

ANÁLISIS FÍSICO-ACÚSTICO-ESPACIAL DE RESPUESTAS IMPULSIVAS BINAURALES (BRIR) OBTENIDAS POR MÉTODOS INDIRECTOS

Sebastián P. Ferreyra^a, Oscar A. Ramos^{a,b}

^a*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), unidad Asociada del CONICET, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Córdoba, Mtro. M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, X5016ZAA Córdoba, Argentina. sferreyra@scdt.frc.utn.edu.ar, <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

^b*Miembro del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET, Argentina*

Palabras clave: respuestas impulsivas binaurales de recintos, IACC, deconvolución, MLS.

Resumen. Para evaluar las características acústicas de un recinto es crucial el conocimiento de su respuesta impulsiva (Room Impulse Response: 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. Para salvar este inconveniente, se utilizan técnicas indirectas que emplean señales continuas y post-procesamiento digital de señales para obtener la RIR. Las más utilizadas son: Series binarias de Máxima Longitud y Barridos en 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 *reverberante* en un recinto con alta dispersión sonora utilizando el método directo e indirecto. Se pudo comprobar la existencia de variaciones significativas, según el método utilizado, en algunos indicadores monoaurales. Así mismo, se pudo establecer ventajas y desventajas de las técnicas empleadas.

En una *segunda etapa*, se realizó un análisis físico-acústico-espacial que estudia las MRIR obtenidas por el *método indirecto* en puntos de recepción ubicados en campo *cercano*, *directo* y *reverberante* del mismo recinto.

En esta *tercera y última etapa*, se realizó un análisis similar al anterior de BRIR obtenidas por el *método indirecto*, medidas con una cabeza y torso artificial (Head And Torso Simulator: HATS). Se pudo evidenciar las deficiencias de los métodos y establecer posibles dependencias 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; Rindel, J., 2004).

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 calculados a partir de la RIR que se correlacionen con apreciaciones subjetivas (Beranek L, 1996a). La norma ISO 3382 describe los métodos a seguir para medir el tiempo de reverberación (T_{60}) en recintos y sugiere otra serie de parámetros que pueden ser calculados a partir de la medición de la RIR (ISO 3382, 1997). Estos parámetros objetivos están relacionados con aspectos perceptuales particulares, como por ejemplo, *claridad* (C_x), *ancho aparente de la fuente* (ASW); *envolvimiento del oyente* (LEV), etc. (Soulodre and Bradley, 1995; Okano, et. al 1998). 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 y poder controlar el campo acústico para poder aumentar el confort auditivo, el conocimiento de ellos permite en forma rápida estimar el material, cantidad 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 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 de un Recinto (BRIR) transportan información adicional sobre la calidad

acústica del mismo, determinando una serie de vivencias perceptuales tales como *la impresión espacial, envolvencia*, 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 normalizada (*IACF*) que se define como:

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

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* esta 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. 1969). 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; Daigle and Xiang, 2006). Estas técnicas, conocidas como métodos indirectos, han sido adoptadas por la normativa específica al estudio de salas (ISO 3382), por otra parte, se ha detectado que existen variaciones en los resultados según la técnica empleada (Vorländer and Bietz, 1994).

En una *primera etapa*, se realizó un estudio comparativo de parámetros acústicos definidos en la norma. Estos fueron calculados a partir de las MRIR medidas en campo *reverberante* en un recinto con alta dispersión sonora utilizando tanto el método directo como el indirecto. Se pudo comprobar la existencia de variaciones significativas, según el método utilizado, en algunos indicadores monoaurales que relacionan energía, frecuencia y tiempo. Así mismo, se pudo establecer ventajas y desventajas de las técnicas empleadas (Ferreira and Elías, 2006).

En una *segunda etapa*, 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* del mismo recinto. En esa oportunidad se evaluaron algunos de los parámetros monoaurales mencionados en la norma, detectándose variaciones significativas en algunos según la señal de excitación utilizada. (Ferreira and Ramos, 2007).

En esta *tercera etapa*, se realizó un análisis similar al anterior, pero en esta oportunidad sobre las BRIR obtenidas por el método indirecto medidas en una cabeza y torso artificial

(Head And Torso Simulator: HATS). Se pudo evidenciar las deficiencias de los métodos y establecer posibles dependencias espaciales a verificarse. Se utilizaron como herramientas de análisis curvas de energía-tiempo y espectrogramas de 2D y 3D. Como variables adicionales, se analizaron: forma y volumen del recinto y características acústicas de los materiales.

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 presenta el recinto bajo estudio y sus características acústicas; en el punto 4 se describen las condiciones de medición y el equipamiento utilizado; en el punto 5 se presenta el análisis de los resultados, en el punto 6 se resumen las conclusiones y en el 7 el trabajo a futuro.

2 MÉTODOS INDIRECTOS PARA OBTENER UNA BRIR

En nuestro estudio utilizaremos 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 (deconvolución). 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 Hz - 8000 Hz). Los niveles de energía de la lsw es similar salvo por debajo de los 200 Hz, en la que decae levemente.

