



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

FIA2008-A118

Análisis espacial de parámetros acústicos de recintos a partir de MRIR y BRIR

Sebastián P. Ferreyra^(a),
Oscar A. Ramos^(a,b).

(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: sferreyra@scdt.frc.utn.edu.ar

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

Abstract

To evaluate a room's acoustic properties is essential to know its Room Impulse Response (RIR). Traditionally, band filtered noise bursts and gun shots were used as excitation signals, both with low levels of Signal to Noise Ratio (SNR). Nowadays, to avoid this inconvenience, indirect techniques are used by applying continuous signals and digital signal post-processing for RIR calculation. The most used are: Maximum-Length Sequences (MLS) and sweep frequencies. At the first stage of this work, we made a comparative study of acoustic parameters defined in ISO 3382:1997. Those parameters were calculated from Monaural Room Impulse Responses (MRIR) measured in near, direct and reverberant fields in a room with high scattering using the direct and indirect method. We found significant variations in the results for some parameters, and determine advantages or disadvantages of the applied methods. At a second stage, we performed an acoustic-spatial analysis with Binaural Room Impulsive Responses (BRIR) using Head and Torso Simulator (HATS). The measurements was taken in near, direct and reverberant fields by indirect method. We detected variations in spatial parameters.

Resumen

Para evaluar las características acústicas de un recinto es crucial el conocimiento de su respuesta impulsiva (RIR). Tradicionalmente se ha utilizado como señal de excitación ráfagas de ruido filtrados por bandas y disparos de pistola, ambos con bajos niveles de relación señal ruido (SNR). Para salvar este inconveniente, se utilizan técnicas indirectas que emplean señales continuas y post-procesamiento digital de señales para calcular la RIR. Las más utilizadas son: Series binarias de Máxima Longitud y Barridos de Frecuencia. En una primera etapa, se realizó un estudio comparativo de parámetros acústicos definidos en ISO 3382:1997. Estos fueron calculados a partir de las respuestas impulsivas monoaurales (MRIR) medidas en campo *cercano*, *directo* y *reverberante* en un recinto con alta dispersión sonora utilizando el método directo e indirecto. Se pudo comprobar la existencia de variaciones significativas, en algunos parámetros y determinar ventajas y desventajas de los métodos empleados. En una segunda etapa, se llevó a cabo un análisis acústico-espacial de respuestas impulsivas binaurales (BRIR), utilizando una cabeza y torso artificial (HATS). Las mediciones se realizaron en el campo *cercano*, *directo* y *reverberante* utilizando el método indirecto. Se detectaron variaciones en parámetros espaciales.

1 Introducción

La Respuesta Impulsiva de un Recinto (RIR) engloba la característica de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor, asumiendo que el sistema es Lineal e Invariante en el Tiempo (LTI). Para un recinto en particular, la respuesta impulsiva es diferente para cada ubicación de la dupla fuente-receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros (Kuttruff, H., 1991).

La RIR se compone del sonido directo, las reflexiones tempranas y las reflexiones tardías. El sonido directo es el primero que escucha 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. Estas se asemejan a un proceso aleatorio cuyas direcciones son irrelevantes pero esenciales para definir la impresión espacial, la calidad acústica del recinto y la distancia a la fuente sonora.

Numerosas investigaciones se han llevado a cabo con el objetivo de relacionar la RIR con aspectos perceptuales concernientes con la *calidad acústica* de dichos espacios acústicos. Paralelamente, se definieron una serie de parámetros objetivos obtenidos directamente de la RIR que se correlacionan con apreciaciones subjetivas (Beranek L, 1996a). La norma ISO 3382 describe métodos para medir el tiempo de reverberación (T_{60}) en recintos y sugiere otra serie de parámetros calculados a partir de la medición de la RIR (ISO 3382, 1997). Estos parámetros objetivos están relacionados con aspectos perceptuales particulares, como por ejemplo, *ancho aparente de la fuente (ASW)*; *envolvimiento del oyente (LEV)*, *claridad (C_x)*, etc. (Soulodre and Bradley, 1995). Ahora bien, no hay acuerdo sobre los valores óptimos de dichos parámetros salvo para algunos tipos de recintos, según la actividad que en ellos se desarrolla, como es el caso de Salas de Concierto y Casa de Opera (Beranek, L., 1996b). De todos modos, con el fin de contar con una evaluación más completa de las propiedades acústicas de un recinto, poder controlar el campo acústico y aumentar el confort auditivo, el conocimiento de ellos permite en forma rápida estimar los material, cantidades y ubicación de diferentes elementos acústicos como absorbentes, reflectores y difusores sonoros para tal fin (Isbert A., 2001; Ferreyra S., 2005).

