



paper ID: A032 /p.1

## **Análisis comparativo de parámetros acústicos de recintos, utilizando diferentes técnicas de medición de la respuesta al impulso.**

S.P. Ferreyra<sup>a</sup> & J.M. Elías<sup>b</sup>

<sup>a, b</sup> *Centro de Investigación y Transferencia en Acústica (CINTRA), Unidad Asociada del CONICET.  
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba.  
Maestro López esq. Av. Cruz Roja Argentina. CP 5016, Córdoba, Argentina*

<sup>a</sup> [sebastian.ferreyra@gmail.com](mailto:sebastian.ferreyra@gmail.com); <sup>b</sup> [martinelias@gmail.com](mailto:martinelias@gmail.com);

**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 filtrado en bandas. La desventaja de este método es la pobre relación señal/ruido inherente a la característica impulsiva de la señal. Actualmente es común la utilización de otros tipos de señales que salvan esta desventaja. Básicamente son dos: Series binarias de Máxima Longitud (MLS) y Barrido en Frecuencia en todo el rango de interés. Se presenta en este trabajo un estudio comparativo entre mediciones de respuestas impulsivas de recintos utilizando el método clásico, MLS y el de barrido. El estudio se basa en la comparación de los índices y parámetros especificados en la Norma ISO 3382. Como variables adicionales se evaluaron recintos según su forma, volumen, absorción, entre otros.

**KEYWORDS:** Acústica de Salas, Respuesta Impulsiva de Recintos, MLS, Relación Señal / Ruido, ISO 3382

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de análisis o diseño del campo sonoro confinado en un recinto cerrado, el cual generalmente es utilizado para una actividad auditiva específica, lo primero que se desea conocer es la Respuesta Impulsiva del Recinto (Room Impulse Response: RIR) o ecograma. Ya que esta señal, expresada en el dominio de tiempo, puede caracterizar al recinto de forma completa para una ubicación dada de dupla fuente-receptor. Considerando al recinto como un sistema lineal pasivo e invariante en el tiempo [1], al aplicarle a dicha respuesta impulsiva la transformación de Fourier se define su Función de Transferencia (Transfer Function: TF). A partir de la RIR, es posible calcular múltiples parámetros definidos en la norma ISO 3382 [2]. Estos parámetros objetivos permiten analizar o diseñar en forma rápida y confiable el campo sonoro y por lo tanto la elección y posición de diferentes elementos como absorbentes, reflectores y difusores sonoros [3].

Cuando una fuente sonora omnidireccional radia un impulso en un recinto completamente cerrado, el frente de onda producido se propaga esféricamente en el volumen confinado hasta alcanzar múltiples obstáculos con diferentes características reflectivas y difusivas, modificando su recorrido y propiedades. Este sin número de transformaciones, se produce muy rápidamente y alcanza el punto de audición (captura) con un leve retardo de tiempo respecto del sonido directo. Una vez capturada la RIR, utilizando diferentes técnicas de procesamiento de la señal es posible representar el evento sonoro a través de múltiples curvas graficadas tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Básicamente se utilizan las siguientes: Curva Tiempo-Energía (Energy-Time Curve: ETC), Curva de Decaimiento (Decay Curve: DC), Curva de Respuesta en Frecuencias (Frequency Response Curve: FRC) en representación lineal o logarítmica (aplicando por ejemplo la Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform: FFT) y la Curva Tiempo-Energía-Frecuencia (Energy-Time-Frequency Curve: ETFC), graficada en 3D.

Los parámetros definidos en ISO 3382, pueden clasificarse de varias formas según su aplicación. Así por ejemplo: Definición ( $D_{50}$ ), Claridad ( $C_{50}$ ) y Tiempo de Caída Temprano (EDT), son utilizados para evaluar la inteligibilidad de la palabra [4]. Otros, en cambio, han sido modelados para correlacionarse de mejor manera con los procesos musicales. También se los puede agrupar de acuerdo a si el receptor es de tipo binaural o monoaural. Sin embargo, todos en su conjunto por ser de carácter objetivos permiten realizar comparaciones asegurando un alto grado de repetibilidad en la medición. Por supuesto, cada uno de ellos se relaciona de alguna manera con algún parámetro subjetivo, tratando de vincular, aunque con ciertas limitaciones, ambos tipos de parámetros [5].

Por otra parte, cabe destacar que todos los parámetros objetivos se calculan a partir de la RIR, la cual puede obtenerse básicamente de dos maneras: La primera, es aplicando el método tradicional que utiliza como señal de excitación externa ráfagas de ruido (Noise Bursts) [6] filtrados por bandas, disparos de pistola y estallidos de globos, denominada como técnica impulsiva (Impulse Technique: IT), con la desventaja que implica poseer bajos niveles de Relación Respuesta al Impulso-Ruido (Impulse Response to Noise Ratio: INR). La segunda, utiliza la técnica de la deconvolución (Deconvolution Technique: DT) donde la RIR es calculada deconvolucionando una señal de excitación apropiada con la respuesta de la señal. Esta técnica permite aplicar procesos de cálculo numérico para reducir significativamente el nivel de ruido existente durante la medición, haciéndola prácticamente independiente del ruido de fondo [7].

