

Difusores Acústicos III

Ing. Alejandro Bidondo.

Profesor de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, Laboratorio Abierto y profesor de la Universidad de Belgrano. Director de *Ingeniería de Sonido.com*.

Diciembre 2002

Abstracto:

En esta tercera etapa del estudio de la difusión acústica se trabajó específicamente sobre la medición y análisis del SFD en distintos recintos, la sala AB del Centro Cultural San Martín, el teatro del Colegio Euskal Echea, el salón Dorado de Teatro Colón y la sala principal del Teatro Colón. De estas experiencias se extrajeron los parámetros a los que es sensible el SFD y los datos para un nuevo punto de partida para analizar la acústica de recintos.

Acoustic diffusers III

Dipl. Eng. Alejandro Bidondo

Director of *Ingeniería de Sonido.com*, Professor at the *Universidad de Buenos Aires, Laboratorio Abierto* and *Universidad de Belgrano*, Argentina, Editor of *Tecnopolian Magazine, Audio* section.

December 2002

Abstract:

In this third versión of acoustic diffusers the work was focused on the measurement and analysis of the SFD in different rooms, including the Teatro Colón in Buenos Aires, Argentina. From this experiences were extracted the variables to which the SFD is sensitive and the results for a new acoustical analysis starting point.

Teoría:

Toda investigación nace de ciertos cuestionamientos y en este caso algunos fueron:

- ¿Puede un solo número, el "coeficiente de difusión" obtenido del desparramo espacial de la energía, caracterizar completamente el funcionamiento de una superficie, siendo éste tan complejo?.
- ¿Cuánta superficie difusora es necesaria para conformar un campo difuso?.
- ¿Cuántos tipos de campos difusos se pueden conformar?.
- ¿Es medible la difusión de un campo difuso como para poder repetir valores obtenidos en proyectos ya realizados?.
- ¿Qué superficie difusora es necesaria en un control y en una sala de un estudio de grabación?.
- ¿Es perfectible un campo difuso?.
- ¿Es estudiable un campo difuso?, ¿Cómo?.
- ¿Qué diferencia hay entre conformar un campo difuso con superficies aleatorias respecto de superficies devenidas de teorías numéricas y softwares de optimización?

Definiciones:

Difusión:

Propiedad de las superficies por la que desparraman la energía acústica en el espacio en forma no especular y en el tiempo.

Campo Difuso:

Espacio físico donde existe similar *decorrelación binaural* de la energía acústica.

En las anteriores definiciones se hacen tres afirmaciones ya demostradas en trabajos anteriores (Difusores Acústicos II):

1. Los difusores desparraman la energía acústica *en el tiempo*.
2. El método de medición de los campos difusos es intrínsecamente *binaural*.
3. Los campos difusos poseen un *valor medio de difusividad* y un *desvío estándar* que mide su homogeneidad.

SFD:

Es un *índice de Espacialidad Subjetiva (Subjective sound Field Diffusivity)* que indica el *grado de decorrelación de reflexiones entre el oído izquierdo y derecho* (binaural).

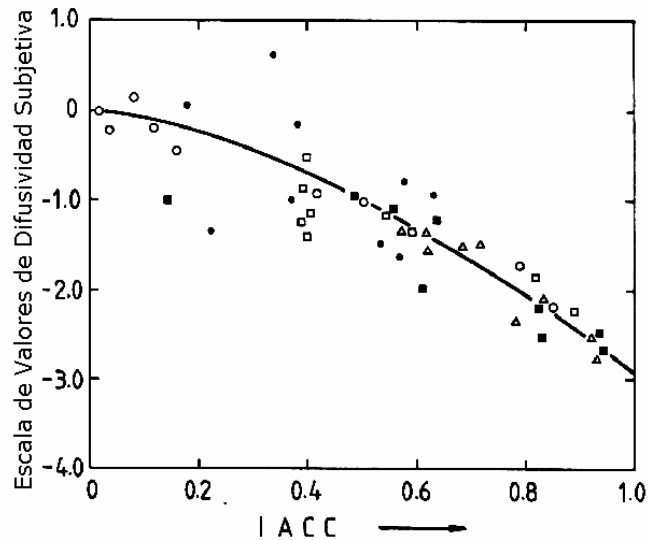
Post procesado de las mediciones binaurales:

Sabiendo que existe una correlación entre el IACC y la *sensación subjetiva* de difusión, a partir de los valores del primero se llegó a los valores del segundo por medio de una *ecuación* fruto de una regresión matemática entre resultados obtenidos en anteriores estudios.

IACC:

$$IACC = \max |\phi_{lr}(\tau)| \text{ para } |\tau| \leq 1ms$$

$$\phi_{lr}(\tau) = \frac{\Phi_{lr}(\tau)}{\sqrt{\Phi_{ll}(0) \cdot \Phi_{rr}(0)}}$$



La Ecuación que mejor ajusta las muestras obtenidas es:

$$SFD = -2,9 \cdot (IACC)^{\frac{3}{2}}$$

Trabajo de investigación

Descripción de las salas evaluadas:

Teatro del Colegio Euskal Echea:

Es una sala construida en 1940 fue proyectada para conciertos de orquestas Filarmónicas, con capacidad para 1000 personas entre la PB y el Pullman. El techo presenta concavidades que focalizan la energía sonora hacia ciertas franjas de 2m de ancho aproximadamente sobre la audiencia, paralelas a la línea frontal del escenario.

Sala AB del Centro Cultural San Martín:

Sala construida durante la década de 1960, con capacidad para 1000 personas sentadas, todas en Planta baja.

Sala principal del Teatro Colón:

Es la casa de Ópera más importante de Argentina. El Teatro Colón fue construido en 1908, con capacidad para 2487 personas sentadas.

Salón Dorado del teatro Colón:

Dentro del teatro Colón, en el primer piso sobre la entrada de la calle Libertad, se encuentra este salón el cual se utiliza para conciertos vocales y musicales (usualmente no más de 5 o 6 instrumentos) con capacidad para 100 personas aproximadamente.