Los parámetros que especifica la norma pueden ser clasificados en dos grandes grupos: los *monoaurales* y los *binaurales*. Según su propósito, los monoaurales pueden ser divididos en tres: a) aquellos que califican la calidad o confiabilidad de la medición de la RIR; b) los que permiten la obtención del tiempo de reverberación y c) los que evalúan las relaciones de energía entre diferentes porciones de la RIR. Los valores óptimos de estos últimos fueron establecidos mediante pruebas subjetivas, según el uso del recinto (Barron, M., 1993). Entre los parámetros monoaurales del grupo a) tenemos: Relación Señal-Ruido: SNR , Relación Respuesta Impulsiva-Ruido: INR , Sonoridad: G , Sonoridad Relativa: G_{rel} y Magnitud Espectral: MAG . Dentro del grupo b) se destacan los diferentes Tiempos de Reverberación: T_{20} (entre -5 y -25 dB), T_{30} (entre -5 y -35 dB) y el EDT (Early Decay Time: EDT, entre 0 y -10 dB). El T_{20} y el T_{30} están relacionados con las propiedades físicas del recinto mientras que el EDT está estrechamente vinculado con la percepción subjetiva de la reverberación (Jordan, 1981). Por último, conforman el grupo c): el Centro de Tiempo: T_s (es el tiempo del centro de gravedad del cuadrado de la respuesta impulsiva) (Kürer, R., 1969), Claridad: C_{te} (relación entre la fracción de energía de los primeros 50 ms para el habla ó 80 ms para la música, llamada energía temprana y el resto de la RIR, llamada energía tardía) (Riechardt, W. et. al., 1975); Definición: D_{50} (relación entre la energía temprana y la energía total de la RIR) (Thiele, R., 1953).

El fenómeno de la audición es esencialmente binaural, esto es, las señales que alcanzan los tímpanos de ambos oídos llevan información que el ser humano utiliza para localizar con precisión una fuente sonora en el espacio. Las características relevantes de las ondas sonoras son: la diferencia de tiempo y de nivel entre ambos oídos y las modificaciones espectrales producidas por las protuberancias del pabellón auricular, la difracción de la cabeza y las reflexiones en el torso y hombros. Por otro lado, las diferentes partes de una Respuesta Impulsiva Binaural (BRIR) de un recinto transportan información adicional sobre la calidad acústica del mismo, determinando una serie de vivencias perceptuales tales como *la impresión espacial, envoltencia*, entre otras (Blauert, 1997).

No fue hasta 1974 que M. Schröder et. al., proponen Mediciones Binaurales (BM) para estudiar la calidad acústica de salas de concierto (Schröder M. et. al., 1974). El único parámetro binaural que la norma aconseja es la Función de Correlación cruzada Inter-Aural (IACF) normalizada que se define como:

$$IACF_{t_1,t_2}(\tau) = \left[\int_{t_1}^{t_2} p_L(t) \cdot p_R(t+\tau) dt \right] / \left[\int_{t_1}^{t_2} p_L^2(t) dt \int_{t_1}^{t_2} p_R^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

en donde $p_L(t)$ y $p_R(t)$ son las respuestas impulsivas en los tímpanos o a la entrada del conducto auditivo del oído derecho y el izquierdo respectivamente. El Coeficiente de Correlación cruzada Inter-Aural (IACC) es:

$$IACC_{t_1,t_2}(\tau) = \max |IACF_{t_1,t_2}(\tau)|, \text{ para } -1\text{ms} < \tau < +1\text{ms} \quad (2)$$

Esto es, el $IACC$ resulta del valor máximo que se obtiene de la función de la ecuación (1) para valores de retardo entre -1 ms y +1ms. Los valores de las constantes de integración t_1 y t_2 varían según que porción de las BRIR que se desea evaluar. Si es de interés toda la BRIR $t_1=0$ y $t_2 =$ tiempo de reverberación ($IACC_{0,\infty}$); si es de interés las reflexiones tempranas $t_1=0$ y $t_2=80$ ms ($IACC_{0,80}$) y finalmente para evaluar la cola de reverberación $t_1=80$ ms y $t_2 =$ tiempo de reverberación ($IACC_{80,\infty}$).

