

Difusores acústicos II

Ing. Alejandro Bidondo (Profesor de la *Universidad de Buenos Aires* y de la *Universidad de Belgrano*, Director de *A. B. Ingeniería de Sonido*, Argentina, Editor de *Tecnopolian Magazine* sección *Audio*).

Colaborador: Sr. Carlos Indio Gauvron.

abidondo@ingenieriadesonido.com

www.ingenieriadesonido.com

Resumen:

En este trabajo sobre Difusores Acústicos se presentan dos líneas de investigación: Una visión microscópica sobre su *funcionamiento temporal* presentando una nueva visión sobre el fenómeno, del cual su propiedad más importante es la *memoria*.

Y una visión pragmática, muy útil para el proceso de control de proyectos, donde se establece un coeficiente de difusión, *Sound Field Diffusivity (SFD)* para poder evaluar cuantitativamente campos difusos reales.

Se incorporan sugerencias para futuras investigaciones en ambas líneas: sobre la primera continuar la búsqueda de un coeficiente de difusión más completo, que incorpore el desparramo temporal de la energía, y sobre la segunda darle resolución en frecuencias al *SFD* para poder efectuar diseños más precisos.

Acoustic diffusers II

Ing. Alejandro Bidondo (General Director of *A. B. Ingeniería de Sonido*, Professor at the *Universidad de Buenos Aires* and *Universidad de Belgrano*, Argentina, Editor of *Tecnopolian Magazine*, *Audio* section).

Assistant: Mr. Carlos Indio Gauvron.

abidondo@ingenieriadesonido.com

www.ingenieriadesonido.com

Abstract:

Two lines of research are presented in this work about acoustic diffusers:

A *microscopic* one which looks into of it's temporal operation presenting a new phenomenon's vision, showing it's *memory* property.

The other, a *pragmatic* one, very useful in the project advance control process, where is established a diffusion coefficient named *Sound Field Diffusivity (SFD)* for the quantitative evaluation of real diffuse fields.

Further research suggestions are presented in both lines, one looking for a more complete surface diffusion coefficient that incorporates the *time energy spreading*, and on the other a frequency resolution of the *SFD* for precise design.

Introducción:

Hoy es innegable que la difusión es una herramienta acústica indispensable en todo diseño obteniéndose por medio de las superficies difusoras tipo QRD, PR, etc., o simplemente mediante la implementación de gradientes de impedancia acústica superficial.

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?

Etc.

En el presente trabajo de investigación se trató de orientar las respuestas a las anteriores preguntas analizando las causas y los efectos de los difusores. En una primera instancia analizando el funcionamiento de la superficie difusora, y en una segunda estudiando el campo difuso.

Según lo descrito en "Análisis Teórico y Experimental de Difusores Acústicos Numéricos" (Memorias del Congreso Mexicano de Acústica, año 1999) se obtiene difusión en el campo lejano de una superficie de reacción local cuando en la misma existen gradientes de impedancia acústica.

O sea que tanto las irregularidades como diferentes coeficientes de absorción conviviendo en partes de una superficie funcionan como difusores. Ahora, ¿qué los diferencia?

Sabiendo que la transformada de Fourier de la forma de una superficie revela la distribución de energía en el campo lejano, podemos presuponer que un difusor numérico posee una optimización en la distribución energética espacial respecto de uno que no lo es (sólo conformado por aleatoriedades o por diferencias de impedancias acústicas adyacentes, o gradientes de impedancia superficial).

Al respecto de los difusores numéricos podemos enumerar un breve resumen de los problemas que presentan:

- Diagramas polares de difusión no uniformes en el tiempo.
- Difusión en sólo una dimensión.
- Ancho de Banda discretizado.
- Lobulación de su desparramo espacial al concatenar secuencias.
- Absorción en bajas frecuencias
- La realización práctica con materiales livianos incrementa la frecuencia mínima real.
- La complejidad de la realización práctica los encarece.

- El método tradicional de medición es complejo.

Algunos de estos problemas se ven resueltos mediante:

- Modulación de la secuencia: Mejoramiento del Ancho de Banda (y de la lobulación).
- Difusión en dos dimensiones aplicando el teorema del resto chino.
- Optimización de la radiación de los difusores.

La principal conclusión de este trabajo, luego de un último *experimento de audición* (donde se logró aislar el *sonido directo monofónico* de sus correspondientes *reflexiones difusas*) es que uno de las principales propiedades de las superficies difusoras, conjuntamente con el *desparramo espacial*, es el *desparramo temporal de la energía*.

Otras conclusiones indican que las superficies difusoras:

- Desparraman la energía acústica en el *tiempo*.
- Desparraman la energía acústica *espacialmente*.
- El correspondiente patrón polar de radiación *cambia* en función del tiempo dada una excitación transitoria.
- Idealmente mantienen la energía acústica dentro del recinto: Acústica Ecológica.

Un campo difuso tenderá a ser ideal espectralmente si la cantidad de "comb filters" tiende a infinito, y la profundidad de los "nulls" tiende a cero.

Por lo tanto la respuesta al impulso entre dos puntos interiores a dicho campo presentará un bajo valor de Correlación Cruzada.

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 a ser demostradas en el siguiente trabajo:

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 demuestra (o no) su homogeneidad.

