



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN**

**ESTUDIO PARA DETERMINAR LA VIABILIDAD DE MEDICIONES DE
ABSORCIÓN SONORA EN FRECUENCIAS POR DEBAJO DE 100 HZ**

MODALIDAD DE GRADUACIÓN:
TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. RICARDO ANDRÉS FRANCO PÉREZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. SANTIAGO JESÚS PÉREZ RUIZ
CCADET-UNAM

MÉXICO, D. F. ENERO 2015



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: Dra. Rosalba Castañeda Guzmán

Secretario: Dr. Felipe Orduña Bustamante

Vocal: Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz

1^{er}. Suplente: Dr. Andrés Esteban Pérez Matzumoto

2^{do}. Suplente: Dr. Héctor Alfonso Cordourier Maruri

Lugar donde se realizó la tesis:

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO (CCADET)

TUTOR DE TESIS:

Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Cris e hijas Luz y Andrea por la confianza y el gran apoyo que siempre me brindan. Por su consejo, por los buenos momentos, juegos, risas, llantos y alegrías que me hicieron desprenderme de los nervios y sobre todo por el impulso que me dan para seguir adelante y hacer lo mejor posible en mi vida de papá, personal y profesional. Gracias por ayudarme y enseñarme a luchar por lo que se quiere.

A mi tutor Santiago J. Pérez Ruiz por su tiempo, ayuda, apoyo, aguante y dedicación para la culminación de este proyecto de Maestría.

Al Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET, que los constituyen doctores, maestros y compañeros, gracias por el préstamo de sus instalaciones y por el apoyo que siempre me brindaron.

El presente trabajo conto con el apoyo del Proyecto de CONACYT No. 213883

A ti Mamá, gracias por tu amor, comprensión apoyo moral y económico que me ayudo a salir a lo largo de este tiempo. Pero sobre todo por creer en mí y apoyarme para dar un paso más académicamente. Compartido este logro con la familia Pérez Vargas a los cuales también les doy las gracias por los buenos momentos, cariño, apoyo y consejos que me han dado a lo largo de este tiempo.

A mi amigo Sergio Saúl Figueroa (Q.E.P.D.) que me dio el empujón para realizar la Maestría. Además de la escuela EMEH que me apoyo moral y económico para llevar a su fin el término de este proyecto de vida y superación profesional y académicamente.

Le agradezco al Sr. Valentín Rivero García de Arquitectura Aural por la disponibilidad del material.

Por último y no por eso menos importante al CONACyT, por la beca otorgada, la cual ayudo en gastos durante la maestría.

!!! Muchas gracias!!!

Índice

	Páginas
Resumen	1
Justificación	1
Objetivo	2
Breve descripción de la tesis	2
Metodología	3
Capítulo I. Aspectos generales	4
1.1. Campo difuso	4
1.2. Trayectoria libre media para campo difuso	5
1.3. Tiempo de reverberación	7
1.4. Teoría de modos	8
1.5. Trayectoria libre media entre reflexiones por tipo de modo	12
1.6. Presión de sonido en estado estacionario en una banda de frecuencia	12
1.7. Calculo del tiempo de reverberación por modo	14
1.8. Métodos de medición del tiempo de reverberación	15
1.8.1. Método del ruido interrumpido	15
1.8.2. Método utilizando señales sinusoidales con barrido de frecuencias	17
1.8.2.1 Señales y sistemas	17
1.8.2.2 Medición de la respuesta de impulso	19
1.8.3. El método de respuesta del impulso integrado	22
1.8.3.1 Variación estadística de los tiempos de reverberación en cuartos	26
1.8.4 Método utilizando secuencias de máxima de longitud (MLS)	28
1.8.4.1. Limitaciones	32
Capitulo II. Desarrollo del proyecto	34
2.1. Mediciones suponiendo la existencia de un campo difuso	34

2.1.1 Método de ruido interrumpido	36
2.2. Mediciones suponiendo la existencia de un campo modal	39
2.2.1 Método propuesto por Zha y Fuch	45
2.2.1.1 Mediciones en campo modal	46
Capítulo III. Conclusiones y recomendaciones	68
Referencias	69
Apéndice	72
A. Explicación (procedimiento) de los métodos	72
A.1.1 Procedimiento de medición de la función de transferencia para la obtención de las frecuencias de los modos propios y los tiempos de reverberación por debajo de 100 Hz, de la cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM.	72
A.1.2 Método de ruido interrumpido	79
A.1.2.1 Proceso para obtener los datos del analizador de frecuencia B&K modelo 2133 a una laptop	83
B. Programas para el método propuesto por Zha y Fuchs	85
B.1 Programa el cual realiza la medición de la función de transferencia de la cámara reverberante para obtener los modos propios con el método propuesto por Zha y Fuchs	85
B.2 Programa que realiza la reproducción de la frecuencia de los modos propios de la cámara reverberante, la obtención de la respuesta de la frecuencia del modo y obtener el tiempo de reverberación.	88

Resumen

En la presente tesis se aborda el problema de medir el coeficiente de absorción sonora por el método de cámara reverberante en frecuencias bajas, (en el intervalo de 50 a 100Hz). Como en este método es indispensable medir tiempos de reverberación, el objetivo de la tesis equivale a medir tiempos de reverberación en frecuencias bajas, con un margen de incertidumbre pequeño. Actualmente en la literatura especializada relacionada, existe una gran variedad de procedimientos propuestos, pero ninguno ha alcanzado un acuerdo unánime, lo cual refleja su complejidad, por lo mismo, se considera un tema abierto a la investigación de Who [1].

Justificación

La necesidad de medir absorción (tiempo de reverberación) en frecuencias en el intervalo de 50 a 100 Hz, surge principalmente, debido a la necesidad de determinar el aislamiento sonoro (índice de reducción sonora, R) en recintos en esta gama de frecuencias Pedersen [2]. Al cuantificar la diferencia entre la energía sonora incidente y la energía sonora transmitida a través de un muro de separación, es necesario determinar la energía sonora absorbida en el recinto receptor.

Los muros de una casa reducen el nivel de energía sonora en 2 casos principales a) fachadas, b) entre viviendas. Para el primer caso, la energía sonora del exterior frecuentemente se debe al ruido generado por el transporte (autos, camiones, trenes, aviones, etc.); este ruido de tráfico no solo se ha venido incrementando en nivel, sino que el espectro de emisión se ha extendido en la zona de frecuencias bajas, quizás por el creciente empleo de motores cada vez más grandes y potentes. Para el segundo caso, también se ha observado un incremento tanto en el nivel como en el espectro de emisión hacia frecuencias bajas, debido a la generalización del uso de aparatos electrodomésticos y equipos reproductores de sonido de alta fidelidad con refuerzos en frecuencias bajas (subwoofer).

Actualmente, el procedimiento normalizado para determinar el coeficiente de absorción sonora por el método de la cámara reverberante, se establece en la gama de frecuencias de 100 a 5000 Hz, Norma ISO 354:2003 [3]. El límite en frecuencias bajas se ha ubicado en la frecuencia de 100 Hz debido a que el método de la cámara reverberante requiere conseguir, dentro de la cámara, un campo sonoro difuso, meta difícil de lograr a esta frecuencia por el comportamiento fuertemente modal del recinto a esta frecuencia. El alcanzar solo parcialmente el campo sonoro difuso, trae como consecuencia una gran variabilidad en la medición del coeficiente, por lo que el margen de incertidumbre en esta medición es alto.