Si bien el estudio e interpretación de los diferentes valores del coeficiente $IACC$ está fuera del alcance de este trabajo, debemos decir que no hay acuerdo sobre los valores óptimos de dichos parámetros salvo para algunos tipos de recintos, según la actividad que en ellos se desarrolla, como es el caso de Salas de Concierto y Casa de Opera (Beranek, 1996b).

Históricamente, para obtener una RIR de un recinto, se utilizaba como señal de excitación ráfagas de ruido filtrados por bandas o disparos de pistola (Schröder, M. 1965). La desventaja de este método es la pobre SNR debido a que su energía está concentrada en un pequeño intervalo de tiempo. Esto impone, la utilización de impulsos de niveles elevados que para el primer caso requerían altoparlantes especiales que sean capaces de manejar con muy baja distorsión dichas señales y sin riesgo de ruptura. En la actualidad, es habitual utilizar señales continuas que mediante procesamiento a posterior permitan obtener la RIR con un incremento en la SNR (Vanderkooy, J, 1994). Estas técnicas, conocidas como métodos indirectos, han sido adoptadas por la normativa específica al estudio de salas (ISO 3382) y se ha detectado que existen variaciones en los resultados según la técnica empleada (Vorländer and Bietz, 1994; Ferreyra y Elías, 2006).

El presente trabajo, ha sido desarrollado en dos etapas. En la primera de ellas, se realizó un análisis físico-acústico-espacial que estudió las MRIR obtenidas por el método indirecto en puntos de recepción ubicados en campo cercano, directo y reverberante. Este trabajo permitió evidenciar variaciones significativas en algunos parámetros según: la posición espacial y la señal de excitación utilizada (Ferreyra and Ramos, 2007).

En una segunda etapa, se realizó un análisis similar al anterior, pero en esta oportunidad sobre las BRIR obtenidas por el método indirecto, medidas con una cabeza y torso artificial (Head And Torso Simulator: HATS), pudiendo evidenciar las deficiencias de los métodos y establecer posibles dependencias espaciales a verificarse (Ferreyra and Ramos, 2008).

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera. En el punto 2 se introduce al lector en los métodos indirectos para obtener una respuesta impulsiva sin utilizar impulsos y se analizan las señales utilizadas; en el punto 3 se presentan los recintos utilizados para el estudio y sus características acústicas; en el punto 4 se describe el método de medición y el equipamiento utilizado; en el punto 5 se presenta una síntesis, por cuestiones de espacio, del análisis realizado y en el punto 6 se resumen las conclusiones.

2 Métodos indirectos para obtener una RIR

En nuestro estudio utilizamos dos tipos de señales continuas: barrido de frecuencias y serie de máxima longitud (mls). Los barridos de frecuencia, a su vez, pueden ser: lineales (lsw) y exponenciales (esw).

Básicamente, los barridos de frecuencias son señales senoidales cuya frecuencia varía de manera continua en todo el rango de interés. Si esta variación se realiza a un ritmo constante el barrido se denomina lineal (lsw); si el barrido varía según una ley logarítmica, se denomina exponencial (Farina A., 2000).

La reconstrucción de la respuesta impulsiva de un sistema LTI excitado con una señal de barrido, se obtiene por la convolución de la señal de salida con el filtro inverso de la señal de excitación. Luego:

$$h(t) = y(t) * 1/x(t) \quad (3)$$

Las series de máxima longitud (mls) son secuencias discretas de ceros y unos (binarias) que tiene la propiedad de ser periódicas y su espectro continuo; de igual energía en todo el rango de frecuencias de interés.

Una propiedad esencial de las mls, es que su auto correlación periódica es también una secuencia periódica unitaria de periodo L, más una pequeña constante (en donde L es la longitud de la serie):

$$\Phi_{ss}(n) = s(n)\Phi s(n) = \delta(n) - \frac{1}{L+1} \quad (4)$$

en donde Φ significa auto correlación (Rife and Vanderkooy, 1989).