Generalmente se utilizan tres tipos de señales para aplicar la deconvolución:

- 1.- Barrido en frecuencias de una señal sinusoidal que incrementa proporcionalmente con el tiempo (Lineal Sweep, l-sweep).
- 2.- Barrido en frecuencia de una señal sinusoidal que incrementa exponencialmente con el tiempo (Exponential Sweep, e-sweep).
- 3.- Secuencia binaria pseudoaleatoria con propiedades específicas denominada Secuencia de Máxima Longitud (Maximum Length Sequence: MLS) [8].

Se presenta en este trabajo un estudio comparativo de parámetros monoaurales especificados en dicha norma, aplicando diferentes señales y técnicas de medición para la obtención de la respuesta al impulso.

## 2. CRITERIOS, ENSAYOS Y MEDICIONES

### 2.1 Criterios

Para poder comparar los parámetros obtenidos a partir de cuatro señales distintas (noise burst, e-sweep, l-sweep y MLS) en un recinto con características acústicas complejas como es el caso, de una iglesia con una arquitectura tipo gótica con altos niveles de reverberación y difusión, se realizaron previamente los ensayos en un ambiente conocido [9]. Dicho espacio arquitectónico de referencia fue la cámara semianecoica del CINTRA ubicada en la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba, Córdoba, Argentina.

Una vez realizados los ensayos evaluando todos los parámetros bajo estudio, se procedió a realizar las mediciones en la iglesia Sagrado Corazón de Jesús de los padres Capuchinos sita en la intersección de calles Buenos Aires esq. Obispo Oro, de la Ciudad de Córdoba. Este templo, con características acústicas muy particulares permitió evaluar las técnicas y las señales de medición bajo condiciones reales. Observando como se modifican los valores de cada uno de los parámetros, según la señal utilizada para la obtención de la RIR. El estudio se realizó con una resolución espectral por tercio de octava, aunque en este trabajo por una cuestión de simplicidad para mostrar los resultados se trabajó por octavas. El espectro de frecuencias bajo estudio definido por condiciones de los sistemas de medición es el comprendido entre los 63 Hz a 8000 Hz, ya que esta es la respuesta en frecuencia que proporciona a puntos de  $-10 \text{ dB}_{\text{SPL}}$  la fuente sonora omnidireccional de campo homogéneo.

Para poder correlacionar los resultados se optó por utilizar dos cadenas de instrumentación de alta resolución, precisión y exactitud de la firma Brüel & Kjær (B&K).

### 2.2 Ensayos e instrumentos

Como ya se mencionó, el ensayo por ambas técnicas consiste en la obtención de la RIR. En el laboratorio, fueron instaladas ambas cadenas de instrumentación en condiciones normales. El volumen aproximado de la cámara semianecoica es de  $V_{\text{cs}} = 41,2 \text{ m}^3$  (3,779 m x 4,285 m x 2,546 m), la fuente sonora omnidireccional de campo homogéneo (tipo dodecaedro) y el micrófono B&K type 4133 fueron elevados a 1,7 m respecto del piso. La distancia entre la fuente y el micrófono fue de 2 m. Seguidamente, se muestran tres espectrogramas (Time Shifted Spectra: TSS) obtenidos con la técnica que aplica la deconvolución de una señal tipo MLS, e-sweep y l-sweep todos con una duración de 1,37 s. El ruido de fondo en la cámara al momento de la medición fue de 18 dBA.