Difusores Acústicos II: la Superficie Difusora.

El objetivo de este capítulo es la comprobación del *desparramo temporal* y de la *decorrelación de las reflexiones* emanadas de la superficie difusora.

Dispositivos bajo prueba:

En esta primera parte de los ensayos se midieron dos difusores del mismo tipo pero de diferentes frecuencias mínimas teóricas, un panel plano de igual superficie (proyectada) y un difusor cilíndrico.

Muestras evaluadas:

- Un difusor en 2 dimensiones tipo QRD de 10cm de profundidad máxima de 0,5m x 0,5m.
- Un difusor en 2 dimensiones tipo QRD de 20cm de profundidad máxima de 0,5m x 0,5m.
- Un panel plano de 0,5m x 0,5m.
- Un difusor cilíndrico de 0,6m de ancho por 1,2m de alto.

Equipo de Medición:

Con objeto de obtener respuestas al impulso (para su posterior análisis) de cada dispositivo el set de medición constituía de:

- Una cámara anecoica de un volumen aproximado de 200m³.
- La fuente sonora utilizada fue *ruido rosa* (al utilizar *ruido* la única correlación entre señales posible es la dada por el sistema).
- El post procesamiento fue realizado mediante 2 canales de FFT utilizando una ventana tipo Hanning, analizadores de espectro y de oscilogramas, Plug ins de correlación y procesadores de integral reversa de Schroeder.
- Un reproductor de CD.
- 2 Micrófonos Eartworks M30.
- 2 Micrófonos Shure SM81.
- Un medidor de Nivel de presión sonora TES 1350 con calibrador correspondiente.
- Un grabador de DAT de 2 canales.
- Un amplificador de Audio de 2 canales.
- Un altavoz marca Auratone modelo "The Cube".
- Transportador y cinta métrica.

Resultados de las mediciones:

Los primeros resultados (figuras 1, 2, 3 y 4) muestran tanto la señal directa como el desparramo en tiempo de la energía reflejada. Las figuras fueron obtenidas excitando cada DUT a 35° de entrada y captando su salida también a 35°. Se tomó esta combinación de ángulos de entrada y de salida porque bajo estas condiciones no se cumple la ley de Snell.

Podemos observar en la figura 2 aproximadamente cuatro reflexiones discretas de energía las cuales se deben a la "difusión de borde" ("edge scattering"). Veremos en el siguiente punto que estas reflexiones *no tienen un contenido energético considerable*.

Tras procesar estas respuestas al impulso por la *Integral reversa de Schroeder*¹ de los primeros 40ms de las mismas podemos cuantificar la energía involucrada en las IR (impulse response) de cada DUT en los primeros milisegundos de las mismas.

Esto se observa en las figuras 5, 6, 7 y 8.

En las figuras 9 y 10 se observan claramente las diferentes pendientes de la *integración reversa* para el panel plano y para el difusor. En el caso del difusor aparecen reflexiones (*más de una*) con importantes valores de energía en la salida las cuales generan una zona de mayor pendiente (no un instante) de duración **4,22ms** presentando un **ΔdB= 8,43dB**.

Según estas condiciones de entrada y salida de la información (respecto del DUT) vemos que el panel plano no refleja energía apreciable mientras que los difusores sí.

Estas visualizaciones justifican relacionar este comportamiento de las superficies difusoras con la característica de los sistemas denominada "memoria".

Memoria:

Propiedad por la cual el valor actual en la salida depende del valor actual de la entrada y de valores pasados.

En un paso posterior del procesamiento se evaluó la entrada y la salida mediante la *envolvente*² de la función *correlación cruzada* (equivalente a la *convolución entre entrada y salida de un sistema*). De esta herramienta matemática se pueden extraer ciertas conclusiones sobre los difusores (ver Figura 11 y 12, un *zoom* de la anterior):

- Existen *multiplicidad de trayectos* desde un punto de entrada hasta un punto de salida. Esto indica *diferentes retrasos de la misma señal*.
- *Cada pico de la función resultante indica similaridad entre ambas señales*. Esto confirma la propiedad de "*memoria*" del difusor.
- La no coincidencia temporal entre picos indica que se está *decorrelando la señal en el tiempo* entre cada par de puntos in – out.
- La correlación cruzada de las anteriores correlaciones tiene muy bajo grado de correlación.

Nota: La envolvente (módulo) se obtuvo mediante la transformada de Hilbert de la correlación cruzada original (o sea la parte real).

Por lo tanto podemos afirmar que *los difusores desparraman la energía acústica en el tiempo*. Ver modelos clásico y moderno (propuesto por el autor) en las Figuras 13 y 14.

Difusores Acústicos II: El campo Difuso.

El motivo de este capítulo es poder cuantificar la difusividad³ de un punto en el espacio dentro de un recinto. Con esto se pueden graficar (o especificar) líneas o zonas con idénticos (o similares) valores delimitándose campos difusos reales. Así se estaría independizando efectivamente el campo reverberante del campo difuso.

Sólo cuantificando, tabulando y ponderando subjetivamente una serie de valores medidos en diferentes ámbitos acústicos servirá de guía para todo diseño y como valores de corrección u objetivos de una reforma acústica.