Equipamiento de Medición:

- Un par (2) de micrófonos Crown PZM en configuración binaural espaciados 17cm entre sí (llamado "Binaural Wood Head").
- El post procesamiento fue realizado mediante 2 canales de FFT utilizando una ventana tipo Hanning, analizadores de espectro y de oscilogramas, softwares de correlación y procesadores de integral reversa de Schroeder.
- 1 Micrófono omnidireccional Eartworks M30.
- 2 Micrófonos Shure SM81.
- 1 Micrófono AKG414 ULS.
- 1 Micrófono Audio Technica AT4033.
- Un reproductor de CD.
- Un grabador de ADAT de 8 canales.
- 7 Preamplificadores de micrófono de una consola Soundcraft de 16 canales de entrada.
- Un amplificador de Audio de 2 canales marca CREST FA901.
- Un altavoz marca JBL modelo 4425, a menos que se especifique lo contrario.

Disposición microfónica:

Se planteó una nueva disposición microfónica para la medición de los parámetros acústicos de una sala. La misma cuenta con 7 micrófonos de diferentes características polares, 6 de los cuales se encuentran en la posición de medición.

Sobre la fuente sonora:

Cardioide:

El mismo capta lo emitido por esta, de manera de conocer cómo está siendo excitada la sala. La distancia de este micrófono hasta la fuente será $> \frac{L^2}{\lambda}$, para cumplir con la condición de *Fraunhofer* de campo lejano para fuentes puntuales. Debido a que el SFD es un parámetro subjetivo de difusividad de los recintos, es recomendable (para lograr una buena mensura) que la fuente posea la direccionalidad que tendría una fuente sonora real de uso común dentro de la sala; en su defecto, la aplicación de las leyes del buen arte sugieren el uso de fuentes omnidireccionales, con lo que el resultado será más universal pero menos real.

En cada posición del oyente a ser evaluada:

Omnidireccional:

El mismo capta la totalidad de la respuesta al impulso $h_T(t)$.

Cardioide frontal:

El mismo capta la información directa, proveniente del frente a partir de la posición de medición.

Cardioide trasero:

El mismo capta solamente lo emitido por aquella porción de sala existente detrás de la posición de medición.

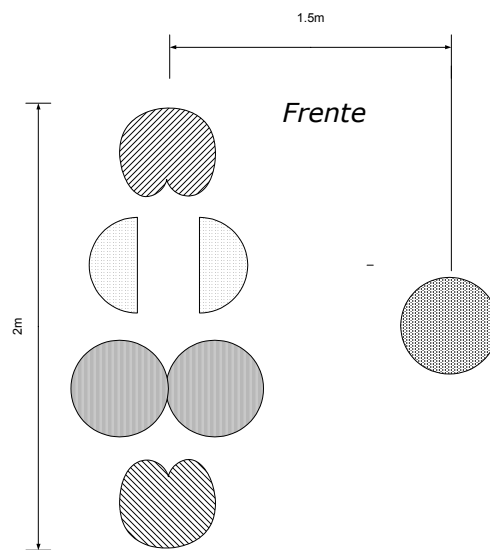
Figura de ocho:

El mismo capta sólo la energía lateral. La misma puede ser comparada con la energía total (micrófono omnidireccional) y/o con la energía frontal (micrófono cardioide).

"Binaural Wood Head" (2 micrófonos hemiesféricos separados 17cm uno de otro):

Este set de 2 micrófonos realiza una captación binaural en la posición de medición. Separadamente se sugiere evaluar sus captaciones tomando como entrada lo captado por el micrófono de fuente, en la medida que así lo requieran los resultados que arroje la evaluación del SFD (*RT60 binaural*).

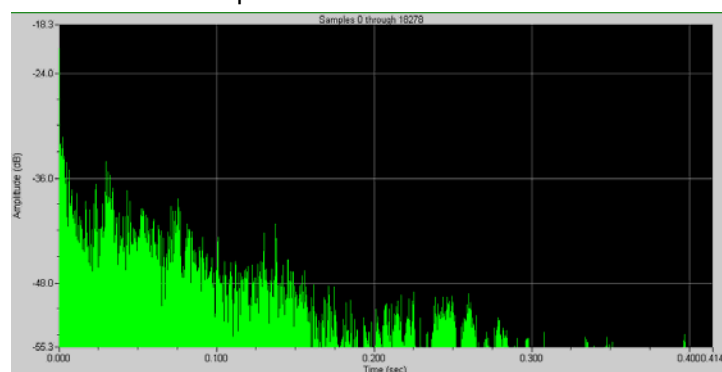
La disposición de los micrófonos que minimiza la interferencia entre ellos es:



RT60 Binaural:

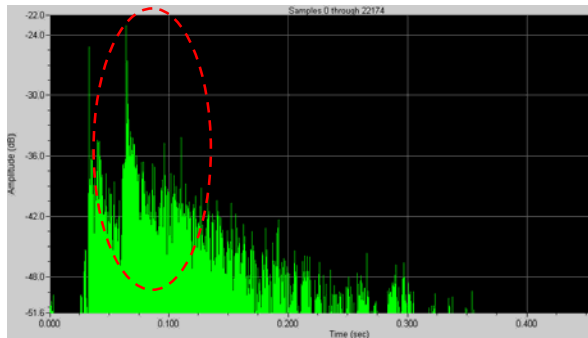
Se encontró que el análisis tradicional de la respuesta al impulso de un recinto en una posición cualquiera de medición enmascara resultados que se evidencian en las respuestas al impulso binaurales, tomando como excitación del sistema lo captado en cercanía a la fuente sonora y como salida del sistema lo propio de los micrófonos de la "Binaural Wood Head". Como de toda respuesta al impulso, también se pueden obtener los valores de RT60 (en este caso valores L y R), EDT, Claridad 50 y 80. Los valores resultantes del mapeo del SFD motivan el precedente análisis encontrándose así los comportamientos particulares de cada posición de evaluación.

