

ANÁLISIS FÍSICO-ACÚSTICO-ESPACIAL DE RESPUESTAS IMPULSIVAS DE UN RECINTO CON ALTA DISPERSIÓN SONORA OBTENIDAS POR MÉTODOS INDIRECTOS

Sebastián P. Ferreyra, Oscar A. Ramos

*Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada del CONICET,
UTN – Facultad Regional Córdoba, Mtro. M. López esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria,
CP 5016 Córdoba, Argentina. sebastian.ferreyra@gmail.com,
<http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cintra>*

Palabras clave: respuesta impulsiva de recintos, acústica de salas, MLS, norma ISO 3382

Resumen. Para evaluar las características acústicas de un recinto es crucial el conocimiento de su respuesta impulsiva. Tradicionalmente se ha utilizado como señal de excitación ráfagas de ruido filtrados por bandas. La desventaja del método es la pobre relación señal/ruido inherente a la característica impulsiva de la señal. Para salvar este inconveniente, se utilizan actualmente técnicas indirectas que emplean señales continuas, que procesadas a posteriori, permiten obtener la respuesta impulsiva del recinto. Básicamente existen dos tipos de señales: Series binarias de Máxima Longitud (MLS) y Barridos en Frecuencia en todo el rango de interés .

En una primera etapa, se realizó un estudio comparativo de parámetros acústicos definidos según norma ISO 3382:1997. Estos fueron calculados a partir de las respuestas impulsivas 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 temprana-tardía, frecuencia y tiempo. Así mismo, se pudo establecer ventajas y desventajas de las técnicas empleadas.

En una segunda etapa, motivo del presente trabajo, se realizó un análisis físico-acústico-espacial que estudia las respuestas impulsivas obtenidas por el método indirecto en puntos de recepción ubicados en campo *cercano*, *directo* y *reverberante* del mismo recinto. Se utilizaron como herramientas de análisis curvas de energía-tiempo, espectrogramas de 2D y 3D, e índices y parámetros especificados en la norma. Como variables adicionales, se analizaron: forma y volumen del recinto y características acústicas de los materiales.

1 INTRODUCCION

Es crucial, para el diseño acústico de un recinto, conocer la respuesta impulsiva o ecograma (RI) entre una fuente sonora y diferentes lugares del mismo. La RI caracteriza al recinto para una ubicación dada de la fuente y el receptor. Considerando al recinto como un sistema lineal, pasivo e invariante en el tiempo (Saposhkov, 1983), la transformada de Fourier define su Función de Transferencia (FT) que caracteriza al recinto en el dominio de la frecuencia, como lo es la RI en el dominio del tiempo.

A partir de la RI, es posible calcular múltiples parámetros definidos en la norma ISO 3382 (ISO 3382, 1997) y otros que no se encuentran aún estandarizados. Ahora bien, solo hay acuerdo sobre los valores óptimos de dichos parámetros 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. De todos modos, el conocimiento de ellos permite en forma rápida estimar el material, cantidad y ubicación de diferentes elementos acústicos como absorbentes, reflectores y difusores sonoros (Isbert, 2001), con el fin de controlar el campo acústico y aumentar el confort auditivo.

Los parámetros que especifica la norma pueden ser divididos 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 RI; b) los que permiten la obtención del tiempo de reverberación y c) los que evalúan las relaciones de energía entre diferentes porciones de la RI. Los valores óptimos de estos últimos fueron establecidos mediante pruebas subjetivas, según el uso del recinto (Beranek, 1996).

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. Por ultimo, conforman el grupo c): el centro de tiempo: T_s (es el tiempo del centro de gravedad del cuadrado de la respuesta impulsiva), 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 RI, llamada energía tardía); definición: D_{50} (relación entre la energía temprana y la energía total de la RI). Por ultimo, tres parámetros relativos al escenario: soporte temprano: ST_{early} , soporte tardío: ST_{late} y soporte total: ST_{total} (estos indicadores relacionan fracciones de energía tardía respecto de temprana y se evalúan en puntos muy próximos a la fuente).

Históricamente, para obtener una RI de un recinto, se utilizaba como señal de excitación ráfagas de ruido filtrados por bandas o disparos de pistola. La desventaja de este método es la pobre relación señal-ruido 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 sin distorsión dichas señales y sin riesgo de ruptura. En la actualidad, es habitual utilizar señales continuas que mediante procesamiento a posterior permitan obtener la RI con un incremento en la SNR. Estas técnicas, conocidas como métodos indirectos, han sido adoptadas por la normativa específica al estudio de salas (ISO 3382, 1997).

