

# Fundamentos de Acústica y Electroacústica (Año 2017)

6 de mayo de 2017

**Docente:** Ing. Sebastián P. Ferreyra  
**Trabajo Práctico Nro:** 2 (individual)  
**Alumno:** Diego Lorca  
**Legajo:** 63477

## **Tema: Análisis de respuestas impulsivas de recintos**

**Objetivo:** Analizar respuestas impulsivas monoaurales y binaurales de recintos (MRIR: Monoaural Room Impulse Response; BRIR: Binaural Room Impulse Response). Determinar parámetros acústicos monoaurales y binaurales de recintos derivados de las respuestas impulsivas. Comparar parámetros acústicos de recintos para diferentes tipos de recintos. Análisis de reflexiones tempranas y tardías. Familiarizarse con la norma IRAM 4109 (equivalente a ISO 3382).

## **Materiales e Instrumental necesarios.**

- Respuestas impulsivas monoaurales de recintos (MRIR) medidas.
- Respuestas impulsivas binaurales de recintos (BRIR) medidas.
- Software de aplicación para acústica de salas (DIRAC 6.0 DEMO).
- Banda espectral de análisis de octava: 2 kHz, por ser la única disponible en el Demo de DIRAC 6.0.



## Marco Teórico

### Introducción a la acústica de recintos

Desde el punto de vista acústico un recinto implica un campo sonoro limitado (parcial ó totalmente) por paramentos de rigidez, aislamiento y absorción sonora variables. La forma y tamaño de los cerramientos puede ser cualquiera y su geometría, dependiente en general de las funciones del recinto, determinan entre otras variables su comportamiento acústico. Fuchs y Lara Saenz, (1993) clasifican los recintos de diversas maneras, considerando sus proporciones como: a) tridimensionales, b) cuasibidimensionales y c) cuasiunidimensionales; por el grado de cerramiento como: a) totalmente cerrados, b) parcialmente abiertos y c) acoplados; por su geometría como: a) paralelepípedicos y b) irregulares; por su utilización como: a) viviendas, b) salas (trabajo, reunión, usos múltiples, etc.), c) auditorios, d) vehículos. Por lo cual, existen recintos estáticos y dinámicos según se trate de edificaciones o medios de transporte aéreos, superficiales, subterráneos ó subacuáticos.

Todo recinto encierra (parcial o totalmente, aislado ó acoplado) un cierto volumen de aire  $V$  ( $m^3$ ), en diversas condiciones de presión, humedad relativa y temperatura, en el cual puede establecerse un campo sonoro particular. Además, los recintos están limitados por diversos paramentos interiores de superficies  $S_1, S_2, \dots, S_n$  que presentan coeficientes de absorción sonora  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , constituyendo una superficie interior total  $S$  ( $m^2$ ) y produciendo una absorción sonora total  $A = \sum S_i \cdot \alpha_i$  expresada en (Sabin  $m^2$ ). Cada paramento, por sus características físicas determinará además el grado de aislamiento sonoro individual y en su conjunto la insonorización del recinto. Para analizar esta característica se utilizan tres conceptos: la resonancia, la ley de las masas y el efecto de coincidencia (Beranek, 1961). Los recintos suelen contener una ó múltiples fuentes sonoras de potencia acústica, direccionalidad y ubicaciones diversas dentro del mismo. Por lo cual, cerramientos del recinto pueden ser excitados y vibrar, convirtiéndose en fuentes secundarias que radian ondas sonoras al volumen de recinto (Kuttruff, 2000). La interacción entre las ondas sonoras incidentes y reflejadas en un recinto produce interferencias constructivas y destructivas dando lugar a ondas estacionarias ó modos propios de vibración. Cada modo de resonancia va asociado a una frecuencia denominada propia ó normal, y está caracterizado por el nivel de presión sonora que es función del espacio. Los modos aumentan con el volumen del recinto y con el cubo de la frecuencia, de manera que las irregularidades de la respuesta del recinto son notorias en bajas frecuencias (Morse, 1948). Cuando existe una alta densidad modal en un espectro angosto de frecuencia la energía sonora se concentra, originando un sonido característico a cada recinto denominado “coloración”.

El recinto puede ser modelado como un sistema lineal, invariante en el tiempo (LTI), en el cual en función de las características de la señal y de su contenido informativo, requiere diferentes tratamientos tanto de geometría, volumen y otros parámetros. Así, la palabra hablada requiere un máximo de claridad ó definición y la música condiciones de difusividad, reverberación y riqueza tonal que son función no solo de la fuente y del recinto sino también del oyente (Fuchs y Lara Saenz, 1993). El principal objetivo del diseño acústico de recintos



es crear las condiciones adecuadas para las funciones a que se lo destina y a las actividades de las personas en relación con dichas funciones. Para diseñar acústicamente un recinto no es suficiente conocer parámetros como volumen, absorción, aislamiento, entre otros, sino que debe conocerse su influencia en las características de transmisión de señales dentro del recinto, ó función de transferencia, máxime si las señales dentro del recinto no son de régimen ni espectro estable, ni tampoco armónicas simples, como es el caso de la voz hablada o cantada y la música (Carrion Isbert, 2001; Ferreyra, 2005). Los pioneros trabajos científicos realizados por R. Heyser (1967), M. Schröder (1965), A. Berkhout (1980), N. Aoshima (1981), J. Borish (1983), J. Vanderkoy (1994), W. Chu (1990), M. Poletti (1988), A. Farina (2000) y S. Müller (2001) entre otros durante estos últimos 50 años, permitieron que métodos y técnicas de medición aplicados a acústica de recintos evolucionen cuantitativa y cualitativamente. La respuesta impulsiva de un recinto (RIR) engloba la característica de transmisión de las ondas sonoras entre una fuente y un receptor, en el dominio del tiempo y es equivalente a la función de transferencia en el dominio de la frecuencia. La RIR es diferente para cada ubicación de la combinación fuente-receptor y varía según la geometría y materiales, entre otros factores (Ferreyra y Ramos, 2007). La RIR se compone del sonido directo, las reflexiones tempranas y las reflexiones tardías. El sonido directo es el primero que escucha el oyente, seguido por las reflexiones tempranas, cuyas direcciones son cruciales para la localización de la fuente sonora. Después de 60 a 100 ms (dependiendo de la sala), comienzan las reflexiones tardías que tienen una mayor densidad. Estas se asemejan a un proceso aleatorio cuyas direcciones son irrelevantes pero esenciales para definir la impresión espacial, la calidad acústica del recinto y la distancia a la fuente sonora (Ferreyra y Ramos, 2008). En la actualidad el conocimiento de la RIR resulta imprescindible para el análisis y diseño de diversos recintos. La identificación de anomalías acústicas como ecos flotantes, resonancias, excesiva reverberación y otras, se realiza a través del análisis de la RIR. La medición de la RIR resulta útil también, para validar programas de simulación que se utilizan como herramientas de diseño y sistemas de realidad acústica virtual (Tommasini et al, 2008). En la actualidad existen varios métodos de medición de la RIR, siendo a nivel internacional la norma ISO 3382 el documento que establece las directrices para realizar dichas mediciones. En el orden nacional, la norma IRAM 4109 es el documento de referencia (equivalente a ISO 3382).

### **Propagación del sonido en recintos cerrados**

Según se acaba de comentar, la energía radiada por una fuente sonora en un recinto cerrado llega a un oyente ubicado en un punto cualquiera del mismo de dos formas diferentes: una parte de la energía llega de forma directa (sonido directo), es decir, como si fuente y receptor estuviesen en el espacio libre, mientras que la otra parte lo hace de forma indirecta (sonido reflejado), al ir asociada a las sucesivas reflexiones que sufre la onda sonora cuando incide sobre las diferentes superficies del recinto. En un punto cualquiera del recinto, la energía correspondiente al sonido directo depende exclusivamente de la distancia a la fuente sonora, mientras que la energía asociada a cada reflexión depende del camino recorrido por el rayo sonoro, así como del grado de absorción acústica de los materiales utilizados como revestimientos de las superficies implicadas. Lógicamente, cuanto mayor sea la distancia recorrida y más absorbentes sean los materiales empleados, menor será la energía asociada tanto al sonido temprano como a las sucesivas reflexiones.

#### **Ecograma ó reflectograma:**



Al analizar la evolución temporal del sonido reflejado en un punto cualquiera del recinto objeto de estudio, se observan básicamente dos zonas de características notablemente diferenciadas: una primera zona que engloba todas aquellas reflexiones que llegan inmediatamente después del sonido directo, y que reciben el nombre de primeras reflexiones o reflexiones tempranas (“early reflections”), y una segunda formada por reflexiones tardías que constituyen la denominada cola reverberante. Si bien la llegada de reflexiones al punto en cuestión se produce de forma continua, y por tanto sin cambios bruscos, también es cierto que las primeras reflexiones llegan de forma más discretizada que las tardías, debido a que se trata de reflexiones de orden bajo (habitualmente, orden  $\leq 3$ ). Se dice que una reflexión es de orden “n” cuando el rayo sonoro asociado ha incidido “n” veces sobre las diferentes superficies del recinto antes de llegar al receptor. Desde un punto de vista práctico, se suele establecer un límite temporal para la zona de primeras reflexiones de aproximadamente 100 ms desde la llegada del sonido directo, aunque dicho valor varía en cada caso concreto en función de la forma y del volumen del recinto. La representación gráfica temporal de la llegada de las diversas reflexiones, acompañadas de su nivel energético correspondiente, se denomina ecograma o reflectograma. En la figura 4.1 se representa de forma esquemática la llegada de los diferentes rayos sonoros a un receptor junto con el ecograma asociado, con indicación del sonido directo, la zona de primeras reflexiones y la zona de reflexiones tardías (cola reverberante).