Captación omnidireccional

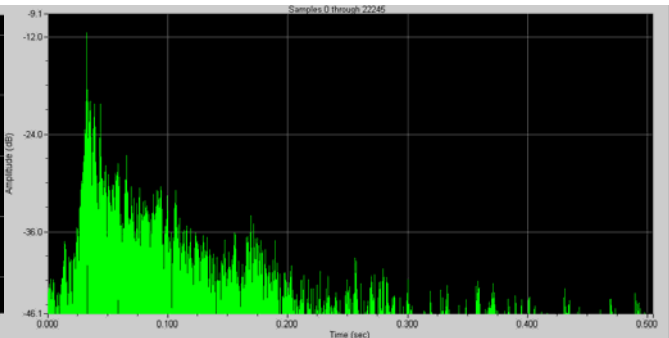


RT60 = 1.02 segundos

Oído Izquierdo



Oído Derecho



RT20 = 0.64

C50 = 3.38dB

C80 = 6.83dB

RT20 = 0.58

C50 = 6.99dB

C80 = 11.53dB

En las figuras anteriores se puede observar el resultado de la captación monofónica de la posición 2 del CCGSM que enmascara los fenómenos observados en las respuestas al impulso *binaurales*, como ser reflexiones, ancho de banda de las mismas, decays lateralizados y diferencias de claridad entre L y R.

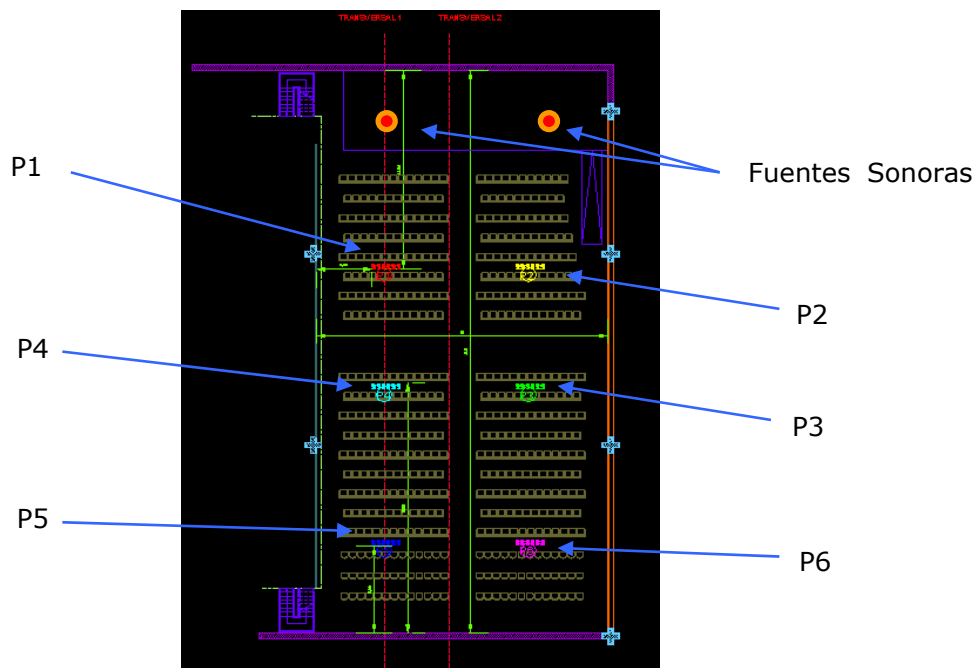
Algunos resultados:

Centro Cultural General San Martín:

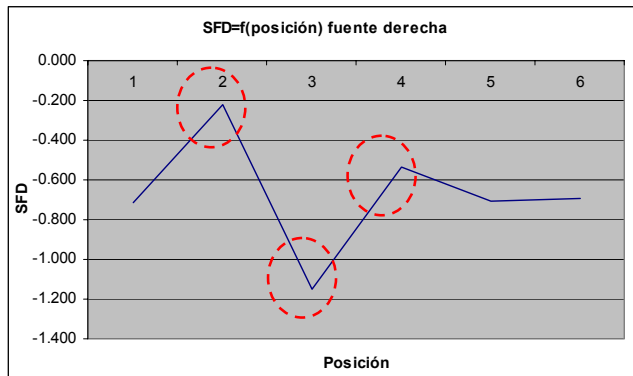
La señal de excitación utilizada fue pseudo-ruido MLS sin ningún tipo de ecualización. Las fuentes sonoras fueron 2 cajas acústicas marca Meyer, modelo , las que tienen incorporado un sistema de protección contra sobre excitación de señal. Se tuvo la precaución de no trabajar con es dicho sistema accionado.

Se utilizaron estas cajas en sus respectivas posiciones (L y R) debido a que son las fuentes sonoras de uso habitual en dicho recinto. Esto generó 2 (dos) mediciones en cada posición, una con cada caja.

Se detalla a continuación el plano con las posiciones de las mediciones realizadas:

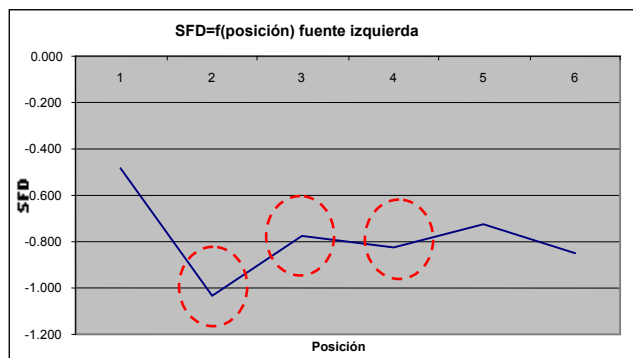


Confeccionando los gráficos del $SFD=f(\text{posición, Fuente})$ es posible analizar la simetría axial del recinto. Los resultados fueron:



Promedio = 0,669

Desvío = 0,3



Promedio = 0,782

Desvío = 0,18

Se encontraron grandes diferencias de SFD en las posiciones 2, 3 y 4 entre la excitación de la caja izquierda y la derecha (*asimetría axial de difusión*). Esto motivó el posterior análisis de los *parámetros binaurales* anteriormente mencionados encontrando los motivos de tales discrepancias.

Además a partir de los gráficos anteriores es posible analizar el campo difuso hallando el promedio y el desvío de los valores encontrados.

