



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

**ESTUDIO ACÚSTICO DE LA SALA XOCHIPILLI DE LA ESCUELA NACIONAL DE MÚSICA
Y PROPUESTA DE MEJORAMIENTO USANDO DIFUSORES.**

**TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:
ING. CITLALLI DÁVILA DELGADO**

**TUTOR PRINCIPAL
DR. FELIPE ORDUÑA BUSTAMANTE
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico**

MÉXICO, D. F. ENERO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

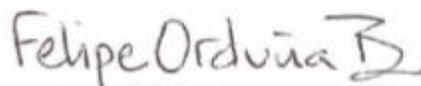
JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Ruíz Boullosa Ricardo.
Secretario: Dr. Pérez Ruiz Santiago Jesús.
Vocal: Dr. Orduña Bustamante Felipe.
1^{er}. Suplente: M. en M. Pérez Acosta Gabriela.
2^{do}. Suplente: Dr. García Valenzuela Pablo.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: CCADET - UNAM, ENM -UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Orduña Bustamante Felipe



FIRMA

Estudio acústico de la sala Xochipilli de la Escuela Nacional de Música y propuesta de mejoramiento usando difusores.

Citlalli Dávila Delgado.

Laboratorio de Acústica y Vibraciones.

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico.

Universidad Nacional Autónoma de México.

Resumen.

El propósito de este proyecto es realizar un estudio acústico de la sala de conciertos Xochipilli de la Escuela Nacional de Música de la UNAM para determinar la posibilidad y la efectividad de mejorar las condiciones acústicas usando difusores. Debido a su diseño con paredes laterales paralelas, el sonido presenta reflexiones que pueden afectar la calidad del sonido en la sala. En esta tesis se propone utilizar difusores para controlar estas reflexiones especulares, a fin de no alterar significativamente el tiempo de reverberación de la sala y para conservar los niveles de sonoridad generados por los músicos. En esta aplicación, el uso de difusores es preferible, frente a la estrategia alternativa de utilizar elementos absorbentes, ya que estos últimos mitigan las reflexiones reduciendo el tiempo de reverberación y la energía sonora. Este proyecto presenta simulaciones de las mejoras obtenidas mediante la utilización de difusores, pero no comprende su implementación práctica en la sala. Se realizaron mediciones *in situ* que muestran reflexiones discretas con un retraso mayor a 60 ms con respecto al sonido directo y con una amplitud perceptualmente notable. Las simulaciones realizadas con el programa CATT-Acoustic™ muestran la respuesta acústica de la sala y el efecto producido con el empleo de difusión. El análisis de los resultados permite concluir que el uso de difusores puede mejorar la respuesta acústica de la sala eliminando las reflexiones que por el tiempo de arribo pueden llegar a influir en la percepción del sonido.

Agradecimientos.

Este trabajo de tesis se llevó a cabo en el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET por lo que me gustaría agradecer por las facilidades que ha dado para desarrollar esta investigación, así como por permitir el uso de sus instalaciones y a todos sus integrantes por hacer de mi estancia una experiencia placentera.

Un agradecimiento especial a la Escuela Nacional de Música de la UNAM por permitir realizar las mediciones en sus instalaciones para llevar a cabo esta investigación.

Agradezco a todos los profesores que durante este periodo me enseñaron a desarrollar un pensamiento científico y analítico, ayudando a mi formación profesional.

Quiero agradecer de manera especial al Dr. Felipe Orduña Bustamante por aceptarme para realizar este trabajo bajo su dirección, por su disponibilidad y apoyo, así como por una excelente supervisión y orientación. Le agradezco también el haberme facilitado siempre los medios necesarios para realizar las actividades propuestas durante el desarrollo de este proyecto.

Me gustaría expresar mi gratitud a mi familia. Quiero agradecer a mis padres por el apoyo incondicional, paciencia, confianza y ánimo que me han brindado y a mis hermanos por compartir su sabiduría y consejos conmigo.

A mis amigos y colegas que de una u otra manera me han apoyado en todo lo necesario para cumplir mis objetivos.

CONTENIDO

1. Introducción.	1
1.1. Descripción del tema de tesis.	1
1.2. Estructura de la tesis.	2
2. Antecedentes.	3
2.1. Campo sonoro en un recinto.	3
2.2. Psicoacústica.	7
2.2.1. Localización de fuentes.	8
2.2.2. Sonoridad.	8
2.2.3. Enmascaramiento.	9
2.3. Percepción del sonido reflejado.	10
2.3.1. Efectos perceptuales del sonido reflejado y umbrales de percepción.	13
2.3.2. Criterio objetivo de percepción de eco.	18
2.4. Difusores.	20
2.4.1. Difusores de formas geométricas.	22
2.4.2. Difusores de Schroeder.	25
2.5. Mediciones acústicas en recintos.	29
2.5.1. Método de medición de la respuesta al impulso.	31
2.5.2. Análisis de la respuesta al impulso.	32
2.6. Parámetros acústicos objetivos.	34
2.7. Modelos computacionales	38
2.7.1. Fuentes de incertidumbre	40
2.7.2. Acústica geométrica	41
2.7.3. Simulación de recintos con el programa CATT-Acoustic™.	48
3. Estudio previo en la terraza del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico - UNAM.	51
3.1. Características físicas del lugar.	51
3.2. Mediciones.	52
3.3. Simulación en CATT-Acoustic™.	55
3.3.1. Análisis de la respuesta acústica temprana.	56
3.3.2. Análisis de ecograma simulado.	57

3.4. Comparación de medición experimental y simulación.	58
4. Sala Xochipilli de la ENM-UNAM.	63
4.1. Características físicas del lugar.	64
4.2. Mediciones.	65
4.3. Simulación en CATT-Acoustic™.	71
4.3.1. <i>Análisis de la respuesta acústica temprana.</i>	73
4.3.2. <i>Análisis de ecograma simulado.</i>	77
4.4. Comparación de medición experimental y simulación.	79
4.5. Criterio de percepción de eco.	83
4.5.1. <i>Umbrales de percepción de eco.</i>	84
4.5.2. <i>Criterio objetivo de percepción de eco.</i>	86
4.6. Parámetros acústicos objetivos.	91
4.7. Propuesta de acondicionamiento utilizando difusión.	94
4.8. Modificaciones en el techo de la sala Xochipilli.	100
5. Conclusiones.	105
Referencias.	107

1. Introducción.

1.1 Descripción del tema de tesis.

En este trabajo se analizan las características acústicas de la sala Xochipilli de la Escuela Nacional de Música, recinto dedicado a la interpretación musical. Al excitar la sala vacía con una señal impulsiva (un aplauso) se percibe un eco de *aleteo* o *flutter*. Se hace la suposición de que debido a su diseño con paredes laterales paralelas existe la posibilidad de que el sonido reflejado en estas paredes provoque ecos o reflexiones que pueden llegar a afectar la calidad del sonido en la sala.

Para comprobar esta hipótesis, se realiza un estudio experimental y computacional con el fin de presentar una propuesta de acondicionamiento acústico que ayude a que la energía reflejada se distribuya de manera homogénea y así mejorar la percepción general del sonido.

El sonido que escuchamos está afectado por las reflexiones en las superficies. El sonido directo viaja de la fuente al escucha y al encontrarse con una frontera se refleja en diferentes direcciones hasta que se desvanece. Las reflexiones ayudan a definir el sonido característico de un recinto.

El que una reflexión se perciba como un eco o no, depende de su retraso con respecto al sonido directo, de su energía, de la naturaleza de la señal de sonido y de la presencia de otras reflexiones que eventualmente pueden enmascarar la reflexión en cuestión.

Los espacios cerrados de grandes dimensiones son susceptibles al problema de ecos discretos. Las longitudes de las largas trayectorias que recorre el sonido para llegar a un oyente y el gran número de asientos cerca y lejos de la fuente de sonido pueden generar problemas de eco con facilidad.

Para evitar esto se debe prestar atención a las superficies que pueden producir reflexiones con un nivel sonoro y un retardo suficiente para percibirse como ecos discretos. Para este tipo de disturbio hay poca tolerancia, pues resulta perceptible en general para la mayoría de las personas.

Las superficies planas producen reflexiones especulares, mientras que las superficies irregulares dispersan la energía incidente en múltiples direcciones.

Las salas de conciertos son lugares que deben contar con características acústicas favorables para música en vivo. Uno de los criterios acústicos básicos para el acondicionamiento de este tipo de salas es evitar la presencia de ecos.

Para el tratamiento de ecos, frecuentemente se trabaja con la estrategia de modificar la absorción de los materiales, pero cuando es necesario conservar tiempos de reverberación adecuados, como en el caso de un auditorio, el uso de difusión es aconsejable.

La difusión del sonido en un recinto mejora la calidad con la que se percibe el sonido, ya que además de eliminar ecos y focalizaciones, aumenta la impresión subjetiva de espacialidad, creando un sonido envolvente.

1.2 Estructura de la tesis.

El trabajo está estructurado en cinco capítulos. El capítulo dos describe los conceptos teóricos básicos necesarios para el desarrollo y el análisis del trabajo, comenzando por describir cómo es el campo sonoro, y cómo se perciben las reflexiones dentro de un recinto, así como los parámetros que indican la calidad del sonido en éste. Se explican los métodos de medición utilizados y se presenta una breve reseña de los modelos computacionales y del software de simulación acústica utilizado (*CATT-Acoustic™*).

Con el propósito de aprender a utilizar el software y estudiar el efecto acústico causado por espacios con paredes paralelas, se realizó un estudio previo en la terraza del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET. El desarrollo de este análisis se muestra en el capítulo tres.

El capítulo cuatro describe el estudio experimental y computacional llevado a cabo en la sala Xochipilli. Se presenta el proceso de medición en la sala y la simulación realizada con el software *CATT-Acoustic™*, además de los resultados obtenidos de la medición experimental y de la simulación. La comparación de los resultados permiten considerar que los resultados obtenidos de la simulación son fiables. Con esta información se realiza un análisis para determinar las condiciones acústicas de la sala. Este análisis se basa en criterios de percepción de eco propuestos por diferentes autores; de igual manera se obtienen los parámetros acústicos que describen aspectos subjetivos de la naturaleza acústica de la sala y finalmente se presenta una propuesta de acondicionamiento utilizando difusión. La última sección está dedicada a las mediciones realizadas después de las modificaciones hechas al techo de la sala Xochipilli, en diciembre del 2012.

En el capítulo cinco se comentan las conclusiones y el trabajo futuro de este proyecto de investigación.

Se incluye un anexo digital que contiene las gráficas de mediciones complementarias que no están reportadas en esta tesis, así como los programas utilizados para el análisis de las respuestas medidas y simuladas.

2. Antecedentes.

2.1. Campo sonoro dentro de un recinto.

En un espacio cerrado, la ley de decaimiento de la intensidad acústica en forma inversa con el cuadrado de la distancia a la fuente, no describe completamente el campo sonoro, ya que además del sonido directo, las reflexiones de las superficies que lo componen afectan la forma en que el nivel del sonido varía con la distancia [14].

Cuando el sonido incide en una superficie es transmitido, absorbido o reflejado. La cantidad de energía transmitida, absorbida o reflejada depende de las propiedades acústicas de la superficie. Si la superficie es sólida y lisa, el sonido se refleja con el mismo ángulo del sonido incidente y se producen *reflexiones especulares*. El comportamiento de estas reflexiones se rige al igual que el de la luz, por la ley de Snell que establece que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. (Figura 2.1)

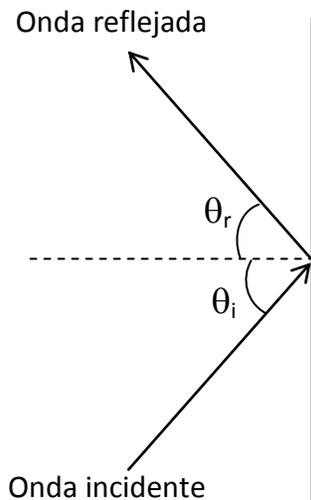


Figura 2.1. Reflexión especular de una onda sobre una superficie reflectante.

Una superficie normalmente no es totalmente plana, sino que presenta algunas irregularidades. Si estas irregularidades son muy pequeñas en comparación a la longitud de onda del sonido incidente, el sonido se reflejará especularmente. Sin embargo, a un determinado intervalo de longitudes de onda una gran fracción de la energía reflejada se dispersará en todas las direcciones. Las reflexiones en este tipo de superficies reciben el nombre de *reflexiones difusas* [10]. Las

reflexiones difusas también ocurren en paredes que son suaves y tienen impedancia no uniforme. El comportamiento de este tipo de reflexiones está representado de manera simplificada por los coeficientes de *difusión* d y *dispersión* s [9]. La proporción de energía reflejada difusamente está dada por el coeficiente de dispersión s .

Las reflexiones difusas de una pared ocurren de acuerdo con la ley de Lambert. Esta ley está basada en observaciones empíricas y describe una superficie perfectamente irregular o difusa. De acuerdo con esta ley, cuando la distribución direccional de energía reflejada o dispersada no depende en ninguna manera de la dirección del sonido incidente, la reflexión de una superficie es totalmente difusa. Al aplicar esta ley, las reflexiones difusas ocurren como se muestra en la *figura 2.2*.

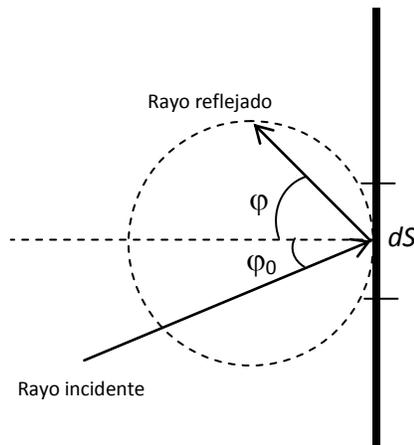


Figura 2.2. Reflexión difusa de sonido de una superficie irregular.

La ley de Lambert se utiliza ya que se ajusta con la filosofía de los modelos geométricos que se basan en técnicas de modelado de alta frecuencia, que es, esencialmente el intervalo de frecuencia donde los modelos geométricos son más correctos.

En el contexto de los métodos de modelado acústico basados en rayos, esta ley establece que si un rayo de sonido¹ incide en un elemento de área dS con un ángulo de incidencia φ_0 respecto a la normal y una intensidad I_0 , la intensidad del sonido que es dispersado $I(r, \varphi)$ en una dirección caracterizada por el ángulo φ , medido a una distancia r de la superficie dS , está dada por:

¹ Un rayo de sonido es una pequeña porción de una onda esférica. Se origina a partir de un cierto punto y tiene una dirección de propagación bien definida.

$$I(r, \varphi) = I_0 dS \frac{\cos \varphi \cos \varphi_0}{\pi r^2} \quad (2.1)$$

Donde I es la intensidad reflejada en la superficie; I_0 es la intensidad incidente en la superficie; φ es el ángulo del receptor a la superficie normal; φ_0 el ángulo de la fuente a la superficie normal; dS es el área de la superficie que está siendo considerada, y r la distancia al receptor.

El sonido que escuchamos dentro de un recinto está afectado por las reflexiones en las superficies. El sonido reflejado por una superficie seguirá siendo reflejado entre las superficies de la habitación, hasta que su energía se desvanezca. Estas reflexiones ayudan a definir el sonido característico de un recinto. (Figura 2.3)

En cuanto a la estructura temporal del campo sonoro, el arribo del *sonido directo* marca convencionalmente el tiempo $t=0$; las primeras reflexiones, llamadas *reflexiones tempranas*, se presentan esporádicamente en instantes de tiempo posteriores (hasta aprox. 50 ms.) [19] y con gran cantidad de energía. La densidad temporal de las reflexiones subsiguientes es mayor debido a que el sonido continúa reflejándose en cada vez más superficies, teniendo que viajar más lejos, por lo que llega más tarde, pero la energía que contienen es menor pues es atenuada en su recorrido por la absorción de las superficies. Estas *reflexiones tardías* son las que percibimos subjetivamente como reverberación, pues aunque llegan de manera discreta, nuestro sistema auditivo se encarga de integrarlas e interpretarlas como un único sonido.

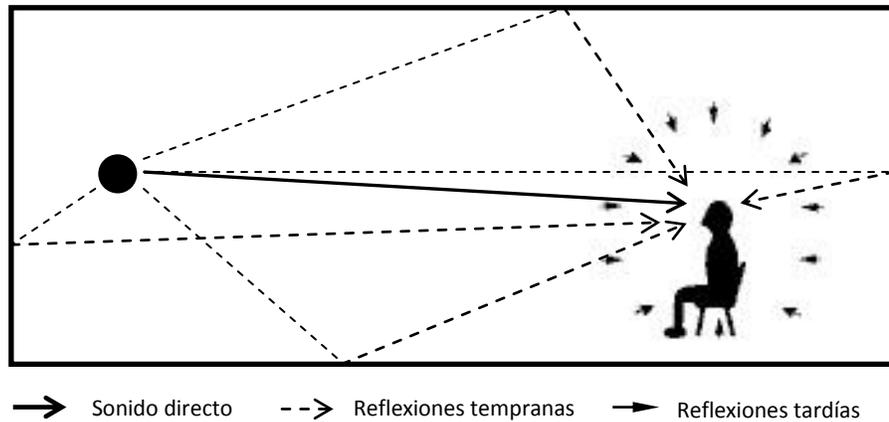


Figura 2.3. Recorrido del sonido directo y las primeras reflexiones.

La información de la estructura temporal de un campo sonoro se puede observar en un diagrama de reflexiones o “ecograma”. (Figura 2.4)

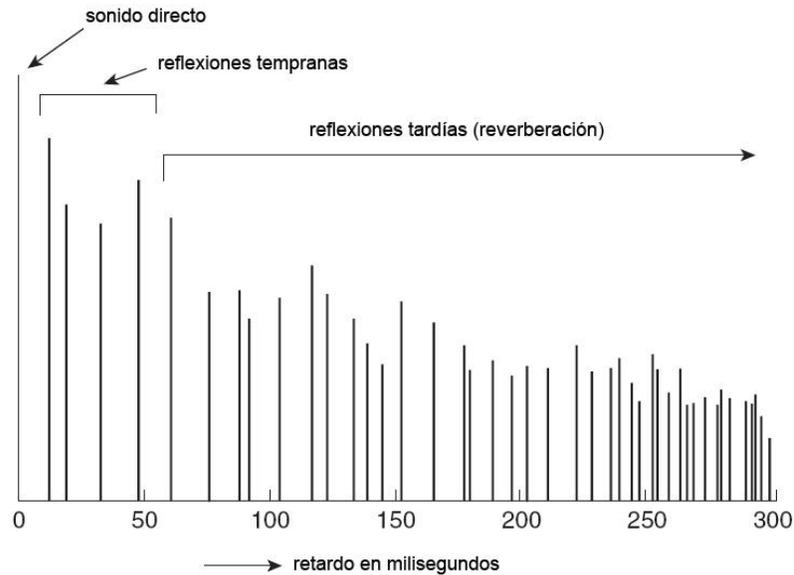


Figura 2.4. Representación esquemática de la distribución temporal de las reflexiones.

En un espacio cerrado, el estudio del campo cercano es de poco interés práctico con respecto a la audiencia debido a su relativamente intrincada variación espacial y compleja dependencia con respecto a la naturaleza y distribución de las fuentes sonoras. Después se encuentra el campo lejano que está conformado por el campo libre y el campo reverberante. Las condiciones de campo libre existen cerca de la fuente, donde predomina el sonido directo y la divergencia esférica prevalece (el nivel de presión sonora decrece 6 dB al duplicar la distancia), en este espacio las reflexiones de las superficies tienen un nivel relativamente menor. Más allá de esta zona, el sonido directo va disminuyendo y el reflejado por las superficies aumenta por lo que comienza a influir en la percepción del sonido. La distancia en la que el sonido directo y el reflejado tienen el mismo nivel se llama *distancia crítica*. Después de esta distancia se localiza el campo reverberante, donde el nivel de sonido es aproximadamente igual en todas partes. Este nivel depende de la cantidad de absorción en la habitación [14].

2.2. Psicoacústica.

La psicoacústica es el estudio de cómo el ser humano percibe el sonido. En acústica arquitectónica ayuda a conocer cómo es percibido por el escucha el sonido directo de la fuente, las reflexiones tempranas y el campo difuso reverberante de un recinto.

Cuando una onda acústica incide en el pabellón auditivo, viaja a través del conducto auditivo hacia el oído medio donde las ondas sonoras se convierten en vibraciones que se transfieren al oído interno cuya función es convertir estas vibraciones en impulsos nerviosos que son enviados al cerebro y crean una sensación llamada sonido.

El oído humano es un órgano muy sensible y complejo y tiene la capacidad para detectar sonidos que se encuentran en determinados intervalos de amplitudes y frecuencias.

La sensibilidad del oído a sonidos de diferentes frecuencias varía en un intervalo de nivel de presión sonora muy amplio. El sonido más tenue audible por el oído humano a 1 kHz corresponde a una presión acústica de 20 μPa . El intervalo audible de presión sonora es muy extenso y además conviene utilizar unidades de medida perceptualmente más apropiadas, en una escala logarítmica, por lo tanto el nivel de presión de sonido (SPL) se representa en decibeles con relación a 20 μPa , que equivale a 0 dB [21].

El intervalo de frecuencias al que es sensible el sistema auditivo es de 20 a 20 000 Hz, aunque este intervalo puede variar entre individuos. Este intervalo de frecuencia cambia como parte del proceso de envejecimiento humano, en particular en términos del límite superior que tiende a reducir [15].

El área de audibilidad está delimitada por dos curvas de umbral (*Figura 2.5*): el umbral de audibilidad (curva A), en el extremo inferior y el umbral de dolor (curva B) en el extremo superior.

La curva A (*umbral de audición*) representa el nivel de presión sonora en cada frecuencia donde los sonidos son apenas audibles y muestra que el oído humano es más sensible alrededor de 3 kHz [4]. Por otra parte, a la frecuencia de 1 kHz, aún cuando no resulta la más sensible, define el nivel de presión de referencia (20 μPa) como 0 dB.

La curva B (*umbral de dolor*) representa el nivel en cada frecuencia con la que se siente un cosquilleo en los oídos. En 3 kHz, esto ocurre a un nivel de presión acústica de aproximadamente 110 dB. Al ser superado este umbral, se produce una sensación de dolor y puede causar daños permanentes. Entre el umbral de la audición y el umbral de sensibilidad está el área de audibilidad [14].

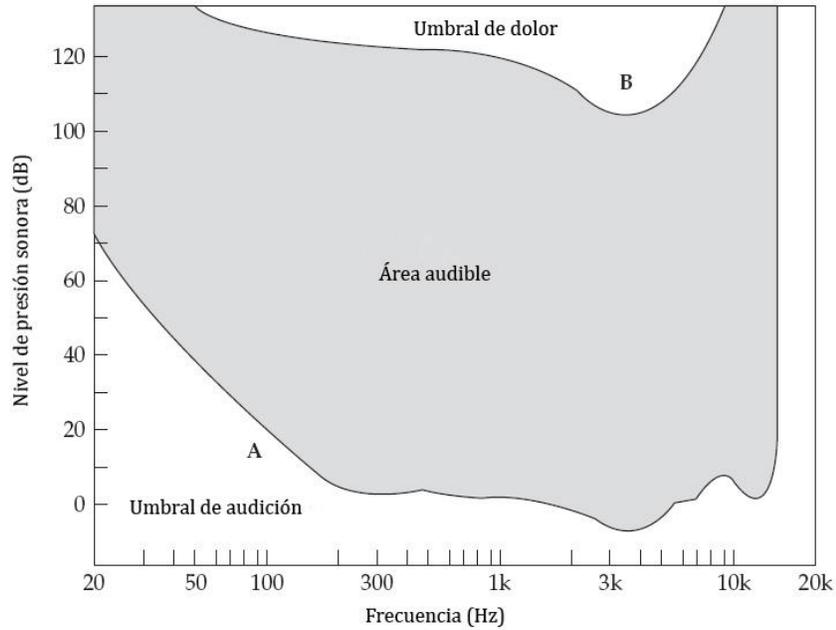


Figura 2.5. Umbrales de audición y dolor

2.2.1. Localización de fuentes

La percepción de la localización de una fuente sonora comienza en el oído externo. Cuando el sonido llega al oído, las ondas sonoras son recogidas por el pabellón auricular, el sonido reflejado desde las crestas, ondulaciones, y las superficies de pabellón de la oreja se combina en la entrada al canal auditivo, con el sonido directo no reflejado. De esta manera el pabellón de la oreja codifica todo el sonido que llega al oído con información direccional, el cual el cerebro decodifica como una percepción direccional. Nuestros oídos son capaces de localizar con precisión la dirección de una fuente en el plano horizontal. En un plano vertical, la capacidad de localización es menos precisa [14].

2.2.2. Sonoridad

La sonoridad es un parámetro subjetivo fundamental del sonido y está relacionada con la intensidad del sonido, aunque no depende sólo de ésta, sino también de la frecuencia, del ancho de banda, del contenido espectral y la duración del sonido [21].

La sonoridad es difícil de medir porque depende de la interpretación subjetiva de lo que escucha una persona.

Las curvas de igual sonoridad medidas por Fletcher y Munson (*Figura 2.6*), se obtuvieron mediante una comparación subjetiva y muestran qué tan intenso debe ser un sonido en términos del nivel de presión sonora (dB) para ser percibido con la misma sonoridad que un tono de 1 kHz a un nivel dado. Las curvas muestran que la sonoridad percibida varía mucho con la frecuencia y el nivel de presión de sonido [14].

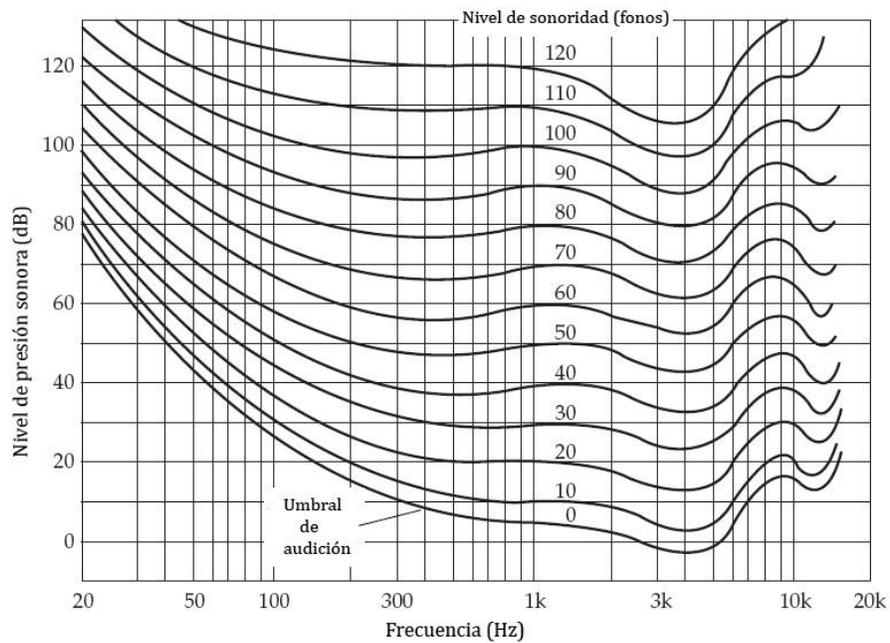


Figura 2.6. Curvas de igual sonoridad

2.2.3. Enmascaramiento

El enmascaramiento es parte de los fenómenos estudiados en psicoacústica y se da cuando la presencia de un sonido afecta la percepción de otro sonido. El enmascaramiento sonoro puede ser definido como un proceso en el cual el umbral de audibilidad correspondiente a un sonido se eleva, debido a la presencia de otro sonido.

Cuanto más intenso sea el tono que enmascara, más amplia es la gama de frecuencias que puede enmascarar [21].

2.3. Percepción del sonido reflejado.

La calidad del habla y la música que se escuchan en un recinto está en función del patrón de reflexiones. La energía sonora que llega al escucha está compuesta de dos partes: el sonido directo y el reflejado o reverberante.

A su vez, las reflexiones tempranas son reflexiones que llegan en un tiempo corto después del sonido directo, pero antes de la parte reverberante. Frecuentemente, estas reflexiones tempranas representan una porción importante de la energía total en la respuesta al impulso.

Estas reflexiones normalmente no se escuchan como eventos separados, sino que son integrados subjetivamente junto con el sonido directo por nuestro sistema auditivo. Por esto, las reflexiones tempranas pueden hacer que el sonido directo se perciba con más fuerza y claridad, y por lo tanto incrementar la sonoridad e inteligibilidad del habla en recintos.

La calidad de la percepción auditiva en recintos depende principalmente del sonido directo y las primeras reflexiones, integradas perceptualmente a éste. Las reflexiones posteriores pueden agregar tanto mejoras, como efectos desagradables que contribuyen a una mala inteligibilidad e incomodidad general en recintos.

Los defectos principales son reflexiones tardías múltiples o muy intensas, coloración, resonancias de la sala, entre otros. No todos estos defectos son importantes en todos los recintos y algunos pueden estar presentes sin afectar el uso principal del recinto [21].

Una reflexión puede tener un efecto audible en el escucha dependiendo de su nivel de amplitud. Si su amplitud es muy baja, se manifiesta sólo como un aumento de la intensidad de la señal de sonido total, un cambio en el timbre, o un aumento del tamaño aparente de la fuente de sonido. Al aumentar la amplitud, la reflexión se vuelve más distinguible y se puede escuchar como un evento separado, es decir, como una repetición de la señal de sonido original. Este efecto se conoce comúnmente como un "eco" [19]. Los ecos se producen cuando un sonido de suficiente intensidad llega después del sonido directo con suficiente retraso (por lo menos 50 ms más tarde que el sonido directo) y se tiene que destacar de las reflexiones contiguas [21].(Figura 2.7).

No se debe confundir el concepto de eco y reverberación, ya que no son lo mismo. El eco es una repetición del sonido original que es claramente perceptible, mientras que la reverberación es una prolongación del sonido a través de múltiples reflexiones, que con frecuencia es beneficioso para la música [21].

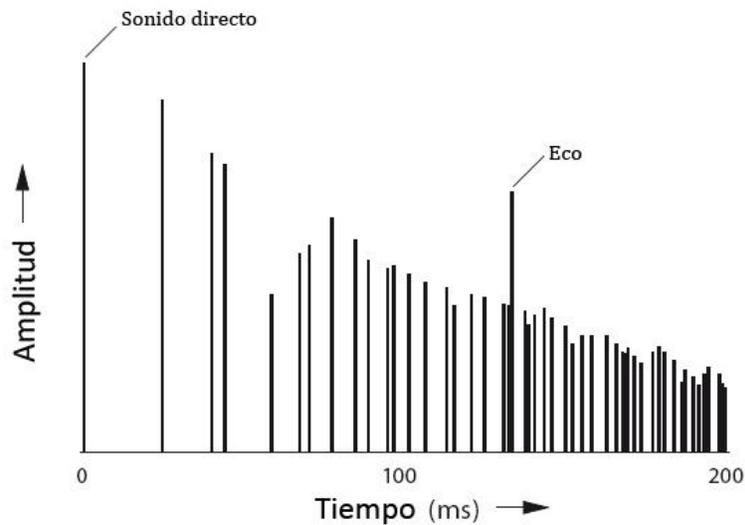


Figura 2.7. Reflectograma donde se representa la presencia de un eco discreto.

El eco se caracteriza por ser una reflexión que sigue un camino más sencillo (esto es, que se refleja en pocas superficies) que otras reflexiones con el mismo retardo, generalmente proveniente de una superficie grande (e.g. una sola reflexión proveniente de la pared trasera de un auditorio) [3]. En todas las habitaciones hay numerosas reflexiones que llegan a más de 50 ms después del sonido directo. Algunas reflexiones con retardos largos (> 50 ms) pueden no percibirse como sonidos separados, pero hacen ininteligible el sonido original [21]. Estas reflexiones son como ecos, en el sentido de que tienen una trayectoria sencilla. La diferencia entre una *reflexión con retardo largo* y un *eco* es el tiempo de arribo, ya que estas reflexiones tienen un tiempo de retardo un poco menor que un eco, es decir, recorren una trayectoria más corta. (Figura 2.8).

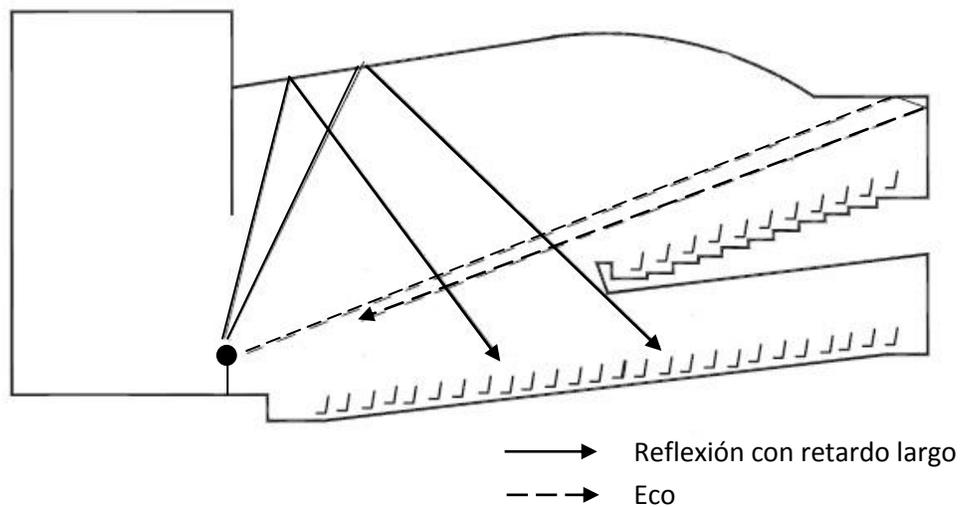


Figura 2.8. Ejemplos que muestran la diferencia entre reflexiones con retardos largos y ecos.

Otro efecto producido es el eco de "aleteo" o eco "flutter". Mientras los ecos implican retrasos grandes (mayores a 50 ms) y longitudes de ruta largas, los ecos "flutter" implican normalmente longitudes de trayectoria corta pero iterada muchas veces [21]. Estas reflexiones repetitivas sucesivas, igualmente espaciadas en el tiempo, pueden ser audibles, y pueden degradar la inteligibilidad de la voz y la calidad de la música.

Estos sonidos persisten a nivel local debido a múltiples reflexiones entre planos paralelos, o superficies cóncavas, pero existen numerosas combinaciones geométricas capaces de producir este fenómeno. Pueden ser causadas por dos, tres, o más reflexiones. La situación más común de eco de aleteo se produce entre dos paredes paralelas. Trayectorias repetitivas más complejas son posibles pero poco frecuentes (Figura 2.9).

Las reflexiones repetidas crean un 'acento' característico. Cuando el tiempo entre las reflexiones es breve, pueden producir un cambio de timbre en la música. Si el tiempo entre reflexiones es mayor que aproximadamente 30 a 50 ms, la periodicidad es audible como un aleteo discreto. Este período de tiempo está dentro de la zona de fusión de Haas², y de otra manera podría ser inaudible, pero la periodicidad del eco hace que sea más audible.

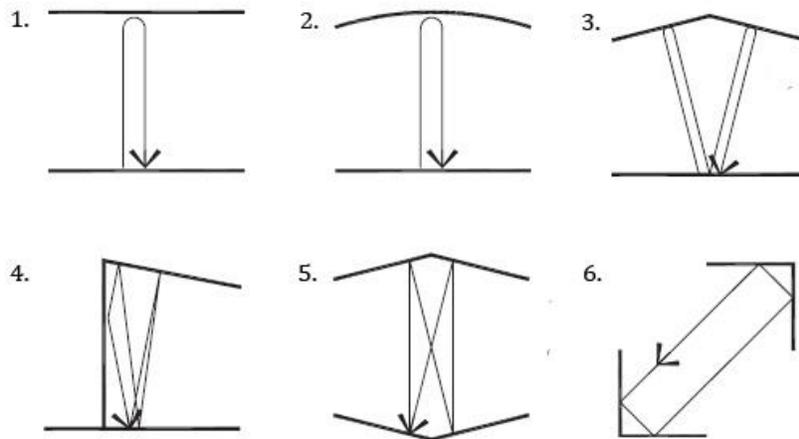


Figura 2.9. Configuraciones que generan eco flutter: 1. Superficies paralelas. 2. Superficies cóncava/plana. 3. Superficie cóncava en ángulo. 4. Superficie cóncava semi angulada. 5. Doble superficie cóncava en ángulo. 6. Esquinas opuestas.

² Zona en la que el sonido reflejado es integrado por el oído junto con el sonido directo, resultando un sonido con mayor intensidad que se escucha como proveniente de la fuente.

2.3.1. Efectos perceptuales del sonido reflejado y umbrales de percepción.

El oído y el cerebro tienen la capacidad de integrar todas las reflexiones que llegan aproximadamente 35 ms después del sonido directo, y combinarlas dando la impresión de que todo este sonido proviene de la dirección de la fuente original, a pesar de que las reflexiones provengan de otras direcciones. Este fenómeno se llama *efecto Haas*.

La energía del sonido integrado en este periodo da una sensación de aumento de volumen (sonoridad). Después de 50 a 80 ms, las reflexiones ya no son integradas por el oído y se escuchan ecos discretos, perceptualmente separados del sonido directo. La zona de transición entre el efecto Haas (para retardos menores a 35 ms) y la percepción de ecos, es gradual, y por lo tanto, indefinido. Si el sonido retardado se atenúa, la zona de fusión se extiende.

Para un oyente que se encuentra en un espacio cerrado, la impresión acústica depende sin duda de las reflexiones. Ya que las reflexiones son inevitables, se han realizado experimentos psicoacústicos que estudian los efectos perceptuales que producen las reflexiones, y han servido como referencia para el desarrollo de umbrales que delimitan zonas en las que las reflexiones comienzan a afectar varios aspectos del sonido.

La mayoría de los resultados presentados provienen de un grupo de investigación del Third Physical Institute en Göttingen, Alemania [19]. De los resultados obtenidos se propusieron los siguientes umbrales, medidos por diferentes investigadores bajo diferentes condiciones experimentales, utilizando diferentes criterios psicoacústicos:

<u>UMBRAL</u>	<u>CRITERIO</u>
• <i>Umbral absoluto de percepción</i>	• <i>Cambio auditivo, reflexión audible.</i>
• <i>Umbral de desplazamiento de imagen</i>	• <i>Cambio en la dirección del evento auditivo</i>
• <i>Umbral de eco</i>	• <i>Dos eventos separados</i>
• <i>Umbral de igual sonoridad entre el sonido directo y el eco</i>	• <i>Misma intensidad de sonido directo y reflexión.</i>

Para definir un umbral, se examina si se manifiesta alguna característica particular que indique que una reflexión está presente además del sonido primario.

Uno de los primeros umbrales de percepción de reflexiones fue obtenido por Seraphim (1961) con base en el criterio psicoacústico de reportar un cambio auditivo, sin considerar un tipo de cambio específico [19]. Al umbral que separa los niveles en los que la reflexión es audible de los niveles en los que la reflexión está enmascarada se le llamó "*umbral absoluto de percepción*", también

conocido como "*umbral de enmascaramiento*" [5]. Este umbral indica los valores más bajos de cualquier umbral de percepción.

En el caso en que sólo se presente una reflexión, el umbral se mide con referencia al tipo de señal, la dirección del sonido incidente y el tiempo de retardo.

Olive y Toole obtuvieron un "*umbral absoluto de percepción*" investigando el efecto de las reflexiones laterales simuladas en un ambiente anecoico, con el habla como la señal de prueba [27]. (*Figura 2.10*).

En relación con el *umbral absoluto de percepción*, se observa que para cualquier retardo en particular, la reflexión no se percibe para los niveles debajo de la curva. A mayores retardos, se requieren niveles de reflexión cada vez más bajos para que una reflexión sea apenas audible [14].

Sin embargo, cuando el nivel de intensidad de la reflexión es igual al del sonido primario, la reflexión excede el umbral absoluto de percepción sin importar el tiempo de retardo.

La respuesta subjetiva de las reflexiones con un alto nivel de intensidad depende del retardo. A medida que el tiempo de retardo aumenta, son evidentes más cambios. Las reflexiones tempranas con un nivel sonoro alto causan el llamado "cambio de imagen", *i.e.* cuando el sonido parece venir de una dirección intermedia entre las direcciones de sonido directo y reflejado [3]. Estos cambios subjetivos fueron estudiados por Olive y Toole, quienes propusieron el "*umbral de desplazamiento de imagen*", que indica el nivel mínimo en el que se percibe que una reflexión lateral causa un cambio en la localización del evento auditivo asociado con el sonido directo (*Figura 2.12*). Por debajo de este umbral, se percibe una sensación de espacialidad. A medida que el nivel de la reflexión se incrementa aproximadamente 10 dB o más por encima del umbral, se aprecia una ampliación de la imagen del sonido.

Otros efectos percibidos son: *aumento del nivel de sonoridad*; *mayor claridad* (si la reflexión llega dentro de 50-80ms después del sonido directo); *coloración*, si el retraso es corto (menor a 30 ms) y el nivel es alto; *cambio en la dirección de la localización*, cuando la reflexión es más fuerte que el sonido directo. Este tipo de cambios subjetivos, causados por reflexiones laterales, fueron estudiados por Barron, usando como señal de prueba música [2]. (*Figura 2.12*).

Después de que un determinado tiempo se excede, el evento auditivo comienza a separarse en dos eventos que se perciben como provenientes de dos direcciones diferentes; al segundo evento se le conoce como "eco" del primero y el tiempo de retardo más corto en el que el segundo evento auditivo se hace audible se le denomina "*umbral de percepción de eco*" o "*umbral de eco*".

El umbral de eco no depende sólo del tipo de señal, sino del tiempo de retardo y el nivel del sonido primario [5].

El nivel que corresponde al *umbral de eco* es considerablemente mayor que el del *umbral absoluto de percepción*. El *umbral de eco* ha sido medido bajo diferentes condiciones experimentales por Haas (1950), Meyer y Schodder(1952) Lochner y Burger (1958), Kietz (1959), Burgtorf (1961), entre otros [5].

Para determinar el nivel en el que una reflexión se percibe como un eco discreto, Meyer y Schodder usaron el criterio de “eco casi inaudible” mientras que Lochner y Burger usaron el criterio de “eco claramente audible”. En este experimento el nivel del eco artificial aumentaba hasta que fuera claramente audible. Los resultados muestran que el nivel al que el eco es percibido depende del retardo entre el sonido principal y el eco, así como en la intensidad del sonido principal. En tiempos de retardo más cortos, el eco es más perceptible antes de escucharse como procedente de una fuente independiente [20]. Esta es una de las razones por las que la curva de Meyer y Schodder (usando el mismo nivel de sonido directo) es inferior que la de Lochner & Burger (*Figura 2.10*). Lochner y Burger muestran que el umbral de eco depende del nivel del sonido primario [5]. El umbral de eco obtenido por Meyer y Schodder muestra que sonidos con retardos superiores a 35 milisegundos se vuelven fácilmente discernibles.

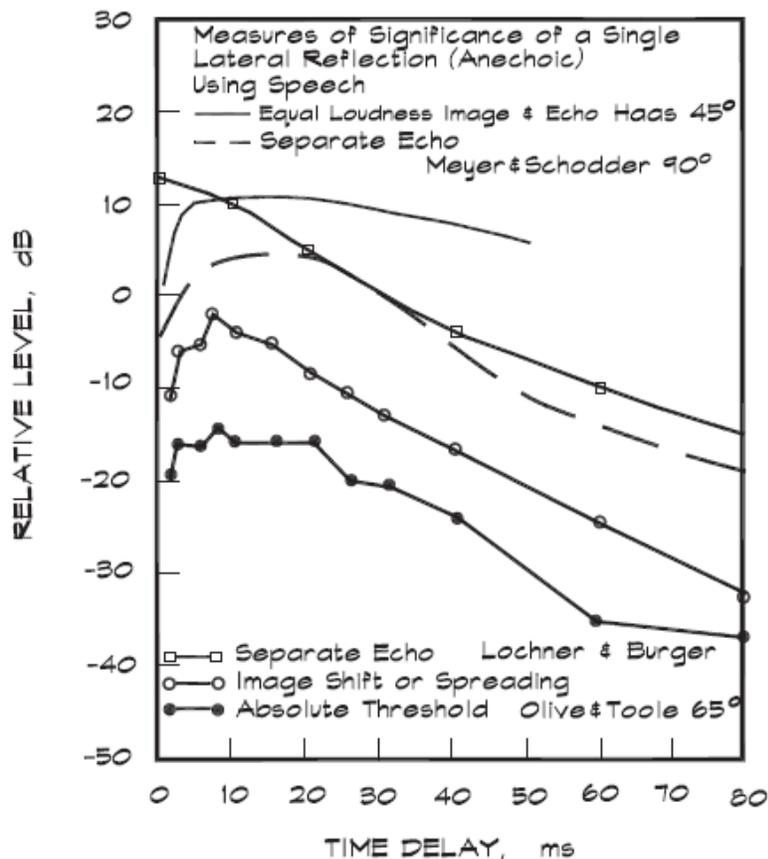


Figura 2.10. Diferentes umbrales de percepción obtenidos con una reflexión lateral [21].

Haas realizó experimentos para conocer a qué nivel sonoro una sola reflexión se escucha con la misma intensidad que el sonido directo, y mostró que las reflexiones con retardos entre 15 y 25 ms se perciben con la misma sonoridad que el sonido directo si la presión sonora de la reflexión es aproximadamente 10 dB mayor que el sonido directo. Estos resultados son independientes del tiempo de retardo y la dirección de la reflexión [12, 19]. El nivel de reflexión crítico en el que tanto el sonido directo como el reflejado se escuchan con la misma intensidad se le llama "*umbral de igual sonoridad entre el sonido directo y el reflejado*" y determina la intensidad relativa que requiere el eco para dar la impresión de que los dos eventos son iguales en intensidad (Figura 2.10). Meyer y Schodder [19] y Lochner y Burger [20] también realizaron investigaciones sobre este efecto y sus resultados apoyan los obtenidos por Haas. La curva de igual sonoridad entre el sonido directo y el eco es similar al umbral de eco pero a un nivel más alto [5].

Los experimentos realizados por estos investigadores se llevaron a cabo utilizando sólo un eco, en un ambiente anecoico y utilizando el habla continua como señal de sonido de prueba.

Sin embargo, se han hecho relativamente pocos avances para el caso de las primeras reflexiones con música.

Barron y Schubert, entre otros, realizaron experimentos similares a los del habla para los diversos tipos de música en habitaciones que eran prácticamente anecoicas, obteniendo *umbrales absolutos de percepción* para la música (Figura 2.11).

En el experimento llevado a cabo por Barron se utilizó música clásica con un amplio rango dinámico como señal de prueba. En este experimento, los individuos tenían que indicar en qué momento dejaban de escuchar la presencia de la reflexión. Los resultados medidos para una sola reflexión, donde la fuente se encuentra en una dirección azimutal de 40° contrarios a las manecillas del reloj, conforman el umbral absoluto de percepción de Barron [2]. (Figura 2.11).

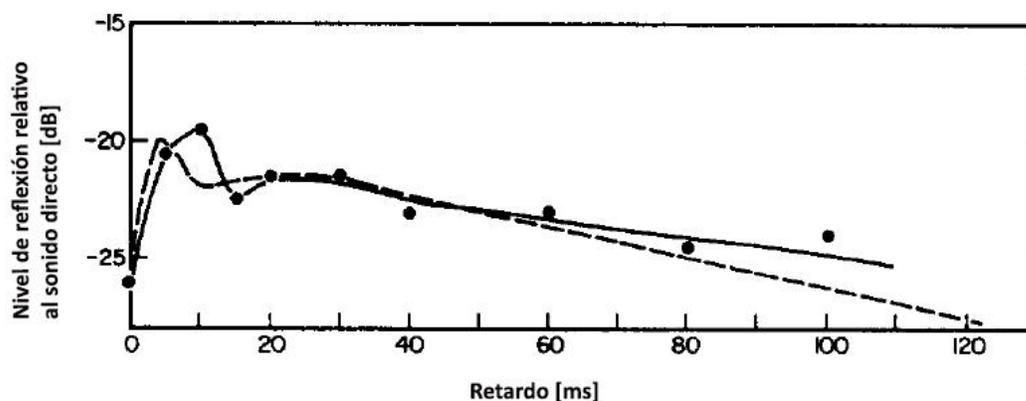


Figura 2.11. Umbral para una sola reflexión lateral usando música como señal de prueba [2].

---- Umbral obtenido por Schubert (ángulo azimutal = 30°)
 — Umbral obtenido por Barron (ángulo azimutal = 40°)

Estos estudios muestran que los umbrales dependen del tipo de señal de sonido. Si la señal de sonido es música en lugar de la voz, nuestro sistema auditivo es menos sensible a las reflexiones. Este es el resultado general de las investigaciones llevadas a cabo por Schubert, que mide el umbral absoluto de percepción con diversos motivos musicales [2, 19]. (Figura 2.11).

El umbral obtenido por Barron para una reflexión lateral concuerda con los resultados de Schubert. Las diferencias entre las curvas se deben a las distintas señales de prueba utilizadas.

Barron fue uno de los que estudió los efectos subjetivos producidos por una sola reflexión usando música como señal de prueba. Dentro de los efectos observados por Barron (mencionados anteriormente), el de mayor interés para este trabajo son las perturbaciones causadas por ecos. En su estudio sobre *efectos subjetivos de las primeras reflexiones en salas de conciertos* [2] menciona que las reflexiones con niveles altos de intensidad y retardos mayores a 50 ms se perciben como eventos molestos que degradan la calidad del sonido, y a medida que el retardo aumenta, el nivel al que inicialmente fueron percibidas como molestas disminuye. La figura 2.12 muestra la curva que delimita los niveles en los que una reflexión se vuelve molesta para el caso de música como señal de sonido principal.

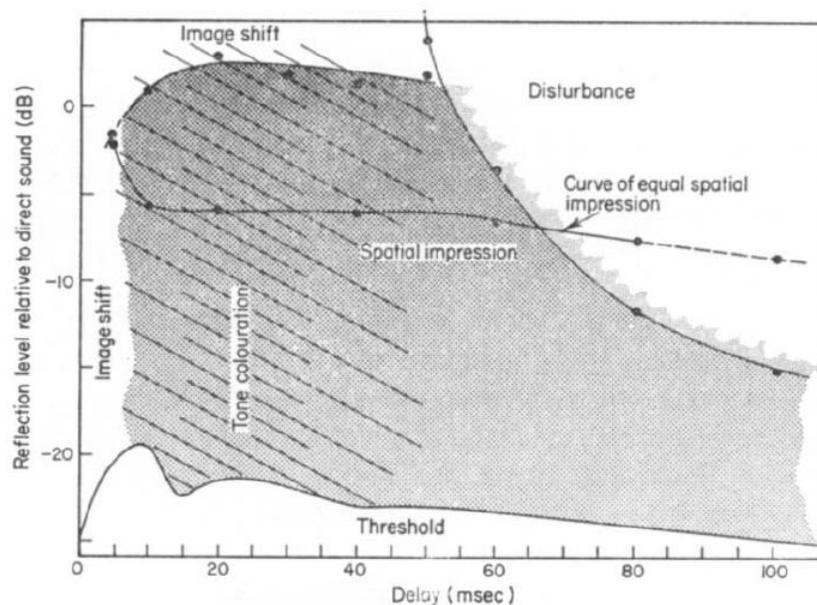


Figura 2.12. Efectos subjetivos de una sola reflexión usando música como señal de prueba (Barron) [2].

De acuerdo con Reichardt y Schmidt [19], si se utiliza música como señal de prueba, se pueden detectar variaciones del nivel de la reflexión tan pequeñas como aproximadamente ± 1.5 dB. Sin embargo, las diferencias en retardos son más difíciles de detectar.

En general, los umbrales para la música son mayores que para el habla. Después de algunos experimentos de inteligibilidad llevados a cabo para determinar el tiempo en el que el sistema auditivo deja de integrar las reflexiones junto con el sonido directo para el habla, se asume que para la música el tiempo crítico es de 50 milisegundos [2].

Además del tipo de señal, la dirección de donde proviene la reflexión influye en el nivel y forma del umbral. Nuestro oído es más sensible a los reflejos que llegan de direcciones laterales que a los que llegan de la parte delantera o trasera. El umbral es notablemente más bajo para reflexiones provenientes de direcciones laterales que las de incidencia frontal. Schubert señala que la variación en el umbral para la música es prácticamente insignificante cuando existen cambios en la elevación de la fuente. Las reflexiones que llegan desde arriba son enmascaradas más eficazmente por el sonido directo que las reflexiones laterales.

2.3.2. Criterio objetivo de percepción de eco.

Además de los umbrales, existe un criterio que determina si un evento intenso (pico) contenido en la respuesta al impulso o "reflectograma" del recinto, corresponde con un eco audible y perjudicial, sujeto a ser eliminado por las medidas constructivas adecuadas o mediante acondicionamiento acústico [19].

Este criterio fue propuesto por Dietsch y Kraak en 1986 [13]. Para la deducción de este criterio, se consideró que la relación entre la presión p_v y el tiempo t_v que caracterizan a una reflexión discreta (eco) permanecen constantes. Donde n es un exponente de ponderación relacionado con el tipo de señal analizado.

$$|p_v|^n t_v = const \quad (2.2)$$

Esto significa que una reflexión temprana debe contener mucha energía para que llegue a ser molesta, mientras que para una reflexión tardía, el nivel puede ser menor. El parámetro acústico que relaciona estas cantidades físicas es el tiempo central, propuesto por Kürer. Cambiando el límite superior de integración de ∞ a una variable determinada, la función de tiempo se define como:

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau |g(t)|^n t dt}{\int_0^\tau |g(t)|^n dt} \quad (2.3)$$

Donde $g(t)$ denota la respuesta al impulso y t_s indica la estructura temporal de la respuesta al impulso. Para una mejor aplicación a nuestro sistema auditivo, se utiliza $n = 1$ cuando el sonido es música, y $n = 2/3$ cuando el sonido es voz.

La cantidad usada para evaluar la fuerza del eco está dada por la relación de aumento de energía para un intervalo de tiempo dado:

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau} \quad (2.4)$$

$\Delta \tau$ toma un valor diferente dependiendo de la señal utilizada. Para música $\Delta \tau = 14 \text{ ms}$ mientras que para voz $\Delta \tau = 9 \text{ ms}$.

El criterio se completa al comparar el valor máximo de esta relación con los valores de umbral determinados por Dietsch y Kraak (*valor crítico de EK*), ya que si el valor máximo del cociente de la diferencia excede este valor, se debe esperar un eco perceptible.

Este criterio determina el riesgo de que el 10% o 50% de la audiencia perciba un eco. La *tabla 2.1* muestra los valores de las constantes utilizadas para el caso de la música y el habla, así como los valores críticos obtenidos por Dietsch & Kraak [13].

Tipo de señal	n	$\Delta \tau$ (ms)	EK [50%]	EK [10%]
Música	1	14	1.8	1.5
Habla	2/3	9	1	0.9

Tabla 2.1. Valores de umbral obtenidos del criterio objetivo de Dietsch & Kraak.

Si se superan los límites del criterio (EK) varias veces, existe el riesgo de percibir un eco múltiple (*eco "flutter"*) si los intervalos mínimos entre ecos consecutivos son 50 ms para la voz y 80 ms para la música.

2.4 Difusores.

En acústica arquitectónica se busca conseguir un campo sonoro difuso dentro de los recintos. Una buena difusión ayuda a suavizar el crecimiento y el decaimiento del sonido en un recinto, resaltando las cualidades naturales de la música y la palabra hablada.

Los difusores están pensados principalmente para controlar las primeras reflexiones, en contraste con la aplicación de absorción para controlar la reverberación. Al dispersar las reflexiones tempranas, se pueden mitigar efectos causados por reflexiones especulares como coloración, desplazamiento de imagen, entre otros. Los difusores también se utilizan para mantener la energía dispersada uniformemente, mejorar la sensación de espacialidad y eliminar ecos.

La función de un difusor se basa principalmente en descomponer los frentes de onda que inciden desde varias direcciones por medio de superficies irregulares o cambios de impedancia, al producir una variación angular en el factor de reflexión (*que expresa los cambios en amplitud y fase durante la reflexión*), haciendo que la reflexión especular se deshaga y la energía se disperse en direcciones no especulares [10].

Además de generar dispersión espacial, los difusores generan una dispersión en el tiempo (*Figura 2.13*).

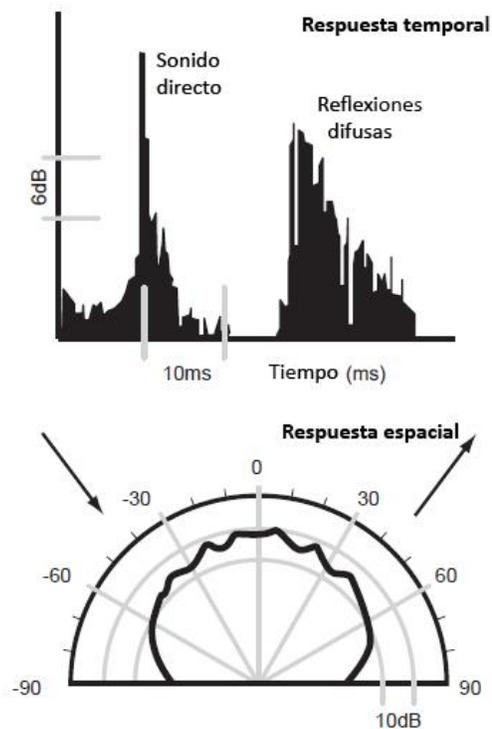


Figura 2.13. *Dispersión temporal y espacial generada por un difusor.*

La dispersión espacial es un concepto útil cuando se evalúa la cobertura del sonido en la audiencia y el escenario, pero como se ha mencionado, a menudo se utilizan difusores para tratar los defectos en ciertas posiciones en una sala, en especial la coloración y ecos. Si se utiliza un difusor para lidiar con la coloración (por ejemplo, filtro de peine), existe la necesidad de considerar tanto una dispersión espacial como temporal.