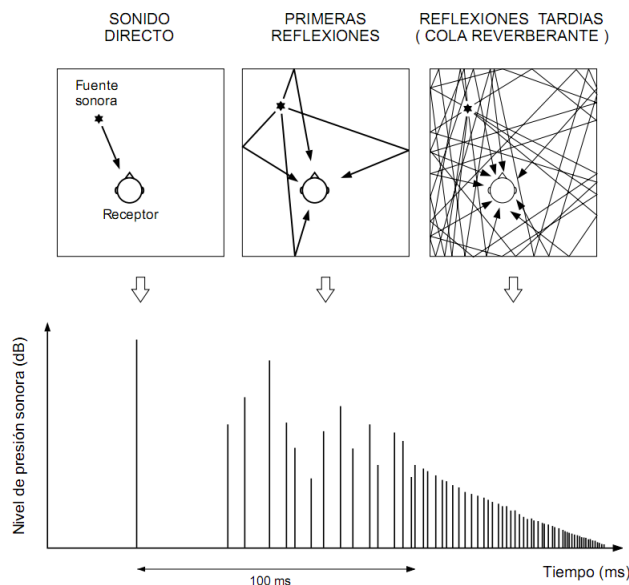


Figura 1: Ecograma asociado a un receptor, indicando el sonido directo, las reflexiones tempranas y tardías (Carrión, 2001)

En un recinto real, la manera más elemental de obtener dicha representación gráfica es excitando el recinto con un impulso sonoro, por ejemplo, un disparo de pistola, explosión de globos especiales ó ráfagas de ruido de banda angosta. Sin embargo, en la actualidad existen sofisticados sistemas de medición basados en técnicas indirectas que aplican señales determinísticas como secuencias de máxima longitud (Maximum Length Sequence, MLS), barridos de frecuencia sinusoidales (sweep frequency), para la obtención de la respuesta impulsiva. También existen otras técnicas como la espectrometría por retardo de tiempo (Time Delay Spectrometry, TDS) que permiten obtener en cada punto de interés la curva de decaimiento



energético, denominada curva energía-tiempo ETC (“Energy-Time Curve”), de forma rápida, precisa y automatizada. A partir de la obtención de dicha curva en distintos puntos del recinto considerado es posible extraer una gran cantidad de información sobre las características acústicas del mismo. En la figura 4.2 se muestra una curva ETC medida en un punto de un recinto. En abscisas se indica el tiempo, expresado en ms (milisegundos), mientras que en ordenadas se indica el nivel, expresado en dB.

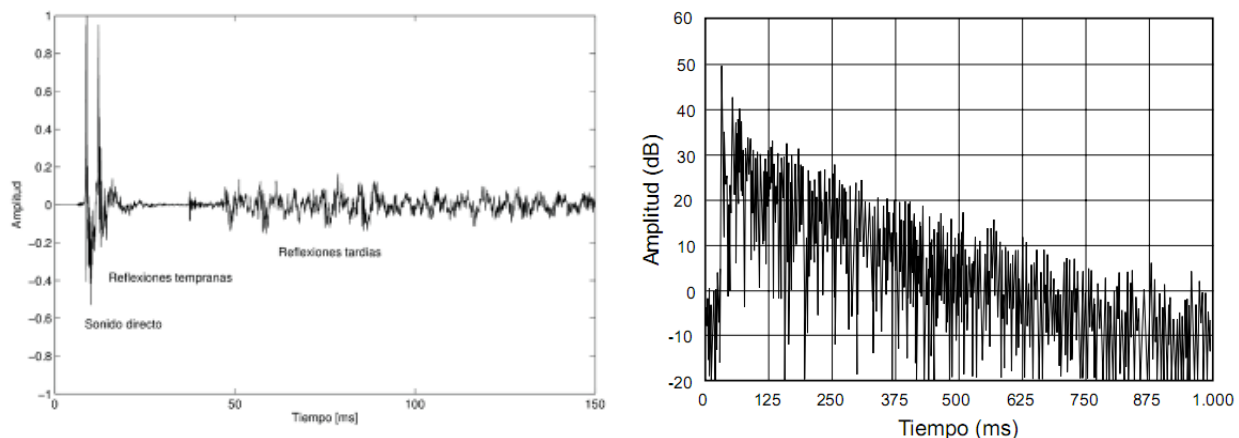


Figura 2: a) Extracto de una respuesta impulsiva de un recinto; b) curva energía-tiempo ETC medida en un punto de un recinto.

Como se menciona en el capítulo II, cuando se produce un sonido dentro de un recinto cerrado se establecen los siguientes campos sonoros que se definen a continuación (Davis, 1983):

**Campo cercano:** no puede definirse en términos del nivel de presión sonora (SPL) en función de la distancia porque el vector de velocidad de las partículas, u no sigue la misma dirección en la que se desplaza la onda, por lo tanto, puede existir en cualquier punto una apreciable componente de velocidad tangencial. La distancia frontera de este campo que rodea la fuente, es aproximadamente el doble de la dimensión mayor de la fuente sonora.

**Campo directo o libre lejano:** prevalece la ley inversa de los cuadrados de la distancia de la variación de nivel.

**Campo reverberante lejano o difuso:** la densidad de la energía de sonido es prácticamente uniforme. Existe una distancia tomada a partir de la fuente sonora donde se produce la frontera (separación) entre el campo directo y el campo reverberante lejano la cual recibe el nombre de Distancia Crítica ( $D_c$ ) (Davis, 1983). La  $D_c$  es un parámetro fundamental para el cálculo y diseño de un sistema electroacústico de refuerzo sonoro; como también, durante la etapa de análisis acústico de un recinto.

## Teoría Estadística

De la misma forma que la energía de una fuente sonora se radia en todas las direcciones, las ondas reflejadas en cualquier punto dentro de un recinto también viajan en todas las posibles direcciones. Las fases de las ondas que llegan a cada uno de estos puntos puede considerarse que están distribuidas de forma aleatoria, debiendo recordar que los sonidos naturales (palabra y música) producidos en el interior de un recinto son señales no estacionarias, continuas e



irregulares. Esto permite determinar la energía en cualquier punto de un recinto, sin tener en cuenta los retardos de fase en las ondas, así como la suma de los valores medios de la energía de las reflexiones que alcanzan el punto del recinto sometido a estudio. Las combinaciones de fenómenos aleatorios que tienen propiedades comunes tales como son las combinaciones de reflexiones que alcanzan cada punto del recinto se estudian mediante la matemática estadística, basada en la teoría de la probabilidad. El método estadístico no descubre los detalles intrínsecos del fenómeno; sin embargo, su ventaja consiste en que mediante unas matemáticas sencillas, basadas en datos de los resultados del proceso, permite obtener conclusiones objetivas de los aspectos cuantitativos del proceso, así como de sus posibles defectos (Recuero López, 1997). Al aplicar matemáticas estadísticas a sucesos aleatorios, si por cualquier causa el fenómeno deja de ser aleatorio, existe una pobre descripción del proceso, por ejemplo, si algunas de las superficies interiores del recinto tienen propiedades de enfoque, la naturaleza aleatoria de la dirección de llegada de las ondas reflejadas es menor, por lo que en este caso el análisis estadístico no se puede aplicar.

## Reverberación

Haciendo una analogía con la mecánica clásica, cuando presionamos el acelerador de un móvil el cual se encuentra inicialmente estático, el resultado es la aceleración del mismo hasta alcanzar una cierta velocidad. Luego de un intervalo considerable de tiempo y si el camino es liso y nivelado, la velocidad permanecerá constante. Manteniendo presionado el acelerador y habiendo alcanzado una cierta velocidad de régimen, el motor solo produce la fuerza necesaria para vencer todas las fuerzas de fricción actuantes, lo que resulta en una condición de equilibrio (estado estacionario). Una situación semejante ocurre en un recinto cuando se reproduce un sonido constante. El nivel de presión sonora crece hasta un cierto nivel, el cual es considerado punto de equilibrio o estado estacionario; en el cual, la energía radiada por la fuente es solo suficiente para cubrir todas las pérdidas que se producen en el aire y en los límites del recinto. Una energía mayor radiada por la fuente, resultaría en un mayor nivel de estado estacionario, mientras que una menor energía radiada, en un menor nivel de equilibrio (Everest, 2001). Si la fuente sonora cesa de emitir abruptamente, existe un tiempo finito para que el nivel sonoro decaiga hasta volverse inaudible. Esta mayor o menor persistencia del sonido que se oye en un recinto después de que la fuente cesa súbitamente de emitir se denomina reverberación, ver figura 4.3. Tanto la cantidad de energía inicial (estado estacionario) como la energía umbral ( $E_0$ , mínima cantidad de energía audible por nuestro oído) afectan la duración de la reverberación. Además, puede ocurrir que el umbral no dependa de la sensibilidad de nuestros oídos, sino de la presencia de ruido en el ambiente (ruido de fondo o piso de ruido), que enmascara la señal reverberante decreciente. Lo que nos interesa conocer principalmente del proceso de reverberación, es la pendiente de la curva de decrecimiento de energía en función del tiempo la cual puede ser de tipo exponencial o lineal dependiendo del campo acústico existente en el recinto. La reverberación está formada por reflexiones tempranas y reflexiones tardías, siendo esta última la más significativa (Carrion, 2001).

