



VI Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA 2008  
Buenos Aires, 5, 6 y 7 de noviembre de 2008

FIA2008-A087

## Comparación objetiva de respuestas impulsivas de recintos medidas y simuladas

Fabián C. Tommasini<sup>(a,b)</sup>,  
Oscar A. Ramos<sup>(a,b)</sup>,  
Sebastián P. Ferreyra<sup>(a)</sup>.

(a) Centro de Investigación y Transferencia en Acústica, CINTRA, UA del CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina, Córdoba, Argentina. E-mail: ftommasini@gmail.com

(b) Miembro del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina

### Abstract

The acoustic properties of a room are characterized by its Impulse Response (IR). It is essential for a Virtual Acoustic Reality System to simulate in a convincing manner this response. It was developed a model that can simulate an arbitrary room's IR based on: the geometry, the acoustic characteristics of materials and the propagation characteristics. To obtain the early reflections, the image-source method was utilized. To calculate the late reverberation, a feedback delay network was employed. The purpose of the present work is to compare measured impulse responses of a simple geometry small room and a large dimensions room with the model results. For the analysis, recommended parameters for the ISO 3382:1997 standard were used.

### Resumen

Las propiedades acústicas de un recinto se caracterizan por su Respuesta Impulsiva (RI). Es esencial para un Sistema de Realidad Acústica Virtual simular de manera convincente dicha respuesta. Se ha desarrollado un modelo que permite simular una RI de un recinto arbitrario a partir de: la geometría, las características acústicas de los materiales y las características de propagación. Para obtener las reflexiones tempranas, se utilizó el método de la fuente-imagen, mientras que para la reverberación tardía se empleó una red de retardo realimentada. El objetivo del presente trabajo es comparar respuestas impulsivas medidas de un recinto pequeño de geometría sencilla y de otro de dimensiones mayores con las producidas por el modelo. Se utilizaron para el análisis, algunos de los parámetros recomendados por la norma ISO 3382:1997.

## 1 Introducción

Estamos abocados al desarrollo de un Sistema de Realidad Acústica Virtual utilizando hardware y software estándares. Para alcanzar este propósito tres subsistemas deben ser modelados: la fuente sonora, el recinto y el medio de propagación y el oyente o receptor.

Para una configuración dada de fuente y receptor, un recinto puede ser caracterizado, en el dominio del tiempo, por su Respuesta Impulsiva (*Room Impulse Response*, RIR), asumiendo que el mismo es lineal e invariante en el tiempo.

La RIR se compone del sonido directo, las reflexiones tempranas (especulares y difusas) y las reflexiones tardías. El sonido directo es el que primero escuchará el oyente, seguido por las reflexiones tempranas, cuyas direcciones son cruciales para la localización de la fuente sonora. Después de 60 a 100 ms (dependiendo de la sala), comienzan las reflexiones tardías que tienen una mayor densidad. Se asemejan a un proceso aleatorio cuyas direcciones son irrelevantes pero claves para la percepción de las dimensiones, la calidad acústica del recinto y de la distancia a la fuente sonora.

El propósito del presente trabajo es validar objetivamente las RIR generadas por un modelo que desarrollamos con RIR medidas en recintos reales. Se utilizaron para tal fin dos recintos con características diferentes: uno de geometría sencilla y dimensiones pequeñas y otro de geometría más compleja y dimensiones mayores. Para realizar la validación se adoptaron algunos parámetros recomendados por la norma ISO 3382:1997 (ISO 3382, 1997).

## 2 Descripción del modelo

En la figura 1 se muestra un esquema del modelo implementado. Los datos de entrada son: la geometría del recinto, las posiciones de la fuente y del oyente y las características acústicas de los materiales. Para simular las reflexiones tempranas se utilizan: el método de la fuente-imagen (*Image-Source Method*, ISM) (Borish, 1984), filtros de absorción de los materiales (Huopaniemi et. al., 1997), filtros de difusión (Pellegrini, 2001) y filtros de absorción del medio (absorción del aire y atenuación por la distancia) (Huopaniemi et. al., 1997). Las reflexiones tardías o cola de reverberación se simulan mediante una red de retardo realimentada (*Feedback Delay Network*, FDN) (Jot and Chaigne, 1991; Jot, 1992). Luego se realiza la unión entre las reflexiones tempranas y las tardías.