Un buen difusor necesita generar dispersión espacial y temporal. Por ejemplo, un difusor de Schroeder puede estar diseñado exclusivamente por sus propiedades de dispersión espacial, pero de forma natural genera una dispersión temporal debido a su geometría compleja (siempre que el período sea lo suficientemente amplio).

En recintos dedicados a la interpretación musical, donde se desea conservar la reverberación, se aconseja el uso de difusores [29]. El papel de las superficies difusoras en estos recintos es:

- Dispersar reflexiones tempranas que causan falsa localización de la fuente, coloración y brillo.
- Proporcionar energía difusa lateral temprana con una distribución temporal concentrada.
- Dispersar reflexiones aisladas de alto nivel o ecos flutter que interrumpen la uniformidad de la energía y causan la pérdida de la inteligibilidad.
- Dispersar reflexiones en techos bajos. Esto puede reducir el efecto de filtro de peine para zonas cercanas al techo y posiblemente incrementar la espacialidad al disminuir la energía temprana no lateral.
- Proporcionar un conjunto de reflexiones benéficas que permitan a los intérpretes escucharse entre sí.
- Mejorar la densidad temporal y espacial del sonido reverberante.
- Fomentar reflexiones laterales que crean una sensación envolvente en recintos.

A menudo no es del todo claro si una sala tiene muy poca o demasiada dispersión. Dado que un difusor es también un elemento absorbente, también es obvio que el uso de demasiados a menudo resulta en una disminución de nivel de sonido y el tiempo de reverberación, mientras que el uso de muy pocos no proporcionará una difusión adecuada.

Se ha observado que el posicionamiento de las superficies de difusión apropiados en el punto de las reflexiones tempranas laterales resulta en una mejor "sensación de espacio".

La producción y la colocación de difusores en salas de conciertos sigue siendo un trabajo empírico. Existe la necesidad de realizar más estudios para investigar cuanta difusión se necesita y en donde se debe aplicar.

Es imposible diseñar y aplicar difusores confiables si no se realizan mediciones de las reflexiones que inciden en las superficies. La reflexión de una superficie se puede caracterizar, como se

mencionó en la *sección 2.1*, usando un coeficiente de dispersión, el cual difiere del coeficiente de difusión.

El *coeficiente de difusión (d)* es una medida de la uniformidad del sonido reflejado y se utiliza en el diseño de difusores, entre otras cosas. El *coeficiente de dispersión (s)* indica la cantidad de energía no reflejada de manera especular y no toma en cuenta cómo se dispersa esta energía. El propósito de este coeficiente es caracterizar la dispersión de una superficie para su uso en programas de modelado geométrico de recintos [9, 10].

Se han realizado estudios para conocer qué tipo de superficies irregulares proporcionan el mejor efecto de difusión. Somerville y Ward concluyeron que los elementos difusores con formas geométricas eran los más eficientes y que la profundidad de dichos difusores debía ser al menos de un séptimo de la longitud de onda para que el efecto fuera perceptible. Estudiaron elementos cilíndricos, triangulares y rectangulares y encontraron que los lados rectos del difusor rectangular proporcionaban el mayor efecto tanto para fenómenos en estado estacionario como transitorio [14].

Después de muchas investigaciones y experimentos, Manfred R. Schroeder dedujo que una onda sonora que incide en una rejilla de reflexión dispersaría el sonido casi de manera uniforme en todas las direcciones. Con estos resultados, desarrolló un tipo de difusor basado en una serie de huecos con un ancho constante y diferentes profundidades, separados por divisiones delgadas. La profundidad relativa de cada hueco está determinada por secuencias de números que optimizan la difusión en un plano transversal a la alineación de los huecos [10, 14].

2.4.1. Difusores de formas geométricas.

Superficies triangulares

Las formas triangulares o de pirámide, pueden producir dispersión, formando difusores de "*muesca*", que reducen considerablemente la energía en ciertas direcciones. La cantidad de dispersión de un arreglo de triángulos y pirámides está determinada por la inclinación de las pendientes laterales [10].

En la *figura 2.14* se muestran arreglos de dos triángulos con diferentes pendientes, y la forma en que se refleja el sonido incidente a medida que el ángulo del triángulo (χ) varía.

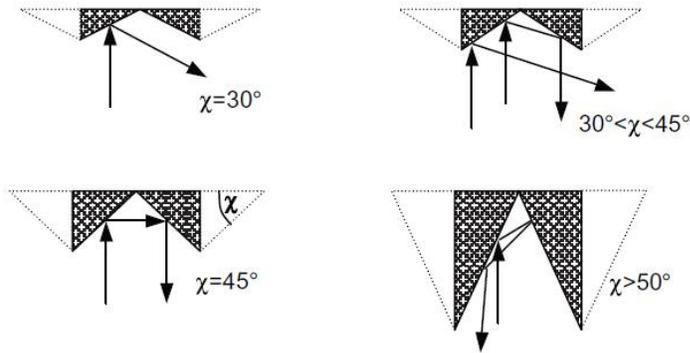


Figura 2.14. Sonido reflejado de superficies triangulares

Superficies cóncavas.

Las superficies cóncavas tienden a concentrar la energía sonora en un punto (Figura 2.15). El radio de la curvatura determina la distancia focal. Mientras menor sea la curvatura del arco, mayor será la distancia a la que se concentra el sonido. El que una superficie de este tipo cause problemas, depende de la posición de la fuente y el receptor. El efecto de focalización sólo es un problema para algunas distancias del receptor cercanas a la distancia focal del arco. Tomando como ejemplo un techo cóncavo, si el foco está muy por encima de la audiencia, la superficie cóncava puede causar dispersión, pero no tan eficazmente como superficies de otra geometría [10].

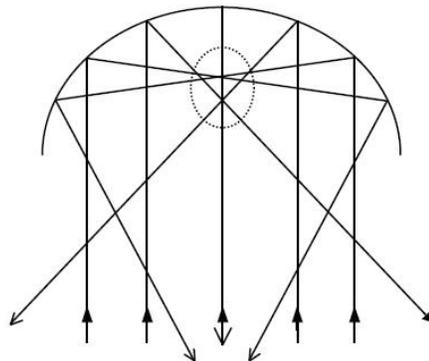


Figura 2.15. Sonido reflejado de superficies cóncavas

Superficies convexas (difusores policilíndricos).

Las superficies de forma convexa, son mucho más eficaces en la difusión espacial de reflexiones, ya que tienden a dispersar el sonido; sin embargo una sola superficie no es de mucha utilidad, se necesitan varias superficies convexas contiguas para lograr un mejor efecto de difusión. La *figura 2.16* muestra la forma en que se dispersa el sonido reflejado en una superficie convexa [10, 14].

La difusión no depende solamente de las características de dispersión de la superficie, sino también de la manera en que se colocan las superficies, ya sea periódica o aleatoriamente.

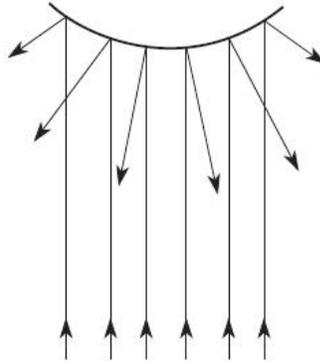


Figura 2.16. *Sonido reflejado de superficies convexas*

Los difusores policilíndricos consisten en un conjunto de superficies lisas de forma convexa dispuestas secuencialmente y con un radio de curvatura inferior a 5 m. Las superficies convexas con un radio de curvatura superior a este valor actúan como reflectores del sonido, es decir como si fuesen superficies planas. Al reducir el radio de curvatura por debajo de este valor, la zona de cobertura aumenta, y por lo tanto, el nivel asociado a cada reflexión es menor. Se pueden utilizar para absorber las bajas frecuencias. Una superficie semicilíndrica produce una excelente dispersión espacial, pero ninguna dispersión temporal.

2.4.2. Difusores de Schroeder.

La idea de Schroeder era diseñar una superficie donde se pudieran utilizar principios matemáticos para su diseño. Usando teoría de números, Schroeder supuso que una superficie con ranuras dispuestas en una cierta manera dispersaría el sonido de una manera más eficiente que otros métodos.

Mediante la introducción de variaciones de fase en un frente de onda, se puede obtener la máxima difusión del sonido reflejado. Fue idea de Schroeder seleccionar los ángulos de fase de acuerdo a ciertas secuencias de números periódicos y utilizarlas en forma de superficies irregulares. Estos elementos de dispersión se conocen como "*difusores de Schroeder*", que desde un punto de vista físico son rejillas de reflexión (RPG por sus siglas en inglés) [19].

Los cambios de fase son generados por una serie de huecos igualmente espaciados por divisiones delgadas y rígidas, con diferentes profundidades. Cuando una onda sonora incide en el arreglo, se generan ondas secundarias dentro de los huecos, las cuales se desplazan hacia el fondo rígido de los huecos donde se reflejan y se vuelven a irradiar en el espacio. La presión en un punto externo del difusor está determinada por la interferencia entre las ondas que radian de cada hueco. Todas estas ondas tienen la misma magnitud pero diferente fase, debido al cambio de fase causado por el tiempo que toma al sonido llegar al fondo del hueco y regresar, por esto la onda reflejada en el exterior del hueco, regresa con un desplazamiento de fase. Por consiguiente, la distribución polar de la presión reflejada por la superficie está determinada por las profundidades de los huecos [10].

La secuencia de diferentes profundidades utilizada puede repetirse múltiples períodos para ampliar el tamaño del difusor.

Dentro de las secuencias más conocidas, estudiadas por Schroeder y utilizadas en la elaboración de difusores RPG se pueden mencionar las *secuencias de máxima longitud*, *secuencias de residuos cuadráticos* y *las secuencias de raíces primitivas*.

Difusores MLS (Maximum Length Sequence).

Schroeder descubrió que las secuencias de máxima longitud (MLS por sus siglas en inglés) se pueden utilizar para crear ruido pseudo-aleatorio mediante la aplicación de ciertas secuencias de +1 y -1, ya que las MLS tienen un espectro de potencia plana en todas las frecuencias.

Existe una estrecha relación entre el espectro de potencia y la dispersión de la superficie. Un espectro de potencia amplio y plano está relacionado con ángulos y coeficientes de reflexión muy diversos, esto indica que la difusión se puede obtener mediante la aplicación de +1 y -1 en una secuencia de máxima longitud.

El -1 propone una reflexión desde la parte inferior de un hueco en una pared con una profundidad de un cuarto de longitud de onda ($\lambda/4$). El $+1$ propone una reflexión de la pared sin ninguna ranura. Debido al requisito de profundidad ($\lambda/4$), las propiedades de difusión de la superficie dependen de la longitud de onda del sonido incidente [14].

Con este tipo de difusores se obtiene una difusión razonable en la banda de octava de la frecuencia para la que se diseña el difusor. La *figura 2.17* muestra la geometría de este tipo de superficie utilizando la secuencia $\{+, +, -, +, -, -, -\}$, así como su patrón polar.

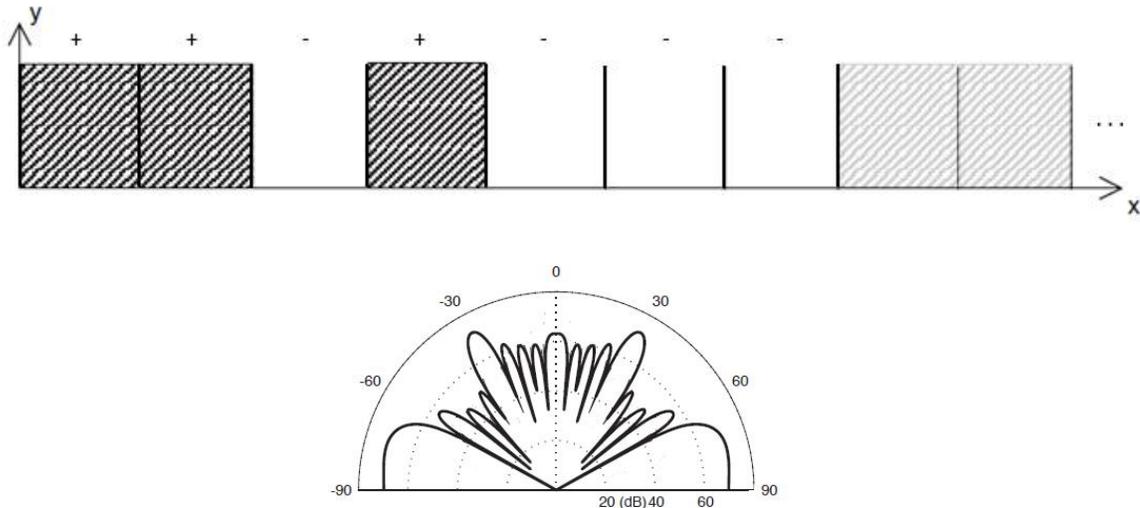


Figura 2.17. Sección transversal de un difusor MLS (superior) y patrón polar de difusión de 5 periodos de un difusor MLS $N=7$ (inferior).

Difusores QRD (Quadratic - Residue Diffusers)

En los difusores de residuo cuadrático, los cambios de fase (o cambios de tiempo) se obtienen por un arreglo de huecos cuyas profundidades se determinan por una secuencia de residuos cuadráticos. Esta secuencia es la más utilizada para formar las profundidades relativas de los huecos. El número de la secuencia para el n -ésimo hueco s_n está dado por:

$$s_n = n^2 \text{ modulo } N \quad (2.5)$$

Donde n es un entero mayor o igual a cero y N es un número primo y es el número de huecos por periodo. Esta secuencia es simétrica.

La profundidad máxima de un hueco es determinada por la longitud de onda de la frecuencia más baja que se desea dispersar y se determina a partir de la secuencia:

$$d_n = \frac{s_n \lambda_0}{2N} \quad (2.6)$$

La frecuencia de diseño se establece normalmente como el límite de frecuencia inferior (λ_0).

El ancho del hueco es de aproximadamente media longitud de onda ($\lambda/2$) de la frecuencia más alta que se desea dispersar.

La frecuencia superior es directamente proporcional al número de huecos por periodo e inversamente proporcional al ancho del hueco. La frecuencia más baja a la que se produce una difusión significativa puede ser determinada asimismo por el ancho del periodo en lugar de la profundidad máxima [14].

La uniformidad de la difusión espacial está determinada por la longitud del período de difusor.

Para que un difusor tenga un desempeño óptimo, debe ser periódico. Si no existe periodicidad, la dispersión en ciertas direcciones tendrá un nivel similar, esto es, que en las respuestas polares habrá ángulos donde la dispersión sea idéntica a otros ángulos. Sin embargo, la dispersión de un difusor de un solo período es más uniforme que un difusor periódico. Si se incluyen muchos periodos la dispersión obtenida es desigual pues se presentan ángulos donde se anulan los niveles, es decir, sin dispersión [10].

La energía que se dispersa desde este tipo de difusores, no sólo lo hace en el espacio, sino también en el tiempo.

La *figura 2.18* muestra la forma de un difusor de residuos cuadráticos basado en el número primo 7, así como el patrón polar originado por este tipo de difusor. Las profundidades de los huecos son proporcionales a la secuencia de números para $N=7 : \{ 0, 1, 4, 2, 2, 4, 1, 0 \}$.

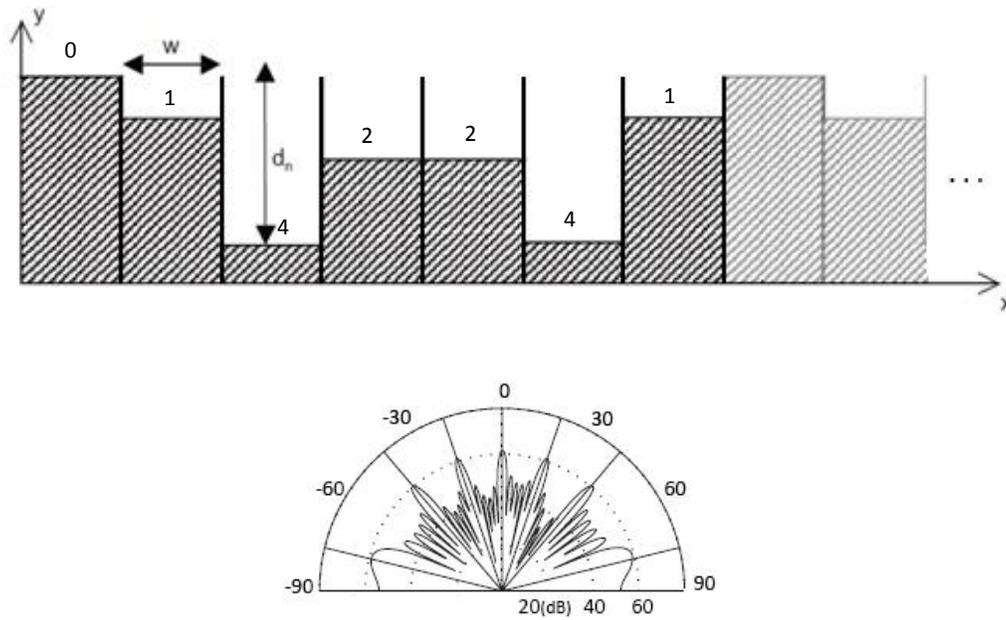


Figura 2.18. Sección transversal de un difusor QRD, $N=7$ (superior) y patrón polar de difusión de 6 periodos (inferior).

Se pueden dividir en dos tipos principalmente: unidimensionales y bidimensionales. Los difusores unidimensionales tienen variaciones de profundidad en una sola dirección y profundidad constante en la dirección ortogonal. Este tipo de difusores dispersa el sonido uniformemente en el eje donde se encuentran las variaciones de profundidad. Los difusores de dos dimensiones dispersan el sonido uniformemente en ambos ejes. Los difusores bidimensionales son útiles cuando se necesita que la energía se distribuya sobre un hemisferio, como en techos o para dispersar una reflexión especular muy fuerte.

Difusores PRD (Primitive - Root Diffusers)

Los difusores de raíces primitivas usan una secuencia basada en la raíz primitiva de un número primo. Los difusores de raíces primitivas no son simétricos [10, 14].

Una secuencia de raíz primitiva se genera con:

$$s_n = r^n \text{ modulo } N \tag{2.7}$$

Donde r es la raíz primitiva de N y N es un número primo. El difusor tendrá $N - 1$ huecos por periodo.

Este tipo de difusor reduce la energía reflejada en la dirección de la reflexión especular produciendo un difusor tipo *muesca* y debe tener energía uniforme en las demás direcciones. La capacidad del difusor para suprimir la reflexión especular mejora al aumentar el número primo.

La limitación acústica en estos difusores es que la reflexión especular no se elimina tan eficazmente como con los difusores QRD.

La *figura 2.19* muestra un periodo de este tipo de difusores; como se observa, estos difusores no son simétricos. La secuencia de raíz primitiva representada es la combinación de $N = 5$ y $r = 2$: { 2, 4, 3, 1}

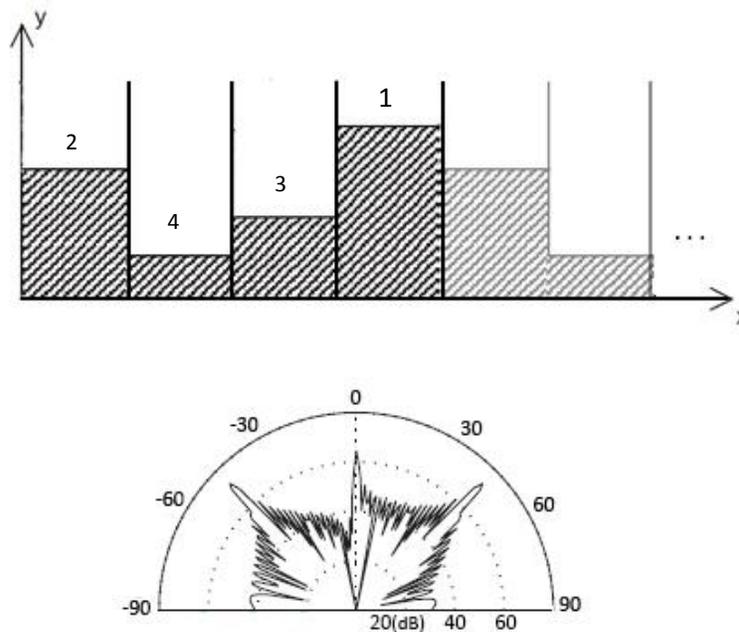


Figura 2.19. Sección transversal de un difusor PRD, $N=5$ (superior) y patrón polar de difusión de 7 periodos (inferior).

2.5 Mediciones acústicas en recintos.

Las mediciones acústicas en recintos son herramientas de diagnóstico valiosas que nos permiten conocer las características acústicas del lugar.

La determinación de la respuesta al impulso de un recinto es un procedimiento fundamental en todas las áreas de acústica.

La respuesta al impulso es el comportamiento de un sistema físico lineal. Un recinto puede ser considerado como un sistema de transmisión acústico, por lo que su respuesta al impulso representa una descripción completa de los cambios que el sonido sufre cuando se desplaza de un punto a otro en una habitación.

La *respuesta al impulso* se define como la respuesta de un sistema lineal e invariante en el tiempo ante una señal de entrada impulsiva. Un impulso consiste en un pulso infinitamente corto en el tiempo con un máximo de amplitud infinitamente alto. Este concepto es imposible en la realidad pero matemáticamente puede ser representado por una función Delta de Dirac [19]. En los sistemas reales no es posible generar un impulso, por lo que se utilizan pulsos muy breves compatibles con el ancho de banda requerido (disparo de una pistola, estallido de un globo, etc.). Debido a que estos pulsos son de muy corta duración y amplitud finita, contienen muy poca energía y la exactitud de las mediciones está limitada, pues el sistema de medición requiere normalmente un intervalo dinámico grande a fin de superar incertidumbres debidas a la presencia de ruido externo o ruido propio de los instrumentos de medición. Por esta razón se utilizan señales que se propagan durante un tiempo más largo y que contienen más energía que un impulso corto. Estas pueden ser señales repetidas pseudo aleatorias [19] o barridos de frecuencia.

En comparación con el uso de señales pseudo aleatorias, las mediciones usando barridos de frecuencia como señal de excitación muestran significativamente mayor inmunidad contra la distorsión (inducida principalmente por el altavoz) y la variación del tiempo. La única limitación en el uso del barrido de frecuencias es el ruido de fondo, pues evita tener una buena relación señal a ruido [26].

La medición debe tener una relación señal a ruido suficiente para permitir que se observe el decaimiento completo de la respuesta acústica. Para mejorar la relación señal a ruido, la medición se realiza varias veces y se promedian los resultados. Si N es el número de mediciones, la energía total de las respuestas al impulso crece en proporción a N^2 , mientras que la energía del ruido resultante sólo crece proporcionalmente a N .

La duración de la medición debe ser lo suficientemente larga para permitir que la curva de decaimiento se estabilice en relación con el ruido de fondo.

Las mediciones requieren una fuente que emita la señal de prueba que cubra el intervalo de frecuencias de interés, un micrófono para captar el sonido en el recinto y un medio para almacenar la señal que recibe el micrófono.

Para la correcta medición de la respuesta al impulso se debe considerar una radiación sonora uniforme, se debe evitar cualquier direccionalidad de la fuente de sonido, de lo contrario el

resultado de la medición dependería no sólo de la posición de la fuente, sino también de su orientación [19].

Para las mediciones que requieren mayor precisión y repetibilidad, es preferible utilizar altavoces omnidireccionales, ya que sus características de potencia y directividad son más estables. Además de que con señales de larga duración, como las mencionadas anteriormente, pueden emitir una gran cantidad de energía sin comprometer su limitada capacidad de reproducción de transitorios; sin embargo, si se aplica una señal impulsiva directamente no pueden emitir suficiente potencia acústica.

Se utilizan micrófonos sensibles a la presión, con características omnidireccionales y las mediciones se realizan en la mayor parte de posiciones posibles. La señal de salida del micrófono se almacena para ser procesada posteriormente [19].

2.5.1. Método de medición de la respuesta al impulso.

El recinto se excita por una señal arbitraria de espectro amplio $s(t)$. La respuesta al impulso se obtiene deconvolucionando la señal de salida. La señal modificada por su transmisión en el cuarto es:

$$s'(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t')g(t-t')dt' = \int_{-\infty}^{\infty} g(t')s(t-t')dt' \quad (2.8)$$

En el dominio de la frecuencia:

$$S'(f) = S(f) \cdot G(f) \quad (2.9)$$

$G(f)$ es la función de transferencia del sistema y puede ser obtenida de:

$$G(f) = \frac{S'(f)}{S(f)} \quad (2.10)$$

Donde $S(f)$ es distinta de cero en el intervalo de frecuencias de interés.

La señal $S(f)$ es la transformada de Fourier de la señal $s(t)$ utilizada, mientras que $S'(f)$ es la transformada de Fourier de la señal reproducida varias veces y promediada. El método para obtener la respuesta al impulso se muestra en la figura 2.20.

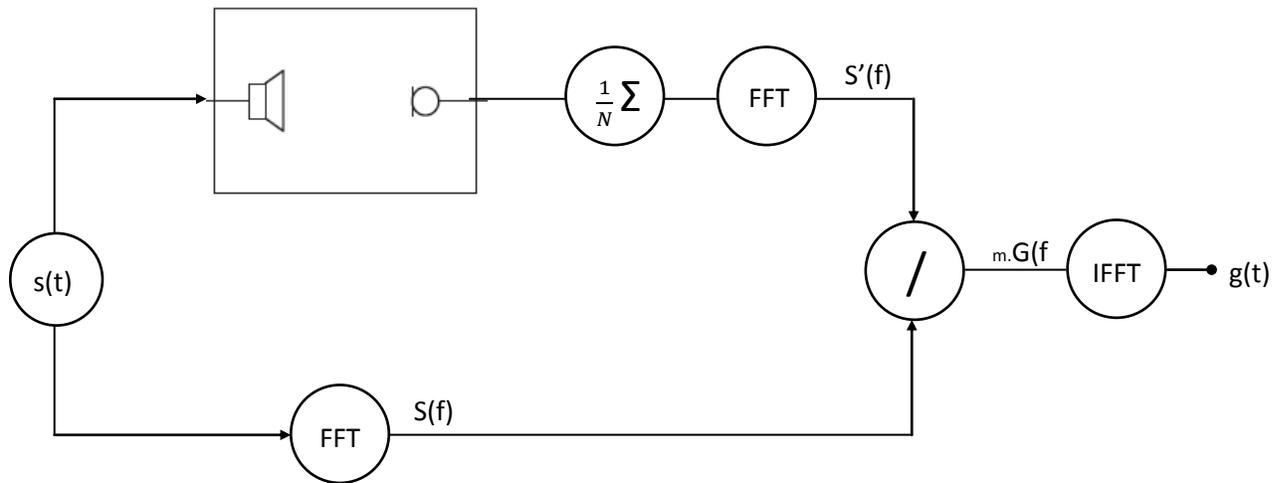


Figura 2.20. Diagrama de método para obtención de la respuesta al impulso.

2.5.2. Análisis de la respuesta al impulso.

La representación gráfica de la respuesta al impulso no es muy fácil de interpretar. Se obtiene una mejor representación de ésta al elevarla al cuadrado y presentándola en una escala logarítmica, lo que permite comparar los niveles relativos de energía [1].

Otra forma práctica de analizar la respuesta al impulso es por medio de su curva envolvente (ETC). Esta curva toma la parte real de la respuesta al impulso y la combina con la misma señal desfasada 90 grados. Para obtener la versión desfasada se utiliza la transformada de Hilbert [19]. La combinación compleja de estas dos señales produce una curva más fácil de interpretar. Se puede pensar en la ETC como una función de suavizado de la respuesta al impulso al cuadrado, la cual muestra la envolvente de la información [1].

Esta curva puede ser a su vez suavizada para simular cómo integra el sonido el oído humano. Para suavizar esta curva, la envolvente se convoluciona con una función $e^{-t/\tau}$. Esto corresponde a aplicarle a la señal un filtro exponencial con una constante de tiempo τ .

Muchos de los parámetros acústicos relacionados con la calidad de la transmisión percibida se derivan de la respuesta al impulso, entre los que podemos mencionar el tiempo de reverberación que se obtiene de la curva de decaimiento.

La curva de decaimiento representa el nivel de la presión sonora en función del tiempo después de que la fuente ha sido apagada. La forma de la curva de decaimiento indica qué tan uniformemente se distribuye el sonido. Si la gráfica que representa el decaimiento (en escala de decibeles) tiene irregularidades o presenta alguna curvatura, y la pendiente no se aproxima a una recta, puede indicar una mezcla de modos con diferentes tiempos de reverberación, lo que representa un decaimiento no exponencial.

Esta curva se obtiene de la integración temporalmente hacia atrás de la respuesta al impulso o integral de Schroeder [33] que se define como:

$$S(t) = \int_t^{\infty} g^2(t') dt' \quad (2.11)$$

Donde $g(t)$ es la respuesta al impulso y $S(t)$ corresponde a la energía que queda en la respuesta al impulso en el momento t .

Se denomina temporalmente hacia atrás porque la integración comienza del final de la respuesta al impulso ($t \rightarrow \infty$) hasta el inicio de la respuesta elevada al cuadrado [16].

$$S(t) = \int_{\infty}^t g^2(t') d(-t') \quad (2.12)$$

En este contexto, el tiempo infinito es el tiempo que dura la grabación. El intervalo de frecuencias en el que las mediciones están hechas normalmente es de seis octavas: 125 a 4000 Hz.

Si el nivel de ruido de fondo no se conoce, se proporciona un margen mayor al tiempo de integración T_0 . La condición para el tiempo de inicio es que no sea menor que el tiempo de reverberación [16].

$$S(t) = \int_{T_0}^t g^2(t')d(-t') \quad (2.13)$$

Mientras más difuso sea el campo sonoro del cuarto, más suave será la respuesta de decaimiento. De manera inversa, un cuarto con ecos producirá una respuesta de decaimiento no uniforme pues la energía se concentra cuando aparecen los ecos.

2.6 Parámetros acústicos objetivos.

El tiempo de reverberación de un recinto es el indicador más importante de sus propiedades acústicas. Además del tiempo de reverberación, existen otras cantidades que proporcionan una descripción más completa de las condiciones acústicas de un recinto y expresan de forma cuantitativa determinados aspectos subjetivos del carácter acústico de un recinto. Esto se hace principalmente mediante la comparación de las energías contenidas en las diferentes partes de la respuesta al impulso $h(t)$.

Cada una de las nuevas medidas evalúa diversos aspectos subjetivos. El nivel de sonido o intensidad percibida está definido por el parámetro de *fuerza sonora* o *sonoridad* (G). La reverberación subjetiva se mide con el parámetro de *tiempo de decaimiento temprano* (EDT). La claridad del sonido percibido se puede determinar mediante tres parámetros diferentes que están correlacionados entre sí: *claridad* (C_{80}), *definición* (D_{50}) y *tiempo central* (T_s) [34]. Dentro de los parámetros relacionados con los aspectos que dan una sensación de espacio está la *fracción de energía lateral* (LEF) relacionado con la anchura aparente de la fuente sonora y la *energía lateral tardía* (LG), que precisa la sensación de sonido envolvente.

Tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación es una medida de la tasa de decaimiento del sonido. Se define como el tiempo en segundos requerido para que el nivel de presión sonora en un cuarto decaiga 60 dB de su nivel original (RT_{60}). El oído es más sensible a la parte inicial de la mayoría de los decaimientos.

Wallace Clement Sabine dedujo la primera ecuación del tiempo de reverberación, también llamada ecuación de Sabine [19]. Sabine fue capaz de aclarar el papel de la absorción en la reverberación de un cuarto. Observó que el tiempo de reverberación depende del volumen del cuarto y de la absorción. Mientras mayor absorción, el tiempo de reverberación es más corto; de igual manera a mayor volumen del cuarto, mayor es el tiempo de reverberación porque el sonido no incidirá tan seguido en las fronteras absorbentes.

Una forma de obtener el tiempo de reverberación es mediante la curva de decaimiento. La tasa de decaimiento en el intervalo de interés se puede aproximar ajustando una recta por el método de ajuste de mínimo error cuadrático. En la práctica, la evaluación se limita a un intervalo más pequeño de la curva de decaimiento, de -5dB a -35 dB, por debajo del valor de arranque, pero todavía en relación con un decaimiento de 60 dB [16, 32]:

$$T_n = \frac{60}{d_n} \quad (2.14)$$

Donde T_n es el tiempo de reverberación y d_n la tasa de decaimiento. El subíndice n expresa el intervalo de decaimiento evaluado. En el caso propuesto anteriormente, el rango evaluado es de 30 dB y se expresa como T_{30} . También se puede utilizar un valor de T_n basado en una tasa de decaimiento evaluada en un rango dinámico menor (T_{15} , T_{20}).

Sonoridad (G).

La fuerza sonora es una medición de la sonoridad percibida en un recinto. Se define como el total de energía en la respuesta al impulso medida en un recinto en relación con el nivel de sonido directo a 10 m de distancia de la fuente en un espacio anecoico.

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} [h(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [h(t)]^2_{10m} dt} \quad (2.15)$$

Tiempo de decaimiento temprano (EDT).

Este parámetro también mide la tasa de decaimiento pero evaluada en la parte inicial de la curva, en el intervalo entre 0 y -10 dB.

$$EDT = \frac{60}{d} \quad (2.16)$$

El valor del tiempo de decaimiento temprano varía a través del recinto, debido a que el comportamiento de la primera parte de la curva está influenciado por los niveles y la distribución de las reflexiones tempranas que dependen de las posiciones de la fuente y el receptor.

El tiempo de decaimiento temprano (EDT) describe mejor el fenómeno perceptual de reverberación que el parámetro T.

Claridad (C).

El índice de claridad o “Klarheitsmaß” caracteriza la transparencia de la música en un recinto y está definido como la relación logarítmica de la energía que llega en la parte temprana y tardía de la respuesta al impulso. El tiempo límite de la parte temprana puede ser 50 ms u 80 ms (C_{50} , C_{80}) dependiendo de si los resultados se refieren a las condiciones para el habla o la música, respectivamente.

$$C_{80} = 10 \log_{10} \left[\frac{\int_0^{80 \text{ ms}} [h(t)]^2 dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} [h(t)]^2 dt} \right] \quad (2.17)$$

Cuanto mayor sea el valor de C , mayor es el sonido en la parte temprana y más alta es la sensación de claridad.

Definición (D).

Uno de los parámetros que determinan la nitidez del sonido es la *Definición (D)* también conocido como "*Deutlichkeit*" y es la relación de la suma de la energía de la parte temprana y la energía total en la respuesta al impulso. Mientras mayor sea la energía del sonido directo y las reflexiones tempranas combinadas, mayor será la definición del sonido, esto debido a la forma en que nuestro sistema auditivo integra el sonido directo con las reflexiones tempranas. Este índice describe de una manera muy eficaz la inteligibilidad del habla.

$$D_{50} = \left[\frac{\int_0^{50 \text{ ms}} [h(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [h(t)]^2 dt} \right] \cdot 100\% \quad (2.18)$$

Tiempo central (t_s).

Este parámetro también se utiliza para describir el equilibrio entre la energía en la parte temprana y tardía, es decir, el equilibrio entre la claridad y la reverberación, y se puede considerar como el centro de gravedad de la respuesta al impulso al cuadrado.

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t [h(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [h(t)]^2 dt} \quad (2.19)$$

Un valor bajo de t_s corresponde a un sonido claro, mientras que los valores más altos indican predominio de la energía tardía reverberante.

Fracción de energía lateral (LEF).

Parámetro objetivo relacionado con la impresión subjetiva de espacio. Se obtiene de la relación entre la energía de las reflexiones tempranas proveniente de los lados y la energía de la parte temprana proveniente de todas direcciones. El intervalo de tiempo temprano se considera hasta 80 ms.

$$LEF = \frac{\int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} [h(t) \cos \theta]^2 dt}{\int_0^{80 \text{ ms}} [h(t)]^2 dt} \quad (2.20)$$

Donde θ es el ángulo entre el eje a través de los oídos del escucha y la dirección del sonido incidente. Esta contribución es independiente de otras reflexiones y de la presencia o ausencia de reverberación.

Energía lateral tardía (LG).

El sonido envolvente está determinado principalmente por la distribución espacial y el nivel de las reflexiones tardías, es decir, las que ocurren después de 80 ms. Este parámetro relaciona la energía de la parte tardía proveniente de las reflexiones laterales en relación con el nivel de sonido directo a 10 m de distancia de la fuente.

$$LG = \frac{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} [h(t) \cos \theta]^2 dt}{\int_0^{t_{dir}} [h(t)]^2_{10m} dt} \quad (2.21)$$

2.7 Modelos Computacionales

Con el rápido avance de las computadoras, se han desarrollado programas de simulación acústica de recintos que permiten estudiar virtualmente el comportamiento acústico de una sala. Este método de análisis es cada vez más utilizado debido a su eficiencia, rapidez y bajo costo, en comparación con las mediciones de los modelos a escala [3].

Los primeros modelos computacionales para el diseño acústico de recintos aparecieron alrededor de 1967 y adquirieron un pleno desarrollo en la década de los noventa [31]. Estos programas son capaces de calcular el tiempo de reverberación y otros parámetros objetivos al definir la geometría de la sala y se especificar las características acústicas de cada superficie.

El uso de expresiones simplificadas para poder llevar a cabo los cálculos en un tiempo razonable provocan que se obtenga una descripción incompleta del comportamiento acústico de la sala, sin embargo, a medida que la sofisticación técnica y la capacidad de las computadoras aumentan, los modelos digitales están mejorando.

Los algoritmos de los programas estándar están basados en los principios de acústica geométrica. El punto de partida de los modelos computacionales es un modelo geométrico con rayos o haces que irradian de una fuente, los cuales posteriormente se reflejan especularmente en las superficies. Algunas dificultades a las que se enfrentan estos modelos son que en realidad las superficies raramente se reflejan especularmente debido a que las superficies pueden ser parcialmente difusas, curvas o existir efectos de difracción. Otra dificultad es que debido a que la parte tardía del sonido se maneja estadísticamente, es difícil definir el momento de transición entre las reflexiones discretas de la parte temprana y la reverberación.[3]

Una manera de introducir la naturaleza de la onda de sonido en modelos geométricos es mediante la asignación de un coeficiente de dispersión para cada superficie. De este modo la reflexión de una superficie se puede modificar de un comportamiento especular puro en un comportamiento más o menos difuso, que ha demostrado ser esencial para el desarrollo de modelos computacionales al generar resultados fiables.

El rendimiento computacional y la precisión de simulaciones de computadora se pueden comprobar solamente si las salas existentes se modelan y los resultados se compararon con los resultados de la medición.

Un reciente acontecimiento han sido los ejercicios de comparación llamados *round-robin*, en los que los programadores utilizan sus programas para predecir el comportamiento acústico del mismo espacio.

Las limitaciones de los modelos computacionales actuales de acústica de salas reportadas en las tres evaluaciones internacionales (1995, 2000, 2002) [8] se resumen en:

- Existen problemas con los algoritmos de cálculo, especialmente cuando se trata de superficies curvas y efectos de difracción en superficies finitas.
- La selección de valores adecuados para los parámetros de entrada es problemática, especialmente de los coeficientes de difusión para los materiales de las superficies.
- No ha habido ninguna validación satisfactoria de auralizaciones generadas por computadora (no hay comparación de los sonidos generados por ordenador con sonidos grabados en las habitaciones reales).

En estas comparaciones, sólo una minoría de los programas han logrado predicciones precisas.

Con el desarrollo de técnicas de modelado por computadora, especialmente como resultado de las retroalimentaciones de las tres evaluaciones internacionales, ahora es posible usarlos como herramientas en el diseño de acústica de salas. Sin embargo, todavía existen muchas incertidumbres asociadas con esta técnica.

2.7.1. Fuentes de incertidumbre.

A pesar de las muchas ventajas de los modelos computacionales sobre los modelos físicos, hay algunos problemas con las técnicas actuales de modelado por computadora [35,36] y la selección de valores de entrada adecuados para estos modelos.

Incetidumbres sistemáticas.

Las razones de las diferencias entre simulaciones y medidas son las deficiencias en los algoritmos y el enfoque de modelado detrás de él.

Nivel de detalle del modelo geométrico del recinto.

Un modelo apropiado de la geometría del lugar (CAD) es esencial para las simulaciones acústicas de la habitación. Los planos que conforman el modelo deben ser grandes en comparación a las longitudes de onda del rango de frecuencias que se desea cubrir. Los resultados pueden ser erróneos debido a una elección incorrecta del nivel de detalle del modelo geométrico.

Superficies curvas.

Ningún software de simulación permite el modelado de superficies curvas. Normalmente una superficie curva se aproxima con varios planos. Las superficies curvas generan puntos de focalización; sin embargo, los modelos computacionales basados en el método de fuentes imagen no son capaces de describir estas focalizaciones de presión.

Difracción.

Este fenómeno no es tomado en cuenta en los algoritmos básicos que utilizan las simulaciones. Existieron algunas ideas de incluir la difracción como una característica estadística en los modelos de rayos, pero no tuvo éxito debido a que el aumento de tiempo de cálculo se volvía un problema grave.

Incertidumbres estocásticas

Este tipo de incertidumbres en simulaciones se pueden presentar por datos de entrada inciertos, sobre todo por las condiciones de frontera de absorción y dispersión. Estos datos se toman a menudo a partir de bases de datos o libros de texto, o son bases de datos integradas en el software.

Número de rayos.

Para evitar que alguna reflexión (o fuente imagen) no sea considerada, se deben usar suficientes rayos en la simulación.

Coefficientes de absorción.

En diferentes bibliografías se encuentran disponibles tablas con coeficientes de absorción. Existen pocos estudios sobre la influencia de las características de los materiales en los resultados de las simulaciones. La idea que concierne a los programas de simulación se enfoca en la implementación de la absorción, si es que se debe modelar dependiente del ángulo de incidencia o con incidencia aleatoria (constante). Si el campo sonoro es lo suficientemente difuso, los datos de incidencia aleatoria son suficientes.

Coefficientes de dispersión.

No existen tablas de coeficientes de dispersión y de igual manera existe la duda de si la dispersión se debe implementar dependiente del ángulo o como un promedio de incidencia aleatoria.

Los usuarios de las herramientas de predicción no pueden estar seguros de que van a obtener resultados correctos cuando utilizan algunos datos de los materiales publicados y modelos CAD creados individualmente de la forma de la habitación. Sin embargo, la fiabilidad de los resultados a menudo se da por sentado.

Mientras el usuario no esté seguro de cuantos rayos utilizar, que tan detallado debe ser el modelo de la geometría de la sala, qué coeficientes de dispersión utilizar y en qué momento hacer la transición entre la parte temprana y tardía, los resultados pueden ser inciertos.

2.7.2. Acústica geométrica.

A altas frecuencias, en las que las dimensiones del cuarto y las paredes son mucho mayores a la longitud de onda del sonido, las resonancias se mezclan en un número cada vez mayor en cada intervalo de frecuencia y el procedimiento de usar modos normales de vibración para representar

el comportamiento acústico de un recinto se complica y no es fácil de calcular. Para simplificar este procedimiento se ha optado por utilizar términos análogos a la óptica geométrica, en donde el concepto de onda es reemplazado por el concepto de rayo acústico, el cual comprende una pequeña porción de una onda esférica originada desde cierto punto. A este modelo conceptual se le llama *acústica geométrica* [11, 19].

La primera suposición en acústica geométrica es que la densidad de energía es distribuida uniformemente en todo el recinto. Para que esta suposición sea válida, deben existir un gran número de ondas estacionarias, así, los nodos de cada onda estacionaria son ocupadas por otras ondas estacionarias. Dado que cada onda estacionaria se puede considerar como un conjunto de ondas planas viajeras que se reflejan en las paredes con diferentes ángulos, la presión sonora en un punto dado del recinto es la resultante de la superposición de muchas ondas planas, viajando en diferentes direcciones, cada una con diferentes amplitudes de presión. Estas ondas planas están distribuidas aleatoriamente por lo que la densidad de energía en el cuarto no depende de la posición ni orientación, por lo tanto la intensidad o flujo de energía es isotrópica.

Se asume que las propiedades de absorción de las superficies de las paredes están representadas por un coeficiente de absorción, que determina la fracción de energía acústica incidente que es absorbida por una porción de la superficie [23,24].

Se hace la suposición de que el recinto es lo suficientemente grande para que el sonido producido por la fuente excite muchos modos de los modos normales de la sala, que la forma de la pared es lo suficientemente irregular para que el sonido se disperse en todas direcciones por todo el cuarto, y que existe suficiente material absorbente en las paredes para que el sonido no tarde mucho tiempo en extinguirse después de la fuente ha sido apagada. Además de esto, cerca de la pared existen efectos de interferencia a ciertas longitudes de onda debido a un efecto de reforzamiento de la onda reflejada [23].

En acústica geométrica es importante considerar la forma en que se refleja el rayo en la pared, en estas circunstancias, la transición a otro medio y la refracción no ocurren, los fenómenos de difracción son ignorados al igual que la interferencia, en este caso, si varios componentes de un campo sonoro se superponen, sus intensidades se suman [19].

La transición entre el análisis de modos normales y el de acústica geométrica no es muy clara. La densidad de frecuencia de los modos normales aumenta rápidamente a medida que la frecuencia central de la banda (o el tamaño del recinto) se incrementa. Mientras más próximas se encuentren las frecuencias de resonancia, más difuso será el campo. Si a una frecuencia f al menos tres ondas estacionarias se pueden excitar, el comportamiento del campo resultante es difícil de prever. Un criterio para definir la frecuencia por encima de la cual se considera que un recinto de volumen V con un tiempo de reverberación T tiene un campo sonoro bastante difuso es la llamada frecuencia de Schroeder f_s [19,21, 17]:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad (2.22)$$

Por encima de la frecuencia de Schroeder es apropiado analizar la respuesta acústica del cuarto sin tomar en cuenta el comportamiento de sus modos normales. Se ha observado que la respuesta acústica de un cuarto se vuelve menos uniforme mientras más simétrico sea.

Esta teoría sólo es representativa para medias y altas frecuencias. Existen dos grandes métodos de acústica geométrica: método de trazado de rayos y método de fuentes imagen. Estos métodos son los utilizados principalmente en los programas de simulación acústica.

Es evidente que la acústica geométrica puede reflejar sólo un aspecto parcial de los fenómenos acústicos que se producen en un recinto. Sin embargo este aspecto es de gran importancia debido a su simplicidad conceptual .

Método de fuentes imagen.

El método de fuentes imagen está basado en el principio de que una reflexión especular se puede construir geoméricamente mediante la duplicación de la fuente en el plano de la superficie reflejante. A esta fuente virtual se le conoce como fuente imagen y su contribución al receptor es idéntica a la reflexión desde la pared. Está acústicamente situada detrás de la superficie reflejante a una distancia a la superficie reflejante igual que la fuente original.

Cada fuente imagen genera una reflexión de primer orden. Se generan fuentes imagen de las fuentes imagen hasta conseguir el orden deseado de reflexión. (*Figura 2.21*)

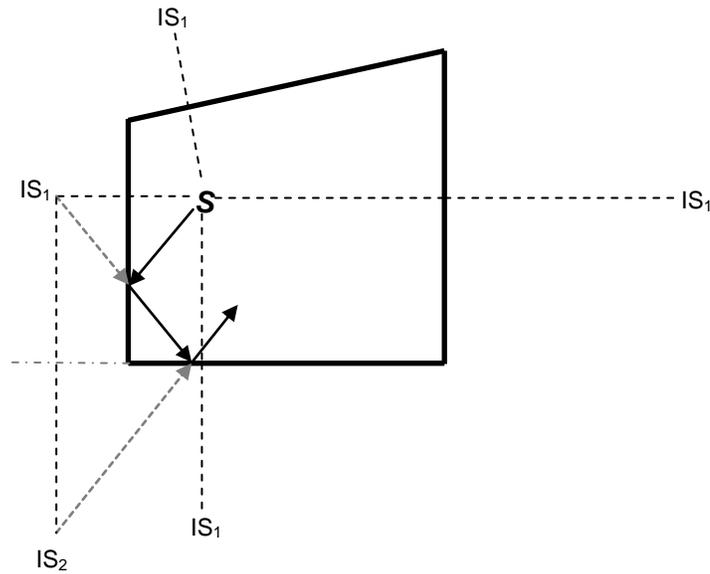


Figura 2.21. Fuentes imagen de primero (IS_1) y segundo orden (IS_2).

Utilizando esta técnica se pueden ignorar las superficies como tal, y considerar el sonido como proveniente de muchas fuentes imagen que llegan al receptor con retardos de tiempo en función de su distancia a la fuente. La magnitud de las imágenes depende de la capacidad de absorción de la superficie reflejante, y el número de veces que se ha reflejado la fuente imagen [14].

Si el recinto tiene un volumen V , el número aproximado de fuentes imagen dentro de un radio ct es:

$$N_{refl} = \frac{4\pi c^3}{3V} t^3 \quad (2.23)$$

Esta ecuación indica el número estimado de reflexiones que llegarán al receptor hasta el tiempo t después de que un sonido fue emitido y es válida para cualquier tipo de geometría.

La ventaja del método de fuentes imagen es que es muy preciso, pero si la forma del recinto es muy irregular se vuelve complicado, ya que el número posible de fuentes imagen se incrementa de manera exponencial con el orden de la reflexión. Por lo tanto este método no es apropiado para reflexiones de órdenes mayores.

El principio de fuentes imagen es simple e iterativo. El número de posibles fuentes imagen aumenta exponencialmente con el orden de la reflexión [18]. Con n superficies, existen n posibles fuentes imagen de primer orden, cada una de éstas puede crear $(n - 1)$ fuentes imagen de segundo orden. El número total de fuentes imagen hasta determinado orden se obtiene de la siguiente relación:

$$N(i_0) = n \frac{(n - 1)^{i_0} - 1}{n - 2} \quad (2.24)$$

Donde i_0 determina el orden de las reflexiones.

Se asume que la fuente imagen emite exactamente la misma señal sonora que la fuente original y que sus características de direccionalidad son simétricas a la fuente original.

Cuando se aplica a una sala rectangular, todas las fuentes imagen son visibles desde cualquier posición en la sala y el cálculo es rápido. Sin embargo, en recintos irregulares no es así, por lo que es necesario realizar pruebas de visibilidad para cada fuente imagen. Las fuentes imagen de orden superior son en su mayoría invisibles. Este método sólo se utiliza hasta cierto orden de reflexiones donde los pruebas de visibilidad son todavía simples.

La señal de sonido recibida en un punto dado se obtiene de la superposición de las contribuciones de todas las fuentes imagen visibles, bajo la suposición de que todas las fuentes, incluyendo la original emiten la misma señal de sonido simultáneamente.

A medida que los rayos se propagan y reflejan, su potencia es atenuada por el coeficiente de reflexión de energía de la pared definido como $R = 1 - \alpha$, donde α es el coeficiente de absorción de energía.

Las implementaciones prácticas que utilizan la acústica geométrica suelen pasar a otro método llamado de trazado de rayos después de 6-8 órdenes de fuentes imagen como máximo, debido al aumento exponencial de fuentes imagen para reflexiones de orden superior.

Trazado de rayos.

Este método asume que un gran número de rayos se emiten en varias direcciones desde una fuente propagándose por todo el recinto y perdiendo energía en cada reflexión de acuerdo al coeficiente de absorción de cada superficie.

Con el fin de obtener un resultado de cálculo relacionado con una posición específica del receptor es necesario definir ya sea un área o un volumen alrededor del receptor con el fin de atrapar los rayos cuando pasan por la zona definida.

Cada rayo viaja en una trayectoria recta hasta que llega a una pared, en este punto el rayo se refleja ya sea especular o difusamente y se define una nueva dirección de propagación.. Este principio se ilustra en la *figura 2.22*.

Si la reflexión es especular, la dirección que toma el rayo reflejado se calcula a partir de la ley de reflexión geométrica mencionada anteriormente; en caso de ser difusa, la distribución direccional de la reflexión se rige por la ley de Lambert [19]. Asimismo, a cada superficie se le asigna un coeficiente de dispersión s , lo que significa que una fracción s de todos los rayos que llegan experimenta una reflexión difusa, mientras que los restantes se reflejan especularmente. Después de esta reflexión, el rayo continúa su trayecto en esta nueva dirección hacia la siguiente pared.

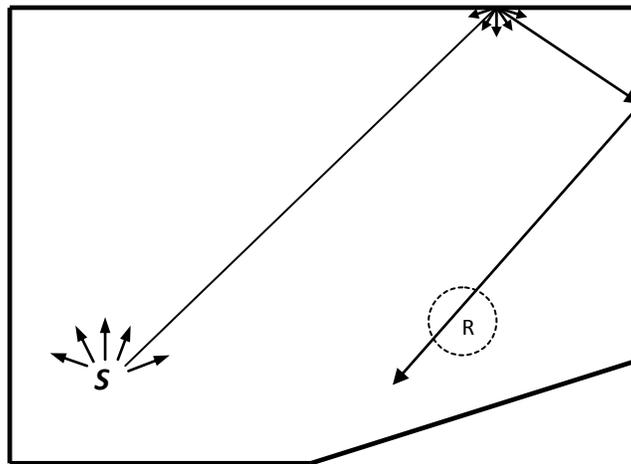


Figura 2.22. Principio de trazado de rayos. S denota la fuente y R el receptor.

El coeficiente de absorción de energía α se considera de dos maneras: ya sea mediante la reducción de la energía del rayo, al multiplicarlo por el factor $1 - \alpha$ después de cada reflexión o considerando el coeficiente de absorción como la probabilidad de que ocurra una reflexión, es decir, ya sea que el rayo se refleje de manera especular o no se refleje en absoluto.

Los resultados de estos procedimientos son recolectados por la geometría del receptor. Cada vez que el rayo atraviesa al receptor, la energía y tiempo de llegada son almacenados. Ya que el total del número especificado de rayos se han calculado, las energías almacenadas se clasifican con respecto a los tiempos de llegada de los rayos y se obtiene como resultado un histograma, que representa la señal de energía captada por el receptor en función del tiempo. De estos datos se pueden calcular los parámetros acústicos.

Dependiendo del número de rayos emitidos, puede darse la probabilidad de omitir paredes pequeñas y hasta receptores. Para evitar esto es necesario utilizar una gran cantidad de rayos.

Existe una alta probabilidad de que un rayo descubra una superficie de área A después de haber viajado un tiempo t si el área del frente de onda por rayo no es mayor que $A/2$. Esto conduce a la cantidad mínima de rayos:

$$N \geq \frac{8\pi c^2}{A} t^2 \quad (2.25)$$

Donde c es la velocidad del sonido en el aire.

Los primeros modelos estaban destinados principalmente a dar gráficas que mostraban la distribución de las reflexiones. El método se desarrolló aún más, y con el fin de calcular una respuesta en un punto, los rayos se transfirieron a conos circulares. En este método los rayos tienen un área circular que aumenta a medida que el rayo diverge. Por esto, los receptores se pueden modelar como un punto. Recientemente, los modelos de trazado de rayos han desarrollado modelos que utilizan pirámides triangulares en lugar de conos circulares.

Métodos híbridos.

El método de trazado de rayos proporciona información de la respuesta impulso en baja resolución, mientras que el método de fuentes de imagen puede ser utilizado para la construcción exacta de la amplitud y el retardo de las reflexiones.

Los métodos híbridos combinan las mejores características de ambos modelos dando lugar a tiempos de cálculo significativamente menores [30].

Un modelo híbrido divide la historia temporal de la sala en un período temprano, en donde se calculan las reflexiones individuales, y un período tardío donde sólo permanece la reverberación.

La división está basada en una selección del orden de reflexión por parte del usuario, después de la cual se usa un coeficiente de difusión. La visibilidad del receptor también se debe revisar para las reflexiones difusas.

Debido a que las reflexiones tempranas se determinan con mayor precisión que las tardías, se podría pensar que se obtienen mejores resultados al seleccionar como transición un orden de reflexión lo más alto posible. Sin embargo, para un número dado de rayos, la posibilidad de perder algunas fuentes imagen aumenta con el orden de la reflexión.

Rindel sostiene que en un modelo híbrido de un orden de reflexión bajo (2 a 3) y un número relativamente pequeño de rayos (500 a 1000) debe ser suficiente para caracterizar un auditorio típico.

2.7.3. Simulación de recintos con el programa CATT-Acoustic™

Un programa de simulación, dentro de sus limitaciones, puede comprobar qué tan bien puede funcionar un determinado diseño acústico de un recinto.

CATT-Acoustic™ [6, 7] es un software de simulación que permite hacer predicciones sobre el comportamiento acústico de recintos una vez representada su geometría.