Si a un sistema LTI con respuesta impulsiva $h(n)$ se le aplica una secuencia mls $s(n)$, la salida será igual a:

$$y(n) = s(n) * h(n) \quad (5)$$

Si a ambos miembros de la ecuación 5, se auto correlacionan con s:

$$y(n)\Phi s(n) = s(n)\Phi[s(n) * h(n)] = [s(n)\Phi s(n)] * h(n) \quad ;$$

$$\Phi_{sy} = \Phi_{ss}(n) * h(n) \quad (6)$$

Sustituyendo en (6) la ecuación (4) tendremos:

$$\Phi_{sy} = [\delta(n) - \frac{1}{L+1}] * h(n) \quad ;$$

$$\Phi_{sy} = h(n) - \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) \quad ;$$

$$\Phi_{sy} = h(n) - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) + \frac{1}{L(L+1)} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) \quad (7)$$

despejando $h(n)$:

$$h(n) = \Phi_{sy} + \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) - \frac{1}{L(L+1)} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) \quad (8)$$

El segundo término de la ecuación (8) es el valor medio de la secuencia (su componente de continua), mientras que el tercer término es el mismo valor medio pero dividido por $(L+1)$.

Concluyendo: la respuesta impulsiva del sistema LTI alimentado con una mls, es igual a la correlación cruzada periódica entre la señal de salida y la secuencia mls.

En la figura 1 se muestran las densidades espectrales (potencia por unidad de frecuencia) de las tres señales utilizadas. La mls contiene una energía constante dentro de un dB en todo el ancho de banda bajo estudio (125 - 8000 Hz). Los niveles de energía de la lsw es similar salvo por debajo de los 200 Hz, en la que decae levemente.

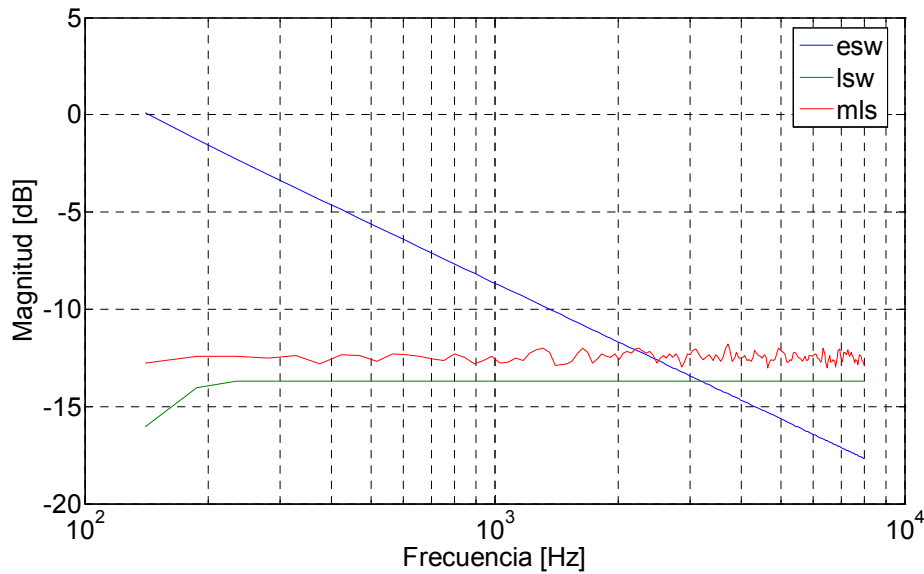


Figura 1. Densidad espectral en potencia de las señales utilizadas en el estudio.

La energía de la esw disminuye de manera constante con la frecuencia a razón de 3 dB por octavas. En 125 Hz la energía es mayor en casi 13 dB; entre 2000 y 4000 Hz alcanza el valor de las otras dos señales y a 8000 Hz se encuentra 5 dB por debajo.

Tanto la señal mls como la esw y lsw, pueden producir, según la existencia de no linealidades en el sistema, distorsiones al momento de obtener la RIR, estas distorsiones se producen en diferentes instantes de tiempo en la RIR, con la posibilidad de ser eliminadas para el caso de RIR obtenidas con señales tipo esw y lsw (Ciric, D., 2007).

3 Descripción de los recintos

Se utilizaron dos recintos, en la primera etapa del trabajo los ensayos se realizaron en la “Iglesia Sagrado Corazón de Jesús” (Padres Capuchinos), ciudad de Córdoba, Argentina. En la segunda etapa, las mediciones se realizaron en el “Salón de Usos Múltiples” (S.U.M.) del colegio “Dr. Antonio Nores”, ciudad de Córdoba, Argentina.