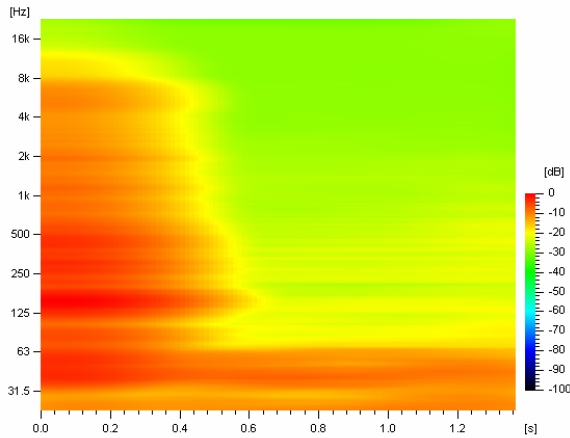


Figura 1: *Espectrograma tipo TSS, Cámara semianecoica, señal MLS de 1,37 s*

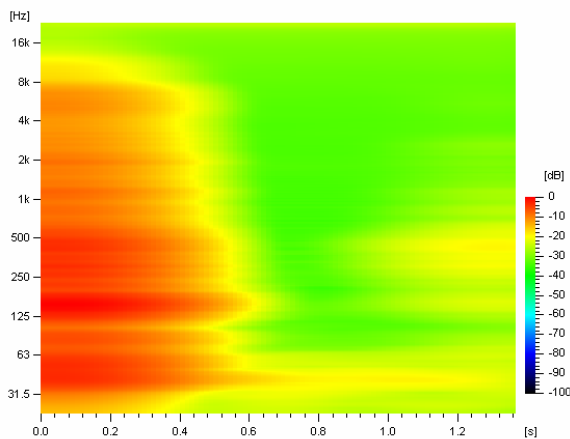


Figura 2: *Espectrograma tipo TSS, Cámara semianecoica, señal e-sweep de 1,37 s*

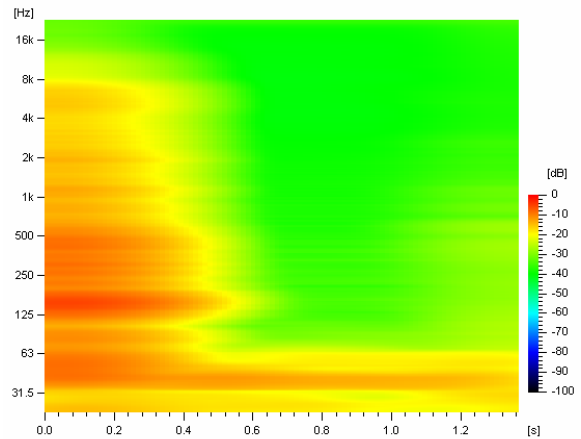


Figura 3: *Espectrograma tipo TSS, Cámara semianecoica, señal l-sweep de 1,37 s*

En la iglesia, desde un punto de vista acústico arquitectónico, el relevamiento planteó hartas dificultades, la complejidad de las formas arquitectónicas nos permitió aproximar el volumen total a  $V_i = 16.058 \text{ m}^3$ , básicamente la iglesia esta compuesta por: un hall de ingreso con un volumen de aproximadamente  $1.019,3 \text{ m}^3$ ; una nave central, (en sentido longitudinal y de base rectangular), dos naves laterales (en sentido transversal y de base rectangular de menor tamaño) y un altar de base semicilíndrica con una superficie de  $142 \text{ m}^2$  y una altura media de 20 m. Básicamente toda la construcción esta realizada con materiales con coeficientes de reflexión muy elevados, algunos materiales son: mármol, vidrio (vitreaux), granito, cerámica, hormigón, madera, yeso. Por otra parte, las condiciones acústicas al momento del ensayo fueron muy diferentes respecto del laboratorio. El ruido de fondo en el interior del templo fue de 46,8 dBA. Mientras que en el hall de ingreso, alcanzo los 58 dBA, y en la explanada a 15 m respecto de la fachada, el nivel medio fue de 64 dBA. Se pudo relevar la presencia en el interior de la sala, un importante nivel de presión sonora por debajo de lo 40 Hz, a causa del transito vehicular y construcciones civiles en los alrededores del templo, por lo cual, no debe considerarse como valido ningún valor por debajo e inclusive en dicha frecuencia en las mediciones. La fuente omnidireccional fue ubicada en el altar, a una altura de 2 m respecto del nivel de piso de la audiencia. Los seis puntos de medición elegidos se posicionaron sobre el eje longitudinal del recinto, y la misma altura que el centro geométrico de la fuente respecto al nivel de piso de la audiencia ( $h_{\text{mic}} = 1,7 \text{ m}$ ). Dichos puntos de

medición se situaron a una distancia de 2 m, 4 m, 8 m, 12 m, 16 m y 24 m respecto de la fuente.



Figura 4. Fotografías Iglesia Sagrado Corazón de Jesús, Córdoba, Argentina

#### **Cadena de instrumentación, técnica impulsiva para la obtención de la RIR.**

- PC Notebook, (solo como receptor para el post-procesamiento de la información, half duplex).
- Micrófono B&K type 4133.
- Medidor de Nivel Sonoro Modular B&K type 2231.
- Software Room Acoustics B&K BZ 7109.
- Amplificador de potencia B&K 4224.
- Fuente Sonora Omnidireccional (tipo dodecaedro).
- Cableado desbalanceado.

#### **Cadena de instrumentación, técnica por deconvolución para la obtención de la RIR.**

- PC de escritorio, Placa de adquisición de sonido de 16 Bits, Full Duplex,
- Software Room Acoustics B&K type 7841 (DIRAC v. 3.0)
- Micrófono B&K type 4133.
- Pre-Amplificador para Micrófono B&K type 2804
- Consola Mixer Behringer Eurorack UB-1204 FX-PRO.
- Amplificador de potencia B&K 4224.
- Fuente Sonora Omnidireccional (tipo dodecaedro).
- Cableado desbalanceado.

#### **Otros Equipos**

- Distanciómetro LASER SPECTRA HD 150
- Cámara fotográfica digital.