En una primera etapa, se realizó un estudio comparativo de parámetros acústicos definidos en la norma. Estos fueron calculados a partir de las respuestas impulsivas 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 (Ferreyra, 2006).

Es esta etapa, objeto del presente trabajo, nos proponemos evaluar algunos de los parámetros monoaurales mencionados, utilizando el método indirecto para obtener la RI. Las señales utilizadas son: barridos en frecuencia lineal, exponencial y series binarias de máxima longitud (Vanderkooy, 1994)

El 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 describe el método de medición y el equipamiento utilizado y en el punto 5 se presenta el análisis de los resultados.

2 MÉTODOS INDIRECTOS PARA OBTENER UNA RI

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.

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

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

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):

$$\Phi_{ss}(n) = s(n)\Phi s(n) = \delta(n) - \frac{1}{L+1} \quad (2)$$

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:

$$y(n) = s(n) * h(n) \quad (3)$$

Si a ambos miembros de la ecuación 3, se auto correlacionan con s:

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

$$\Phi_{sy} = \Phi_{ss}(n) * h(n) \quad (4)$$

Sustituyendo en (4) la ecuación (2) tendremos:

$$\begin{aligned}\Phi_{sy} &= [\delta(n) - \frac{1}{L+1}] * h(n) && ; \\ \Phi_{sy} &= h(n) - \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) && ; \\ \Phi_{sy} &= h(n) - \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) + \frac{1}{L(L+1)} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) && (5)\end{aligned}$$

despejando h(n):

$$h(n) = \Phi_{sy} + \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) - \frac{1}{L(L+1)} \sum_{k=0}^{L+1} h(k) \quad (6)$$

El segundo término de la ecuación (6) 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.

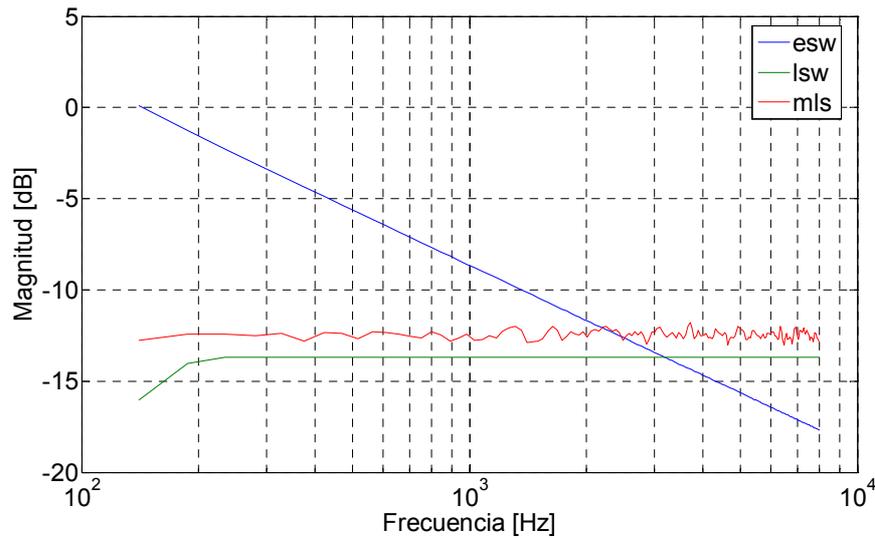


Figura 1. Densidad espectral en potencia de las señales utilizadas en el estudio.

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.

3 EL RECINTO

El recinto bajo estudio fue la iglesia católica Sagrado Corazón de Jesús de la Ciudad de Córdoba, Argentina. Es un templo de estilo gótico de gran volumen (16.058 m^3), buenas características de difusión sonora y bajo nivel de ruido. Se compone de: un hall de ingreso con un volumen de aproximadamente 1.019 m^3 ; 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 con una superficie de 142 m^2 y una altura media de 20 m. Está construida con materiales de altos coeficientes de reflexión, tales como mármol, vidrio, granito, cerámica, hormigón, madera y yeso (Figura 2). 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 el cielorraso, paredes laterales, columnas, altar, etc., obteniéndose un valor global de 0,93. Debido a la disposición de la ornamentación, la dispersión sonora es homogénea en todo el volumen.