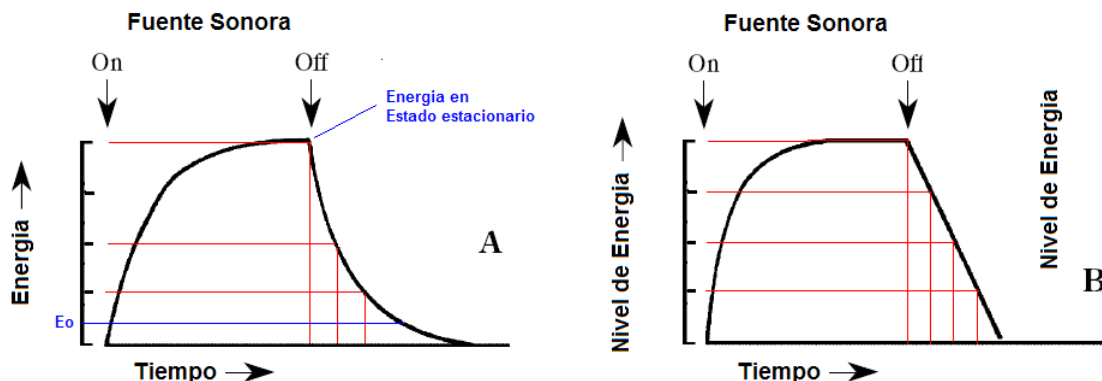


Figura 3: Representación gráfica, régimen estacionario y del decrecimiento energético durante la reverberación (Everest, 2001)

## Análisis de la ETC

La curva de decrecimiento de energía en función del tiempo (Energy Time Curve, ETC) es la curva obtenida a partir de la emisión de un sonido específico (impulsivo o de régimen permanente que es interrumpido en un instante de tiempo determinado) dentro un recinto. Esta curva posee grandes irregularidades durante el desvanecimiento de la energía en dicho espacio confinado (Brüel & Kjaer, 1963). Pero es a partir de ella, que realizando un proceso de integración de todas las contribuciones energéticas es posible calcular el tiempo de reverberación de una sala en particular. La inteligibilidad de la palabra, está íntimamente relacionada con el proceso de decrecimiento energético de la reverberación. Actualmente existen variados modelos matemáticos para calcular el tiempo de reverberación de un recinto, algunos de ellos son el de Sabine, Norrrys-Eyring, Shröder, Kuttruff, Millington, Fitzroy, Hoptkings, etc.

## Tiempo de Reverberación

Wallace C. Sabine (1868-1919) profesor asociado del departamento de física de la Universidad de Harvard, fue quien el 19 de octubre de 1898, introdujo el concepto de que la reverberación de un recinto es inversamente proporcional a la cantidad de absorción del mismo. Sabine, planteó sin ningún tipo de instrumento y por observación, una fórmula que permite calcular el tiempo de reverberación de un recinto relacionando: el volumen del recinto ( $V$ ), la absorción sonora total ( $A_{tot}$ ) producida por diferentes materiales ubicados en las superficies del mismo y la atenuación introducida por el aire ( $m$ ) más una constante. El tiempo de reverberación ("T" según ISO 3382, anteriormente RT ó T 60), se define como el tiempo necesario para que el nivel de energía sonora decaiga 60 dB. El grado de absorción del sonido de un material cualquiera se representa mediante el llamado coeficiente de absorción  $\alpha$ . Se define como la relación entre la energía absorbida por dicho material y la energía incidente sobre el mismo:

$$\alpha = \frac{Energía_{absorbida}}{Energía_{incidente}}$$

Sus valores están comprendidos entre 0 (correspondiente a un material totalmente reflectante) y 1 (caso de absorción total). El valor de  $\alpha$  está directamente relacionado con las



propiedades físicas del material y varía con la frecuencia. En cuanto a la denominada absorción  $A$  de un material cualquiera, ésta se obtiene como resultado de multiplicar su coeficiente de absorción  $\alpha$  por su superficie  $S$ . La unidad de absorción es el sabin (1 sabin corresponde a la absorción de 1 m<sup>2</sup> de ventana abierta). Finalmente, y debido a que un recinto está constituido por distintas superficies recubiertas de materiales diversos, se define la absorción total  $A_{tot}$  como la suma de todas y cada una de las absorciones individuales, es decir:

$$A_{tot} = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n$$

A partir de  $A_{tot}$  es posible calcular el coeficiente medio de absorción sonora dividiendo la absorción total  $A_{tot}$  por la superficie total del recinto  $S_t$ :  $\bar{\alpha} = \frac{A_{tot}}{S_t}$

donde:  $S_t = S_1 + S_2 + \dots + S_n$  = superficie total del recinto (paredes + techo + 2 suelo) [m<sup>2</sup>]

Con todo lo anterior, el tiempo de reverberación,  $RT$ ,  $T$  ó  $T_{60}$  se puede expresar como sigue:

$$RT = \frac{0,161V}{\bar{\alpha}S_t}$$

Según se observa, el  $RT$  calculado a cada frecuencia de interés mediante dicha fórmula no tiene en cuenta la ubicación del receptor, es decir, es único para cada recinto. Ello es consecuencia de que la misma surge exclusivamente de la aplicación de la acústica estadística. La célebre ecuación de reverberación de Sabine, utilizada universalmente hasta nuestros días como parámetro primordial para la caracterización acústica de un recinto, genera una hipérbola decreciente de la energía sonora en función del tiempo. Por otra parte es preciso comentar que, a pesar de la utilización universal de esta fórmula, su validez se circunscribe al caso de recintos con las siguientes características:

- Decaimiento energético exponencial asociado a un campo sonoro perfectamente difuso (la energía se propaga con la misma probabilidad en todas las direcciones)
- Geometría regular del recinto
- Coeficiente medio de absorción sonora  $\alpha$  med inferior a 0,4 (aproximadamente).

El tiempo de reverberación resulta ser un parámetro fundamental tanto para el análisis y diseño acústico de recintos. Ahora bien, en la práctica se utilizan una serie de parámetros complementarios que, por estar fundamentados en la acústica geométrica, dependen de la situación del receptor. La optimización de todos ellos en la fase de diseño permite garantizar con un elevado grado de fiabilidad la obtención de una acústica adecuada, una vez construido el recinto. Con independencia de la fórmula utilizada para el cálculo, el valor más representativo del tiempo de reverberación es el denominado  $T_{mid}$  ó  $RT_{mid}$ , que se obtiene como promedio de los valores correspondientes a las bandas de 500 Hz y 1 kHz:

$$RT_{mid} = \frac{RT(500Hz) + RT(1KHz)}{2}$$

### Cálculo del tiempo de reverberación

Tiempo de reverberación por Sabine:

$$RT = \frac{0,161V}{A_{tot} + 4mV}$$





donde:

$V$  = volumen del recinto [m<sup>3</sup>]

$A_{tot} = \alpha_{med} \times S_{tot}$  = absorción total del recinto [Sabins]

$\alpha_{med} = \frac{\sum \alpha_i}{S_{tot}}$  = coeficiente medio de absorción del recinto [adimensional]

$S_{tot}$  = superficie total del recinto [m<sup>2</sup>]

$m$  = constante de atenuación del aire [m<sup>-1</sup>]