La Iglesia Sagrado Corazón de Jesús, de estilo gótico y gran volumen, posee buenas características de difusión sonora y bajo nivel de ruido. Se compone de: un hall de ingreso; una nave central, (en sentido longitudinal y de base rectangular); dos naves laterales (en sentido transversal, de base rectangular de menor tamaño) y un altar de base semicilíndrica. Está construido con materiales de altos coeficientes de reflexión, tales como mármol, vidrio, granito, cerámica, hormigón, madera y yeso, ver Figura 2 (Ferreyra and Ramos 2007).

El S.U.M., es un espacio acústico arquitectónico tipo mono ambiente y geometría tipo paralelepípedo rectangular (ver Figura 2). Está construido con hormigón y vidrio esencialmente, la cubierta es de chapa galvanizada de zinc, mientras que el piso es de hormigón pulido. Esta conjunción de materiales, produce que el recinto sea altamente reverberante y con reflexiones tempranas poco atenuadas, como consecuencia de los altos coeficientes de reflexión que poseen estos materiales para banda ancha. (Ferreyra and Ramos, 2008).

En la Figura 2 se muestran vistas parciales de ambos. En la Tabla 1 se listan sus características geométricas y tiempos de reverberación globales. Para estimar el grado de difusión, se aplicó el método de ponderación visual por inspección de las superficies (Haan and Fricke, 1993), conocido como Índice de Difusión Superficial (SDI). Esta técnica, si bien no es exacta, permite estimar el grado de difusión rápidamente. Se ponderó las cubiertas, paredes laterales, columnas, etc.



(a)



(b)

Figura 2. Fotografías de los recintos durante las mediciones: (a) Iglesia Sagrado Corazón de Jesús “Padres Capuchinos”; (b) S.U.M. Colegio Dr. Antonio Nores. Ciudad de Córdoba, Argentina.

Tabla 1. Tabla comparativa de los recintos.

Características	Iglesia	S.U.M.
Altura máxima [m]	22,67	11,00
Ancho máximo [m]	28,49	38,68
Largo máximo [m]	39,21	51,20
Volumen [m ³]	16 058,3	18 703,00
Tiempo de reverberación global (T_{30}) [s]	7,03	6,46
Índice de difusión superficial (SDI)	0,93	0,43
Ruido de fondo [dBA]	46,8	47,2

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, 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) y PC	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
Cabeza y Torso Artificial (HATS)	Brüel & Kjær type 4128
Amplificador de potencia	Brüel & Kjær type 4224
Consola de mezcla	Behringer Eurorack UB-1204 FX-PRO
Fuente sonora omnidireccional (dodecaedro)	CINTRA FSO
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. Se utilizó como Fuente Sonora Omnidireccional (FSO) una caja acústica pasiva tipo dodecaedro (Ortiz Skarp, A, et. al, 2005). El ancho de banda del análisis fue restringido entre 63 y 8000 Hz.

En la Iglesia, se ubicó la FSO (S_1) en el altar, con una altura de 1,7 m. La altura del micrófono fue de 1,7 m (audiencia de pie). Los puntos de medición seleccionados fueron: M_1 (2 m, campo cercano); M_2 y M_3 (4 y 8 m, campo directo); M_4 y M_5 (12 y 16 m, campo reverberante) respecto de la FSO y todos en la misma dirección axial al altar, ver Figura 3.

En el S.U.M, la FSO se ubico en dos puntos sobre la explanada (S_1 y S_2), se seleccionaron un total de siete puntos de medición, seis sobre la explanada y uno sobre la tribuna, todos con una altura de 1,2 m. Los puntos de medición M_1 , M_2 , M_3 y M_4 , ubicados sobre la explanada, se posicionaron sobre el eje longitudinal del recinto y siempre axiales a la FSO con distancias de: 3 m (campo cercano), 6 m (campo directo), 12 y 24 m (campo reverberante), respecto de ella. Los puntos de medición M_5 y M_6 se posicionaron desplazados hacia la derecha, más próximos a uno de los muros, con distancias respecto de la fuente de 20 m y 11 m respectivamente, ver Figura 3. La cabeza artificial se utilizó siempre sin rotación.