Casos de Aplicación:

- Diseño de una Sala de Ópera y/o de Conciertos:

Mediante la permanente auditoría de los campos sonoros formados en el proceso de construcción o remodelación se pueden detectar prematuramente problemas o deficiencias en la predicción y poder solucionarlos.

- Diseño de Controles de Estudios de grabación tipo LEDE:

Cuantificando la difusividad provista por los difusores traseros en las zonas del Técnico y del Productor (tratando de que sean similares) se puede *acotar y dimensionar la superficie de los difusores traseros*.

- Diseño de superficies difusoras por el método de prueba y error:

Mediante el intercambio del tipo de superficie lograr ciertos valores de difusividad en un punto interior del campo de reflexiones generado.

- Especificación de superficies difusoras:

Comparando los valores de difusividad obtenidos con distintos difusores bajo las mismas condiciones de entorno y de medición.

Dispositivos bajo prueba:

Campo difusos generados en:

- Control de un estudio de grabación.
- Sala de un estudio de grabación.
- Teatro Colón.

Equipo de Medición:

Con objeto de obtener respuestas al impulso (para su posterior análisis) y captaciones *binaurales* de cada dispositivo el set de medición constituía de:

- Un par de micrófonos PZM en configuración binaural (llamado "Wood Head").
- La fuente sonora utilizada fue *ruido rosa* (al utilizar *ruido* la única correlación entre señales posible es la dada por el sistema).
- El post procesamiento fue realizado mediante 2 canales de FFT utilizando una ventana tipo Hanning, analizadores de espectro y de oscilogramas, Plug ins de correlación y procesadores de integral reversa de Schroeder.
- 2 Micrófonos Eartworks M30.
- 2 Micrófonos Shure SM81.
- Un medidor de Nivel de presión sonora TES 1350 con calibrador correspondiente.
- 2 Pares de micrófonos binaurales Senheiser ("in ear").
- Un reproductor de CD.
- Un grabador de ADAT de 8 canales.
- Una consola Soundcraft de 16 canales de entrada.
- Un amplificador de Audio de 2 canales.
- Un altavoz marca JBL modelo 4425.

Resultados de las mediciones:

En busca de un parámetro que refleje la difusión de un punto en el espacio, definimos el *SFD*, *Sound Field Difusivity*.

Definición:

SFD:

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

- Teatro Colón:

Inicialmente se midieron las respuestas al impulso monoaurales en 7 ubicaciones en el interior de la sala. Se realizaron también diferentes captaciones binaurales y una toma estereofónica tipo "omnis espaciados" en la **posición 2**. Ver figuras 15 y 16.

La respuesta al impulso (monoaural) medida en la posición 2 se puede observar en la figura 17.

Se destacan el **I.T.D.G.** y la **S/N dentro de él**. Esta última brinda una aproximación rápida de la *inteligibilidad* existente dentro del recinto.

La transferencia medida en esta posición se observa en la figura 18.

- Estudio de Grabación, Sala y Control tipo Lede:

Se realizaron captaciones binaurales, 2 en la Sala y 3 en el Control; en este último en las zonas del técnico, del productor y muy cerca del difusor trasero.

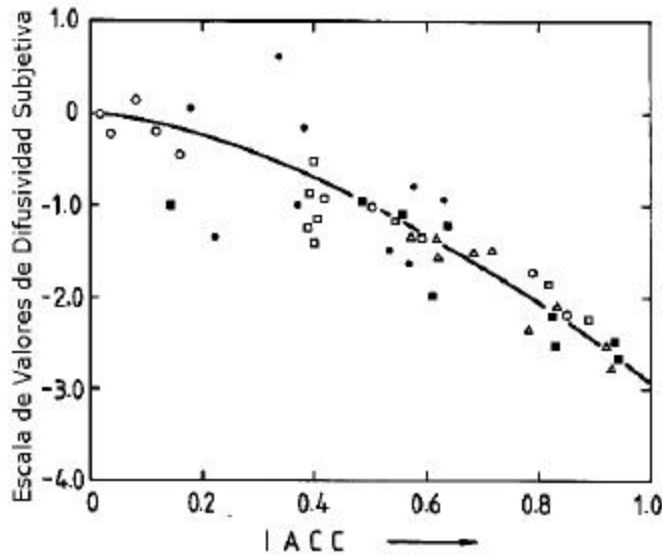
Post procesado de las mediciones binaurales:

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 estudios⁴.

IACC:

$$IACC = \max |f_r(t)| \text{ para } |t| \leq 1ms$$

$$f_r(t) = \frac{\Phi_{lr}(t)}{\sqrt{\Phi_{ll}(0) \cdot \Phi_{rr}(0)}}$$



La Ecuación que mejor ajusta las muestras obtenidas es:

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

Se trabajó con distintos softwares para obtener la correlación cruzada entre las señales correspondientes al oído derecho e izquierdo, su ponderación tipo "A" y su máximo valor normalizado.