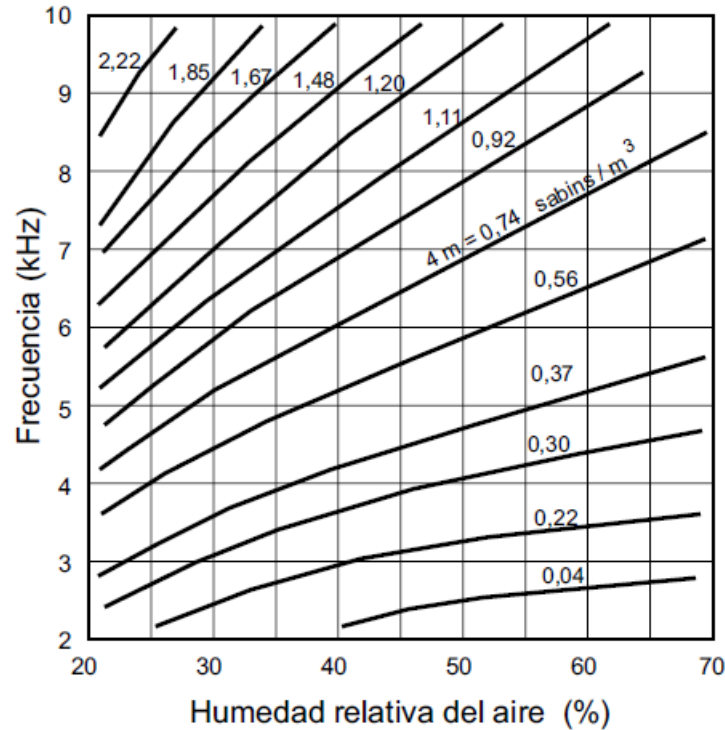


Figura 4: Gráficas para la determinación del producto  $4m$  (para una presión atmosférica estática de 10 5 Pa y una temperatura de 20°C (Carrión, 2001)

### Cálculo de la calidez acústica, BR

La calidez acústica BR ("Bass Ratio") se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 125 Hz y 250 Hz y la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz:

$$BR = \frac{RT(125Hz) + RT(250Hz)}{RT(500Hz) + RT(1KHz)}$$

### Cálculo del Brillo, Br

El brillo (Br) se obtiene como el cociente entre la suma de los tiempos de reverberación correspondientes a las bandas de frecuencias de 2 kHz y 4 kHz y la suma de los RT correspondientes a las bandas de frecuencias de 500 Hz y 1 kHz:

$$Br = \frac{RT(2KHz) + RT(4KHz)}{RT(500Hz) + RT(1KHz)}$$



### Camino libre medio

El camino libre medio (Mean Free Path, MFP), se define como el promedio de distancia que una onda sonora recorre entre dos reflexiones sucesivas, está dado por:

$$MFP = 4 \frac{V}{S}$$

donde:

V: volumen del recinto [m<sup>3</sup>]

S: superficie total de recinto [m<sup>2</sup>]

### Régimen de decrecimiento

El régimen de decrecimiento (Decay ratio, Dr) se define como el tiempo que tarda el sonido en recorrer el camino libre medio en un recinto, está dado por:

$$Dr = \frac{MFP}{c}$$

donde:

MFP: camino libre medio [m]

c: velocidad del sonido [m/s]



### 3 DESARROLLO PRÁCTICO

Se debe encontrar y analizar el valor de los parámetros acústicos derivados de las respuestas impulso, pero para ello es necesario definir que son cada uno y saber que representan, para así poder compararlos y encontrar una conclusión. Estos parámetros acústicos de interés, definidos por la normas ISO 3382, dan información sobre los tiempos de reverberación, radio de energía, inteligibilidad, amplitud, relación señal ruido, etc.

Estos son: EDT, T10 , T20 , T30 , C20 , C30 , C50, C80 , D50 , Ts , H, Grel , SNR, INR, PNR, IACC0,+ , IACC0,80, IACC80,+.

**EDT: Early Decay Time**, tiempo de caída temprana: es el tiempo que le toma a la energía reverberante decaer 10 dB desde su valor estático (Fig. 5). Es otra medida de la reverberación que considera la importancia subjetiva de la parte inicial del decaimiento de la reverberación. El EDT está multiplicado por un factor de seis para relacionarlo con la definición original del tiempo de reverberación (60dB). Durante este período las reflexiones sonoras con mucha energía contribuyen considerablemente a la sensación de intimidad y envolvimiento en el local. El EDT está altamente correlacionado con el tiempo de reverberación.

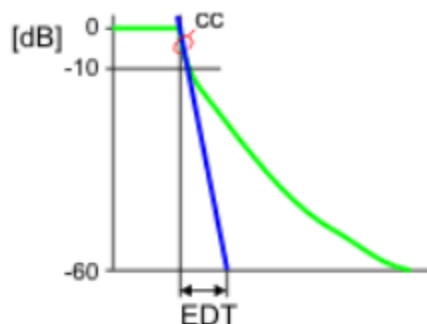


Figura 5: Tiempo de caída temprana

**T10, T20, T30:** Son los tiempos de reverberación estándares dentro de una gama. Dan información sobre qué tan descompuesta está la difusión del sonido y son derivador de la sección de curva de caída entre 5 y 15dB y 25 y 35dB respectivamente por debajo del nivel inicial- A partir del flanco de correspondiente T10, T20, T30, son calculados como los tiempos para llegar a -60dB. Los valores de tiempo más representativos de T10 van desde los 0.005s a los 10 s y los de T20 y T30 van desde 0.1 a 10s como se muestra en la figura.

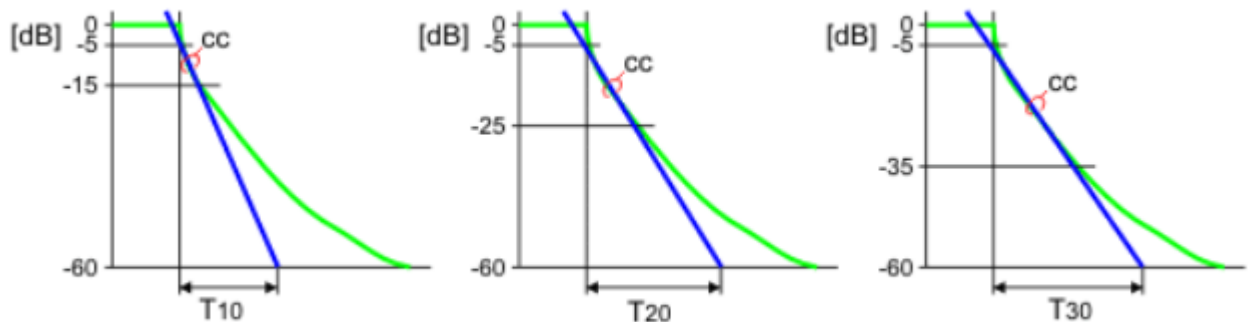


Figura 6: Distintos tiempos de reverberación  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  y  $T_{30}$

**C20, C30, C50, C80:** Se refiere a la claridad del sonido. Trata sobre la relación logarítmica de sonido y energía, desde su inicio hasta su fin relativo, donde su inicio refiere a los primeros mili segundos (20, 30, 50 y 80) iniciales y su fin relativo que son los milisegundos luego de los primeros milisegundos ya pasados. La mayoría de los valores prácticos de claridad compren entre -10 y 20 dB. Como por ejemplo se define como el C80 en la Fig 7.

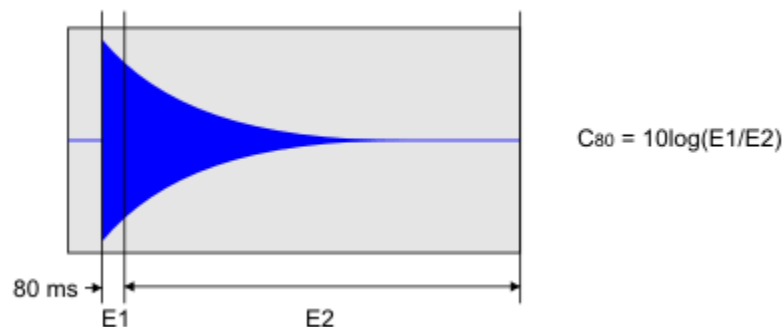


Figura 7: Claridad del sonido para 80ms

**D50:** Es la relación entre la energía que llega al oyente dentro de los primeros 50 ms desde la llegada del sonido directo (incluye el sonido directo y las primeras reflexiones) y la energía total recibida por el mismo. Se calcula en cada banda de frecuencias entre 125 Hz y 4 kHz y varía entre valores de 0 a 1. Se muestra en Fig. 8.

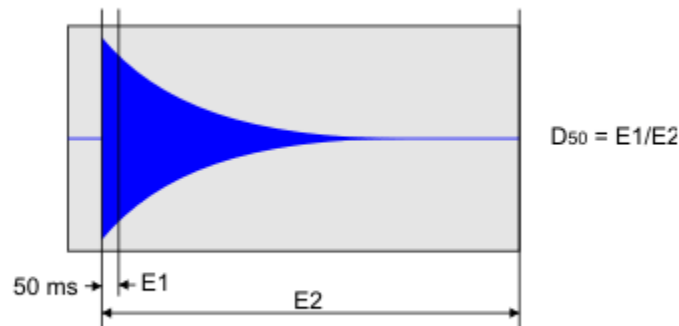


Figura 8: Relación de energía para los 50ms

**Ts:** Tiempo central, es el tiempo de la respuesta de impulso sobre el centro de gravedad del recinto. Los valores más prácticos de  $T_s$  van desde 5ms a 1s, se ve en la Fig. 9.