La geometría del recinto se define mediante las coordenadas de las esquinas de cada superficie que conforman el recinto. Con estos puntos se definen los diferentes planos. Después de construir una imagen tridimensional detallada, se especifican los coeficientes de absorción y dispersión para cada superficie, los cuales pueden ser introducidos por el usuario o estimados por el programa.

Asimismo, se define la posición y características de la fuente a utilizar y se ubica al receptor o receptores dentro de un plano que conforme al recinto.

El software dispone de diferentes métodos de simulación acústica basadas en acústica geométrica. En estas predicciones se emplea el modelo de fuentes imagen para las reflexiones tempranas y diferentes variantes del método de trazado de rayos para el decaimiento tardío.

Métodos de predicción.

Parte temprana detallada ISM.

Utiliza el Modelo de Fuentes Imagen (*ISM* por sus siglas en inglés) incluyendo reflexiones difusas de primer orden. Este método está pensado para el análisis detallado de las reflexiones de la parte temprana y no estima ningún parámetro acústico global (tiempos de reverberación u otros).

La predicción basada en este método determina todas las reflexiones especulares entre la fuente y el escucha al calcular las fuentes imagen de primer orden de la fuente principal en todos los planos reflejantes, así como las de segundo orden y así sucesivamente hasta que se llega al orden máximo establecido o se excede el tiempo de arribo definido.

Cálculo detallado completo

Esta simulación usa el trazado aleatorio de conos con corrección de cola (*RTC: Randomized Tail-corrected Cone-tracing*), que es una combinación de tres métodos diferentes: trazado de conos, trazado de rayos y fuentes imagen.

Esta predicción genera ecogramas completos y se calculan diversos parámetros acústicos entre los que se encuentran: T15, T30, C80, D50, entre otros.

En esta predicción el sonido directo, las reflexiones especulares de primer y segundo orden y las reflexiones difusas de primer orden se consideran por separado, utilizando el método de fuentes imagen; así, las reflexiones tempranas más importantes siempre están contenidas, independientemente del número de rayos utilizado. La amplitud de estas reflexiones depende de los coeficientes de absorción y dispersión.

Para generar las reflexiones difusas de primer orden se crea un número determinado de fuentes simples en cada superficie difusa que se rige por el factor $s(1 - \alpha)$, esto indica que el número de fuentes aumenta en superficies con coeficientes de absorción α bajos y coeficientes de dispersión s altos.

El trazado de conos considera las reflexiones difusas de la misma forma que el trazado de rayos. En este método, para cada reflexión difusa de orden mayor a 1 se genera un número aleatorio

entre 0 y 1, si el número es menor que el coeficiente de dispersión de la superficie, la dirección del rayo es aleatoria de acuerdo a la ley de Lambert [19] para reflexiones difusas ideales; si no, la reflexión es especular.

Para cada banda de octava se realiza un trazado de conos independiente debido a que las reflexiones difusas dependen de la frecuencia. Mientras mayor número de rayos/conos se utilicen, la parte temprana del ecograma será más extensa.

En la parte temprana, todos los detalles del ecograma son considerados correctos, pues hasta ese tiempo no es necesario extrapolar el crecimiento de la densidad de reflexiones. La energía en la parte tardía es corregida extrapolar la densidad de crecimiento de las reflexiones. Los detalles en esta parte del ecograma no son fiables debido a la divergencia de los conos trazados, ya que no detectan todas las reflexiones finales de las superficies pequeñas.

3. Estudio previo en la terraza del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico -UNAM.

En el Laboratorio de Acústica y Vibraciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) existe un espacio en el que se presenta el efecto de eco “flutter” (*eco de “aleteo”*). Es un pasillo que se encuentra en el primer piso y conduce hacia una pequeña terraza. Sus dos paredes paralelas duras y reflejantes tienen las dimensiones suficientes y la separación necesaria para originar el efecto mencionado con anterioridad. Por esta razón se consideró conveniente realizar un estudio del comportamiento de las reflexiones en este lugar, ya que sirve como analogía del caso presentado en la sala Xochipilli.

3.1 Características físicas del lugar.

Es un espacio abierto. Las dos paredes paralelas son de concreto pintado; cada pared es de 8 x 3.2 metros. Están separadas entre sí por una distancia de 3 metros. El piso es de concreto, al igual que las paredes, pero está impermeabilizado (*Figura 3.1*).



Figura 3.1. Espacio utilizado para el estudio preliminar.

3.2. Mediciones.

Para la medición de la respuesta al impulso se utilizó una señal de barrido senoidal lineal de 0 a 22050 hertz, una frecuencia de muestreo de 44100 hertz y un periodo de 1.2 segundos.

El equipo utilizado en las mediciones consistió de un micrófono de medición omnidireccional Behringer ECM8000 y un altavoz activo EVENT Electronics TR8, ambos conectados a una interfaz de audio M-Audio Profire 610.

Se utilizaron tres combinaciones diferentes para la posición del micrófono y el altavoz (Figura 3.2). En las tres mediciones el micrófono se colocó a una altura de 1.45 metros sobre el suelo y el altavoz a una altura de 1.32 metros. Las alturas se determinaron arbitrariamente, considerando para el micrófono una altura aproximada a la posición del oído de una persona de pie.

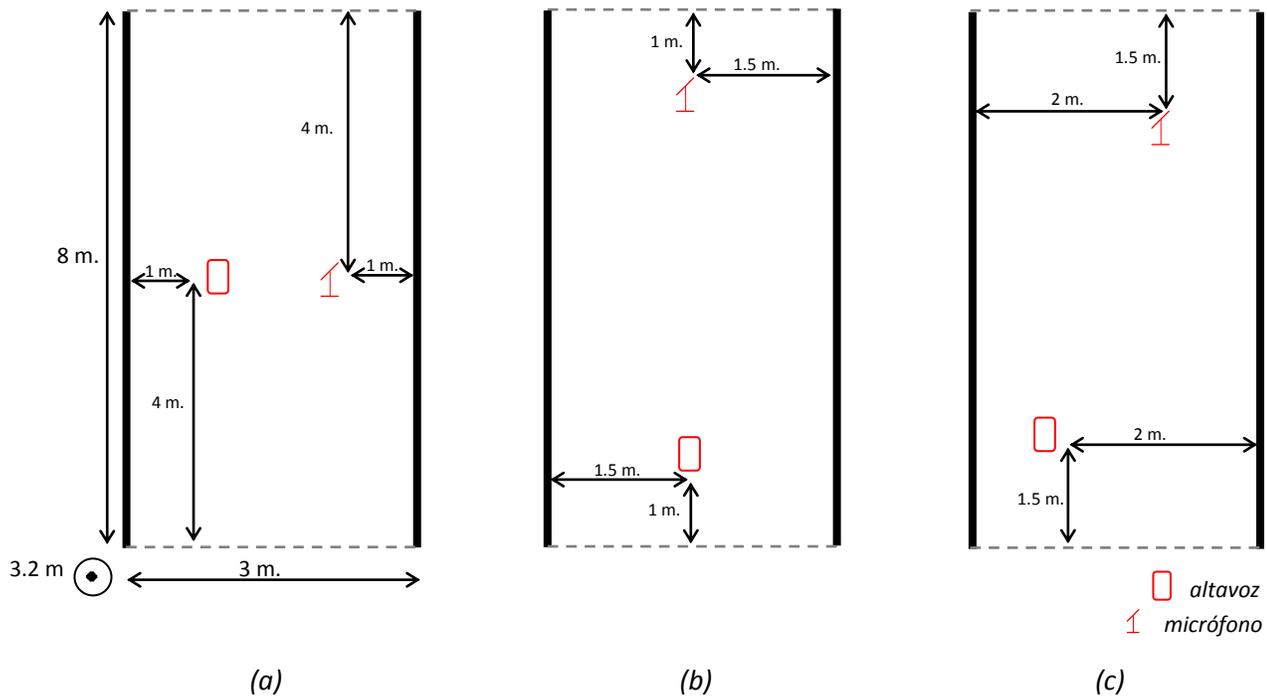


Figura 3.2. Posiciones utilizadas para la medición de la respuesta al impulso. a) Medición 1, b) Medición 2, c) Medición 3.

Se realizaron varias mediciones en cada posición con diferente número de repeticiones de la señal de prueba (ver Anexo digital). Se decidió trabajar solamente con los resultados obtenidos de la medición 3, debido a que de las tres combinaciones, es la que por la posición del micrófono y el altavoz presenta más diversidad en la trayectoria de las reflexiones.

La *figura 3.3* muestra simulaciones en el programa CATT-Acoustic™ del recorrido de algunas reflexiones que se presentan en este espacio, causantes del efecto de eco "flutter". A0 representa la posición de la fuente y O1 la posición del micrófono.

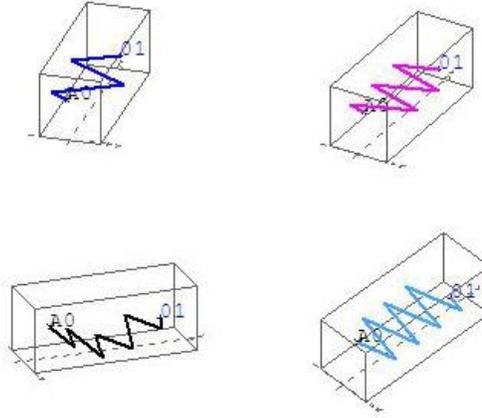


Figura 3.3. Trayectorias de rayos acústicos con reflexiones de diferente orden.

La respuesta al impulso obtenida con esta combinación de posiciones (*medición 3*), se muestra en la *figura 3.4*.

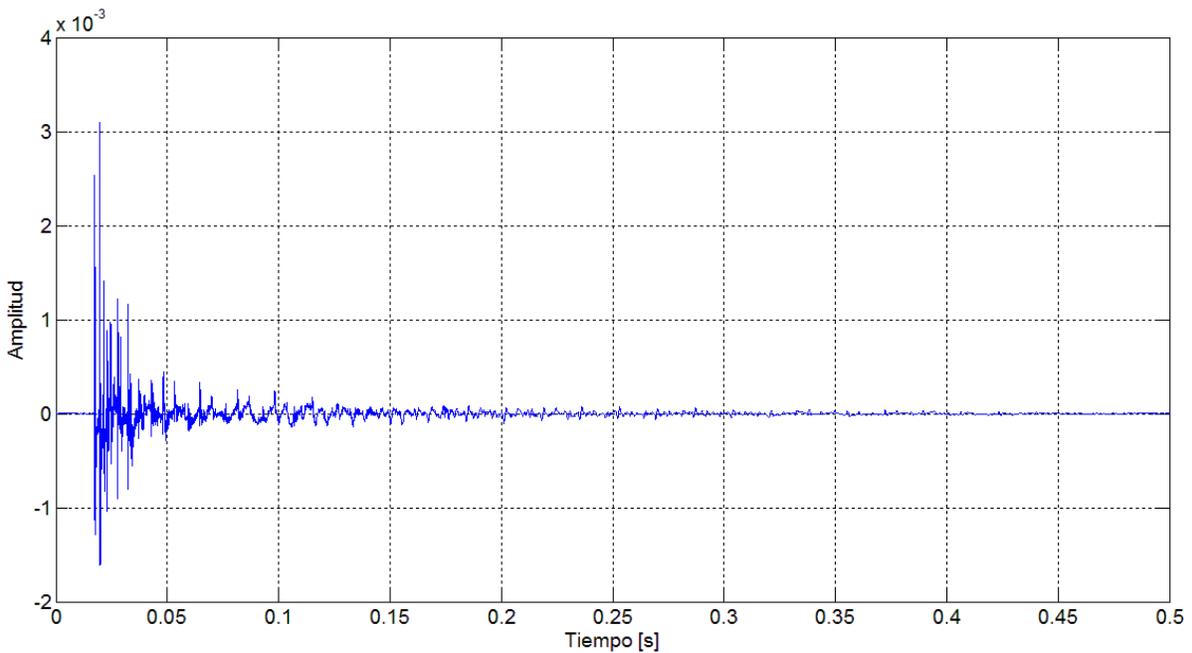


Figura 3.4. Respuesta al impulso obtenida de la medición 3.

El retardo total (ocasionado por la interfaz y el tiempo que tarda en llegar el sonido de la fuente al micrófono) fue de 17.4 ms como se puede observar en la *figura 3.4*.

El primer análisis realizado a la respuesta al impulso fue la obtención de su envolvente, la cual facilita el estudio de la distribución de las reflexiones en el tiempo y ayuda a identificar eventos con gran contenido energético. La envolvente se muestra en la *figura 3.5*.

Las reflexiones que se observan en esta gráfica forman una sucesión casi periódica y con una amplitud considerable en relación al sonido directo, lo que confirma la presencia del eco "*flutter*", originado por las reflexiones en las paredes paralelas.

En la gráfica se observa que la primera reflexión que se distingue es de una amplitud mucho mayor que el sonido directo, debido a que es el conjunto de las reflexiones de primer orden (paredes y piso) las cuales contienen mayor energía. Después de este primer arribo, los subsecuentes son de una amplitud menor, pero muy similar a la amplitud del sonido directo, esto combinado con su periodicidad, nos indica que llegan a ser audibles, ya que nuestro oído es muy sensible a las repeticiones periódicas de este tipo de impulsos sonoros, que se perciben con un carácter tonal rápidamente atenuado. El comportamiento periódico se puede apreciar al principio de la respuesta, ya que se observan separaciones de entre 2 y 5 ms entre reflexiones, que corresponde a una frecuencia de entre aproximadamente 200 y 500 Hz. Esta periodicidad puede considerarse significativa para el eco "*flutter*".

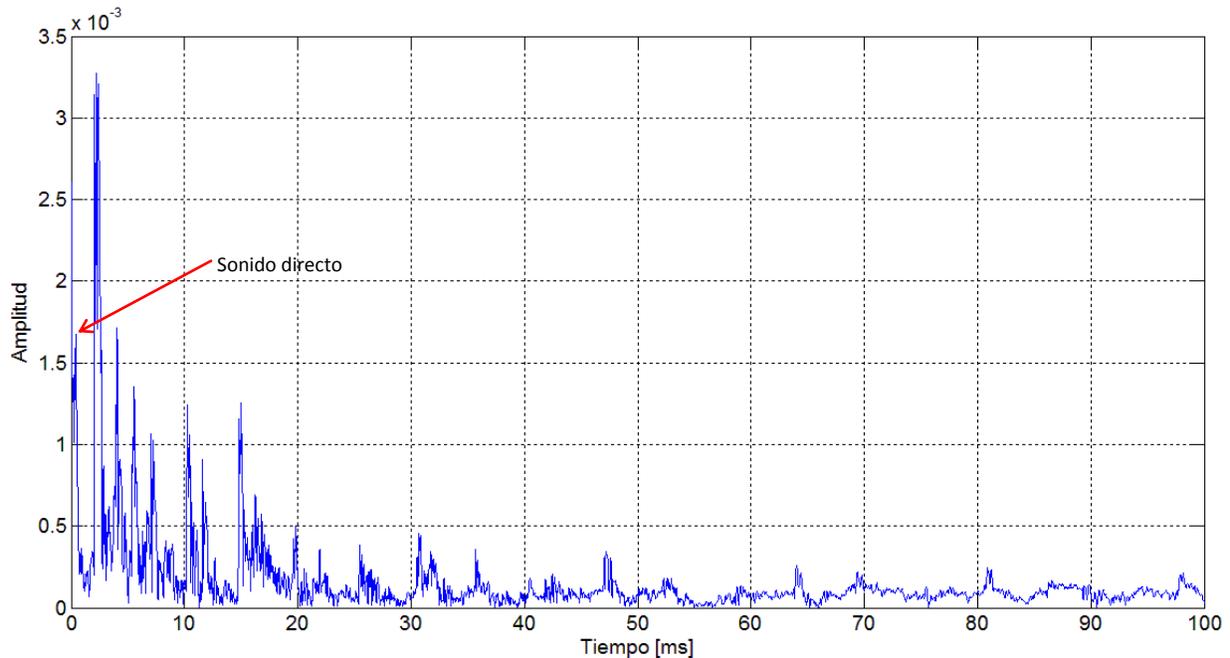


Figura 3.5. Envolvente de la respuesta al impulso obtenida de la medición 3.

En la *figura 3.6* se muestra la envolvente suavizada de la respuesta al impulso. En esta gráfica se observan irregularidades en aproximadamente 30 y 50 ms.

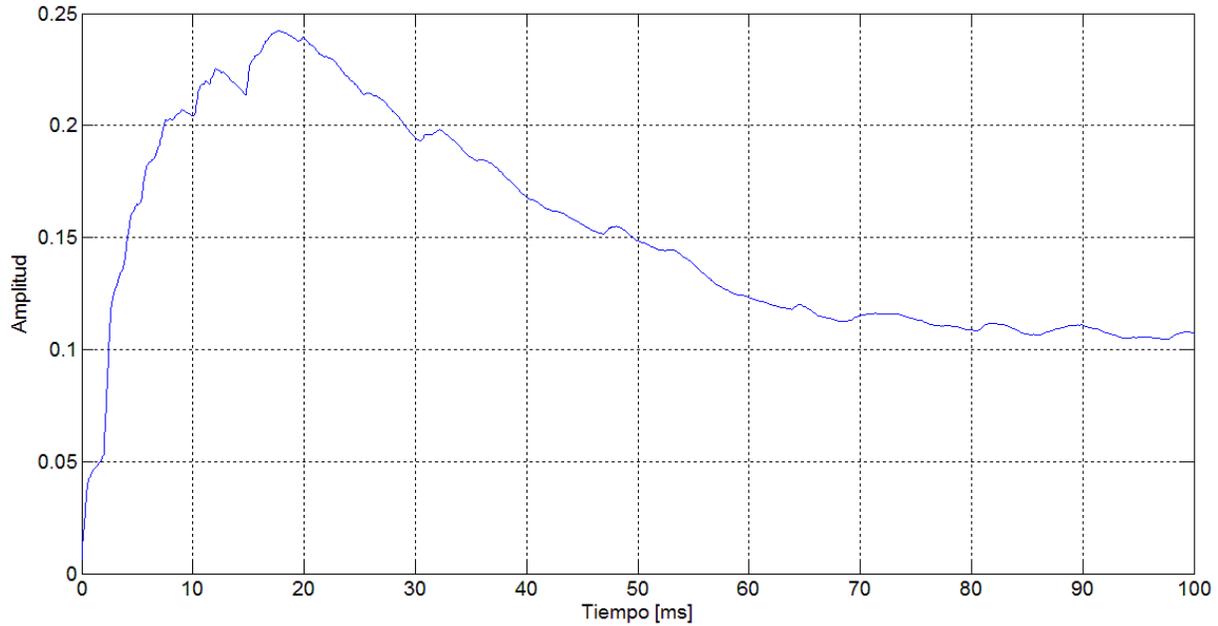


Figura 3.6. *Envolvente suavizada de la respuesta al impulso obtenida de la medición 3.*

3.3. Simulación en CATT-Acoustic™.

Con las dimensiones y las características mencionadas anteriormente se representó la geometría del espacio estudiado en CATT-Acoustic™, así como la posición de la fuente y el micrófono. (*ver Anexo digital para código de geometría*). El modelo resultante se muestra en la *figura 3.7*.

El coeficiente de absorción utilizado en las superficies abiertas (paredes de menor área y techo) fue de 100%, y los coeficientes de las otras superficies se obtuvieron de tablas de coeficientes de absorción de acuerdo al material de éstas [10]. El valor de absorción del aire utilizado, es estimado automáticamente por el software.

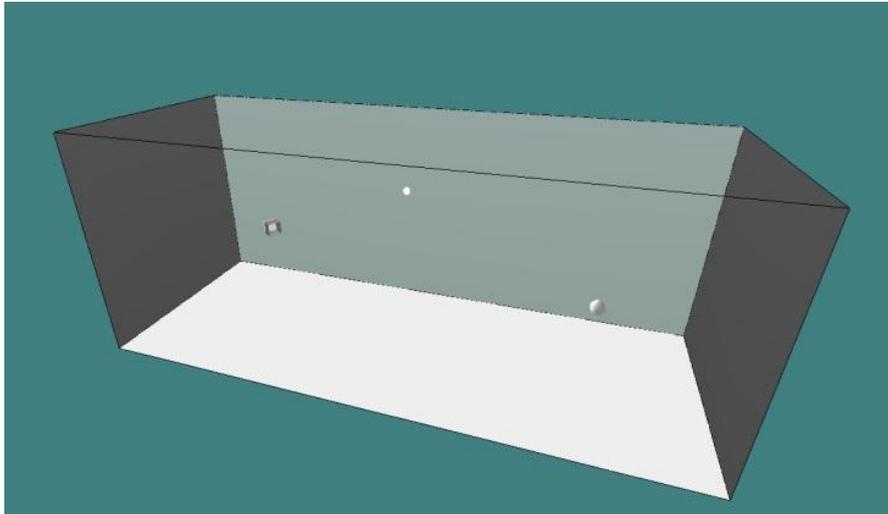


Figura 3.7. Geometría del espacio de estudio incluyendo posición de fuente y micrófono.

3.3.1. Análisis de la respuesta acústica temprana.

Para este análisis se utilizó el mayor orden de reflexiones especulares permitido por el programa, en este caso fueron reflexiones de noveno orden y se estableció un tiempo de corte de 150 ms.

El ecograma obtenido con esta configuración se muestra en la *figura 3.8*.

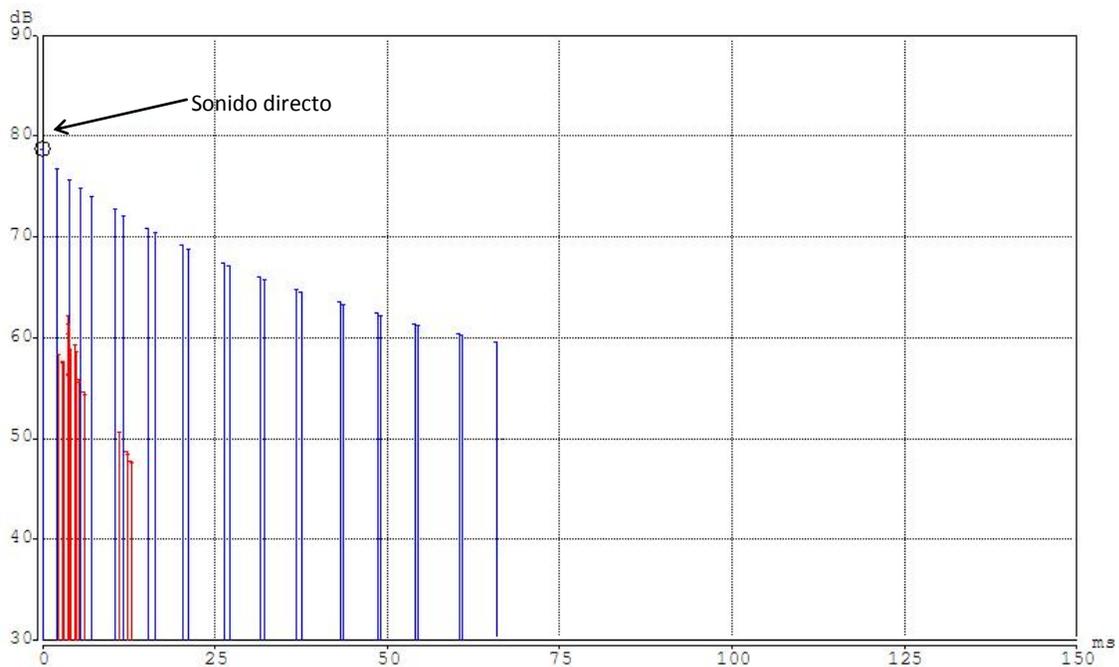


Figura 3.8. Ecograma resultante del análisis basado en fuentes imagen.

Las líneas azules representan las reflexiones especulares hasta 9º orden, mientras que las líneas rojas representan las reflexiones difusas de primer orden. En este ecograma se observa claramente que las reflexiones están distribuidas en el tiempo periódicamente, con separaciones entre reflexiones de aproximadamente 5 ms al igual que lo observado en la respuesta al impulso medida.

3.3.2. Análisis de ecograma simulado.

El ecograma que se obtiene del cálculo detallado completo se muestra en la *figura 3.9*.

La curva roja representa la curva suavizada, utilizando un filtro exponencial con una constante de tiempo $\tau = 15$ ms. Las líneas azules representan las reflexiones especulares de 1º y 2º orden; las líneas rojas representan las reflexiones difusas de primer orden y las líneas negras todas las demás reflexiones tanto difusas como especulares.

En este ecograma también se hace evidente el efecto de eco "flutter" al observar las primeras reflexiones con una sucesión periódica.

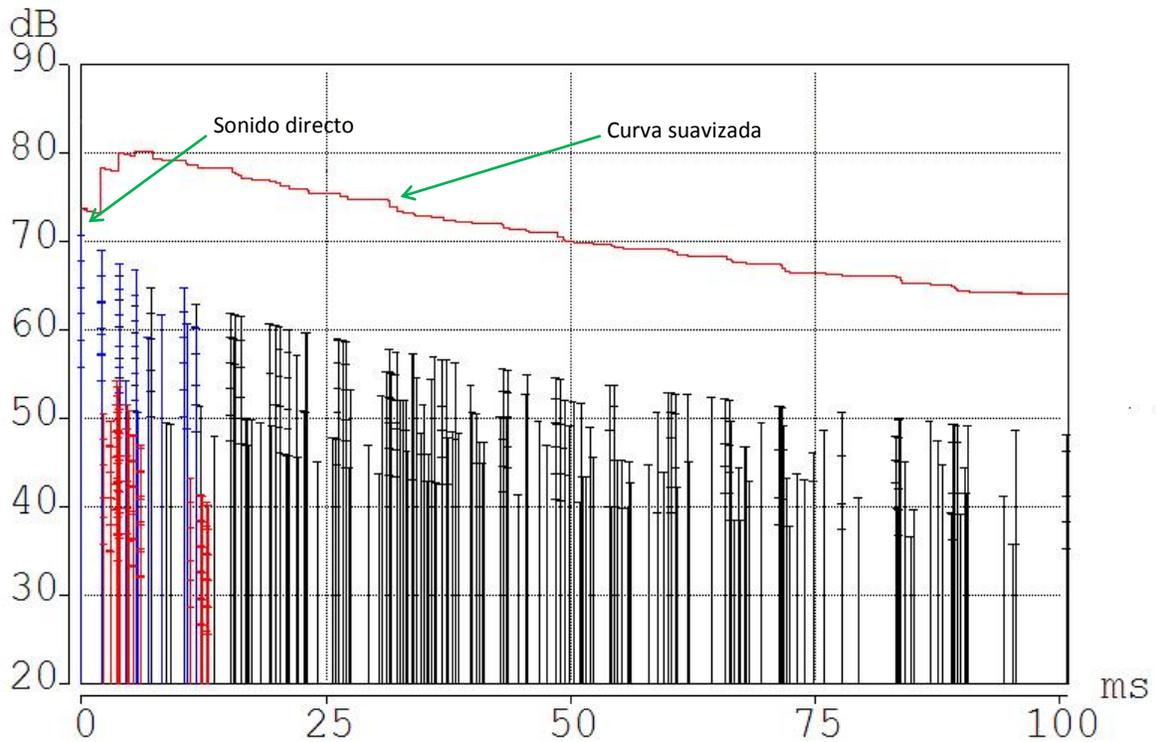


Figura 3.9. Ecograma resultante del análisis basado en RTC.

Debido a que la simulación se realizó considerando los espacios abiertos totalmente absorbentes, los demás parámetros calculados por el programa ($C80$, $D50$, t_s) no se tomaron en cuenta y algunos no pudieron ser calculados ($T15$, $T30$, EDT), ya que en un espacio abierto se pierden muchos rayos, por lo que no se pueden considerar datos fiables.

3.4. Comparación de medición experimental y simulación.

Con la finalidad de simular una solución para eliminar el eco "flutter" en este espacio y confiar que en la práctica tendría el mismo efecto, se comparan las mediciones y los resultados de la simulación.

Para realizar la comparación se trabajó con los datos obtenidos para la octava de 1 kHz.

Tomando en cuenta que la energía decae exponencialmente a una razón [25]:

$$E = E_0 e^{-\alpha t} \quad (3.1)$$

Donde el coeficiente de atenuación α está relacionado con la absorción de las superficies, se ajustaron curvas exponenciales a las curvas obtenidas en cada caso; al coincidir los valores de α se considerarían circunstancias similares tanto en el caso experimental como en el simulado.

El valor del coeficiente de atenuación α en el caso experimental sirvió de pauta para ajustar el valor de la simulación variando los valores de los coeficientes de absorción de las superficies. Los valores de α obtenidos para el caso experimental y el simulado se muestran en la *tabla 3.1*.

	α
Experimental	-19.3021
Simulación	-19.4938

Tabla 3.1. Valores obtenidos de la constante de decaimiento.

Se obtuvo una buena aproximación con los coeficientes de absorción utilizados en las superficies de la simulación. Con estos resultados se realizó una comparación de las reflexiones obtenidas con la simulación y la curva envolvente de la señal medida experimentalmente.

Con el fin de que existiera una correspondencia temporal entre la medición y la simulación, fue necesario ajustar el tiempo de arribo de las reflexiones en la simulación con los eventos impulsivos de la envolvente de la respuesta al impulso. Esto se hizo variando la temperatura en la simulación. La temperatura utilizada para esta simulación fue de 13°C. La gráfica se muestra en la *figura 3.10*.

El retardo que se observa en la gráfica corresponde al tiempo que tarda en llegar el sonido de la fuente al micrófono (14.5 ms). Se graficó con este retardo para observar mejor la correspondencia aproximada de las reflexiones discretas con los eventos impulsivos de la envolvente experimental que, como mencionamos anteriormente tienen un patrón casi periódico.

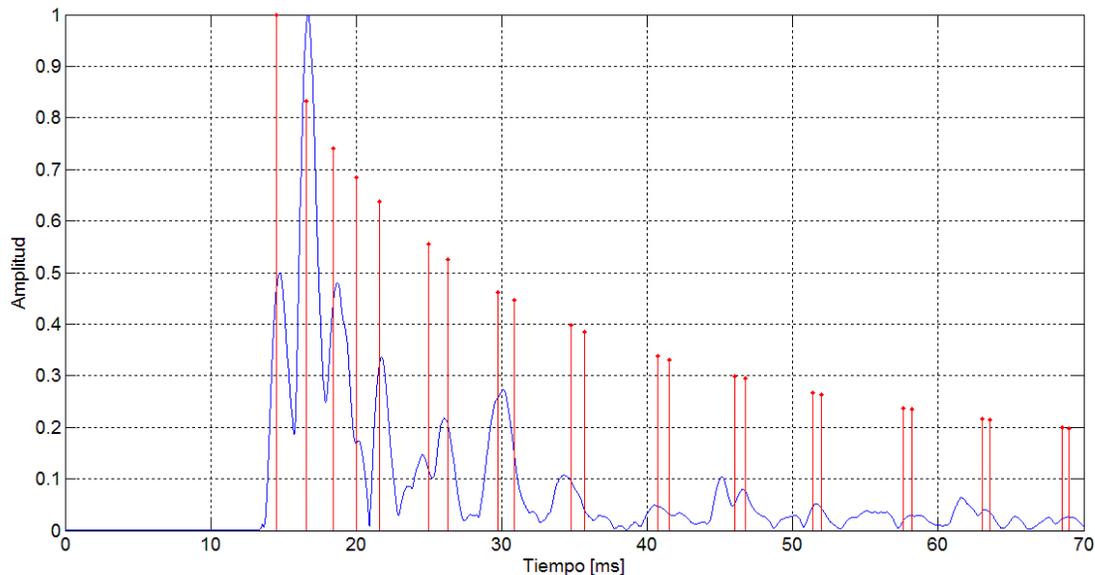


Figura 3.10. Envolvente de la RI experimental (azul) y reflexiones obtenidas de la simulación (rojo) en la octava de 1 kHz.

A partir de las reflexiones discretas simuladas se calculó una curva suavizada de decaimiento. Las curvas suavizadas de la medición experimental y la simulación se muestran en la *figura 3.11*.

De esta gráfica se observa que el decaimiento de las dos curvas (*experimental y simulación*) es muy similar. En la curva de la simulación se pueden observar las irregularidades ocasionadas por las reflexiones periódicas. Este efecto no es tan notable en la curva experimental debido a que estas periodicidades están mezcladas con otras reflexiones que no son mostradas en la simulación basada en el modelo de fuentes imagen.

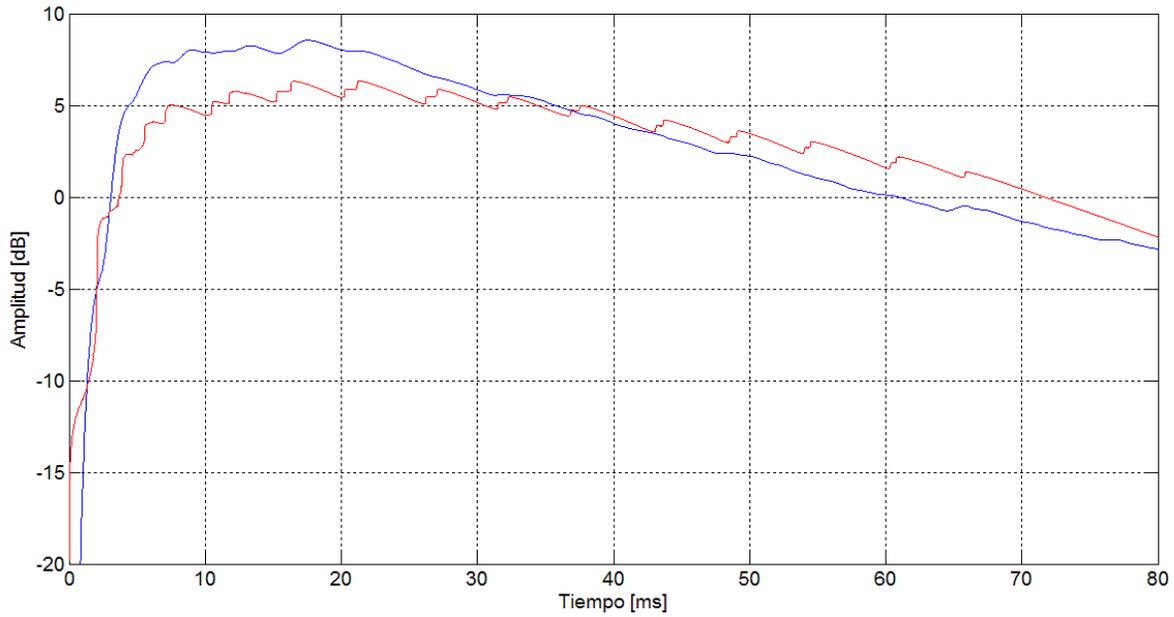
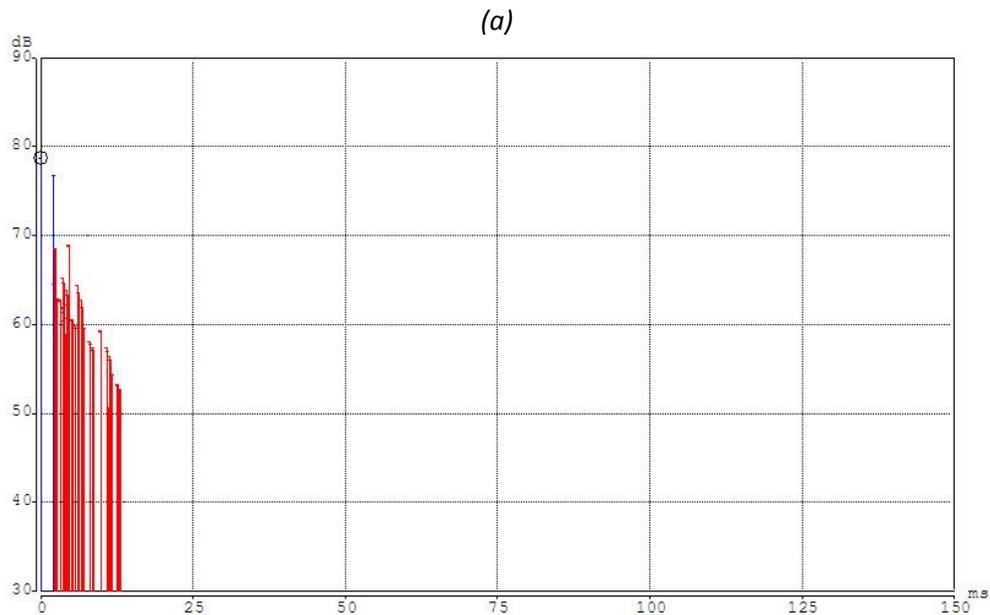


Figura 3.11. Envolventes suavizadas de la RI: experimental (azul) y simulación (roja) para la octava de 1 kHz.

El siguiente paso es simular que las paredes tienen difusión. Para mostrar el efecto de la difusión en las paredes se consideró que éstas eran 100% difusas. Las gráficas resultantes del modelo simulado de fuentes imagen y de trazado de rayos se muestran en la *figura 3.12*.



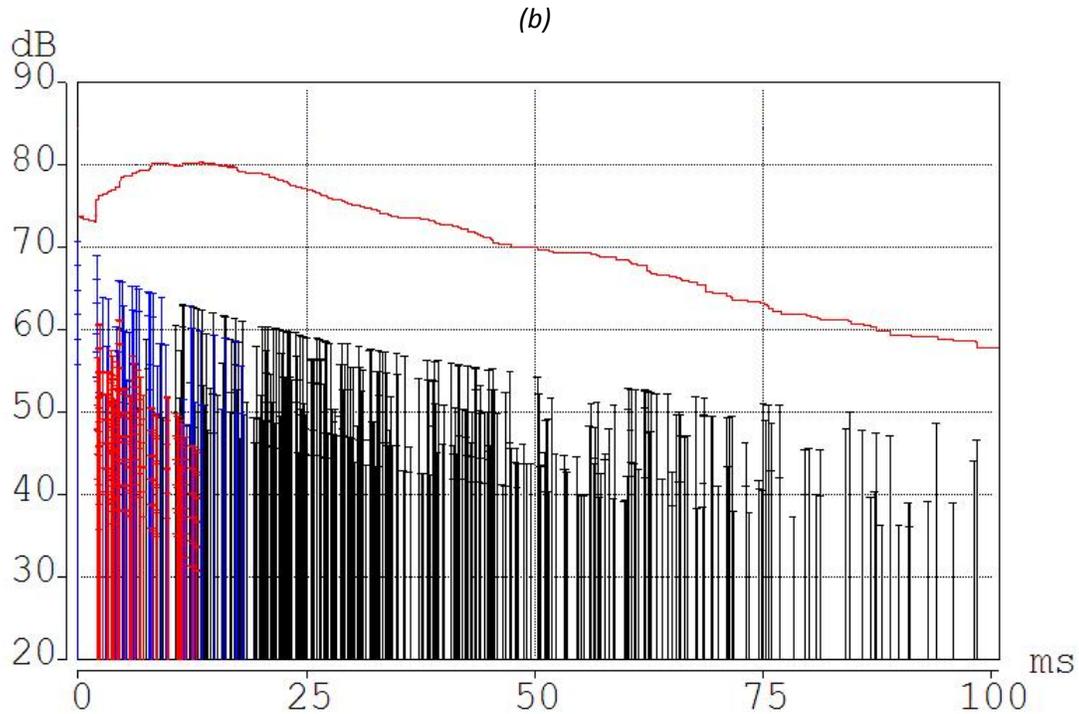


Figura 3.12. Ecogramas con ambas paredes 100% difusas. a) resultante del análisis basado en fuentes imagen. b) resultante del análisis basado en RTC.

En la gráfica *a)* se observa que las reflexiones especulares desaparecen mientras que en la *b)* ya no se observa un patrón periódico en la distribución de las reflexiones en el tiempo, además de la disminución de las irregularidades en la curva suavizada.

Al igual que en el paso anterior, se obtuvo la envolvente suavizada de la simulación con los resultados obtenidos al suponer las paredes totalmente difusas. Esto con la finalidad de observar los efectos de la difusión y que tan útil es para corregir el eco "flutter".

La *figura 3.13* muestra las envolventes suavizadas de la señal experimental y la simulación sin difusión y la simulación con paredes totalmente difusas para la octava de 1kHz. Debido a que en este caso desaparecen casi todas las reflexiones especulares y sólo se tiene información de las reflexiones difusas hasta aproximadamente 13 ms (*Figura 3.12-a*), se graficó solamente la parte temprana, ya que después de este tiempo la información de la simulación no es comparable con la medición experimental y se observa que la curva de la simulación ya no tiene eventos notables de reflexiones discretas y el inicio de su decaimiento es uniforme.

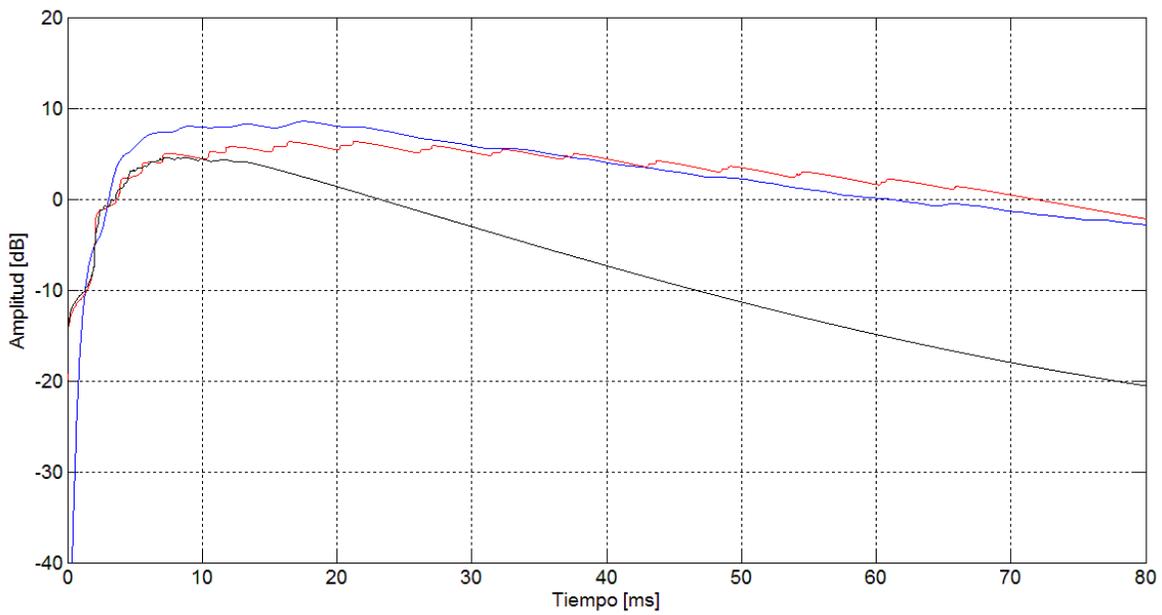


Figura 3.13. Comparación de envolturas suavizadas experimental sin difusión (azul), simulación (roja) y simulación con paredes totalmente difusas (negra).

4. Sala Xochipilli de la ENM - UNAM.

La sala Xochipilli es un lugar dedicado a la interpretación de música, por lo que se requiere que el sonido que se transmite desde el escenario llegue a la audiencia de tal manera que su decaimiento temporal sea uniforme. Esta es una característica deseable en general para la acústica de una sala [3, 22].

El interés de estudiar el comportamiento acústico de esta sala en particular, se debe a su diseño, ya que al tener paredes laterales paralelas, existe la posibilidad de que el sonido reflejado en estas paredes provoque ecos o reflexiones que pueden llegar a afectar la calidad del sonido.

La Sala Xochipilli está alojada en la Escuela Nacional de Música, que se ubica en la calle Xicoténcatl # 126, Col. Del Carmen, Coyoacán, en la Ciudad de México.



Figura 4.1. Sala Xochipilli de la Escuela Nacional de Música

4.1 Características físicas del lugar.

La sala Xochipilli tiene un volumen de aproximadamente 2777 m^3 ³. Las paredes laterales son de madera, y la zona de butacas está alfombrada. Las butacas están tapizadas en tela al igual que la pared trasera del auditorio (*Figura 4.2*). Las paredes traseras normalmente son tratadas con material absorbente para evitar reflexiones que contengan mucha energía, ya que una reflexión con un retardo largo proveniente de la pared trasera puede interferir en la forma en que se percibe el sonido.

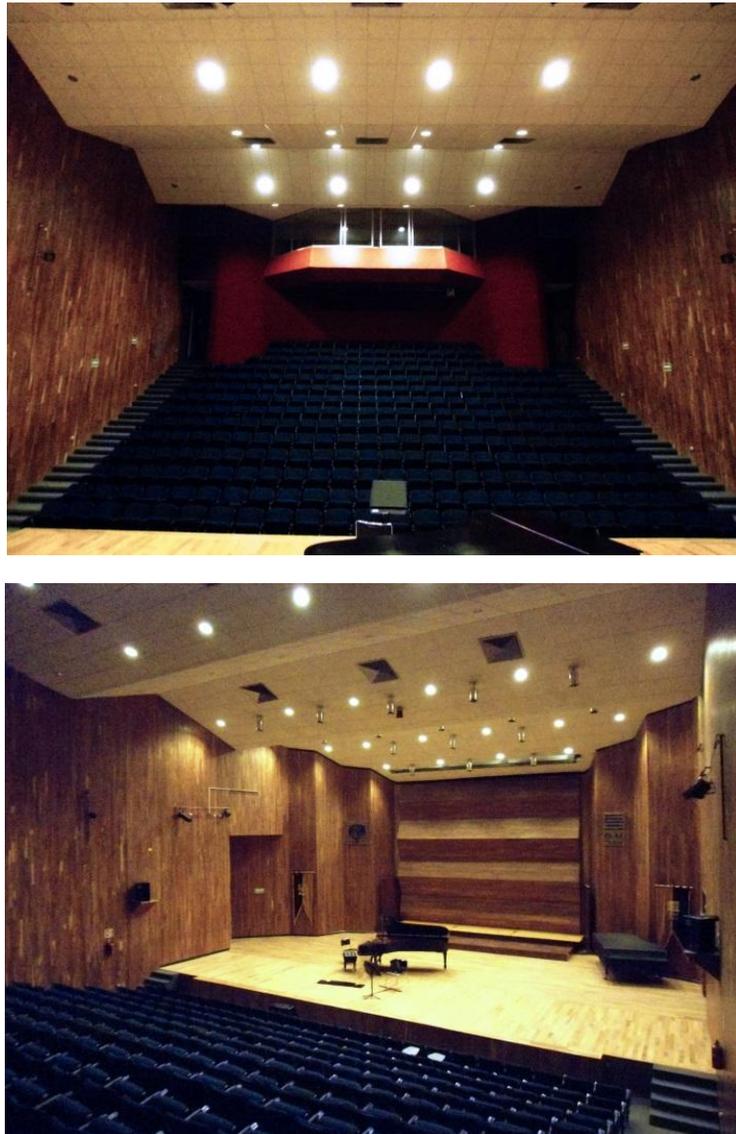


Figura 4.2. Interior de la sala Xochipilli. Superior: área de butacas, inferior: escenario.

³ El volumen aproximado de la sala se obtuvo de la simulación realizada con el software CATT-Acoustic™.

4.2 Mediciones.

Para examinar las propiedades acústicas se midió la respuesta impulso de la sala utilizando como señal de excitación un barrido senoidal lineal de 0 a 22050 Hz, una frecuencia de muestreo de 44100 Hz y un periodo de 5 segundos.

Para obtener una radiación sonora uniforme se utilizó un altavoz omnidireccional, prototipo del CCADET. De igual manera se realizaron mediciones con el altavoz activo M-Audio EX66. Para captar la señal se utilizaron dos micrófonos de medición omnidireccionales Behringer ECM8000, los cuales estaban conectados a la interfaz de audio M-Audio Profire 610.

Las fuentes se colocaron en dos posiciones diferentes del escenario (*Figura 4.3*) y en cada posición se realizaron mediciones en diferentes lugares de la zona de butacas (*Figura 4.4*). El altavoz omnidireccional se colocó a una altura de 1.55 m y el altavoz activo a 1.42 m sobre el piso del escenario. Los micrófonos se colocaron a una distancia de 1.10 m sobre el escalón, altura aproximada a la posición del oído de una persona sentada en la butaca.

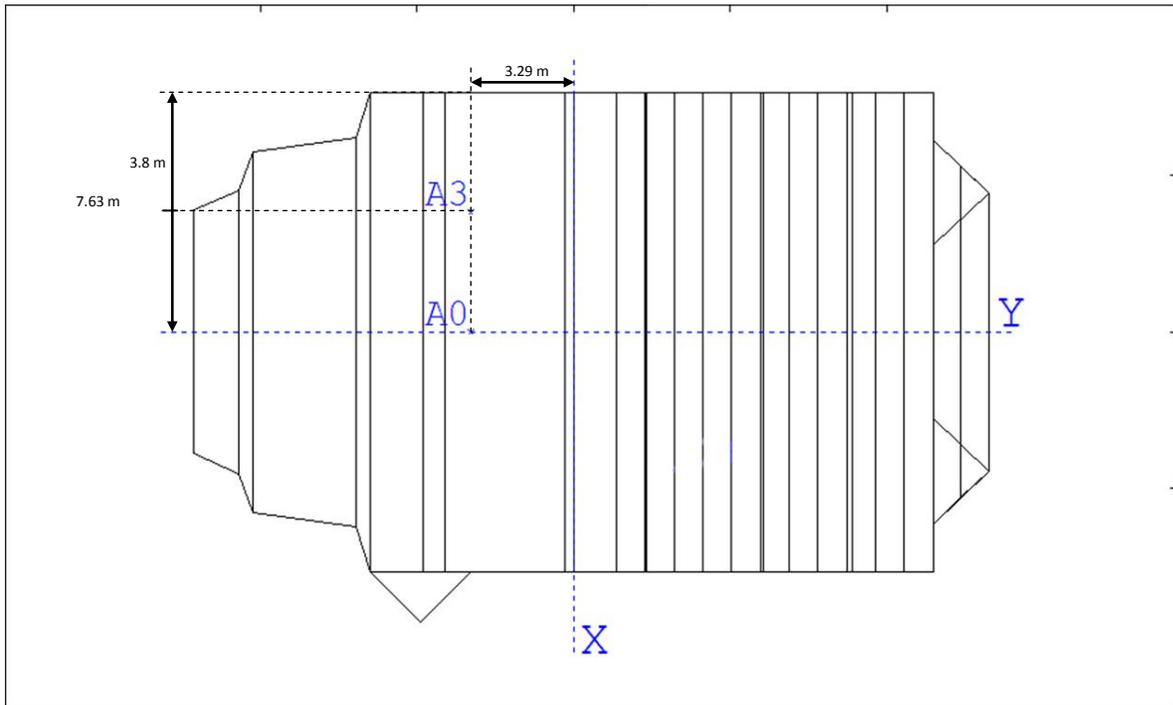


Figura 4.3. Posiciones de la fuente omnidireccional en el escenario.

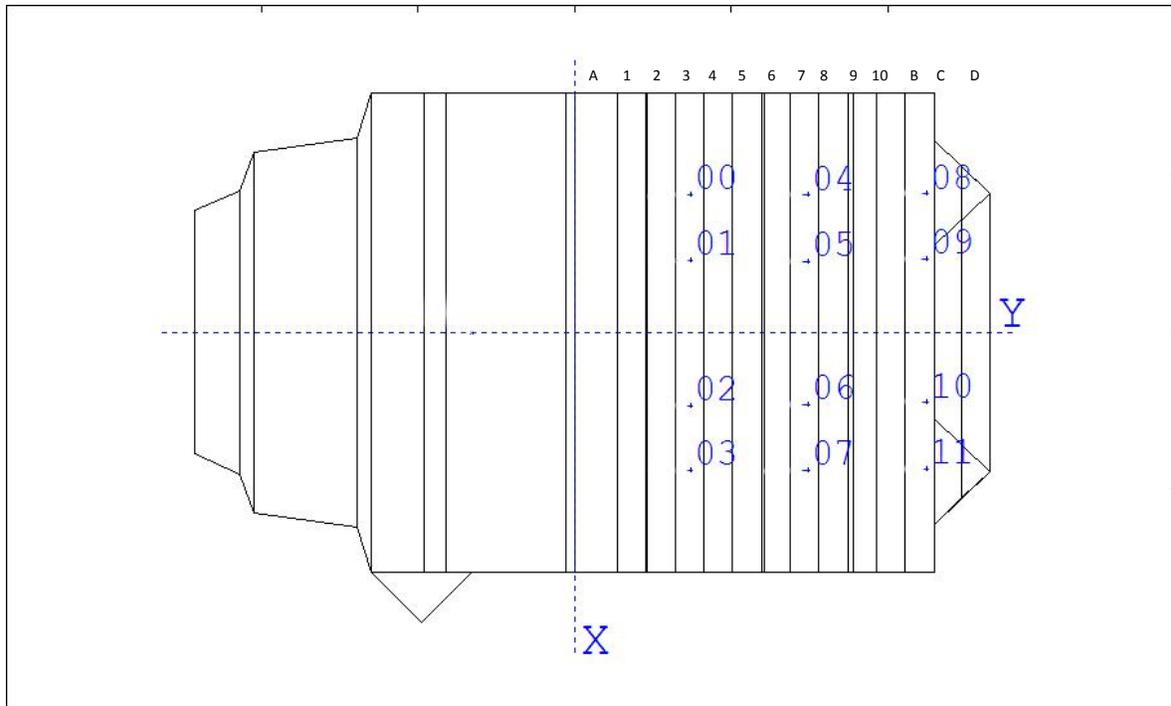


Figura 4.4. Posiciones de los micrófonos en la zona de butacas.

Con el altavoz activo en la posición A0 se realizaron mediciones en las filas 3, 7 Y B en las posiciones 00, 01, 04, 05, 08 y 09; y en la posición A3 se realizaron mediciones en todas las posiciones (00-11).

Con el altavoz omnidireccional en las posiciones A0 y A3 sólo se realizaron mediciones en las posiciones 02, 03, 06, 07, 10 y 11.

Para el análisis del comportamiento de las reflexiones en la sala, se trabajó con las mediciones obtenidas con el altavoz omnidireccional en la posición A0 y el micrófono en la posición 03. La respuesta al impulso obtenida para esta combinación se muestra en la figura 4.5 (las gráficas de la respuesta al impulso para las otras combinaciones altavoz/micrófono se encuentran en el Anexo digital).

El retardo que se observa en la gráfica de la respuesta al impulso se debe al retardo ocasionado por la interfaz y al tiempo que tarda en llegar el sonido de la fuente al micrófono. El retardo medido de la interfaz fue de 2.9 ms y el retardo de la fuente al micrófono para esta posición fue de 24.1 ms.