Al intentar realizar la medición en frecuencias por debajo de 100 Hz se espera que el margen de incertidumbre crezca, por lo que el reto es disminuir la frecuencia de medición y obtener incertidumbres al menos parecidas a las obtenidas actualmente en 100 Hz.

En la literatura especializada en Acústica de Recintos, recientemente se han publicado investigaciones que reclaman la necesidad de caracterizar elementos de construcción (recubrimientos, paneles, puertas, ventanas, etc.) que abarca de 50 hasta 100 Hz, R. O. Neubauer [4]. De hecho la Comunidad Europea está realizando un intenso trabajo de investigación en esta misma dirección, B. Rasmussen y W. Scholl [5,6]. El principal interés radica en poder controlar la emisión de fuentes sonoras cuyo contenido espectral tiene componentes importantes en esta región de frecuencia (ruido de tráfico, música, etc.).

Objetivo

- Estudio de la viabilidad de extender las mediciones de absorción sonora en frecuencias por debajo de 100 Hz, por el método de la cámara reverberante (incidencia aleatoria).

Breve descripción de la tesis

El presente trabajo forma parte de la línea de investigación del Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz del Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), acerca del comportamiento del coeficiente de absorción en el intervalo de 50 a 100 Hz.

Como marco de referencia inmediata (capítulo 1), el trabajo inicia con aspectos generales como son el campo difuso, la trayectoria libre media en el campo difuso, y el tiempo de reverberación. Por tratarse de bajas frecuencias, se investigó la teoría de modos, la teoría de la trayectoria libre media para tipo modal y, por último, los diferentes tipos de medición.

En el capítulo 2 se hace el desarrollo experimental iniciando las mediciones suponiendo la existencia de un campo difuso, por lo que inicia utilizando el método de ruido interrumpido. Al ver que el comportamiento en bajas frecuencias es modal se realizaron las mediciones suponiendo la existencia de un campo modal. Esto se hizo obteniendo de la forma teórico práctico propuesta por Larsen [7] para los modos propios de la cámara reverberante y posteriormente se utilizó el método propuesto según Zha y Fuchs [8].

Por último, el capítulo 3 muestra las conclusiones y se dan recomendaciones para futuras mediciones.

Metodología

Para medir el coeficiente de absorción sonora es necesario medir el tiempo de reverberación dentro de la cámara reverberante (vacía y con muestra). Se empezará por comparar los diversos métodos de medición de tiempo de reverberación. Primero se analizarán los procedimientos que se basan en conseguir el campo difuso dentro de la cámara. Después se analizará el comportamiento modal de la cámara, para intentar determinar el decaimiento de cada modo o de un grupo aproximado de modos (frecuencias propias de la solución de la ecuación de onda de un recinto), sobre todo los más dominantes. En cada caso se revisarán todos los elementos que contribuyan con el valor de incertidumbre de la medición (ruido de fondo, variables ambientales, etc.). Con esta información se espera tener elementos para bosquejar la mejor estrategia de medición, que se someterá a pruebas intensivas.

Capítulo I. Aspectos Generales

1.1. Campo difuso

Una de las suposiciones comúnmente hechas en la medición y predicción de la absorción sonora es que el campo de sonido en las salas puede ser considerado como difuso. Un campo de sonido difuso propuesto por Carl H. y Kuttruff H. [9,10] puede ser considerado como uno en el que la densidad de energía de sonido es uniforme en todo el espacio (es decir, el campo de sonido puede ser considerado como homogéneo) y, si elegimos un punto cualquiera en el espacio, las ondas de sonido que llegan a este punto tendrán fase aleatoria, y habrá igual probabilidad que una onda de sonido llegue desde cualquier dirección. El campo difuso es un concepto, en la práctica, debe existir la disipación de la energía, por lo que puede haber flujo igual de energía en todas las direcciones, debe haber un flujo neto de energía desde una fuente de sonido hacia la parte(s) del espacio donde se absorbe el sonido.

En los campos difusos es común referirse a reflexiones difusas; esto significa que la relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de reflexión es aleatoria. Esto contrasta con la reflexión especular, donde el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Las paredes y los pisos que se encuentran comúnmente en los edificios (excluyendo espacios especialmente diseñados para el funcionamiento de la música tales como estudios o salas de conciertos) tienden a ser planos y lisos, por lo que se podría suponer que las reflexiones especulares son la norma, y que las reflexiones difusas son la excepción. Sin embargo, estas superficies suelen tener objetos colocados, tales como mesas, sillas, estanterías, archivadores y armarios; que pueden ocasionar que la onda incidente se disperse en direcciones no especulares. La reflexión no especular también ocurre cuando la impedancia acústica varía en la superficie; por ejemplo una pared donde la mayoría de la superficie es de hormigón pero con áreas de vidrio, puertas de madera, o armarios empotrados, cada uno de los cuales tiene diferentes impedancias. De ahí que normalmente habrá un grado de reflexión no especular: parte de la energía incidente es reflejada especularmente y parte es reflejada de forma difusa.

El campo difuso es un concepto muy útil. Permite realizar muchas simplificaciones al realizar la medición y la predicción de la absorción sonora, así como realizar otros cálculos acústicos de recintos. En estos cálculos se hace necesario el uso de la trayectoria libre media, que se definirá más adelante. Experimentalmente podemos crear aproximaciones cercanas a un campo difuso, en la zona central de un cuarto. Sin embargo, el campo de sonido no siempre tiene parecido a un campo difuso en todo el rango de frecuencia acústica del recinto. En el rango de baja frecuencia se aleja mucho, y esto se debe principalmente al hecho de que las ondas de sonido que llegan en un punto cualquiera provienen de un número limitado de direcciones. A rangos de frecuencias medias y altas, las ondas que llegan a un punto cualquiera tienden a venir de muchas direcciones diferentes. En la zona central de los un recinto típicos a menudo es razonable suponer que hay un campo difuso en rangos de frecuencia media y alta.

Sin embargo, no siempre es apropiado asumir que hay un campo difuso, sobre todo cuando: (a) existen cuartos de formas regulares sin elementos de difusión, (b) hay reflejos no difusos en las superficies del cuarto, y (c) hay distribución no uniforme de la absorción sobre las superficies del cuarto. Por las razones expuestas, es necesario tener en cuenta estas limitaciones en la aplicación de la teoría del campo difuso con el mundo real.

1.2. Trayectoria libre media para campo difuso

La trayectoria libre media propuesta por Carl [9], d_{mfp} , es la distancia media recorrida por una onda de sonido entre dos reflexiones difusas sucesivas en las superficies del cuarto. A partir de la relación, $c_o = \frac{d_{mfp}}{t}$, se puede calcular el tiempo, t , para recorrer esta distancia. Después de cada reflexión, una fracción de la energía del sonido se absorbe; por lo tanto la trayectoria libre media nos permite calcular la acumulación o el decaimiento de la energía del sonido en un recinto con el tiempo. Por lo tanto, será necesario determinarla para cuando se derive el tiempo de reverberación en los campos difusos, así como para el cálculo de la potencia incidente sobre las paredes o pisos en un recinto con un campo de sonido difuso. La siguiente derivación está tomada de Kosten [11] y se inicia mediante la derivación de la trayectoria libre media en un espacio de dos dimensiones antes de extenderlo a tres dimensiones. Este espacio de dos dimensiones tiene un área, S , y una longitud de perímetro, U . Un espacio bidimensional arbitrario puede definirse por una curva cerrada, como se muestra en la figura 1.1. Observe que aunque el espacio se define por las líneas curvadas se supone que todas las reflexiones son difusas. Las líneas discontinuas dentro de esta curva representan trayectorias libres en una sola dirección, donde cada trayectoria libre tiene una longitud, I .