Figura 2. Fotografías Iglesia Sagrado Corazón de Jesús, Córdoba, Argentina

4 METODO DE MEDICION E INSTRUMENTACION

La cadena de instrumentación electroacústica estuvo de acuerdo a lo recomendado en la norma ISO 3382.

1. PC, Placa de adquisición de sonido de 16 Bits, fs: 48000 sam/s, Full Duplex.
2. Software room acoustics, Brüel & Kjær type 7841 (DIRAC v. 3.0)
3. Micrófono, Brüel & Kjær type 4133.
4. Pre-Amplificador para micrófono, Brüel & Kjær type 2804
5. Consola de mezcla, Behringer Eurorack UB-1204 FX-PRO.
6. Amplificador de potencia, Brüel & Kjær 4224.
7. Fuente Sonora Omnidireccional, tipo dodecaedro.
8. Medidor de nivel de presión sonora, Brüel & Kjær type 2238.
9. Distanciómetro laser, SPECTRA HD 150
10. Cámara fotográfica digital.

Se utilizó como fuente sonora un dodecaedro cuya respuesta en frecuencia se muestra en la [Figura 3](#). Se ubicó en el altar a una altura de 1,7 m respecto del piso y a 2 m de altura, respecto al piso de la audiencia. La altura del micrófono fue de 1,7 m.

Se seleccionaron puntos de medición en: el campo cercano, el campo directo y el campo reverberante. La norma propone que se considera campo directo a partir de una distancia mínima respecto de la fuente, determinada por:

$$d_{\min} = 2 (V / c T)^{1/2} \quad (7)$$

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 $T = 7$ s la ecuación 7 es igual a 5,17 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 midió la distancia crítica, D_c igual a 8 m de la fuente. En consecuencia los puntos de medición seleccionados fueron: 2 m en el campo cercano; 4 m y 8 m en el campo directo y 12 m y 16 m en el campo reverberante, todos determinados por medición.

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.

El sistema de medición se calibró a 100 dB_{SPL} de presión sonora a 1 m de la fuente mediante la generación de ruido rosa.

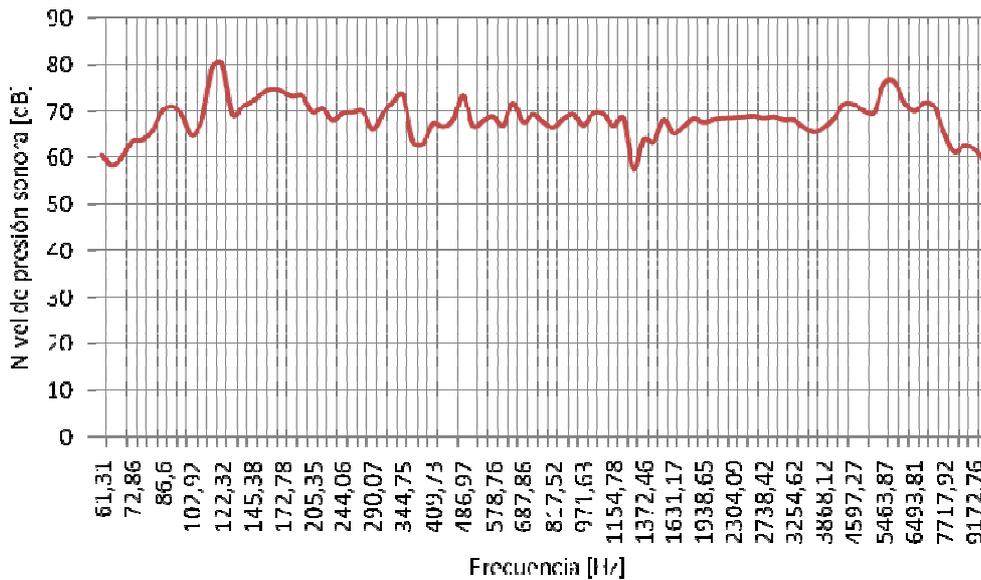


Figura 3. Respuesta en frecuencia baffle tipo dodecaedro por 1/12 de octava.