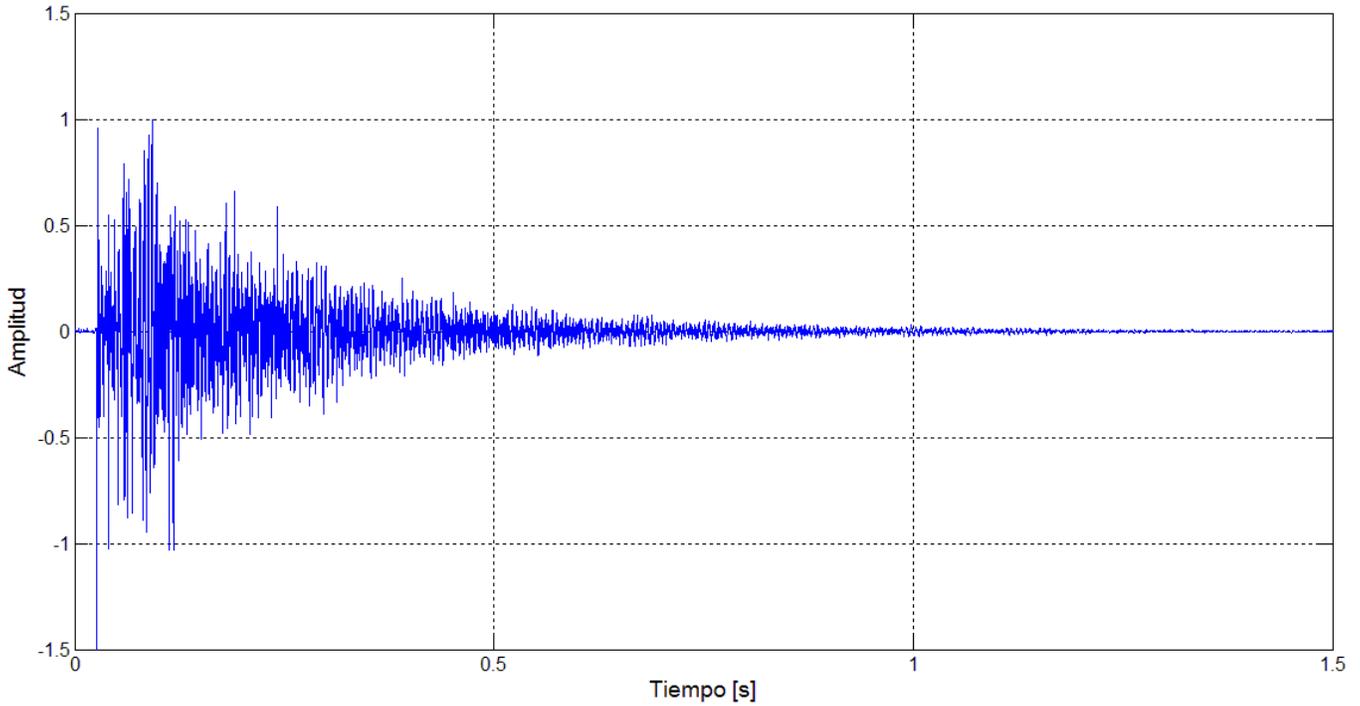


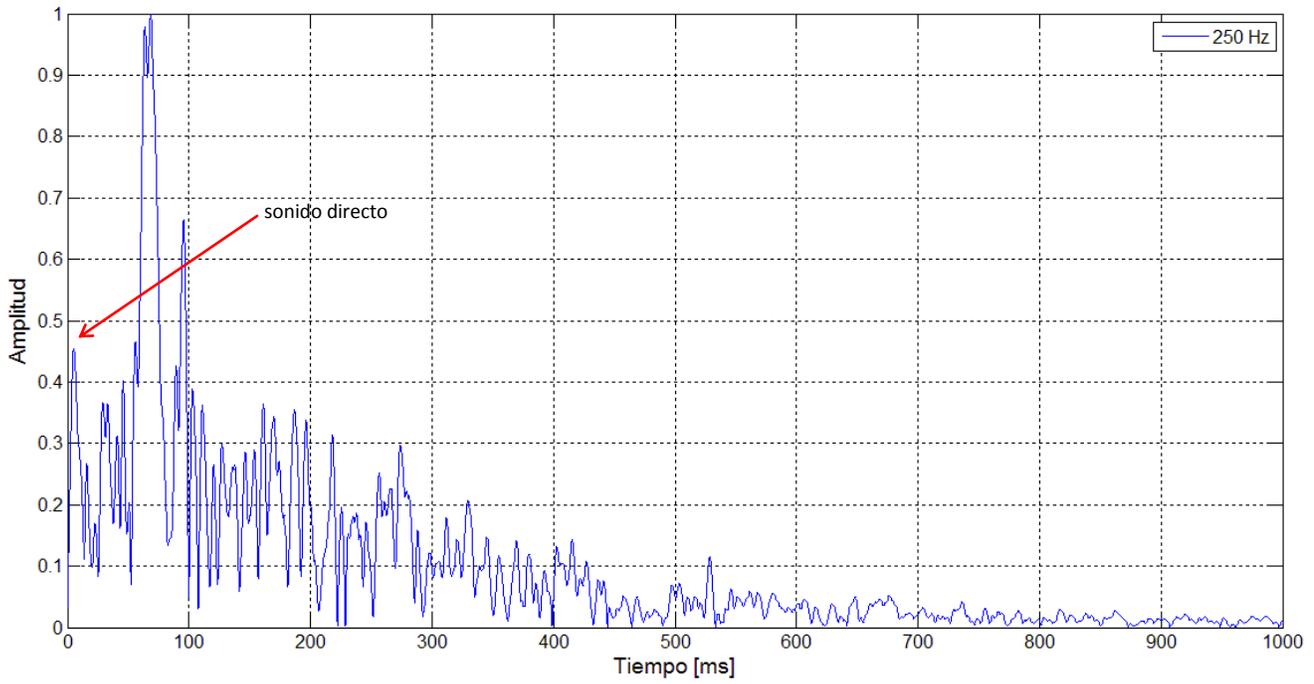
Figura 4.5. Respuesta al impulso obtenida de la combinación de altavoz – micrófono A0-03.

Para el análisis de las reflexiones se trabajó con la respuesta al impulso filtrada por octavas (125 Hz a 4kHz), de las cuales sólo se analizaron las octavas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz.

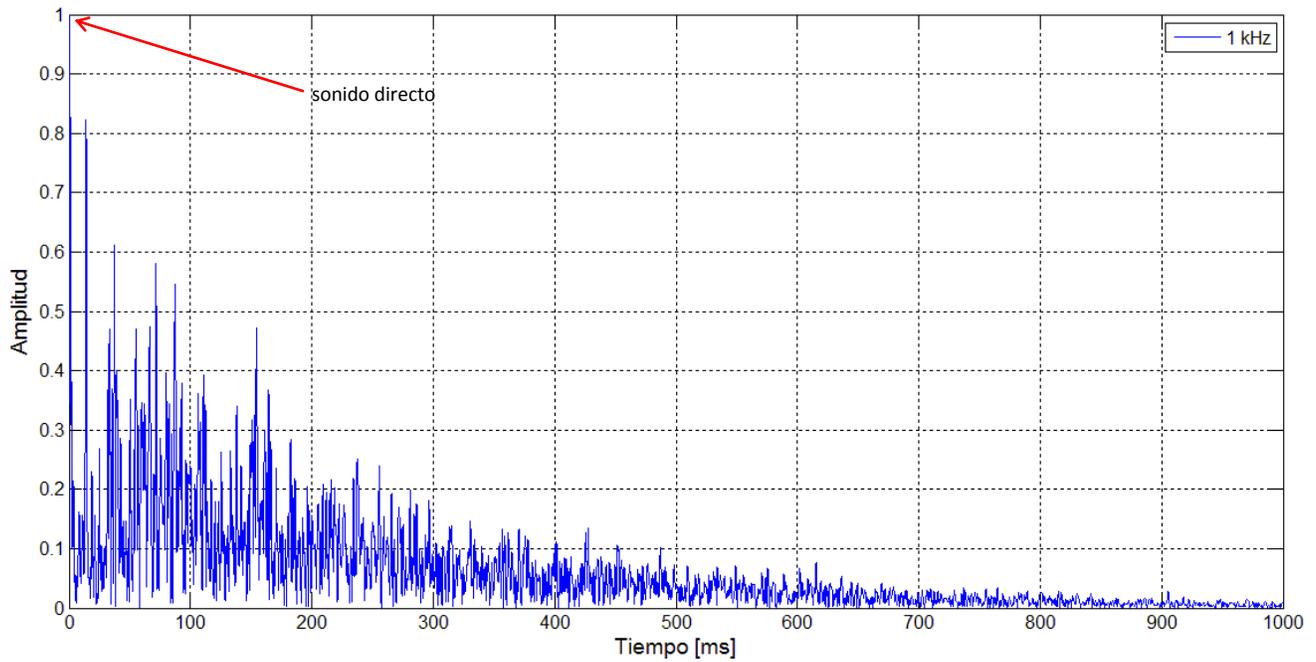
Al igual que en el estudio previo en la terraza del laboratorio, se obtuvo la envolvente de la respuesta al impulso. En la *figura 4.6* se muestran las envolventes para las octavas a analizar.

La *figura 4.6* muestra las gráficas con el eje de tiempo sin incluir los retardos mencionados anteriormente, esto con la finalidad de observar el arribo del sonido directo al tiempo $t = 0$ s.

a)



(b)



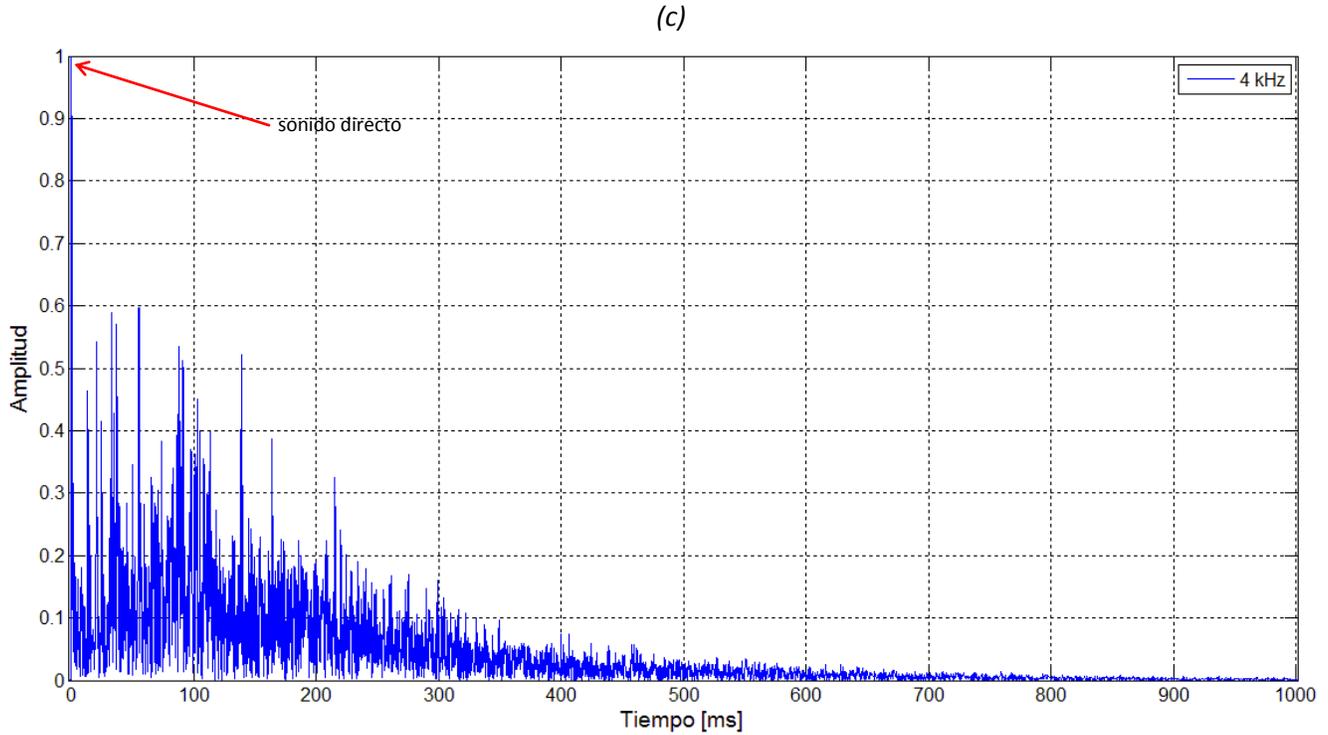


Figura 4.6. Envolventes de la respuesta al impulso para a) 250 Hz, b) 1kHz y c) 4kHz.

En la gráfica 4.6-a para la octava de 250 Hz, se observa una acumulación de reflexiones entre 60 y 70 ms después del arribo del sonido directo con una amplitud mayor a la amplitud del sonido directo, y otra acumulación notable a un tiempo de 95 ms después del sonido directo. Entre 100 y 200 ms se observan reflexiones con una amplitud menor pero con un patrón periódico, con un periodo aproximado de entre 7 y 10 ms, el cual podría ser perceptible.

En la octava de 1kHz (gráfica4.6-b) el sonido directo tiene la mayor amplitud, pero se observa un conjunto de reflexiones con amplitudes notables a partir de aproximadamente 35 ms que se atribuyen a la parte de reflexiones tempranas, y un poco después de 150 ms se observa otra reflexión de amplitud significativa, que debido al tiempo en el que se presenta concuerda con la definición de un eco perceptible [3, 14, 19].

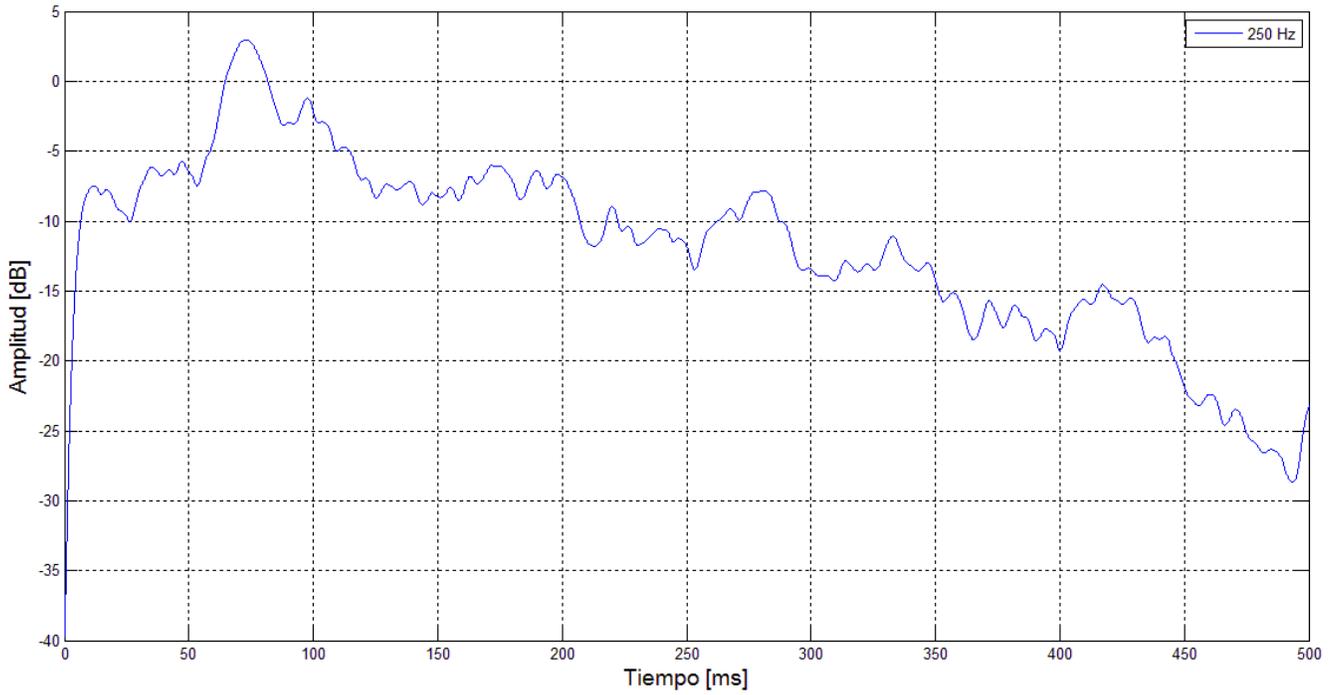
En la gráfica 4.6-c, al igual que para 1 kHz, el sonido directo presenta la mayor amplitud. Después de esto, en los siguientes 100 ms, se observan numerosas reflexiones aisladas, que se destacan de las reflexiones adyacentes, que pueden ser ocasionadas por un efecto de focalización. En seguida, surgen otras reflexiones aisladas en 138, 163 y 215 ms.

A partir de la envolvente de la respuesta al impulso se obtuvo la envolvente suavizada, utilizando un filtro de decaimiento exponencial con una constante de tiempo de 10 ms, esto con la finalidad

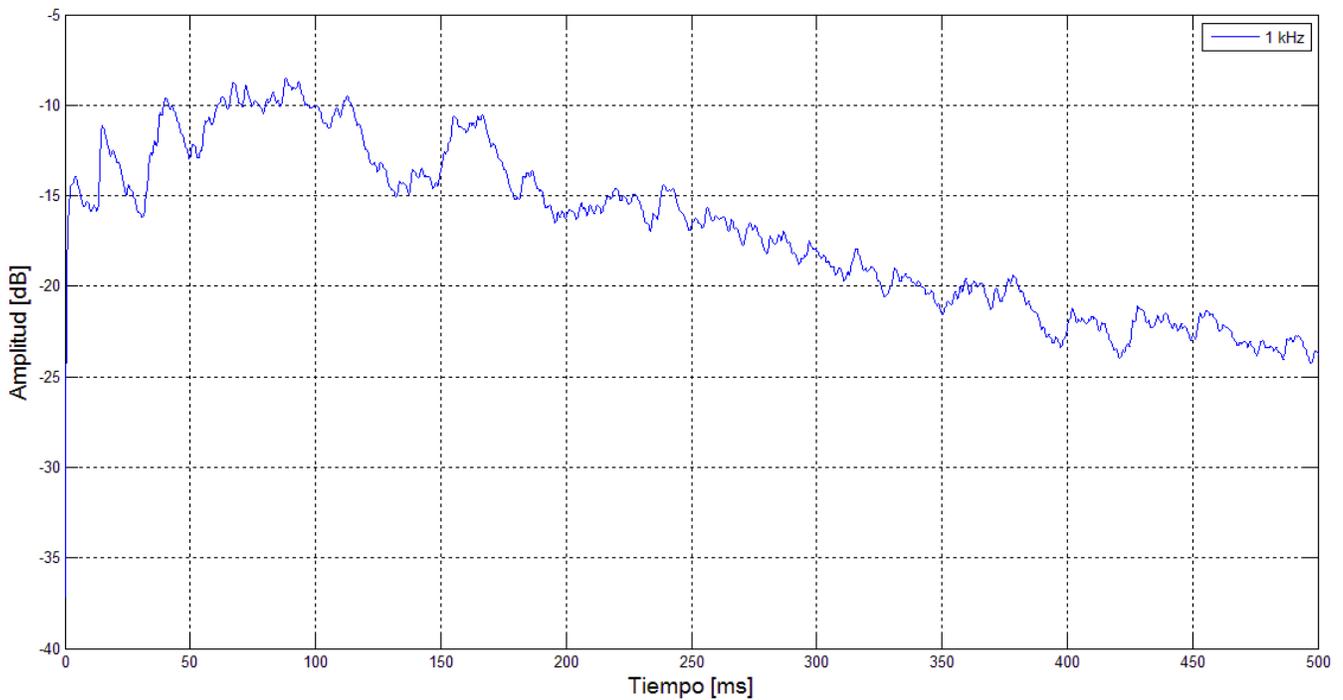
de afinar la envolvente y observar solamente las irregularidades más destacadas, eliminando todas aquellas que no son significativas para el análisis de la percepción del sonido dentro del recinto.

En la *figura 4.7* se presentan las envolventes suavizadas de las octavas a analizar.

(a)



(b)



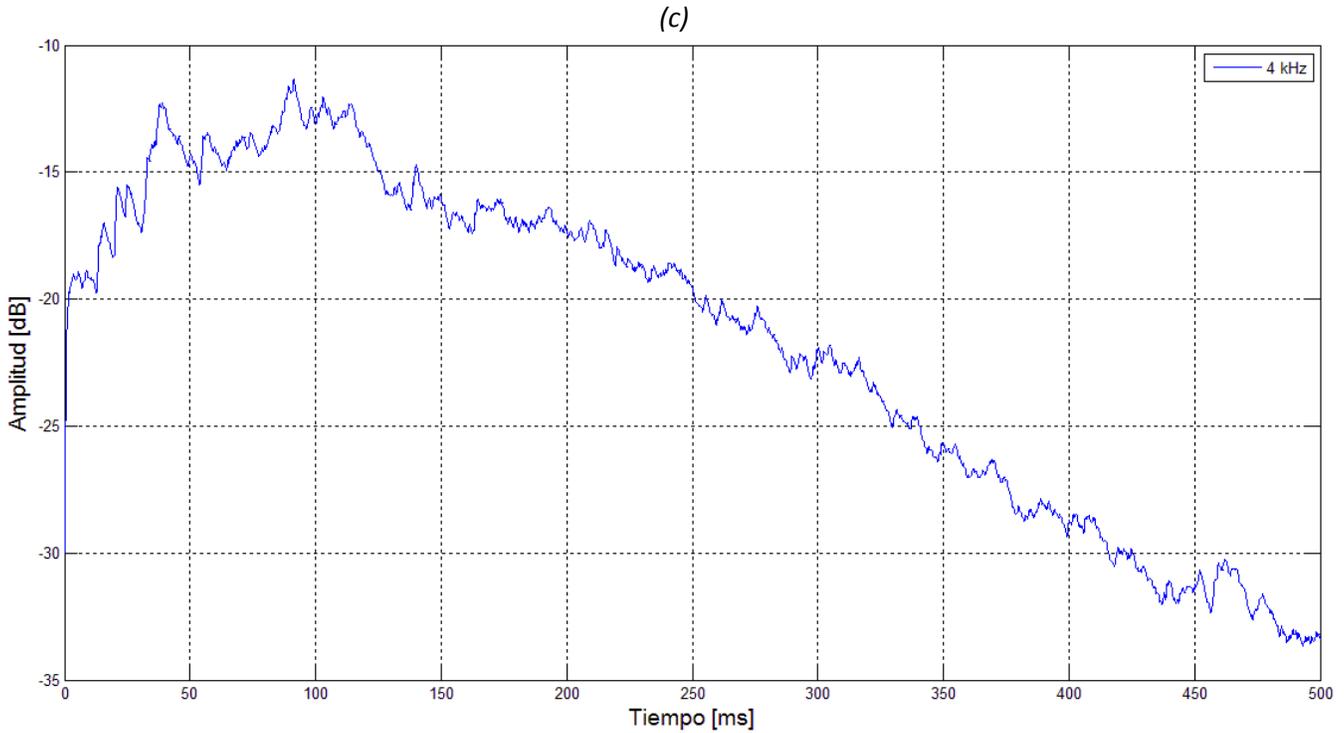


Figura 4.7. Envolventes suavizadas de la respuesta al impulso para a) 250 Hz, b) 1kHz y c) 4kHz.

En la curva de 250 Hz (4.7-a) se observa un pico en 60 ms, que por el tiempo de arribo se atribuye a un conjunto de reflexiones tempranas de primero, segundo y tercer orden de diferentes amplitudes, cuya trayectoria es de la misma longitud. Después de esto comienza el decaimiento y entre 160 y 180 ms se observan irregularidades que se atribuyen a reflexiones con retardos largos, los cuales podrían influenciar la percepción del sonido.

Al observar la curva 4.7-b (1 kHz), lo más destacado y que podría causar algún efecto molesto en la percepción del sonido dentro del recinto, es el pico en aproximadamente 160 ms.

El grupo de reflexiones más notables en la envolvente suavizada que representa la octava de 4 kHz se encuentra alrededor de 100 ms, pero en general la curva presenta un decaimiento uniforme.

4.3 Simulación en CATT- Acoustic™.

Con el programa de simulación acústica CATT-Acoustic™, se elaboró un modelo de la sala con la mayor cantidad de detalles geométricos y arquitectónicos posibles (Figura 4.8), para que los resultados obtenidos de la simulación se parezcan lo más posible a los resultados obtenidos *in situ*.

Las dimensiones de la sala se midieron *in situ* debido a que no fue posible conseguir los planos del lugar.

Para llevar a cabo la simulación, el software CATT-Acoustic™ considera el coeficiente de absorción [10, 19] de cada una de las superficies que conforman el modelo, las cuales están definidas en el código de la geometría (*ver Anexo digital*). Otra consideración importante es la absorción del aire, estimada por el software de acuerdo al estándar ISO 9613-1, y la temperatura ambiente, utilizada para calcular la velocidad del sonido de acuerdo a la siguiente expresión [7]:

$$c_0 = 331.4 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (4.1)$$

Donde

$$T = \text{temperatura del aire} [^{\circ}\text{C}]$$

La temperatura en la sala el día de la medición era de 20 °C. De igual manera, se definieron las posiciones de las fuentes y los micrófonos (*Figura 4.3 y 4.4*) en el código correspondiente (*ver Anexo digital*).

En la *figura 4.8* se muestra el modelo obtenido y la posición de la fuente y el micrófono utilizados en las simulaciones.

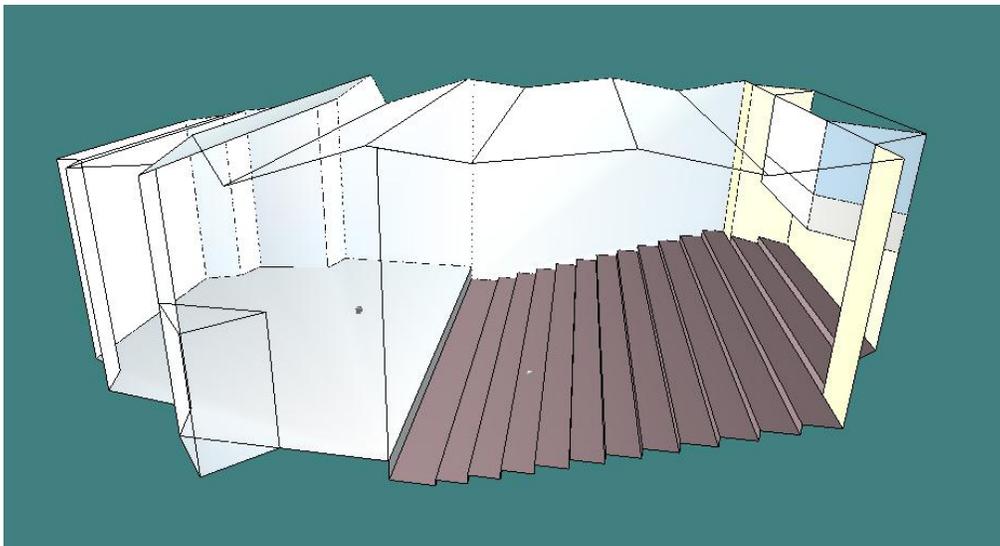
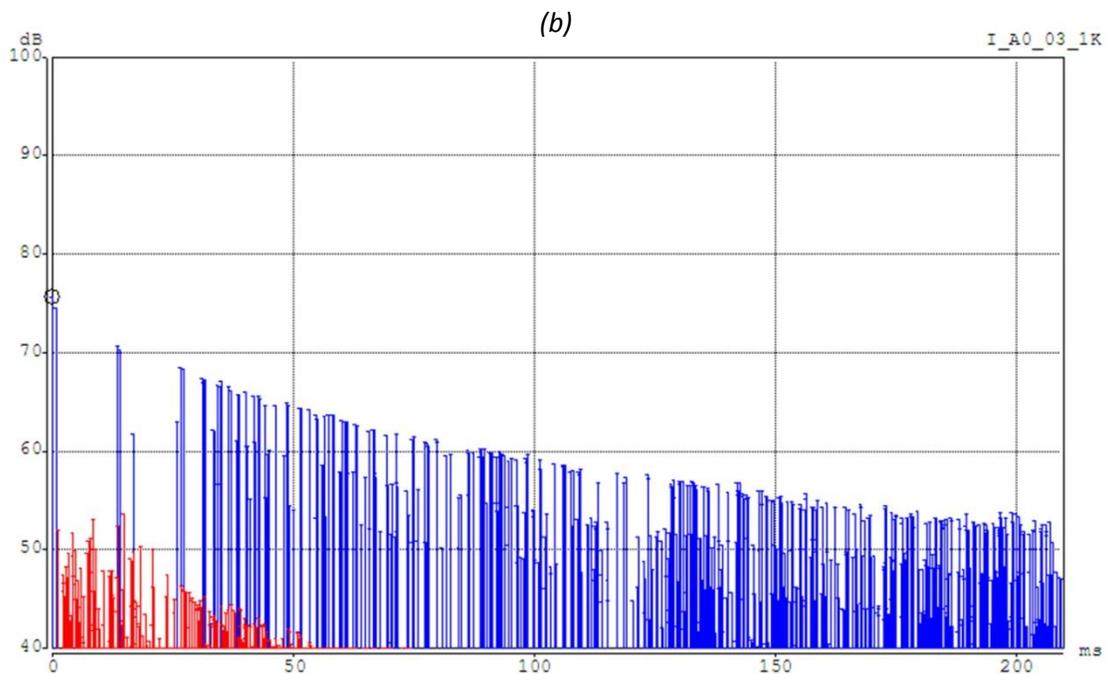
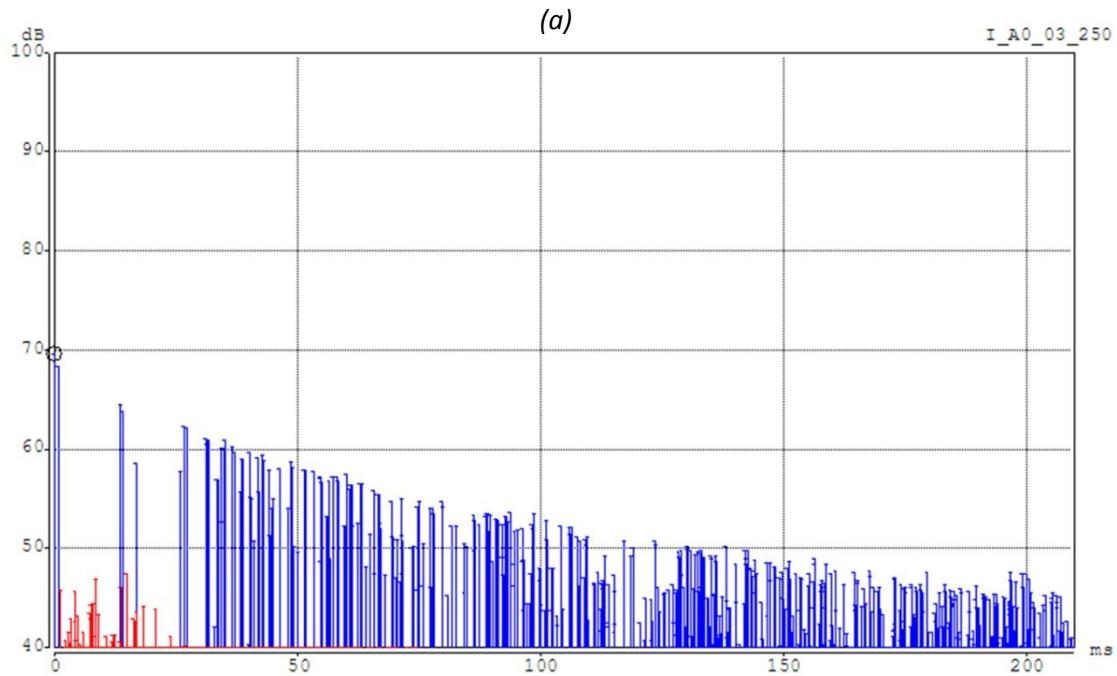


Figura 4.8. Modelo en 3D de la geometría de la sala Xochipilli incluyendo posición de la fuente en el escenario (A0) y micrófono en la fila 3 (03).

4.3.1 Análisis de la respuesta acústica temprana.

La parte temprana en este análisis se consideró hasta los primeros 210 ms. La simulación se realizó con reflexiones especulares de noveno orden. La *figura 4.9* muestra los ecogramas obtenidos para las octavas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz, respectivamente.



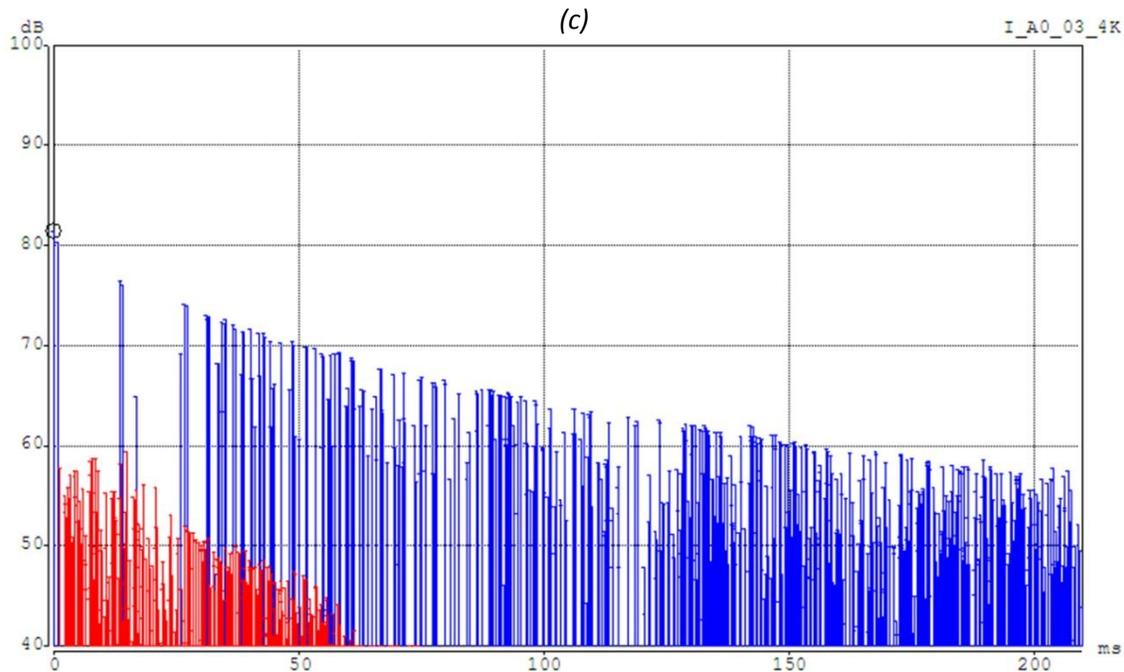


Figura 4.9. Ecogramas resultantes del análisis basado en fuentes imagen para a) 250 Hz, b) 1 kHz y c) 4 kHz

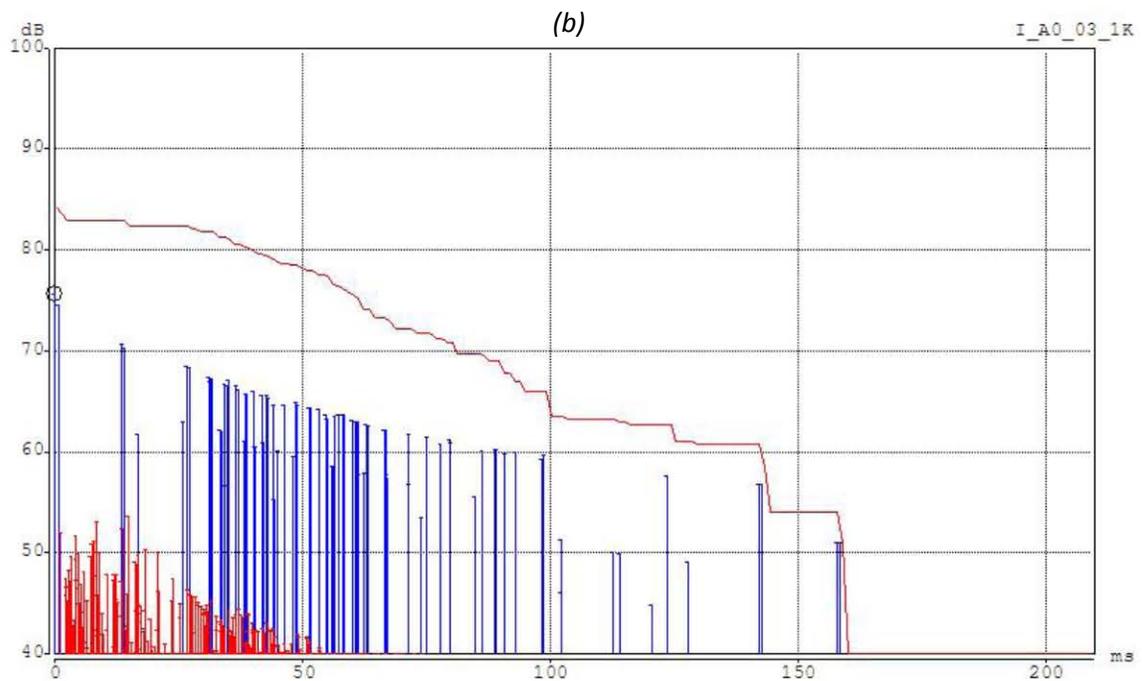
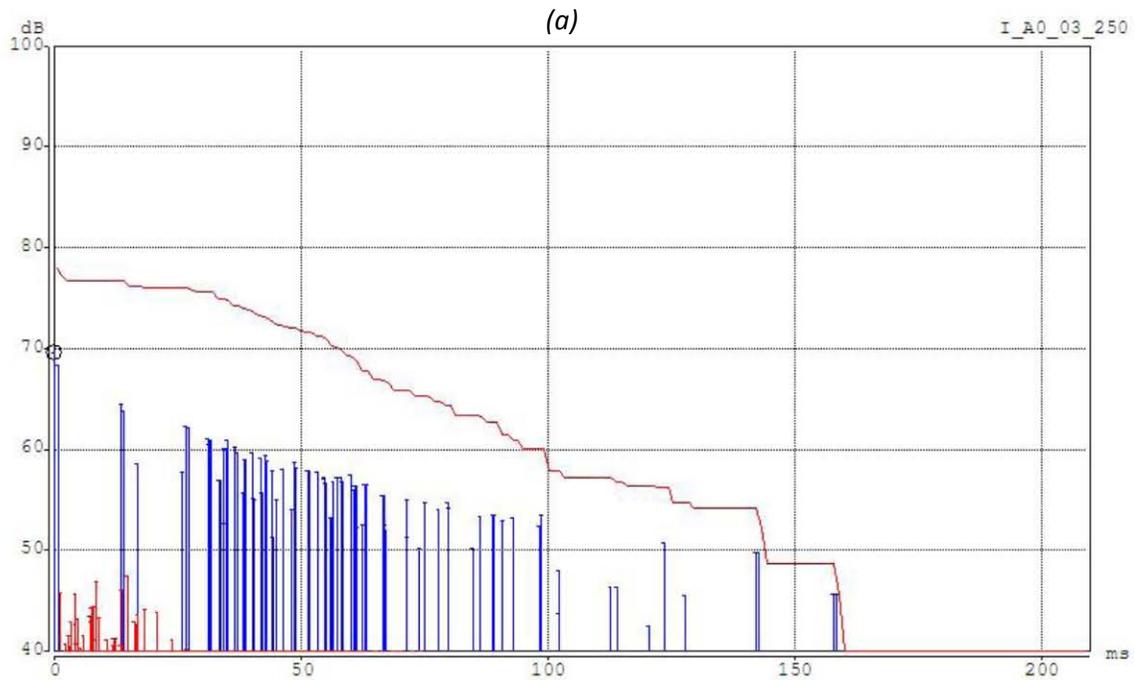
Los ecogramas de la *figura 4.9* muestran las reflexiones especulares de hasta noveno orden (azules) y las reflexiones difusas de primer orden (rojas). Debido a que las reflexiones se presentan de forma discreta no es fácil observar las irregularidades que se pudieran presentar. Lo que se puede observar son concentraciones de reflexiones (parte más sombreada en el ecograma), es decir, reflexiones de diferentes órdenes que llegan al receptor casi al mismo tiempo. Esta acumulación de reflexiones puede llegar a tener un nivel mayor que el sonido directo ya que, dependiendo de la superficie en la que se reflejen, la energía se concentra en intervalos breves de tiempo, y esto provoca los relieves observados en las curvas suavizadas experimentales.

En 250 Hz se observa una zona más sombreada (acumulación de reflexiones), aproximadamente en 80 y 140 ms que concuerdan con las variaciones observadas en la *figura 4.7- a*.

Para la octava de 1 kHz se observa que en 150 y 180 ms, la densidad de reflexiones aumenta, los tiempos en que se producen coinciden con las irregularidades observadas en la curva suavizada para esta misma frecuencia (*Figura 4.7-b*).

En el ecograma de la *figura 4.7-c*, las acumulaciones más notables se observan entre 140 y 190 ms con una separación aproximada de 10 ms entre ellas.

Por otra parte, debido a que el ecograma contiene todas las reflexiones especulares hasta noveno orden producidas en este intervalo de tiempo, las reflexiones de bajo orden que pueden causar ecos o presentar un patrón singular se combinan con las de mayor orden y se dificulta su detección. Por esta razón se decidió examinar cómo se distribuyen las reflexiones hasta tercer orden (Figura 4.10).



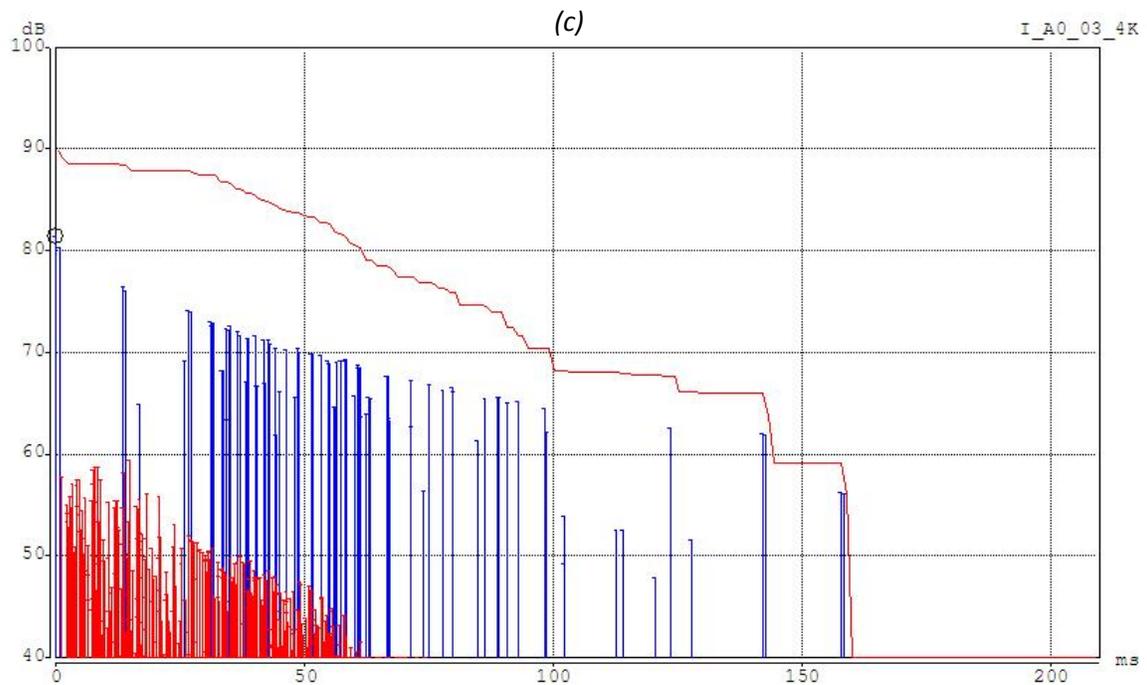


Figura 4.10. Ecogramas resultantes del análisis basado en fuentes imagen con reflexiones hasta tercer orden para a) 250 Hz, b) 1 kHz y c) 4 kHz.

En estos ecogramas se observan reflexiones de tercer orden aisladas a partir de 100 ms. En la curva de decaimiento (curva roja) de la *figura 4.10*, se observa un decaimiento regular hasta este tiempo, después del cual se presentan variaciones debido a estas reflexiones aisladas.

La *figura 4.11* muestra la simulación en CATT-Acoustic™ de la trayectoria de las reflexiones aisladas de tercer orden de mayor amplitud que se presentan a partir de 100 ms. Debido al tiempo en el que ocurren estas reflexiones y a su trayectoria sencilla pero larga, no forzosamente serán percibidas como ecos, pero influyen de manera negativa en la percepción del sonido, pudiendo afectar la inteligibilidad de éste.

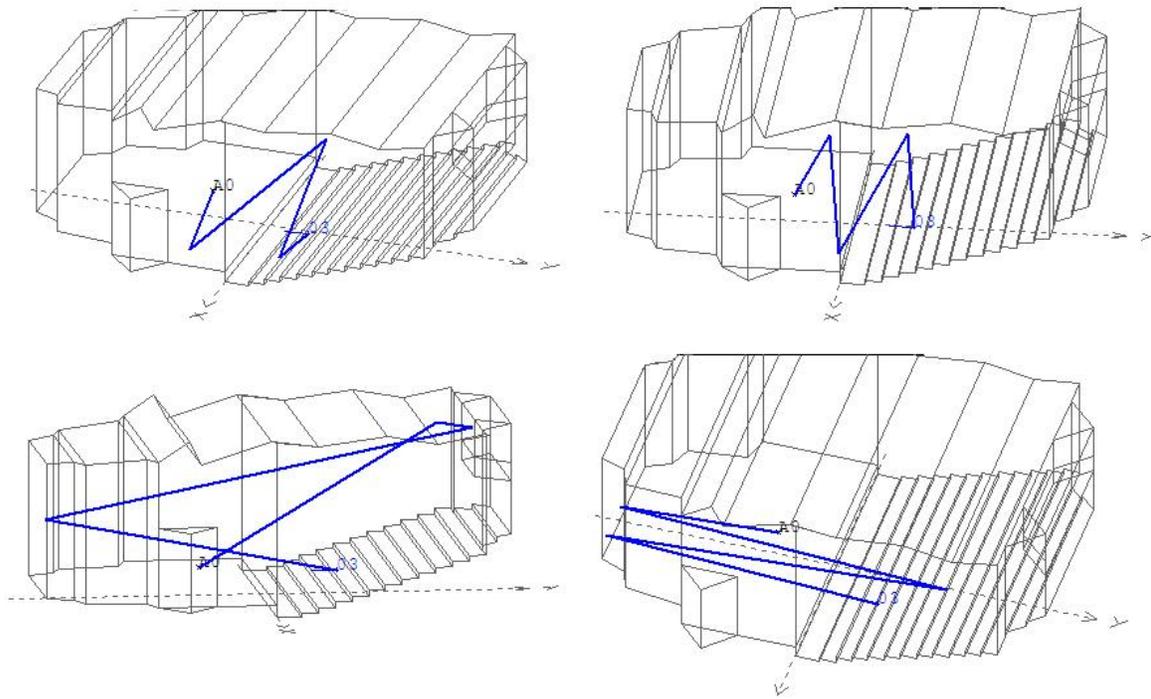
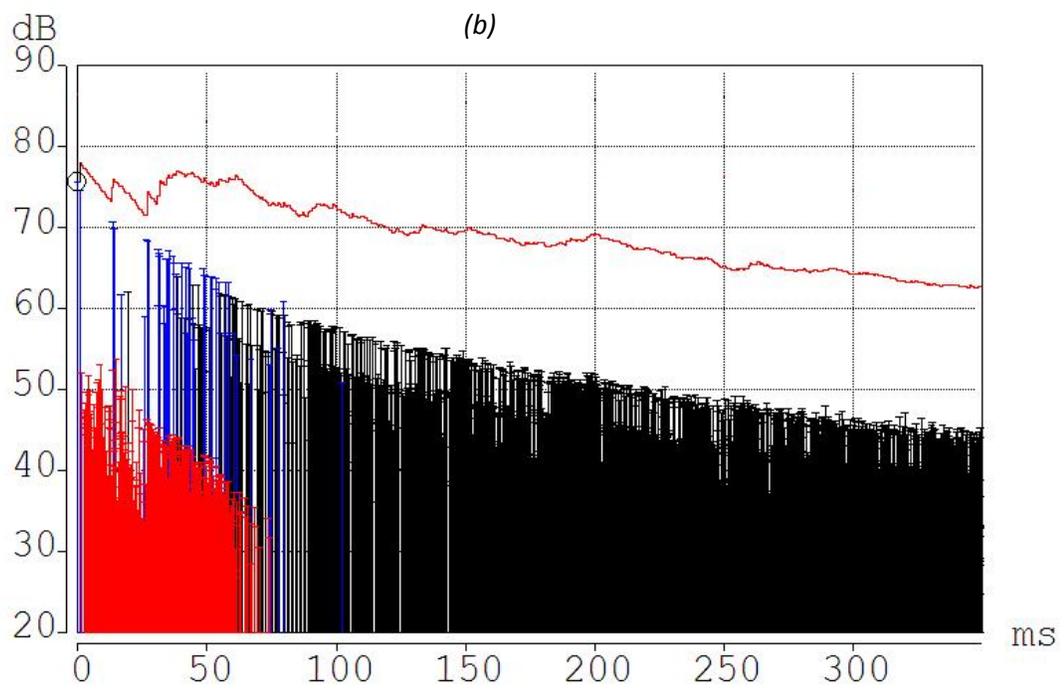
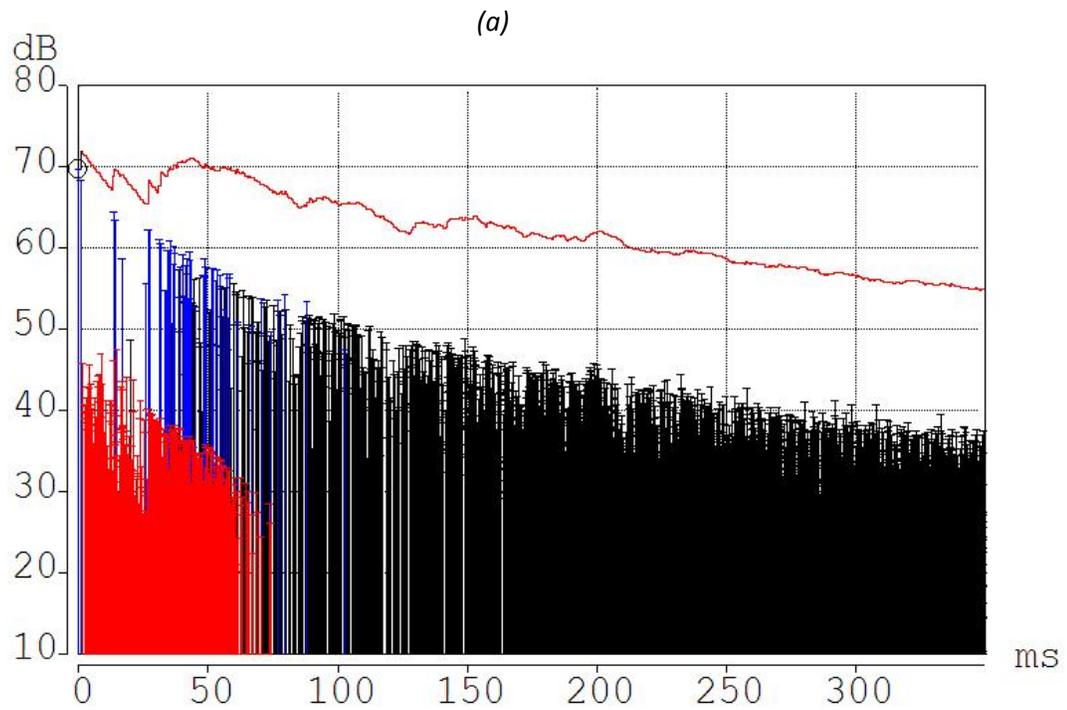


Figura 4.11. Trayectorias de rayos acústicos con reflexiones de tercer orden que ocurren en 98 ms (superior izquierdo), 123 ms (superior derecho), 142 ms (inferior izquierdo) y 158 ms (inferior derecho).

4.3.2 Análisis de ecograma simulado

En la *figura 4.12* se muestra el ecograma completo que se obtiene de la simulación basada en el trazado aleatorio de conos. Contiene todas las reflexiones especulares y difusas que se producen en la sala. La curva roja representa la envolvente suavizada utilizando un filtro exponencial con una constante de tiempo $\tau = 10$ ms.



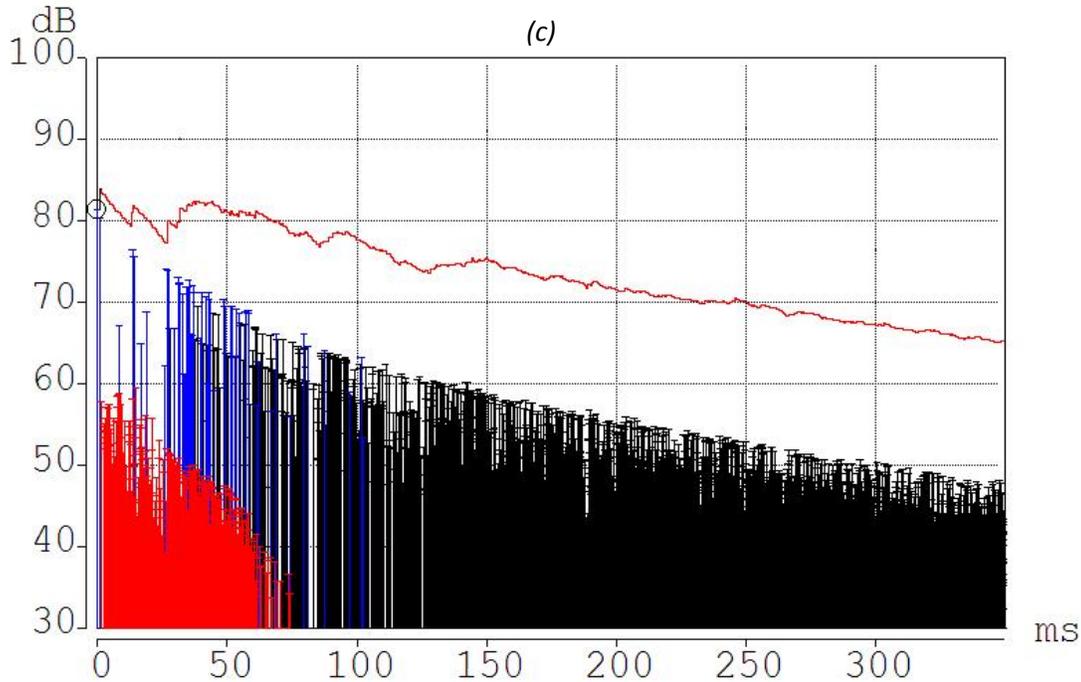


Figura 4.12. Ecograma resultante del análisis basado en RTC para a) 250 Hz, b) 1 kHz, c) 4kHz.

En los ecogramas de las tres octavas analizadas, se observan irregularidades al inicio de las curvas envolventes suavizadas, que se deben a las reflexiones especulares de primer orden (provenientes de piso, techo y pared lateral más cercana al oyente) producidas inmediatamente después del sonido directo con la misma separación entre ellas, por lo que pareciera que siguen un patrón periódico, con un periodo aproximado de 12 ms. El tiempo de arribo entre el sonido directo y estas primeras reflexiones es demasiado largo, el efecto causado por este evento es la posible disminución de la inteligibilidad en el recinto.

Tanto en el ecograma 4.12-a como en el 4.12-b, la curva suavizada presenta irregularidades alrededor de 100, 150 y 200 ms con diferentes formas y amplitudes. Para la curva de 1 kHz también se observan irregularidades en 60 ms; mientras que en el ecograma 4.12-c se observan sólo alrededor de 100 y 150 ms. Estas irregularidades están dentro del intervalo de las observadas en la envolvente suavizada de la respuesta al impulso medida *in situ* (Figura 4.7).

4.4 Comparación de medición experimental y simulación.

Para que la medición experimental y la simulación en CATT-Acoustic™ fueran equiparables, fue necesario hacer coincidir algún parámetro que se pudiera determinar tanto en las mediciones *in situ* como en la simulación. Se optó por realizar un ajuste exponencial tanto a la curva envolvente

experimental suavizada, como a las reflexiones obtenidas en la simulación, debido a que una curva exponencial describe de manera general el decaimiento de la energía sonora en el recinto. Al igual que en la sección 3.4, se igualaron los coeficientes de atenuación α y se obtuvieron los valores mostrados en la *tabla 4.1*.

α	
Experimental	-4.1933
Simulación	-4.0481

Tabla 4.1. Valores obtenidos del coeficiente de atenuación.

Además de ajustar las constantes de atenuación, fue necesario verificar que hubiera una correspondencia temporal entre las curvas experimentales y la simulación.

El tiempo en el que llegan las reflexiones depende de la velocidad del sonido en el medio, que a su vez depende de la temperatura del aire (*Ec. 4.1*). La *figura 4.13* muestra los resultados obtenidos de esta comparación.