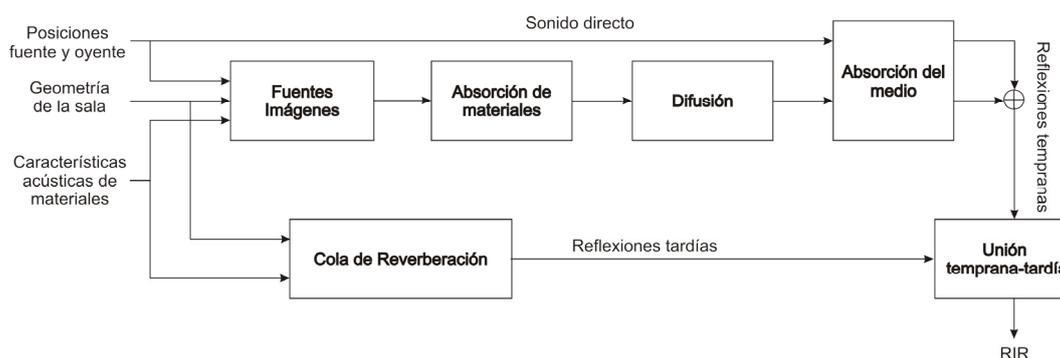


Figura 1. Esquema del modelo implementado.

## 3 Descripción de los recintos

Uno de los recintos es un aula de clases de dimensiones pequeñas y geometría sencilla y el otro, es un salón de usos múltiples (SUM) en construcción de grandes dimensiones. En la figura 2 se muestran vistas parciales de ambos. En la tabla 1 se listan sus características geométricas y sus tiempos de reverberación globales.

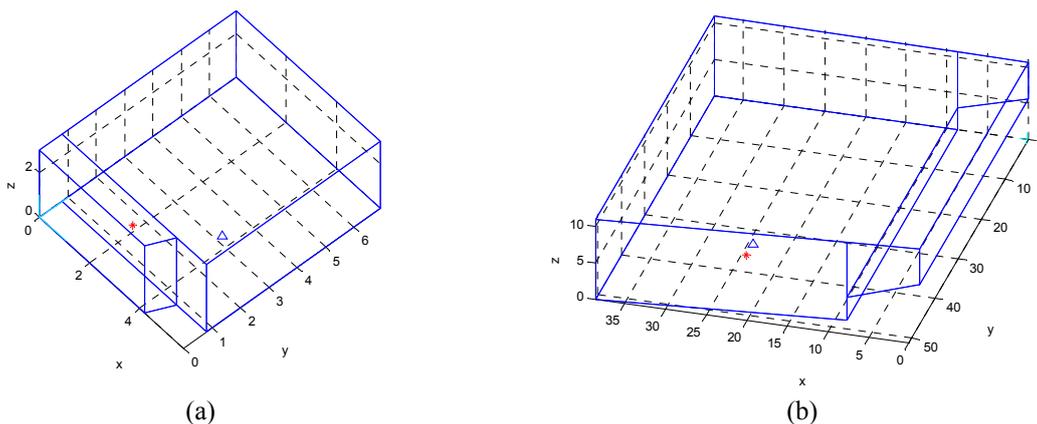


**Figura 2.** Fotografías de los recintos en el momento de la medición: (a) aula y (b) SUM.

**Tabla 1.** Tabla comparativa de los recintos.

	Aula	Salón
Altura máxima [m]	3,03	11,00
Ancho máximo [m]	5,74	38,68
Largo máximo [m]	6,93	51,20
Superficie total interior [m <sup>2</sup> ]	153,34	5 510,24
Volumen [m <sup>3</sup> ]	117,26	18 703,00
Tiempo de reverberación global (T30) [s]	3,63	6,46

En la figura 3, se ven los diseños simplificados realizados con AutoCAD y procesados con nuestro software. Se detallan las posiciones de fuente (\*) y oyente (Δ).



**Figura 3.** Diseños simplificados de los recintos: (a) aula y (b) SUM. La posición de la fuente se señala con \* y con Δ la posición del receptor.

Como se podrá observar, no se ha tenido en cuenta algunos detalles constructivos y se han simplificado otros. En ambos se han obviado las ventanas vidriadas y las puertas; y en el SUM la tribuna o gradas (figura 3b) se la reemplazó por un plano inclinado. Se asumió

además, que las paredes, techo y piso están contruidos con el mismo material y que su terminación fue similar. Esto se debe a que, en esta etapa del estudio, pretendemos detectar errores que nos permitan corregir las deficiencias del modelo desarrollado.