La geometría proyectiva se utiliza para transformar puntos a lo largo del perímetro del espacio en un plano de proyección. Cada una de las trayectorias libres se encuentra perpendicular a un plano de proyección que define la longitud aparente de la superficie, L_a . Cuando el espacio se llena de manera uniforme con trayectorias libres, el área de superficie del espacio puede ser escrita en términos de la trayectoria libre de longitudes usadas, donde \bar{I} es la trayectoria libre media en una dirección.

$$S = \int_{L_a} I dL_a = L_a \bar{I} \quad (1.1)$$

El número de trayectorias en una sola dirección es proporcional a la longitud aparente, así que usar un número fijo de trayectorias por unidad de longitud de la proyección, y la contabilidad de todas las posibles direcciones N da la trayectoria libre media, d_{mfp} , como:

$$d_{mfp} = \frac{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N L_{a,n} \bar{I}_n}{\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N L_{a,n}} \quad (1.2)$$

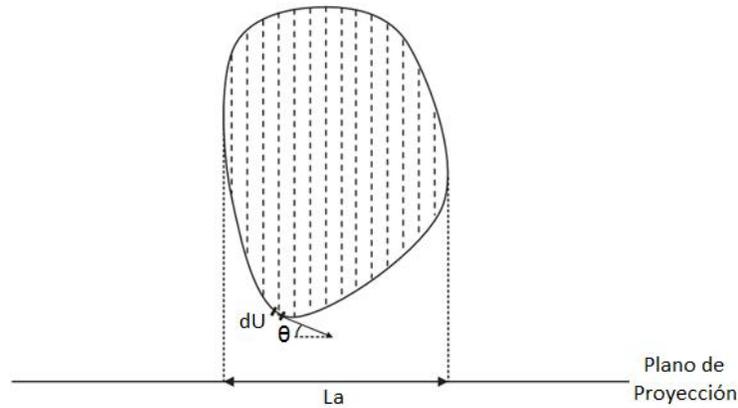


Figura 1.1. Espacio de dos dimensiones que muestra algunas de las trayectorias libres (líneas trazadas) en una sola dirección que se encuentran perpendiculares al plano de proyección. La longitud aparente, L_a , se calcula utilizando una integral de línea para resumir la proyección de la longitud del perímetro pequeño, dU , en el plano de proyección.

De la ecuación 1.1, $S = L_{a_n} \bar{I}_n$ en cada dirección, n , por lo que la ecuación 1.2 puede reescribirse como,

$$d_{mfp} = \frac{S}{L_a} \quad (1.3)$$

Donde \bar{L}_a es la longitud aparente promedio.

Para cualquier forma del recinto en la que todas sus superficies reflejen difusamente ondas sonoras, la trayectoria libre media de un espacio en tres dimensiones está dada por la siguiente ecuación:

$$d_{mfp} = \frac{4V}{S_T} \quad (1.4)$$

Donde S_T es el área total de las superficies de la sala y V es el volumen de la sala.

Es importante tener en cuenta que la ecuación 1.4 da el valor promedio; como en cualquier proceso aleatorio, habrá un diferencial de resultados. La trayectoria libre media se aplica a cualquier forma de recinto con superficies que reflejan de forma difusa. Sin embargo, la distribución estadística de la trayectoria libre media en cuartos con superficies de reflexión difusa, depende de la forma de la sala y de sus dimensiones, así como la presencia de la dispersión de objetos dentro del recinto propuesto por Kuttruff [12].

1.3. Tiempo de reverberación

Cuando una fuente de sonido en un recinto se apaga repentinamente, la energía del sonido permanece dentro del lugar y decae en cierto tiempo debido a los mecanismos de absorción que están presentes en el cuarto. A esta característica se le denomina tiempo de reverberación y se evalúa mediante el trazo de una curva de caída. Esta curva es un gráfico del nivel de presión de sonido en disminución en función del tiempo, a partir del momento en que se detiene la fuente de sonido, generalmente denotado como el tiempo $t = 0$.

El tiempo de reverberación, T , es el tiempo en segundos que tarda el nivel de presión sonora decaer 60 dB o, en términos de energía, que la energía del sonido decaiga a una millonésima parte de su valor inicial. Esta definición está bien adaptada para la curva de caída que se produce en un campo difuso; en este caso se obtiene un decaimiento en línea recta como se muestra en la figura 1.2. Algunas curvas de caída pueden aproximarse por una sola línea recta para todo el decaimiento de 60dB, pero hay otras que no siguen esta sencilla fórmula. Además, no siempre es posible medir un decaimiento de 60 dB debido a la presencia de ruido de fondo. Esta definición también se puede alcanzar para cuantificar el tiempo necesario para alcanzar el nivel de decaimiento de 60 dB mediante el uso de regresión lineal sobre un rango de decaimiento especificado (por ejemplo 30 dB) por lo que no es imprescindible utilizar el máximo decaimiento de 60dB. Por lo tanto, el tiempo de reverberación es más útil definido como el tiempo en segundos que puede ser requerido para que el nivel de presión sonora decaiga 60 dB cuando se utiliza la regresión lineal sobre una parte determinada de la curva de decaimiento. Como ahora podemos usar cualquier rango para la regresión lineal, tal como 10, 15, 20, o 30 dB, es necesario el uso de la notación, T_x , donde X identifica el rango de evaluación utilizado en la regresión lineal, es decir, T_{10} , T_{15} , T_{20} , T_{30} . Con curvas de decaimiento medidas, el punto de partida para la regresión lineal es generalmente 5 dB por debajo del nivel inicial, hasta el punto final en $X+5$ dB, que se estipula en las normas [3, 13] y veremos que 5 dB se utiliza como el punto de partida debido a que el procesamiento de la señal distorsiona la parte inicial de la curva de decaimiento.

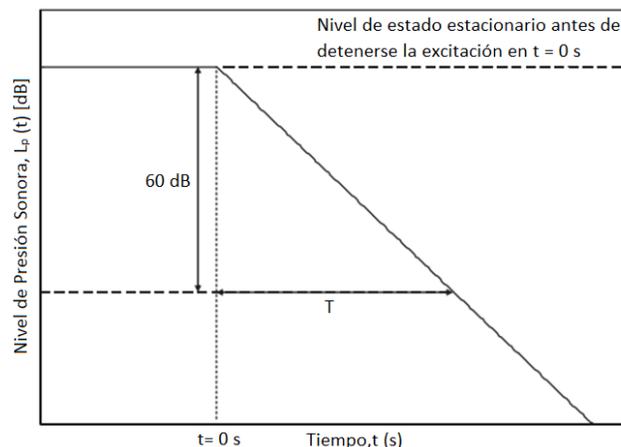


Figura 1.2. Curva de decaimiento ideal en línea recta que muestra la disminución en el nivel de presión de sonido con el tiempo, después que la fuente de excitación se ha apagado.