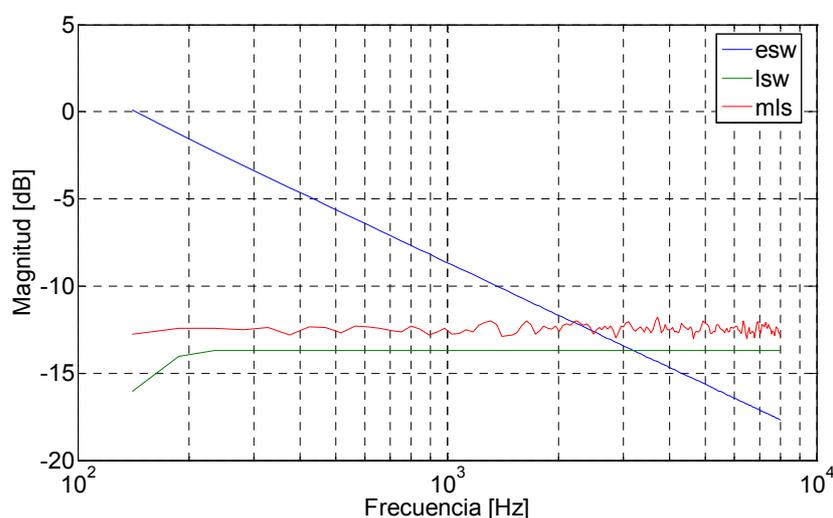


Figura 1: Densidad espectral en potencia de las señales utilizadas en el estudio.

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 EL RECINTO

El recinto donde se realizaron las mediciones fue el “Salón de Usos Múltiples” (S.U.M.) del colegio Dr. Antonio Nores, Ciudad de Córdoba, Argentina. Este espacio acústico arquitectónico, tipo mono ambiente y geometría tipo paralelepípedo rectangular, posee un volumen aproximado igual a 18 703 m³ (ver Figura 2). Está construido esencialmente con hormigón y vidrio, 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.

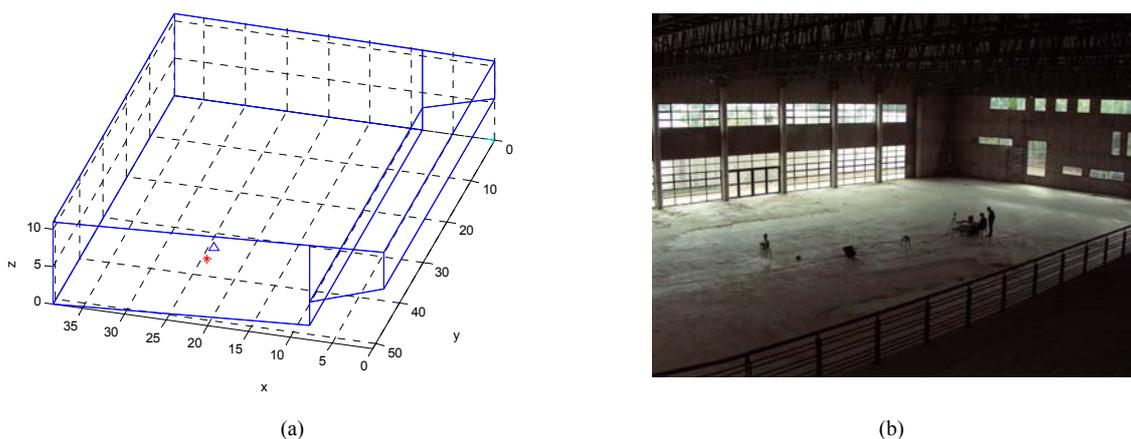


Figura 2: Salón de Usos Múltiples, colegio Dr. Nores, Córdoba, Argentina; (a) Diseño simplificado en autoCAD (dimensiones x, y, z en m); (b) Fotografía tomada desde la tribuna.

En la Tabla 1 se resumen los valores promedio de parámetros monoaurales según ISO 3382. Los modos normales de resonancia fueron calculados y verificados en la medición, se detectaron resonancias axiales en 31 Hz y 63 Hz, las cuales pueden observarse en la Tabla 1. 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 la cubierta, paredes laterales, tribuna y columnas, obteniéndose un valor medio de 0,43.

	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
EDT (s)	3,72	3,12	6,23	8,36	8,72	6,02	2,93
T ₂₀ (s)	5,91	4,93	6,64	8,29	8,43	6,27	3,87
T ₃₀ (s)	6,54	4,51	6,75	8,24	8,34	6,28	3,81
T _s (s)	303,5	285,4	230,0	401,3	485,4	354,9	112,7
C ₈₀ (dB)	-0,8	-2,91	-4,84	-2,59	-4,72	-5,36	-0,29
D (%)	0,74	0,17	0,13	0,31	0,22	0,15	0,09

Tabla 1: Parámetros acústicos monoaurales promediados, S.U.M. colegio Dr. Nores, Córdoba, Argentina.

4 CONDICIONES DE MEDICION Y EQUIPAMIENTO

La cadena de instrumentación electroacústica, que se detalla en la Tabla 2, estuvo de acuerdo a lo recomendado en la norma ISO 3382:1997

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
Cámara fotográfica Digital	Nikon S4

Tabla 2: Instrumentos utilizados para las mediciones.

Se utilizó como Fuente Sonora Omnidireccional (FSO) una caja acústica pasiva tipo dodecaedro (Ortiz Skarp, A, et. al, 2005) cuya respuesta en frecuencia se muestra en la Figura 3. 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 m, 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 4. La cabeza artificial se utilizó siempre sin rotación.

El límite entre el campo cercano y el campo directo se determinó por:

$$d_{\min} = 2 (V / c T)^{1/2} \quad (9)$$

donde: V es el volumen del recinto en m^3 ; c es la velocidad del sonido en m/s y T el tiempo de reverberación estimado en segundos. Para $T = 6,46$ s, y $c = 343$ m/s , la ecuación 9 es igual a 5,81 m. El límite entre campo directo y campo reverberante se determinó por medición. Se generó una señal de ruido rosa y siguiendo la ley de variación de nivel de presión sonora con la inversa de los cuadrados de la distancia, se estimó la distancia crítica, $D_c = 10$ m (Davis, D. and Davis C., 1983).