#### 4 Equipamiento y condiciones de medición

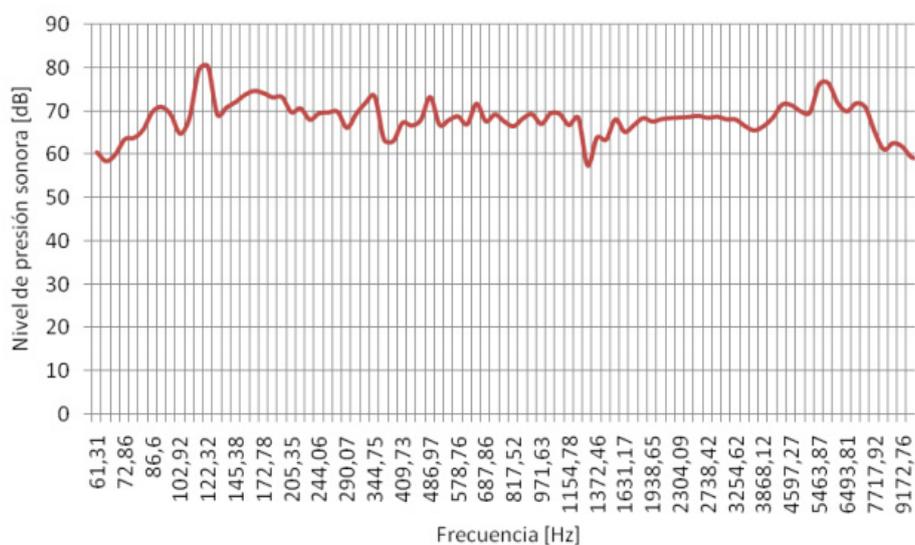
Para ambas mediciones se utilizó una cadena de instrumentación electroacústica de acuerdo a lo recomendado en la norma ISO 3382:1997 y que se detalla en la tabla 2.

**Tabla 2.** Instrumentos utilizados para las mediciones.

Instrumento	Marca/Modelo
Placa de adquisición de sonido (44100 Hz y 16 bits)	Realtek HD Audio
Software de acústica de salas	Brüel & Kjær type 7841 (Dirac v3.0)
Micrófono	Brüel & Kjær type 4133
Pre-amplificador para micrófono	Brüel & Kjær type 2804
Consola de mezcla	Behringer Eurorack UB-1204 FX-PRO
Amplificador de potencia	Brüel & Kjær type 4224
Fuente sonora omnidireccional (dodecaedro)	CINTRA
Medidor de nivel de presión sonora	Brüel & Kjær type 2250
Medidor láser de distancia	Spectra HD 150

Las mediciones se realizaron siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 3382:1997. La RIR se obtuvo a partir de una técnica indirecta de medición, mediante deconvolución de las respuestas obtenidas utilizando como señal excitación un barrido exponencial de señales senoidales: e-sweep (Ferreira and Ramos, 2007).

La fuente sonora utilizada fue un dodecaedro omnidireccional de desarrollo propio (Ortiz Skarp et. al., 2005). En la figura 4 se grafica su respuesta en frecuencia para el eje axial y dirección de 0 grados. No está disponible su diagrama de directividad. El ancho de banda del análisis fue restringido entre 125 Hz y 8000 Hz.



**Figura 4.** Respuesta en frecuencia de la fuente sonora omnidireccional tipo dodecaedro por 1/12 de octava.

## 5 Análisis de los resultados

Se utilizó el programa Dirac para obtener las RI de los recintos reales. En un primer momento, se utilizaron coeficientes de absorción extraídos de tablas de dominio público. Resultados preliminares mostraron grandes discrepancias entre los parámetros calculados con las RIR medidas y las simuladas. Como sospechábamos de los coeficientes de absorción que habíamos adoptado, resolvimos estimarlos a partir del T30 medido. Se utilizó la fórmula de Norris-Eyring para cálculo del tiempo de reverberación  $T_r$  (Knudsen and Harris, 1950).