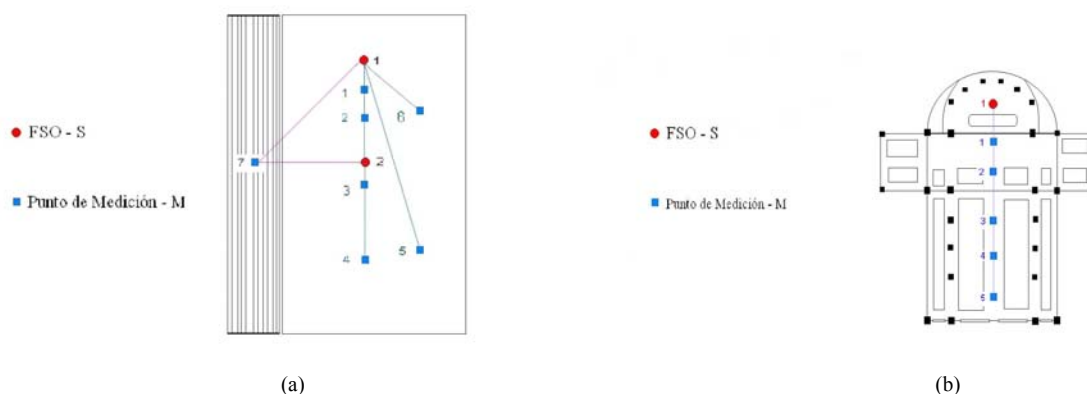


Figura 3: Configuraciones FSO (S, rojo) – Receptor (M, azul), (a) S.U.M.; (b) Iglesia.

5 Análisis de los resultados

Para simplificar el análisis se tomaron tres bandas de frecuencia: 125, 1000 y 4000 Hz. Se compararon los resultados de los parámetros por grupo en función de la posición. Los parámetros analizados fueron:

Grupo a: SNR, INR, MAG

Grupo b: T_{20} , T_{30} , EDT

Grupo c: C_{80} , D_{50} , T_s

Grupo d: $IACC_{0,\infty}$, $IACC_{0,80}$, $IACC_{80,\infty}$

El grupo a), mostro grandes diferencias en los resultados obtenidos con cada señal. Esto concuerda con lo observado en la Figura 1 donde se muestra la densidad espectral de potencia de cada una de las señales. La más alta SNR en baja frecuencia se consigue con la señal esw, mientras que, en alta frecuencia, la lsw es la más adecuada; en frecuencias medias, ambas se comportan de igual manera; la mls es inferior a ambas en todo el rango de frecuencias analizadas. Un comportamiento similar se observa para la INR. Los valores de MAG obtenidos por las tres señales, fueron muy próximos. En cambio, el G_{rel} , obtenido con la mls tomó valores 10 dB por encima de esw y lsw. No se observó variaciones en función de la distancia (Ferreyra and Ramos, 2007).

Los parámetros de grupo b) que cuantifican el tiempo de reverberación (T_{20} y T_{30}) se mostraron independientes de la posición. Esto fue demostrado por W. C. Sabine en 1922. Sin embargo, se puede ver que para media y alta frecuencia, tanto en campo directo como en reverberante, los tiempos de reverberación medidos con la señal lsw son levemente mayores respecto de los obtenidos con esw y mls. El EDT se comporta de igual manera con las tres señales en todo el rango de frecuencias analizado. Sin embargo, verificamos un incremento de hasta 2 s en la banda de 1000 Hz entre las posiciones de 2 m y 16 m. Esto evidencia claramente la variación del EDT a medida que nos alejamos de la fuente. Lo último, concuerda con el hecho de que el índice de transmisión de la palabra (*speech tranmission index: STI*) (Houtgast, et. al, 1980), que utiliza el EDT, se degrada a medida que el oyente se aleja de la fuente.

Los indicadores del grupo c) como C_{80} y D_{50} evidenciaron valores muy similares para las tres señales. Tomado elevados valores en campo cercano y aumentando hacia las altas frecuencias. En campo directo, se obtuvieron valores aceptables mientras que a partir de la posición de 8 m, disminuyen abruptamente debido al campo reverberante. Por ejemplo, en el punto a 16 m se obtuvo un $C_{80} = -10$ dB y un $D_{50} = 0,15$, en frecuencias medias. No hay diferencias significativas en los valores de T_s calculados a partir de las tres señales. Se comprobó, que este parámetro crece de manera sostenida desde las posiciones en campo cercano hasta las posiciones de campo reverberante (Cirillo E., 2007). Sin embargo en este estudio, para la frecuencia de 125 Hz, el crecimiento alcanza un valor máximo en 8 m (distancia crítica, D_c); disminuye a los 12 m levemente y aumenta nuevamente en 16 m.