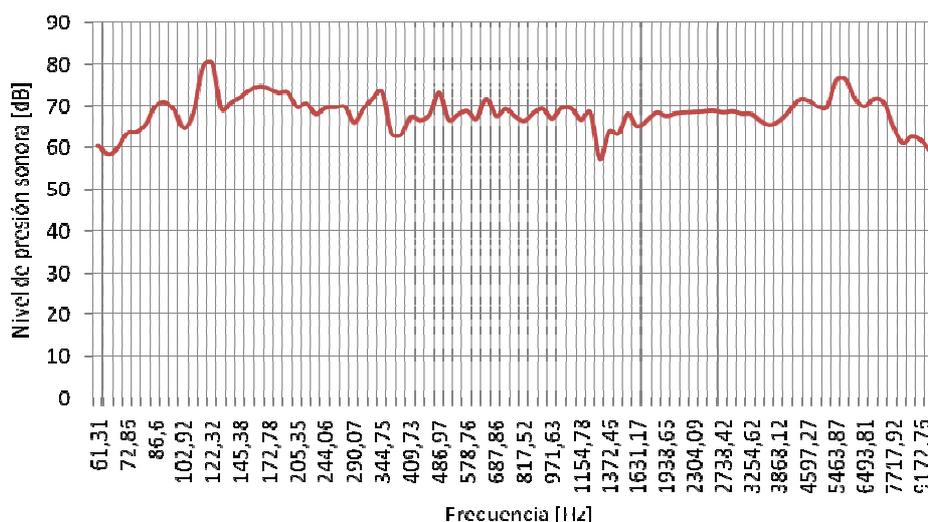


Figura 3: Respuesta en frecuencia fuente sonora tipo dodecaedro por 1/12 de octava.

Como se menciona, se selecciono un único punto de medición sobre la tribuna, con la salvedad de que se utilizaron dos posiciones de fuente S_1 y S_2 . La norma especifica que el punto de medición debe estar alejado un cuarto de longitud de onda de la frecuencia más baja (0,68 m) de cualquier elemento reflector, incluyendo el piso.

La FSO se calibro para emitir un nivel de presión sonora de 90 dBA a 1 m mediante la generación de ruido rosa.

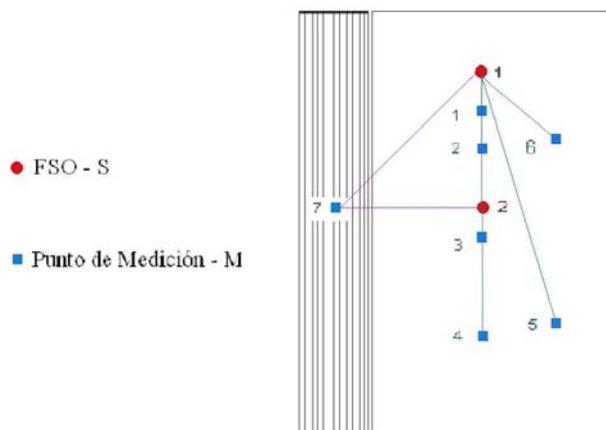


Figura 4: Configuraciones FSO (S, rojo) – HATS (M, azul).

Finalmente, al momento de la medición, el ruido de fondo en el interior del S.U.M. fue de 47,2 dBA, para un periodo de integración de 1 hs y condiciones atmosféricas de temperatura igual a 20°C y humedad relativa del 55 %.

5 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 Introducción

La “espacialidad” o “impresión espacial” (*spaciouness or spatial impression*), está caracterizada por dos dimensiones distintivas que actualmente siguen siendo estudiadas por científicos, ellas son: el *ancho aparente de la fuente* (*apparent source width, ASW*) el *envolvimiento del oyente* (*listener envelopment, LEV*) cada uno relacionado con diferentes aspectos del campo sonoro (Bradley, J. and Souldre, G., 1995).

El trabajo pionero sobre impresión espacial de Keet W. relacionado con mediciones objetivas, estableció que el *ASW*, está vinculado con la correlación cruzada de corto-tiempo obtenida usando un par estereofónico de micrófonos cardioides (Keet, W., 1968). Posteriormente Barron y Marshall, postularon que el *ASW* está relacionado con el nivel relativo de energía temprana del campo sonoro lateral que arriba al oyente (Barron and Marshall, 1981). Marimoto y Maekawa, realizaron pruebas subjetivas con sujetos sobre la impresión espacial. Llegaron a la conclusión de que las dimensiones subjetivas *ASW* y *LEV* están relacionadas con el $IACC_{0,\infty}$ y $IACC_{80,\infty}$, respectivamente. Bradley y Souldre, continuando con el estudio de Marimoto, proponen en 1995 un nuevo parámetro objetivo denominado *nivel relativo de energía sonora lateral tardía*, $LG_{80,\infty}$ (Bradley, J. and Souldre, G., 1995) con mejor correlación para la determinación del *LEV*, que mediante los propuestos $LF_{80,\infty}$ y $1 - IACC_{0,\infty}$.

En el presente trabajo, solo nos interesa estudiar la variación objetiva espacial del *IACC*, y su dependencia según la señal de excitación utilizada para obtener la BRIR, con el objetivo de poder establecer alguna variación significativa del único parámetro definido en la vigente norma. Queremos destacar que los parámetros acústicos monoaurales y binaurales son utilizados no solo para el diseño de espacios acústicos arquitectónicos, sino también como precisos indicadores durante el proceso de validación de software's dedicados a la Realidad Acústica Virtual (VAR) (Savioja, L. et. al., 1999; Ramos, O. et. al., 2006; Rindel, J., 2004).