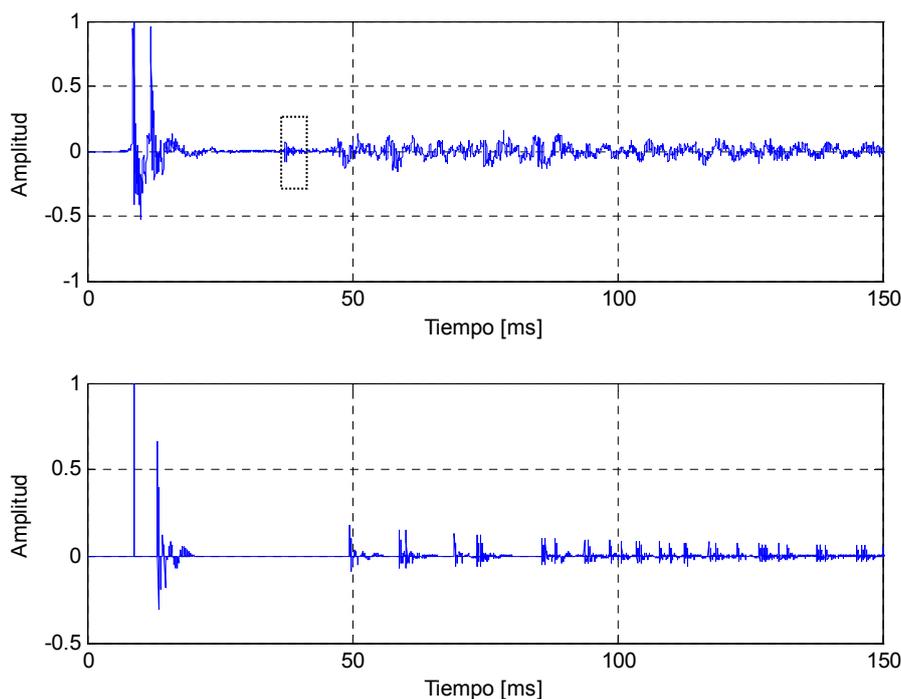
$$T_r = \frac{0,161V}{-S_t \ln(1 - \bar{\alpha})} \Rightarrow \bar{\alpha} = 1 - e^{-\frac{0,161V}{S_t T_r}}, \quad (1)$$

donde  $V$  es el volumen de la sala,  $\bar{\alpha}$  es el coeficiente de absorción medio que depende de la frecuencia y  $S_t$  es la superficie interior total.

Las mejoras fueron notables y se muestran a continuación.

### 5.1 Reflexiones tempranas

Se muestra en la figura 5, a modo de ejemplo, las reflexiones tempranas del SUM obtenidas de la RI medida y la simulada. Para la simulada se empleó fuentes imágenes hasta quinto orden con el agregado de difusión.



**Figura 5.** Comparación de las reflexiones tempranas de la RIR medida (gráfico superior) y la simulada (gráfico inferior).

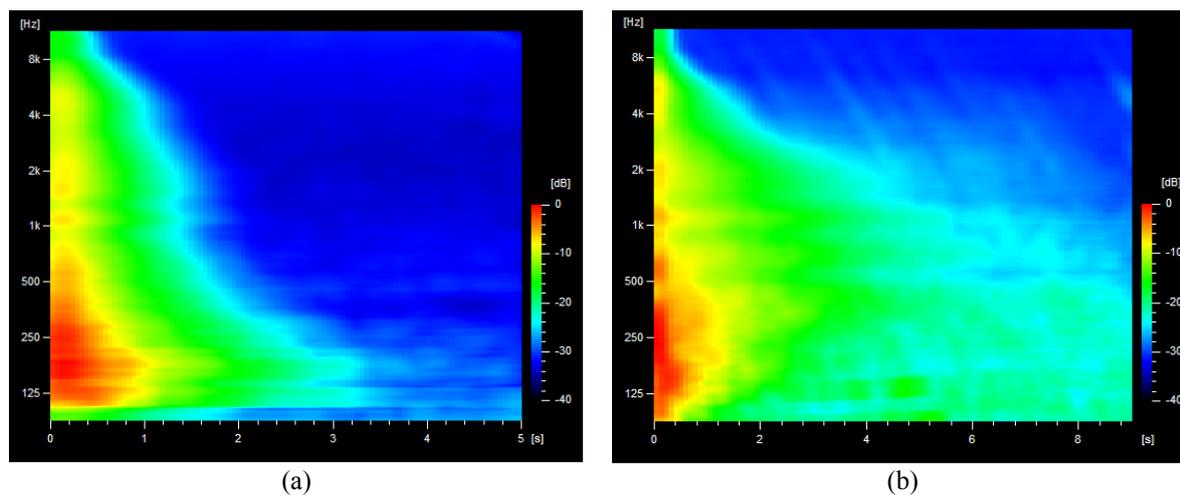
Luego del sonido directo, se observa la primera reflexión del piso. A los 50 ms se ve la reflexión en el techo, seguido de reflexiones de diferentes órdenes que provienen de las paredes laterales, pared posterior, techo y piso. En la RIR medida se ve una entre las del piso y la del techo (remarcada). Esta se debe a una reflexión originada en una columna que se encuentra detrás de la fuente (ver figura 2b) y que no fue incluida en el modelo geométrico

del recinto (figura 3b). Las reflexiones discretas muy evidentes en la RIR simulada están oscurecidas en la RIR medida debido al ruido de fondo y probablemente a la presencia de modos normales de bajas frecuencias, no tenidos en cuenta en la simulación.