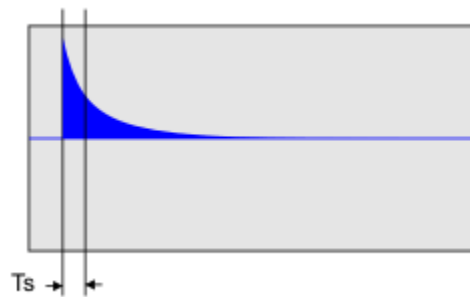


Figura 9: Tiempo central

**H:** Es el Hallmass, se define como la inversa de  $-C_{50}$ . Es decir la difusividad en 50 ms.

**Grel:** Es la relación logarítmica de la potencia de sonido integral de la medición de la respuesta impulsiva una distancia de 10m desde la misma fuente en un campo libre, en otras palabras  $G$  es 0 dB cuando la medición, en un campo libre, es a una distancia de 10m desde la fuente de sonido, como se muestra en la Fig. 2.7.

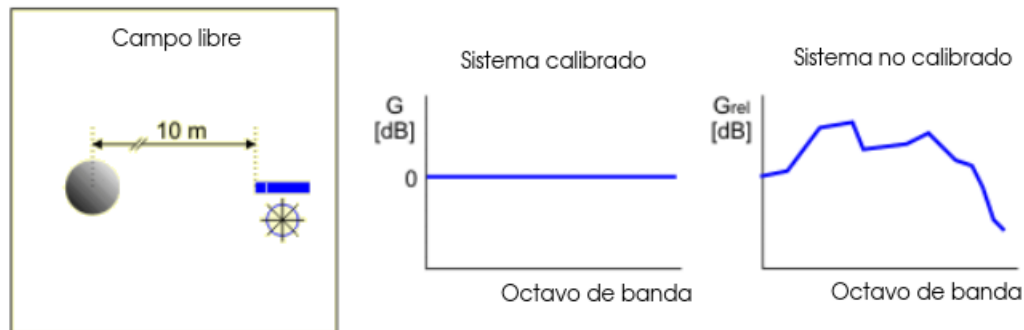


Figura 10: Potencia de sonido integral

Para recintos, la norma ISO 3382 estándar prescribe el uso de una fuente omnidireccional y un micrófono igual para medir  $G$ . Entonces, se coloca una fuente, por ejemplo, en el escenario y el micrófono se coloca sucesivamente en distintas posiciones.

**SNR:** La relación señal ruido eléctrica (SNR) del sistema está definida por la totalidad de la cadena de medición, considerando el piso de ruido del micrófono o HATS, más el ruido de fondo de los preamplificadores, consola de mezcla, conversor analógico/digital (ADC) y fuentes de alimentación del sistema. La relación señal ruido se define como la relación logarítmica del nivel de señal y el nivel de ruido. Por lo general esta medida es un parámetro cualitativo, relacionado con la señal de entrada dentro de la respuesta impulsiva. Con el fin de obtener una SNR de calidad de una respuesta impulsiva, el ruido debido al sistema de medición, debido a los cambios acústicos del sistema bajo prueba, debe ser mucho menor que el ruido de fondo, y el valor de la media de la misma, debe ser 1. Por tal motivo, se deben seleccionar dispositivos y transductores de muy bajo ruido. Fig. 11.

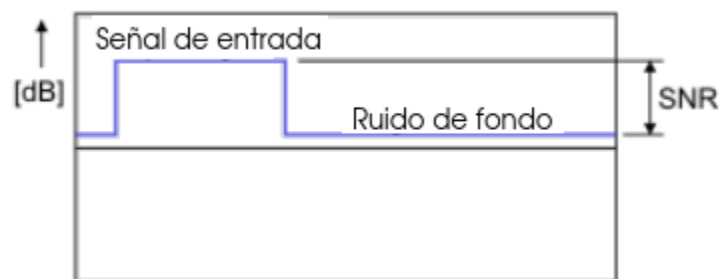


Figura 11: Relación señal ruido

**INR:** Se define como la relación logarítmica del nivel de repuesta impulsiva máximo y el nivel de ruido, y refleja el rango de descomposición. Sirve como un parámetro general de la calidad de medición, relacionada más con el sistema que con la señal, que puede ser

calculada con cualquier tipo de receptor, Fig. 12. Según ISO 3382, la INR debe ser de al menos 35dB o 45dB para tiempos precisos determinados, T20 y T30, respectivamente. Con buenas mediciones, los valores INR varían entre 35 a 60dB.

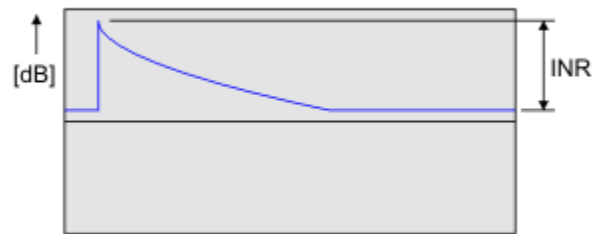


Figura 12: Relación nivel de respuesta impulsiva máximo y nivel de ruido

**PNR:** La relación de pico ruido es la relación logarítmica del pico más grande de la respuesta impulsiva y el nivel de ruido. A pesar de que esta es usada a veces en lugar de INR como medida de rango de caída, y con ello la calidad de la respuesta impulso. Debe tenerse en cuenta que PNR puede dar resultados muy erráticos ya que depende de un solo pico de una muestra. El INR por el contrario utiliza la integral de la respuesta impulso desde atrás para llegar al nivel máximo.

**IACC:** El correlación cruzada inter-aural, es la medida de cuanto más las señales del oído izquierdo y el oído derecho están correlacionadas y son medidas usando un simulador de cabeza.  $IACC_{t1,t2}$  es definida como el máximo absoluto de la función inter-aural correlación cruzada normalizada, es calculada sobre un intervalo de tiempo desde  $t1$  hasta  $t2$ .  $IACC_{0,80}$  involucra sólo las reflexiones cercanas,  $IACC_{80,+}$  involucra sólo el sonido reverberante, y la  $IACC_{0,+}$  involucra ambos. En esta notación, “80” indica 80ms, y el “+” indica el tiempo total de captura de la medida. La medida varía de entre 0 a 1. La Fig. 13 muestra una sala de concierto con una fuente de sonido omnidireccional en el escenario y un simulador de cabeza situado en el área de audiencia, mirando en la dirección de la fuente.

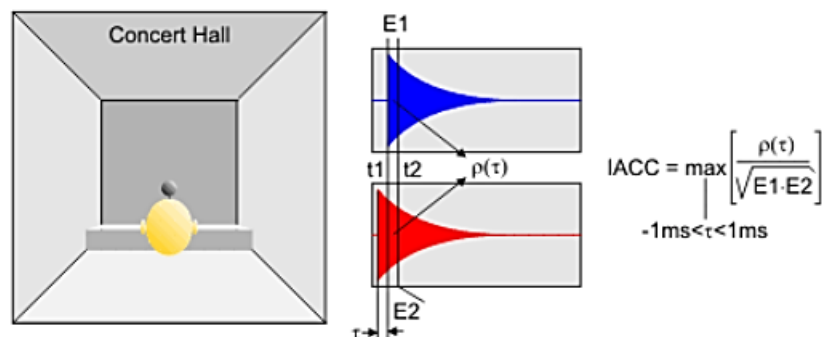


Figura 13: Sala de concierto con simulador de cabeza



Ahora bien, con los parámetros definidos se puede realizar una tabla de comparación sobre sus valores utilizando respuestas impulsivas de recinto para tres tonos monoaurales y tres binaurales, es necesario aclarar que tipo de transductor se utilizó para tomar y generar éstos impulsos.

La fuente sonora encargada era omnidireccional de tipo dodecaedro, como se muestra en la Fig 14. Para las respuestas monoaurales se utilizó un micrófono electrostático de media pulgada Bruel&Kjaer 4134, mientras que para las respuestas impulsivas binaurales se utilizó un simulador cabeza torso Bruel&Kjaer 4128 como se muestra en la Fig. 15(derecha).