5.2 Análisis espectro-temporal de las BRIR

Realizamos un análisis de las BRIR mediante gráficos de Energía-Tiempo-Frecuencia (ETF) en 3D del tipo Espectrometría por Desplazamiento de Tiempo (TSS) (ver Figura 5) Por razones de espacio se muestran para puntos a 6 y 12 m, oído derecho (R) e izquierdo (L) únicamente. El campo directo contiene el punto a 6 m y el campo reverberante los de 12 y 24 m.

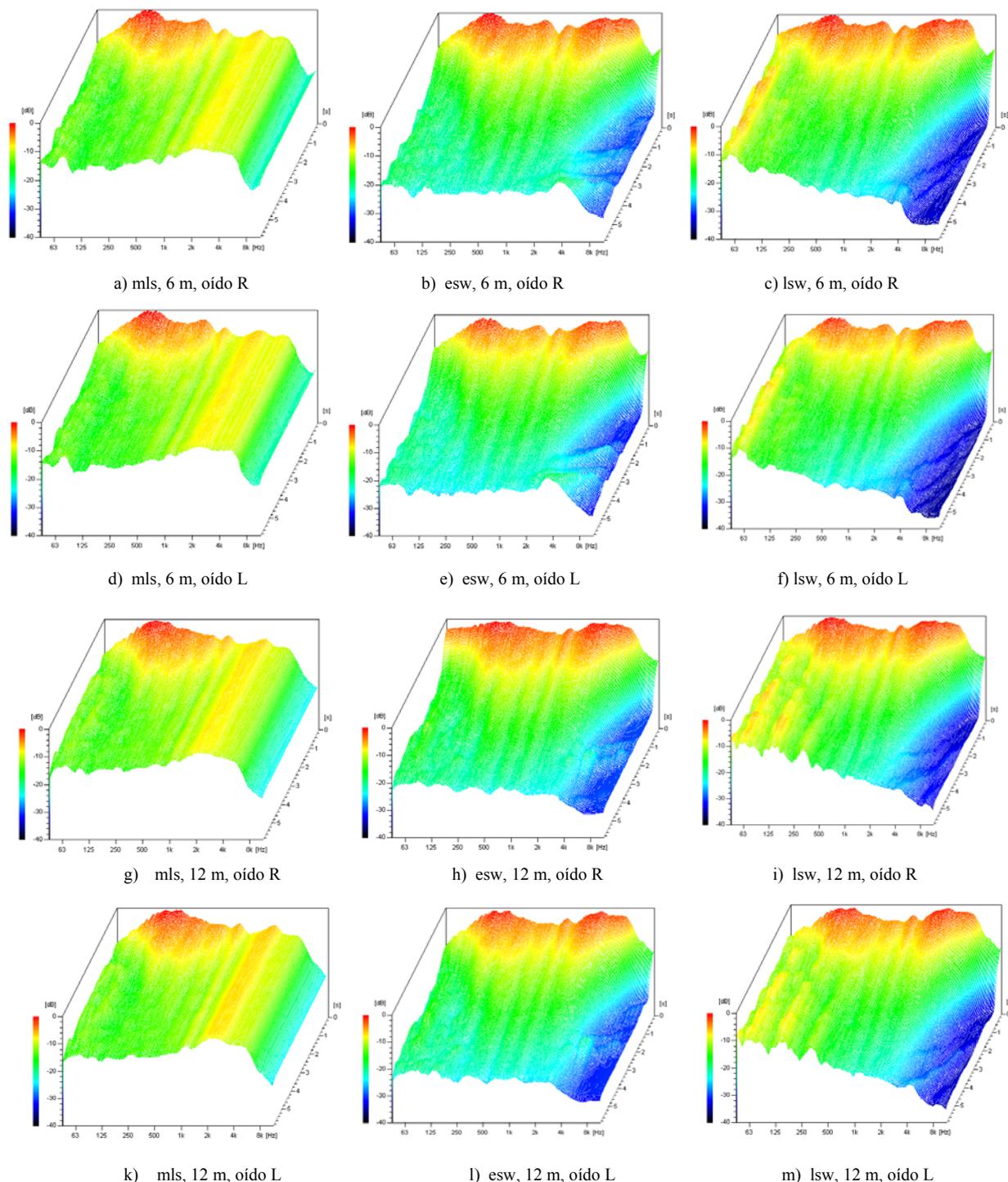


Figura 5. Espectrometrías (TSS) L y R, de BRIR's para 6 y 12 m. a), d), g), k) excitación mls; b), e), h), l) excitación esw; c), f), i), m) para excitación lsw.

En primer lugar, las BRIR obtenidas tanto con mls, esw y lsw, muestran los efectos que causan los modos normales del recinto. Esto último, será transferido a algunos indicadores que recomienda la norma. En segundo lugar, se observa que para iguales condiciones de calibración de la cadena de instrumentación, la BRIR obtenida con mls es poco inmune a disturbios (ver figura 5, mls a), d), g) y k) entre 1 y 4 KHz). Inconveniente que puede salvarse realizando múltiples pre-promediaciones. Indicadores como *INR* y *SNR* tomaron valores bajos para estas bandas de análisis. En tercer lugar, la técnica de barrido no solo es más inmune a perturbaciones, si no que al aplicar la deconvolución de las señales se obtuvo una BRIR con distorsión que puede ser eliminada. La gran ventaja de los barridos radica en que las no linealidades del sistema de medición que produce los productos de distorsión, pueden ser separados de la parte lineal de la RIR (Farina, A., 2000). Los productos de distorsión, de 2^{do}, 3^{er}, 4^{to}, etc. orden aparecen antes de la RIR cuando el tiempo de barrido es suficientemente mayor comparado con la duración de la RIR medida. (Really, A. and McGrath D., 1995; Ciric, D., 2007). Cada producto de distorsión no lineal está localizado a la distancia $\Delta\tau$ según:

$$\Delta\tau = T \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)} \quad (10)$$

donde: T es la duración del esw o lsw, ω_1 y ω_2 son los números de onda y N es el numero de la distorsión (Tronchin, L., et. al., 2007).