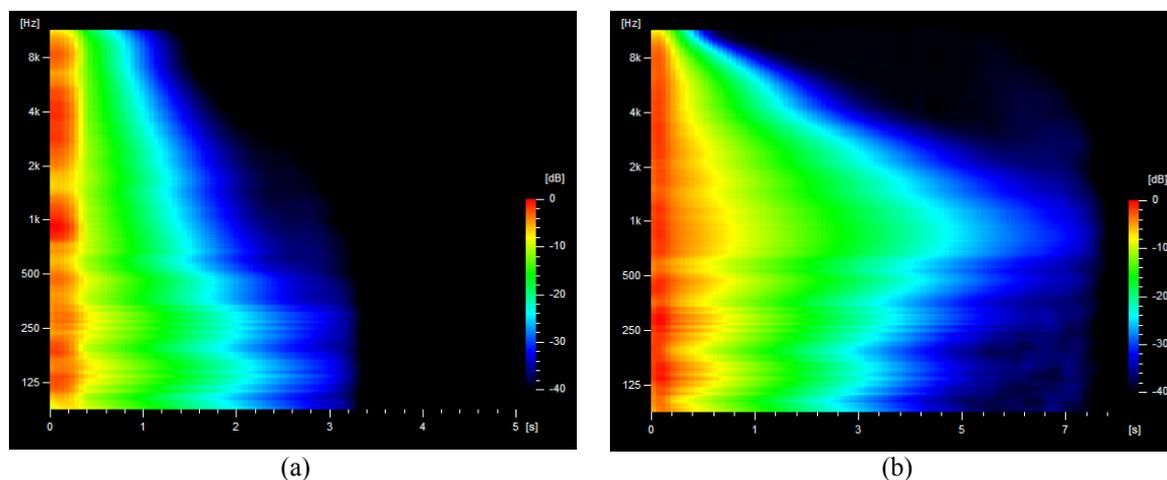
## 5.2 Espectrogramas

Para evaluar globalmente los comportamientos de las RIR simuladas y las medidas se realizaron espectrogramas. Ellos muestran a lo largo de la duración de las RIR, la distribución de la energía para diferentes bandas de frecuencia.

En la figura 6 se muestran los espectrogramas de la RIR medidas en ambos recintos y en la figura 7 los de las RIR simuladas.



**Figura 6.** Espectrogramas de las RIR medidas: (a) aula y (b) SUM.



**Figura 7:** Espectrogramas de las RIR simuladas: (a) aula y (b) SUM.

En el aula, la energía mayor se da en el primer segundo de la respuesta y para frecuencias bajas entre 125 y 250 Hz (color naranja). Un aumento sistemático de la energía se nota (verde claro) desde los 500 ms en altas frecuencias hasta casi los 3 s en bajas frecuencias. A continuación existe una zona en donde la energía decrece desde el celeste al azul que puede ser atribuido al ruido de fondo durante la medición. Los perfiles de colores en el espectrograma de la RIR simulada, muestra cierta similitud con los medidos, con algunas

excepciones. La energía mayor está concentrada en los primeros 500 ms y es constante para todo el rango de frecuencias. La zona del verde claro tiene la misma tendencia que en el espectrograma de la RIR medida pero los valores de energía alcanzados en bajas frecuencias se extinguen a los 2 s. Finalmente, de la energía representada por el color azul se pasa abruptamente al negro debido a la ausencia de ruido de fondo en la RIR simulada.

Por razones de espacio, se invita al lector realizar un análisis similar para el SUM. Solo hacemos notar que existe en la distribución en la zona verde, tanto en la medida como en la simulada un máximo alrededor de los 1000 Hz que se reflejará en los valores del tiempo de reverberación. Haciendo un análisis cuidadoso de los espectrogramas de las RIR medidas se pueden detectar los modos normales de ambos recintos.

### 5.3 Comparación de parámetros recomendados por la norma ISO 3382

Se analizan a continuación los tiempos de reverberación (EDT, T10, T20, T30) y el centro de tiempo (Ts), tanto del aula como del SUM contra la simulación respectiva. Para su cálculo se utilizó el software Dirac.