Figura 14: Fuente omnidireccional HD2050



Figura 15: Instrumento para tomar respuestas impulsivas:(izq.) MRIR y (der.) BRIR

Algunas especificaciones técnicas tomadas de sus respectivas hojas de datos se muestran a continuación:





## Specifications and Ordering Information Type 4134

The data below are valid at 23°C, 101.3kPa and 50% RH unless otherwise specified

### TYPICAL USES:

Medium- and high-level measurements in the audio range and flush mounted measurements of noise. Especially suitable where good random-incidence characteristics are required

### NOMINAL DIAMETER:

1/2"

### FREQUENCY RESPONSE CHARACTERISTICS:

Random-Incidence and Pressure

### OPEN CIRCUIT FREQUENCY RESPONSE\*:

4Hz to 20 kHz:  $\pm 2$  dB

### OPEN CIRCUIT SENSITIVITY (250 Hz)\*:

$-38 \pm 1.5$  dB re. 1 V/Pa, 12.5 mV/Pa

### LOWER LIMITING FREQUENCY (-3 dB):

1 Hz to 3 Hz

### CARTRIDGE THERMAL NOISE:

18 dB(A)

### 3% DISTORTION LIMIT (UPPER):

$> 160$  dB re. 20  $\mu$ Pa at 100 Hz

### DIAPHRAGM RESONANCE FREQUENCY:

23 kHz (90° phase-shift)

### POLARIZATION VOLTAGE:

External: 200 V

### POLARIZED CARTRIDGE CAPACITANCE\*:

18.5 pF at 250 Hz

### MEAN TEMPERATURE COEFFICIENT:

$-0.002$  dB/°C ( $-10^\circ\text{C} < t < +50^\circ\text{C}$ )

### EQUIVALENT AIR VOLUME:

10 mm<sup>3</sup> (250 Hz)

### EXPECTED LONG-TERM STABILITY:

$> 1000$  years/dB at 20°C

### INFLUENCE OF STATIC PRESSURE:

$-0.007$  dB/kPa, typical

### INFLUENCE OF VIBRATION:

67 dB re. 20  $\mu$ Pa and 1 ms<sup>-2</sup> axial vibration

### INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD:

20 dB re. 20  $\mu$ Pa in 50 Hz, 80 A/m field

\* Individually calibrated

### INFLUENCE OF HUMIDITY:

$< 0.1$  dB in the absence of condensation

### DIMENSIONS:

Diameter: 13.2 mm (0.52 in) (with grid)

12.7 mm (0.50 in) (without grid)

Height: 12.6 mm (0.49 in) (with grid)

11.5 mm (0.45 in) (without grid)

Thread for preamplifier mounting: 11.7 mm – 60 UNS

## Ordering Information

Type 4134 1/2" Microphone

### Suitable Preamplifiers:

Type 2639 1/2" Microphone Preamplifier

Type 2645 1/2" Microphone Preamplifier

Type 2660 1/2" Low-level Microphone Preamplifier

Type 2669B 1/2" Microphone Preamplifier

Type 2669L 1/2" Microphone Preamplifier with LEMO connector

For information on microphone calibration equipment and microphone accessories, please refer to the relevant product data sheets

## Specifications - Head and Torso Simulator Type 4128C

### LISTENER FREQUENCY RESPONSE

Conforms to ITU-T Rec. P.58 for measurements on telecommunications devices and to IEC 60959 and ANSI S3.36-1985 for measurements on air conducting hearing aids

### EAR SIMULATOR

The ear simulator complies with ITU-T Rec. P.57, IEC 60711 and ANSI S3.25 standards. The output from the ear simulator is via a 7-core 3m cable (2.3m from the bottom of the torso) terminated with a Lemo (1B) plug. For connection to a preamplifier input socket of Brüel & Kjær Power Supplies, Analyzers, etc., a Lemo-to-Brüel & Kjær adaptor is supplied  
**Typical Sensitivity:** 12.6 mV/Pa ( $-38$  dB re 1 V/Pa) at 250 Hz  
**3% distortion level:** 162 dB re 20  $\mu$ Pa at eardrum position

### LEFT EAR TO RIGHT EAR TRACKING

$\pm 1$  dB up to 5 kHz,  $\pm 3$  dB up to 8 kHz (measured using the same ear simulator)

### PINNA SIMULATORS

Dimensions similar to those specified in ITU-T Rec. P.58, IEC 60959 and ANSI S3.36. Minor adjustments in the dimensional details have been made which enable the 4128C to conform with the acoustic specifications of these documents in the frequency range 100 Hz to 8 kHz. Types 4158C and 4159C are supplied with calibrated pinna simulators. An additional pair of uncalibrated soft pinna simulators are supplied with the 4128C

### MOUTH SIMULATOR

Input to mouth simulator via 0.75 m cables (0.2m from the bottom of the torso) terminated with banana-sockets

**Sound Pressure Distribution:** conforms to ITU-T Rec. P.51

**Mouth Opening:** W x H: 30 x 11 mm

(42 x 16 mm with mouth adaptor removed)

**Equivalent Lip Plane Position, CL:** 6 mm in front of the sound radiation opening

**Mouth Reference Point, MRP:** 25 mm in front of mouth CL

**Continuous Output Level at MRP:**

Min. 110 dB SPL, 200 Hz to 2 kHz

Min. 100 dB SPL, 100 Hz to 8 kHz

**Typical Sensitivity at 1 kHz:** 80 dB SPL 2V/500mm

**Distortion (harmonic components up to 8 kHz) at 94 dB SPL:**

$< 2\%$ , 200 Hz to 250 Hz

$< 1\%$   $> 250$  Hz

**Max. Average Input Power:** 10 W max. continuous average power (at 20°C (68°F))

**Max. Pulsed Input Power:** 50 W for 2 seconds (limited by protection circuit)

**Loudspeaker Impedance:** 4  $\Omega$

**Loudspeaker Diameter:** 80 mm (3.1 in)

### DIMENSIONS AND WEIGHT

The main dimensions comply with the dimensional requirements of ITU-T Rec. P.58 and the reports from IEC 60959 and ANSI S3.36-1985

**Total height, Head and Torso:** 695 mm (27.4 in)

**Torso:** Height: 460 mm (18 in)

Width: 410 mm (16 in)

Depth: 183 mm (7.2 in)

External neck diameter: 112 mm (4.4 in)

**Head Angles:** Vertical or 17°

**Weight:** 9 kg (19.8 lb.)



Las respuestas impulsivas seleccionadas de la página de la cátedra se pueden observar en el cuadro 1.

BRIR	MRIR
esw 1	fso3m7
esw 4	fso1m3
esw 6	fso1m2

Cuadro 1: Respuestas seleccionadas

Tomando éstos tonos desde el Dirac 4.0 se lograron obtener sus respectivas gráficas referidas a la curva de energía con respecto al tiempo y a la respuesta temporal del sonido reflejado (sonido directo, reflexiones tardías y tempranas):

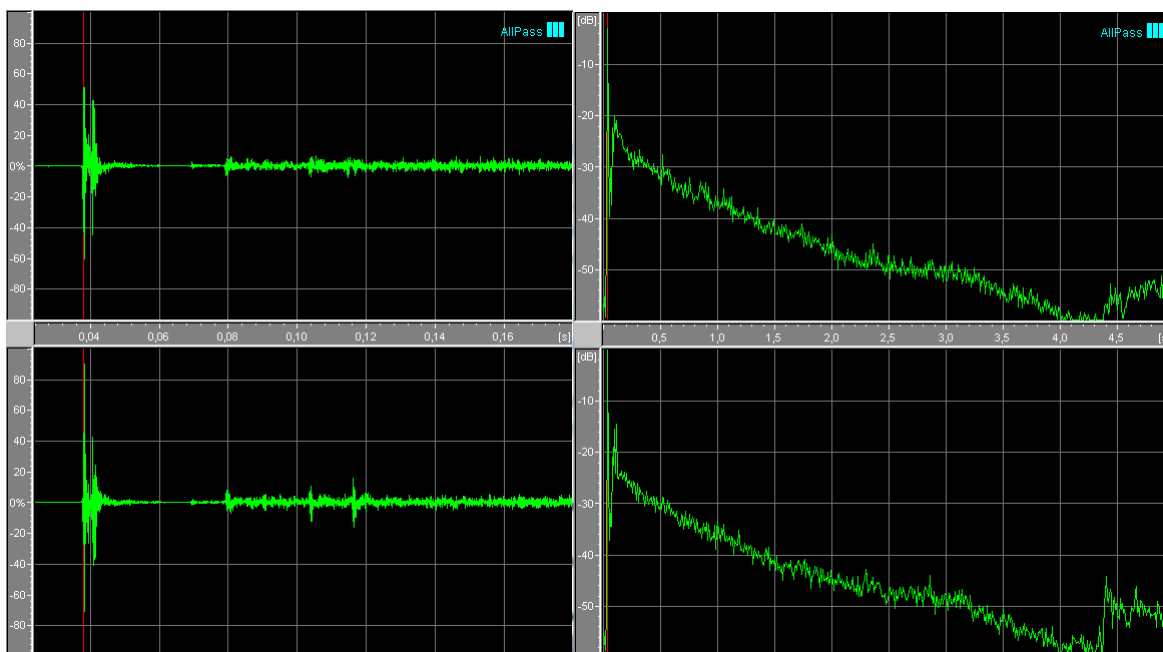


Figura 16: BRIR esw1: Ecograma (izq.) y Curva energía-tiempo ETC (der.)

En el reflectograma de esw1 (Fig. 16) se puede observar lo que se mencionó en la parte teórica, esto es, luego del sonido directo que está a unos 40ms se observa una zona que representa las reflexiones tempranas y una segunda zona formada por las reflexiones tardías aproximadamente a partir de los 100ms, la que se denomina cola reverberante. Éstas zonas permiten trazar la curva energía-tiempo, que es la de interés para encontrar los parámetros acústicos que caracterizarán los recintos.