En la técnica de barrido, los altavoces producen menor distorsión mecánica que respecto de una señal de banda ancha (mls) debido a que, someten al transductor electroacústico a un menor esfuerzo mecánico al radiar un tono puro que barre el espectro de frecuencia bajo estudio.

5.3 Análisis del IACC según la señal de excitación utilizada.

Para simplificar el análisis se tomaron tres bandas de frecuencia: 125, 1000 y 4000 Hz. Como ya se menciona, el único parámetro binaural que especifica la norma ISO 3382:1997 es el *IACC*. A su vez, este indicador posee 3 variantes, según que porción de la BRIR es analizada, ellas son: *IACC*_{0,∞}; *IACC*_{0,80}; *IACC*_{80,∞}.

En primer lugar, se compararon los resultados del *IACC* en un mismo punto a partir de BRIR obtenidas con mls, esw y lsw, por bandas de frecuencia, ver Tablas 3, 4 y 5.

125 Hz	IACC _{0,∞}			IACC _{0,80}			IACC _{80,∞}		
	mls	esw	lsw	mls	esw	lsw	mls	esw	lsw
S ₁ -M ₁	0,34	0,21	0,85	0,64	0,83	0,78	0,93	0,93	0,93
S ₁ -M ₂	0,17	0,15	0,28	0,66	0,59	0,45	0,91	0,90	0,90
S ₁ -M ₃	0,52	0,76	0,59	0,17	0,60	0,13	0,92	0,92	0,91
S ₁ -M ₄	0,82	0,60	0,78	0,30	0,63	0,18	0,93	0,91	0,93
S ₁ -M ₅	0,42	0,43	0,42	0,78	0,67	0,67	0,88	0,89	0,89
S ₁ -M ₆	0,46	0,45	0,48	0,34	0,34	0,31	0,85	0,84	0,84
S ₁ -M ₇	0,72	0,74	0,68	0,38	0,48	0,26	0,86	0,86	0,86
S ₂ -M ₇	0,76	0,72	0,84	0,39	0,40	0,41	0,89	0,89	0,89

Tabla 3: IACC calculados de BRIR obtenidas con mls, esw y lsw para 125 Hz.

1000 Hz	IACC _{0,∞}			IACC _{0,80}			IACC _{80,∞}		
	mls	esw	lsw	mls	esw	lsw	mls	esw	lsw
S ₁ -M ₁	0,28	0,38	0,21	0,69	0,90	0,39	0,34	0,08	0,07
S ₁ -M ₂	0,11	0,13	0,11	0,60	0,61	0,59	0,12	0,08	0,08
S ₁ -M ₃	0,06	0,06	0,07	0,39	0,36	0,39	0,09	0,06	0,06
S ₁ -M ₄	0,06	0,08	0,07	0,44	0,35	0,44	0,06	0,07	0,06
S ₁ -M ₅	0,04	0,03	0,03	0,20	0,13	0,16	0,04	0,03	0,03
S ₁ -M ₆	0,14	0,13	0,14	0,45	0,50	0,48	0,07	0,05	0,07
S ₁ -M ₇	0,07	0,07	0,06	0,26	0,23	0,27	0,07	0,05	0,06
S ₂ -M ₇	0,12	0,04	0,09	0,23	0,25	0,10	0,14	0,09	0,09

Tabla 4: IACC calculados de BRIR obtenidas con mls, esw y lsw para 1000 Hz.

4000 Hz	IACC _{0,∞}			IACC _{0,80}			IACC _{80,∞}		
	mls	esw	lsw	mls	esw	lsw	mls	esw	lsw
S ₁ -M ₁	0,65	0,64	0,56	0,17	0,43	0,33	0,47	0,08	0,08
S ₁ -M ₂	0,44	0,43	0,43	0,25	0,73	0,72	0,46	0,05	0,05
S ₁ -M ₃	0,27	0,19	0,19	0,23	0,39	0,40	0,28	0,04	0,04
S ₁ -M ₄	0,10	0,07	0,10	0,21	0,25	0,19	0,11	0,06	0,06
S ₁ -M ₅	0,05	0,06	0,07	0,11	0,12	0,21	0,05	0,06	0,06
S ₁ -M ₆	0,12	0,12	0,12	0,22	0,33	0,31	0,13	0,05	0,05
S ₁ -M ₇	0,07	0,07	0,07	0,20	0,25	0,24	0,08	0,06	0,06
S ₂ -M ₇	0,10	0,05	0,11	0,13	0,16	0,16	0,17	0,13	0,13

Tabla 5: IACC por calculadas de BRIR obtenidas con mls, esw y lsw para 4000 Hz.