En la figura 8 se muestran los tiempos de reverberación. En el caso del aula, se ve que el EDT se ajusta bien hasta 500 Hz y discrepa considerablemente por arriba de esa frecuencia. T10 presenta en todo el rango un ajuste aceptable mientras que T20 y T30 ajusta excelentemente por encima de 500 Hz y subestima para frecuencias por debajo de los 500 Hz. Si analizamos los tiempos para el SUM se comprueba que, en general, el ajuste es bueno para todas las frecuencias con la particularidad de que la simulación sobreestima entre 2000 Hz y 4000 Hz; subestima entre 250 Hz y sobreestima para 125 Hz.

En la figura 9 se muestran gráficas del centro de tiempo. En ambos las discrepancias son importantes, sin embargo las tendencias respecto a la frecuencia son similares a las reales. Los resultados son parecidos con la claridad (C80) y con la definición (D50), no mostrados aquí.

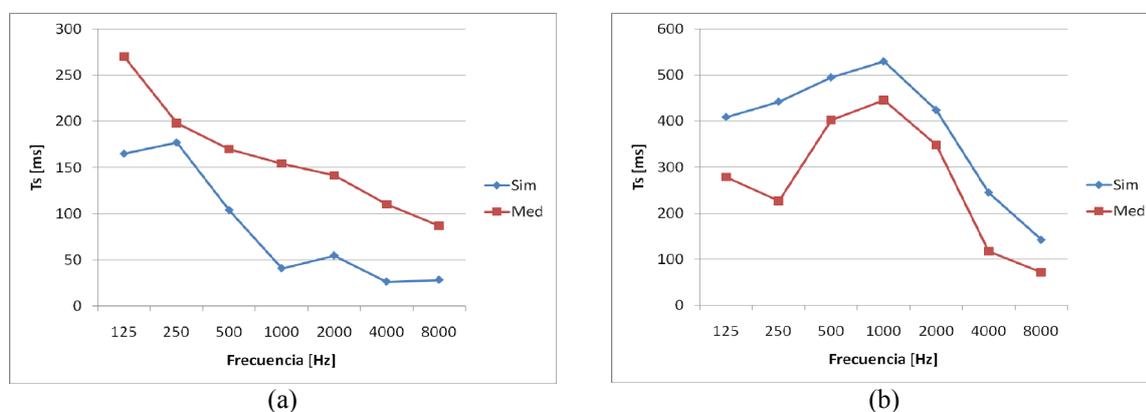
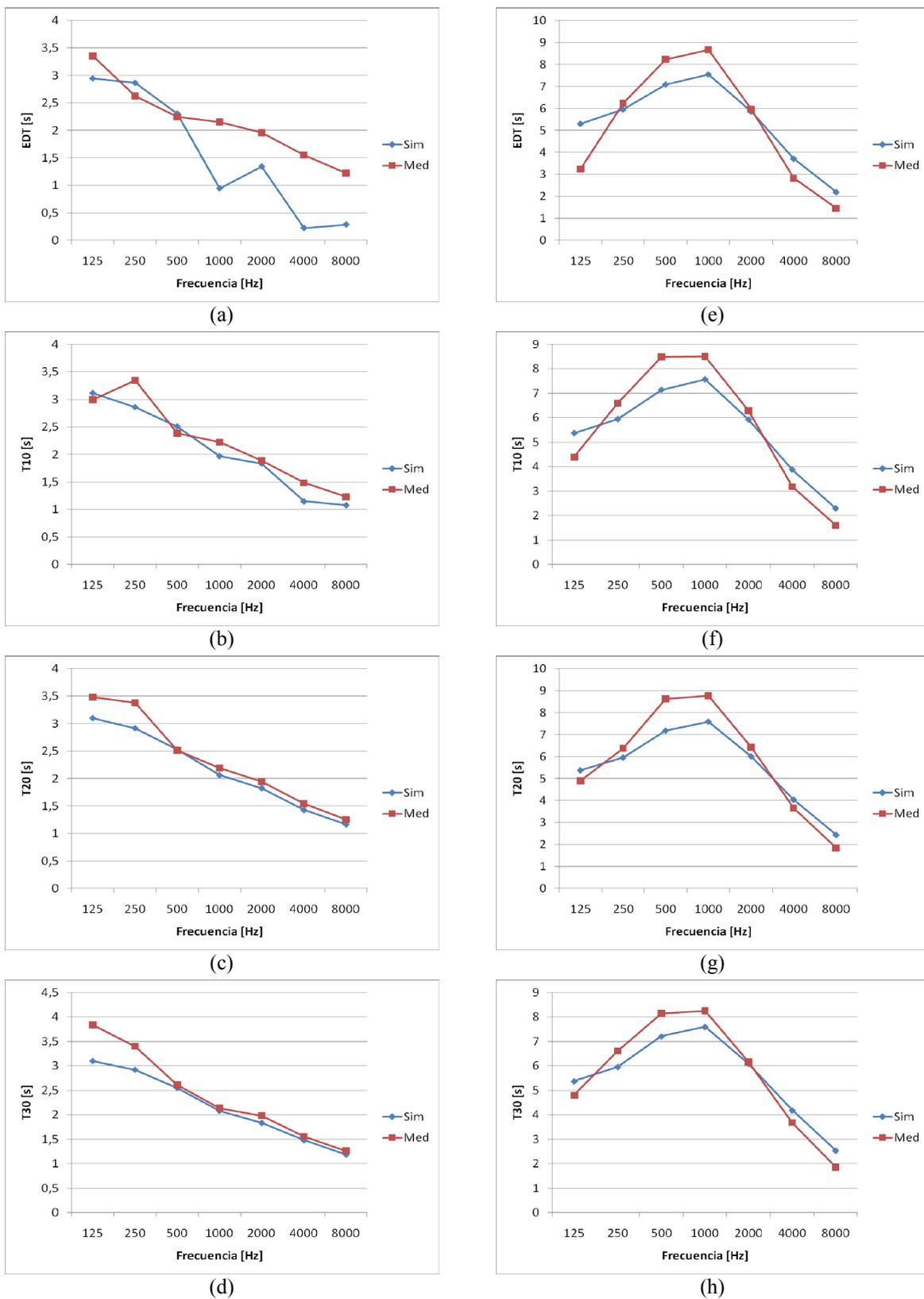