Teatro Colón, Sala principal:

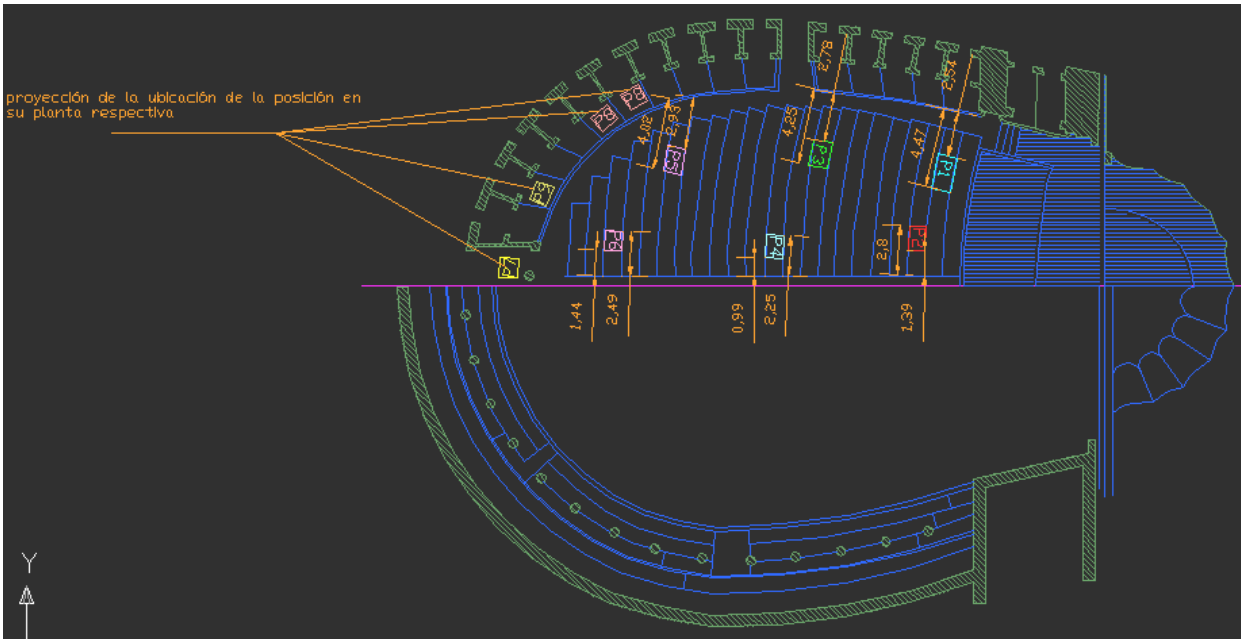
La señal de excitación utilizada fue pseudo-ruido MLS con ecualización de tipo Rosa (pendiente = -3dB/Oct) con el objeto de cuidar la integridad funcional de la fuente sonora, ya que la misma no posee protección alguna.

La fuente sonora utilizada fue la caja JBL detallada anteriormente.

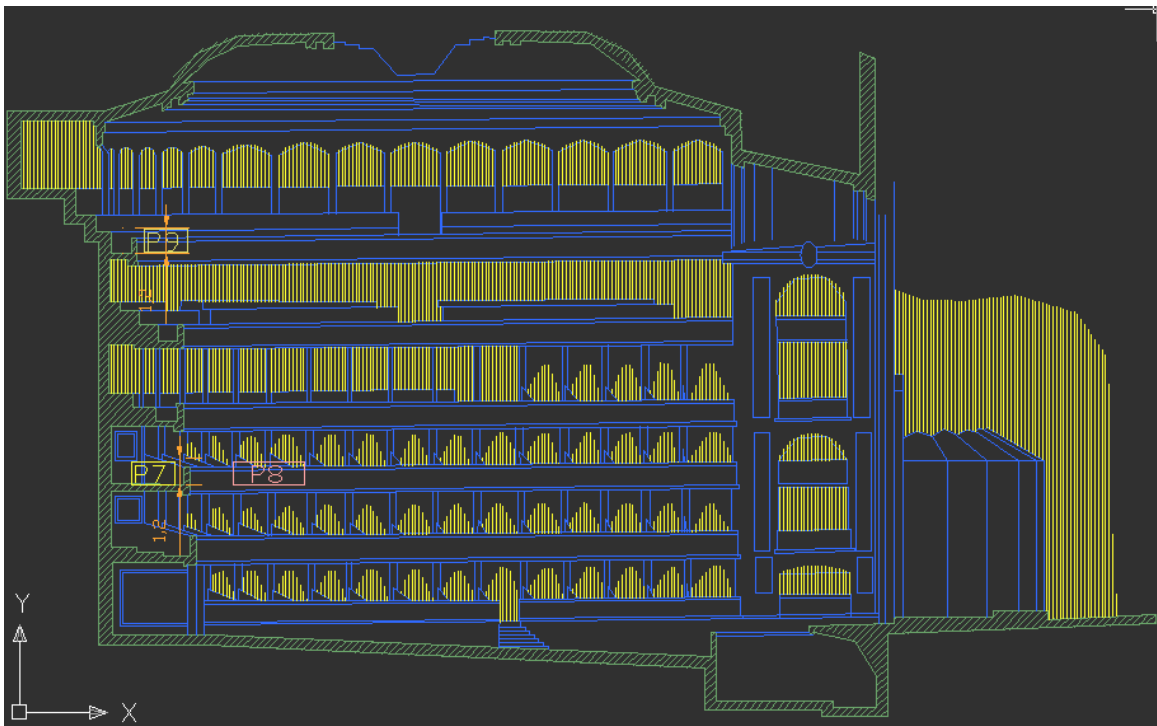
La ubicación de la misma fue en el centro del escenario, presuponiendo que en el uso cotidiano las fuentes se ubican en dicha posición.