1.4. Teoría de modos

Comenzamos definiendo los modos de un recinto según Carl [9]. Para ello podemos seguir el recorrido de una onda plana a medida que viaja alrededor de un recinto con forma de caja. Para simplificar las cosas, se supone que todas las superficies del recinto son perfectamente reflejantes y rígidas. Por lo tanto las ondas incidentes y reflejadas tienen la misma magnitud y la presión del sonido se refleja desde la superficie sin ningún cambio de fase. Una pared rígida o suelo se define como aquel que no vibra cuando una onda sonora incide sobre ella; por lo tanto, la velocidad de partícula normal a la superficie es cero. En la práctica, paredes y suelos vibran porque este es el mecanismo que es responsable de la transmisión del sonido; Sin embargo, esta suposición evita tener que considerar el amplio rango de impedancias acústicas de superficie que están asociados con las superficies reales.

El camino que recorre una onda sonora que viaja por un recinto con forma de caja se puede ver en la figura 1.3. En algún momento en el tiempo llegará a uno de los límites del recinto, desde el cual se reflejará antes de continuar su viaje para reflejarse en otros límites del cuarto.

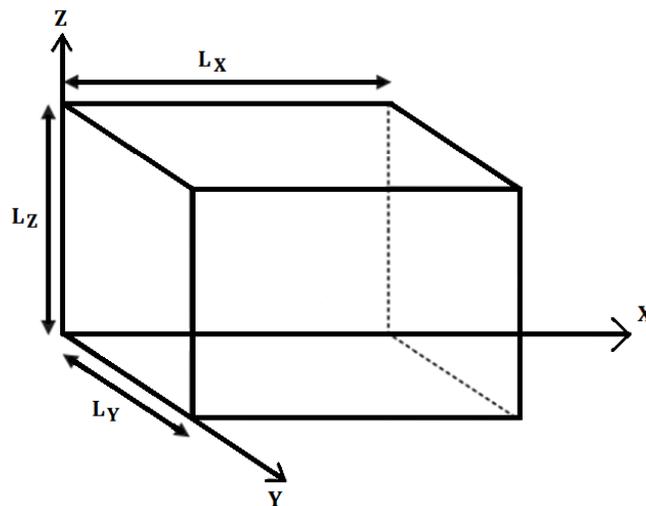


Figura 1.3. Recinto con forma de caja.

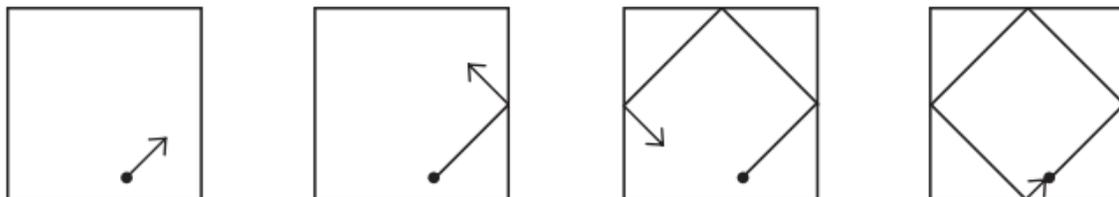


Figura 1.4. Modos de un recinto. Vista de planta de un recinto con forma de caja que muestra un posible camino recorrido por una onda plana. Un modo del recinto se produce cuando la onda viaja y llega al mismo punto de partida (•) viajando en exactamente en la misma dirección.

Estas reflexiones se supone que son especulares como ocurriría con paredes lisas y planas que tienen impedancia acústica de superficie uniforme sobre su superficie. También podemos seguir los viajes de las demás ondas de sonido que viajan en otras direcciones. Algunas de estas ondas regresarán al punto de partida que viajan exactamente en el mismo sentido que cuando partieron por primera vez. En algunos casos la longitud de su viaje, en términos de fase, corresponderá a un múltiplo entero de 2π tal que habrá continuidad de fase; nos referiremos a esto como cierre de fase. Cada viaje que vuelve al mismo punto de partida de viaje en la misma dirección, mientras que el logro de cierre de fase define un modo con una frecuencia específica (ver la figura 1.4).

El término "Modo local" se utiliza porque los modos son "locales" a un espacio que está definido por sus límites. Para esta definición se supone que no hay interacción entre las ondas de sonido en el recinto. Las paredes y los pisos, sólo se consideran como los límites que determinan la fracción de la energía de la onda que se refleja y el cambio de fase que se produce después de una reflexión. También se supone que no hay ninguna fuente de excitación de sonido asociada a estos modos, simplemente hemos seguido el viaje de una onda plana sin tener en cuenta la forma en que se generó. Por lo tanto es importante tener en cuenta que los modos locales de espacios son un concepto; no existen en realidad, en edificios reales, los espacios y estructuras se acoplan entre sí.

Aunque la definición de los modos locales se aleja ligeramente de la realidad, el concepto es muy útil en el estudio de determinadas características de los campos de sonido. Los modos locales se conocen como modos naturales o también ondas estacionarias puras; que son una propiedad del espacio, en lugar de una función combinada del espacio y la excitación. Esta última se conoce como resonancia.

Para el cálculo de las frecuencias de los modos del recinto en este recinto en forma de caja, es necesario calcular los números de onda. De ahí que nos referimos a las ondas planas y la ecuación de onda, donde la relación entre el número de onda y las constantes, k_x , k_y , k_z está dada por la ecuación $k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$. Estas constantes se calculan utilizando la ecuación de la presión sonora de una onda plana que debe satisfacer tanto la ecuación de onda $\left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0\right)$, como las condiciones de frontera. Para un recinto en forma de caja con dimensiones L_x , L_y , y L_z , se requieren las siguientes condiciones de frontera para asegurarse de que la velocidad de partícula normal a las superficies del recinto rígido es cero.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \text{ en } x = 0 \text{ y } x = L_x \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \text{ en } y = 0 \text{ y } y = L_y \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \text{ en } z = 0 \text{ y } z = L_z$$

Al tomar la parte real de la ecuación que describe la presión de sonido para una onda plana y haciendo caso omiso de dependencia con el tiempo tenemos la siguiente solución

$$p(x, y, z, t) = \hat{p} \exp(-ik_x x) \exp(-ik_y y) \exp(-ik_z z) \exp(i\omega t)$$

$$p(x, y, z) = \hat{p} \cos(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z)$$

Cada combinación de valores para p, q, y r describe un modo del recinto para que el número de onda, $K_{p,q,r}$, (también llamado un valor propio).

$$K_{p,q,r} = \pi \sqrt{\left(\frac{p}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{r}{L_z}\right)^2} \quad (1.5)$$

Por lo tanto la frecuencia del modo, $f_{p,q,r}$, (también llamada una frecuencia propia) es, donde p, q, y r tienen valores cero ó enteros positivos.

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \frac{C_o}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (1.6)$$

En un recinto con forma de caja, hay tres tipos diferentes de modo: modos axiales, tangenciales y oblicuos.

Los modos axiales describen la propagación de la onda cuando es paralela al eje x, y o z. Tienen un valor distinto de cero para uno de los tres índices y valores cero para las otras dos índices (por ejemplo, $f_{(1,0,0)}$, $f_{(0,3,0)}$, $f_{(0,0,2)}$), la figura 1.5 muestra el modo $f_{(1,0,0)}$.