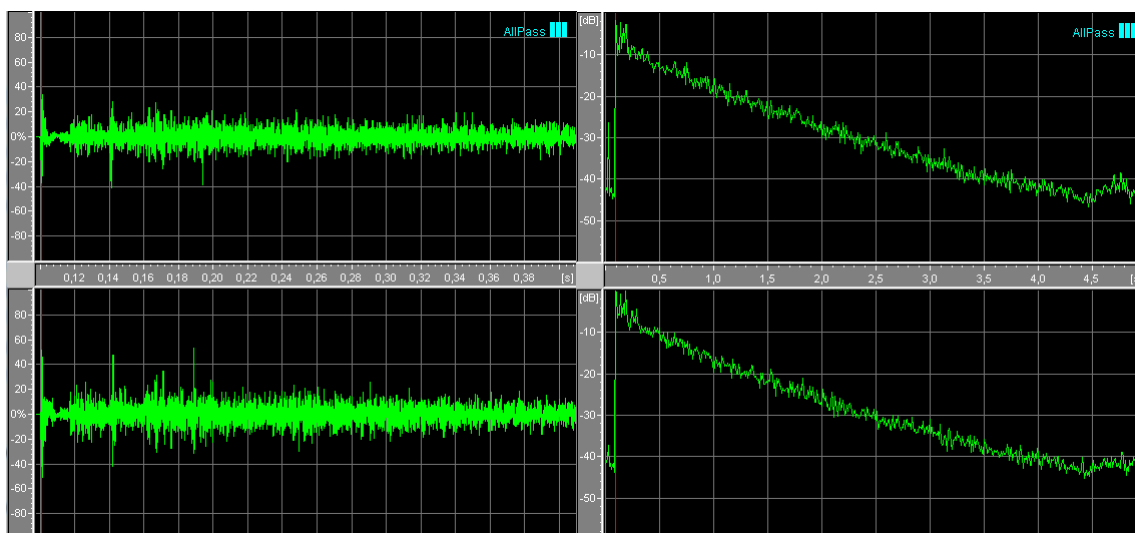


Figura 17: BRIR esw4: Ecograma (izq.) y Curva energía-tiempo ETC (der.)

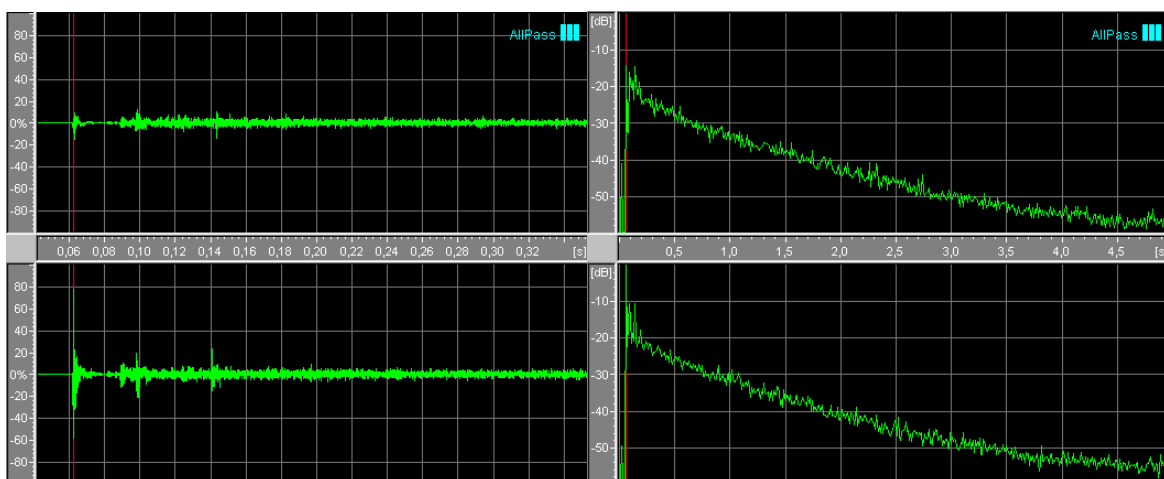


Figura 18: BRIR esw6: Ecograma (izq.) y Curva energía-tiempo ETC (der.)

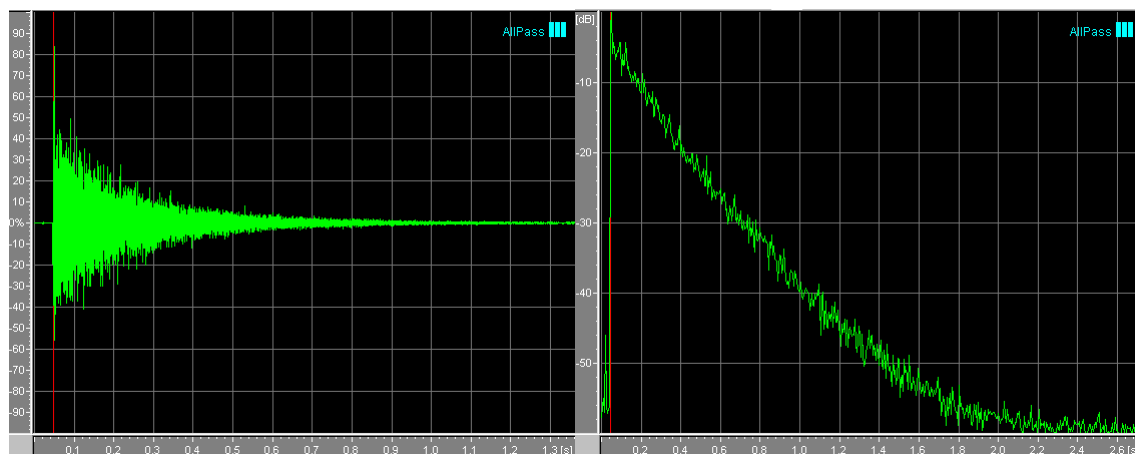


Figura 19: MRIR fso3m7: Ecograma (izq.) y Curva energía-tiempo ETC (der.)

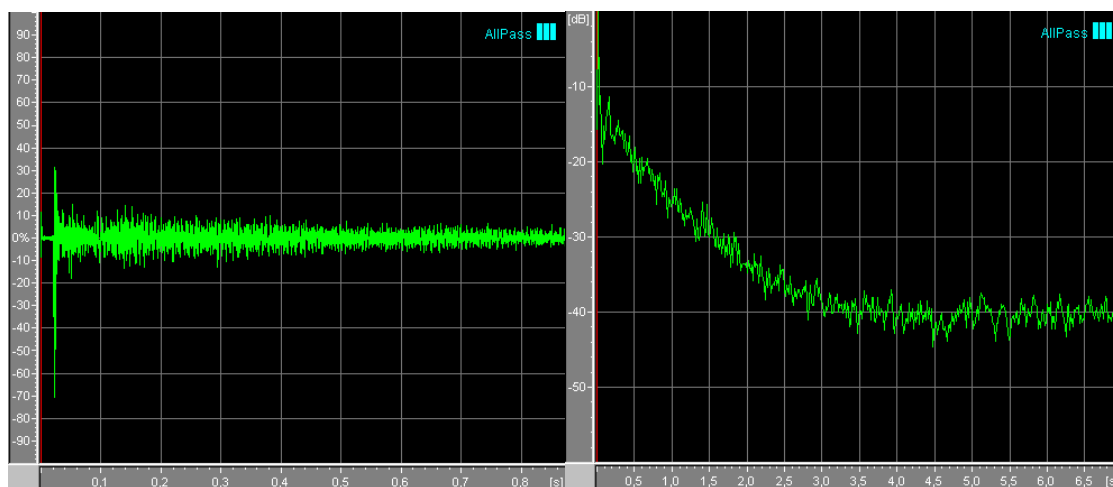


Figura 20: MRIR fso1m3: Ecograma (izq.) y Curva energía-tiempo ETC (der.)

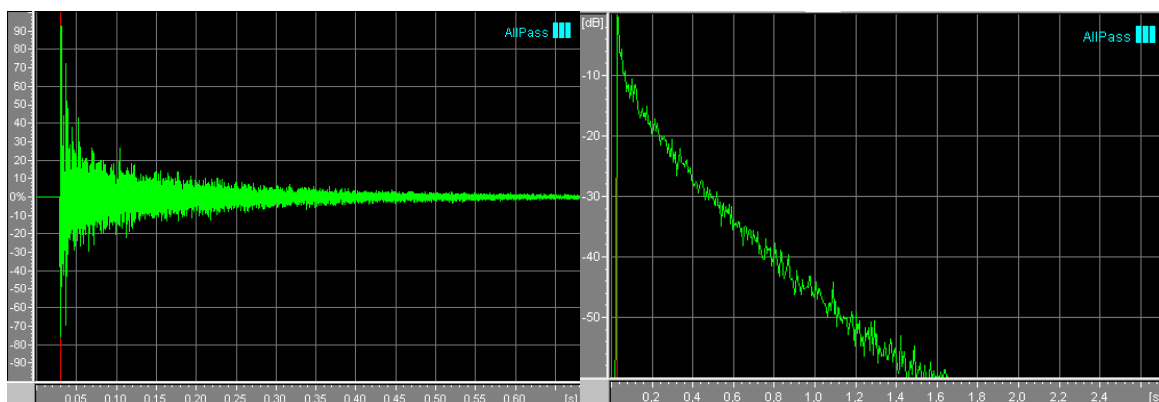


Figura 21: MRIR fso1m2: Ecograma (izq.) y Curva energía-tiempo ETC (der.)