Se detalla a continuación el plano con las posiciones de las mediciones realizadas:

Vista de Planta con las posiciones de medición 1, 2, 3, 4, 5 y 6:

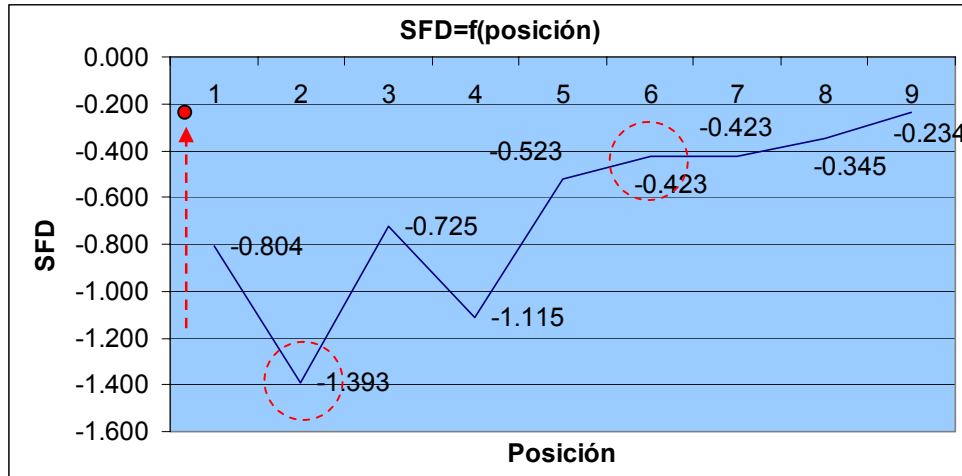


Sección vertical donde se muestran las posiciones de medición en los palcos (P7 y P8) y en la Cazuela (P9):



En este caso la confección del gráfico $SFD=f(\text{posición})$ nos permite realizar un análisis de zonas de percepción sonora de la sala. Se puede comparar el valor del

SFD obtenido en la única posición medida dentro del Salón Dorado del mismo edificio. Los resultados fueron:

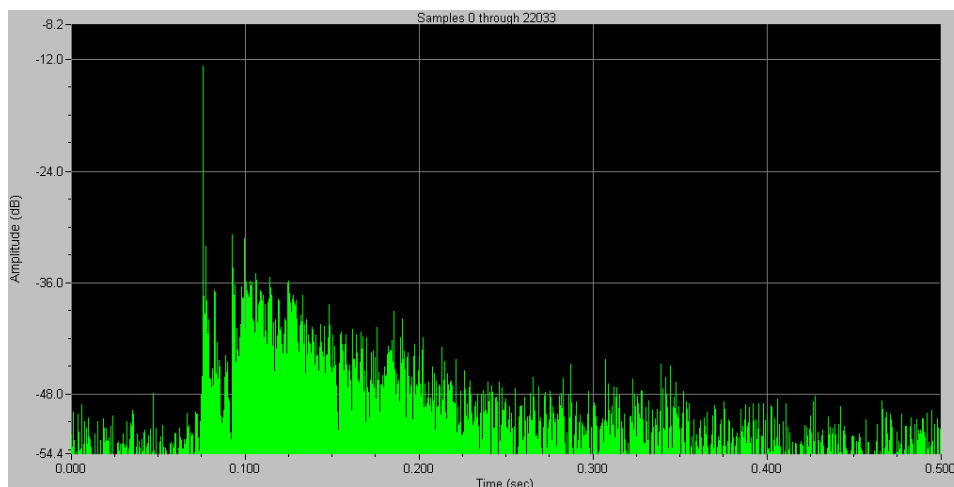


El punto rojo apuntado por una flecha del mismo color indica el valor de SFD del Salón Dorado del Teatro Colón, el cual tiene un RT60 monoaural de 1,1 segundos a frecuencias medias. Se evidencia un valor de difusividad similar al que se encuentra en la Cazuela (P9) de la Sala principal, razón por la cual es posible justificar las excelentes cualidades sonoras subjetivas con las que el público oyente siempre pondera del lugar.

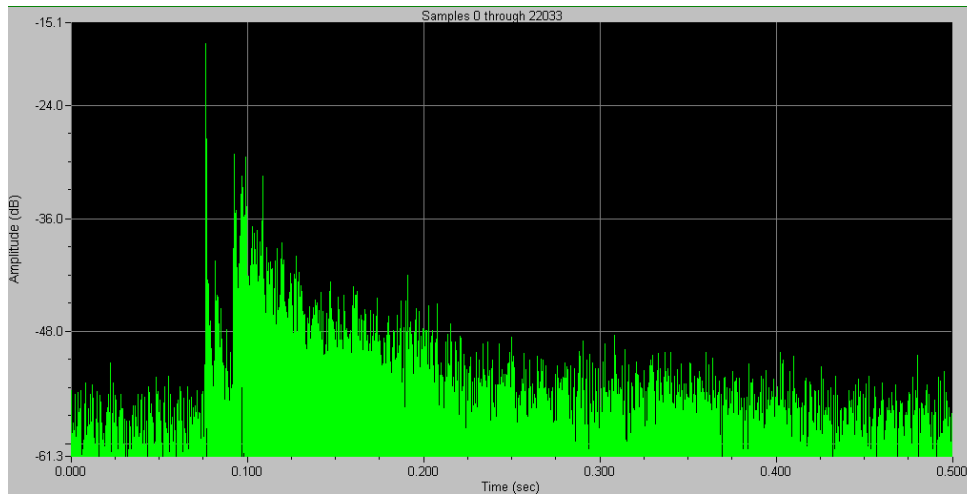
En las siguientes figuras se observan las respuestas al impulso de las posiciones 6, 9 y Salón Dorado, primeramente la obtenida mediante el micrófono omnidireccional Earthworks (respuesta monofónica) y luego aquellas *binaurales*. Estas últimas sólo son útiles al iniciar el análisis acústico mediante el SFD y son las que más datos nos brindan sobre calidad acústica de recintos.