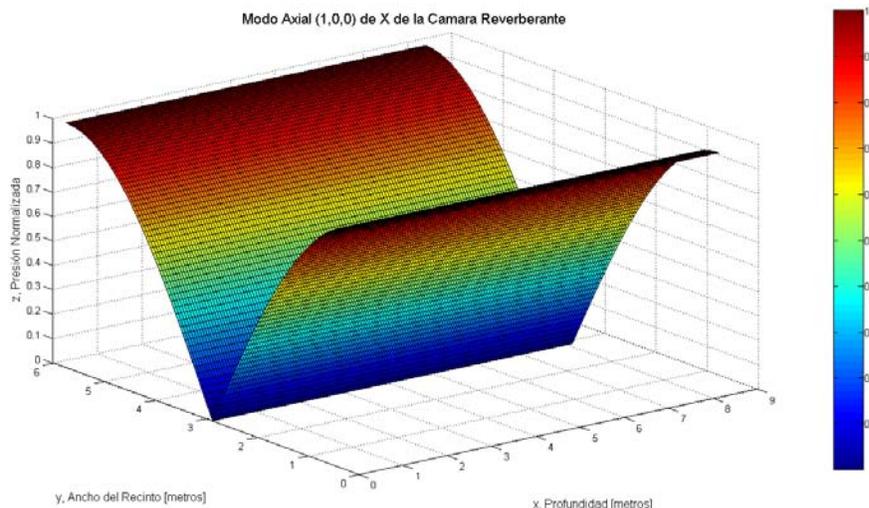


Figura 1.5. Modo axial (1,0,0) calculado de la Cámara Reverberante de LAV-CCADET

Los modos tangenciales pueden ser descritos mediante la definición de un "par de superficies", es decir como dos superficies que se encuentran una frente a otra, donde cada par de superficies define parcialmente el recinto en forma de caja. Por lo tanto, los modos tangenciales describen la propagación de ondas en un ángulo que es oblicuo a dos pares de superficies, y es tangencial a la otra pareja de superficies. Ellos tienen valores distintos de cero para dos de los índices y un valor de cero para el restante índice (por ejemplo, $f_{(1,2,0)}$, $f_{(3,0,1)}$, $f_{(0,2,2)}$), la figura 1.6 muestra el modo $f_{(1,2,0)}$.

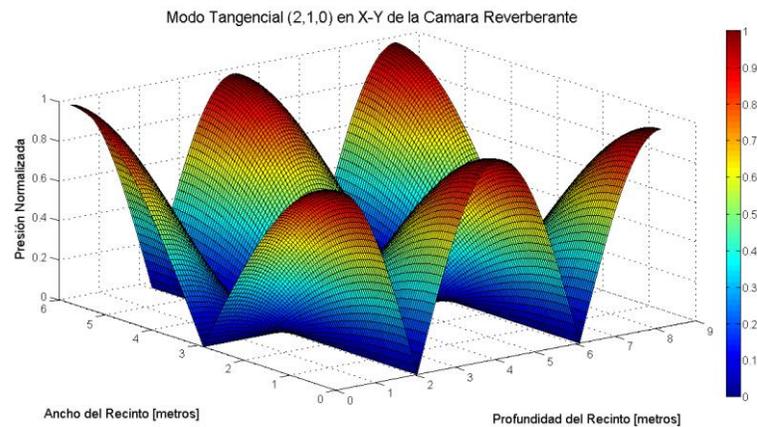


Figura 1.6. Modo tangencial (1,2,0) calculado de la Cámara Reverberante de LAV-CCADET

Los modos oblicuos describen la situación en la que se produce la propagación de ondas en un ángulo que es oblicuo con respecto a todas las superficies; por lo tanto, que tienen valores distintos de cero para los tres índices (por ejemplo, $f_{(2,3,1)}$) y la figura 1.7 muestra el modo $f_{(1,1,1)}$.

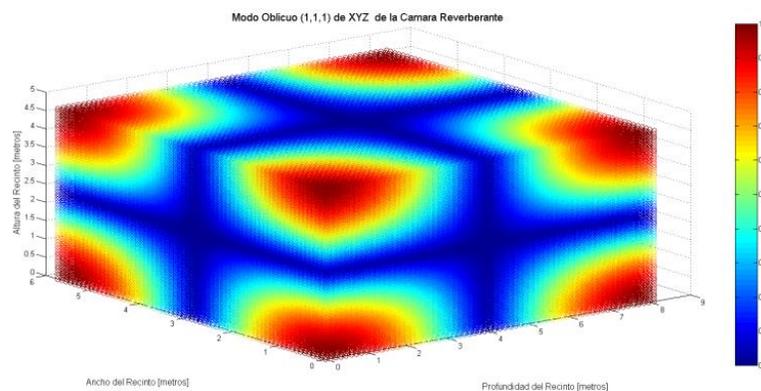


Figura 1.7. Modo oblicuo (1,1,1) calculado de la Cámara Reverberante de LAV-CCADET

Hemos asumido que todas las superficies del recinto son perfectamente reflectantes y rígidas, en la práctica existe una interacción entre la presión de sonido en el recinto y la vibración de las paredes y pisos frente a ese cuarto. Sin embargo, el supuesto de paredes rígidas y suelos es razonable en muchos cuartos, ya que esta interacción se traduce en cambios relativamente menores de las frecuencias propias.

1.5. Trayectoria libre media entre reflexiones por tipo de modo

A continuación se determinara la trayectoria libre media [7], considerando los tres tipos de modos mencionados anteriormente.

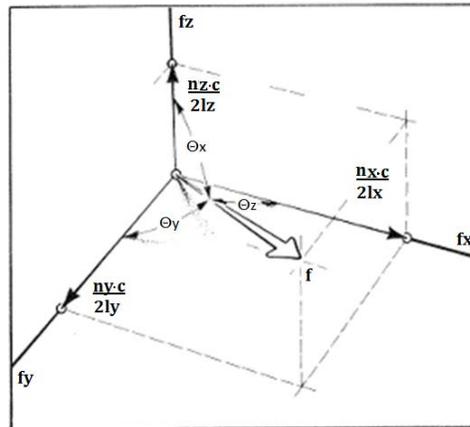


Figura 1.8. Vector de frecuencia f en sistema de coordenadas rectilíneas en 3 dimensiones

Cada modo propio en un recinto rectangular puede ser considerado como un vector de frecuencia f en un sistema de coordenadas en 3 dimensiones (ver figura 1.8) cuyo origen es una de las esquinas del recinto.

$$\ell = \frac{\sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}}{\frac{n_x}{l_x^2} + \frac{n_y}{l_y^2} + \frac{n_z}{l_z^2}} \quad (1.7)$$

La fórmula (1.7) calcula la trayectoria libre media y es válida para los modos axiales, tangenciales y oblicuos.

1.6. Presión de sonido en estado estacionario en una banda de frecuencia

Una fuente de sonido mono polar emitiendo ruido blanco con una densidad espectral de velocidad de volumen q [$m^3/s/\sqrt{Hz}$], está rotando en el recinto según Larsen [7]. La presión de sonido se mide mediante un micrófono rotante lejos de la fuente. Para calcular la presión de sonido, en estado estacionario, se utiliza la siguiente ecuación

$$p_{io}^2 = \frac{c^4 q^2 \rho^2 \pi T_i}{V^2 (\varepsilon_{xi} \varepsilon_{yi} \varepsilon_{zi})^2 \cdot 12 \cdot \ln 10} \left[\frac{N^2}{m^4} \right] \quad (1.8)$$

Dónde:

q es la densidad espectral de la velocidad de volumen $[m^3/s/\sqrt{Hz}]$

ρ es la densidad del aire $[\frac{Kg}{m^3}]$

V es el volumen del recinto $[m^3]$

T_i es el tiempo de reverberación para los i -ésimo modos propios $[s]$

ε_{xi} , ε_{yi} y ε_{zi} son los valores en función de los números enteros para n_x , n_y y n_z

$\varepsilon = 1$ para $n = 0$

$\varepsilon = 2$ para $n > 0$

Ecuación 1.8 puede ser escrita como

$$p_{io}^2 = C_1 \frac{T_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2} \quad (1.9)$$

Dónde:

$$C_1 = \frac{c^4 q^2 \rho^2 \pi}{V^2 12 \ln 10} \quad \text{es una constante}$$

Si hay I número de modos propios en la banda de frecuencias considerada, la RMS total de la presión sonora al cuadrado (promediado en el tiempo y espacio) en la banda de frecuencias se dará por:

$$p_{BO}^2 = p_{10}^2 + p_{20}^2 + \dots + p_{i0}^2 \quad (1.10)$$

Donde 0 representa los valores de estado estacionario y p_{10} , p_{20} , ... p_{i0} son las presiones de sonido para los I modos propios.