Finalmente, al momento de la medición, el ruido de fondo en el interior del templo fue de 46,8 dBA; en el hall de ingreso, alcanzo los 58 dBA, y en la explanada, a 15 m de la fachada, el nivel medio fue de 64 dBA.

5 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

5.1 Análisis de los parámetros monoaurales

Para simplificar el análisis se tomaron tres bandas de frecuencia: 125 Hz, 1000 Hz 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 y G_{rel} .

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

Grupo c: C_{80} , D_{50} , T_s , ST_{early} (solo 2 m), ST_{late} (solo 2 m), ST_{total} (solo 2 m)

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.

En las [Figuras 4 a la 6](#) se grafica la SNR en función de la posición. Se observa claramente que 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.

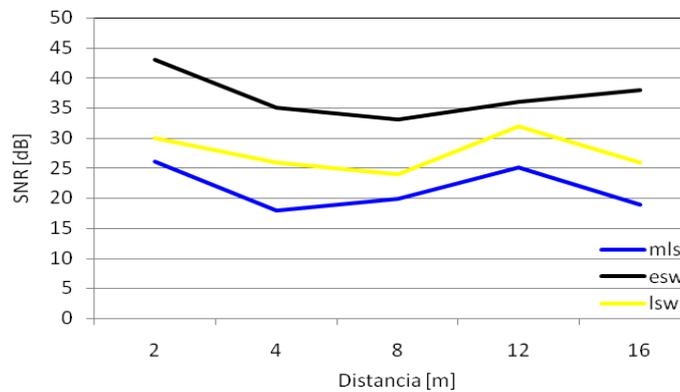


Figura 4. SNR para 125 Hz.

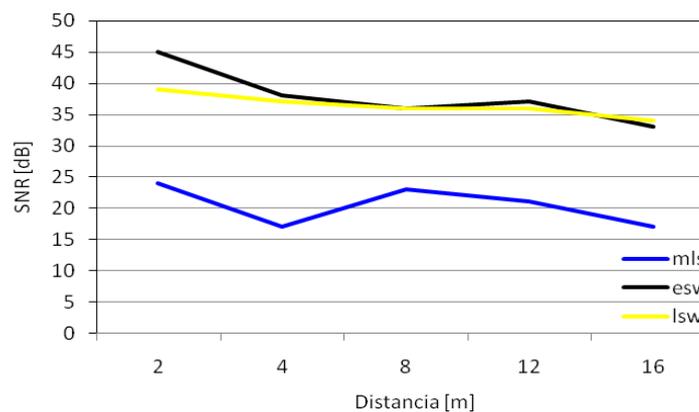


Figura 5. SNR para 1000 Hz.

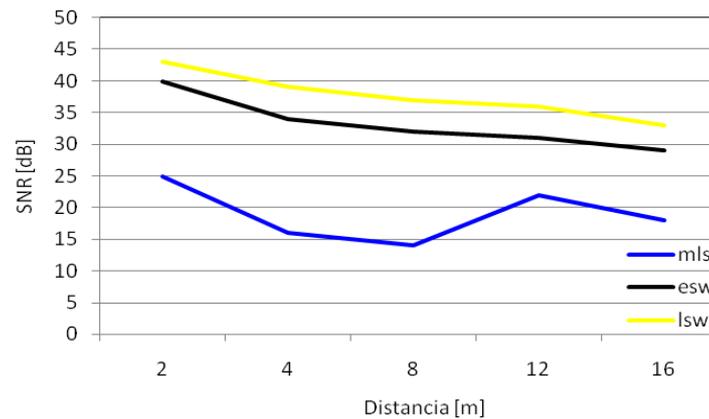


Figura 6. SNR para 4000 Hz.

La ISO 3382 especifica que para calcular T_{20} y T_{30} , la INR debe ser mayor a 35 dB y 45 dB respectivamente. Por lo tanto es conveniente utilizar la esw para analizar las bajas frecuencia y la lsw para las altas frecuencias. Para mejorar el comportamiento de la mls se deben promediar varias secuencia iguales durante la medición. De esta manera la mls se puede utilizar como señal de uso general en todo el espectro de estudio obteniéndose un buen rango dinámico en la respuesta impulsiva y alta inmunidad al ruido. (Kuttruff, 1991; Xiang, 1995; Daigle and Xiang, 2006).

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.