Posición 6:

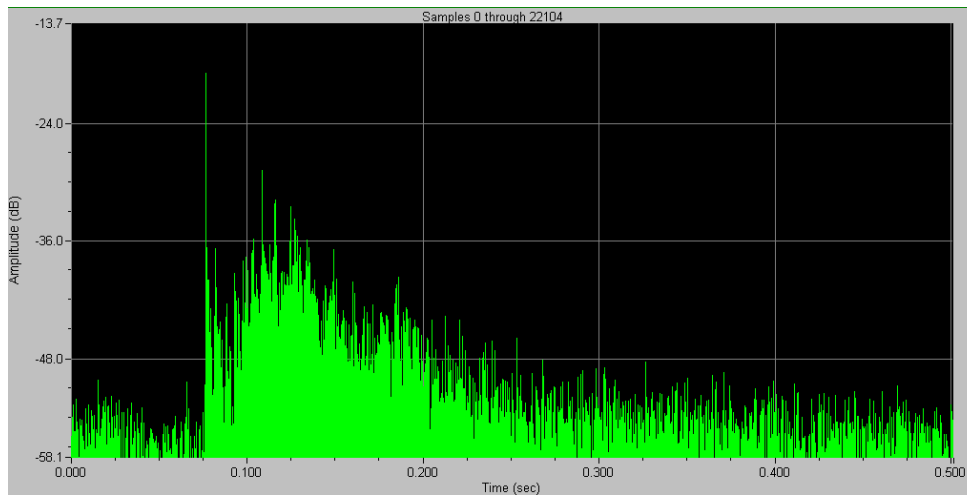
Respuesta al impulso monoaural:



Respuesta al impulso Izquierda:

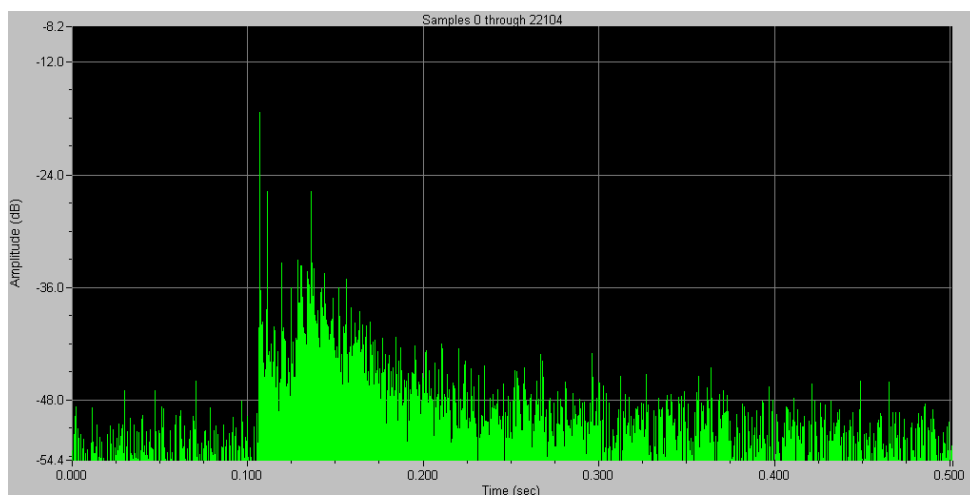


Respuesta al impulso Derecha:

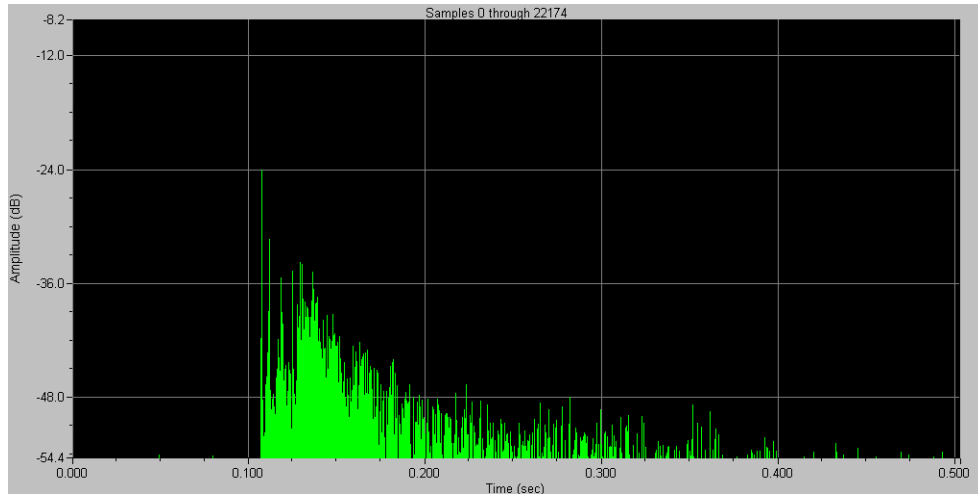


Posición 9:

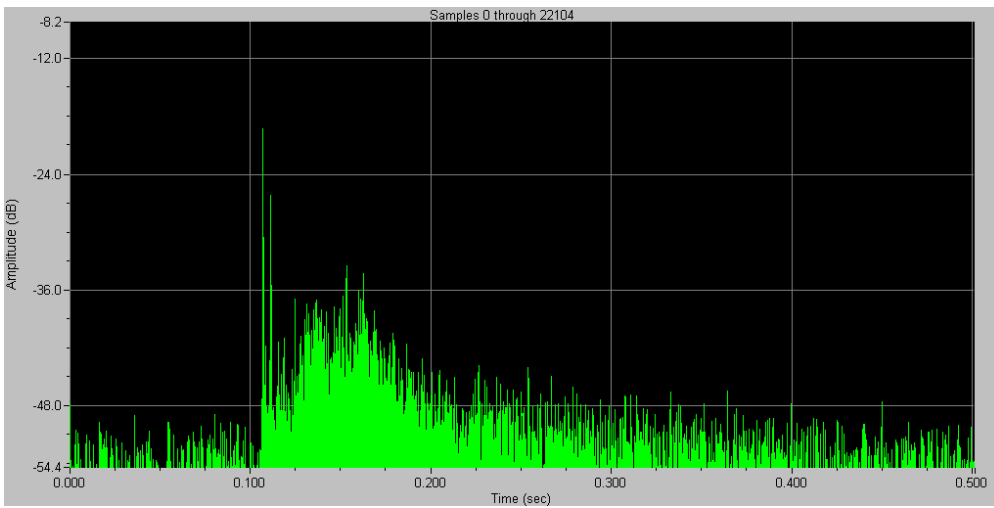
Respuesta al impulso monoaural:



Respuesta al impulso Izquierda:

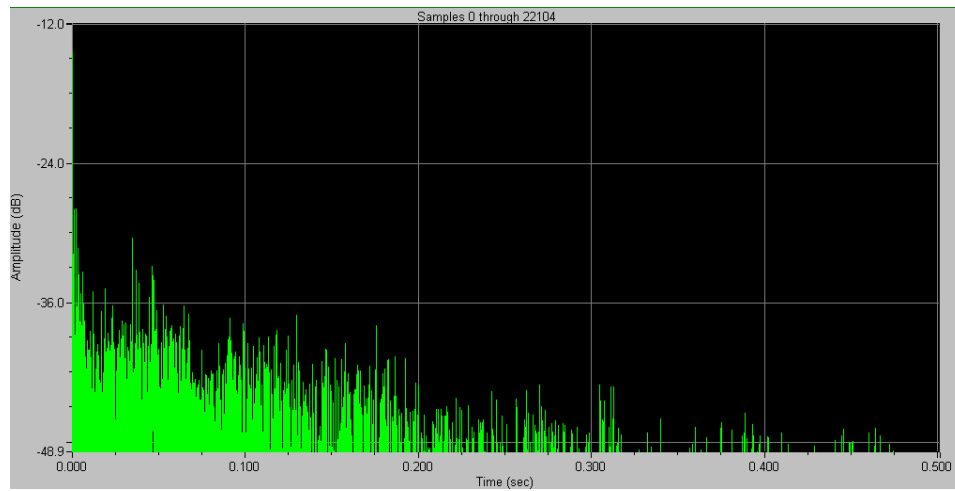


Respuesta al impulso Derecha:

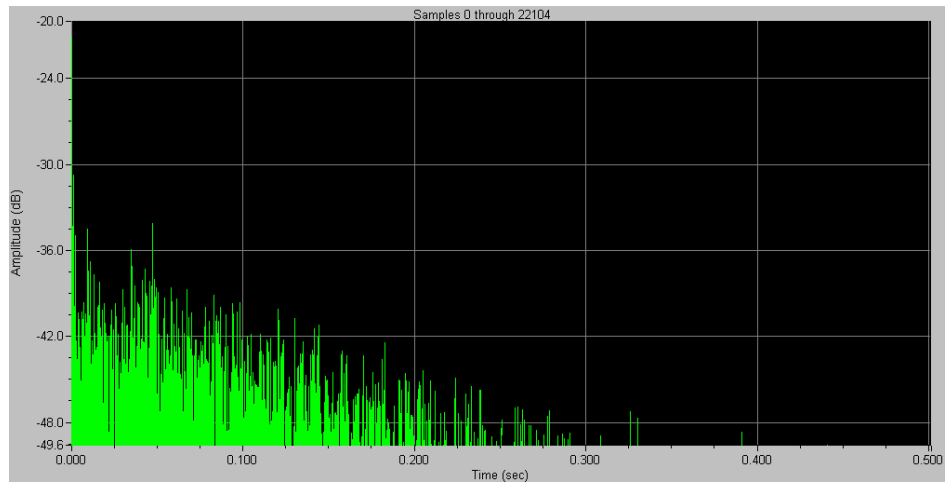


Salón Dorado:

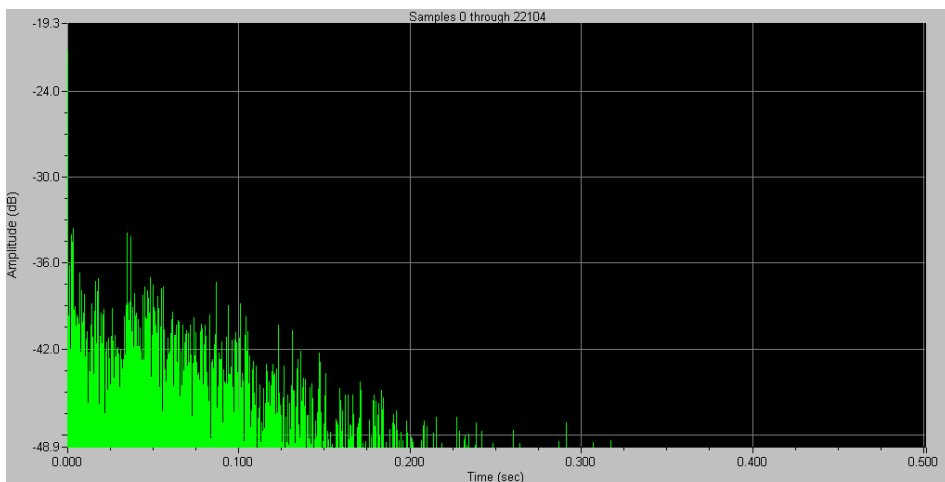
Respuesta al impulso monoaural:



Respuesta al impulso Izquierda:



Respuesta al impulso Derecha:

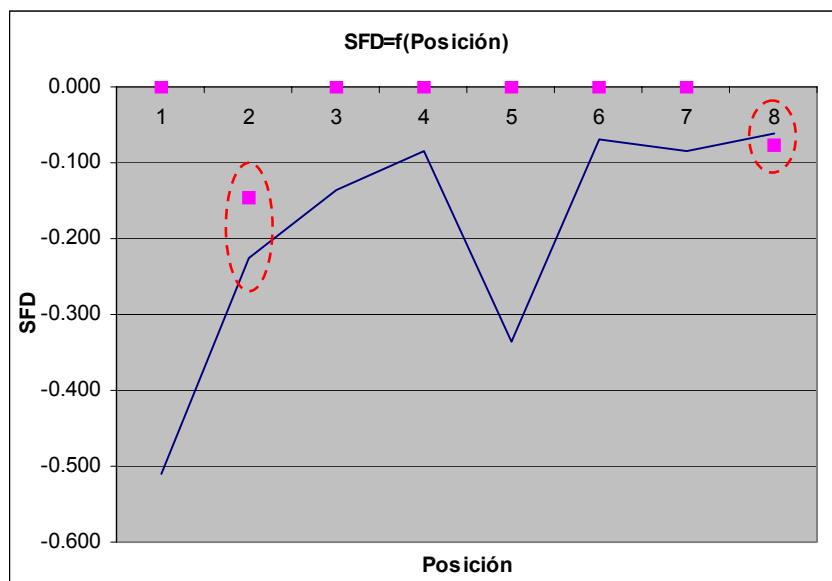
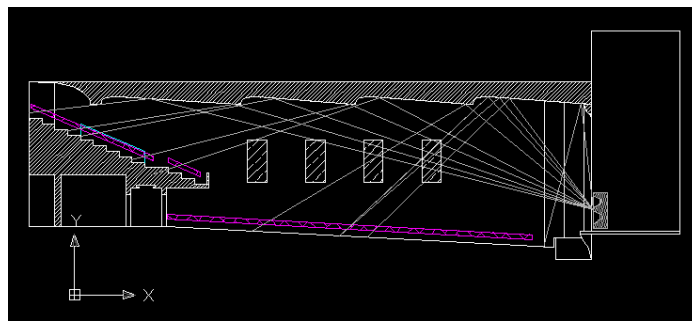
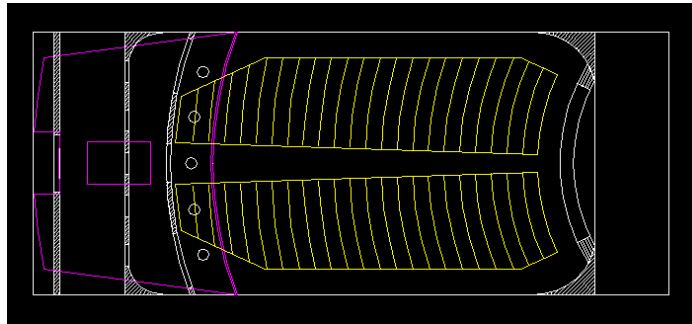