Sustituyendo (1.9) en (1.10) obtenemos

$$p_{BO}^2 = C_1 \frac{T_1}{(\varepsilon_{x1}\varepsilon_{y1}\varepsilon_{z1})^2} + C_1 \frac{T_2}{(\varepsilon_{x2}\varepsilon_{y2}\varepsilon_{z2})^2} + \dots$$

Es decir,

$$p_{BO}^2 = C_1 \sum_{i=1}^I \frac{T_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2} \quad (1.11)$$

Dividiendo (1.9) por (1.11) obtenemos

$$\left(\frac{p_{io}}{p_{BO}} \right)^2 = \frac{\frac{T_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2}}{\sum_{i=1}^I \frac{T_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2}} \quad (1.12a)$$

Como el tiempo de reverberación es proporcional a la trayectoria libre media ℓ_i , la ecuación de arriba puede también ser escrita como:

$$\left(\frac{p_{i0}}{p_{BO}}\right)^2 = \frac{\ell_i}{\sum_{i=1}^I \frac{\ell_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2}} \quad (1.12b)$$

Se puede observar que el estado estacionario de la presión de sonido al cuadrado para los modos propios individuales son proporcionales a su tiempo de reverberación o su trayectoria libre media.

1.7. Calculo del tiempo de reverberación por modo

Cuando la fuente de sonido que excita el recinto, es detenida, la densidad de energía en cada modo propio se reducirá de acuerdo con la fórmula

$$D(t) = D_o(1 - \alpha)^a$$

$$\text{o } p_i^2 = p_{i0}^2(1 - \alpha)^a$$

Donde: D_o es la densidad de energía en estado estacionario cuando $t = 0$
 $D(t)$ es la densidad de energía instantaneo
 p_{i0} es la presión de sonido en estado estacionario cuando $t = 0$
 p_i es la presión de sonido instataneo
 a es el número de reflexiones en tiempo t
 α es el coeficiente de absorción de las paredes

$$a = \frac{c}{\ell_i} t$$

Donde: c es la velocidad del sonido y ℓ_i es la trayectoria libre media para los i-esimo modos propios.

$$T_i = \frac{6\ell_i \ln 10}{c \ln\left(\frac{1}{1-\alpha}\right)} \approx \frac{6\ell_i \ln 10}{c \cdot \alpha} \quad (1.13)$$

Dónde: T_i es el tiempo de reverberación i-esimo, para valores pequeños de α .

El tiempo de reverberación [Larsen,7] puede ser visto que es proporcional a la trayectoria libre media e inversamente proporcional al coeficiente de absorción α .

El tiempo de reverberación colectivo de toda la banda de frecuencia puede ahora ser evaluado. La presión de sonido instantaneo al cuadrado de la banda de frecuencia esta dada por:

$$p_B^2 = C_1 \frac{T_1}{(\varepsilon_{x1}\varepsilon_{y1}\varepsilon_{z1})^2} 10^{-6 \frac{t}{T_1}} + \dots + C_l \frac{T_l}{(\varepsilon_{xl}\varepsilon_{yl}\varepsilon_{zl})^2} 10^{-6 \frac{t}{T_l}} \quad (1.14)$$

Dividiendo la ecuación de arriba por (1.11) da:

$$\left(\frac{p_B}{p_{B0}} \right)^2 = \frac{\sum_{i=1}^l \frac{T_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2} 10^{-6 \frac{t}{T_i}}}{\sum_{i=1}^l \frac{T_i}{(\varepsilon_{xi}\varepsilon_{yi}\varepsilon_{zi})^2}} \quad (1.15)$$

La ecuación anterior predice el decaimiento de la presión de sonido de una banda de frecuencia con **I** números de modos propios y su respectivo tiempo de reverberación.

1.8 Métodos de medición del tiempo de reverberación

El método principal que se utilizarán para determinar el tiempo de reverberación en recintos: el método del ruido interrumpido, y el método de respuesta de impulso integrado según la norma [13].

1.8.1. Método del ruido interrumpido

El método del ruido interrumpido según Carl [9] utiliza ruido aleatorio para crear un nivel constante en estado estacionario. Después de haber alcanzado un estado de equilibrio, la excitación se detiene y el decaimiento del nivel de presión sonora se graba. Un ejemplo de la curva de decaimiento obtenida se muestra en la figura 1.9. En comparación con la curva de decaimiento ideal la curva no es suave; se caracteriza por fluctuaciones aleatorias debido a la naturaleza aleatoria de la señal de excitación. A medida que el nivel de la señal de decaimiento se acerca al nivel de ruido de fondo, la pendiente de la curva de decaimiento se ve alterada por el ruido de fondo y ya no es representativa de la pendiente de decaimiento real. Cuando esto ocurre dentro del rango de evaluación, impide la determinación exacta del tiempo de reverberación.

Cualquier efecto significativo sobre tiempo de reverberación debido a ruido de fondo se puede evitar mediante el uso de un nivel de estado estacionario que es al menos 15 dB por encima del ruido de fondo, preferiblemente más, porque el ruido de fondo puede ser más fluctuante. Por ejemplo, el nivel de estado estacionario debe ser de al menos 45 dB por encima del ruido de fondo para tener un tiempo de reverberación con 30 dB de caída porque hay que tener en cuenta que el punto de partida para el rango de evaluación es 5 dB por debajo del nivel de estado estacionario, y por lo tanto el punto final será de al menos 10 dB por encima del nivel de ruido de fondo.

Si la medición de una curva de decaimiento se repite usando exactamente el mismo micrófono y la misma posición del altavoz de excitación, entonces cada vez que se detiene la excitación, todos los modos tendrán las fases y amplitudes aleatorias. La interacción entre los modos por lo tanto variará con cada medición, lo que se traducirá en diferentes curvas de decaimiento. Por esta razón, una sola curva de decaimiento medido con ruido interrumpido no es especialmente útil. Por lo tanto, tenemos que tomar más de una medición en cada posición para calcular un valor promedio. Este promedio puede calcularse de dos formas; podemos ya sea obtener el promedio aritmético de los tiempos de reverberación de cada curva o bien obtener el promedio del conjunto de las curvas de decaimiento. Ambos procedimientos son aceptables, pero el último es preferible porque da lugar a curvas de decaimiento más suaves. Una curva suave es beneficiosa para determinar el tiempo de reverberación, porque a fin de llevar a cabo una regresión lineal sobre un rango de X dB es necesario para identificar claramente el punto de partida y el punto final que definen el rango de evaluación.