En Tabla 3, baja frecuencia, se observa que el $IACC_{0,\infty}$ es dependiente de la señal de excitación en el campo cercano y directo (puntos M₁, M₂) pero fue menos dependiente de la señal en el campo reverberante y difuso (puntos M₅ y M₇). $IACC_{0,80}$ se mostro dependiente de la señal de excitación, con excepción del punto M₆ ubicado en campo reverberante y bajo la influencia de fuertes reflexiones tempranas producidas en el muro norte. $IACC_{80,\infty}$ fue independiente de la señal en todos los puntos de medición. Estos resultados indican en primera instancia, la posible dependencia del $IACC_{0,80}$ respecto de la señal utilizada como excitación, y la independencia del $IACC_{80,\infty}$ que evalúa la cola de la RIR, para baja frecuencia. En Tabla 4, media frecuencia, se observa que el $IACC_{0,\infty}$ es inicialmente menos dependiente de la señal de excitación respecto a baja frecuencia, sin embargo, existe una variación con la distancia, disminuye con el aumento de la misma (puntos M₁, M₂, M₃). Por otra parte, para el punto M₁, Ubicado en campo cercano, se obtuvieron los valores más disimiles. Por lo tanto, existe la posibilidad con estos primeros ensayos, de inferir que para medias frecuencias (1000 -2000 Hz), este índice sea independiente de la señal de excitación, en campo directo y reverberante. Tanto $IACC_{0,80}$ como $IACC_{80,\infty}$ fueron concordantes para las señales esw y lsw. Consideramos que la diferencia con los valores calculados a partir de mls (sin pre-promediar), pueden ser ocasionados por la deficiencia de la técnica evidenciada en este ensayo, la cual se describió anteriormente en el análisis espectral de la BRIR. En Tabla 5, alta frecuencia, se observa efectos similares que para media frecuencia, el $IACC_{0,\infty}$ fue concordante con las tres señales de excitación. $IACC_{0,80}$ fue levemente dependiente de la señal, sobre todo en campo cercano (M₁), mientras que $IACC_{80,\infty}$ fue altamente concordante para el caso de esw y lsw y no así para mls, donde se volvió a evidenciar lo expuesto en media frecuencia. Concluyendo: el $IACC_{0,80}$ es sin duda el más variable y dependiente de los

tres indicadores. Este trabajo induce la posibilidad de dependencia con la señal de excitación en campo cercano en primer lugar y directo en segundo lugar.

5.2 Análisis espacial del IACC

Para estudiar el comportamiento del *IACC* con la variación de la distancia y consecuentemente su comportamiento en el campo cercano, directo y reverberante, se eligieron únicamente los pares coordenados: $S_1 - M_1$; $S_1 - M_2$; $S_1 - M_3$; $S_1 - M_4$, ya que se encuentran en la misma dirección (línea recta) respecto a la fuente S_1 . Este eje axial a la fuente, corresponde al sentido longitudinal del recinto, y ubicado en el centro de la explanada lejos de las paredes laterales.

Se trazaron las curvas *IACC vs. Espacio*, para las tres versiones del *IACC* para 125, 1000 y 4000 Hz, calculadas de BRIR medidas con excitaciones tipo mls, esw y lsw. (Figura 6).

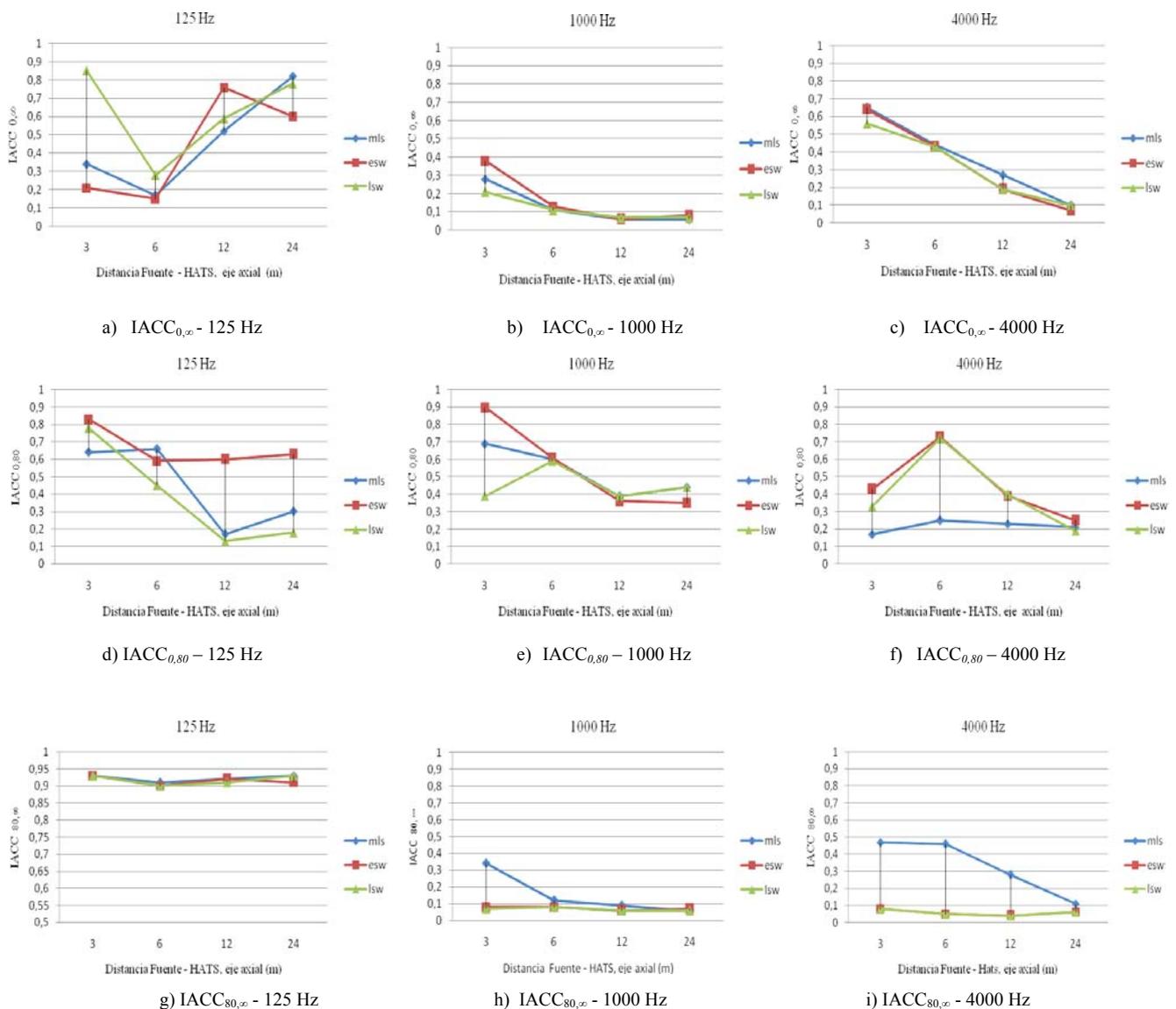


Figura 6: a), b) y c) $IACC_{0,\infty}$; d), e) y f) $IACC_{0,80}$; g), h) e i) $IACC_{80,\infty}$; para 125, 1000 y 4000 Hz. respectivamente en posiciones de 3, 6, 12 y 24 m, igual dirección, obtenidas por mls, esw y lsw.