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 Sabine en 1922 (Sabine, 1922). Sin embargo, se puede ver que en media y alta frecuencia, tanto en campo directo como en reverberante, que los tiempos de reverberación medidos con la señal lsw son levemente mayores respecto a los obtenidos con esw y mls. El EDT (Jordan, 1981) se comporta de igual manera con las tres señales en todo el rango de frecuencias analizado. 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 (speech transmission index: STI) (Houtgast, Steeneken and Plomp, 1980), que utiliza el EDT, se degrada a medida que el oyente se aleja de la fuente.

Por ultimo los indicadores del grupo c) como C_{80} (Riechardt, Abdel and Schmidh, 1975) y D_{50} (Thiele, 1953) tienen valores muy similares para las tres señales. Mostraron valores elevados en el campo cercano, a 2 m de la fuente, aumentando hacia las altas frecuencias. En las posiciones ubicadas en campo directo se obtuvo 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 -10 dB para claridad y 0,15 para definición en frecuencias medias. Cabe destacar que en este tipo de recintos este resultado es sumamente buscado ya que mantiene la tradición de los grandes templos católicos apostólicos romanos (edad media), donde la mayor parte de la audiencia estaba ubicada dentro del campo reverberante. Una forma de atenuar este efecto es utilizar un sistema distribuido de altavoces con un gran número de elementos dispersos en el recinto.

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. Sin embargo, para la frecuencia de 125 Hz, el crecimiento alcanza un valor máximo en 8 m (D_C); disminuye a los 12 m y aumenta nuevamente en 16 m.

La medición de los parámetros ST se realizó a 2 m de la fuente y no a 1 m como lo especifica la norma. Las tres señales arrojaron los mismos resultados. Un análisis complementario nos permite afirmar que el ST_{early} (-11 dB) fue el mismo para todas las frecuencias estudiadas y que el ST_{late} y el ST_{total} varían considerablemente con la frecuencia. El análisis de las causas de este comportamiento esta fuera del alcance de este trabajo.

A continuación y por razones de espacio se muestran (Figura 7) los resultados para algunos parámetros analizados en el rango de frecuencias estudiado.

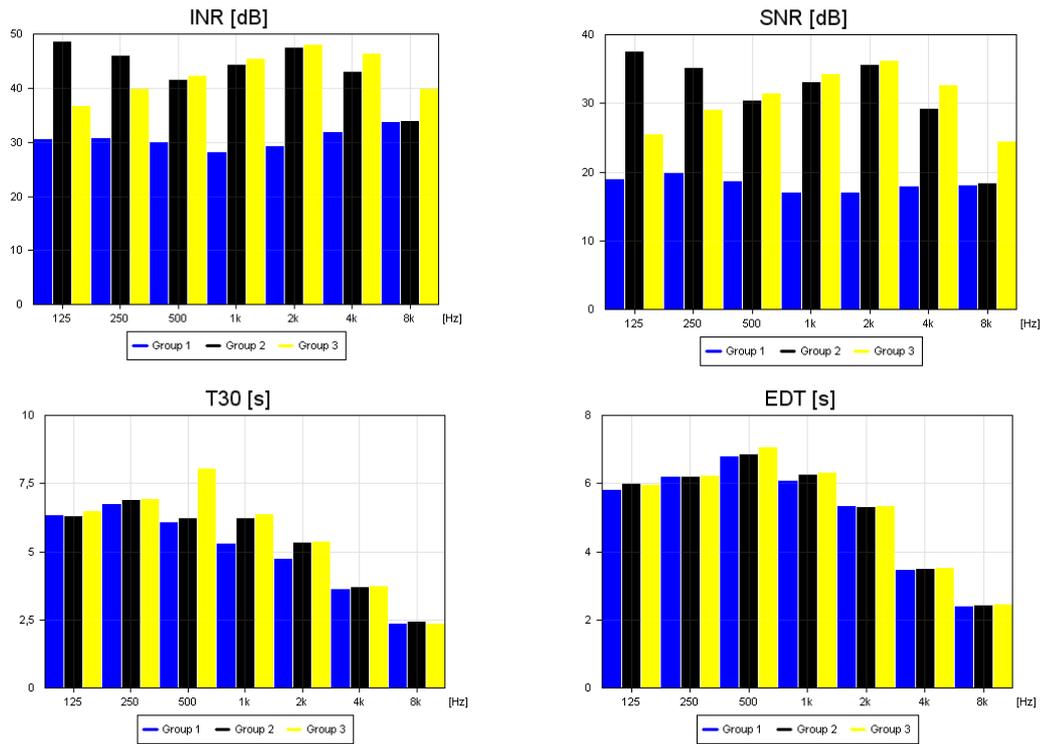


Figura 7. Comparación de señales por parámetros, punto a 16 m de la fuente. INR, SNR, T_{30} y EDT. Grupo 1 (mls), 2 (esw) y 3 (lsw).