#### **2.3 Mediciones**

A continuación se exponen resumidamente las mediciones realizadas y solo en el punto ubicado a 16 m respecto de la fuente, el cual esta ubicado en el campo reverberante difuso ya que la distancia crítica ( $D_c$ ) [10] fue relevada a 8 m.

**Mediciones por Técnica Impulsiva: Parámetros de estudio: EDT, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub>, D<sub>50</sub>, C<sub>80</sub>, t<sub>s</sub>.**

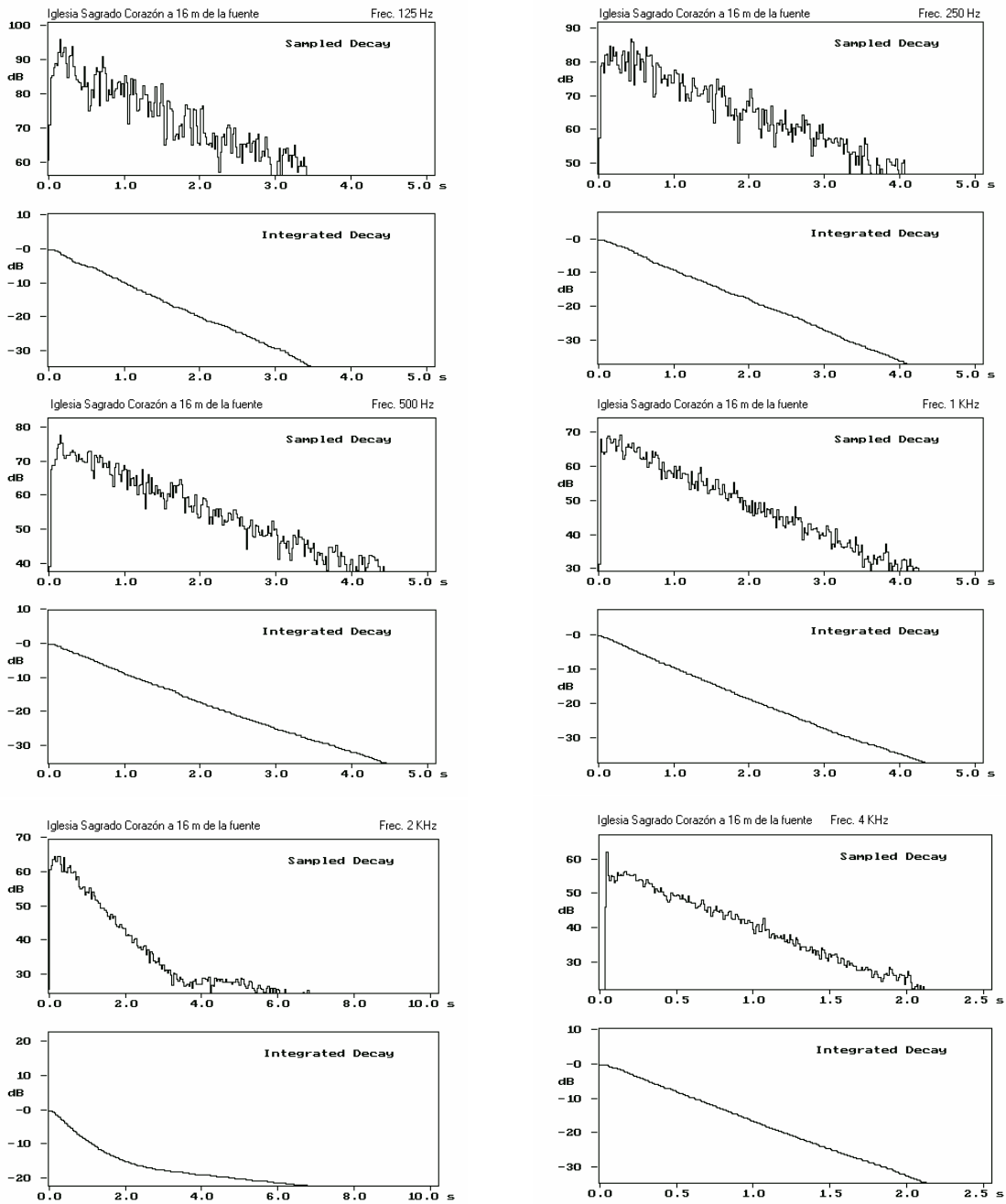


Figura 5. ETC y Curva Integrada, Técnica Impulsiva, Noise Burst, pto a 16 m.