Comenzando con el $IACC_{0,\infty}$ en la Figura 6 c), podemos observar la pendiente de disminución con el aumento de la distancia en alta frecuencia y por otra parte, la gran

variabilidad de los valores para baja frecuencia ver Figura 6 a). 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 ver Figura 6 e). Por último, $IACC_{80, \infty}$, se comporta casi invariante con la posición espacial, ver Figura 6 g) y h). La señal mls, produce altos valores para 4000 Hz a 3, 6 y 12 m, que consideramos posibles deficiencias de la técnica, evidenciadas en este ensayo, ver Figura 6 i).

Para estudiar el comportamiento del $IACC$ con la posición relativa FSO-HATS, se tuvieron en cuenta los pares de puntos S_1-M_5 y S_1-M_6 , que tienen en cuenta fuertes reflexiones laterales. En las Tablas 4 y 5, se puede observar que para media y alta frecuencia, el $IACC_{0,80}$, y $IACC_{0, \infty}$, aumenta su valor en más del doble. Para evaluar el efecto de la difusión y la posición relativa de la fuente, se evalúan los pares S_1-M_7 y S_2-M_7 . Donde la HATS se mantiene ubicada en la tribuna (superficie difusora) y se posiciona la fuente en S_1 (a la izquierda de la HATS y a 35 m de distancia) y en S_2 (perpendicular a la HATS, a 28 m de distancia). Las BRIR de estos puntos son claramente disimiles (ver Figura 7).

En las Tablas 3, 4 y 5, observamos que para baja, media y alta frecuencia el $IACC_{0, \infty}$, toma el valor del $IACC_{80, \infty}$, lo cual indica que la baja incidencia de las reflexiones tempranas en el valor global del $IACC$, ya que son en este caso, dispersadas por las superficies difusoras.

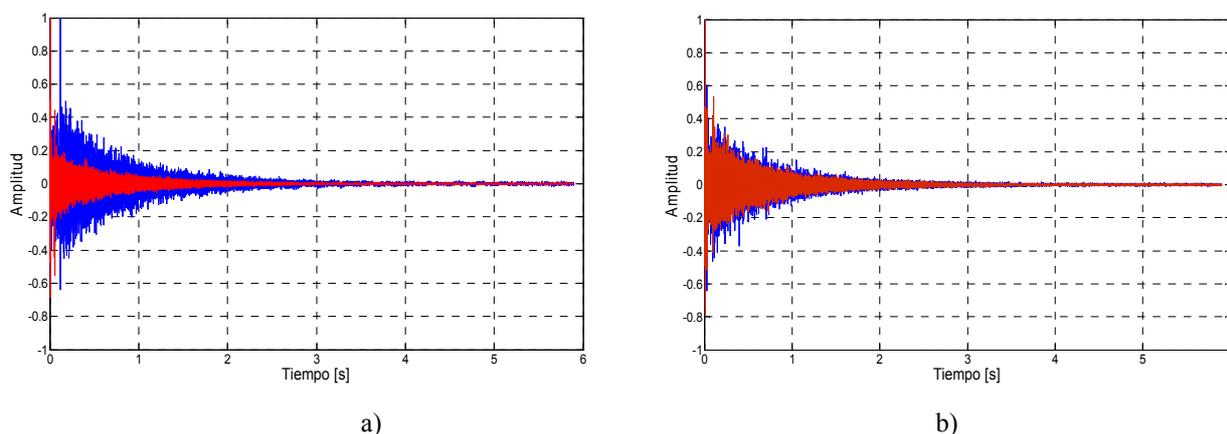


Figura 7: a) BRIR par coordenado S_1-M_7 ; b) BRIR par coordenado S_2-M_7 , ambos por lsw. Azul, oído izquierdo (L) y Rojo, oído derecho (R).

6 CONCLUSIONES

Haciendo un análisis de los resultados se puede concluir que:

- Cualquier tipo de señal continua de excitación (mls, esw y lsw), con el objeto de obtener la BRIR, deberá exceder en duración al valor del T_{60} estimado.
- Para separar la distorsión no lineal del sistema de la BRIR, la señal de barrido (esw o lsw) debe ser *mucho mayor la duración* de la BRIR, para de esta manera ubicar los impulsos de distorsión de n-ésimo orden antes del comienzo de la BRIR.
- $IACC_{0, \infty}$, 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.

7 TRABAJO A FUTURO

Continuando con el presente trabajo, estamos abocados a continuar estudiando:

- La variabilidad del IACC en un ambiente acústico controlado, en campo reverberante, difuso y libre a partir de las tres señales de excitación utilizadas
- La posible dependencia del espacio del $IACC_{0,\infty}$, para alta y media frecuencia, en un ambiente acústico controlado, en campo reverberante y difuso.