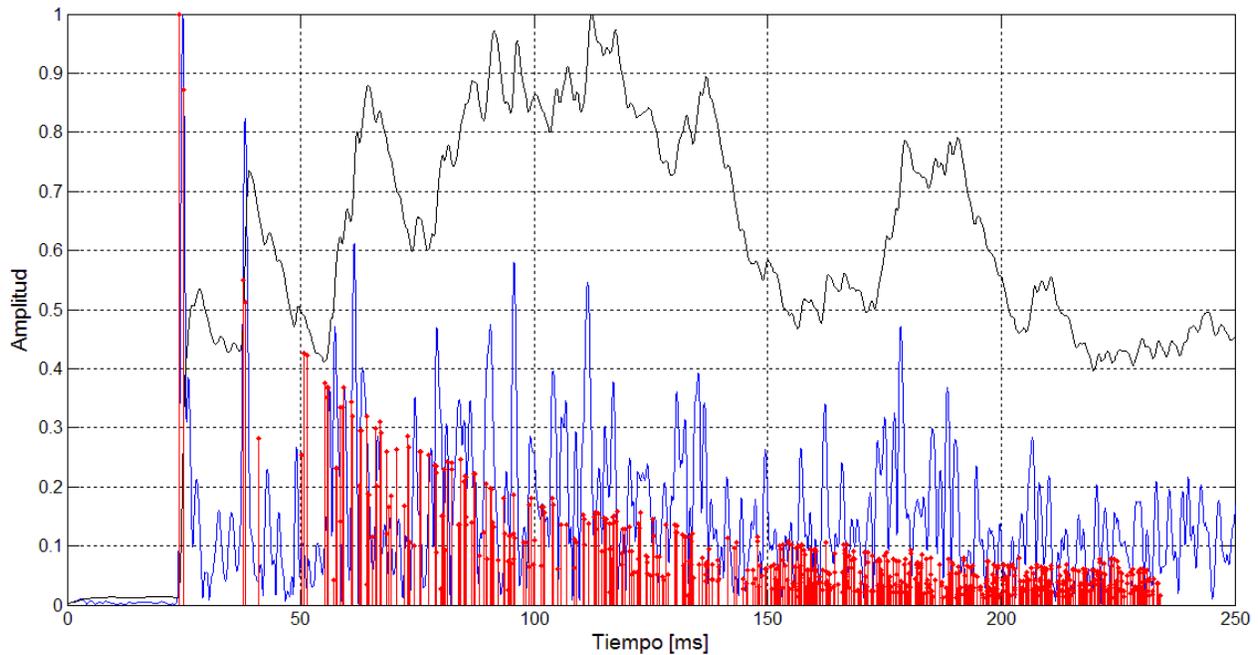


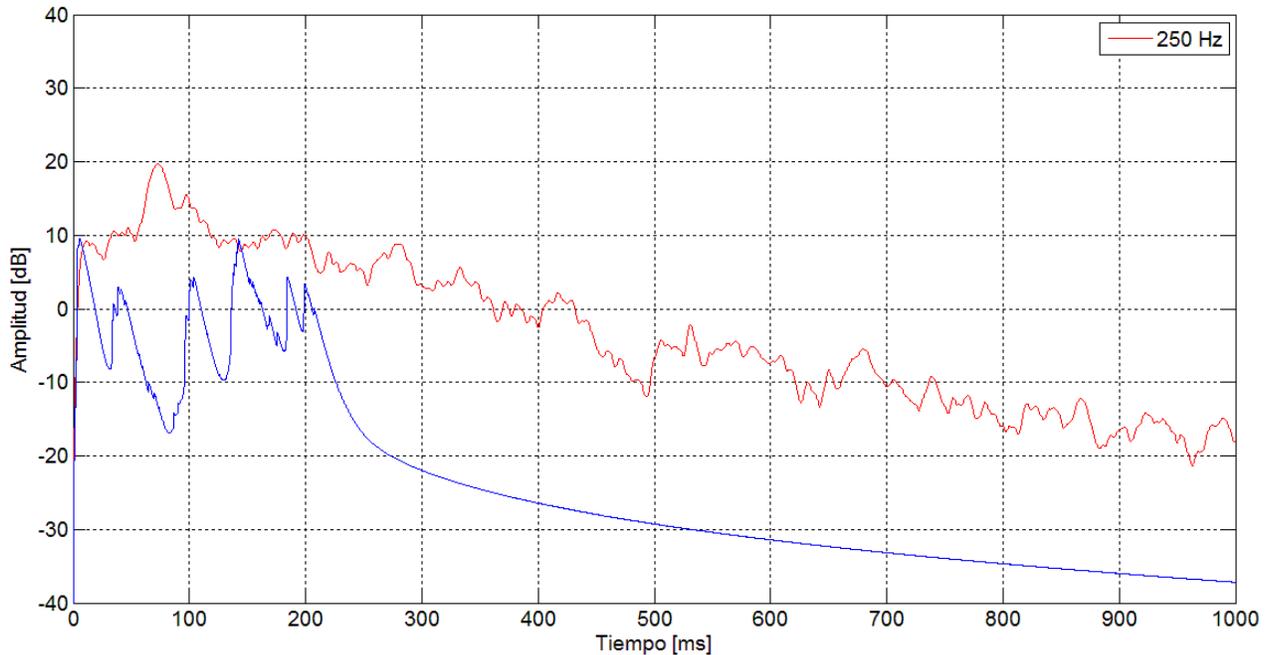
Figura 4.13. Envolvente de la RI experimental (azul), envolvente suavizada (negra) y reflexiones obtenidas de la simulación (rojo) para la octava de 1 kHz.

Tanto las curvas experimentales como la simulación, se graficaron incluyendo el retardo de la fuente al receptor (24.1 ms) para una mejor apreciación. Como se puede observar, las reflexiones discretas obtenidas de la simulación coinciden con los eventos impulsivos de la envolvente de la respuesta al impulso.

A partir de las reflexiones discretas obtenidas en la simulación con el método de fuentes imagen, se calculó una curva suavizada de decaimiento que fuera comparable con la envolvente suavizada obtenida en la sección 4.2.

Para esta comparación, se utilizó un criterio de normalización basado en el sonido directo. Debido a que en la medición experimental no se puede especificar con exactitud qué amplitud tiene la reflexión que corresponde al primer arribo, se consideró como sonido directo el promedio de las amplitudes de las reflexiones que suceden en los primeros 10 ms de la envolvente de la respuesta al impulso. Ambas curvas (experimental y simulación) se normalizaron bajo este criterio. Las curvas para las octavas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz se muestran en la *figura 4.14*.

(a)



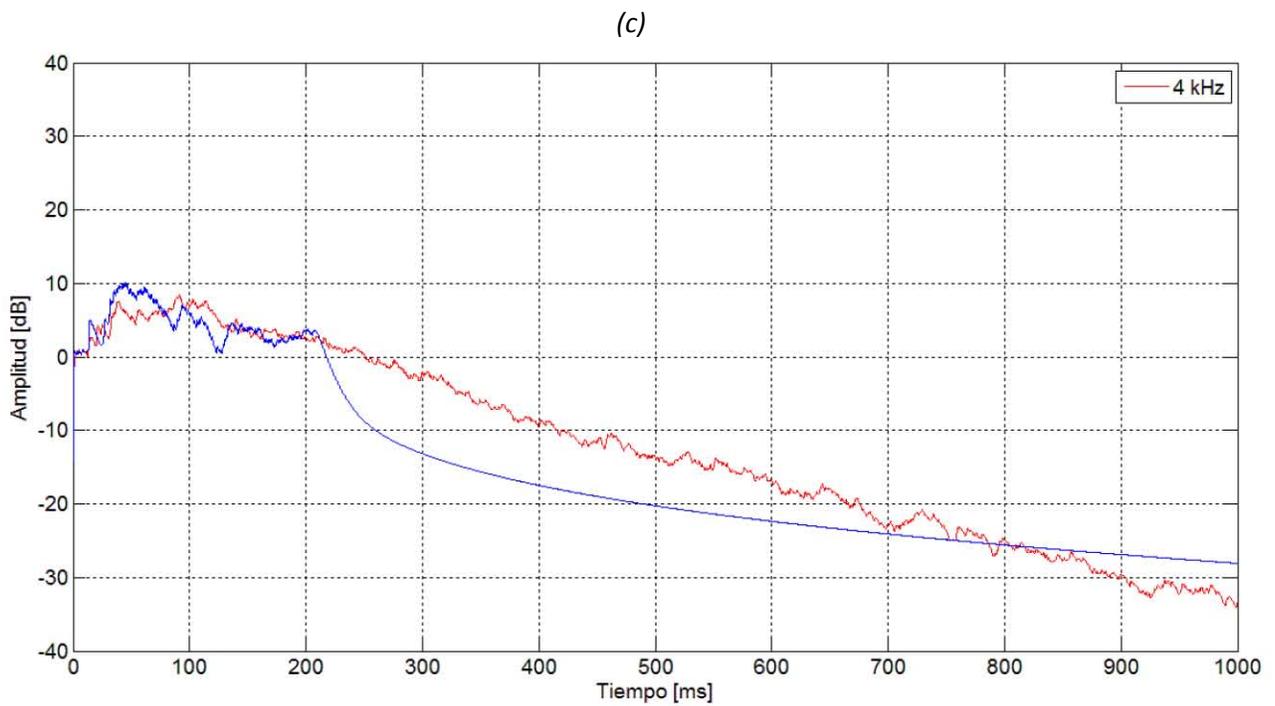
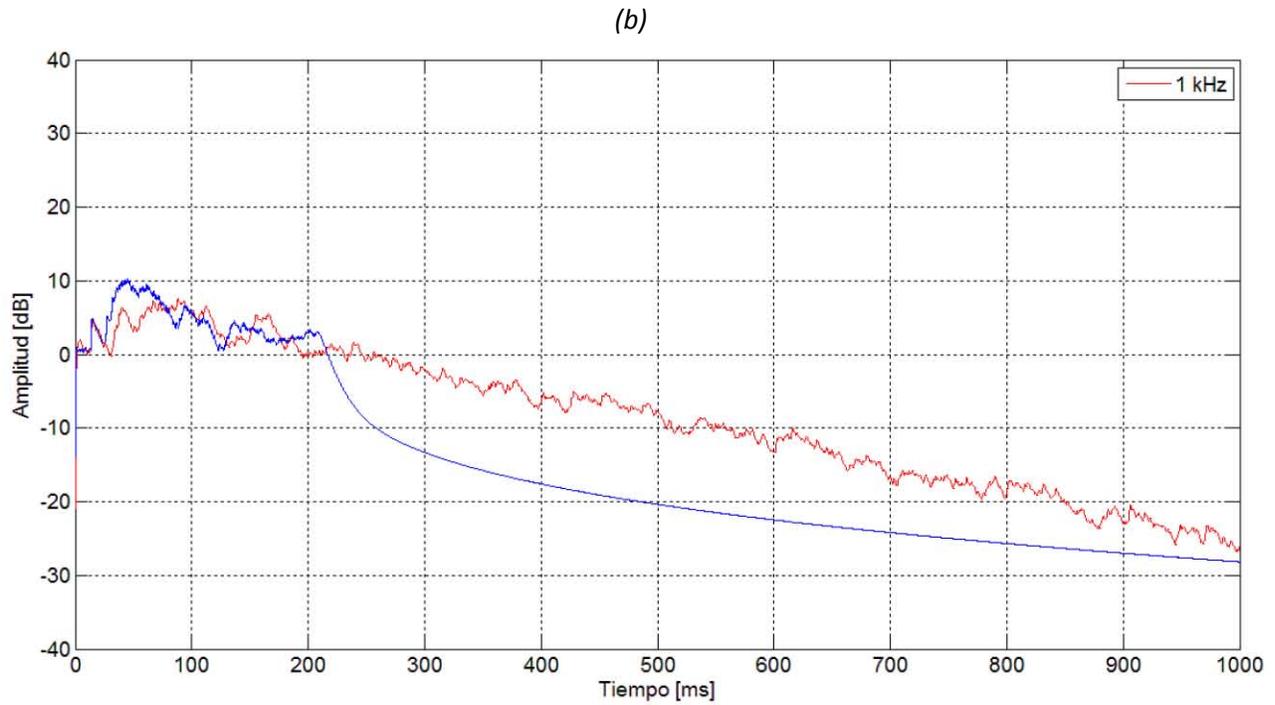


Figura 4.14. Curvas de decaimiento suavizadas experimental (roja) y simulación (azul), para las octavas a) 250 Hz, b) 1 kHz, c) 4 kHz.

La simulación no entrega datos después de 210 ms, por esta razón la comparación se realiza solamente en la parte temprana de la respuesta.

Las curvas obtenidas para la octava de 250 Hz, sólo coinciden en la amplitud y tiempo de arribo del sonido directo. La curva de la simulación presenta muchas irregularidades que no se distinguen tanto en la curva experimental. Sin embargo, los picos que se observan en 40 , 100 y 200 ms de la curva obtenida de la simulación coinciden con las irregularidades de la curva experimental en los tiempos mencionados.

Con las curvas para 1 y 4 kHz se puede confirmar la similitud entre la medición experimental y la simulación, ya que la correspondencia cualitativa entre ellas es mayor.

Se realizó una simulación considerando que la sala estuviera llena. Al comparar los resultados generados se observa que las curvas envolventes suavizadas (*figura 4.15*) son muy similares por lo que el análisis anterior también es válido para la sala llena.

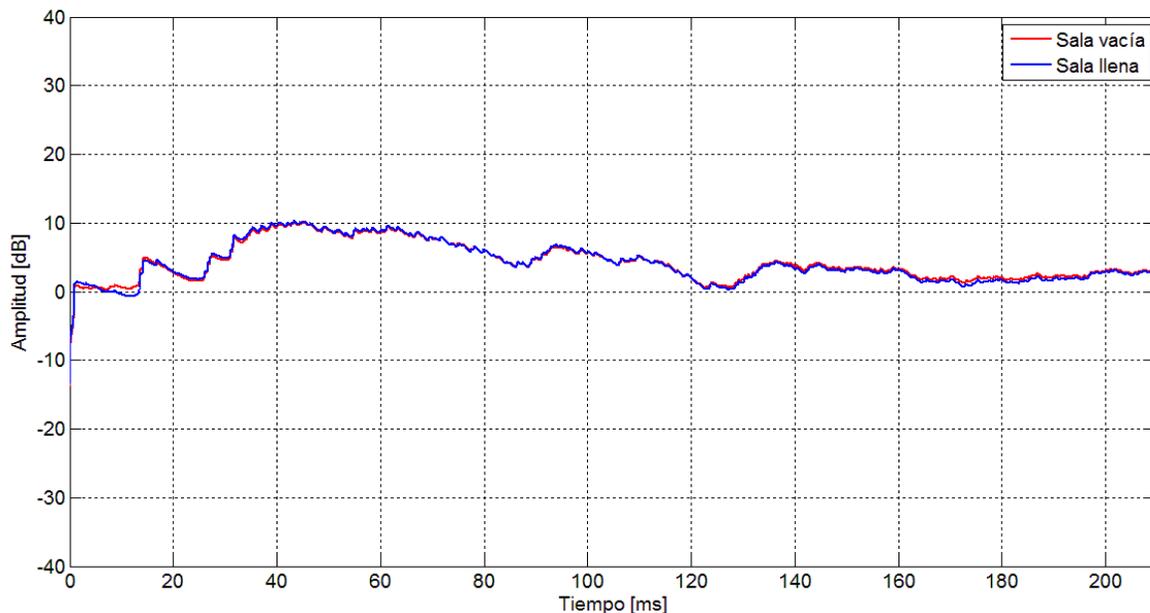


Figura 4.15. Curvas de decaimiento suavizadas de la sala vacía (roja) y ocupada (azul), para la octava de 1 kHz.

4.5 Criterio de percepción de eco.

Para poder argumentar si alguna de las reflexiones analizadas anteriormente tiene algún efecto negativo en la forma como se percibe el sonido en la sala, es necesario aplicar un criterio que permita confirmar las suposiciones hechas a partir de los resultados obtenidos de la medición y la

simulación. Para analizar estos resultados se utilizaron los umbrales de percepción de eco y el criterio objetivo de percepción de eco mencionados en la sección 2.3.1.

4.5.1 Umbrales de percepción de eco.

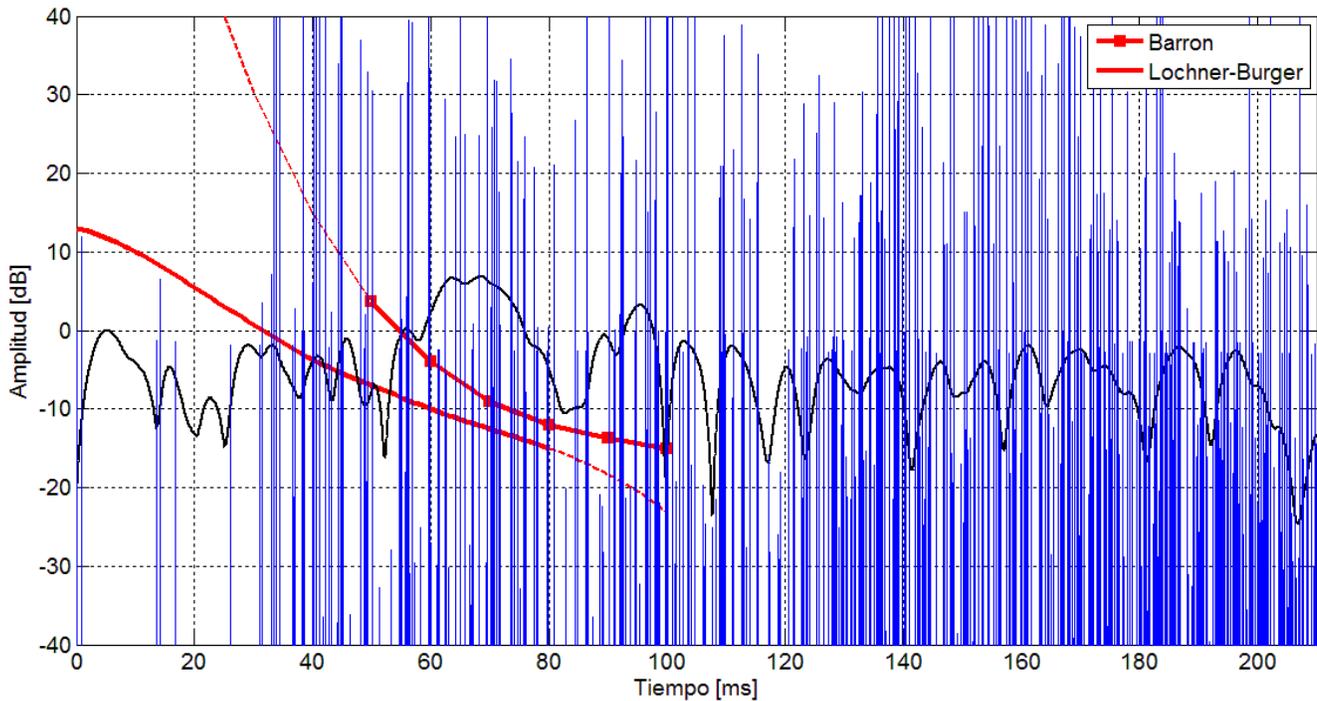
Como se mencionó en la sección 2.3, existen umbrales de percepción de eco que sirven de pauta para saber si una reflexión puede o no ser perjudicial para la percepción del sonido.

De la gran variedad de umbrales formulados por diversos autores, en este trabajo se utiliza el propuesto por J.P.A. Lochner & J.F. Burger [20], ya que representa el umbral de eco con mayor exactitud, puesto que su investigación se basa en el criterio de "eco claramente audible".

Asimismo se utiliza el umbral propuesto por M. Barron en su estudio "*efectos subjetivos de las reflexiones primarias en salas de conciertos*" [2], debido a que determina de manera más específica, en qué momento el eco comienza a ser molesto, además de que sus resultados fueron obtenidos usando música como señal de prueba.

En la *figura 4.16* se observan los umbrales de percepción de eco junto con las curvas obtenidas de la medición experimental y la simulación.

(a)



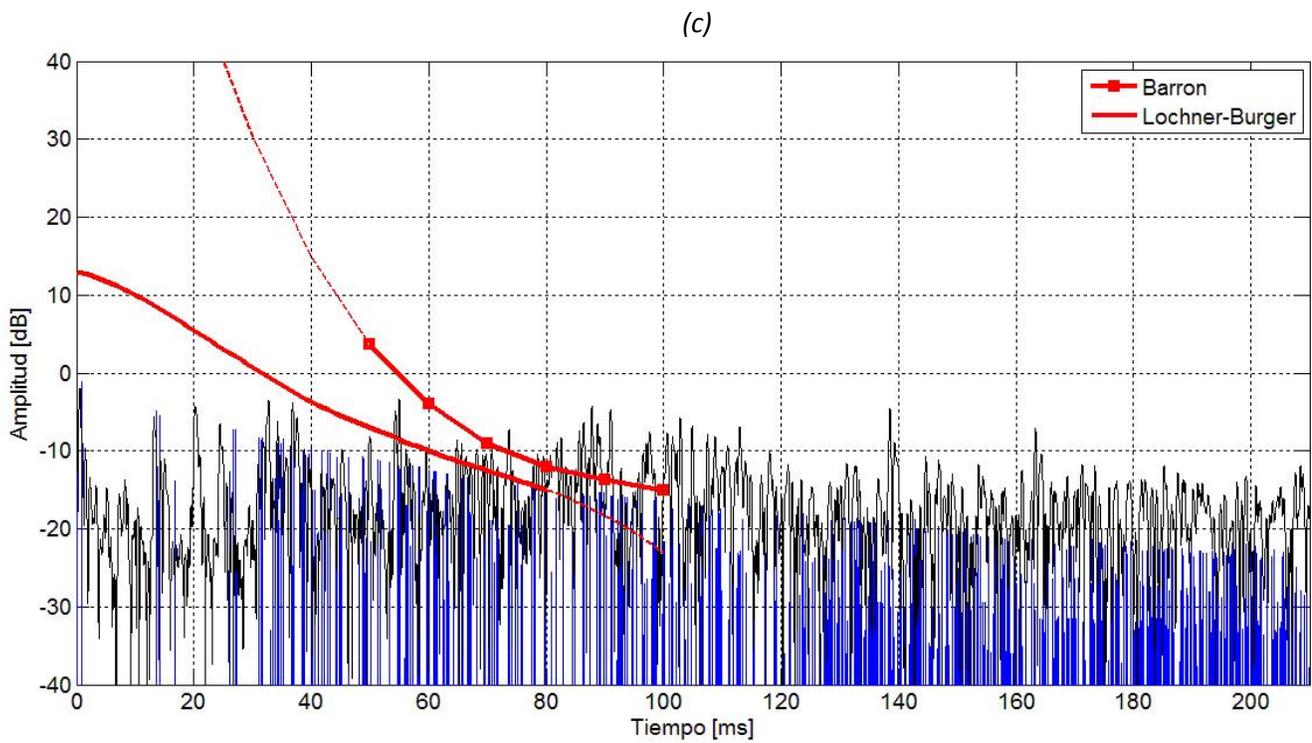
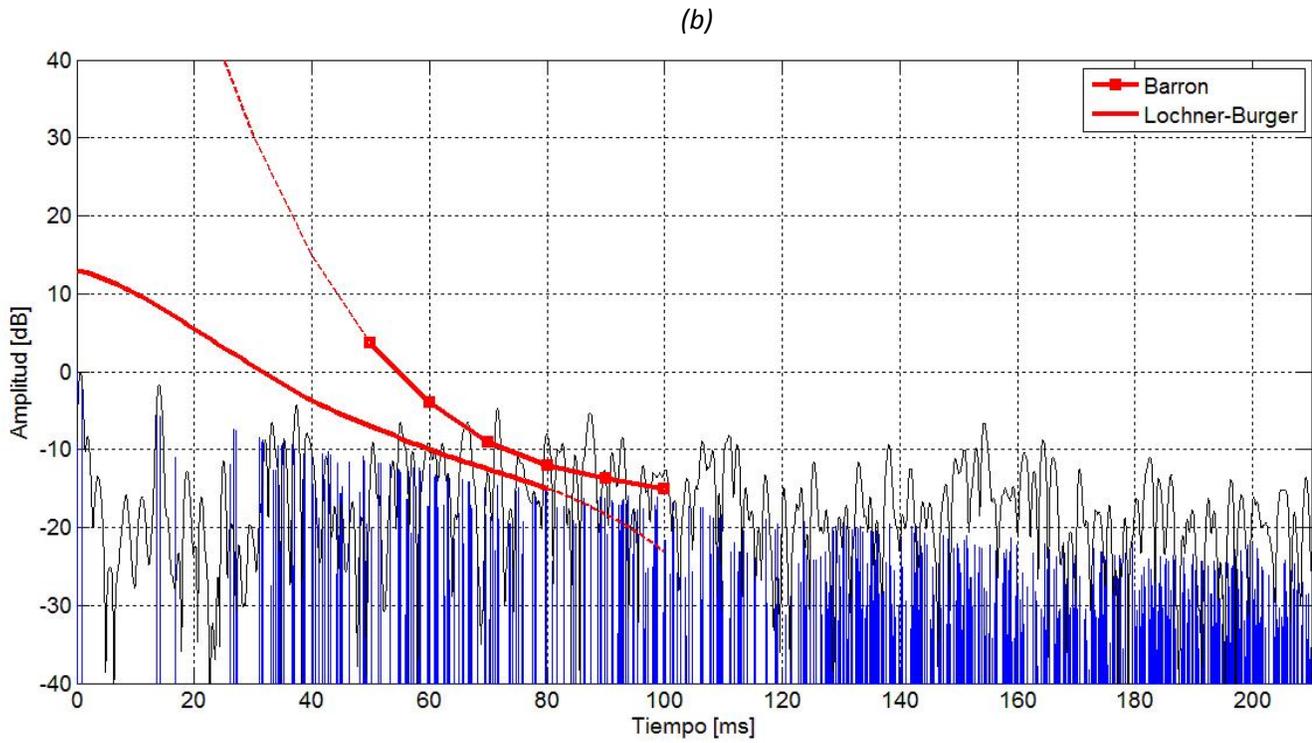


Figura 4.16. Reflexiones experimental (negro) y simulación (azul) para a)250 Hz, b)1 kHz y c)4 kHz, junto con los umbrales de percepción de eco (rojo) propuestos por Barron y Lochner & Burger.

En las gráficas de la figura 4.16 se observa que las reflexiones que ocurren en los primeros 30 ms no tienen un nivel que sobrepase el umbral, por lo tanto no se perciben como ecos. Esto coincide con los ecogramas de la medición y la simulación, ya que en esta región no se observaron irregularidades significativas. Por lo tanto, se confirma que el único efecto que posiblemente se produce en este intervalo de tiempo es el efecto Haas.

A partir de 30 ms, los niveles de las reflexiones para la octava de 250 Hz comienzan a rebasar el umbral de Lochner & Burger y su comportamiento continúa constante en todo el intervalo de tiempo siguiente. Para las octavas de 1 y 4 kHz, el umbral se rebasa a partir de aproximadamente 60 ms. Esta observación coincide con lo mencionado en la sección 2.3, sobre las reflexiones con retardos mayores a 50 ms que comienzan a influir en la manera en que se percibe el sonido.

El umbral de *Barron* es más alto, si se excede es más seguro que se perciba una alteración en la percepción del sonido. Como se mencionó anteriormente, para la octava de 250 Hz (*figura 4.16 a*), desde tiempos de retardo muy cortos se presentan irregularidades cuyas amplitudes rebasan en extremo el umbral. Este comportamiento no se observa en las octavas de 1 kHz y 4 kHz (*figura 4.16 b y c*). De la *figura 4.16 b y c* se puede observar que a partir de 80 ms la mayoría de las reflexiones sobrepasan el umbral. Estos resultados son consistentes con las observaciones hechas en los análisis de los ecogramas, puesto que todas las irregularidades encontradas ocurren después de aproximadamente 80 ms. Para estos tiempos de retardo se considera que la presencia del eco ya es molesta.

4.5.2. Criterio objetivo de percepción de eco.

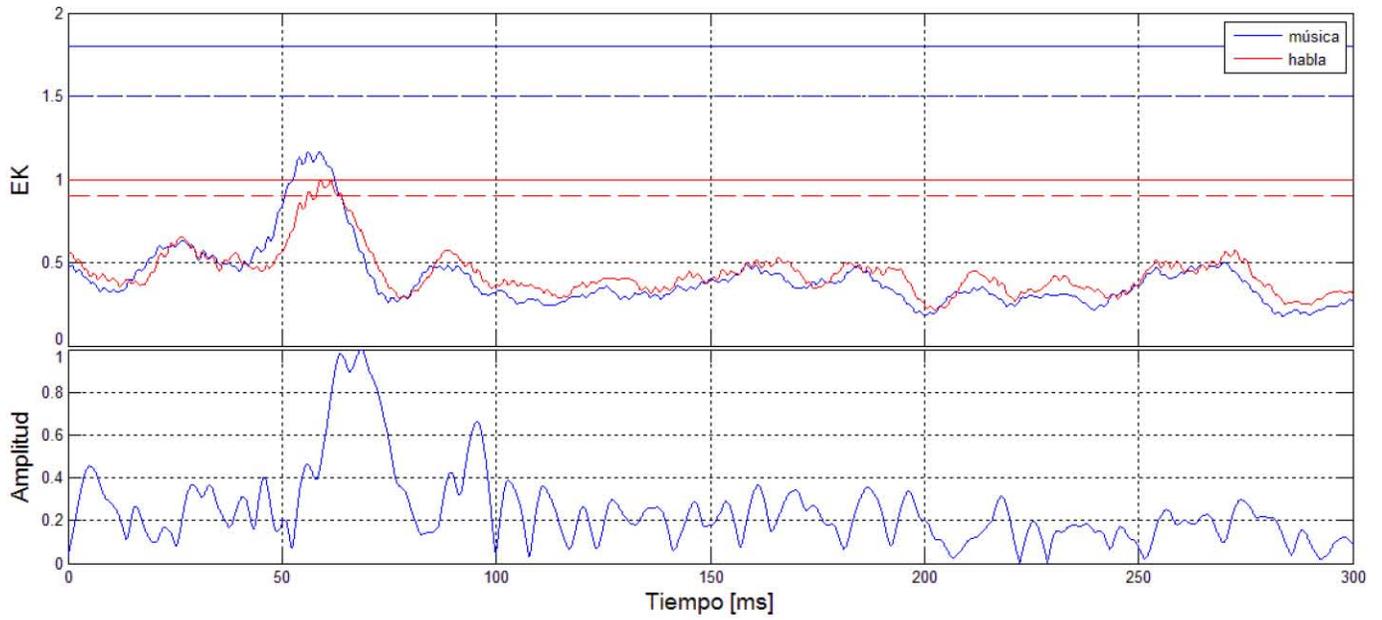
El criterio propuesto por Dietsch & Kraak determina un valor crítico (*Tabla 4.2*) que indica el riesgo de ecos audibles, y un intervalo de tiempo mínimo entre reflexiones consecutivas (*50 ms - habla; 80ms - música*) que indica el riesgo de ecos múltiples audibles. (*ver Sección 2.3.2*)

	Música	Habla
EK _{10%}	1.5	0.9
EK _{50%}	1.8	1

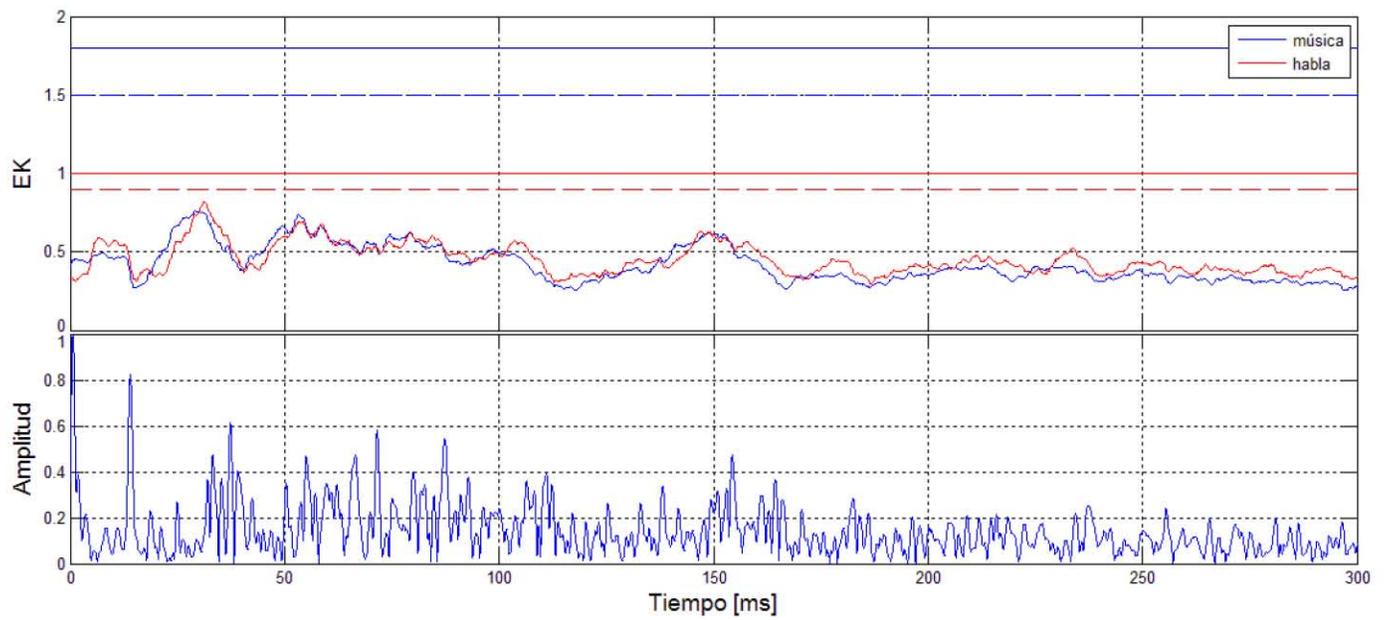
Tabla 4.2. Valores de EK para música y habla.

A partir de la respuesta impulso medida en la sala, se obtuvieron los valores de EK resultantes de la ecuación 2.4 (*ver Sección 2.3.2*). La *figura 4.17* muestra el curso temporal de los valores de EK, para las octavas de 250 Hz, 1 kHz y 4 kHz.

(a)



(b)



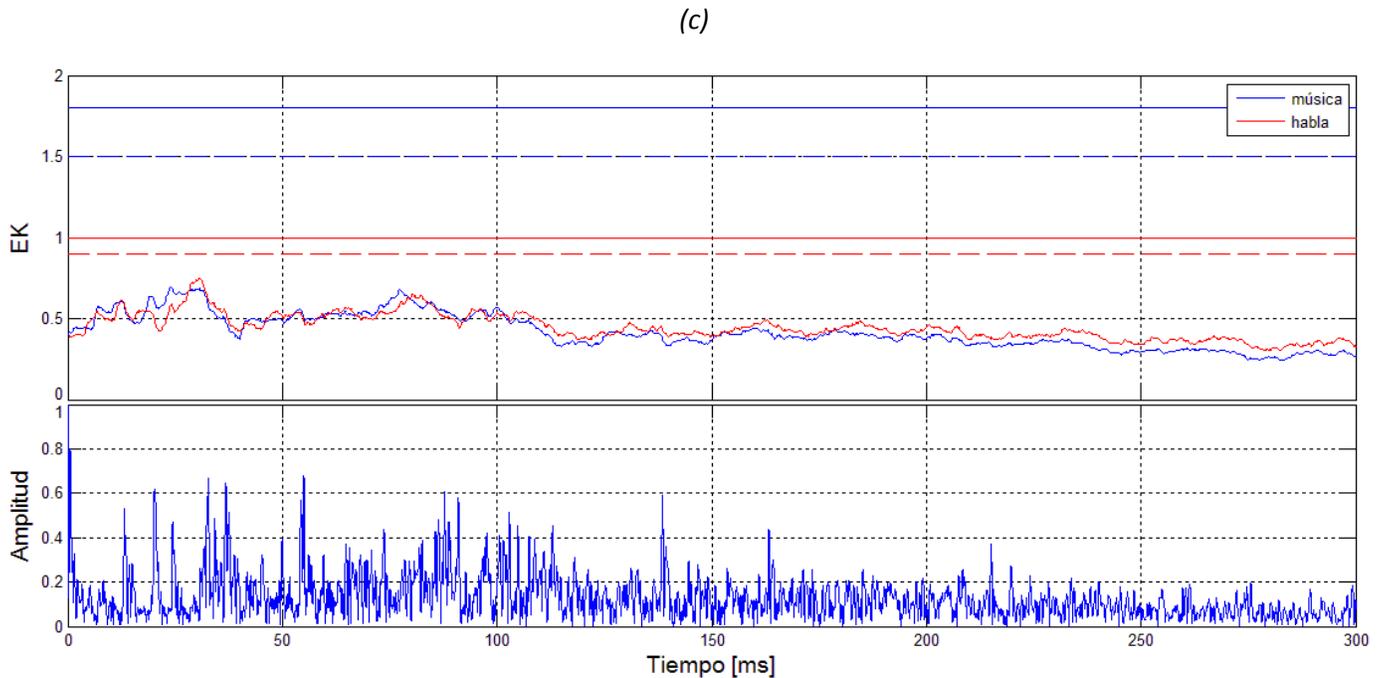


Figura 4.17. Curvas de EK para música (azul) y habla (roja) (superior). Respuesta impulso de la sala (inferior).
 a)250 Hz, b)1 kHz y c)4 kHz. — EK 50% - - - - EK 10%

En las gráficas de la *figura 4.17* se puede observar qué reflexiones pueden ocasionar ecos audibles, así como el tiempo de separación entre ellas.

En la gráfica *4.17-a* se observa que las reflexiones que se presentan en aproximadamente 60 ms exceden el valor crítico de $EK_{10\%}$ para el habla, por lo que se podría esperar una alteración en la percepción del sonido para este tipo de sonido en un 10 % de la audiencia. Mientras que para la música, ningún grupo de reflexiones excede este valor, sin embargo, se pueden observar grupos de reflexiones débiles en 90 ms, 160 ms y 260 ms que superan el intervalo de tiempo mínimo para la música (*80 ms*), debido a esto, algunos escuchas (<10%) podrían llegar a percibir múltiples ecos (*eco "flutter"*).

Tanto para la octava de 1kHz (*figura 4.17- b*) como para la de 4kHz (*figura 4.17- c*), ninguna de las reflexiones producidas en los primeros 300 ms superan los valores de $EK_{10\%}$ y $EK_{50\%}$. Esto indica que no hay riesgo de un eco audible.

Al analizar la separación entre las reflexiones, se observa que en la octava de 1 kHz, sólo en la curva para el habla existe una separación de 50 ms entre las reflexiones que se presentan en 100 y 150 ms aproximadamente, las cuales podrían influir en la percepción del habla. Sin embargo para la música, ninguna de las reflexiones exceden el intervalo de tiempo crítico.

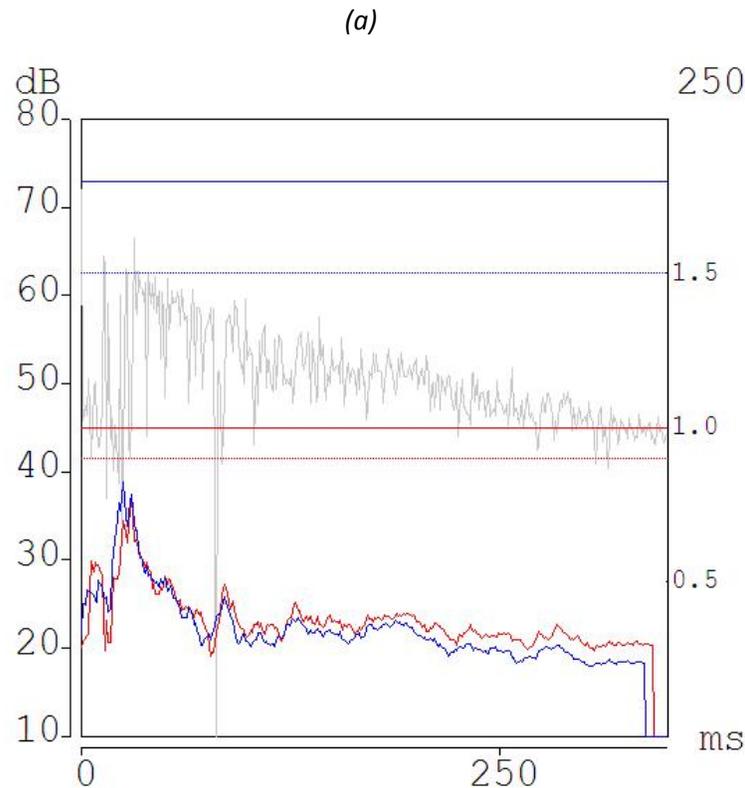
Al igual que en la octava de 1 kHz, en 4 kHz, la separación de las reflexiones con mayor amplitud en la curva para la música es menor a 80 ms, por lo tanto no hay riesgo de eco "flutter", no obstante, en la curva para el habla, el grupo de reflexiones de mayor amplitud se presenta en 30 ms, y después de este, se observa una cresta aproximadamente entre 80 y 90 ms. En este caso, el intervalo de tiempo mínimo (50 ms) entre estos dos grupos se supera, de manera que para una minoría de la audiencia múltiples ecos son perceptibles.

Los valores máximos de EK por octava para la música y el habla se muestran en la *tabla 4.3*.

EK	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Música	1.032	1.167	0.652	0.761	0.887	0.694
Habla	0.916	0.997	0.672	0.818	0.794	0.749

Tabla 4.3. Valores máximos de EK de las curvas para la música y el habla.

El software CATT-Acoustic™ también proporciona esta información. La *figura 4.18* muestra las curvas de EK obtenidas de la simulación.



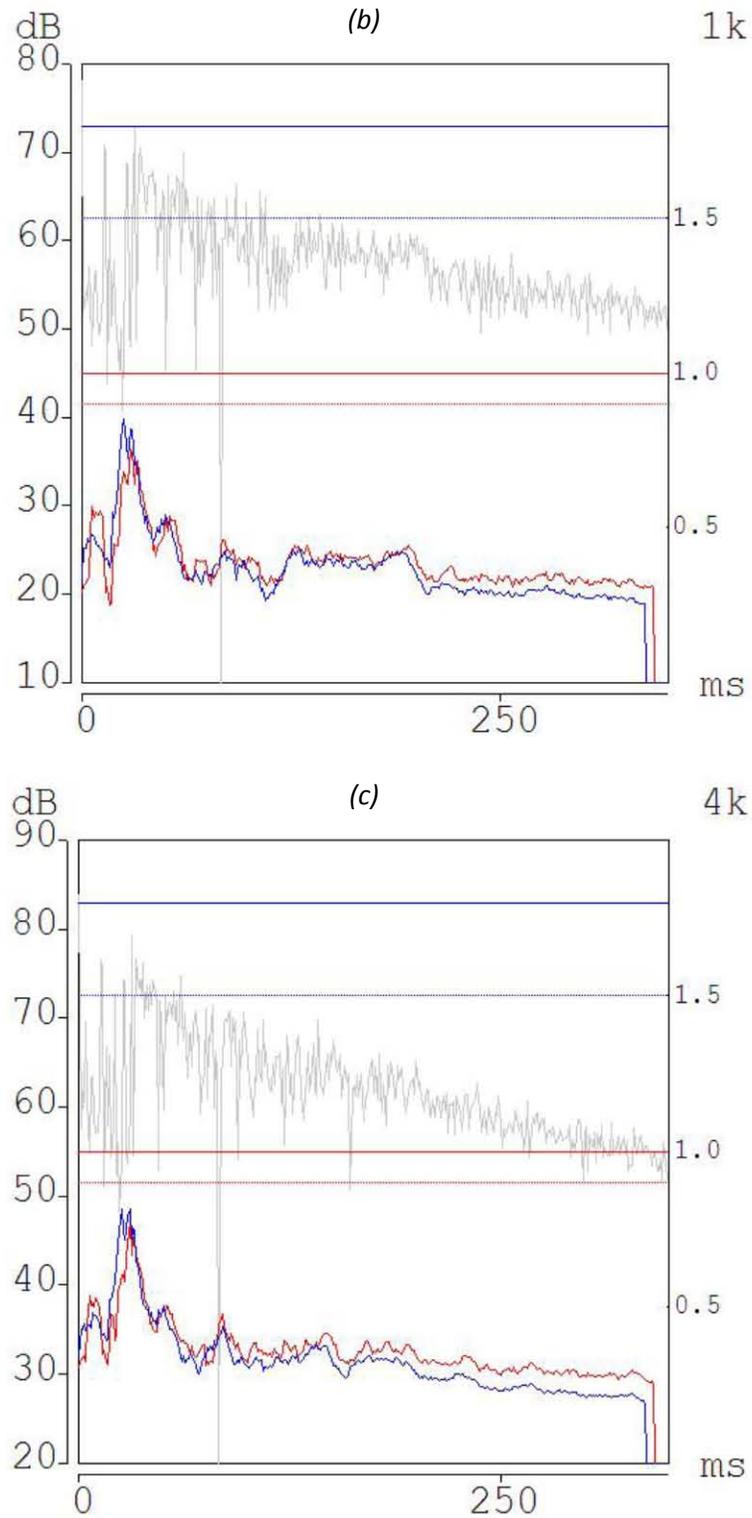


Figura 4.18. Curvas de EK para música (azul) y habla (roja) y respuesta impulso de la sala (gris) obtenidas de la simulación para a) 250 Hz, b) 1 kHz y c) 4 kHz. — EK 50% — EK 10%

En las curvas obtenidas de la simulación, se observa que al igual que en la medición, las reflexiones más notables no sobrepasan los valores críticos, sin embargo, la separación entre ellas puede llegar a percibirse por algunas personas como eco "flutter".

Los tiempos en los que se presentan las reflexiones más relevantes en la octava de 250 Hz son muy similares a los medidos experimentalmente. Las reflexiones de mayor amplitud se dan aproximadamente en 60 ms. Después de este grupo, otros grupos de reflexiones importantes se presentan alrededor de aproximadamente 80 ms, 130 ms y 190 ms. En este caso se puede señalar que para el habla, estos grupos de reflexiones tienen aproximadamente la separación mínima establecida para el habla (50 ms), aunque como se mencionó con anterioridad, el riesgo de múltiples ecos audibles sería para un porcentaje muy pequeño de la audiencia. En la curva para la música, la separación entre los grupos de reflexiones más sobresalientes no es mayor al intervalo mínimo requerido.

Para la octava de 1kHz (figura 4.18- b), las reflexiones con amplitud más significativa se presentan en aproximadamente 30 ms. Al igual que en los resultados obtenidos para la medición *in situ*, la curva de la música no presenta problemas, mientras que para el habla, las reflexiones ocurridas alrededor de 80 ms y 130 ms tienen la separación mínima, por lo que existe la posibilidad de una alteración en la percepción del habla.

En 4 kHz, después de las reflexiones que se presentan en 30 ms en la curva para el habla, surge un grupo de reflexiones más débiles alrededor de aproximadamente 50 ms, y es hasta cerca de 100 ms que se observa otro grupo con amplitud similar. Posteriormente aparece otro grupo de reflexiones con amplitudes notables sobre 150 ms. Los intervalos de tiempo entre estas reflexiones coinciden con el valor mínimo determinado para que lleguen a ser percibidas. Al igual que los casos anteriores, en la curva de la música, este criterio no indica ningún riesgo de ecos múltiples.

4.6 Parámetros acústicos objetivos.

Otra parte del estudio es la obtención de los parámetros acústicos objetivos que describen aspectos subjetivos de la naturaleza acústica de la sala.

Los parámetros obtenidos de las mediciones experimentales fueron: *tiempo de reverberación* T_{30} y T_{15} , *tiempo de decaimiento temprano* EDT, *tiempo central* t_s , *claridad* C_{80} y *definición* D_{50} . Estos valores también son calculados por el software CATT-Acoustic™ en la simulación basada en RTC.

Dependiendo de la aplicación a la que esté destinada el recinto, los valores aceptables o deseables de estos parámetros pueden variar. En este caso los valores que nos interesan son para una sala de conciertos como la sala Xochipilli.

Comenzando con el tiempo de reverberación RT , este no debe ser muy largo, para no afectar la inteligibilidad del sonido, ni muy corto ya que el sonido puede ser desagradable al oído. Por lo tanto, el tiempo recomendado para una sala de conciertos destinada a la ejecución de música ligera y orquestal varía entre 1.5 y 2.2 s, prefiriendo valores entre 1.8 y 2 s en las frecuencias medias, con un aumento en el tiempo para frecuencias bajas.

Como se mencionó en la sección 2.6, se ha observado que la sensación subjetiva de la reverberación se relaciona mejor con el tiempo de decaimiento temprano EDT que con el tiempo de reverberación tradicional. El EDT suele ser con frecuencia menor que el RT . En un espacio completamente difuso, donde el decaimiento es completamente lineal, el EDT y RT serían idénticos. Los valores aceptables de EDT para una sala de conciertos oscilan entre 1.5 y 2.2 s [3].

El tiempo central t_s es un parámetro que ya no se utiliza tanto en la acústica de conciertos debido a su alta correlación con el EDT. Un valor pequeño de t_s corresponde a un sonido claro, i.e. mayor inteligibilidad, mientras que valores altos indican un dominio de la parte reverberante tardía. Según Kürer, una buena inteligibilidad se obtiene con tiempos entre 60 y 140 ms, aunque valores hasta 200 ms son aceptables [19].

El parámetro C_{80} es un criterio útil para determinar la claridad y transparencia de la música en salas de conciertos. El rango típico según Gade es entre -5 y +3 dB [19].

El parámetro D_{50} se utiliza más para salas destinadas al mensaje hablado. Una buena inteligibilidad se obtiene con valores comprendidos entre 40 y 80%. A mayor "definición", mayor inteligibilidad.

La *tabla 4.4* muestra los valores obtenidos de la medición experimental y la simulación en CATT-Acoustic™.

EDT [s]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición	1.98	1.47	1.83	1.73	1.52	1.45
Simulación	1.26	1.29	1.38	1.54	1.44	1.13

T₁₅ [s]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición	1.98	1.56	1.92	1.89	1.66	1.16
Simulación	1.43	1.50	1.63	1.70	1.61	1.30

T_{30} [s]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición	2.20	1.99	2.11	2.35	2.03	--
Simulación	1.48	1.55	1.66	1.74	1.67	1.32

t_s [ms]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición	137	117	129	127	110	113
Simulación	83	85	91	98	95	75

C_{80} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición	0.83	1.14	-1.00	-1.01	0.27	-1.62
Simulación	2.90	2.90	2.50	2.00	2.00	3.40

D_{50} [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición	25.36	11.96	32.42	26.93	35.08	26.51
Simulación	48.10	49.70	46.80	45.50	43.80	51.90

Tabla 4.4. Parámetros acústicos obtenidos de la medición experimental y la simulación.

Los valores obtenidos del tiempo de decaimiento temprano EDT para la medición experimental están dentro del rango recomendado, mientras que los de la simulación son un poco menores pero aceptables para auditorios.

Los valores de T_{15} y T_{30} también son adecuados para la actividad a la que se destina la sala Xochipilli. El único valor que no se pudo calcular debido a que el rango dinámico de la curva de decaimiento no fue suficiente fue T_{30} para la octava de 4 kHz.

Los valores de t_s medidos y simulados sugieren una buena inteligibilidad en el recinto.

De acuerdo a los valores de C_{80} obtenidos, la música que se ejecuta en esta sala se percibe con claridad.

En cuanto a la definición D_{50} , los valores obtenidos de la medición experimental son muy bajos, mientras que los de la simulación están comprendidos en el intervalo de valores recomendados,

aunque muy cercanos al límite inferior. Sin embargo, con estos valores se considera que existe una buena inteligibilidad de la palabra.

Se puede observar que no todos los valores obtenidos en la medición y en la simulación coinciden. Una de las razones a las que se atribuye esta diferencia es el intervalo usado para calcularlos y el ruido de fondo presente en las mediciones *in situ*. Los valores que más se asemejan son de los parámetros EDT y T_{15} ya que sólo se considera la parte temprana de la respuesta al impulso, y el ruido de fondo no afecta en este intervalo.

4.7 Propuesta de acondicionamiento utilizando difusión.

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, los ecos son causados por reflexiones tardías con niveles más altos que la reverberación en general. En un recinto como la sala Xochipilli, además de la posibilidad de escuchar ecos o reflexiones tardías, existe el riesgo de eco "*flutter*" (*de "aleteo"*), causado por reflexiones repetidas en superficies paralelas. Debido a que la sala Xochipilli está destinada a la ejecución de música y los tiempos de reverberación que presenta pueden considerarse adecuados (*ver sección 4.6*), es necesario mantener los mismos niveles de absorción de la energía sonora. Es por esta razón que se propone utilizar difusión para tratar los inconvenientes que pudieran causar las reflexiones, con la finalidad de dispersar las reflexiones originadas de las superficies planas reflejantes.

Se realizaron simulaciones utilizando el software CATT-Acoustic™ con diferentes porcentajes de difusión⁴ en las paredes laterales de la audiencia con el fin de observar un cambio en la respuesta acústica de la sala.

Debido a que la proporción de la energía reflejada de forma difusa está dada por el coeficiente de dispersión s , la amplitud de las reflexiones especulares se reducen en función de $(1-s)$. En la *figura 4.19* se observa como la amplitud de estas reflexiones disminuye a medida que aumenta el porcentaje de difusión.

⁴ El porcentaje de difusión está representado por el coeficiente de dispersión, no confundir con el coeficiente de difusión.

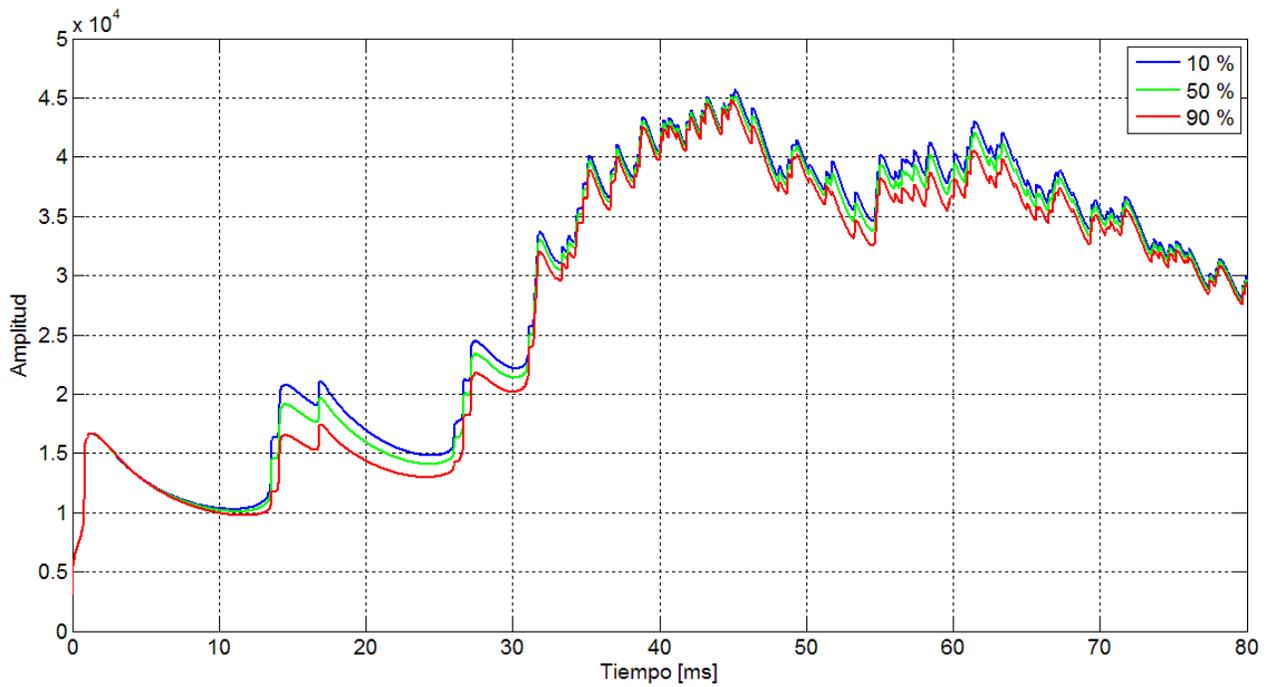


Figura 4.19. Curvas envolventes de reflexiones especulares obtenidas de la simulación (CATT-Acoustic™) con diferentes porcentajes de difusión para la octava de 1 kHz.

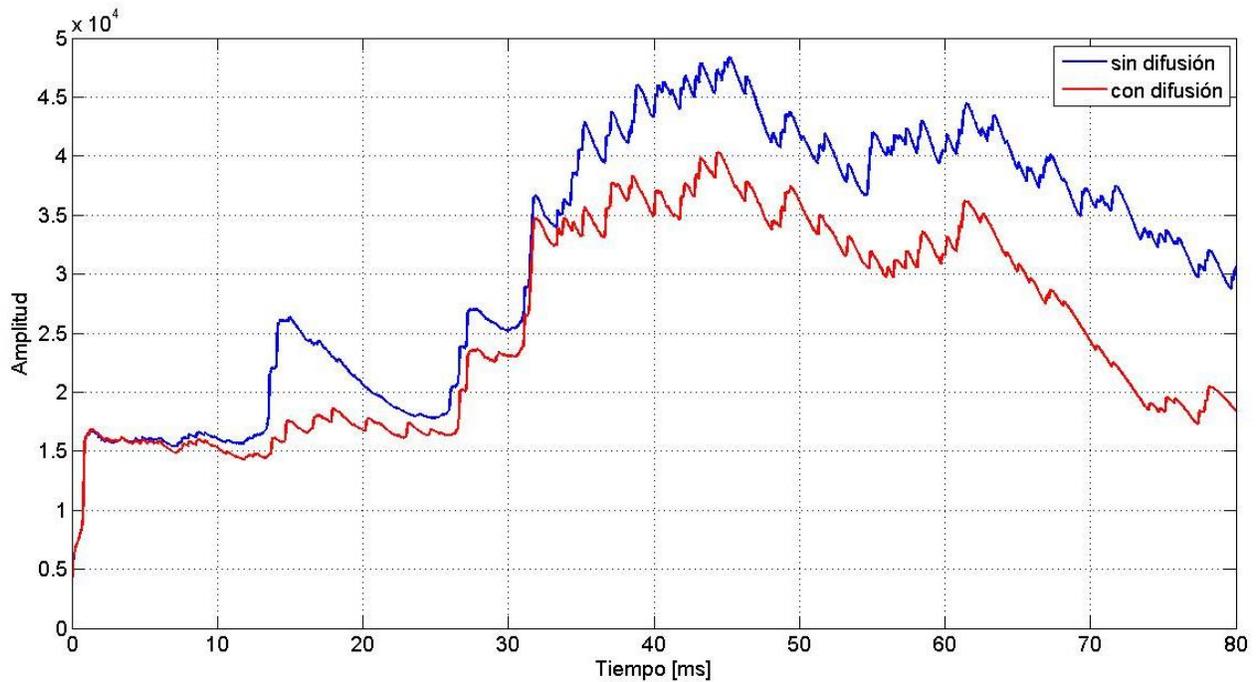


Figura 4.20. Curvas envolventes obtenidas de la simulación en CATT-Acoustic™ para la octava de 1 kHz.

Las reflexiones especulares se mezclan con las reflexiones difusas producidas por la superficie difusora produciendo la dispersión de la energía sonora incidente. La *figura 4.20* muestra el efecto producido por la difusión.