Los resultados obtenidos fueron:

Estudio de Grabación		
Posición de la Captación	Binaural Wood	SFD
Control Room: Técnico	IACC= 0.514.	-1.06866
Control Room: Productor	IACC= 0.563.	-1.22506
Control Room: Difusor	IACC= 0.389.	-0.70549
Sala: Toma XY	IACC= 0.574.	-1.26114
Sala: Toma Omnis espaciados.	IACC= 0.201.	-0.26133

Podemos destacar:

- La gran similitud de valores obtenidos de SFD entre las posiciones del Técnico y el Productor, lo cual debería ser un objetivo primordial en todo diseño.
- El alto valor de SFD de las captaciones cercanas a los Difusores (Toma "Difusor" en el Control y "Omnis Espaciados" en la Sala). Esto se debe a que los micrófonos se encuentran en una zona de impedancia acústica de radiación *reactiva* de las fuentes fantasma que se generan dentro de las celdas de los difusores.

Teatro Colón		
Tipo de captación	IACC	SFD
Binaural Wood	0.387	-0.6981
Binaural Hô	0.378	-0.6739
Spaced Omnis	0.500	-1.0253

Podemos destacar:

- La *gran similitud* de los valores resultado de la captación con Binaural Wood y Binaural Hô, lo cual valida el *modelo microfónico binaural* compuesto por 2 micrófonos PZM separados por una madera a modo de "cabeza".
- La reducción del valor de difusividad, SFD, (o sea *mayor correlación entre ambas informaciones*) encontrado en la captación *Spaced Omnis*. El mismo se produce debido a que no existe un *material aislante entre un micrófono y otro, función que cumple la cabeza entre nuestros dos oídos*.

Conclusiones:

- El ETS existe y es cuantificable. Sugerimos tomar en cuenta la duración (Δ de tiempo) y la magnitud del conjunto de reflexiones salientes.
- La superficie difusora decorrela en el tiempo las reflexiones salientes (respecto de sí mismas y de la señal original).
- La difusividad de un campo sonoro es mensurable en forma objetiva y a partir de ello es posible tomar decisiones correctivas.

Trabajo a futuro:

- Análisis de la **memoria** de los difusores mediante la Autocorrelación de su salida.
- Relevar valores relativos y absolutos de S.F.D..
- Realizar pruebas subjetivas de S.F.D. en Controles de estudios de grabación.
- Distribuir el SFD en *frecuencias* para una mayor comprensión de los campos sonoros dentro de los recintos.
- Incorporar al coeficiente de difusión una magnitud del E.T.S..

Notas:

- 1: La Integral reversa de Schroeder resta la energía de cada reflexión del total de energía involucrado en toda la IR en función del tiempo.
- 2: La envolvente de la correlación cruzada se obtuvo mediante la transformada de Hilbert.
- 3: El estudio de la difusividad es basado en procesos *binaurales*.
- 4: Yoichi Ando, "Arquitectural Acoustics".

Otra bibliografía:

- Leonid I. Makrinenko, "Acoustics of Auditoriums in Public Buildings".
Malcolm Crocker, "Handbook of Acoustics".
Leo beranek, "Concert and Opera halls, how they sound".

Ing. Alejandro Bidondo
Buenos Aires, Argentina

Figura 1:

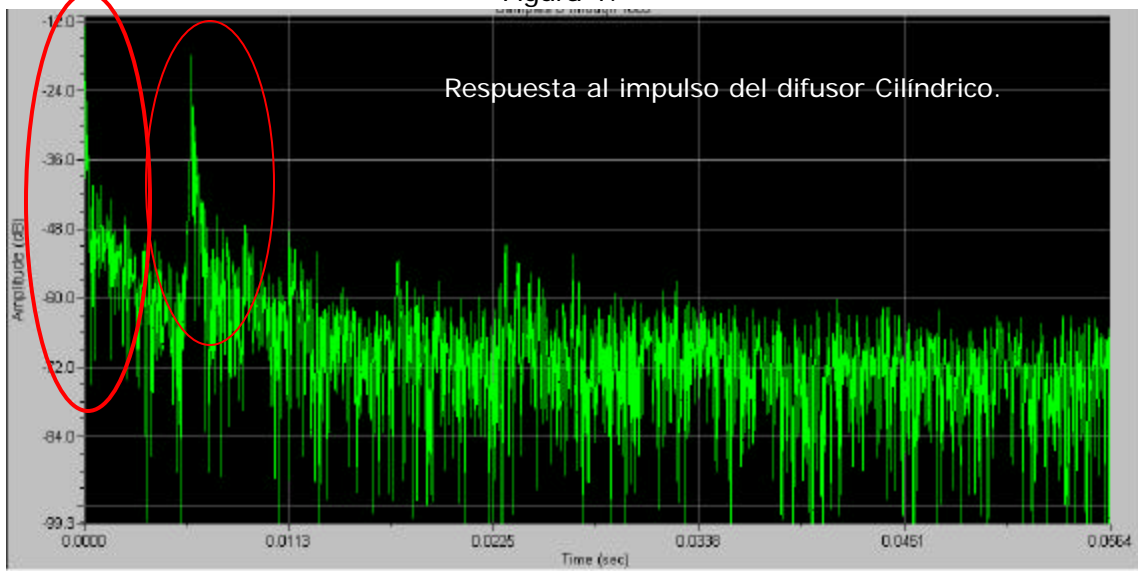


Figura 2:



Figura 3:



Figura 4:

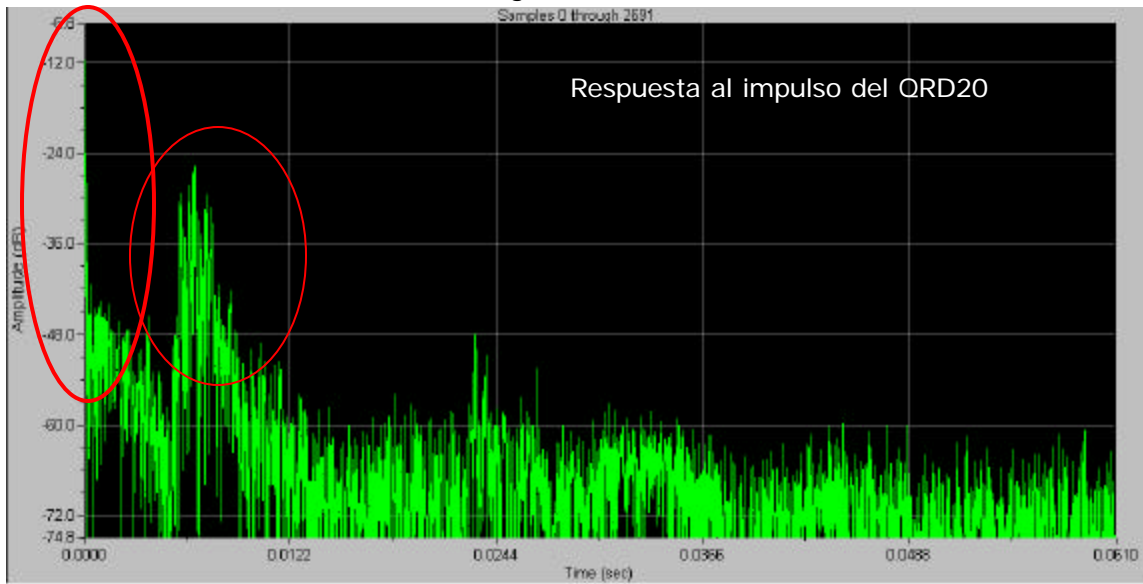


Figura 5:

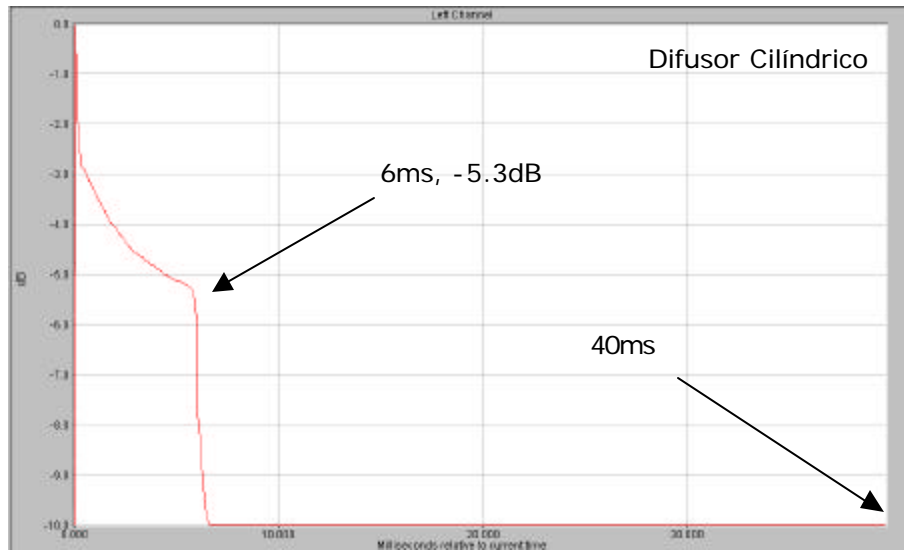


Figura 6:

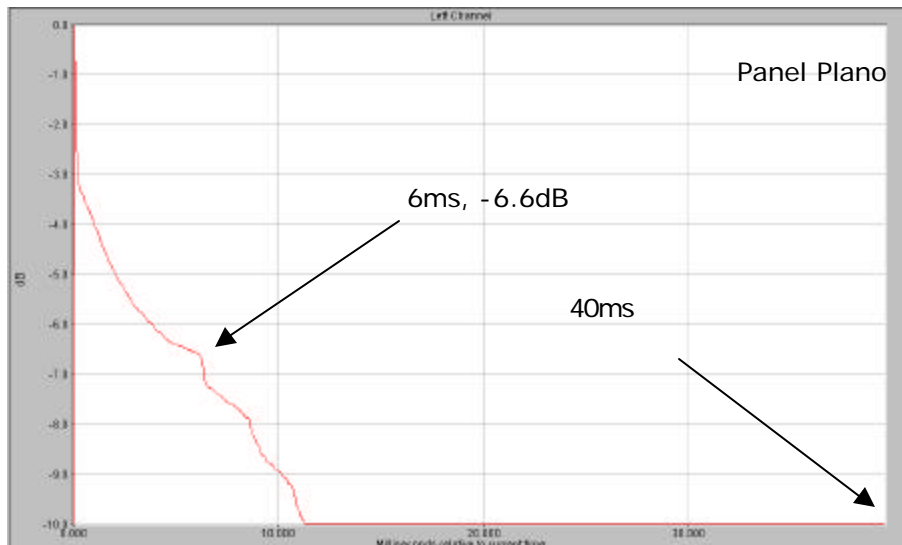


Figura 7:

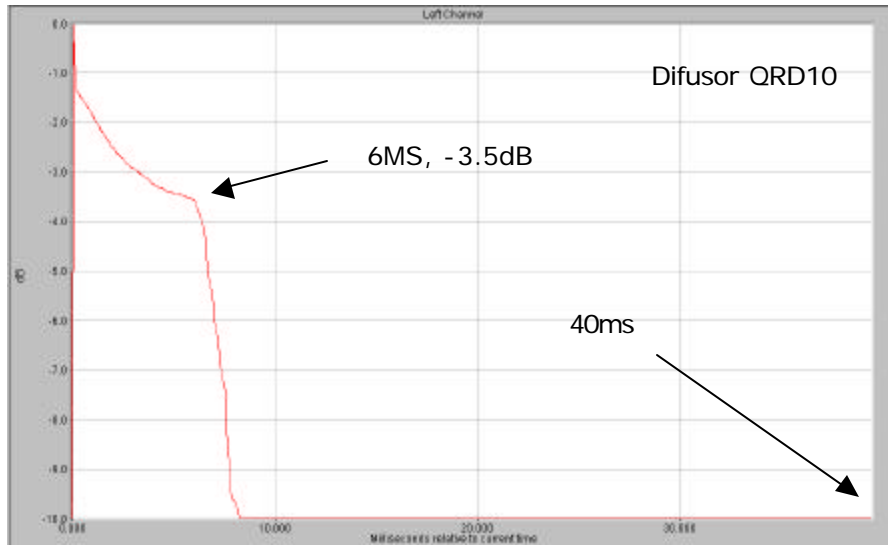


Figura 8:

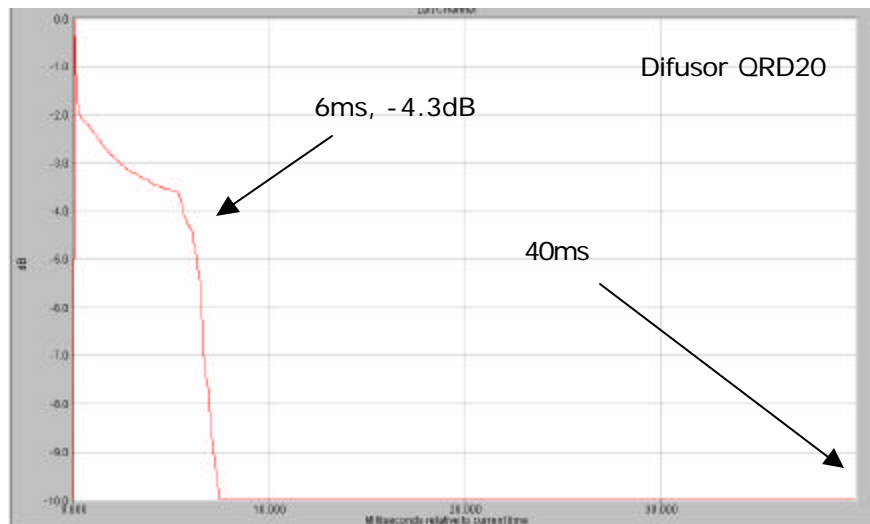


Figura 9: Panel Plano

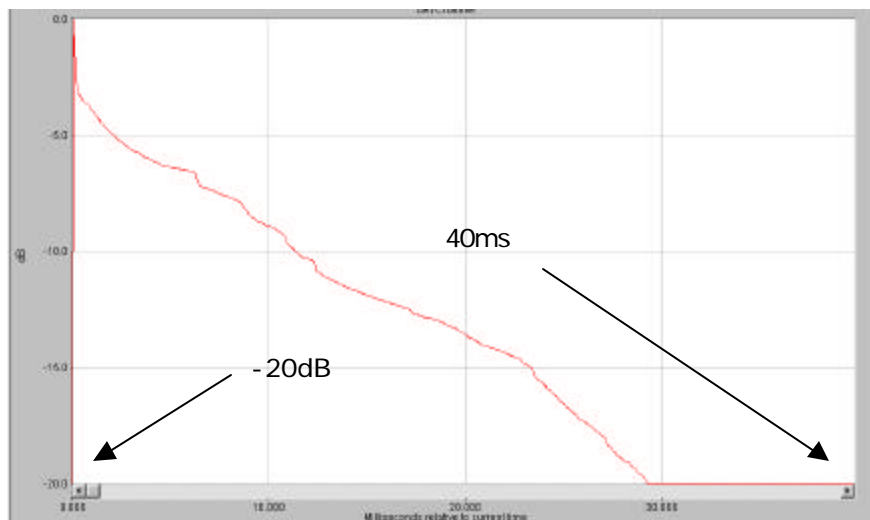


Figura 10: Difusor QRD2D 10

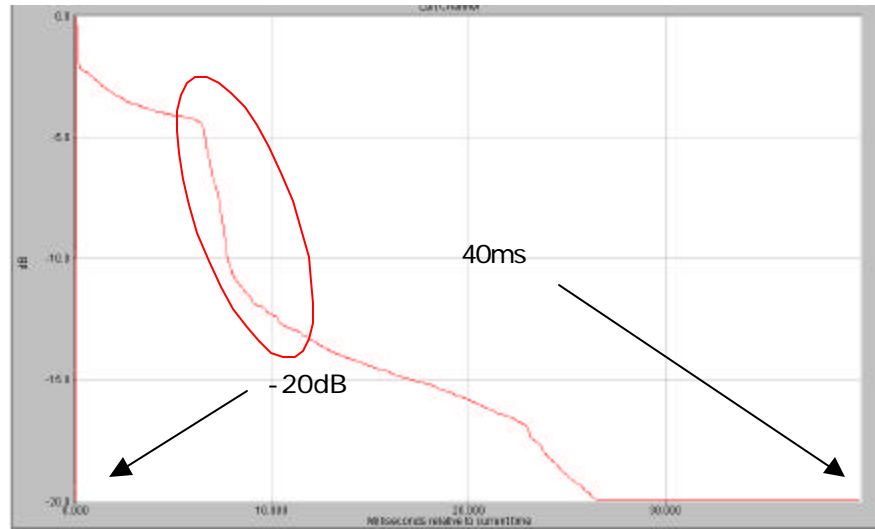


Figura 11:



Figura 12 (zoom de la anterior):

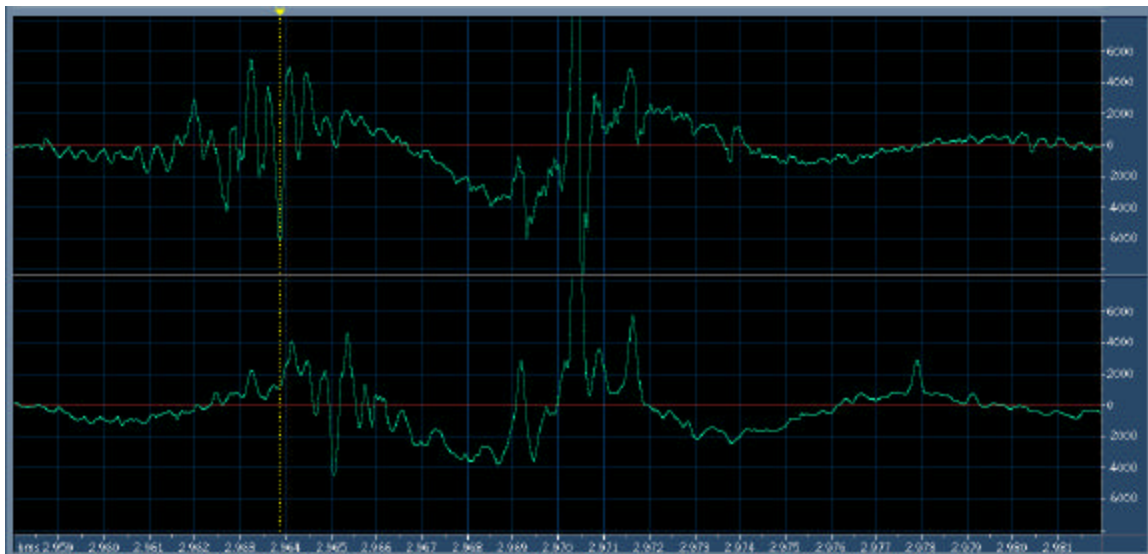


Figura 13: Modelo Clásico.

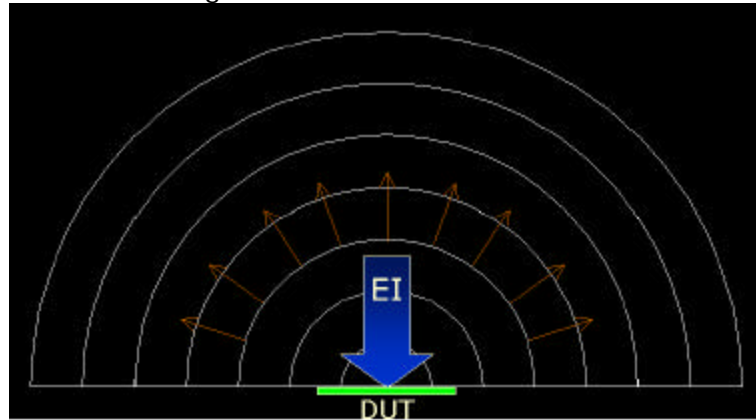


Figura 14: Modelo Moderno.

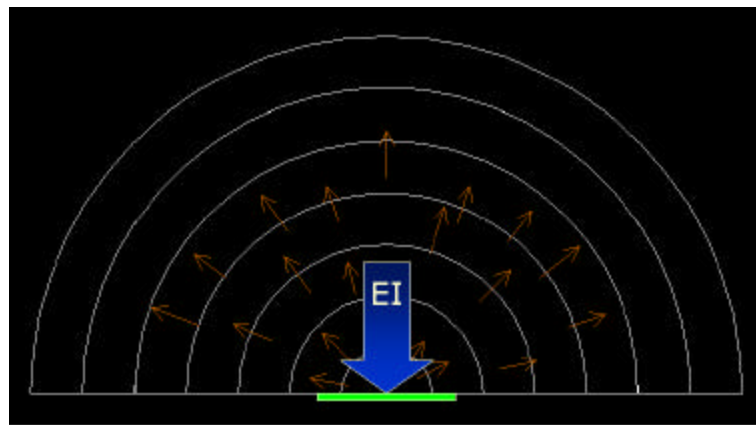


Figura 15: Posiciones de medición sobre la planta Teatro Colón.