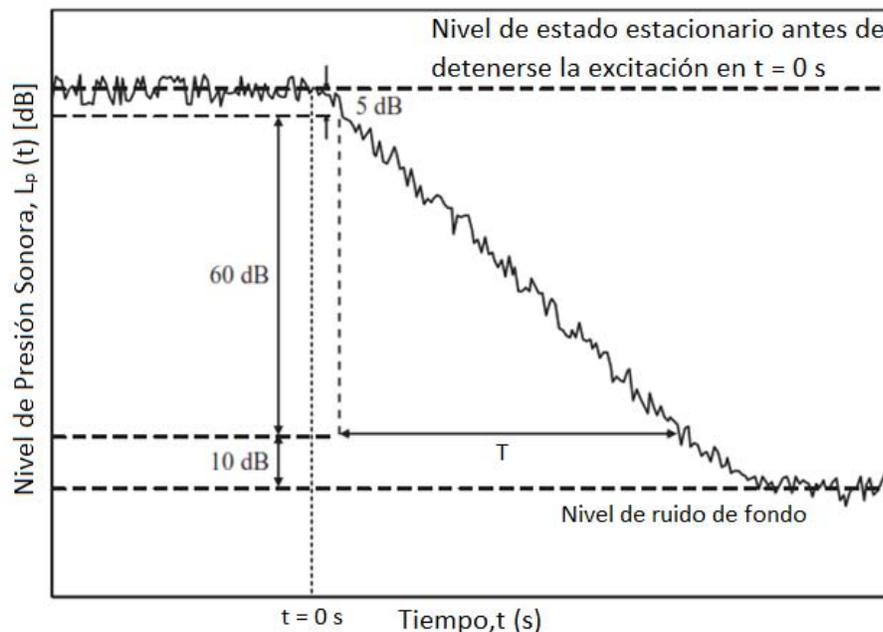


Figura 1.9. Ejemplo de una curva de decaimiento medida usando el método de ruido interrumpido

Si hay grandes fluctuaciones aleatorias puede ser difícil identificar el punto de partida que es 5 dB por debajo del nivel inicial y el punto final que está en X+5 dB por debajo del nivel inicial. El ensamble (conjunto) promedio de las curvas de decaimiento también es preferible debido a que el promedio de un ensamble de un número infinito de curvas proporciona la misma curva de decaimiento obtenida mediante la respuesta de impulso integrado, para ese mismo punto en el recinto según Schroeder [14].

Un número infinito de mediciones está claramente fuera de alcance, pero al promediar varias curvas de decaimiento se obtiene una curva de decaimiento mucho más suave. Para hacer esto se requiere que cada curva de decaimiento individual, $L_p(t)$, se sincronice justo en el momento cuando se detiene la excitación. Entonces se puede calcular, a partir de las N curvas de decaimiento individuales, el promedio del ensamble $L_{p,av}(t)$, de las curva de decaimiento utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{p,av}(t) = 10 \log \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10 \frac{L_{p,n}(t)}{10} \right) \quad (1.16)$$

Para determinar el tiempo de reverberación promedio espacial de las diferentes posiciones de la fuente y el receptor, es aceptable promediar aritméticamente los tiempos de reverberación, o promediar el ensamble de las curvas de decaimiento.

1.8.2. Método utilizando señales sinusoidales con barrido de frecuencias

1.8.2.1 Señales y sistemas

La función delta [Kuttruff, 10] tiene la siguiente propiedad fundamental:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \delta(t - \tau) d\tau \quad (1.17)$$

Donde $s(t)$ es cualquier función del tiempo. En consecuencia, cualquier señal puede considerarse como una estrecha sucesión de pulsos muy cortos, como se muestra en la figura 1.10. Especialmente, para $s(t) \equiv 1$ obtenemos:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(\tau) d\tau = 1 \quad (1.18)$$

Dado que la función delta $\delta(t)$ es cero para todo $t \neq 0$ se deduce de la ecuación (1.18) que su valor en $t=0$ debe ser infinito. Consideremos ahora un sistema de transmisión no especificado lineal e independiente del tiempo. Ejemplos de sistemas de transmisión acústicos son todos los tipo de conductos (conductos de aire, silenciadores, instrumentos de viento, etc.) y resonadores. Del mismo modo, cualquiera de los dos puntos en un recinto puede considerarse como la terminal de entrada o de salida de un sistema de transmisión acústica. La linealidad significa que multiplicar la señal de entrada por un factor da como resultado una señal de salida que se ve aumentada por el mismo factor. Las propiedades de un sistema de este tipo están completamente caracterizados por la llamada respuesta al impulso $g(t)$, es decir, la señal de salida que es la respuesta a una señal de entrada impulsiva representada por la función de Dirac $\delta(t)$ figura 1.11. Puesto que la respuesta no puede preceder a la excitación, la respuesta impulsiva de cualquier sistema causal debe desaparecer para $t < 0$. Si $g(t)$ es conocida, la señal de salida $s'(t)$ con respecto a cualquier señal de entrada $s(t)$ se puede obtener mediante la sustitución de la función de Dirac en la ecuación (1.17), con su respuesta.

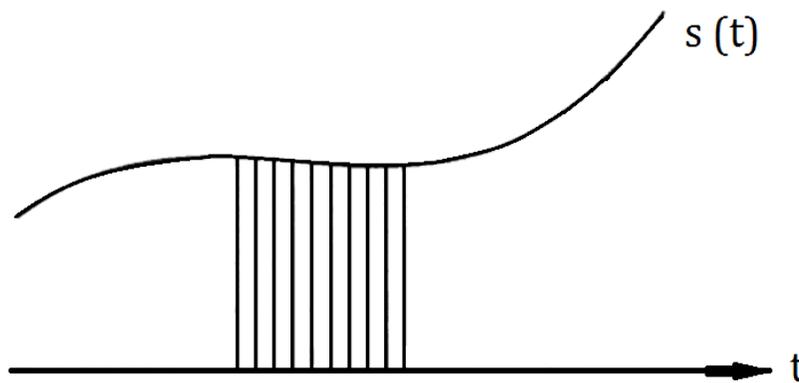


Figura 1.10 Función continua como el caso límite de una sucesión de impulsos cortos.

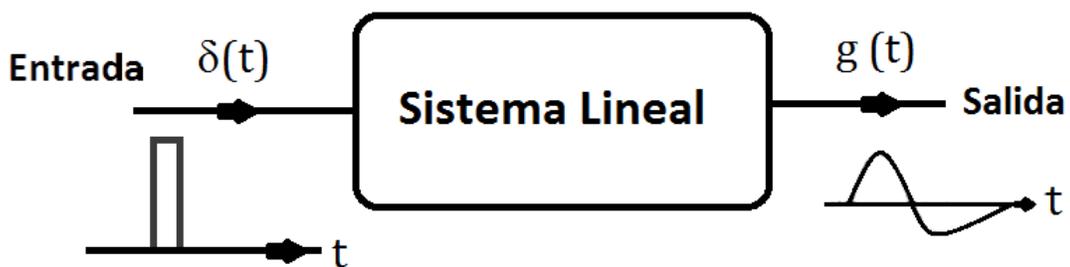


Figura 1.11 Respuesta impulso de un sistema lineal

1.8.2.2 Medición de la respuesta de impulso

De acuerdo con la teoría de sistemas, [Kuttruff, 10] todas las propiedades de un sistema de transmisión lineal están contenidas en su respuesta al impulso o, alternativamente, en su función de transferencia, que es la transformada de Fourier de la respuesta al impulso. Incluso un recinto puede ser considerado como un sistema de transmisión acústica, la respuesta de impulso produce una descripción completa de los cambios de una señal de sonido que ocurren cuando se viaja desde un punto a otro de un recinto. A partir de estas observaciones, es evidente que la determinación de respuestas de impulso es una de las tareas más fundamentales de la acústica experimental de recintos. Se requieren altos estándares de calidad para todos los componentes de medición, que deben estar libres de las distorsiones lineales o no lineales, incluyendo los cambios de fase. Por su propia definición, la respuesta de impulso de un sistema es la señal obtenida en la salida del sistema después de su excitación por un infinitamente corto impulso, es decir, por un impulso delta.