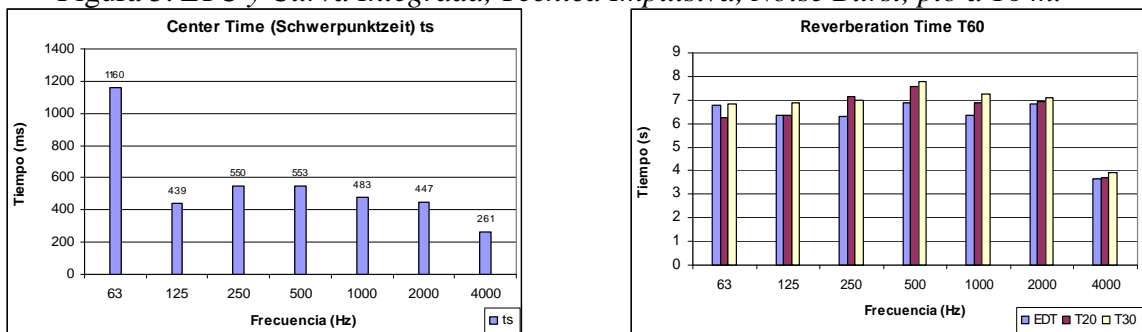


Figura 6. Parámetros Acústicos, Técnica Impulsiva, Software B&K BZ 7109

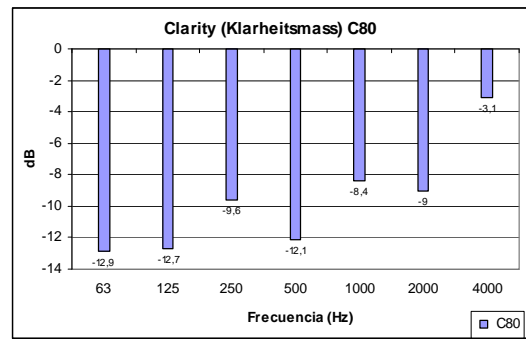
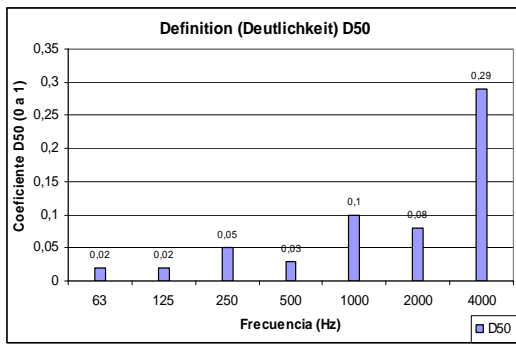


Figura 7. Parámetros Acústicos, Técnica Impulsiva, Software B&K BZ 7109.

**Mediciones aplicando la Técnica de la Deconvolución:** Parámetros de estudio: EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ ,  $T_{30}$ ,  $D_{50}$ ,  $C_{80}$ ,  $t_s$ ,  $G_{rel}$ ,  $SNR$ ,  $ST_{early}$ ,  $ST_{late}$ ,  $ST_{total}$ , Magnitud, INR

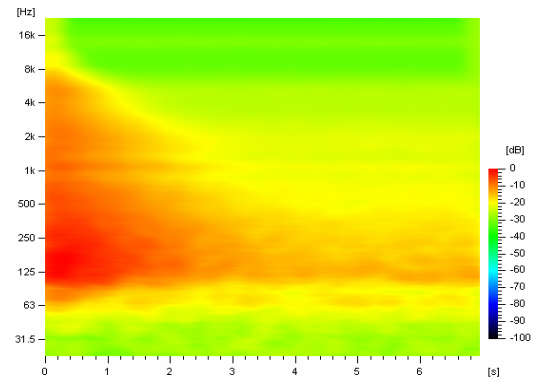
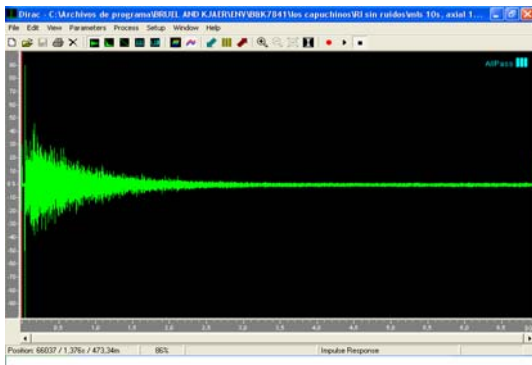


Figura 8: RIR por MLS 10 s, DIRAC's window y Espectrograma tipo TSS, pto. 16 m.

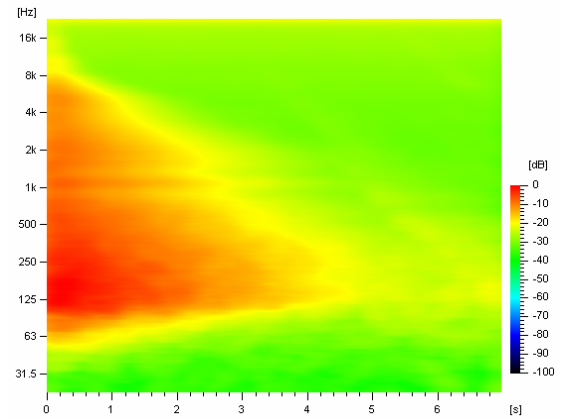
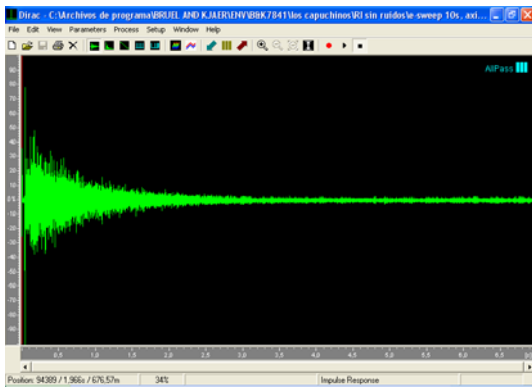