REFERENCIAS

- Barron, M., Auditorium Acoustics and Architectural Design. Chapman & Hall, London, 1993
- Barron, M. and Marshall, H., Spatial impression due to early lateral reflections in concert hall: the derivation of a physical measure, *Journal Sound and Vibration*, 77:211-232, 1981
- Beranek, L., Acoustics and musical qualities, *Journal Acoustical Society of America*, 99:2647-2652, 1996a
- Beranek, L., *Concert and Opera Halls- How they Sound*, Acoustical Society of America, 1996b
- Blauert, J. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge, MA. The MIT Press, 1997
- Bradley, J., Soulodre, G., Objective measures of listener envelopment. *Journal Acoustical Society of America*, 97 (4) 2363-2271, 1995
- Bradley, J., Soulodre, G., The influence of late arriving energy on spatial impression. *Journal Acoustical Society of America*, 98 (5) 2590-2597, 1995
- Ciric, D., Comparison of influence of distortion in mls and sine sweep technique. *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics (ICA2007)*, PACS:43.58.-e Madrid, 2-7 September 2007
- Cirillo, E., Martellotta, F., On the spatial variation of acoustical parameters in churches. *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics (ICA2007)*, PACS:43.55.Gx Madrid, 2-7 September 2007
- Daigle J. N. and Xiang, N., A specialized fast cross-correlation for acoustical measurements using code sequences, *Journal Acoustical Society of America*, 119:330-335, 2006.
- Davis, D. and Davis C., Sound System Engineering, 2nd Edition, Indianapolis, Sams, 1987
- Farina, A., Simultaneous measurements of impulse response and distortion with a sweep-sine technique., *Proc. 108th Convention of Audio Engineering Society*, preprint 5093, Paris, Francia, 2000
- Ferreira, S. P., 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*, (CADAE 2005), 10 y 11 de Noviembre, Buenos Aires, Argentina, 2005
- Ferreira, S. P., Elías, M., 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, Santiago de Chile, 25-28 de Octubre, 2006
- Ferreira, S. P., Ramos, O. A. Análisis físico-acústico-espacial de respuestas impulsivas de un recinto con alta dispersión sonora obtenidas por métodos indirectos. *Mecánica Computacional*, 26, pp 3-14, ISSN: 1666-6070. *Procedimientos del 26^{to} Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones (ENIEF 2007)*, Córdoba, Argentina, 2-5 de Octubre, 2007
- Haan, C. H. and Fricke, F. R., 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, 81-90, 1993

- Isbert A.C., Diseño acústico de espacios arquitectónicos, Alfaomega, 2001
- ISO 3382:1997 (E), Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters, 1997
- Jordan, V. L., A group of objective criteria for concert hall, *Applied Acoustics*, 14, 1981
- Keet, W. deV., The influence of early lateral reflections on the spatial impression, Proceedings of the 6th International Congress on Acoustics, paper E24, Tokyo, Japon, 1968
- Kuttruff, H. *Room Acoustics*, 3th edition, Elsevier Applied Science Publishers, 1991
- Kürer, R., *Acustica* 21, 370, 1969
- Okano, T., Beranek, L., Hidaka., Yakayuki., Relations among interaural cross-correlation coefficient (IACC_E), lateral fraction (LF_E), and apparent source width (ASW) in concert hall. *Journal Acoustical Society of America*, 104 (1) 255-265, 1998
- Ortiz Skarp, A., Ferreyra S., Perez Villalobo J., Novillo D., Fuente de campo sonoro homogéneo: construcción y verificación. *Procedimientos del 3^{er} Congreso Argentino de Acústica del Nuevo Milenio*, (CADAE 2005), 10 y 11 de Noviembre, Buenos Aires, Argentina, 2005
- Ramos, O. A., Jasa, V., Gorgas J., Céspedes Daza, D., Simulación binaural de espacios acústicos, *Proc. V Congreso Iberoamericano de Acústica FIA 2006*, A090, Santiago de Chile, 2006
- Really, A. and McGrath D. S., Convolution processing for realistic reverberation, *Pre-Prints of the 98th AES convention*, February 25-28, Paris, 1995
- Riechardt, W. Abdel Alim, O and Schmidt W., Definition and basis of making an objective evaluation to distinguish between useful and useless clarity defining musical performances, *Acustica*, 32:126-137, 1975
- Rife, D., Vanderkooy, J. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. *Journal Audio Engineering Society*. 37, 419-443, 1989
- Rindel, J., Evaluation of room acoustic qualities and defects by use of auralization. *148th Meeting of the Acoustical Society of America*, paper n°: 1pAA1, San Diego, California, 15-18 Noviembre, 2004
- Savioja, L., Houpaniemi, J., Looki, T., Väänänen R., Creating interactive virtual acoustic environments. *Journal Audio Engineering Society*, 7 (9) 675:705, 1999
- Schröder M., New method of measuring reverberation time, *Journal Acoustical Society of America*, 37:409-412, 1965
- Schröder M., Gottlob, D. and Siebrasse, K., Comparative study of European concert hall: Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters, *Journal Acoustical Society of America*, 56, 1195ff.
- Soulodre, G., Bradley, J., Subjective evaluation of new room acoustic measures. *Journal Acoustical Society of America*, 98 (1) 294-301, 1995
- Thiele, R., Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen, *Acustica*, 3:291-302, 1953
- Tronchin, L., Durvilli, I., Tarabusi, V., Influence of not-linearity in uncertainty on room acoustics measurements, *Proceedings of 19th International Congress on Acoustics (ICA2007)*, PACS: 43.55Mc, Madrid, 2-7 September 2007
- Vanderkooy, J., Aspects of MLS measuring systems, *Journal Audio Engineering Society*, 42:219:231, 1994
- Vorländer, M. and Bietz, H., Comparison of methods for measuring reverberation time, *Acustica*, 80:205-215, 1994