5.2 Análisis espectro-temporal

Realizamos un análisis de las RIs mediante gráficos de energía-tiempo-frecuencia en 3D del tipo espectro por desplazamiento de tiempo (TSS). Por razones de espacio se muestran para puntos a 2 m, 8 m y 16 m.

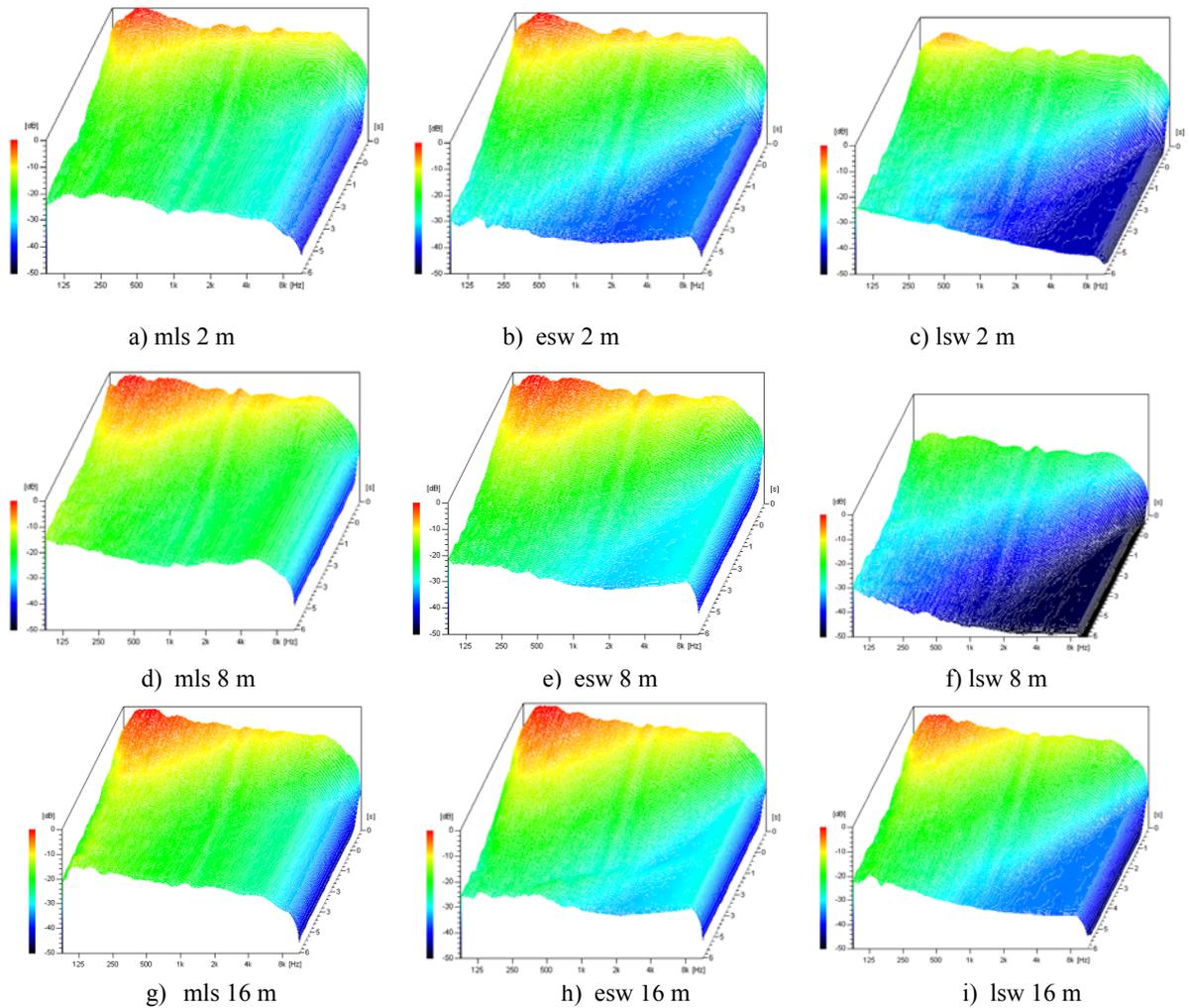


Figura 7. Comparación de señales por parámetros, punto a 16 m de la fuente.