Figura 9: RIR por e-sweep 10 s, DIRAC's window y Espectrograma tipo TSS, pto. 16 m.

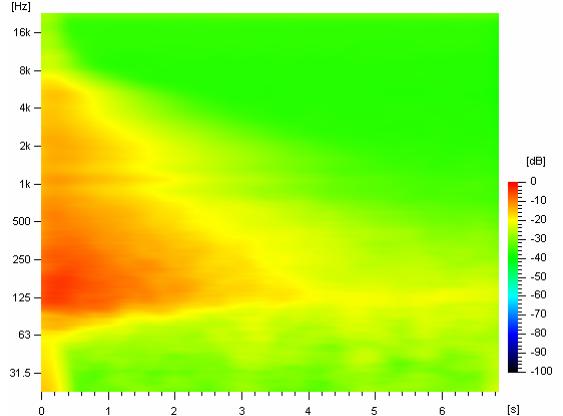
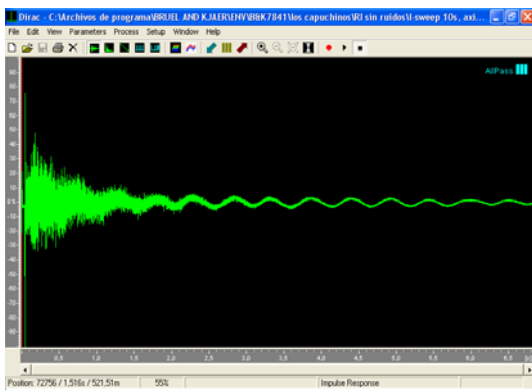
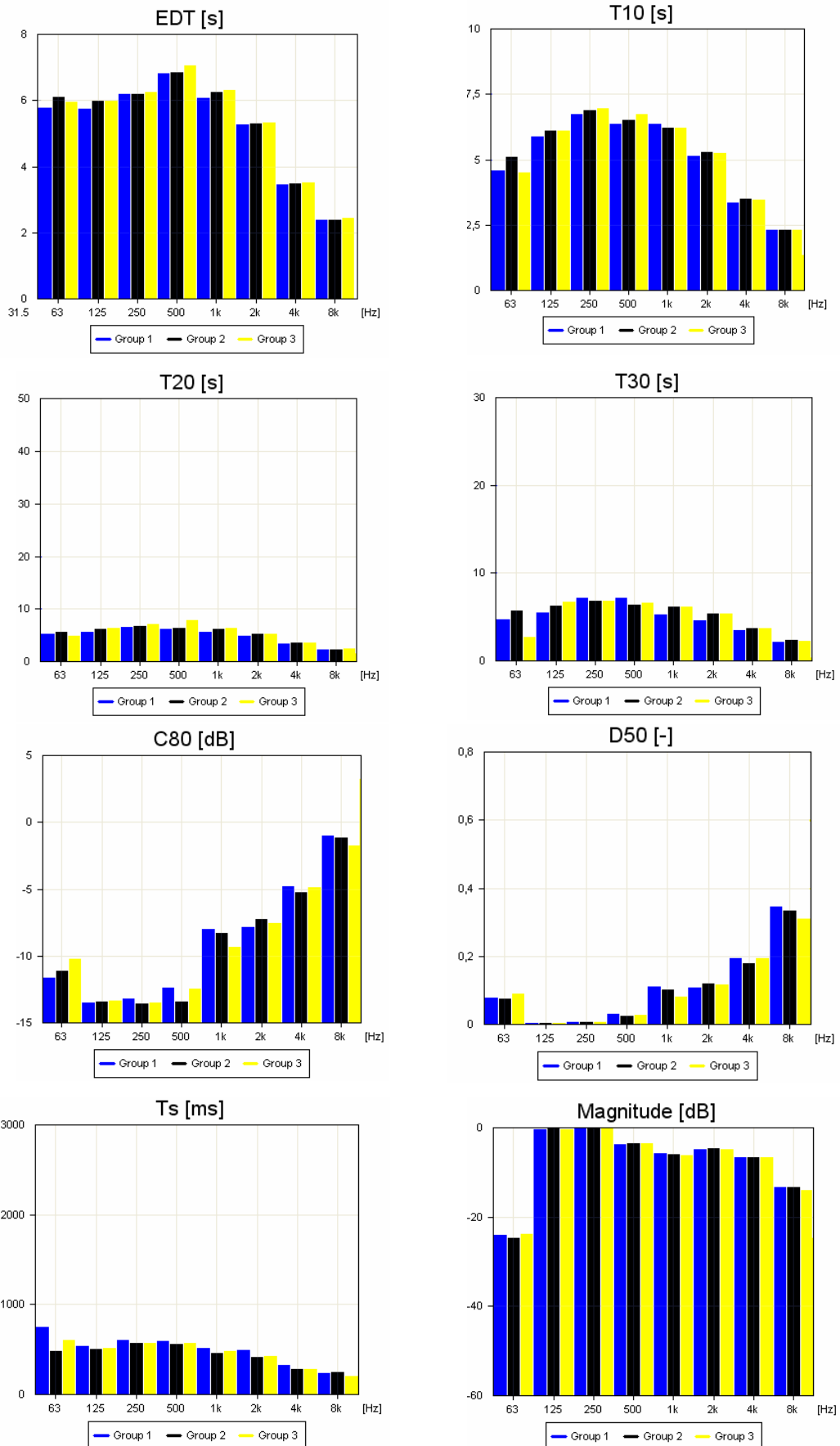