Figura 9. Comparación del centro de tiempo: (a) del aula y (b) del SUM.

Como una manera de caracterizar con un índice la calidad de la simulación, se ha calculado el error medio cuadrático porcentual entre los parámetros calculados a partir de las RIR medidas y las simuladas, según la fórmula siguiente:

$$Error [\%] = 100 \frac{\|x_m - x_s\|^2}{\|x_m\|^2}, \quad (2)$$

donde  $x_m$  son los valores medidos por octavas y  $x_s$  son los valores simulados.



**Figura 8.** Comparación de tiempos de reverberación: desde (a) a la (d) se muestra respectivamente el EDT, T10, T20 y T30 del aula. Desde (e) a la (f) los correspondientes para el SUM.

En la tabla 3 se muestran los errores según la ecuación (2). Hacemos notar que el error para los tiempos de reverberación, salvo el EDT del aula, son menores al 5 %. Este valor es considerado desde el punto de vista perceptual, como la diferencia apenas notable (*just noticeable difference*, jnd) para estos tipos de parámetros (Vorländer, 1995).

**Tabla 3.** Errores porcentuales entre los parámetros calculados de la RI simulada y la medida.

	Aula	Salón
EDT	13,17 %	3,46 %
T10	1,24 %	1,99 %
T20	0,95 %	1,67 %
T30	1,80 %	1,08 %
Ts	22,78 %	16,88 %

## 6 Conclusiones

Las diferencias entre las RIR medidas y las simuladas obedecen a dos causas diferentes: discrepancias no inherentes al modelo y discrepancias inherentes al modelo.

### 6.1 Discrepancias no inherentes al modelo

- El modelo no tiene en cuenta las características reales de directividad y respuesta en frecuencia de la fuente utilizada en las mediciones. En la simulación la fuente es puntual y omnidireccional. Por lo tanto, se debe en primer lugar, caracterizar con precisión la fuente y en segundo lugar, desarrollar un modelo de la misma.

- Los valores de los parámetros que la norma ISO especifica varían, en algunos casos de manera alarmante, según el programa que se use para calcularlos. Suponemos que estas diferencias están relacionadas con el criterio que se adopte para determinar el nivel inicial, el límite de integración de la fórmula de Kuttruff y la efectividad del método utilizado para calcular la relación señal-ruido. En general este último determina la constante de integración mencionada. En consecuencia, la ausencia de ruido de fondo en la RIR simulada puede ser la causa de algunas discrepancias. Para salvar estas incertidumbres, se está desarrollando un programa en donde se tenga control sobre las variables mencionadas.

- La señal de excitación utilizada para el modelo y por la medición son diferentes. Para generar la RIR el modelo utiliza un impulso angosto (delta de Dirac) mientras que en las mediciones se utiliza un barrido exponencial de señales senoidales. Desconocemos la influencia de esta variable, pero es conocido que existen diferencias entre RIR medidas con diferentes señales de excitación (Vorlander, 1994; Ferreyra and Ramos, 2007).