Se observa que las RIs obtenidas por lsw se desvanecen abruptamente desde alta hacia baja frecuencia, hasta los 1000 Hz; logran los mejores niveles de SNR y INR en alta frecuencia, pero poseen menor energía en baja frecuencia que las RI obtenidas con las otras dos señales (Figura 7, c, f, i).

Al estudiar con una mayor resolución espectral se comprobó que en bajas frecuencias, las RI obtenidas por mls, producen leves picos de amplitud por debajo de 63Hz, lo que propone un estudio más avanzado en muy baja frecuencia con una fuente sonora adecuada a dicho espectro. Además, las RI obtenidas por mls son las únicas que se desvanecen uniformemente (Figura 7, a, d, g).

Por último, las RI obtenidas por esw lograron los niveles más elevados de SNR y INR en baja frecuencia (Figura 7, b, e, h).

6 CONCLUSIONES

Haciendo un análisis de los resultados se puede concluir que:

- Cualquiera de las señales a utilizar, con el objeto de obtener la RI, deberá exceder en duración al valor del T_{60} estimado.
- Tanto del análisis de los parámetros como de los gráficos ETF se infiere que: 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 tiempo de reverberación por técnicas indirectas. Ahora bien, en media y alta frecuencia, tanto en campo directo como reverberante, la señal lsw produce tiempos levemente mayores respecto de las otras.
- El EDT se comporta de igual manera con las tres señales en todo el rango de frecuencias analizado. 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.
- Los valores de C_{80} y D_{50} son independientes de la señal utilizada.
- Se comprobó que los valores de T_s varían levemente con la señal: los obtenidos con la esw fueron superiores respecto de la lsw y la mls para todo el rango de frecuencias y las cinco posiciones estudiadas. Se observó además, independiente de las señales, que T_s aumenta con la distancia y en forma no lineal en todo el espectro.
- Cuando se calculó ST, las tres señales arrojaron resultados concordantes en todo el espectro de frecuencias.
- 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.

REFERENCIAS

- Beranek, L. L., Acoustics and musical qualities, *Journal Acoustical Society of America*, 99:2647-2652, 1996.
- 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.
- Ferreira, S. P. and Elías J. M., Análisis de parámetros acústicos de recintos, utilizando diferentes técnicas de medición de la respuesta al impulso. *Procedimientos de conferencias del V Congreso Iberoamericano de Acústica, FIA, Santiago de Chile, A032, 2006.*
- 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.
- Houtgast, T., Steeneken H. J. M. and Plomp R., Predicting speech intelligibility in rooms

- from the modulation transfer function, *Acustica*, 16:60-72, 1980.
- ISO 3382:1997 (E), *Acoustics – Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, 1997.
- Isbert A.C., *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, Alfaomega, 2001.
- Jordan, V. L., A group of objective criteria for concert hall, *Applied Acoustics*, 14, 1981
- Kuttruff, H. *Room Acoustics*, 3th edition, Elsevier Applied Science Publishers, 1991
- Riechart, W. Abdel Alim, O and Schmidt W., Definition und meßgrundlage eines objective maßes zur ermittlung der grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer durchsichtigkeit bei musikdarbietung, *Acustica*, 32:126-131, 1975
- Rife, D. and Vanderkooy, J. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. *J. Audio Eng. Soc.*, 37, 419-443, 1989.
- Sabine, W. C., *Collected Papers on Acoustics*, Harvard U. Press, reprinted by Peninsula Publishing, 1992.
- Schröder M., New method of measuring reverberation time, *Journal Acoustical Society of America*, 37:409-412, 1965.
- Saposhkov, M. A., *Electroacústica*, Editorial Reverté, 1983.
- Thiele, R., Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen, *Acustica*, 3:291-302, 1953
- 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
- Xiang, N., Evaluation of reverberation times using a nonlinear regression approach, *Journal Acoustical Society of America*, 98:2112-2121, 1995.