Figura 10: RIR por l-sweep 10 s, DIRAC's window y Espectrograma tipo TSS, pto. 16 m.

**Nomenclatura:** Grupo 1 aplica señal MLS (azul), Grupo 2 aplica señal e-sweep (negro), Grupo 3 aplica señal l-sweep (amarillo). Ancho de banda bajo estudio de 63 Hz a 8000 Hz.





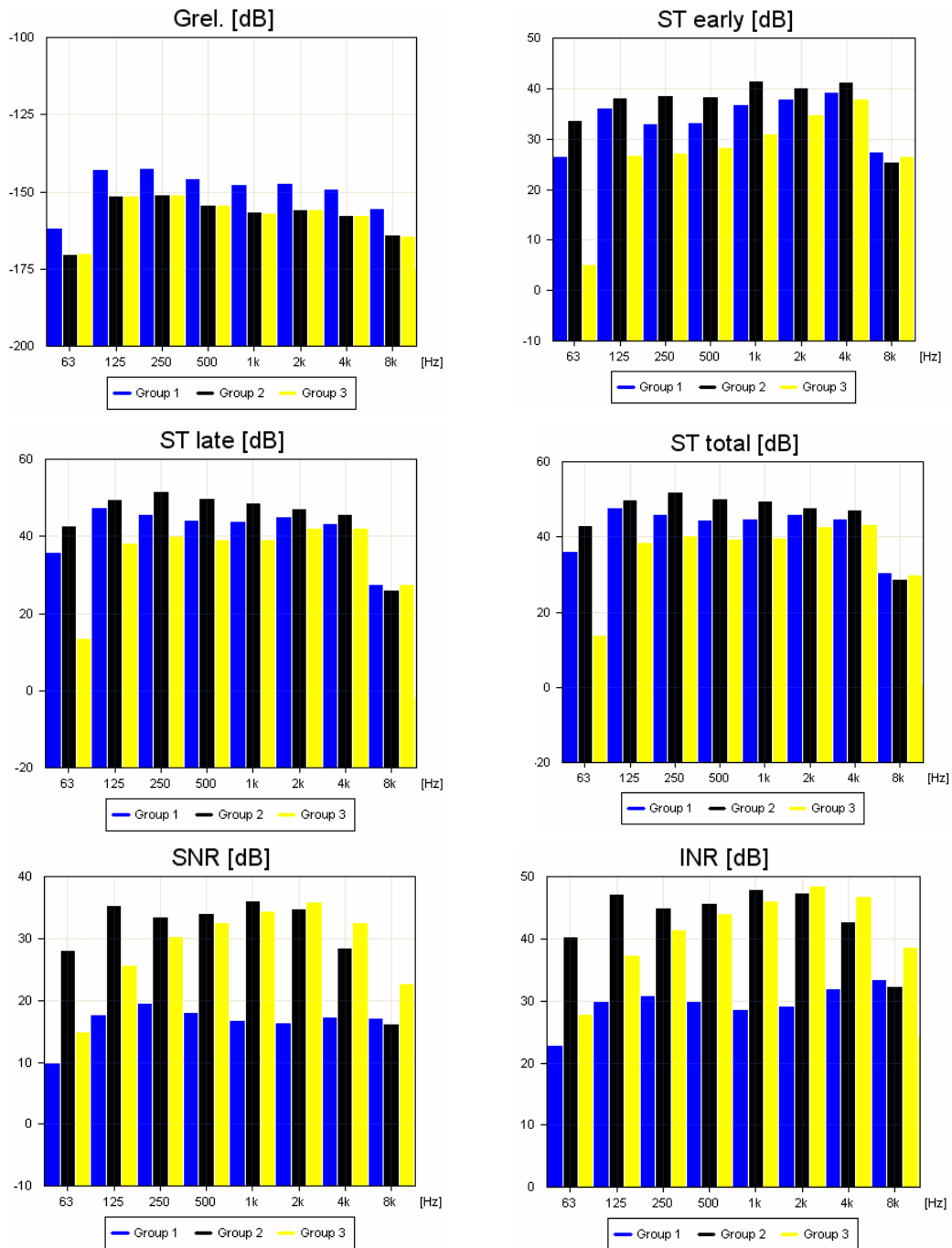


Figura 10. *Parámetros Acústicos, Técnica por deconvolución, Software DIRAC.*

### 3. CONCLUSIONES

Haciendo un análisis de los valores de los parámetros obtenidos por ambas técnicas se concluye que:

- La DT posee una superior inmunidad al ruido de fondo respecto de la IT, pero además en líneas generales, la DT tiene un mejor comportamiento en baja frecuencia.
- En el momento de medir EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  y  $T_{30}$ , las tres señales de la DT arrojaron resultados concordantes entre sí, mientras que la IT mostró pequeñas diferencias en bajas frecuencias.

- Ambas técnicas mostraron valores coherentes al calcular índices de energía temprano-tardío como  $C_{80}$ ,  $C_{50}$  y también al calcular  $D_{50}$ . Por otra parte, la DT se comportó más coherente en baja frecuencia al calcular  $t_s$ .

Haciendo un análisis de los resultados arrojados por la DT comparando las señales de excitación únicamente, se puede concluir que:

- Al evaluar los espectrogramas, la MLS, por desarrollar más ciclos de baja frecuencia que los sweep's, proporcionó durante unos segundos más, energía en baja frecuencia. Esto aparentemente excitó en mayor medida los modos de resonancia de la sala y mantuvo alto los niveles de presión sonora (SPL) en baja frecuencia repercutiendo en varios parámetros.
- Las tres señales mostraron concordancia cuando se calculó Magnitud,  $t_s$ ,  $C_{80}$ , EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ .
- El cálculo de los índices tardíos-tempranos, relacionados con la audición en los escenarios como  $ST_{early}$ ,  $ST_{late}$  y  $ST_{total}$ , mostraron que el e-sweep obtuvo valores elevados respecto a la MLS (en segundo lugar) y por último l-sweep. Dicho efecto está vinculado con el proceso de decaimiento energético observable en la ETC, DC y ETFC.
- Se consideró como una conclusión de suma relevancia el estudio de la INR. Para que la RIR pueda ser eficiente para el cálculo de ciertos parámetros acústicos, la norma (ISO 3382) especifica una INR mayor que 35 dB para determinar  $T_{20}$  y superior que 45 dB en el caso de  $T_{30}$ . Bajo iguales condiciones de medición, la INR fue óptima en ésta sala al utilizar un e-sweep, buena con un l-sweep y pobre con la MLS. Cabe destacar que el "pre-average" mejora mucho la INR y que en este estudio siempre tomó el valor de 1, para las tres señales.
- Cualquiera de las señales a utilizar, con el objeto de obtener la RIR, deberá exceder en duración al valor del  $T_{60}$  estimado.
- El hecho de poder utilizar tres señales con distintas características en el dominio del tiempo, permite tener una visión más amplia para la interpretación de un parámetro objetivo que tiene como fin relacionarse con un evento subjetivo como lo es la audición humana.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Saposhkov, M. A. (1983). Electroacústica, Editorial Reverté S.A. Madrid. España.
- [2] ISO 3382-(1997). (Acoustics - Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters).
- [3] Isbert A. C. (2001). Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos. Alfaomega.México.
- [4] Ferreyra, S. P. & Elías, J. M. (2005) Análisis de Parámetros Acústicos de Recintos según ISO 3382, aplicado a Salas de Usos Múltiples, III Congreso Argentino de Acústica del Nuevo Milenio, CADAE (Cámara Argentina de Acústica y Electroacústica y Áreas Vinculadas), 10 y 11 de Noviembre de 2005, Buenos Aires, Argentina.
- [5] Beranek L.L. (1996). Acoustics and Musical Qualities. J.Acoustical Society of America. Vol. 99, No. 5. pp. 2647-2652.
- [6] Brüel & Kjør. Electroacoustic Free Field Measurements in Ordinary Rooms using Gating Techniques. Application Notes. Nærum. Denmark.
- [7] Farina A. (2000). Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique. 108<sup>th</sup> Convention 2000 February 19-22, Paris, France. AES.5093(D-4).
- [8] Vanderkooy J. (1994). Aspects of MLS Measuring Systems, JAES vol.42, n.4, 1994 April pp. 219-231.
- [9] Beranek, Leo. L. (1967). Acoustic Measurements, John Wiley & Sons, Inc, 7<sup>nd</sup> Edition, New York.
- [10] Davis, D. & C.(1983), Ingeniería de Sistemas Acústicos, Marcombo S.A. Barcelona. España.