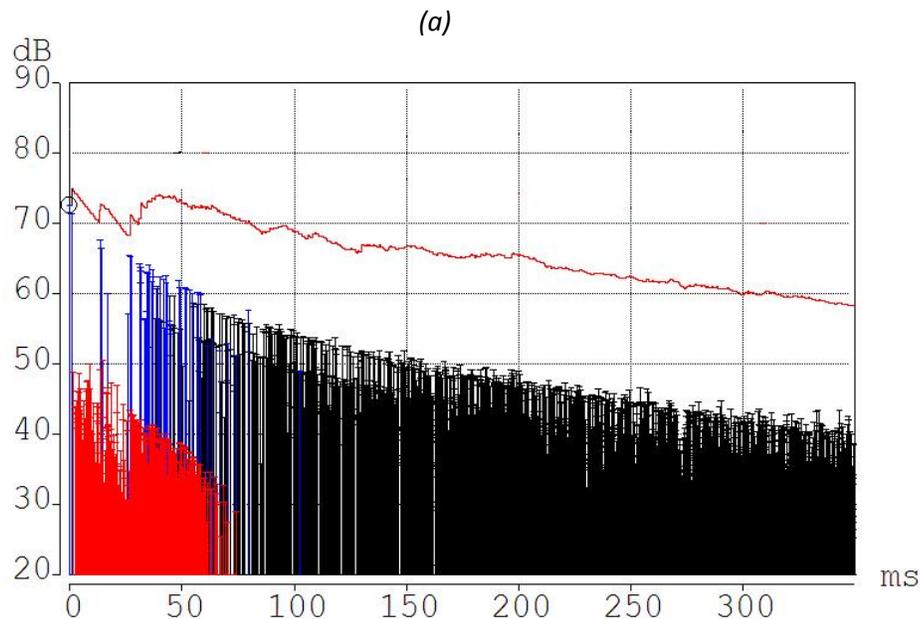
Como se observa, el aumento de difusión genera una dispersión temporal de las reflexiones evitando reflexiones especulares con amplitudes significativas.

Se llevaron a cabo simulaciones utilizando un mismo porcentaje (10%-90%) para todas las octavas, con la finalidad de observar qué porcentaje de difusión mejora la respuesta acústica y así poder establecer un coeficiente de dispersión (s) para cada octava.

Los cambios se observaron tanto en la curva suavizada como en la distribución de las reflexiones del ecograma producido en la simulación, así como en las curvas de EK.

En el caso de las curvas de EK, debido a que las reflexiones de mayor amplitud en la curva no presentan un problema grave, se decidió observar con qué porcentaje de difusión desaparecían los grupos de reflexiones consecutivas con separaciones importantes que pudieran ser percibidos como múltiples ecos.

En la *figura 4.21* se puede observar cómo al utilizar difusión, las concentraciones de reflexiones que pueden causar algún cambio perceptual en el sonido se distribuyen temporalmente.



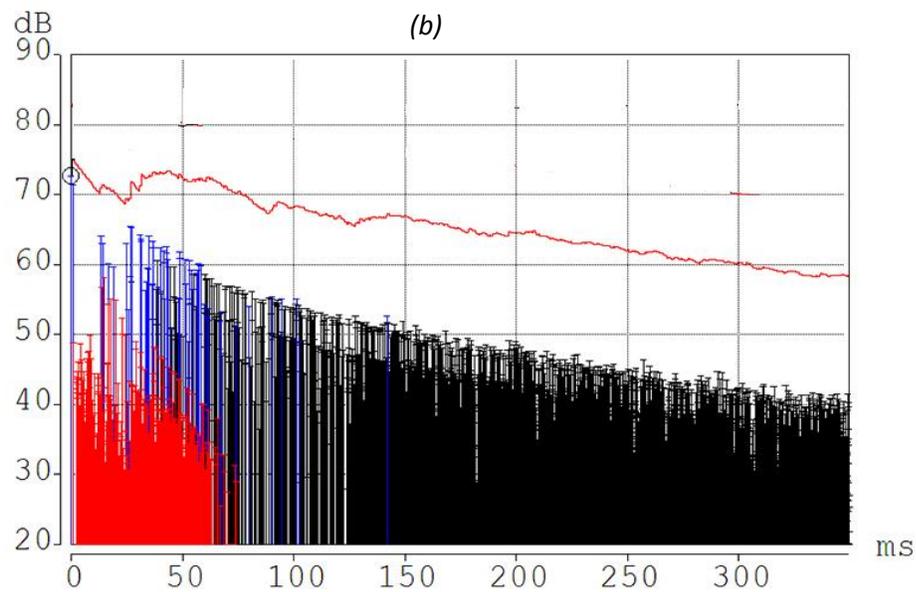


Figura 4.21. Ecograma de 500 Hz. a) 10% difusión, b) 60% difusión.

En este caso, para la octava de 500 Hz (Figura 4.21-a) las acumulaciones de reflexiones alrededor de 100 ms se dispersan de forma satisfactoria utilizando un porcentaje de difusión del 60% en las paredes laterales (Figura 4.21-b).

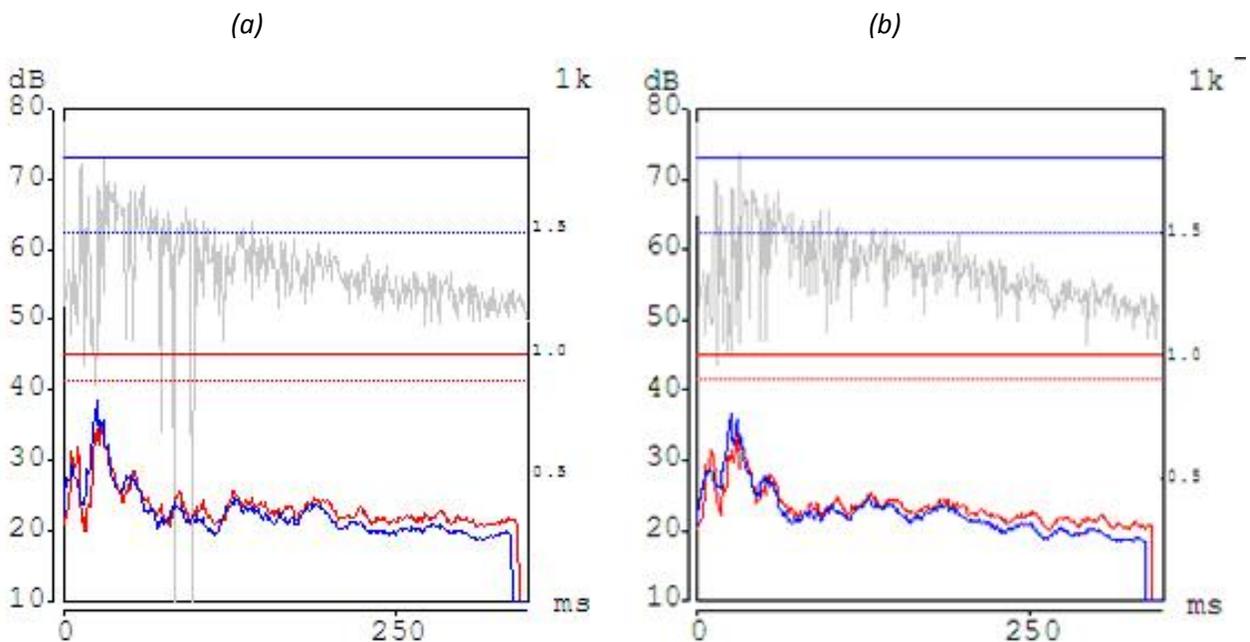


Figura 4.22. Curvas de EK de 1 kHz. a) 10% difusión, b) 30% difusión.

La *figura 4.22* muestra las curvas de EK para la octava de 1 kHz con 10% de difusión y 30% de difusión (*Figura 4.22-a y b respectivamente*).

Del análisis realizado para cada octava, se deduce que un mismo porcentaje de difusión no funciona igual para todas las octavas. Por esta razón se seleccionaron aquellos coeficientes en los que se observó un decaimiento más uniforme en la curva suavizada, *i.e.* una mejor distribución temporal de las reflexiones, así como una disminución en el valor máximo de EK y mayor uniformidad en la curva de EK.

Tomando en cuenta estos parámetros, se efectuaron simulaciones utilizando combinaciones de los diferentes porcentajes que mejoran la respuesta en cada octava. Además se realizaron simulaciones utilizando los coeficientes de dispersión de difusores comerciales⁵ [10, 28].

Al realizar las simulaciones con diferentes porcentajes para cada octava, se observó que el variar la difusión en una octava, repercutía negativamente en la octava adyacente. Los coeficientes propuestos fueron aquellos en los que en todas las octavas se obtuvo una respuesta acústica aceptable.

Los coeficientes propuestos por octava para las paredes laterales de la sala Xochipilli se muestran en la *tabla 4.5*.

	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000Hz
<i>s</i>	0.2	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9

Tabla 4.5. *Coefficientes de dispersión propuestos.*

Los valores propuestos se definieron en el código de CATT-Acoustic™ como característica de dispersión de las paredes laterales de la sala, con la finalidad de representar el efecto que tendría el uso de difusores con dichos coeficientes de dispersión en la respuesta acústica.

La simulación utilizando estos coeficientes de dispersión en las paredes laterales del modelo de la sala Xochipilli dieron como resultado los ecogramas mostrados en la *figura 4.23*.

⁵ Schroeder diffuser: Optimized / Diffractal [9], QRD®734 [28].

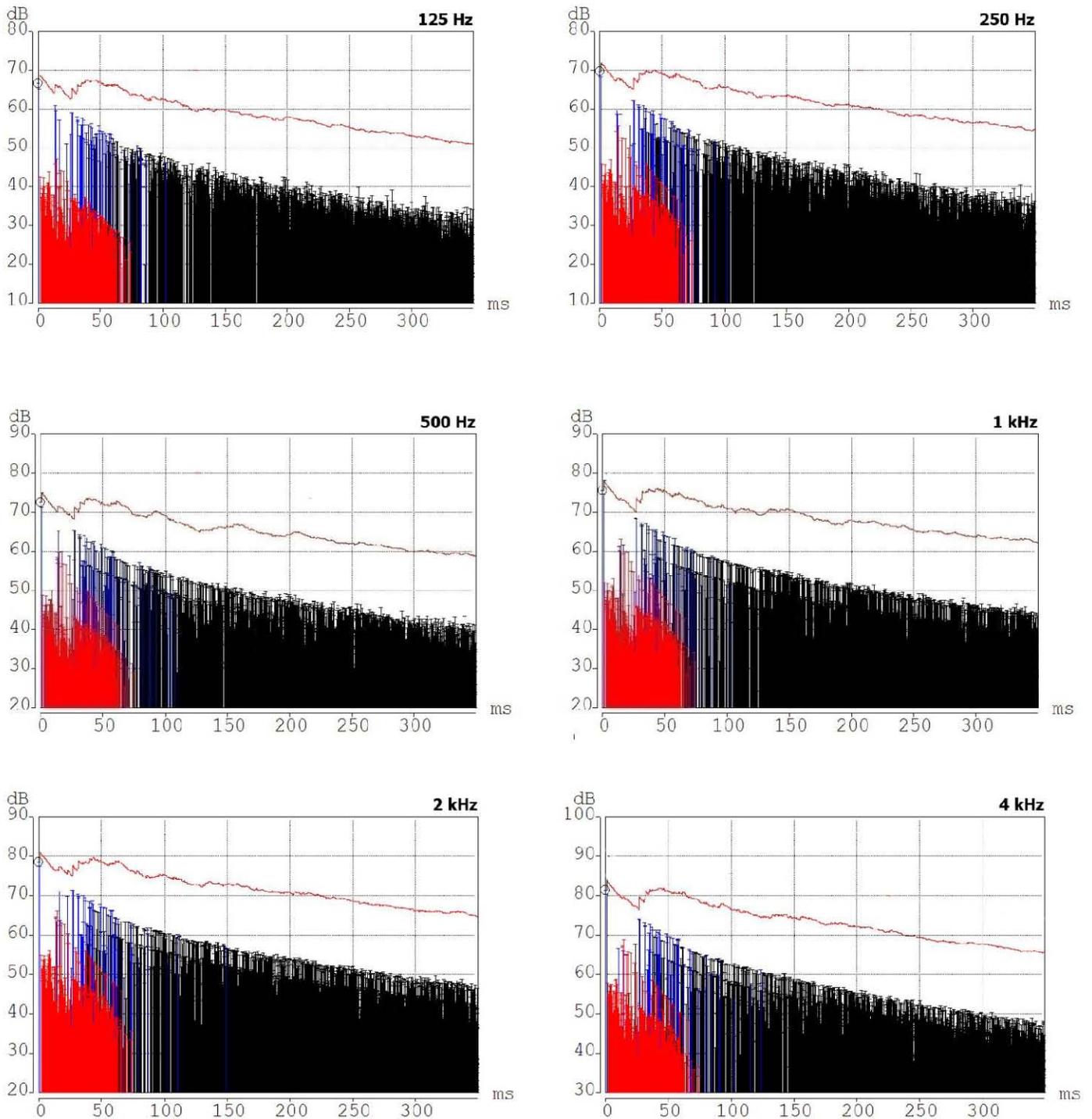


Figura 4.23. Ecogramas resultantes de simulación con difusión propuesta.

Al observar los ecogramas (*curva roja*) de todas las octavas, se puede apreciar que en general estos porcentajes mejoran la respuesta acústica de la sala, y las reflexiones se encuentran distribuidas satisfactoriamente en el tiempo.

Debido a que la función de un difusor es dispersar las reflexiones en múltiples direcciones, el evaluar la difusión propuesta en una sola posición de la audiencia no proporciona un panorama general del comportamiento del sonido en la sala. Por esta razón se realizaron simulaciones con el porcentaje de difusión propuesto en las paredes laterales de la audiencia, en todas las posiciones medidas experimentalmente y en todas ellas se observó una respuesta acústica aceptable (*ver Anexo digital*).

En la *tabla 4.6* se muestran los parámetros acústicos obtenidos de esta simulación.

		125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000Hz
EDT	[s]	1.28	1.32	1.40	1.52	1.48	1.23
T₁₅	[s]	1.42	1.48	1.55	1.66	1.67	1.36
T₃₀	[s]	1.45	1.49	1.57	1.68	1.66	1.35
t_s	[ms]	82.1	86.4	94.1	99.2	95.7	80.4
C₈₀	[dB]	3.0	2.6	1.9	1.7	2.2	3.0
D₅₀	[%]	51.9	50.3	44	44.5	48.2	50.8

Tabla 4.6. *Parámetros acústicos obtenidos de la simulación con difusión en las paredes laterales.*

Comparando estos resultados con los obtenidos de la simulación sin propuesta de difusión se observa que no hay cambios significativos, es decir, el tiempo de reverberación se mantiene al igual que los demás parámetros objetivos, lo que nos indica que con el uso de difusión en las paredes laterales la energía sonora se conserva (característica importante en el caso de salas de conciertos) y sólo se redistribuyen las reflexiones.

4.8 Modificaciones en el techo de la sala Xochipilli.

Debido a un desperfecto en el techo de la sala Xochipilli del cual no se conocen los detalles, en diciembre del año 2012 se realizaron modificaciones (*Figura 4.24*) que produjeron cambios en la acústica de la sala.

Las mediciones utilizadas en este trabajo de tesis se realizaron en septiembre del año 2012⁶, antes de los cambios hechos a la sala, por esa razón se decidió realizar nuevamente mediciones con el fin de hacer una comparación y observar los cambios en el sonido percibido.

Las mediciones se llevaron a cabo en octubre del año 2013, replicando las condiciones en las que fueron hechas las primeras mediciones, esto es, utilizando el mismo equipo y ubicándolo en las mismas posiciones.



Figura 4.24. *Modificación del techo de la sala Xochipilli. Superior: septiembre 2012. Inferior: octubre 2013.*

Para la comparación se usaron las mediciones realizadas con el altavoz activo M-Audio EX66 en la posición central A0 y la posición del micrófono 05 y 06 de la primera y segunda medición respectivamente (Figura 4.25).

⁶ Las fotos de la figura 4.2 corresponden a la sala después de la modificación al techo.

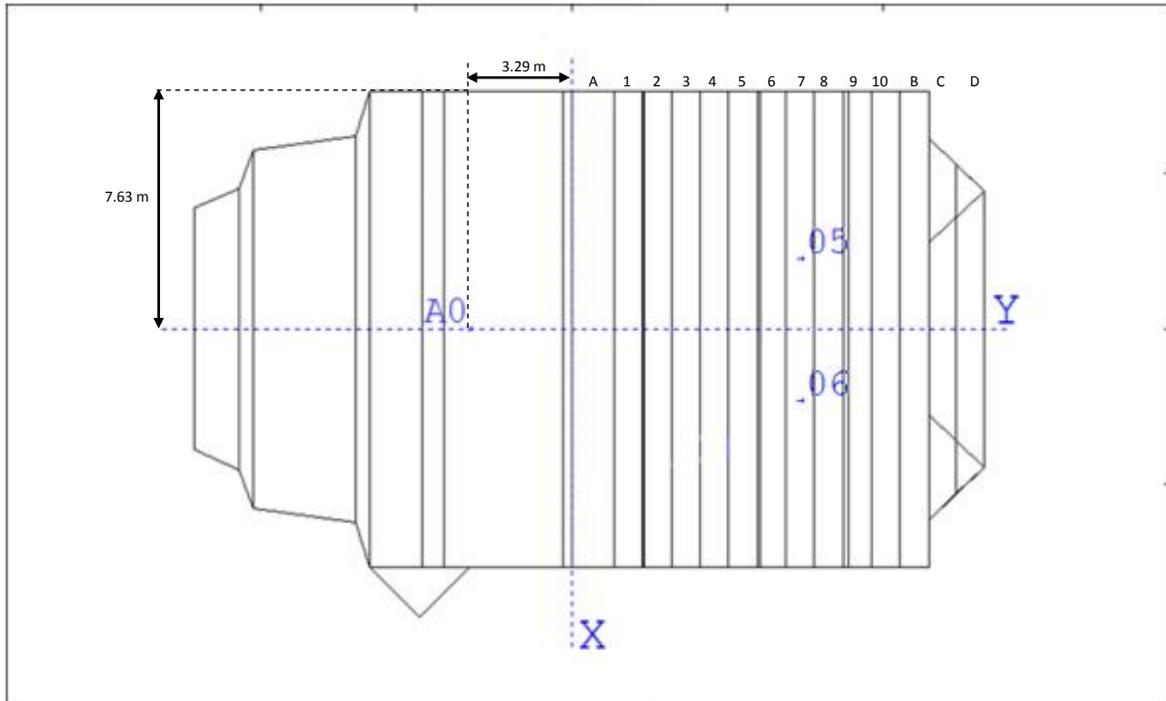


Figura 4.25. Posiciones de altavoz y micrófonos utilizados para la comparación.

Al igual que en el primer estudio, se obtuvieron las curvas envolventes suavizadas de las respuestas al impulso de las dos mediciones utilizando un filtro exponencial con una constante de tiempo de 25 ms [19] (Figura 4.26).

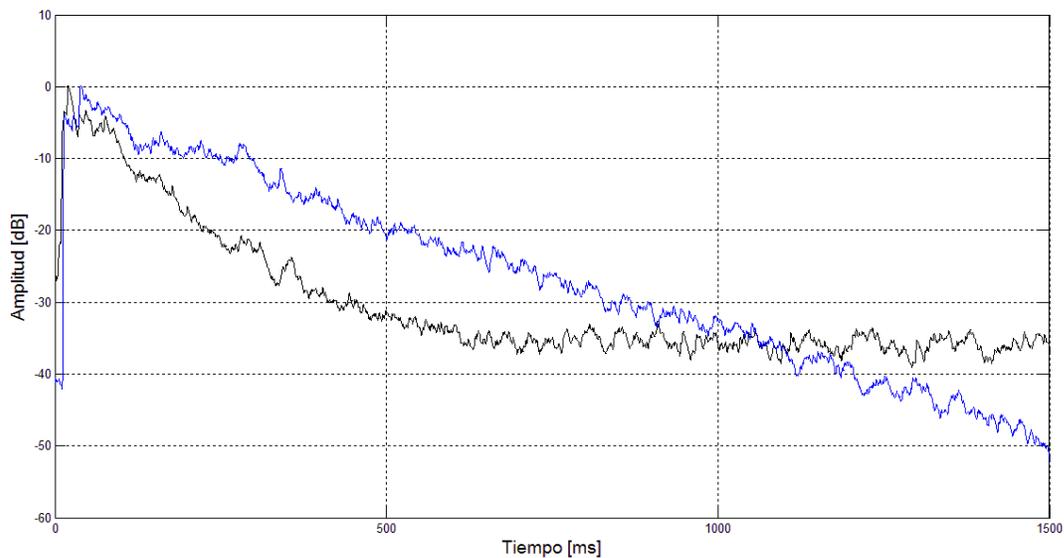


Figura 4.26. Curvas envolventes suavizadas de la RI para la octava de 1kHz de la primera medición (azul) y la segunda medición (negra).

El retardo de la fuente al micrófono para estas posiciones es de 32 ms. Las curvas de la *figura 4.26* se graficaron sin retardo.

De las curvas se puede observar cómo decae el sonido antes y después de las modificaciones hechas a la sala. En la segunda medición el sonido se atenúa más rápidamente que en la primera medición, esto indica que la absorción de la sala aumentó, provocando que el tiempo de reverberación disminuyera. Para confirmar este aumento de absorción se calcularon las constantes de decaimiento de energía. (*Tabla 4.7*).

α	
Medición 1	-4.2090
Medición 2	-7.1123

Tabla 4.7. Valores obtenidos de las constantes de decaimiento.

De igual manera se calcularon los parámetros acústicos objetivos que describen la acústica de la sala (*Tabla 4.8*).

EDT [s]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición 1	2.41	1.83	1.89	1.74	1.43	1.13
Medición 2	1.87	1.68	1.31	0.63	0.73	0.72

T₁₅ [s]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición 1	2.35	1.88	2.06	1.77	1.64	1.35
Medición 2	1.84	--	--	--	0.84	0.86

T₃₀ [s]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición 1	2.75	--	--	--	1.85	--
Medición 2	--	--	--	--	--	--

t_s [ms]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición 1	184	135	115	107	98	73
Medición 2	127	119	116	77	62	46

C_{80} [dB]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición 1	-3.19	-1.24	2.09	1.85	2.51	4.27
Medición 2	-1.31	-0.81	0.17	5.43	4.99	10.64

D_{50} [%]	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz
Medición 1	19.34	18.86	37.78	46.96	44.01	57.07
Medición 2	29.19	30.29	39.97	68.34	56.07	76.85

Tabla 4.8. *Parámetros acústicos obtenidos de la primera y segunda medición.*

Como se mencionó anteriormente el tiempo de reverberación disminuyó, afectando más a las frecuencias medias y altas, lo que por consiguiente aumentó la claridad y definición dentro de la sala. Sin embargo, como se menciona en la *sección 4.6*, investigaciones realizadas por Gade sobre salas de conciertos en Europa y EUA determinan como valores aceptables de claridad los encontrados en el intervalo de -5 a +3 dB [19] y en la *tabla 4.8* se observa que estos valores se sobrepasan en las frecuencias medias y altas.

Con las modificaciones realizadas a la sala, el problema de ecos provocados por las paredes laterales paralelas sigue vigente y, debido a la disminución de la reverberación en la sala, son más perceptibles ya que estos ecos estaban enmascarados por la reverberación del cuarto.

5. Conclusiones.

En este trabajo se presenta una evaluación acústica objetiva de la sala Xochipilli de la ENM debido a que es un espacio cerrado de grandes dimensiones con paredes laterales paralelas, por lo que es susceptible al problema de ecos. Asimismo, se propone una solución que ayude a atenuar las reflexiones provenientes de estas paredes que puedan provocar la presencia de ecos y con esto mejorar la calidad acústica de la sala.

La solución propuesta consiste en utilizar difusión en dichas paredes, ya que disponer de una óptima difusión del sonido es especialmente importante en los espacios arquitectónicos donde la calidad con la que se escucha la música representa un aspecto crítico, como es el caso de las salas de conciertos.

Se utiliza el software de simulación acústica CATT-Acoustic™ para representar la geometría de la sala y analizar el comportamiento de ésta, así como simular la solución para valorar si el cambio propuesto contribuye con el mejoramiento de la acústica de la sala. El modelo de simulación acústica permite anticipar la respuesta del recinto utilizando difusión.

La comparación de los resultados simulados con los medidos *in situ* permite validar el procedimiento implementado, por lo que los resultados obtenidos de las simulaciones de la solución se admiten como aceptables.

Los resultados de las mediciones experimentales no muestran el eco *flutter* que se escucha al excitar la sala con un aplauso. Se concluye que la razón de esto es debido a que la posición de la fuente y receptor al aplaudir es la misma, y en las mediciones experimentales son diferentes.

Los resultados muestran reflexiones potencialmente perceptibles y perjudiciales en tiempos mayores a 60 ms y 80 ms. Los criterios utilizados para determinar si estas reflexiones causaban alguna molestia se basan en los efectos de reflexiones individuales, y aunque en los recintos grandes se producen una gran cantidad de reflexiones que al integrarse pueden ser potencialmente más perjudiciales (al degradar la inteligibilidad y no forzosamente ser percibidos como ecos discretos), estos criterios ayudan a visualizar las reflexiones que pueden llegar a afectar la calidad del sonido.

También se observan reflexiones con sucesiones periódicas o casi periódicas con tiempos de repetición de unos pocos milisegundos, por lo que aún cuando nuestro oído es muy sensible a este tipo de señales, no se perciben como ecos "*flutter*" sino como cambios en el tono y timbre del sonido.

Para frecuencias bajas, los resultados muestran una respuesta acústica muy inestable, esto se atribuye a que este método de análisis (acústica geométrica) funciona mejor para frecuencias altas, por lo que se puede suponer que a estas frecuencias el campo no es totalmente difuso.

Los resultados finales muestran que es posible eliminar las irregularidades observadas utilizando difusión y al mismo tiempo conservar el tiempo de reverberación, ya que no se observa un cambio notable en éste ni en los parámetros complementarios que describen el comportamiento de la sala.

Es indiscutible la importancia de los programas de simulación acústica para predecir el comportamiento aproximado de diferentes circunstancias acústicas, ya que nos permiten probar diferentes propuestas de diseño e investigar los efectos en cambios de superficies y elementos en un ambiente acústico. Sin embargo, estos programas basados en acústica geométrica no pueden ser muy precisos, debido a que los algoritmos que utiliza el modelo de acústica geométrica son todavía muy limitados y no pueden representar todo los fenómenos que ocurren en un campo sonoro, pero pueden ser lo suficientemente precisos para ser herramientas muy útiles en la consultoría.

El trabajo presentado en esta tesis finaliza con la propuesta de un coeficiente de difusión que mejora el problema de ecos causados por las paredes laterales paralelas. La continuación de este trabajo consiste en el diseño de un difusor que cumpla con las características propuestas, y la realización de un trabajo experimental que evalúe el desempeño de los diferentes tipos de difusores con el fin de utilizar el que cumpla con las exigencias de la sala, asimismo observar la correspondencia entre el modelo teórico de un difusor y su implementación física.

Sin embargo, debido a las modificaciones realizadas recientemente a la sala Xochipilli, se abre una nueva propuesta de estudio relacionada con los efectos causados por la absorción del techo y se sugiere plantear una solución que restablezca el tiempo de reverberación recomendado para este tipo de salas dedicadas a la interpretación musical, sin perder de vista el problema de ecos, especialmente de ecos "*flutter*" que se hacen más perceptibles al haber menor reverberación en la sala.

Referencias.

- [1] BALLOU, G. A (2009). *Sound Engineer's Guide to Audio Test and Measurement*. Oxford: Focal Press.
- [2] BARRON, M. (1971). *The subjective effects of first reflections in concert halls: The need for lateral reflections*. *Journal of Sound and Vibration* 15(4), 475-494.
- [3] BARRON, M. (2010). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. 2^a ed. Oxford: Spon Press.
- [4] BERANEK, L. (1996). *Acoustics*. Acoustical Society of America.
- [5] BLAUERT, J. (1997). *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. Cambridge: MIT Press.
- [6] CATT-ACOUSTIC™. <<http://www.catt.se>>
- [7] *CATT-ACOUSTIC™ v8.0 Room Acoustics Prediction and Walkthrough Auralization. User's manual* .2007.
- [8] CHOI, Y-J., Cabrera, D. (2005) *Some Current Issues in Computer Modelling for Room Acoustics Design*. *Acoustics Australia*. Vol. 33 p. 19-24.
- [9] COX, T. J., Dalenbäck, B. -I., D'Antonio, P., Embrechts, J.J., Jeon J.Y., Mommertz, E., et al. (2006). *A Tutorial on Scattering and Diffusion Coefficients for Room Acoustic Surfaces*. *Acta Acústica united with Acustica*. 92, 1-15.
- [10] COX, T.J. & D'Antonio P. (2009). *Acoustic Absorbers and Diffusers: Theory, design and application*. 2^a ed. Oxford: Taylor & Francis.
- [11] DALENBÄCK, B. -I. (2010). *Engineering principles and techniques in room acoustics prediction*. En: Baltic-Nordic Acoustic Meeting, Bergen Norway.
- [12] DAMASKE, P. (2008). *Acoustics and Hearing*. Springer.
- [13] DIETSCH, K. & KRAAK, W. (1986). *Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Echostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen*. *Acta Acústica united with Acustica*. 60(3), 205-216.
- [14] EVEREST, F.A. & Pohlmann K.C. (2009). *Master Handbook of Acoustics*. 5^a ed. McGraw-Hill.
- [15] HOWARD, D.M. & Angus, J. A. S. (2009). *Acoustics and Psychoacoustics*. 4^a ed. Oxford: Focal Press.

- [16] ISO/DIS 3382-1. (2009). *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance Rooms*. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland.
- [17] KINSLER, L., Frey, A., Coppens, A., Sanders, J.(2000). *Fundamentals of Acoustics*. 4^a ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [18] KRISTIANSEN, U.R., Krokstad, A. & Follestad T. (1993). *Extending the Image Method to Higher-Order Reflections*. *Applied Acoustics*. 38, 195-206.
- [19] KUTTRUFF, H. (2009). *Room Acoustics*. 5^a ed. Oxford: Spon Press.
- [20] LOCHNER, J. P. A & BURGER J. F. (1964). *The influence of reflections on auditorium acoustics*. *Journal of Sound and Vibration* I(4), 426-454.
- [21] LONG, M. (2006). *Architectural Acoustics*. London: Elsevier Academic Press.
- [22] MENDEZ, A., Stornini, A., Salazar, E., et al. (1994). *Acústica Arquitectónica*. 1^a ed. Universidad del Museo Social Argentino.
- [23] MORSE, P.H. (1948). *Vibration and Sound*. 2^a ed. McGraw-Hill.
- [24] MORSE, P. H. & Ingard, K. U. (1968). *Theoretical Acoustics*. McGraw-Hill.
- [25] MÖSER, M. (2009). *Engineering acoustics: An Introduction to Noise Control*. 2^a ed. Springer.
- [26] MÜLLER, S. & MASSARINI, P. (2001). *Transfer Function Measurement with Sweeps*. *Journal of the Audio Engineering Society*. 49(6), 443-471.
- [27] OLIVE, S.E. & TOOLE, F.E. (1989). *The Detection of Reflections in Typical Rooms*. *Journal of Audio Engineering Society*. 37(7/8), 539-552.
- [28] QRD ® 734 1D Wood Sound Diffuser Acoustical Data. RPG Diffusor Systems Inc.
- [29] RATHSAM, J. & Wang, L. M. (2006). *A Review of Diffuse Reflections in Architectural Acoustics*. *Architectural Engineering - Faculty Publications*. Paper 14.
- [30] RINDEL, J.H. (2000). *The use of computer modeling in room acoustics*. *Journal of Vibroengineering*. No 3(4), p. 219-224.
- [31] RINDEL, J.H. (2002). *Modelling in Auditorium Acoustics. From Ripple Tank and Scale Models to Computer Simulations*. *Revista de Acústica*. Vol. XXXIII No 3-4, p. 31-35.
- [32] ROSSING, T.D. (Ed.) (2007). *Springer Handbook of Acoustics*. Springer .
- [33] SCHROEDER, M. R. (1964). *New Method of Measuring Reverberation Time*. *Journal of the Acoustical Society of America*. 37(3), 409-412.

- [34] SORIANO, J. R., Martínez, A. U., Fernández, J., et al. (1998). *Curso Experimental de Acústica de Salas*. Universidad Politécnica de Valencia.

- [35] VORLÄNDER, M.(2011). *Models and Algorithms for Computer Simulations in Room Acoustics*. En: International Seminar on Virtual Acoustics. Valencia, España.

- [36] VORLÄNDER, M. (2013). *Computer simulations in room acoustics: Concepts and uncertainties*. *Journal of the Acoustical Society of America*. 133(3), 1203-1213.

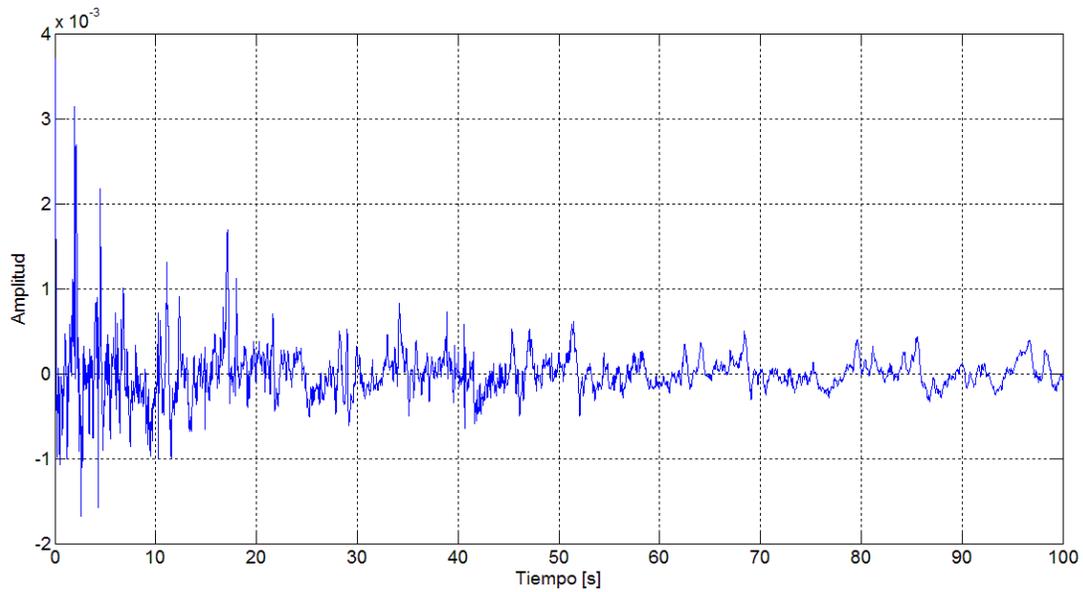
GRÁFICAS

MEDICIONES EN LA TERRAZA DEL LABORATORIO DE ACÚSTICA Y VIBRACIONES - CCADET.

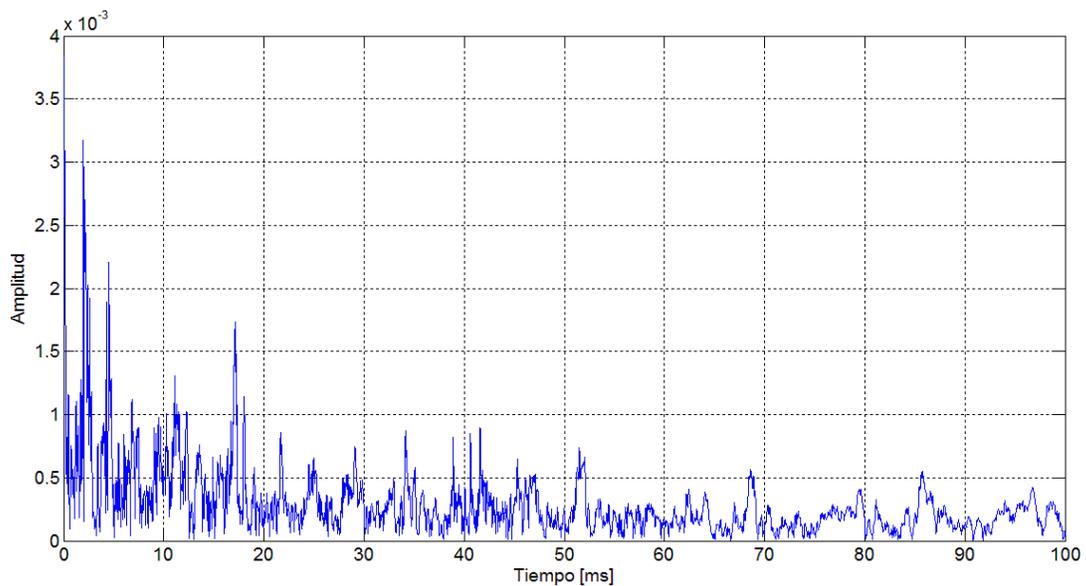
(ver sección 3.2)

Medición 1

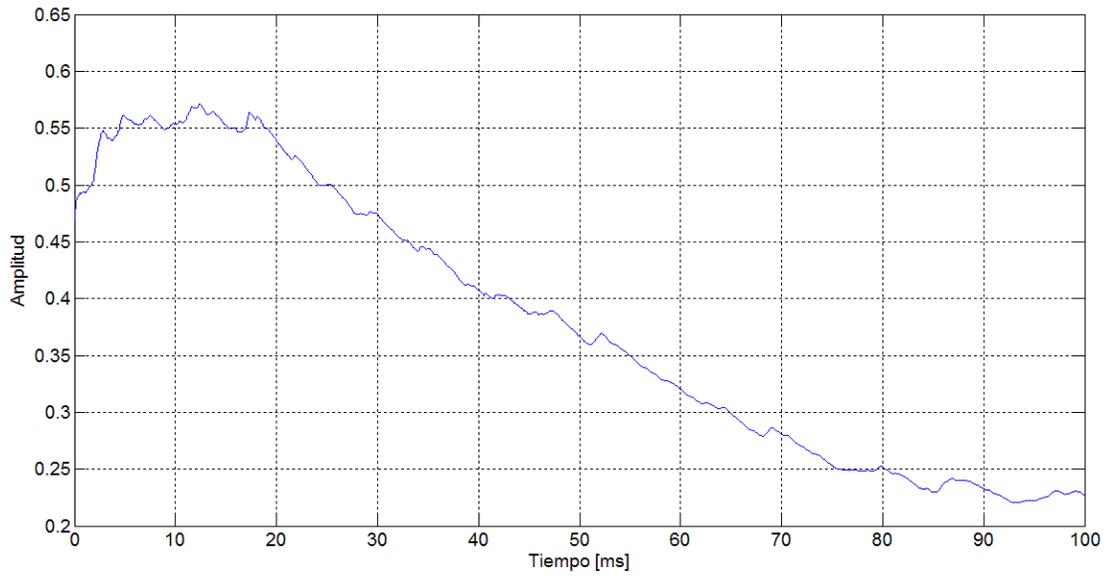
Respuesta al impulso



Envolvente de la respuesta al impulso.

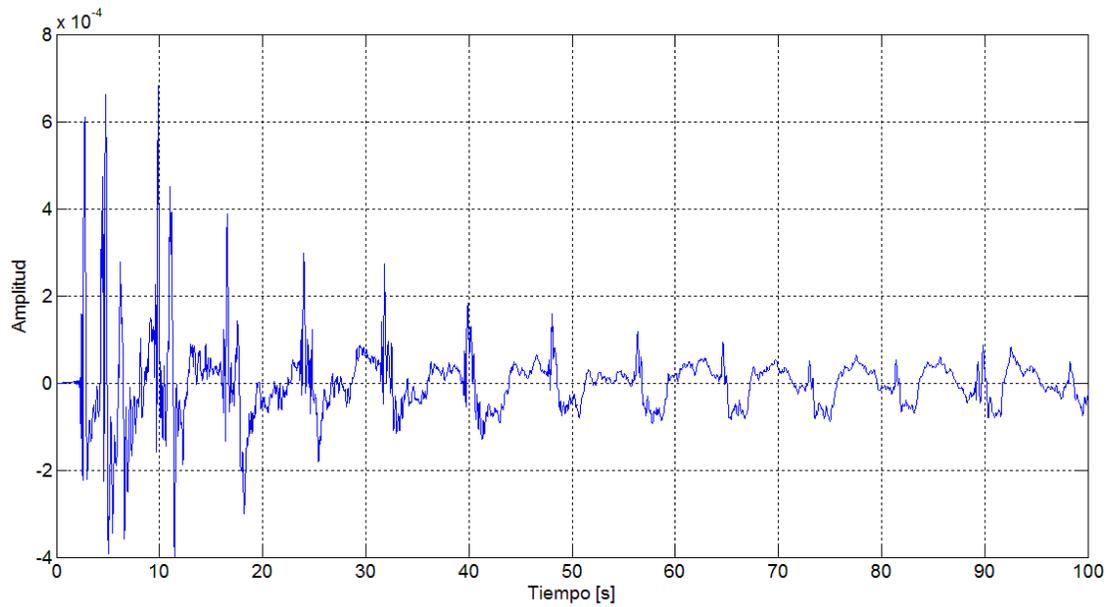


Envolvente suavizada de la respuesta al impulso.

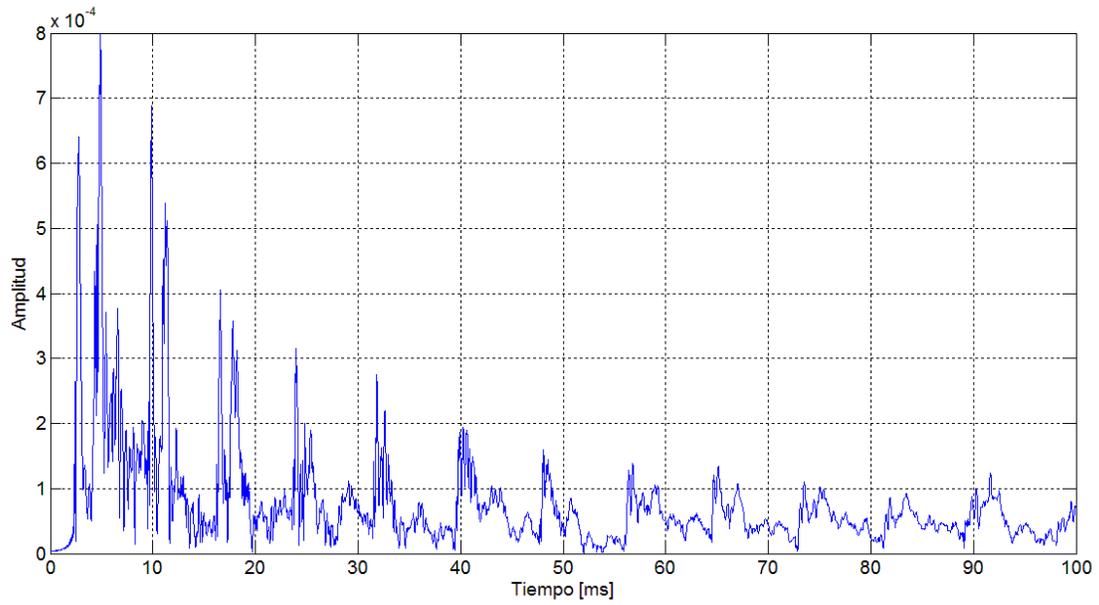


Medición 2

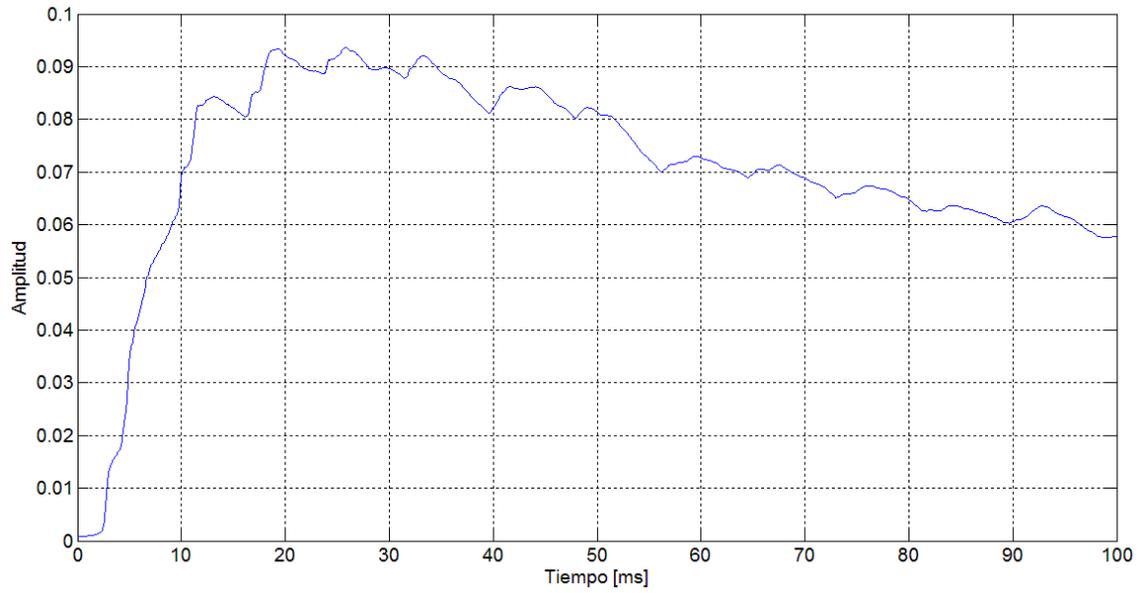
Respuesta al impulso



Envolvente de la respuesta al impulso.



Envolvente suavizada de la respuesta al impulso.



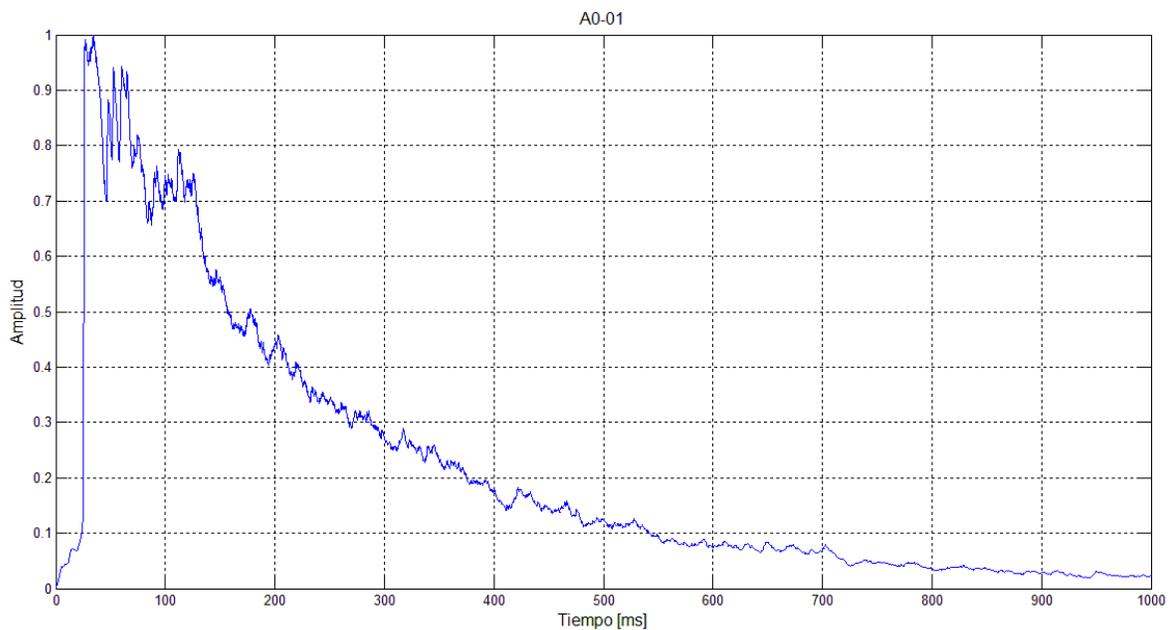
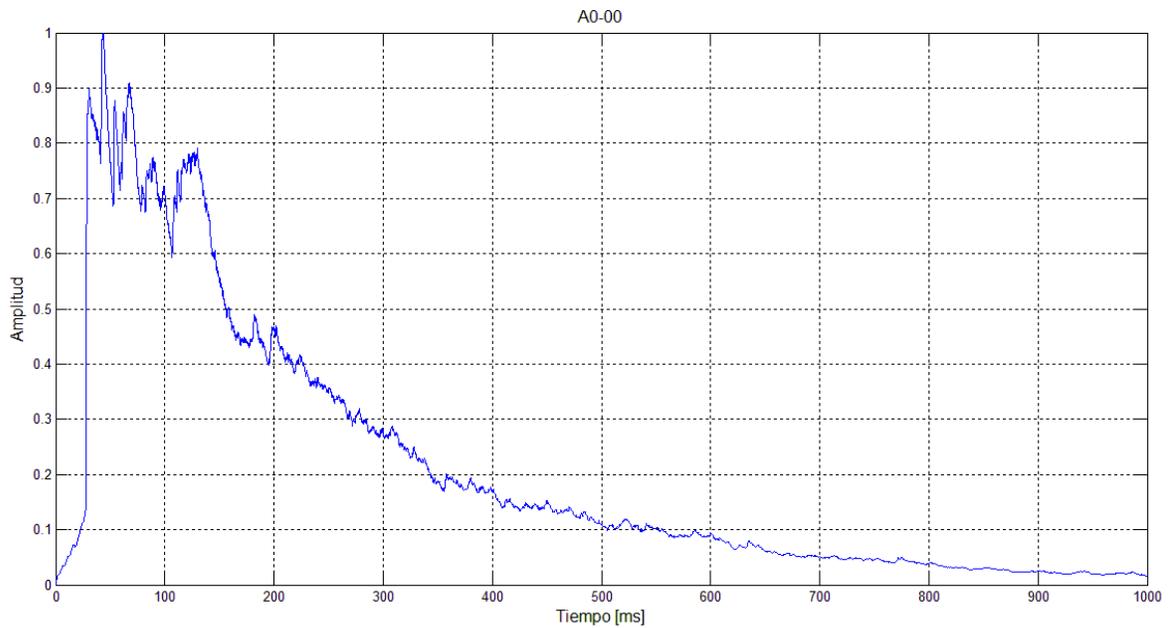
MEDICIONES EN LA SALA XOCHIPILLI

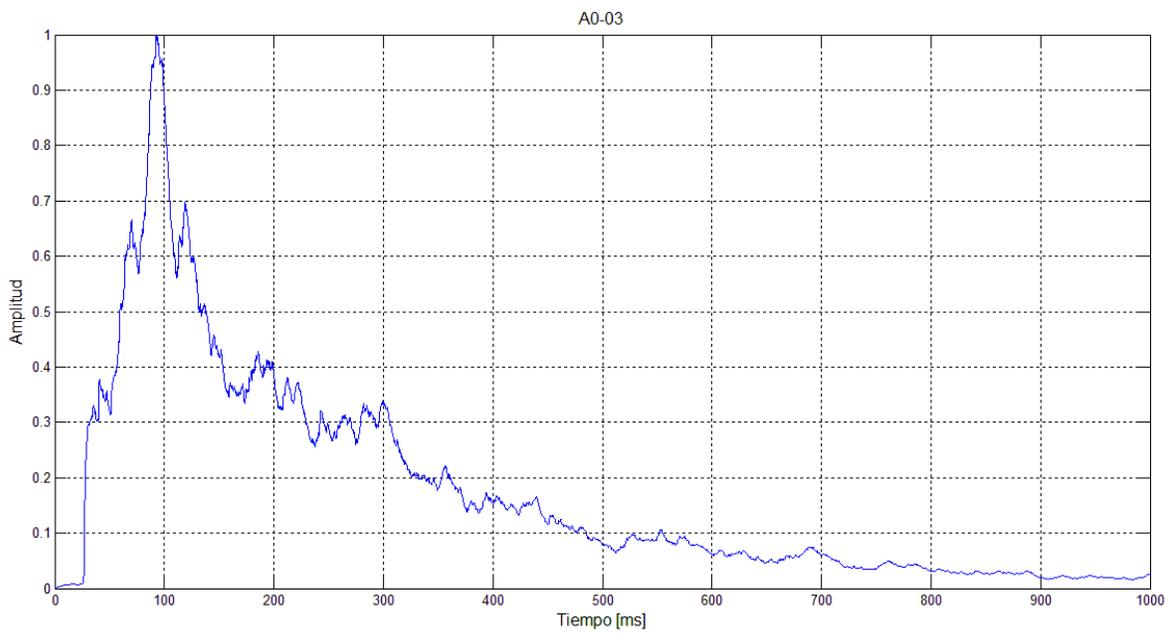
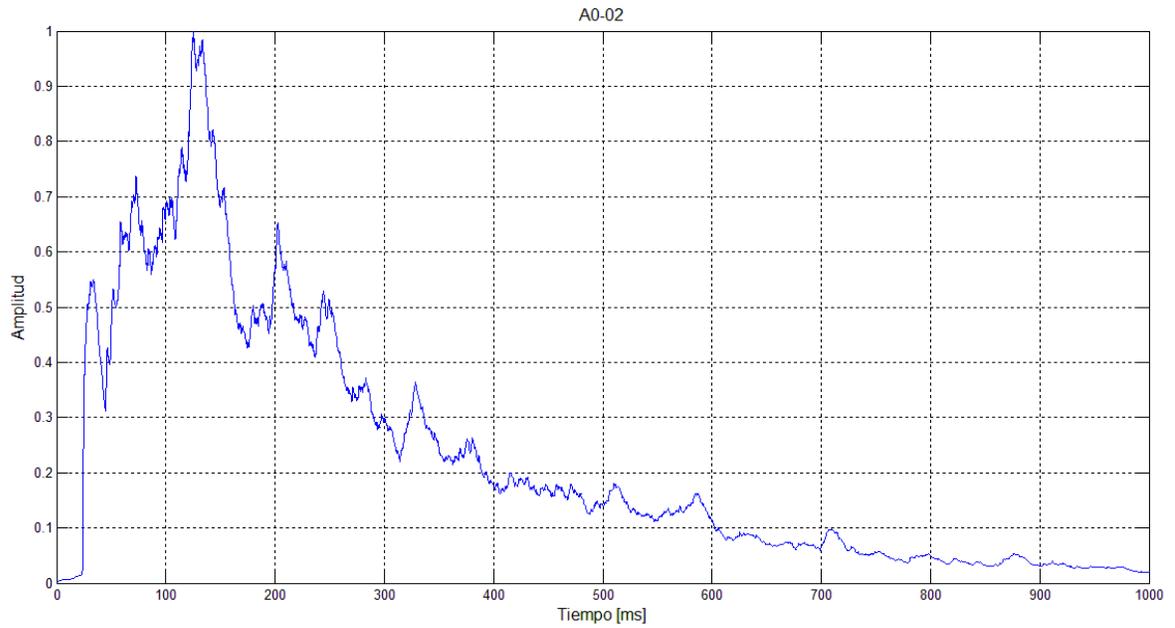
(ver sección 4.2)

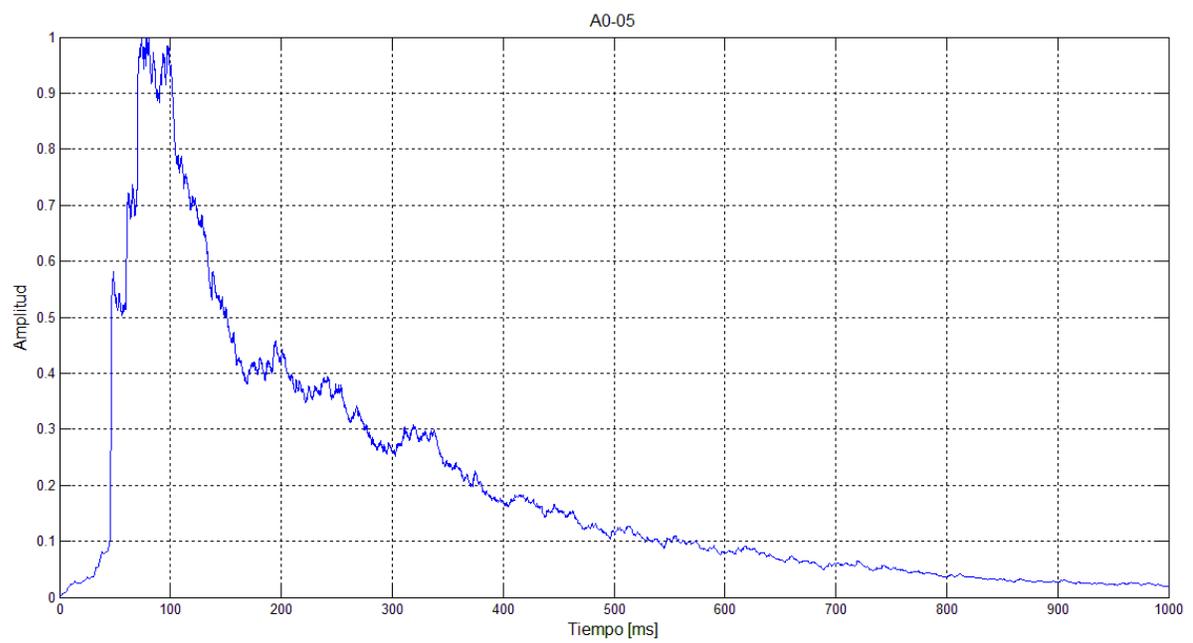
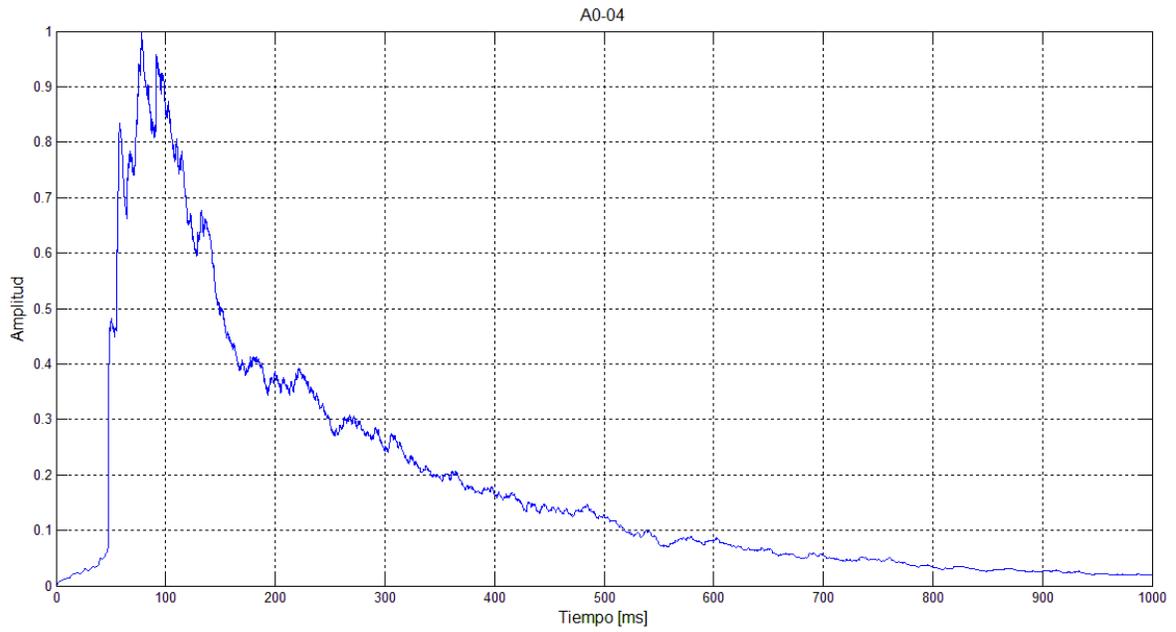
Gráficas de envolventes suavizadas de la respuesta al impulso.