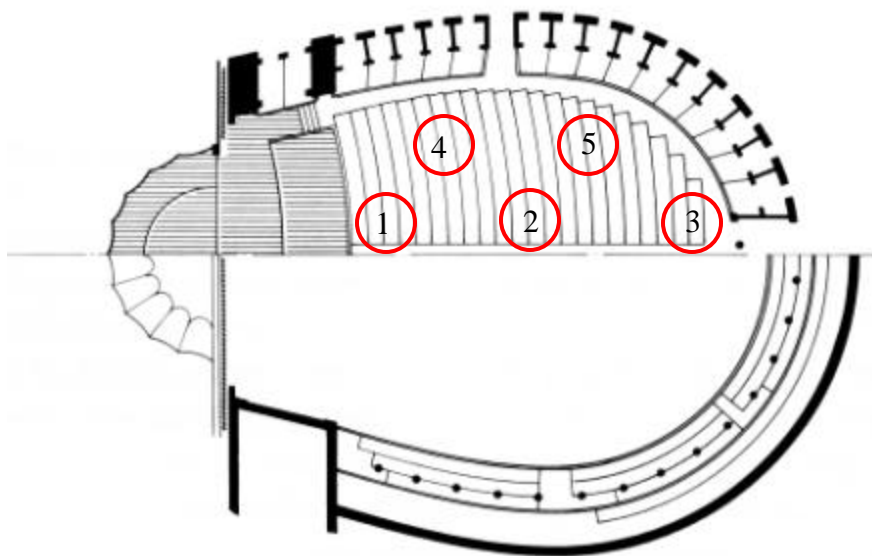


Figura 16: Posiciones de medición sobre el corte vertical longitudinal.

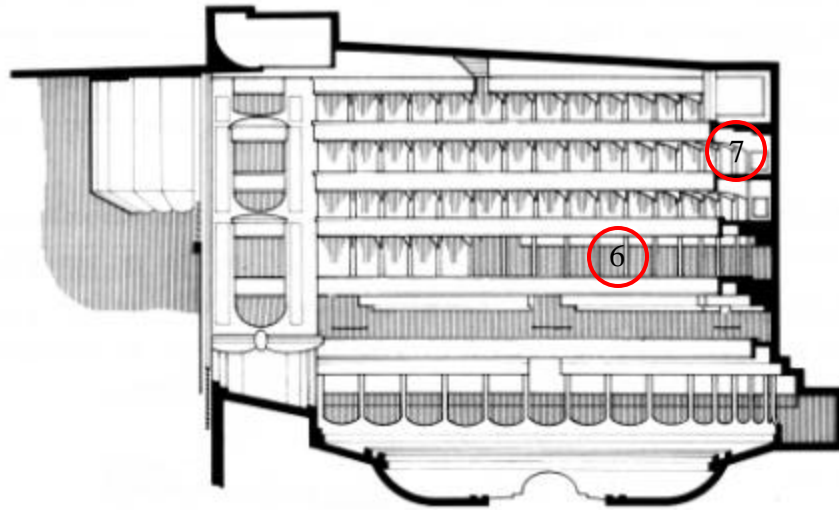


Figura 17: Respuesta al impulso en posición 2.

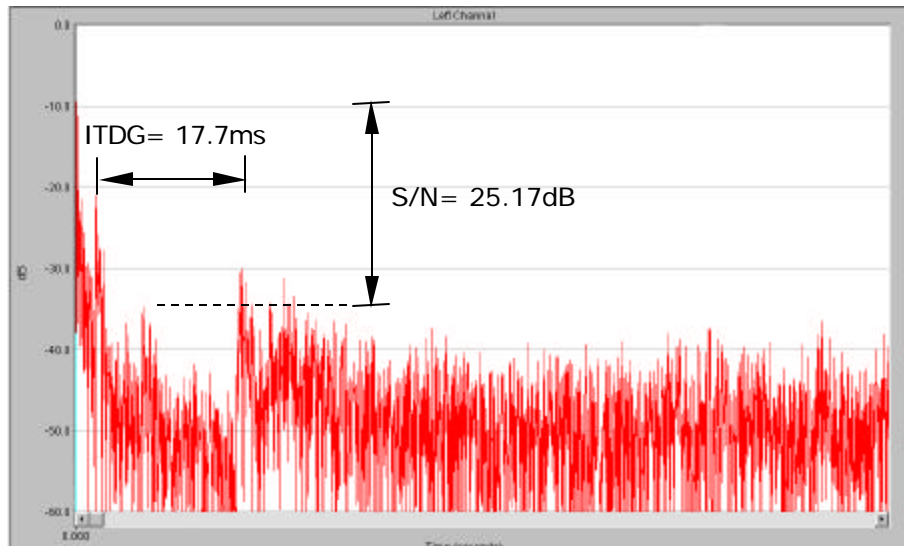


Figura 18: Transferencia en la Posición 2.