Por último, el grupo d) indicadores binaurales, evidencio que: el $IACC_{0,\infty}$, experimento una pendiente de disminución con el aumento de la distancia para 4000 Hz, por otra parte, gran variabilidad de los valores para baja frecuencia. El $IACC_{0,80}$, sufre una clara disminución entre los 6 y 12 m (campo directo), estabilizándose en un valor constante en el campo reverberante para media frecuencia. Este indicador evidencio una gran variabilidad, según la señal utilizada, pudiendo ser causado entre otras cosas por el software.

Por último, $IACC_{80,\infty}$, se comporta prácticamente invariante con la posición espacial. La señal mls, produce mayores valores para 4000 Hz, no sabemos la naturaleza del porque,

posiblemente por problemas del software. Este hecho, nos conduce a profundizar el estudio en el futuro.

6 Conclusiones

- Cualquier tipo de señal continua de excitación (mls, esw y lsw), con el objeto de obtener la RIR, deberá exceder en duración al valor del T_{60} estimado.
- Para *separar la distorsión no lineal del sistema* de la RIR, la señal de barrido (esw o lsw) debe ser *mucho mayor la duración de la RIR*, para de esta manera ubicar los impulsos de distorsión de n-ésimo orden antes del comienzo de la RIR.
- La señal *esw posee la más alta SNR en baja frecuencia*; por el contrario, la *lsw lo es en alta frecuencia*; para *frecuencias medias es indistinto utilizar la esw o la lsw*. La señal mls es inferior a las anteriores. Estas diferencias también son observables en la *INR*. La norma ISO 3382 especifica que para calcular T_{20} y T_{30} la *INR* debe ser mayor que 35 dB y 45 dB respectivamente. Concluyendo: *es conveniente aplicar esw para analizar baja frecuencia y lsw para alta frecuencia y cuando la SNR lo permite utilizar la mls en todo el espectro de frecuencias*.
- *Se pueden utilizar las tres señales con un buen grado de confiabilidad cuando se mide el T_{60} por técnicas indirectas*. Ahora bien, en media y alta frecuencia, tanto en campo directo como reverberante, la señal lsw produce tiempos levemente mayor respecto de las otras.
- *EDT crece con el aumento de la distancia*, muestra un incremento de hasta 2 s en la banda de 1000 Hz entre las posiciones de 2 m y 16 m. Esto evidencia claramente la variación del EDT a medida que nos alejamos de la fuente. Lo último concuerda con el hecho de que el índice de transmisión de la palabra, que utiliza el EDT, se degrada a medida que el oyente se aleja de la fuente. Sin embargo, se comporta de igual manera con las tres señales en todo el rango de frecuencias analizado.
- C_{80} y D_{50} *disminuyen con el aumento de la distancia y son independientes de la señal utilizada*.
- T_s *aumenta con la distancia y varía según la señal de excitación*: los obtenidos con esw fueron superiores respecto de lsw y mls para todo el rango de frecuencias y las cinco posiciones estudiadas.
- Los valores de *MAG* obtenidos por las tres señales fueron muy precisos.
- $IACC_{0,\infty}$, engloba todo el proceso de decaimiento energético, es en primera instancia, dependiente de la distancia para alta frecuencia y en menor grado para media frecuencia. $IACC_{0,\infty}$, disminuye con el aumento de la distancia. (a verificar)
- $IACC_{0,80}$, *es muy sensible a la posición de la fuente-receptor y de la proximidad con los muros*, además, en primera instancia es dependiente respecto de la señal de excitación y muestra gran variabilidad en baja frecuencia. Este trabajo evidencia la posibilidad de dependencia con la señal de excitación.
- $IACC_{80,\infty}$, es prácticamente independiente de la distancia. Por otra parte, fue altamente concordante en media y alta frecuencia utilizando señales de barrido, tipo esw y lsw.