Los valores tomados de los parámetros acústicos debido a las seis respuestas impulsivas sacados de la versión demo del Dirac 4.0 para una frecuencia de 2000Hz, se pueden observar en la tabla 2:

Parámetros	BRIR			MRIR		
	esw 1	esw 4	esw 6	fso3m7	fso1m3	fso1m2
EDT[s]	5,76	6,07	5,72	1,87	4,97	1,64
T10[s]	6,07	5,92	6,33	1,78	5,21	1,77
T20[s]	6,06	5,95	6,247	1,73	5,29	1,72
T30[s]	5,96	5,89	6,08	1,76	5,27	1,72
Ts[ms]	272,8	459,3	403,8	125,1	367,7	104,5
C30[dB]	-1,88	-14,76	-13,75	-5,40	-7,60	-2,25
C50[dB]	-1,52	-12,58	-9,18	-1,95	-6,52	-0,69
C80[dB]	-0,58	-8,80	-6,72	0,25	-5,29	1,30
C20[dB]	-1,88	-20,84	-15,95	-6,99	-40,94	-4,31
D50[-]	0,41	0,05	0,11	0,39	0,18	0,46
H[dB]	1,52	12,58	9,18	1,95	6,52	0,69
Grel[dB]	-219,43	-220,04	-219,28	-246,42	-245,7	-245,43
INR[dB]	37	42	42	58	48	59
SNR[dB]	26	31	32	39	36	40
IACC0+[-]	0,41	0,04	0,06	-	-	-
IACC0,80[-]	0,87	0,28	0,31	-	-	-
IACC80,+[-]	0,08	0,04	0,05	-	-	-

Cuadro 2: Parámetros acústicos medidos a 2KHz

Como es de esperarse no existe el parámetro IACC en respuestas impulsivas monoaurales ya que es la correlación cruzada interaural entre lo que percibe el oído derecho y el izquierdo.

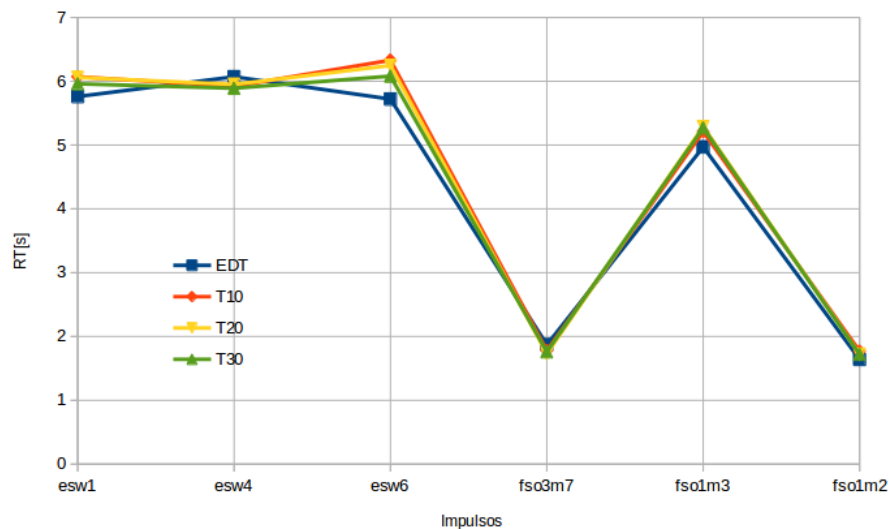


Figura 22: Comparación de tiempos de reverberación

En la Fig. 22 se tiene una comparación de tiempos de reverberación dada en segundos, la cual muestra a las BRIR fso3m7 y fso1m2 como las de menor tiempo, mientras que las MRIR tienen valores similares.



## Conclusión

Observando los tiempos de reverberación en las BRIR existe una similitud entre  $esw1$  y  $esw4$ , lo cual daría a pensar que los recintos pueden ser muy parecidos o iguales, pero teniendo en cuenta sus valores de  $T_s$  hay una clara diferencia de magnitudes, el tiempo central, representa el tiempo sobre el centro de gravedad del recinto, eso quiere decir que son diferentes. En las MRIR existen tiempos de reverberación similares para  $fso3m7$  y  $fso1m2$  y son relativamente pequeños, mientras que claramente  $fso1m3$  muestra valores más altos, por lo que se puede decir que en éstos recintos hubo gran absorción en las MRIR  $fso3m7$  y  $fso1m2$ .

Para el análisis que refiere a la claridad de sonido, se compara los valores de  $C20, C30, C50$  y  $C80$ , éstos están comprendidos prácticamente entre  $-10\text{dB}$  y  $20\text{dB}$ , mientras mayor es su valor, aportan más a la inteligibilidad de la palabra y sonoridad del recinto, por lo que se puede decir que la BRIR de  $esw1$  y las MRIR de  $fso3m7$  y  $fso1m2$  son las mejores respuestas para la claridad del sonido. Esto viene acompañado de lo que representa  $D50$ , la cual establece la relación de energía existente que llega al oyente hasta los  $50\text{ms}$  desde que se emitió el sonido (sonido directo y primeras reflexiones) y la energía total; significa que si el valor se acerca a la unidad, la energía total es contribuida por la que corresponde al sonido directo, prácticamente sin reflexión. Por lo tanto también es un aporte a la inteligibilidad y se puede ver en los valores que son cercanos a la mitad de la energía total.

Analizando los parámetros de SNR, PNR y INR se observa que los valores asociados a las MRIR son mayores que las BRIR, esto se debe a la diferencia que existe de canales, al tener un sólo canal la distribución de energía es captada en mayor proporción que usando dos canales que se encuentran en un simulador torso-cabeza el cual tiene por su forma geométrica absorción y reflexión de sus partes.

Los valores de IACC son mayores para la BRIR  $esw1$  que representan la correlación en reflexiones tempranas ( $IACC_{0,80}$ ), el sonido reverberante ( $IACC_{80,+}$ ) y la correlación interaural que las involucra ( $IACC_{0,+}$ ) mientras que las otras BRIR tienen valores menores y similares entre ellas.



## Referencias

- Carrion Isbert, A. 2001. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Alfaomega, Barcelona.
- Farina, A. 2000. Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique. Preprints of the Audio Engineering Society 108th Convention. Paris, France.
- Dirac 4.0 Demo Help, Acoustics Engineering, Brüel & Kjær.
- C. C. J. M. Hak, R.H.C. Wenmaekers L.C.J. van Luxemburg. Measuring Room Impulse Responses: Impact of the Decay Range on Derived Room Acoustic Parameters. AN Measuring Speech Intelligibility using DIRAC Type 7841. Brüel & Kjær.
- ISO 3382-1:2009 - Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces.
- Everest A., Master Handbook of Acoustic, (2001)
- Lundeby, A., Vigran, T. E., Bietz, H., y Vorlander, M. 1995. Uncertainties of Measurements in Room Acoustics. Acta Acústica united with Acústica, 81(4): 344-355.
- Mankovsky, V. S. 1971. Acoustics of studios and auditoria. Communication Arts Books, New York.
- Martellotta, F. 2010. The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. The Journal of the Acoustical Society of America, 128(2): 654- 663.
- Martin, R. S., Witew, I. B., Arana, M., y Vorlander, M. 2007. Influence of the Source Orientation on the Measurement of Acoustic Parameters. Acta Acústica united with Acústica, 93(3): 387-397.
- Meesawat, K., y Hammershoi, D. 2002. An investigation on the transition from early reflections to a reverberation tail in a BRIR. Proceedings of the 8th International Conference on Auditory Display (ICAD2002). Kyoto, Japan.
- Rife, D. D., y Vanderkooy, J. 1989. Transfer-function measurement with maximum-length sequences. Journal of the Audio Engineering Society, 37(6): 419-444.
- Soulodre, G. A., y Bradley, J. S. 1995. Subjective evaluation of new room acoustic measures. The Journal of the Acoustical Society of America, 98(1): 294-301.
- Tommasini, F. C., Ramos, O. A., y Ferreyra, S. 2008a. Modelado eficiente y validación objetiva de la respuesta impulsiva de un recinto. Mecánica Computacional, XXVII: 443-455.
- Tommasini, F. C., Ramos, O. A., y Ferreyra, S. 2008b. Comparación objetiva de respuestas impulsivas de recintos medidas y simuladas. Actas del VI Congreso Iberoamericano de Acústica (FIA 2008), Buenos Aires, Argentina. Santa Fe, Argentina.
- Vanderkooy, J. 1994. Aspects of MLS measuring systems. Journal of the Audio Engineering Society, 42 (4): 219-231.
- Vorlander, M., y Bietz, H. 1994. Comparison of methods for measuring reverberation time. Acustica, 80 (3): 205-215.
- Hoja de datos Brüel&Kjær 4128 HEADQUARTERS: DK-2850 Nærum · Denmark
- Hoja de datos Brüel&Kjær 4134 DK-2850 Naerum · Denmark