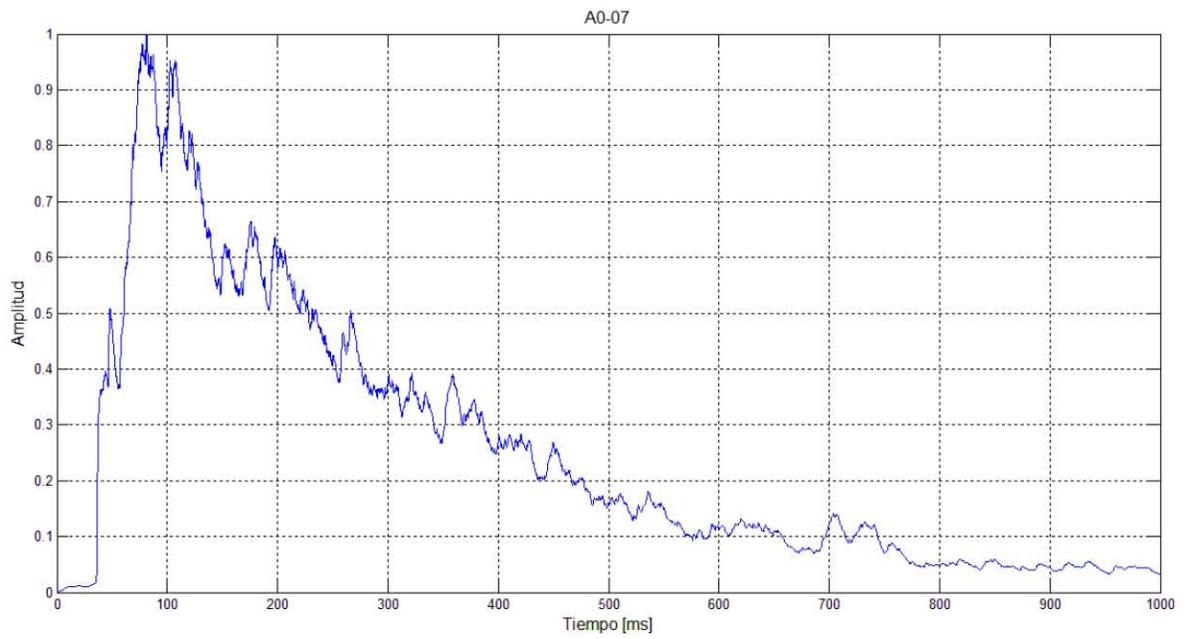
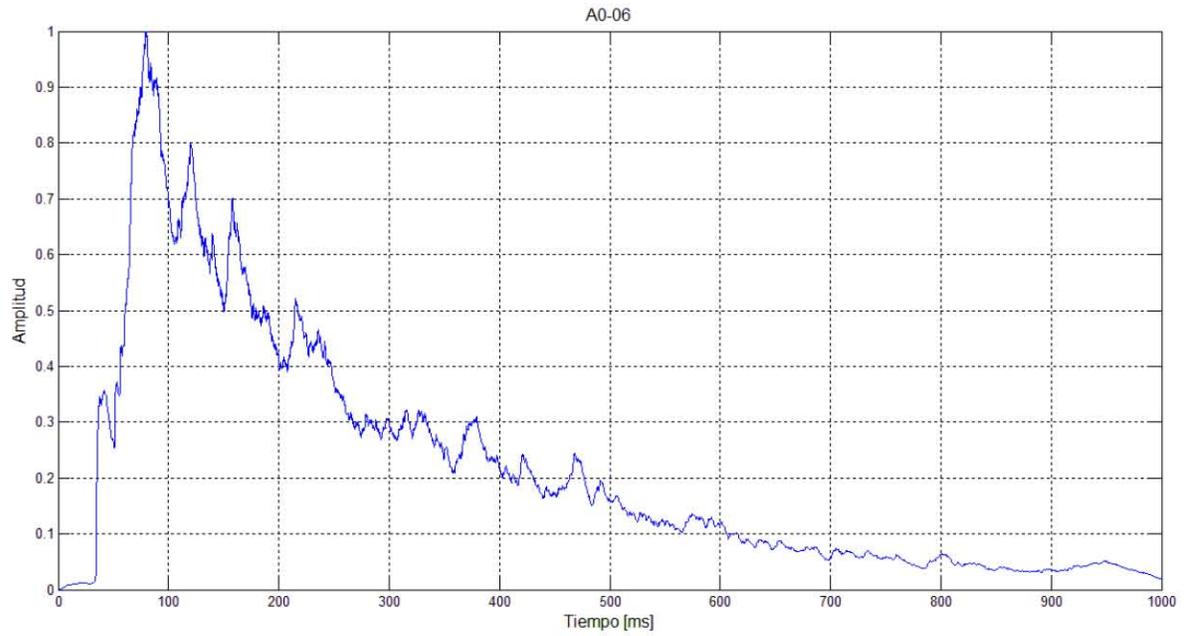
Posición de Altavoz: A0

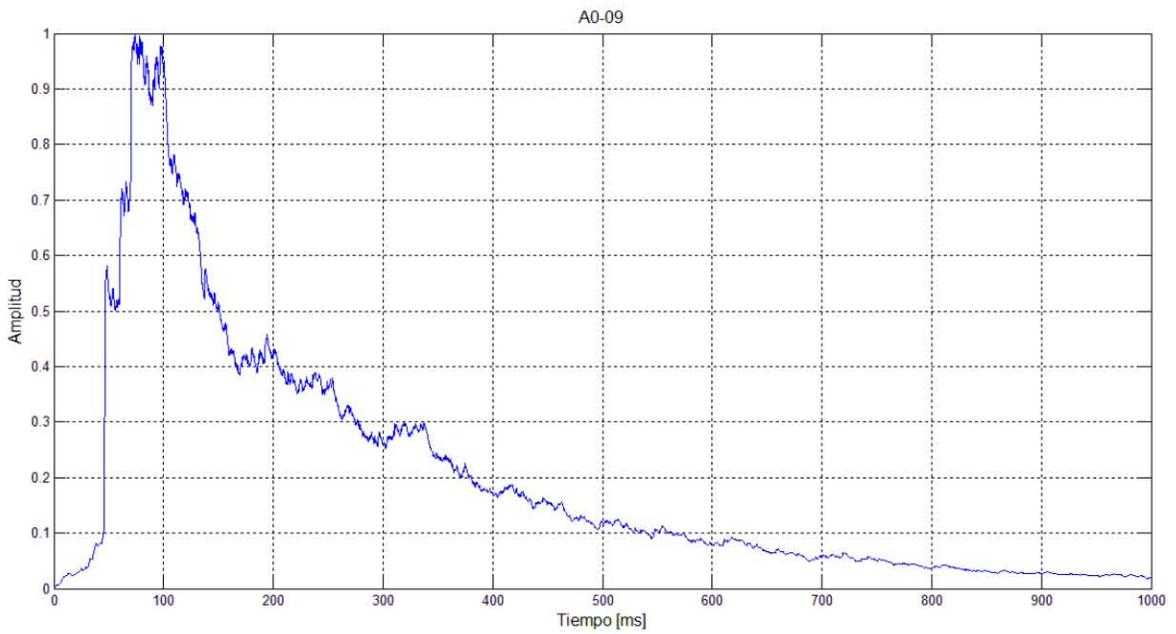
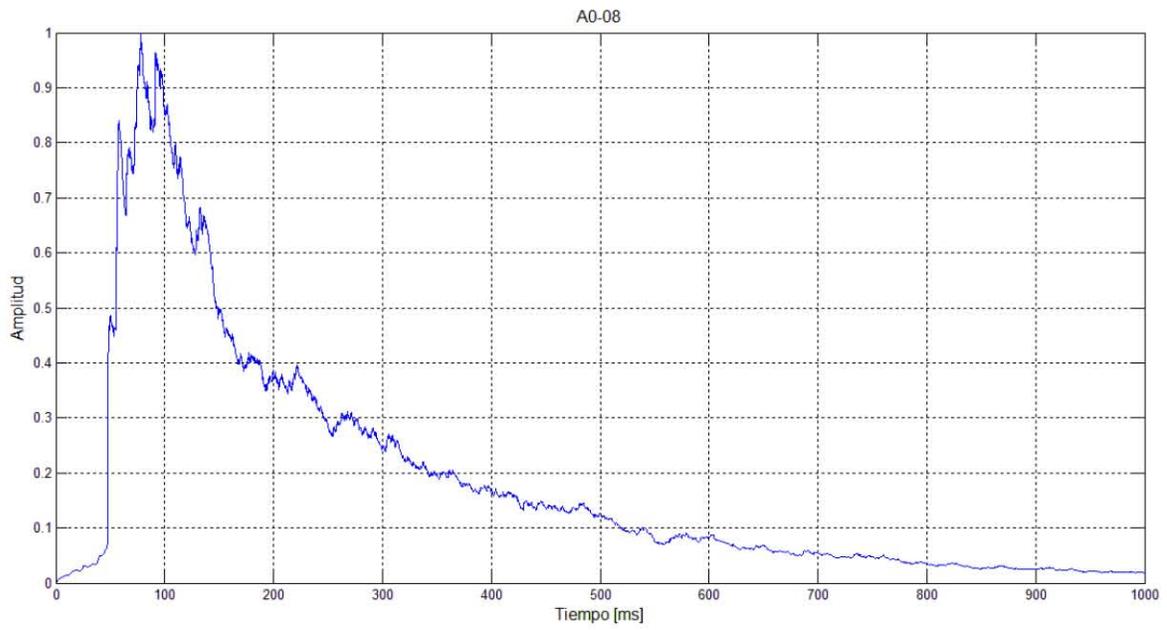
Posiciones micrófono: 00-11

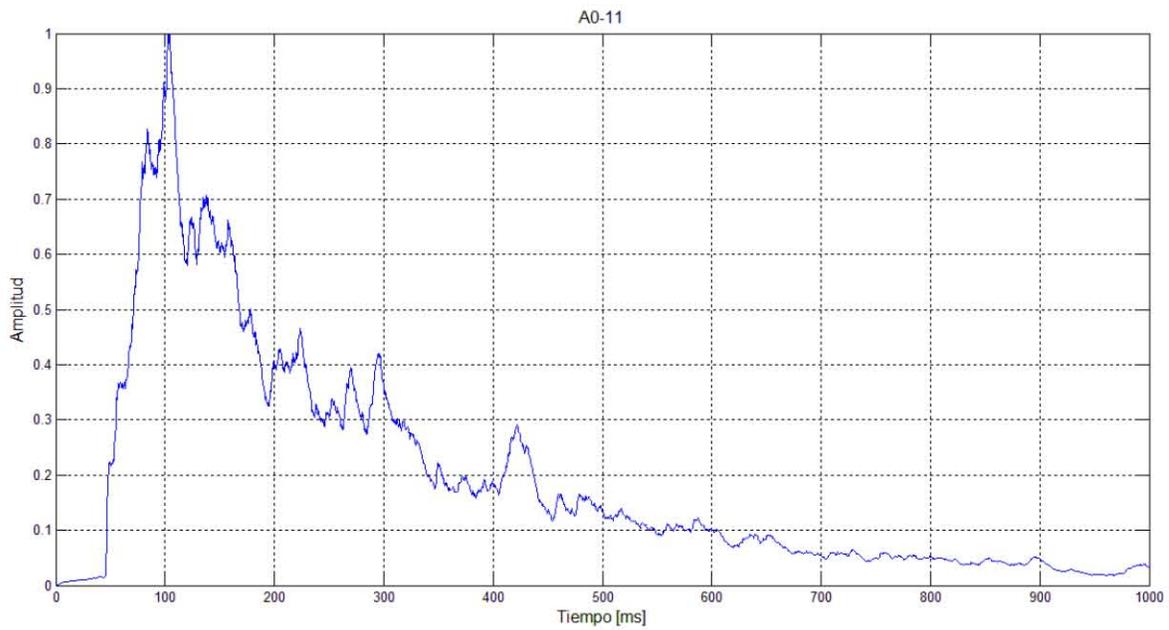
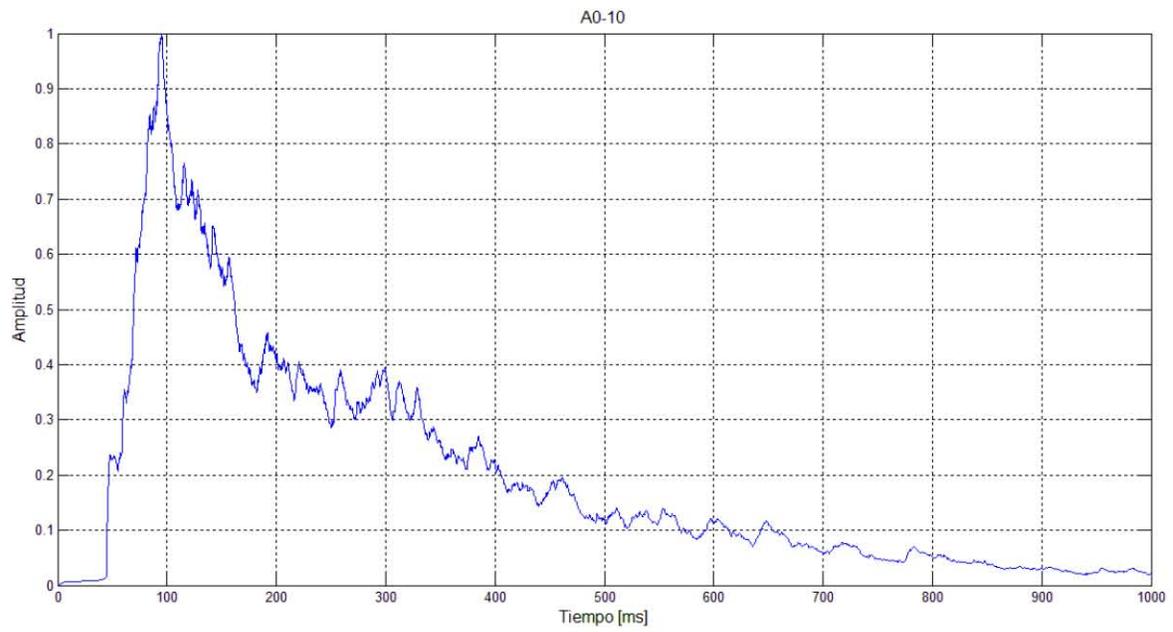






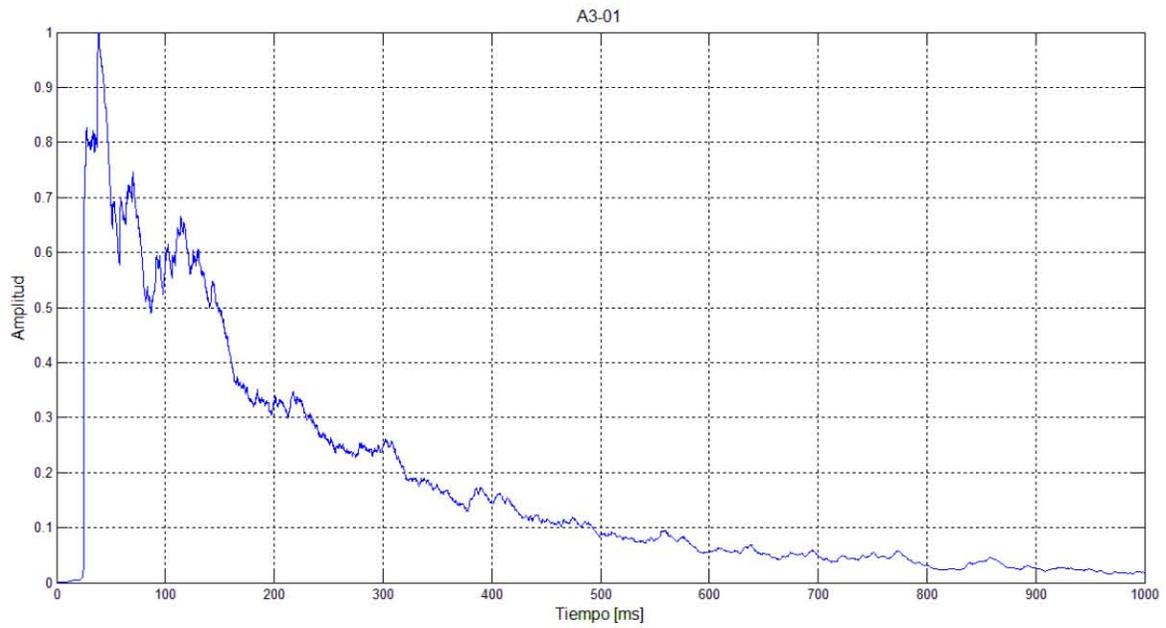
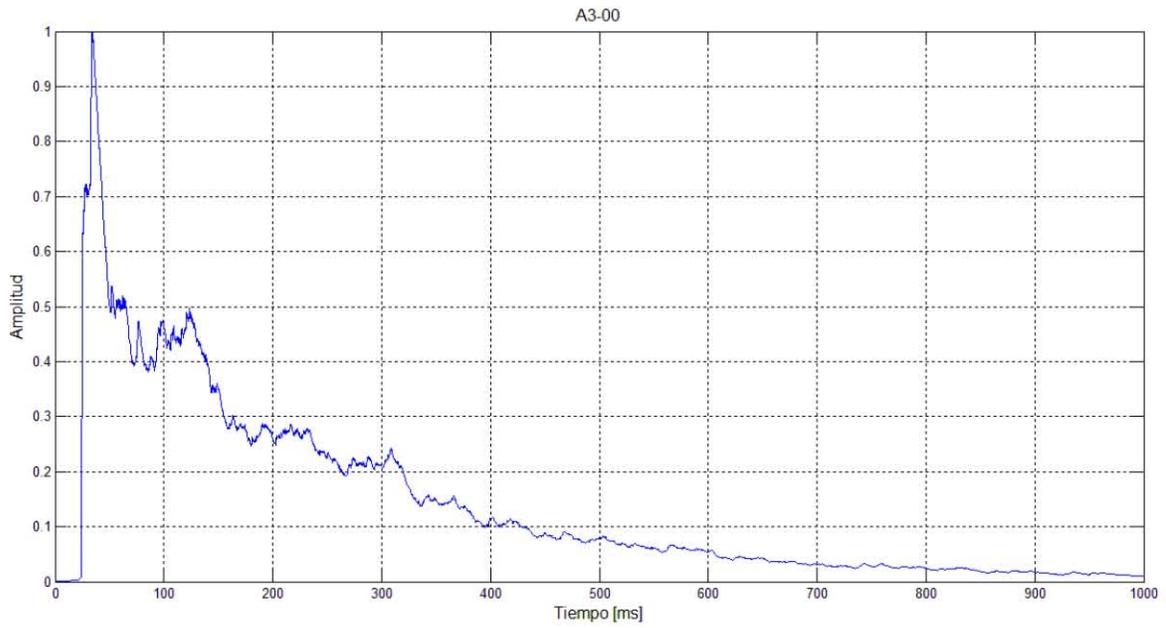


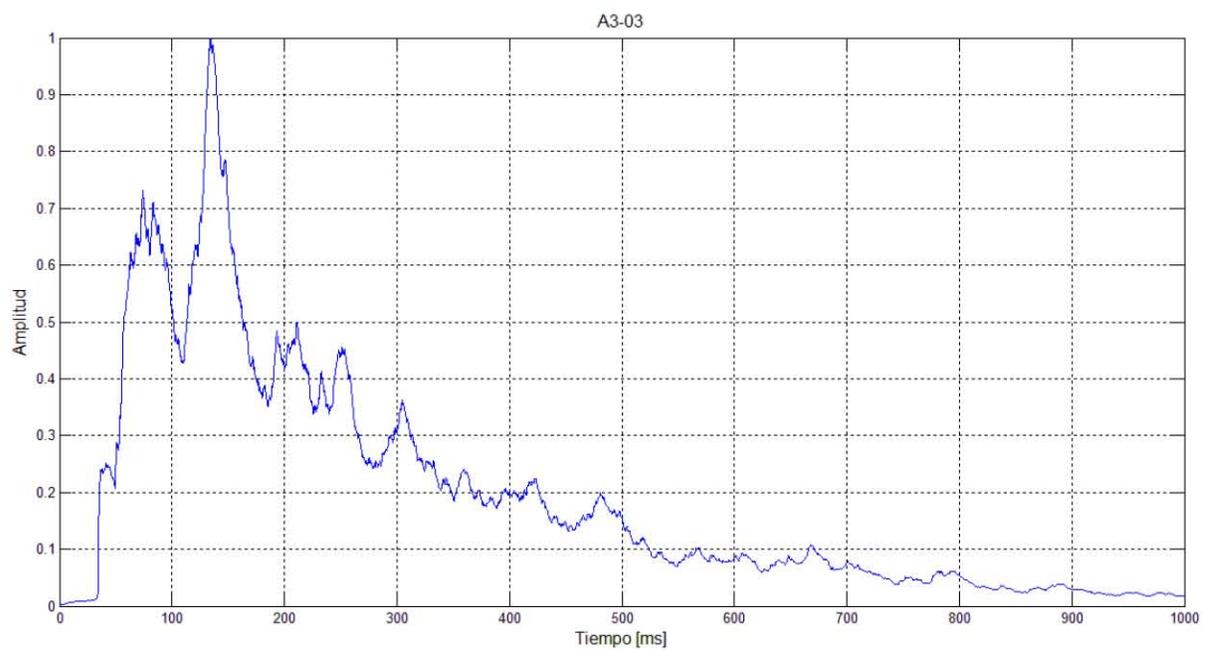
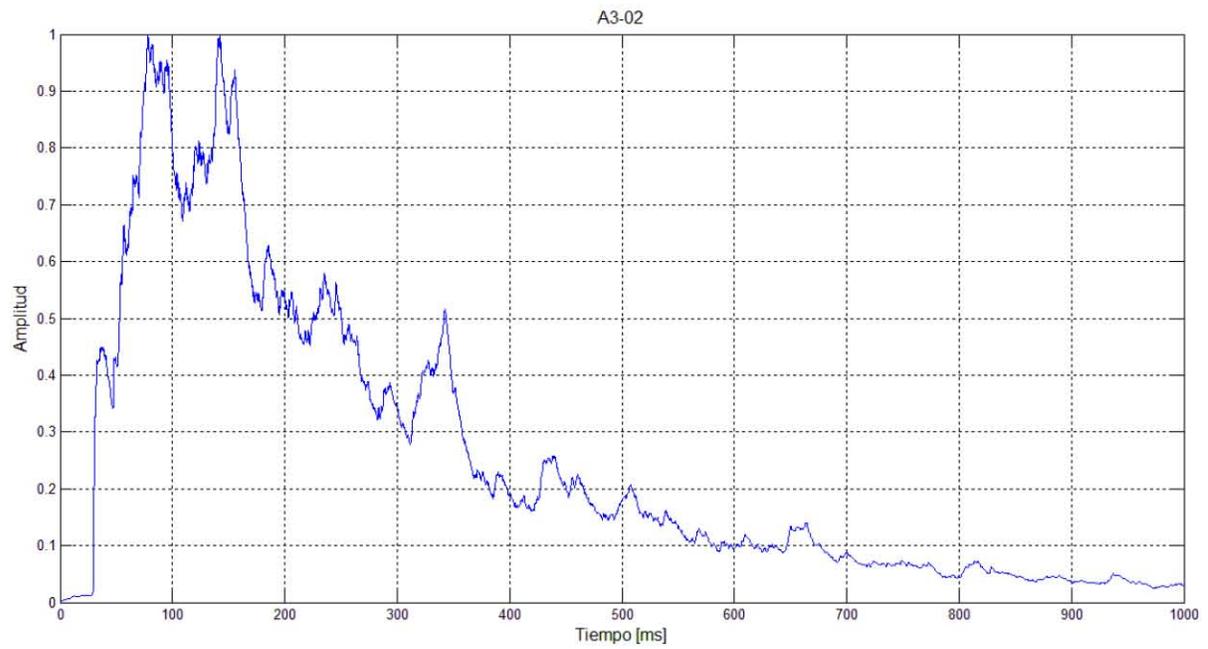


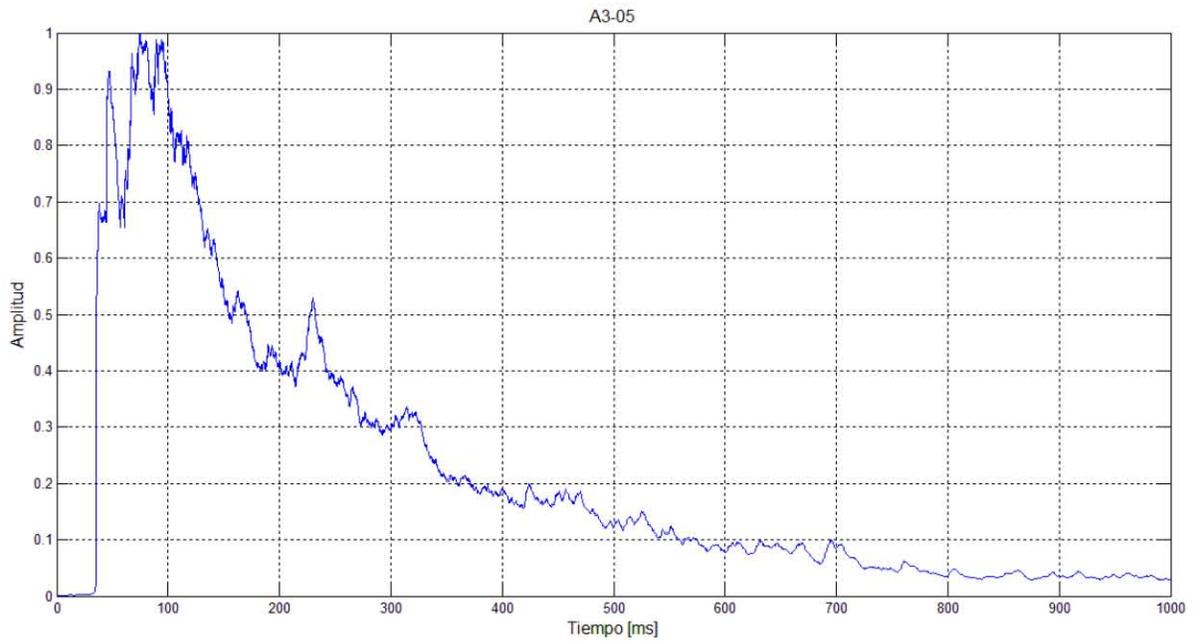
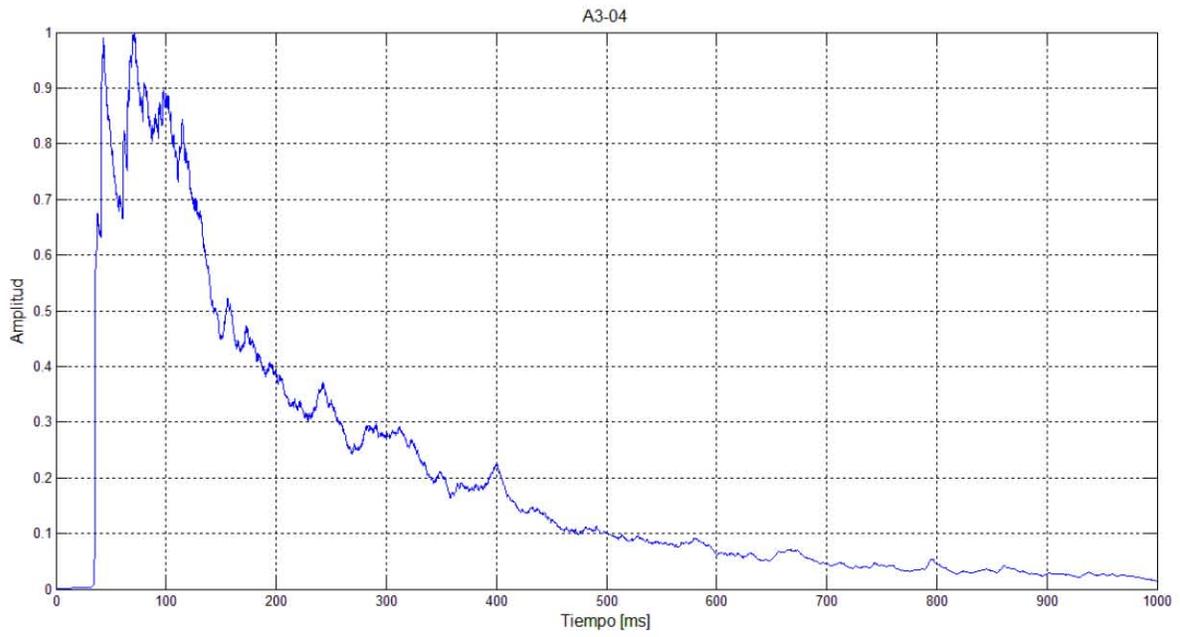


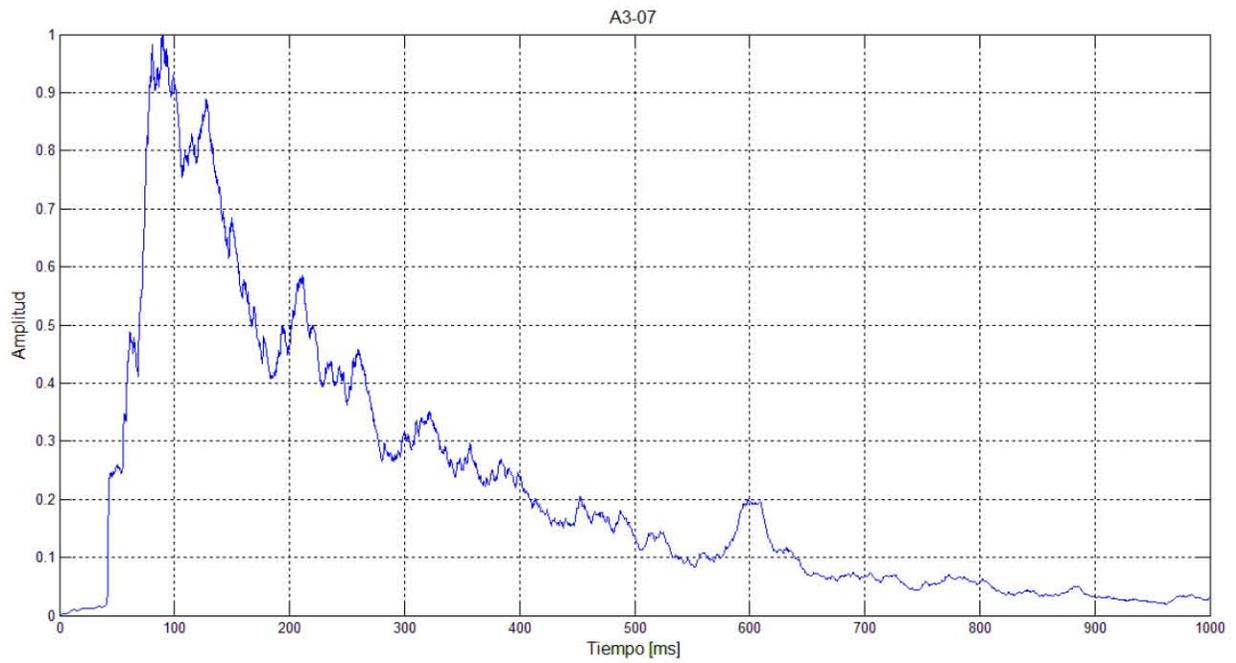
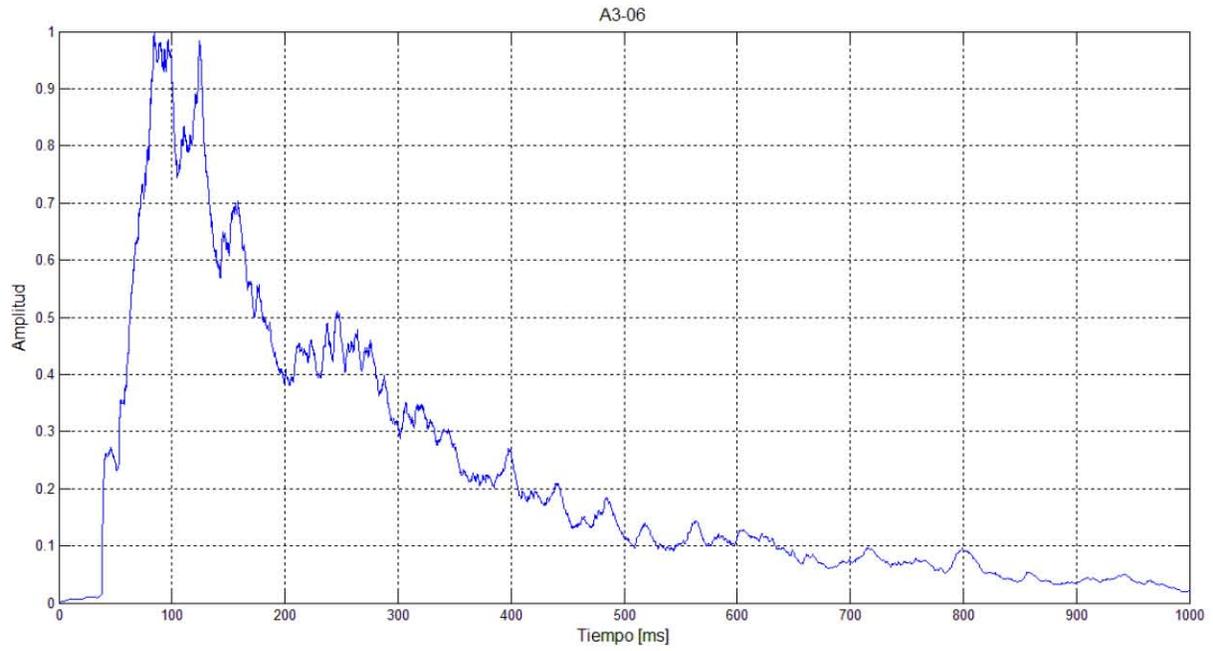
Posición de Altavoz: A3

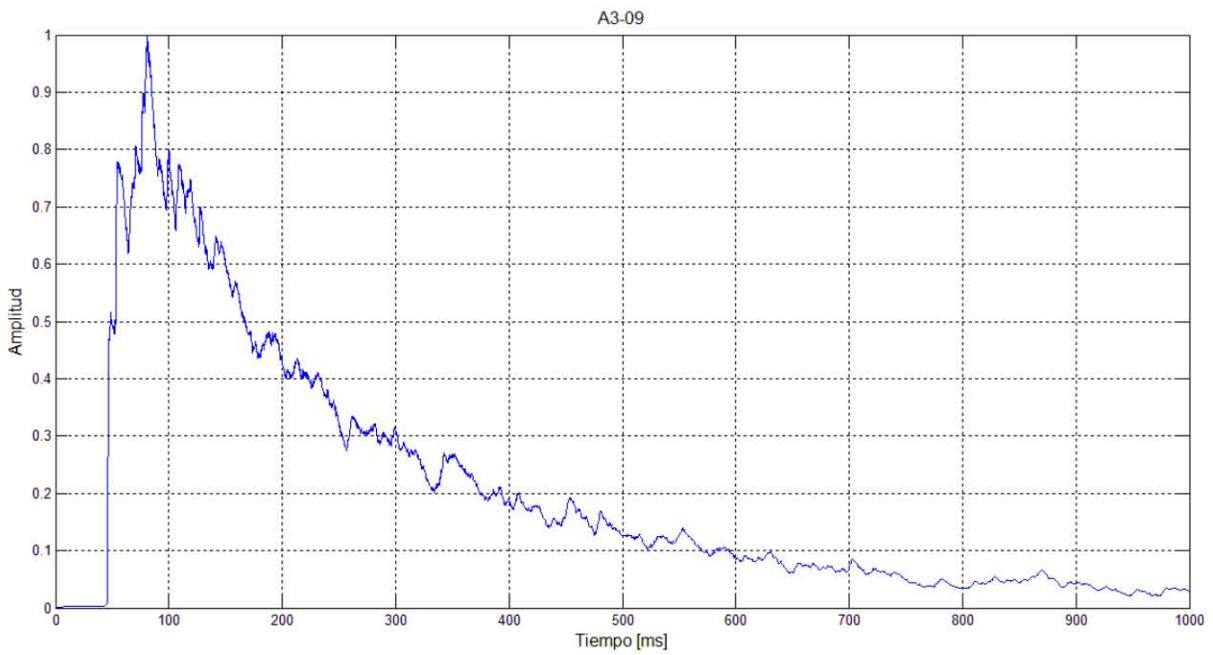
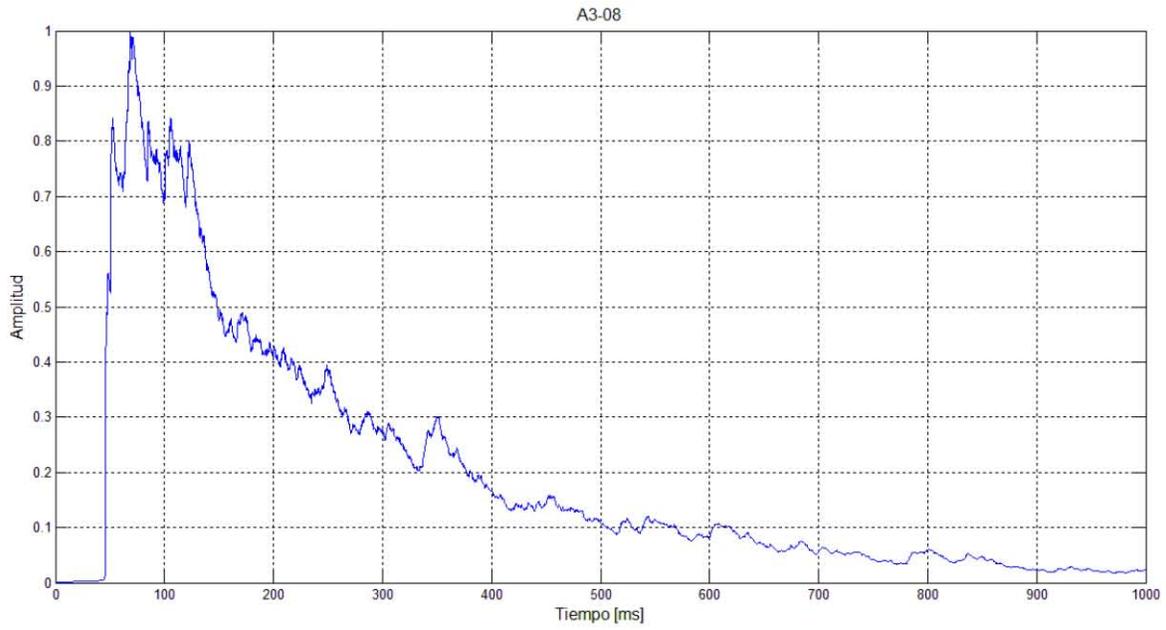
Posiciones micrófono: 00-11

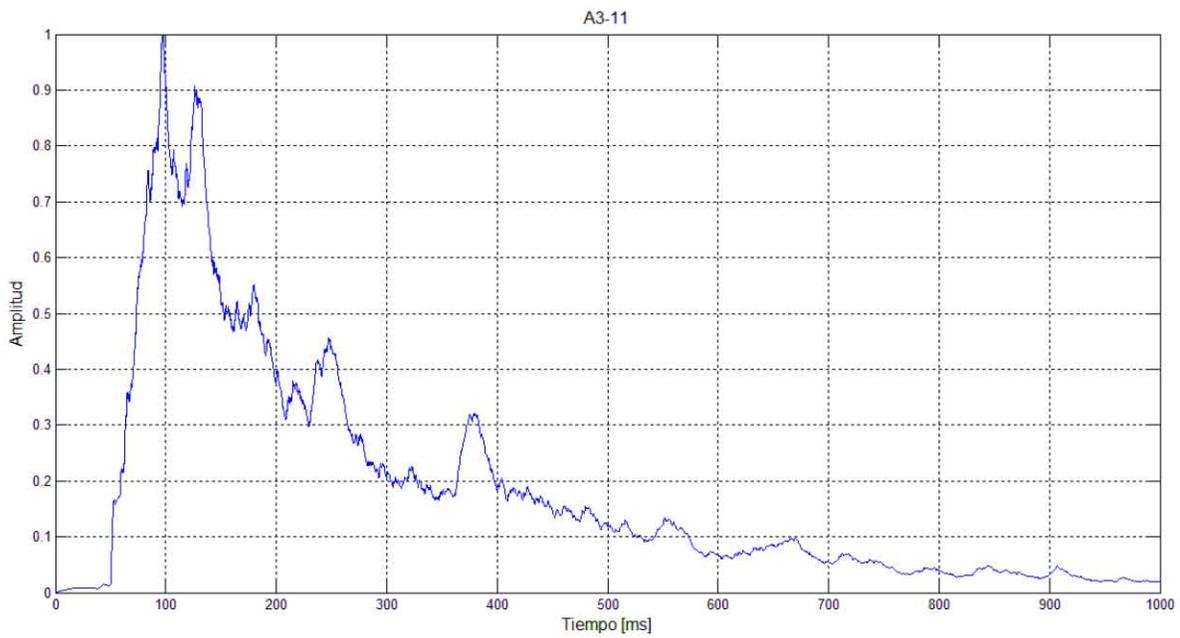
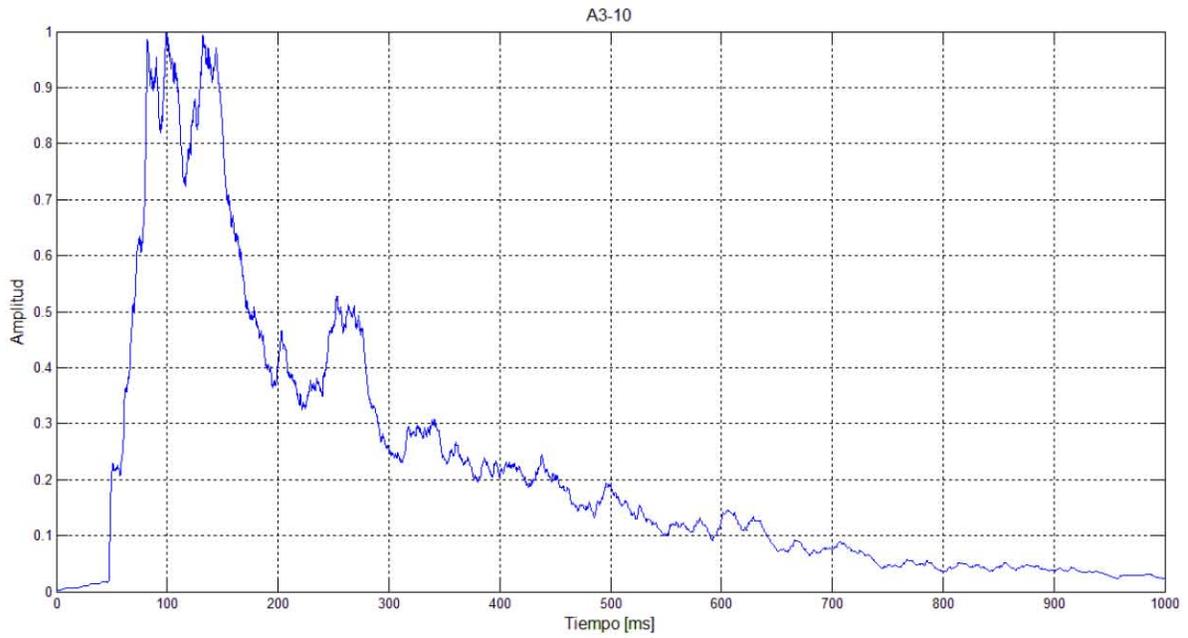










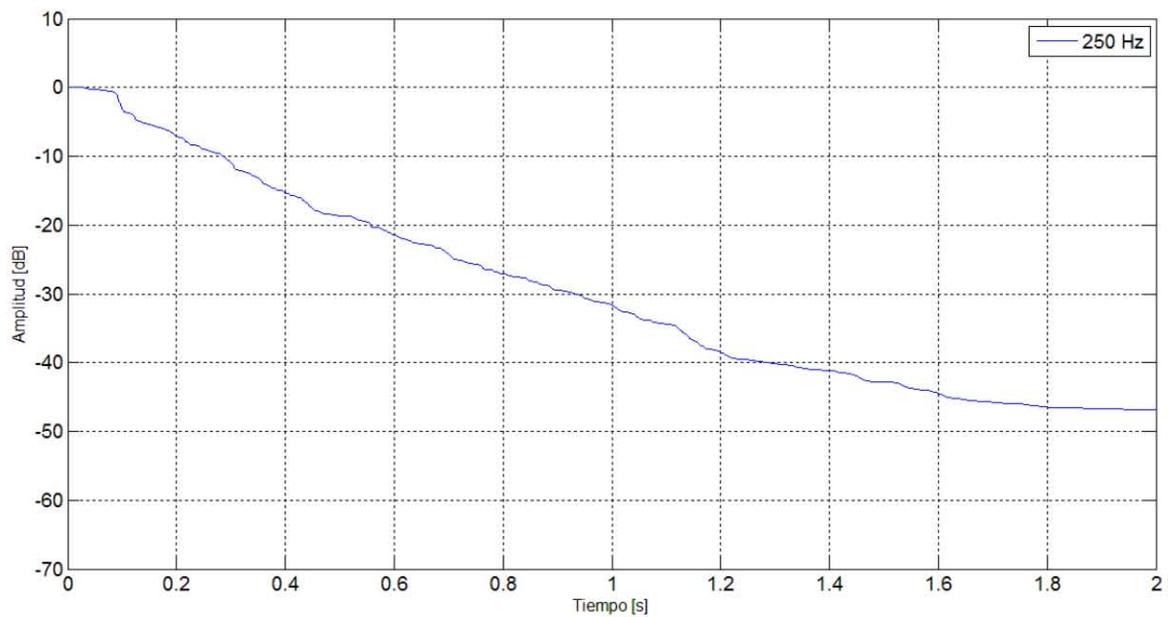
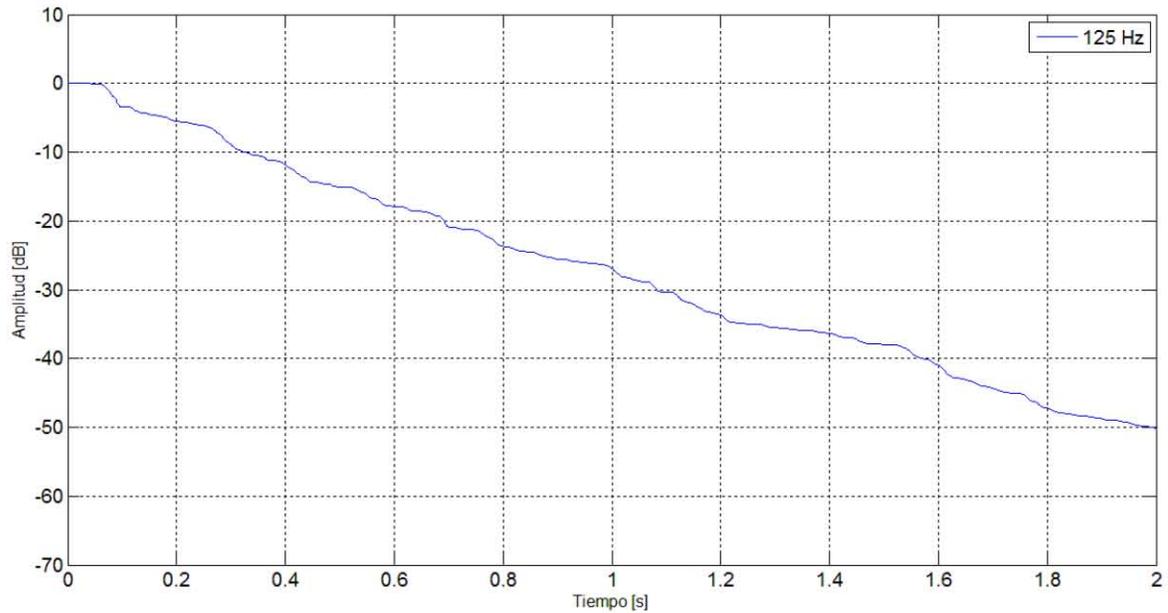


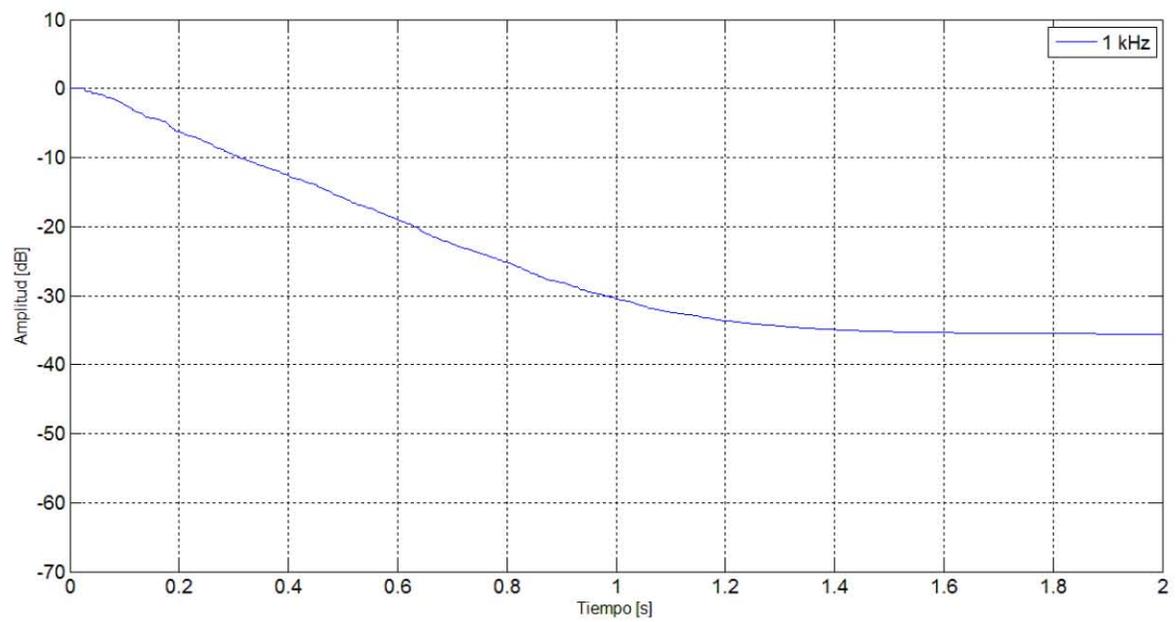
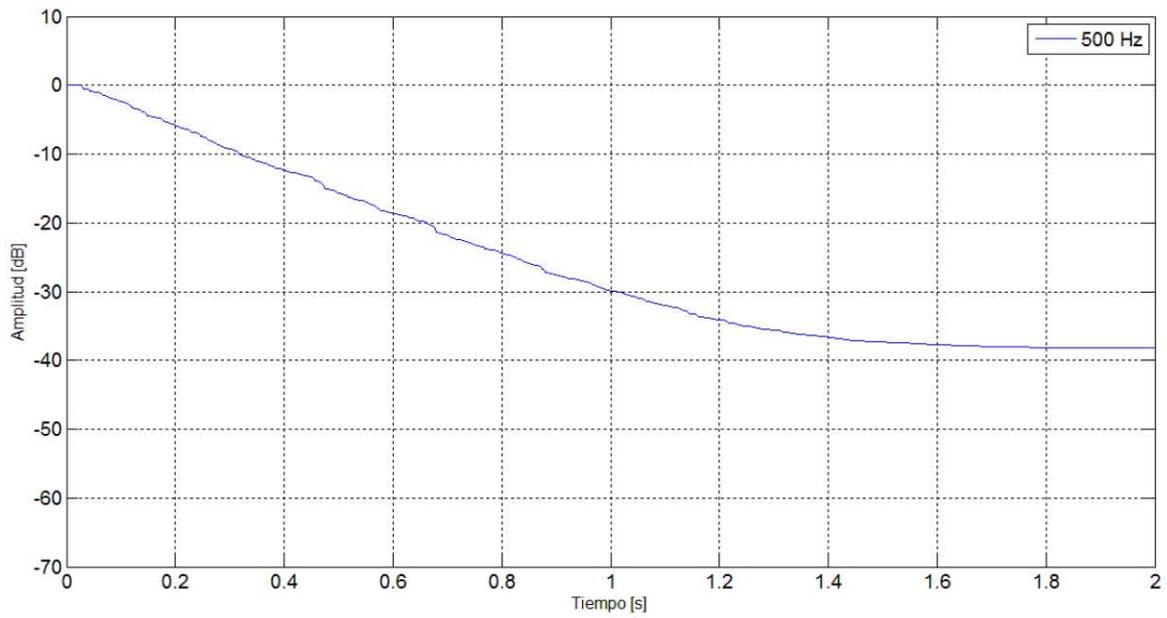
CURVAS DE DECAIMIENTO (método de Schroeder)

