 1JND.

El parámetro  $J_{LF}$  ha dado lugar a un análisis más riguroso, debido a las grandes diferencias encontradas inicialmente entre los valores calculados a partir de la señal exportada con 32 bits (valores similares a los obtenidos con cada software de forma independiente) y los calculados a partir de la señal exportada con 16 bits, con la que se obtenían valores mayores que la unidad (fuera del rango de valores del parámetro). Estos valores erróneos se deben al factor de normalización que aplican los sistemas con el objetivo de exportar la señal en formato wav de 16 bits con la máxima resolución posible. Dicho factor de normalización se calcula de forma independiente para la RI omnidireccional y la RI figura de ocho, perdiendo la relación de escala entre ambas; cuando este factor de normalización no puede ser leído por el software que importa la señal y la analiza, el cálculo del  $J_{LF}$  se ve afectado. Al exportar la señal en formato wav sin normalizar, los resultados obtenidos con los tres sistemas y los dos sistemas de control adicionales empleados arrojan resultados muy similares, permitiendo el intercambio de archivos entre todos ellos de forma fiable.

La Figura 7 muestra los resultados para el receptor R4, que es en el que aparecen las diferencias más notables, y aun así, los resultados obtenidos con todos los sistemas son muy similares. Es excepcional el comportamiento del valor de  $J_{LF}$  en la banda de 1 kHz con el sistema B y que no tiene justificación aparente a pesar de los esfuerzos realizados en este sentido.

## 4 Conclusiones

Se ha realizado un riguroso ensayo comparativo entre diferentes sistemas de medida; en primer lugar se han comparado los valores espectrales y los promedios en frecuencia recomendados obtenidos a partir de las señales registradas y procesadas por cada uno de los sistemas y, en segundo lugar, utilizando formatos comunes de intercambio de archivos se han comparado los resultados de procesamiento cruzado. Todos ellos proporcionan resultados muy similares. Todos los sistemas proporcionan resultados análogos midiendo y analizando de forma independiente, apareciendo las mayores diferencias a bajas frecuencias. Es posible intercambiar archivos entre los diferentes sistemas siempre que en el proceso de exportación no se utilicen procesos de normalización o escalado de la señal, pues no todos son capaces de leer esa información. Hemos de indicar que en este proceso no se ha utilizado el parámetro fuerza sonora,  $G$ , que requiere un proceso de calibración específico para toda la cadena de medida y es más difícil el transporte de dicha calibración entre ellos. Finalmente aparecen algunas dificultades específicas asociadas a cada uno de ellos que conviene considerar: así el sistema A en algunas situaciones presenta problemas al detectar automáticamente la llegada del sonido directo; el sistema B, en función de la configuración de medida, no compensa correctamente la afección del ruido de fondo en la respuesta al impulso, lo que puede producir errores en los parámetros que miden la reverberación; el sistema C es menos flexible a la hora de procesar señales registradas con otros sistemas y sólo admite dos canales de medida.

## Agradecimientos

Este trabajo está financiado por fondos FEDER y el Ministerio de Ciencia e Innovación Español, dentro del proyecto BIA2010-20523.

## Referencias

- [1] Schroeder, M.R. New method of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.* 37, 1965, 409-412.
- [2] Kürer, R.; Kurze, U. Integrationsverfahren zur nachhallauswertung, (Integration procedure for evaluating reverberation). *Acustica* 19, 1968, 313-322.
- [3] Lundeby, A.; Vigran, T.E.; Bietz, H.; Vorländer, M. Uncertainties of measurements in room acoustics. *Acustica* 81, 1995, 344-355.
- [4] Chu, W.T. Comparison of reverberation measurements using Schroeder's impulse method and decay-curve averaging method. *J. Acoust. Soc. Am.* 63, 1978, 1444-1450.
- [5] Xiang, N. Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach. *J. Acoust. Soc. Am.* 98, 1995, 2112-2121.
- [6] Morgan, D.R. A parametric error analysis of the backward integration method for reverberation time estimation. *J. Acoust. Soc. Am.* 101(5), 1997, 2686-2693.
- [7] Huszty, C.; Sakamoto, S. A note on the definition of signal-to-noise ratio of room impulse responses. *Acoust. Sci. & Tech.* 33(2), 2012, 117-120.
- [8] Bradley, J.S. *An International Comparison of Room Acoustics Measurement Systems*. Internal Report, IRC-IR-714 National Research Council, Canada 1996.
- [9] Katz, B.F.G. International round robin on room acoustical impulse response analysis software 2004. *Acoustic Research Letters Online*, 23 August 2004.
- [10] San Martín, R.; Witew, I.B.; Arana, M.; Vorländer, M. Influence of the source orientation on the measurement of acoustic parameters. *Acta Acustica-Acustica*, 93, 2007, 387-397.
- [11] Perlorson, X., Vian, J-P. On the variability of room acoustical parameters: reproducibility and statistical validity. *Appl. Acoust.* 37, 1992, 175-198.
- [12] De Vries, D.; Hulsebos, E.M.; Baan, J. Spatial fluctuations in measures for spaciousness. *J. Acoust. Soc. Am.* 110, 2001, 947-954.
- [13] Fausti, P.; Farina, A. Acoustic measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment. *J. Sound Vib.* 232(1), 2000, 213-229.
- [14] Policardi, F. MLS and Sine-Sweep technique comparison in room-acoustic measurements. *Elektrotehniški Vestnik* 78(3), 2011 91-95.
- [15] Segura, J.; Giménez, A.; Romero, J.; Cerdá, S. A comparison of different techniques for simulating and measuring acoustic parameters in a place of worship: Sant Jaume Basílica in Valencia, Spain. *Acta Acustica-Acustica* 97, 2011, 155-170.
- [16] UNE-EN-ISO 3382-1:2010. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 1: salas de espectáculos. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, 2010.