- El grado de fidelidad entre el recinto real y simulado influye. Numerosos autores han investigado sobre la influencia de simplificar los modelos arquitectónicos y demostraron la influencia que estos tiene sobre el valor de algunos parámetros (Gade et. al., 2004).

### 6.2 Discrepancias inherentes al modelo

- El modelo no simula el comportamiento de un recinto para las bajas frecuencias. La ausencia en los espectrogramas de los modos normales es notoria. Se debe implementar algoritmos que permitan recrear este fenómeno.

- El orden y la cantidad de fuentes imágenes a generar es clave. En algunos recintos, sobre todo los más grandes como el SUM, hay fuentes imágenes de orden superior que generan rayos que arriban al receptor, antes que lo hagan aquellas de menor orden. Si el

criterio que se adopte es generar fuentes imágenes hasta cierto orden, existirán “silencios” en las reflexiones tempranas y en consecuencia, la energía de estas reflexiones será menor. Este puede ser el porqué los parámetros donde interviene la energía, como la claridad por ejemplo, discrepan significativamente con las RIR medidas. Un criterio más adecuado podría ser generar tantas fuentes imágenes, independiente del orden, cuyos rayos lleguen al receptor dentro de un tiempo prefijado.

- Otro aspecto que influye sobre aquellos parámetros en donde interviene la energía es el empalme entre las reflexiones tempranas y las tardías o cola de reverberación. Se debe desarrollar criterios confiables para determinar tanto el nivel como el tiempo en que el empalme debe ser realizado.

- Finalmente, se debe disponer de coeficientes de absorción fiables.

Los resultados obtenidos hasta ahora son alentadores. Hemos realizado un diagnóstico de las causas probables de las discrepancias que existen en algunos de los parámetros calculados de las RIR medidas y las simuladas. Un aspecto a destacar es la coherencia de los parámetros analizados para dos recintos tan disímiles tanto en tamaño como en complejidad.

### Referencias

- Borish, Jeffrey (1984). “Extension of the image model to arbitrary polyhedra”. *J. Acoust. Soc. Am.* 75(6), pp. 1827–1836.
- Ferreya, Sebastián P.; Ramos, Oscar A. (2007). “Análisis físico-acústico espacial de respuestas impulsivas de un recinto con alta dispersión sonora obtenidas por métodos indirectos”. *Mecánica Computacional*, Vol. XXVI, pp. 3-14.
- Gade, Anders C.; Lisa, Martin; Lyngé Claus; Rindel, Jens H. (2004). “Roman Theatre Acoustics: Comparison of acoustic measurement and simulation results from the Aspendos Theatre, Turkey”. In *Proceedings of 18th ICA*. Kyoto, Japan.
- Huopaniemi, Jyri; Savioja, Lauri and Karjalainen, Matti (1997). “Modeling of Reflections and Air Absorption in Acoustical Spaces: A Digital Filter Design Approach”. In *Proc. 1997 IEEE Workshop on Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics (WASPAA'97)*, Mohonk, New Paltz, New York.
- ISO 3382 (1997). “Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters”.
- Jot, Jean-Marc (1992). “An analysis/synthesis approach to real-time artificial reverberation”. In *Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, pp. II.221–II.224. San Francisco, USA. IEEE Press, New York.
- Jot, Jean-Marc and Chaigne, A. (1991). “Digital delay networks for designing artificial reverberators”. In *90th AES Conv.*, preprint 3030 (E-2).
- Knudsen, Vern O.; Harris, Cyril M. (1950). “Acoustical Designing in Architecture”. John Wiley & Sons, New York, USA.
- Ortiz Skarp, Aldo; Ferreyra, Sebastián P.; Perez Villalobo, Jorge; Novillo, David (2005). Fuente de campo sonoro homogéneo: construcción y verificación. In *IV Jornadas de Acústica, Electroacústica y Áreas Vinculadas (CADA)*. Buenos Aires, Argentina.
- Pellegrini, Renato S. (2001). “A Virtual Reference Listening Room as an Application of Auditory Virtual Environments”. PhD thesis, Ruhr-University Bochum.
- Vorländer, Michael (1995). “International round robin on room acoustical computer simulations”. In *15th International Congress on Acoustics (ICA 95)*. Trondheim, Norway.
- Vorländer, Michael; Bietz, Heinrich (1994). “Comparison of Methods for Measuring Reverberation Time”. *Acustica*, Vol. 80, pp. 205–215.