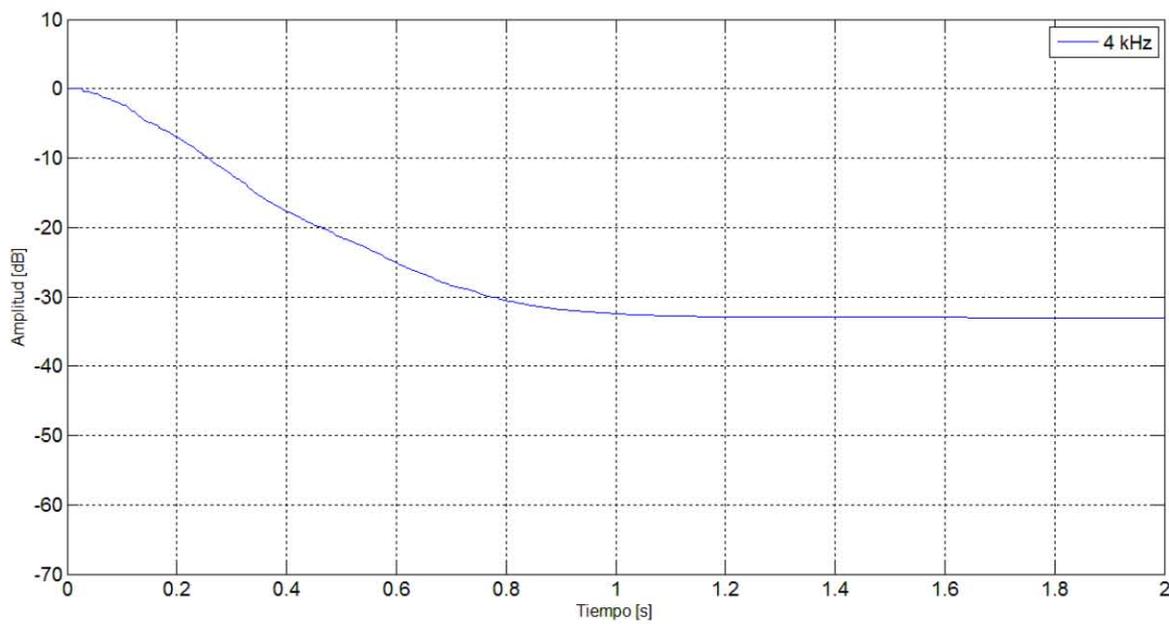
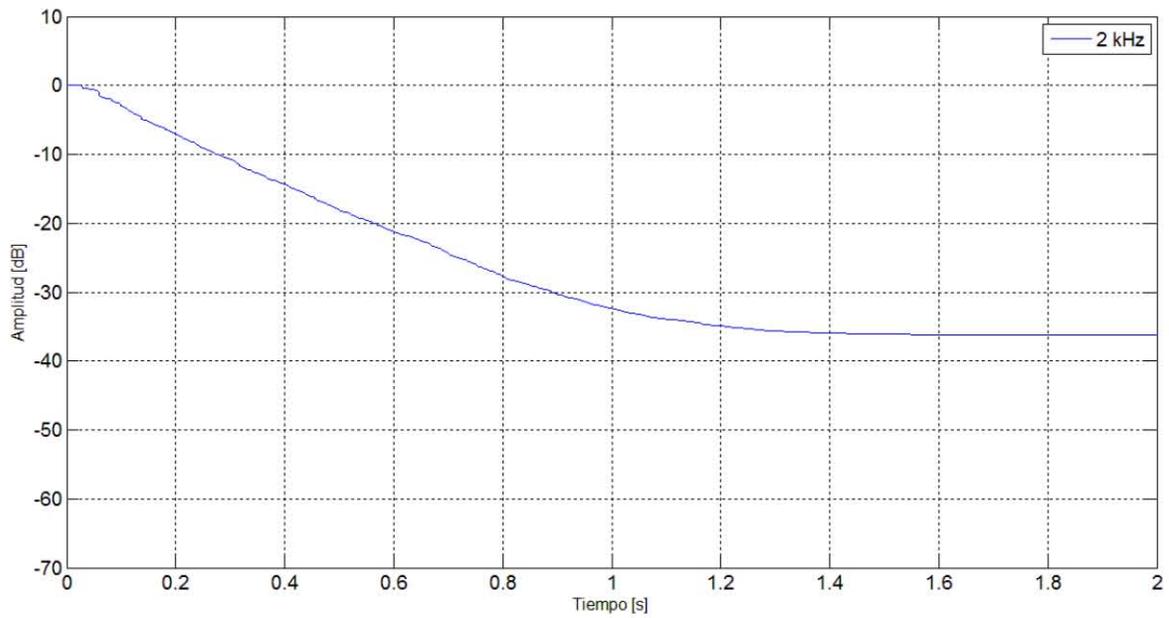
(utilizadas para obtener los tiempos de reverberación, ver sección 4.6)

Posición de Altavoz: A0

Posición micrófono: 03



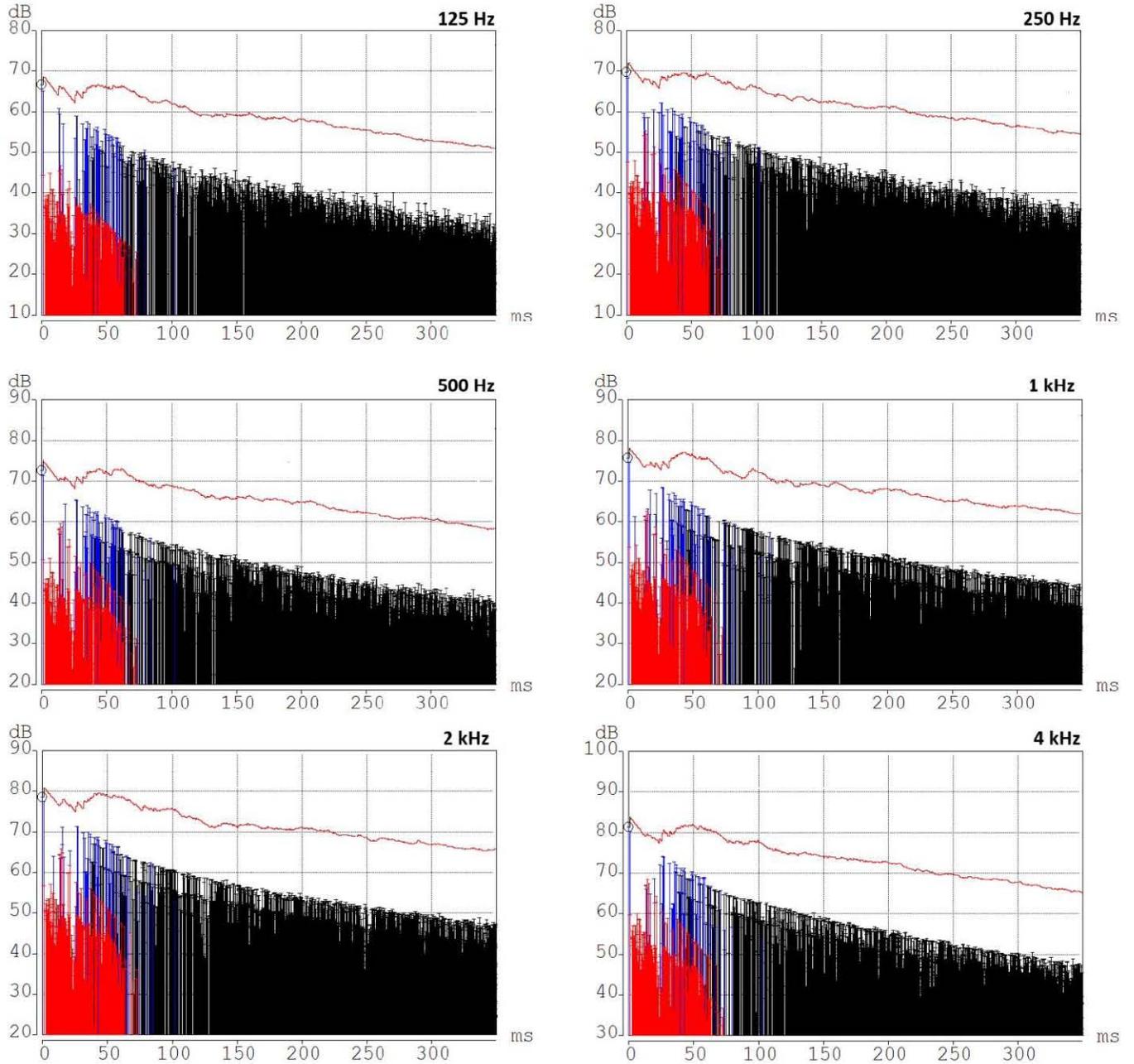




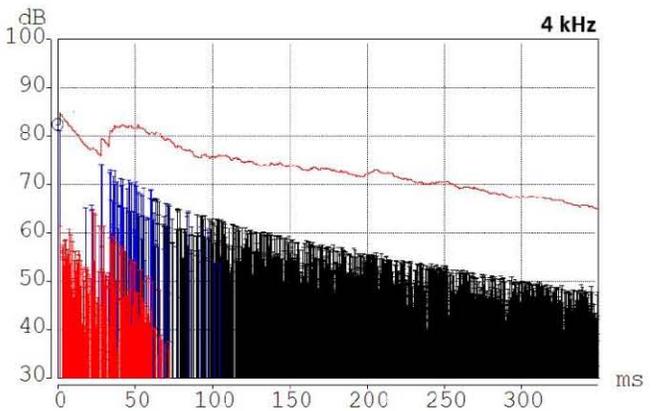
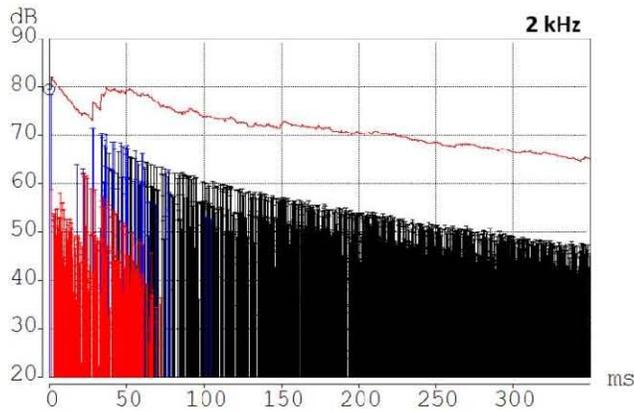
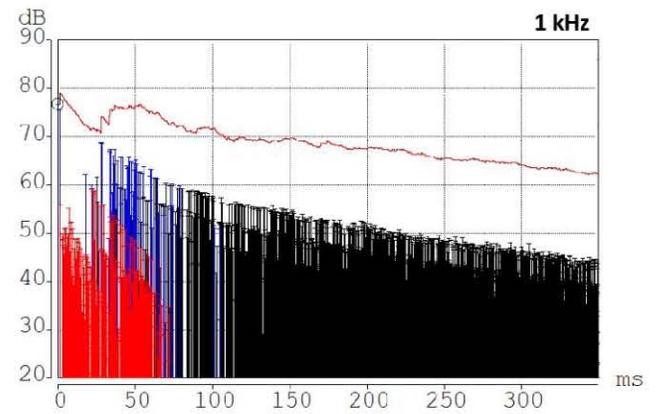
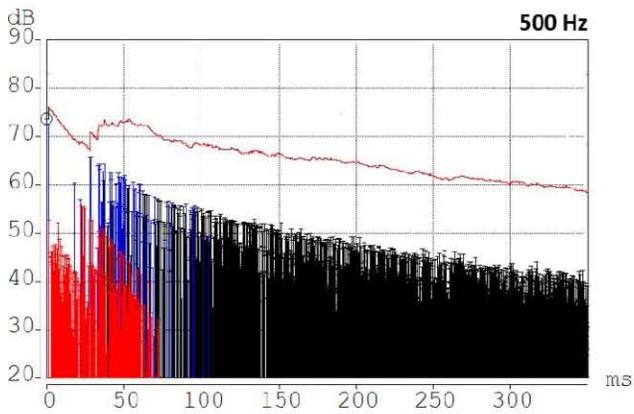
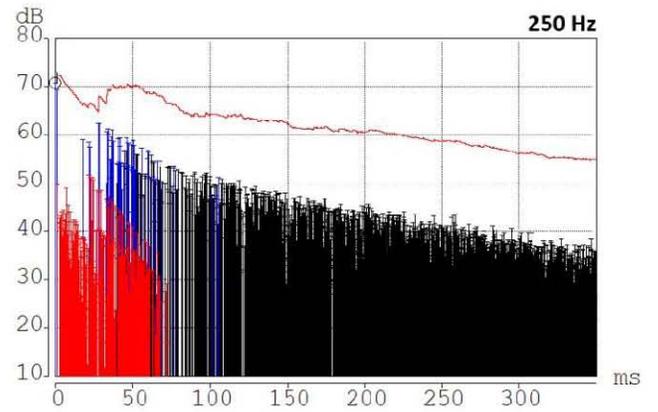
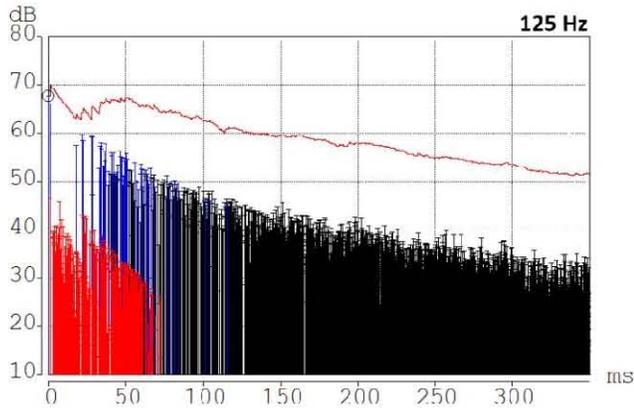
ECOGRAMAS CON DIFUSIÓN PROPUESTA OBTENIDOS DE LA SIMULACIÓN

(ver sección 4.7)

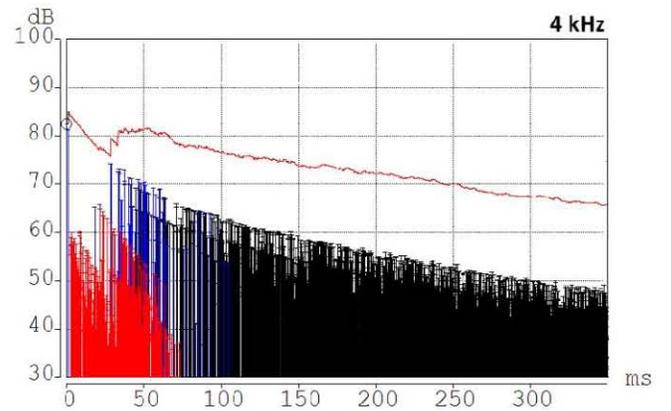
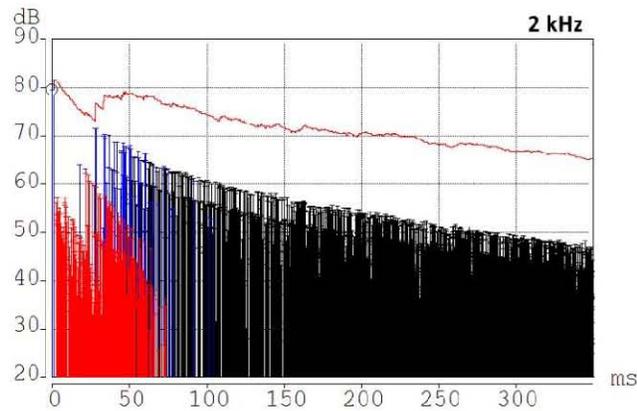
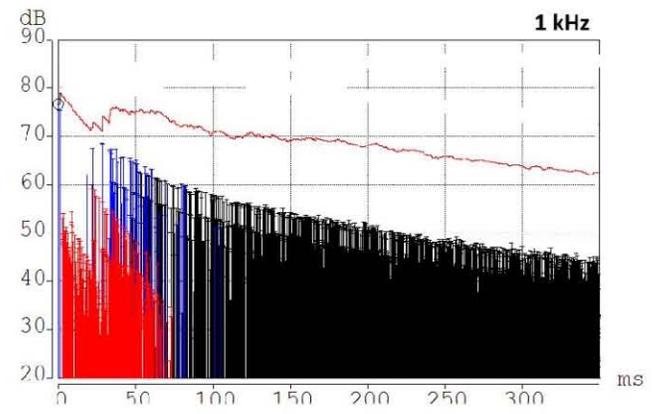
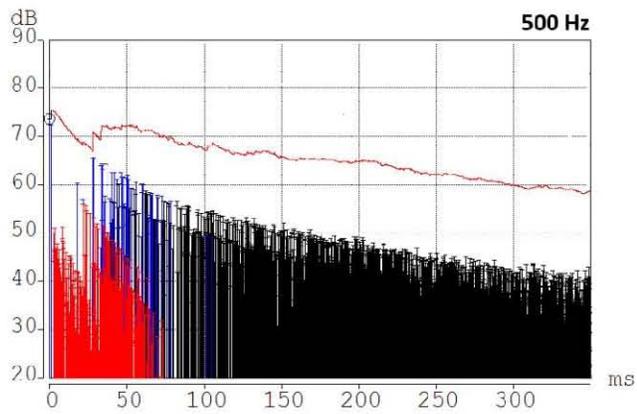
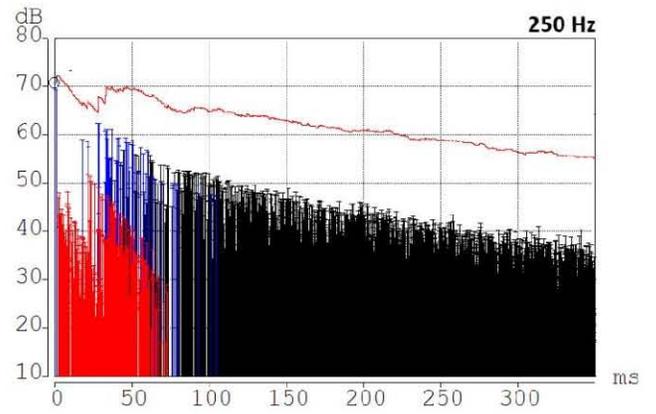
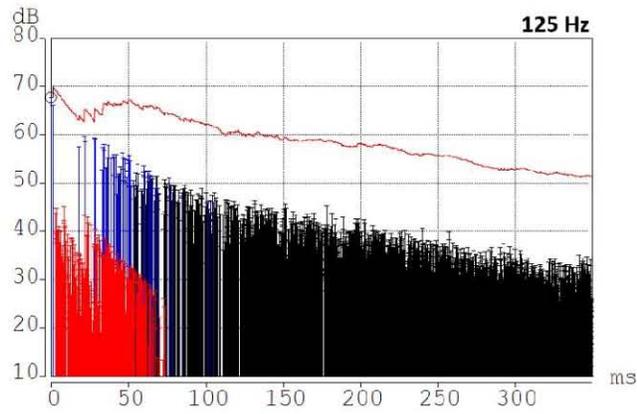
Posición micrófono: 00



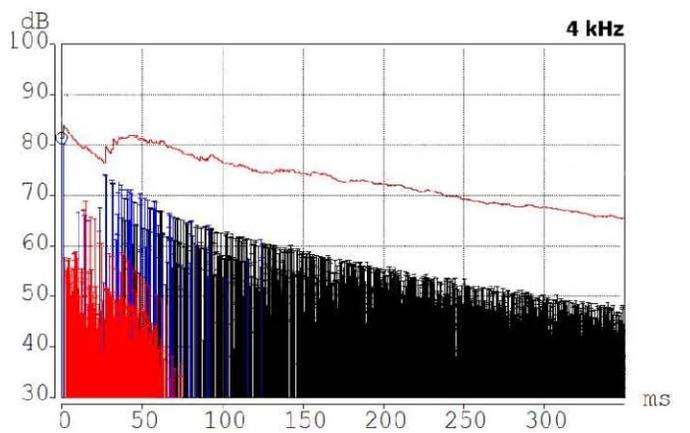
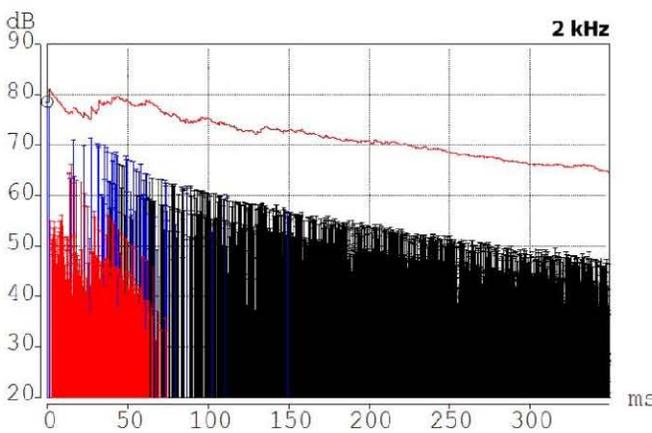
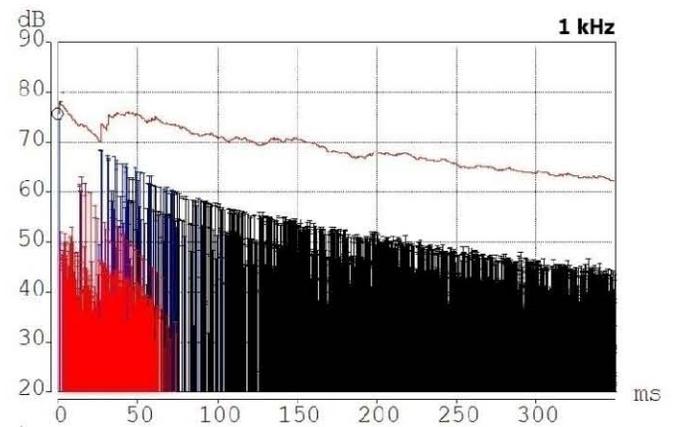
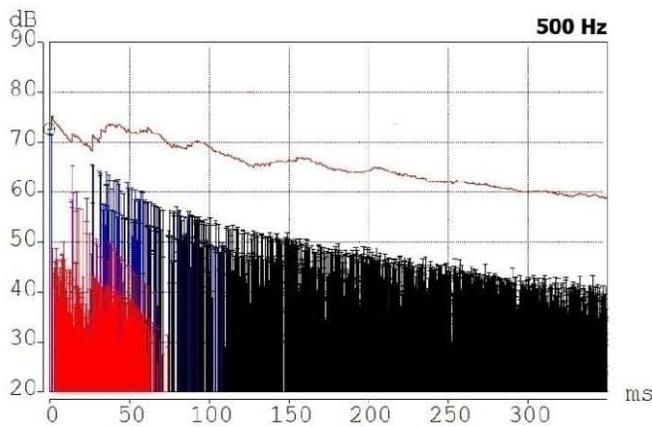
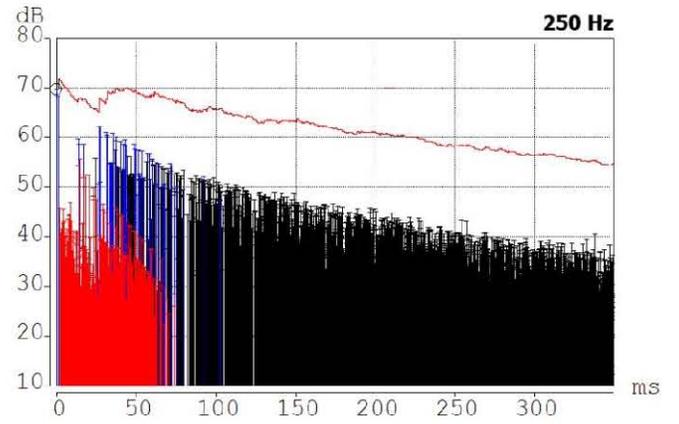
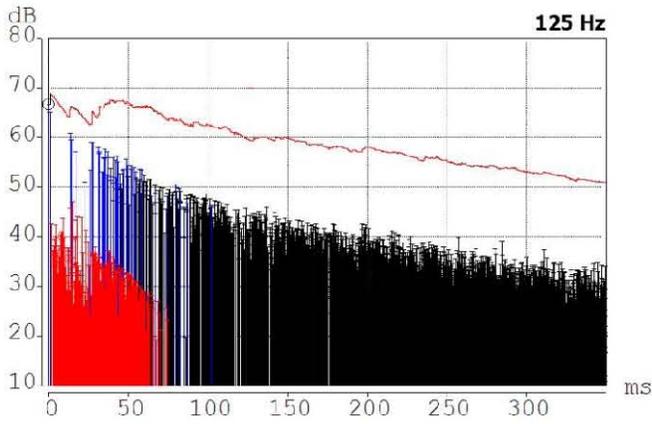
Posición micrófono: 01



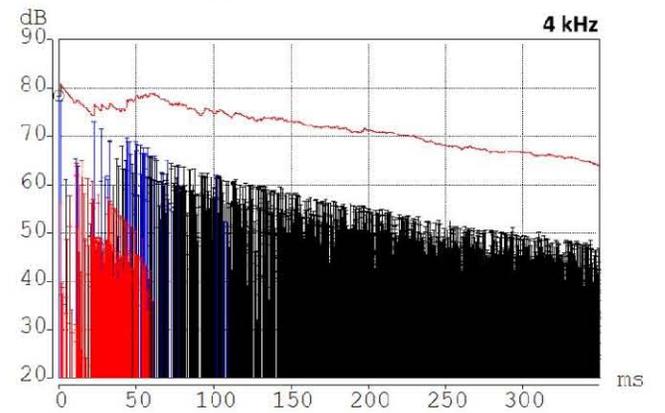
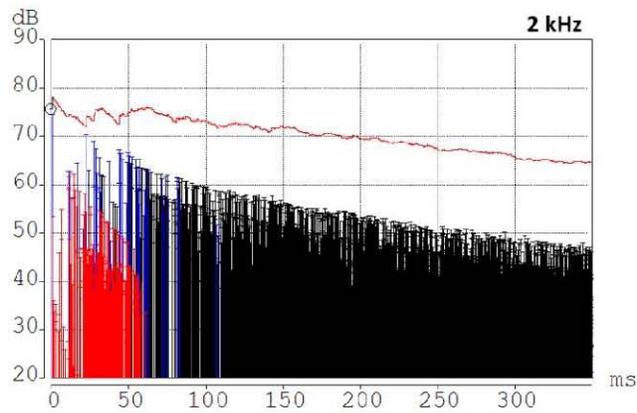
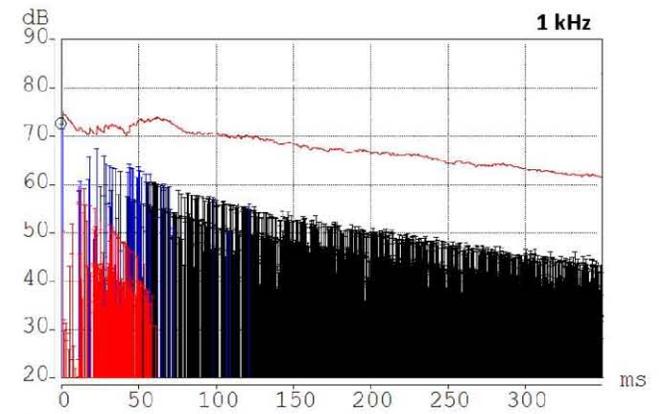
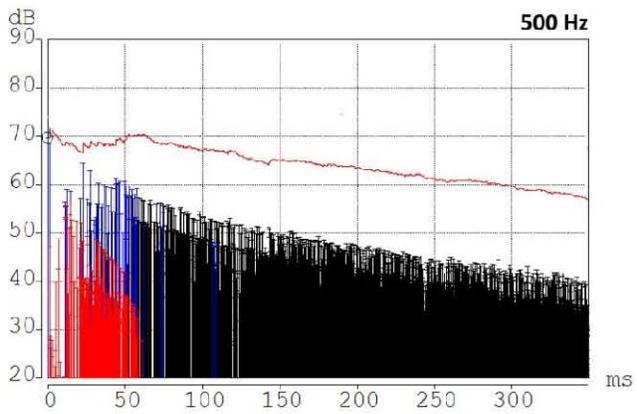
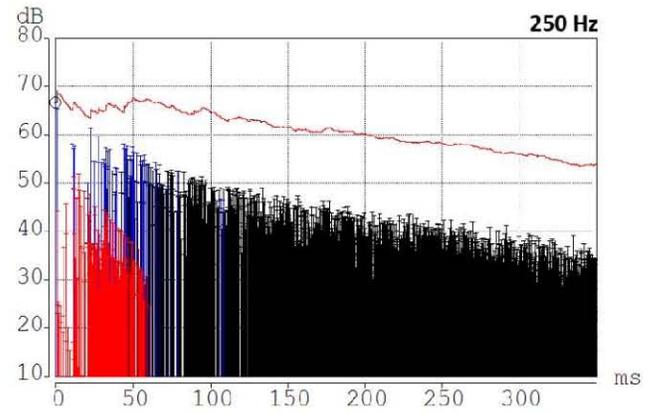
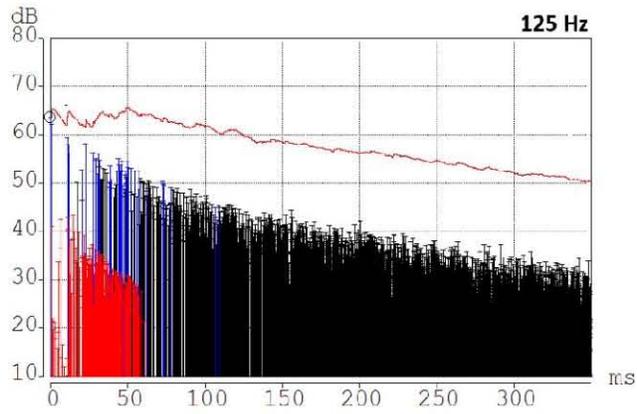
Posición micrófono: 02



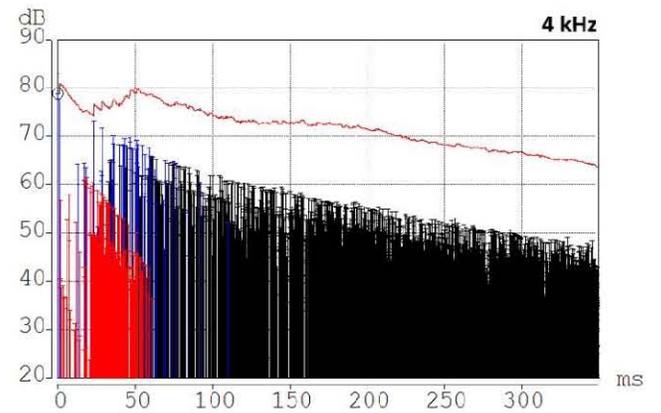
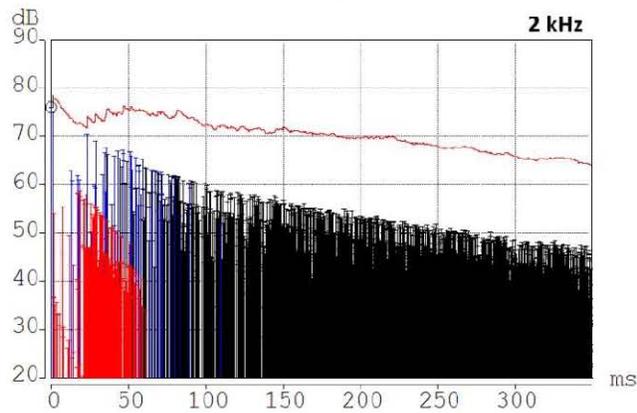
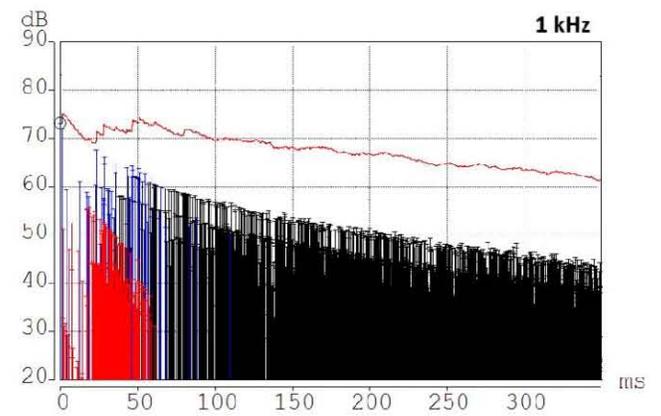
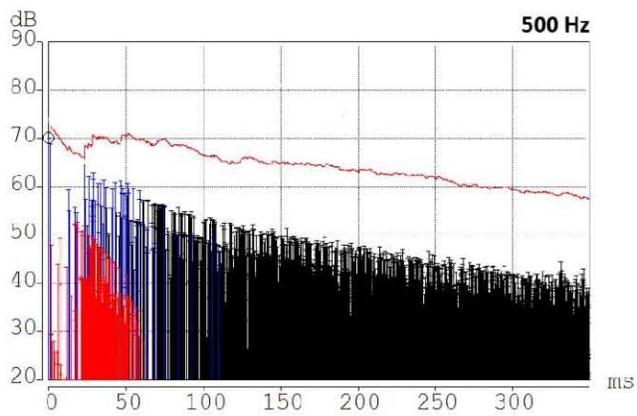
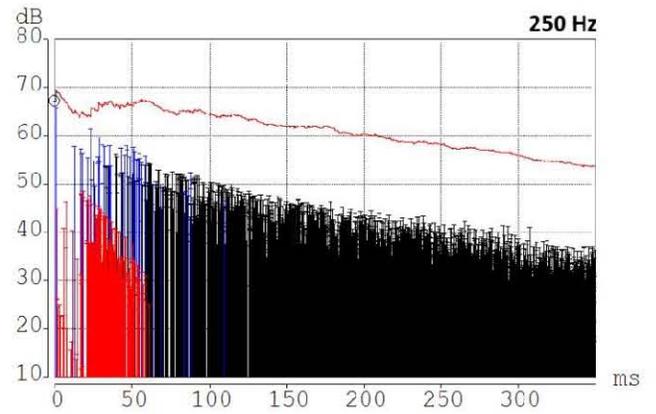
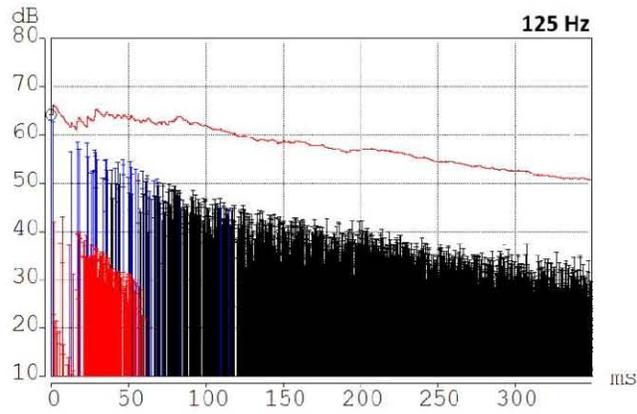
Posición micrófono: 03



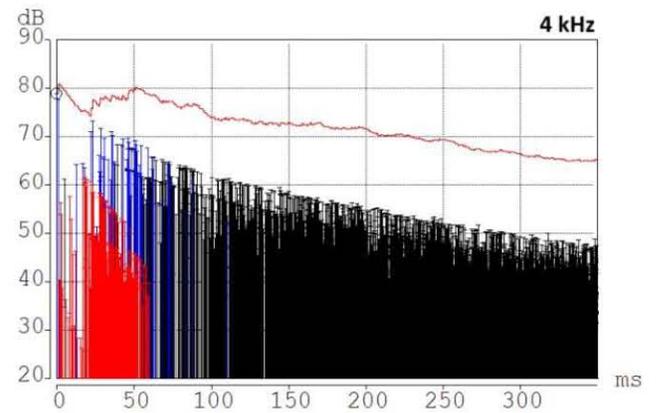
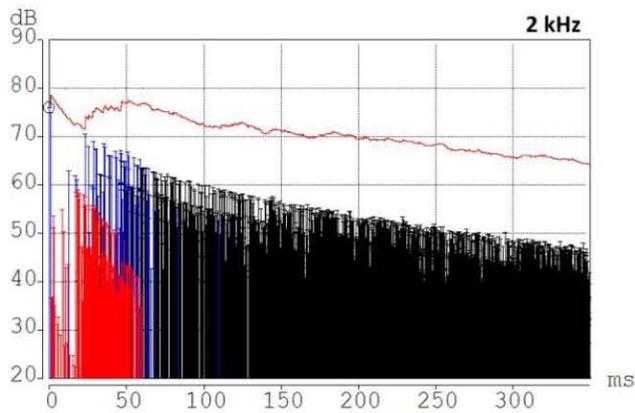
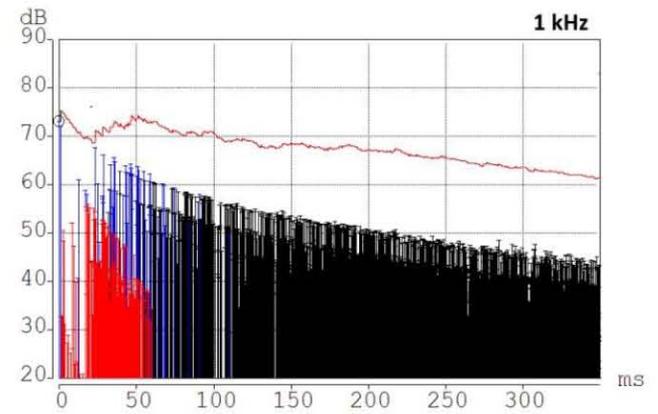
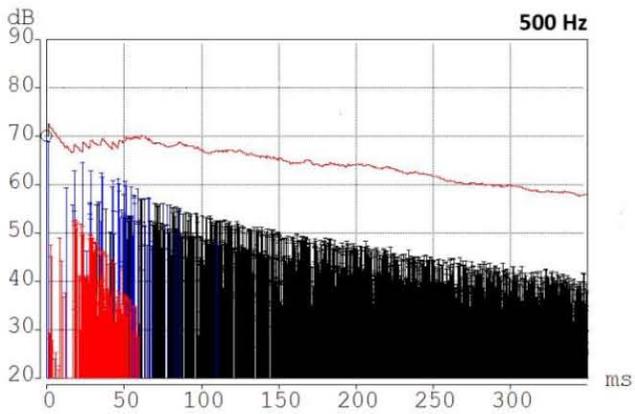
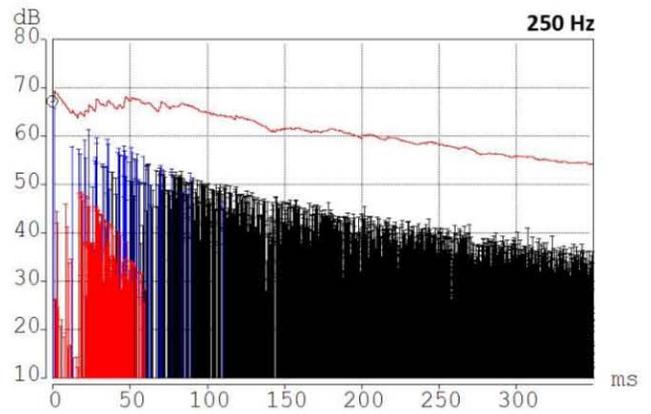
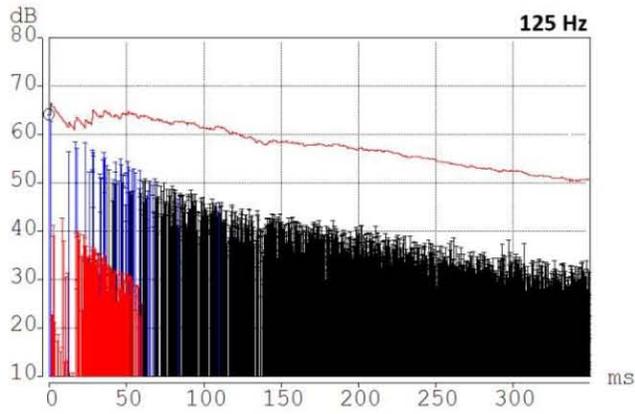
Posición micrófono: 04



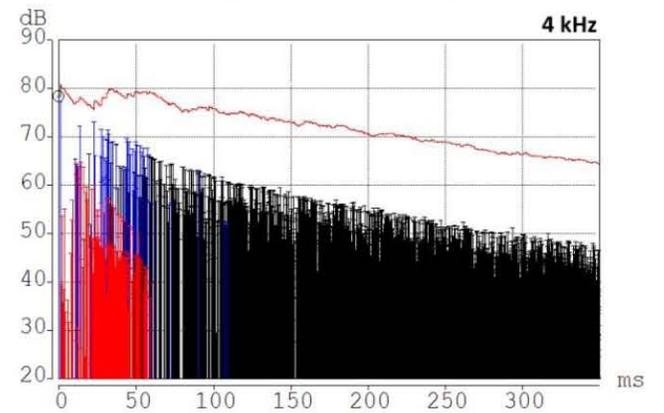
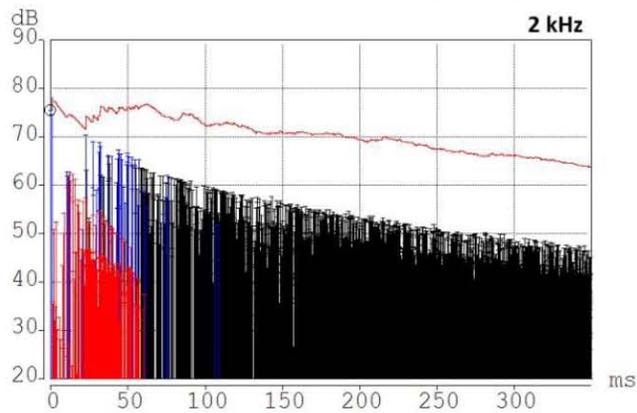
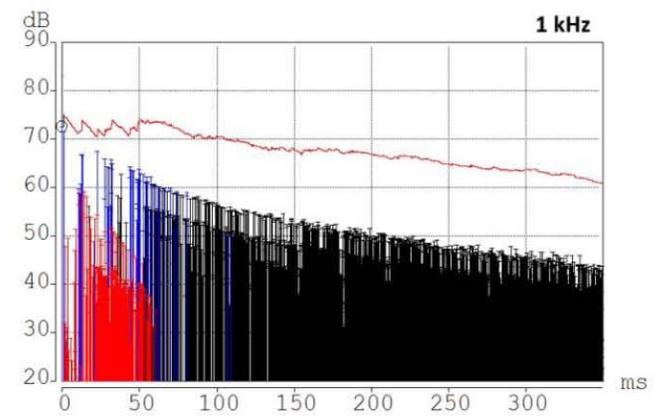
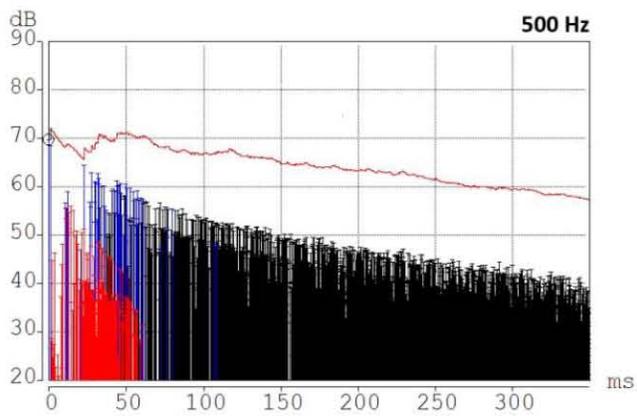
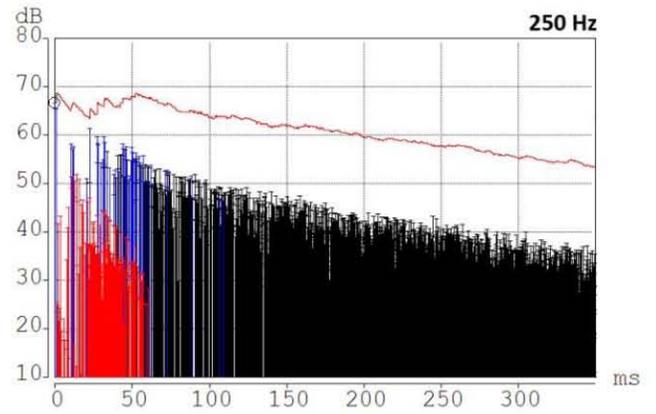
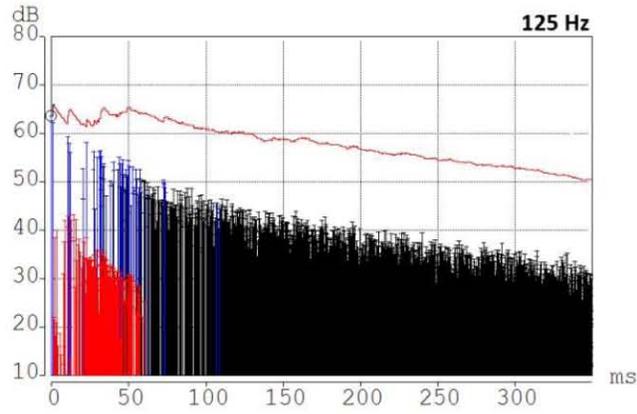
Posición micrófono: 05



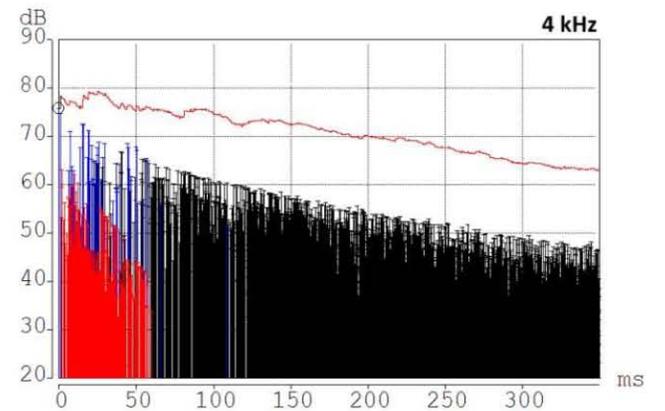
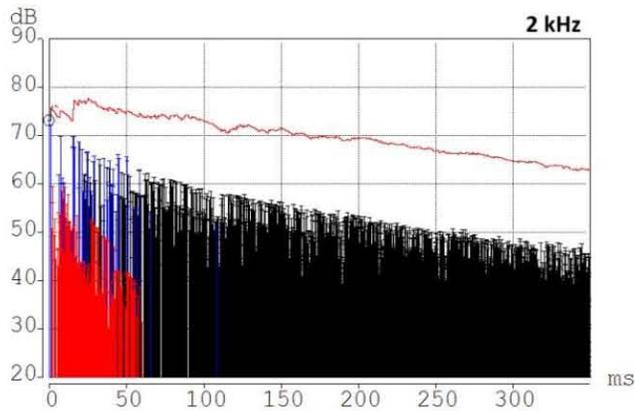
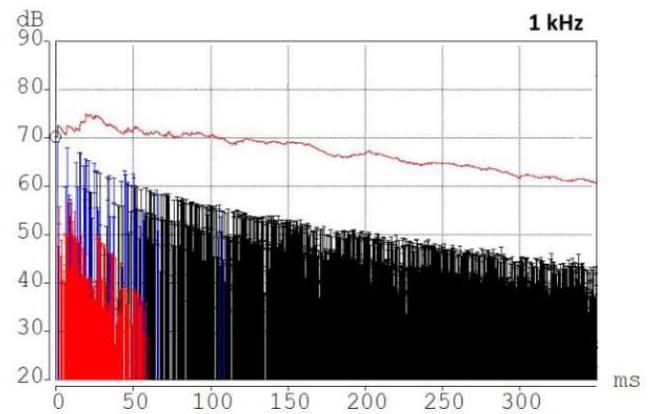
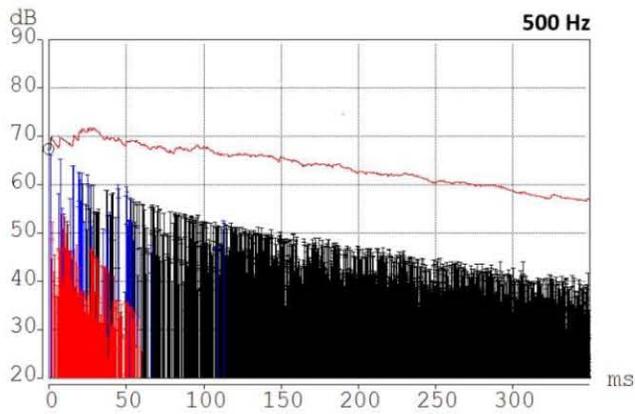
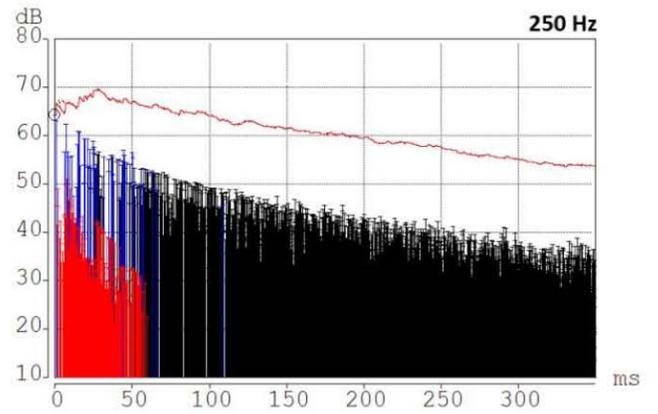
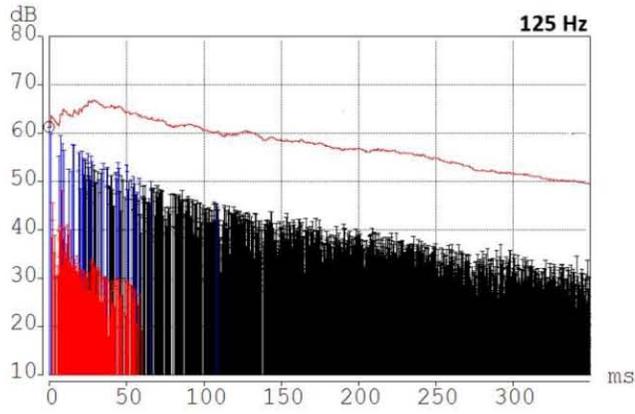
Posición micrófono: 06



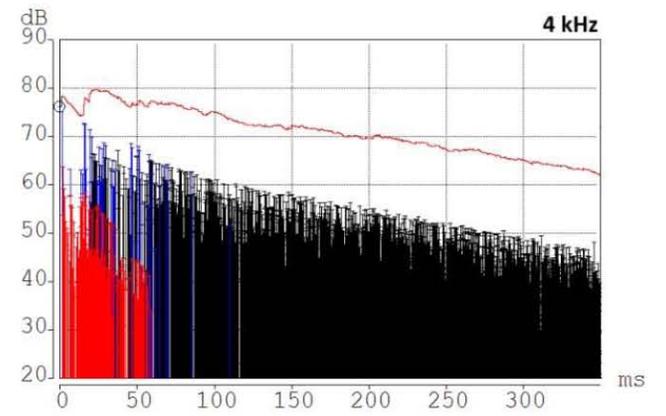
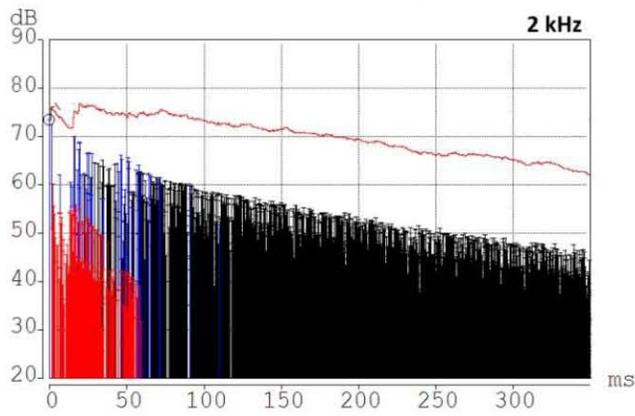
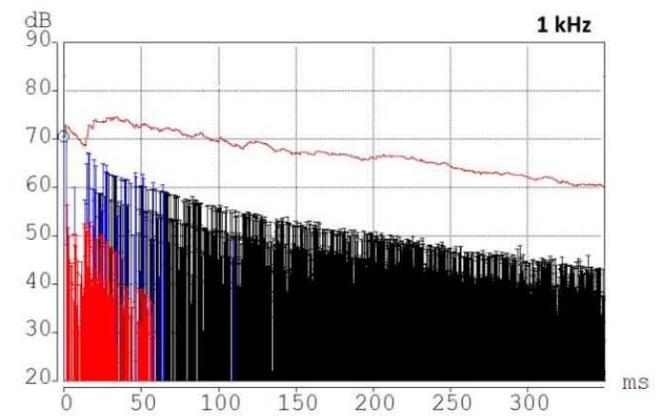
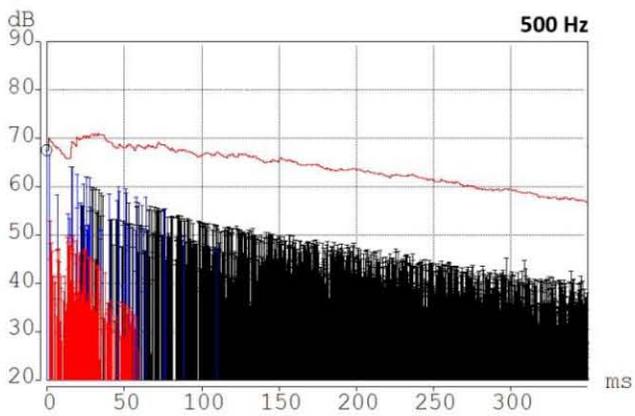
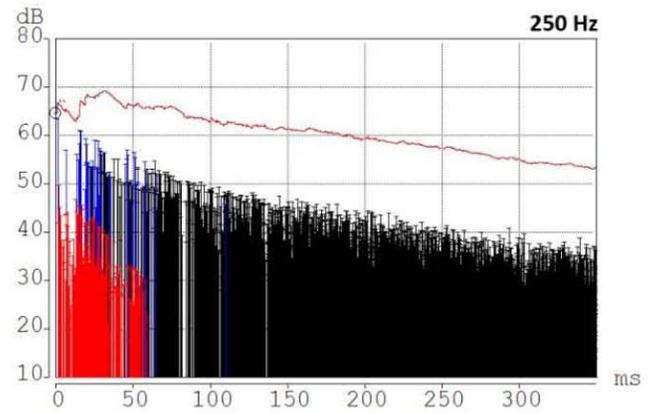
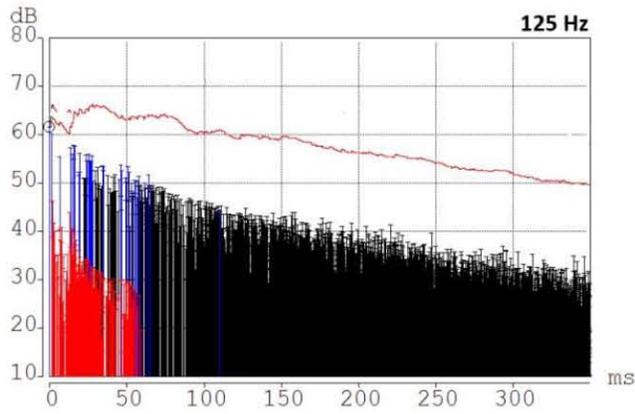
Posición micrófono: 07



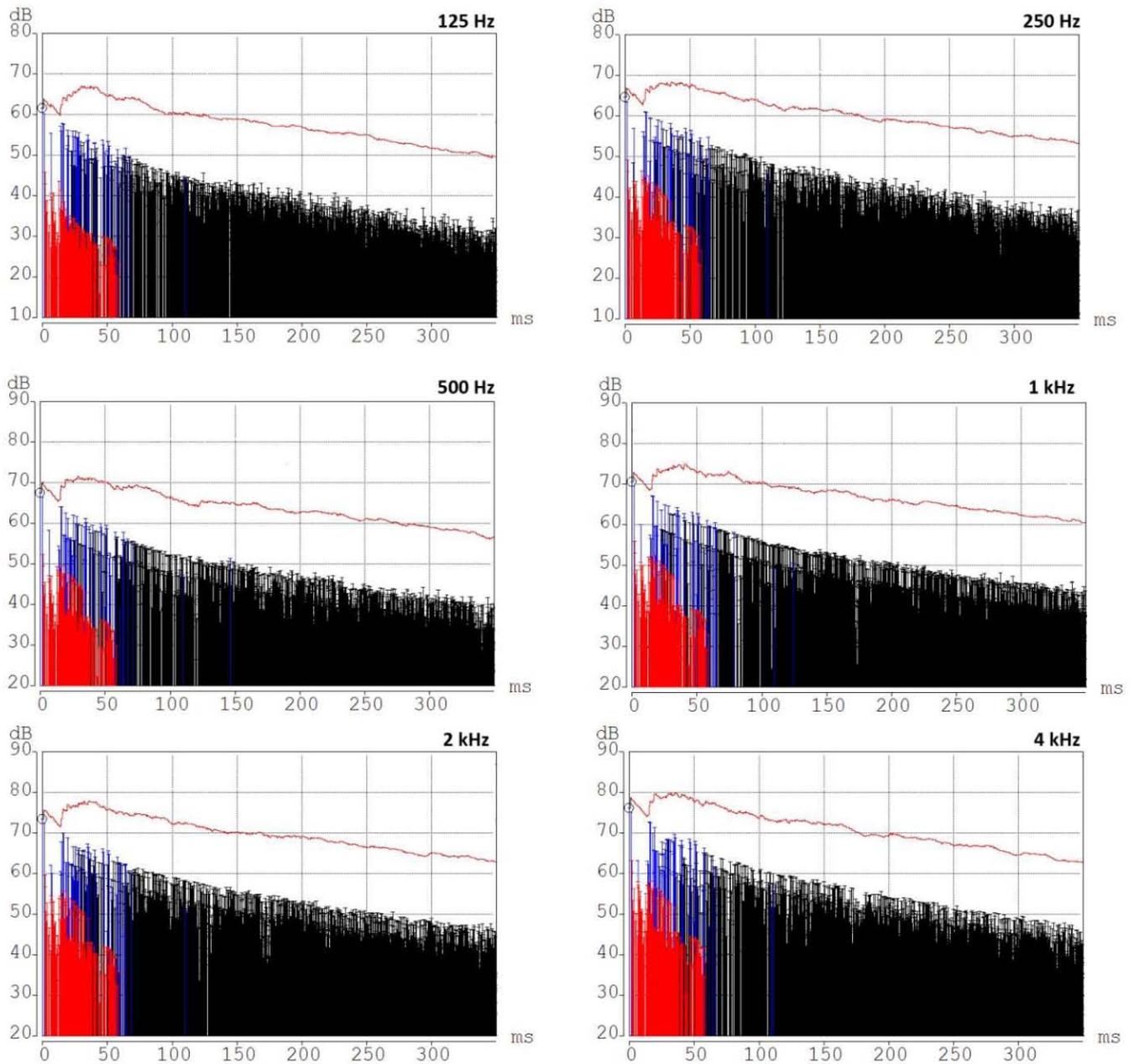
Posición micrófono: 08



Posición micrófono: 09



Posición micrófono: 10



Posición micrófono: 11