Referencias

- Barron, M. (1993). "Auditorium Acoustics and Architectural Design". Chapman & Hall, London.
- Beranek, Leo L. (1996b). "Concert and Opera Halls- How they Sound". Acou. Soc. of America.
- Beranek, Leo L. (1996a). "Acoustics and musical qualities", J. Acou. Soc. of Am., 99: 2647-2652.
- Blauert, Jeans. (1997) "Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization". Cambridge, MA. The MIT Press.

- Ciric, Dejan G. (2007). "Comparison of influence of distortion in mls and sine sweep technique". Proc. of 19th International Congress on Acoustics (ICA2007), Madrid, 2-7 September. España.
- Cirillo, Ettore; Martellotta, Francesco (2007). "On the spatial variation of acoustical parameters in churches". Proc. of 19th International Con. on Acoustics (ICA2007), Madrid, 2-7 September.
- Farina, Angelo (2000). "Simultaneous measurements of impulse response and distortion with a sweep-sine technique". Proc. 108th Convention of Audio Engineering Society, preprint 5093, Paris.
- Ferreira, Sebastián P.; Elias, Martín (2006). "Análisis comparativo de parámetros acústicos de recintos, utilizando diferentes técnicas de medición de la respuesta al impulso". Procedimientos 5^{to} Congreso Iberoamericano de Acústica. Paper n°: A032, 25-28 de Octubre. Santiago de Chile.
- Ferreira, 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.
- Ferreira, Sebastián P.; Ramos, Oscar. A. (2008). "Análisis físico-acústico-espacial de respuestas impulsivas binaurales (BRIR) obtenidas por métodos indirectos". A publicarse en Mecánica Computacional vol XXVII y presentarse en el 27^o Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2008), San Luis, Argentina, 2-5 de Octubre, San Luis.
- Ferreira, Sebastián. P. (2005). "Análisis de parámetros acústicos de recintos según ISO 3382, aplicado a salas de usos múltiples". Procedimientos del 3^{er} Congreso Argentino de Acústica del Nuevo Milenio, (CADA 2005), 10 y 11 de Noviembre, Buenos Aires.
- Haan, C. H. and Fricke, F. R. (1993). "Surface diffusivity as a measure of the acoustic quality of concert hall", Proceedings of conference of the Australia and New Zealand Architectural Science Association, Sydney, pp. 81-90.
- Houtgast, T.; Steeneken H. J. M; Plomp R. (1980). "Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function", Acustica, 16: 60-72.
- Isbert Antoni C. (2001). "Diseño acústico de espacios arquitectónicos", Alfaomega.
- ISO 3382 (1997). "Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters".
- Jordan, V. L., (1981). "A group of objective criteria for concert hall", Applied Acoustics, 14.
- Kürer, R., (1969) Acustica 21:370.
- Kuttruff, Heinrich (1991). "Room Acoustics", 3th edition, Elsevier Applied Science Publishers.
- Ortiz Skarp, Aldo; Ferreira Sebastián P.; Perez Villalobo Jorge.; Novillo David. (2005) "Fuente de campo sonoro homogéneo: construcción y verificación". Procedimientos del 3^{er} Congreso Argentino de Acústica del Nuevo Milenio, (CADA 2005), 10 y 11 de Noviembre, Buenos Aires.
- Riechardt, W.; Abdel Alim, O.; Schmidt W.; (1975) "Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances", Acustica, 32:126-137.
- Rife, D.; Vanderkooy, J. (1989). "Transfer-function measurement with maximum-length sequences". J. Audio Eng. Society. 37:419-443.
- Schröder Manfred (1965). "New method of measuring reverberation time", J. Acous. Soc. of America, 37:409-412.
- Schröder Manfred; Gottlob, D.; Siebrasse, K. (1974) "Comparative study of European concert hall: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters", Journal Acoustical Society of America, 56, pp. 1195ff.
- Soulodre, Gilbert A.; Bradley, John S. (1995). "Subjective evaluation of new room acoustic measures". J. Acous. Soc. of America, 98 (1):294-301.
- Thiele, R., (1953). "Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen", Acustica, 3:291-302.
- Vanderkooy, J. (1994). "Aspects of MLS measuring systems", J. Audio Eng. Society, 42:219:231.
- Vorländer, Michael; Bietz, Heinrich (1994). "Comparison of methods for measuring reverberation time", Acustica, 80:205-215.