Del gráfico del SFD=f(Posición) y de las respuestas al impulso binaurales podemos explicar la tendencia de emisión vocal en diagonal al público (y no frontal) por parte de las voces pequeñas. La causa radica en la reducida difusividad presente en el centro de la sala (posiciones 2 y 4) lo que se evidencia como menor nivel sonoro (pudiendo ser fácilmente enmascarada la fuente) y baja sensación estéreo en dichos lugares respecto de otras zonas con mayor SFD. La solución a esta característica de todas las grandes salas es orientar las fuentes sonoras de menor nivel sonoro hacia el lateral más cercano, generando así las reflexiones que en caso de emitir directamente hacia el frente no tendría, las que le proporcionarán mayor nivel sonoro y sensación de espacialidad y envolvimiento.

Teatro Colegio Euskal Echea:

En esta Sala se utilizó ruido rosa como señal excitadora.

La fuente se ubicó en la mayoría de los experimentos en el centro del escenario, dejando registros sólo para las posiciones 2 y 8 de excitación sobre un lateral. Aquí se puede apreciar la mayor sensibilidad del SFD a la ubicación de la fuente para el punto 2 respecto del punto de medición 8.



Las posiciones de medición con valores color fucsia *en cero* no fueron medidos.

Sensibilidad y minimización de los posibles errores sistemáticos:

La información binaural para el post procesamiento pueden ser:

- 1) Directamente las respuestas al impulso $h(t)_L$ y $h(t)_R$ obtenidas con los métodos *Deconvolución de MLS* y *Log Sine Sweep*.
- 2) La captación binaural de una señal de extremadamente baja autocorrelación para $t \neq 0$. Esta condición la cumple nuevamente una señal *MLS White*.

El SFD presenta gran sensibilidad a (en orden descendente de importancia):

- La Autocorrelación de la señal de excitación. Razón por la cual se debe utilizar *MLS White* o utilizar un método apropiado de restitución de la señal plana a partir del *MLS rosa*.
- La estabilidad del Clock del formato de registro en sistemas de deconvolución de señal *MLS*.
- La S/N alcanzable en el recinto por el Nivel de Presión Sonora de la fuente.
- Los niveles relativos entre L y R, lo que implica una calibración apareada inicial de las ganancias de los preamplificadores de los micrófonos binaurales.
- La alteración *por medios electrónicos* de los tiempos de arribo L y R en el método de medición.
- La alteración *física* de tiempos de arribo L y R por lo que es fundamental la correcta elección de la posición de la cabeza que contiene los micrófonos binaurales.
- El procesamiento estadístico de la FFT (DFT) al hallar la respuesta al impulso de un sistema.
- El ruido propio resultante del Sistema de Medición (ej.: 2 ch FFT).
- Al intervalo temporal de análisis (en este trabajo se estableció en 60 segundos).
- Los ruidos de procedencia lateral.
- La invariancia en el tiempo del sistema (gente, corrientes de aire, etc.).

Conclusiones:

- Se observó que el SFD es un parámetro ortogonal al RT60.
- Se observó una gran sensibilidad del SFD ciertos parámetros los que deberán ser controlados en toda medición para minimizar los errores sistemáticos.
- Se desarrolló un método de medición para completar el posterior procesamiento y la adquisición de datos acústicos complementarios.
- Se comparó el análisis de recintos en base a la respuesta al impulso tradicional con el estudio del mapeo del $SFD=f(\text{posiciones})$ y el posterior análisis del *RT60 binaural*, dando por resultado un mucho mayor conocimiento del funcionamiento acústico de los recintos por medio del último.
- También se observó la gran practicidad de conocer el SFD en las etapas de análisis y proyecto acústico.
- El SFD es el grado de densidad de reflexiones existentes dentro de una respuesta al impulso.
- El SFD mide, en cierta forma, la calidad de la reverberación presente en los puntos de medición dentro de un recinto.

Trabajo a futuro:

En un recinto dado, cuantificar el diferencial de SFD en función de la variación de:

- Superficie cubierta con difusores.
- Tipo de difusor.
- Ubicación temporal de los difusores (en el campo temprano o en el campo tardío).
- Ubicación superficial de los difusores (paredes trasera, laterales o techo).

Ing. Alejandro Bidondo

abidondo@ingenieriadesonido.com

www.ingenieriadesonido.com

Agradecimientos:

Dr. Angelo Farina.

Bibliografía:

Yoichi Ando, "Architectural Acoustics".

Leonid I. Makrinenko, "Acoustics of Auditoriums in Public Buildings".

Malcolm Crocker, "Handbook of Acoustics".

Leo beranek, "Concert and Opera halls, how they sound".

Alejandro Bidondo, "Difusores Acústicos I" y "Difusores Acústicos II", memorias del Congreso mexicano de Acústica años 2000 y 2001 respectivamente.