Dado que estamos interesados sólo en frecuencias por debajo de, por ejemplo, 10 kHz, esta señal puede aproximarse por un corto impulso de forma arbitraria, cuya duración sea menor que aproximadamente 20 μ s. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que todos los altavoces tienen, por lo menos, distorsiones lineales.

En la práctica, sin embargo, las respuestas de impulso de una sala medidas con este esquema sencillo está más o menos afectada por el ruido de fondo omnipresente: por ejemplo, el ruido del tráfico intruso en el recinto desde el exterior, o por el ruido de los equipos electrodomésticos, etc. Una manera de superar esta dificultad es mediante la repetición de las mediciones varias o muchas veces y promediar los resultados. Si N es el número de mediciones, la energía total de las respuestas de impulso recogidas crece en proporción a N^2 , mientras que la energía del ruido resultante sólo crece proporcionalmente a N . Por lo tanto la relación señal a ruido, expresada en decibeles, se incrementa en $10 \cdot \log_{10} N$ decibeles.

Un método que consume menos tiempo es emplear señales de prueba que se estiran en el tiempo y que, por lo tanto inyectan más energía que un impulso corto. Supongamos que el sistema bajo prueba, es decir, el recinto, es excitado por una señal arbitraria $s(t)$. La respuesta de impulso se puede recuperar de la señal de salida mediante la aplicación de la “deconvolución”.

Existe otra clase de señales de excitación que está particularmente bien adaptado para la adquisición de la respuesta de impulso del recinto. Estas son las señales de barrido sinusoidal, es decir, las señales con una variación continua de frecuencia. El ejemplo más simple de tales señales es el barrido sinusoidal lineal.

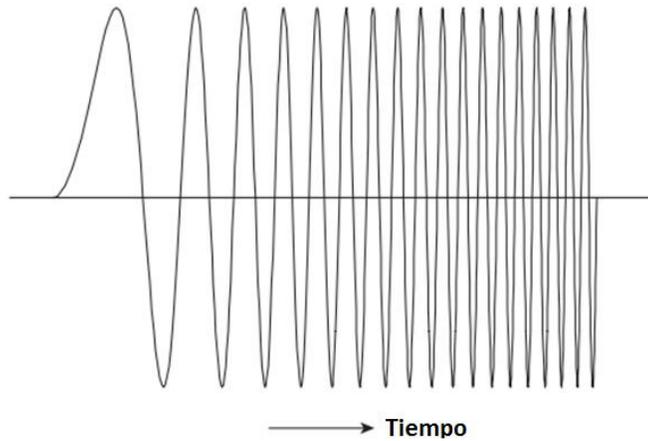


Figura 1.12 Señal de barrido senoidal lineal

$$s(t) = A \operatorname{sen}(bt^2) \quad (1.19)$$

En la figura 1.12 se puede ver, que la frecuencia instantánea

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d(bt^2)}{dt} = \frac{1}{\pi} bt \quad (1.20)$$

Es obvio que el espectro de frecuencia de esta señal $s(t)$ tiene valor absoluto constante. Por lo tanto la respuesta impulsiva del recinto puede ser recuperada inmediatamente por "filtrado adaptado" de acuerdo a la ecuación $g(t) = s'(t) * s(-t)$, es decir, mediante la aplicación de la señal de salida del micrófono a un filtro con la respuesta impulsiva $s(-t)$. Es fácil ver cómo funciona el filtrado adaptado: los últimos componentes espectrales recibidos se procesan primero y viceversa. Sin embargo, es más práctico realizar esta operación, en el dominio de la frecuencia para reducir costo computacional, mostrado en la figura 1.13.

Además, la duración del barrido sinusoidal debe limitarse, por ejemplo, mediante la definición de las frecuencias de inicio y f_{in} , f_1 y f_2 , respectivamente. Entonces la constante b se puede determinar a partir de estas frecuencias y la duración t_s del barrido:

$$b = \pi \frac{f_2 - f_1}{t_s} \quad (1.21)$$

Truncar el barrido sinusoidal a frecuencias finitas introduce alguna ondulación en los extremos del espectro de amplitud que puede ser minimizado mediante el establecimiento de una suave conexión y desconexión en las frecuencias f_1 y f_2 . La constante b debe elegirse lo suficientemente pequeña para hacer la duración t_s del barrido suficientemente larga.

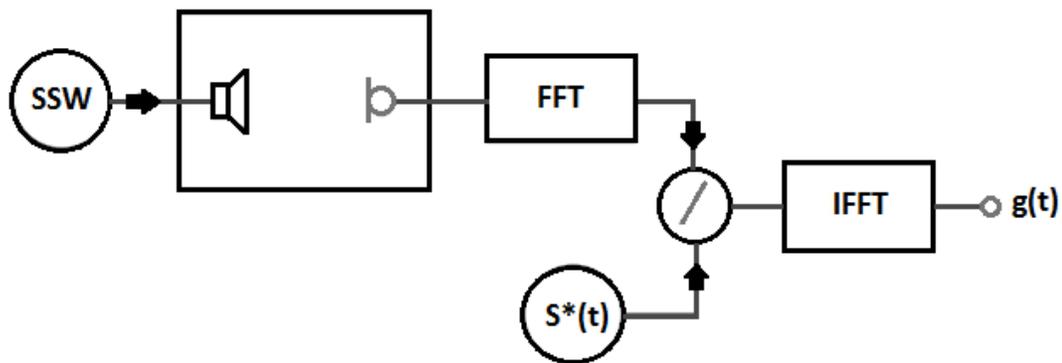


Figura 1.13 Medición de las respuestas de impulso del recinto con señales de barrido sinusoidal. (SSW señal de barrido senoidal con espectro $S(f)$)

Además del barrido sinusoidal lineal representado por la ecuación (1.19), el barrido sinusoidal logarítmico también se puede utilizar:

$$s(t) = A \sin[\exp(bt)] \quad (1.22)$$

Con la frecuencia instantánea

$$f(t) = b \cdot \exp(bt) \quad (1.23)$$

Su espectro de potencia no es constante pero se reduce proporcionalmente a $1/f$, correspondiente a 3 dB por octava. Uno de los aspectos de esta señal es que le da más énfasis a la gama de baja frecuencia. Por supuesto, la influencia de este espectro debe ser eliminada, por ejemplo mediante pre-énfasis. En cualquier caso, la duración del barrido debe ser un poco más larga que el de la respuesta impulsiva a medir.

Comparaciones cuidadosas de los diversos métodos de medición de la respuesta impulsiva de un recinto han sido publicados por Müller y Massarani [15] y por Stan [25]. Parece que los barridos senoidales como señales de excitación son más ventajosos debido a la alta relación señal a ruido alcanzable y la posibilidad de eliminar todos los productos de distorsión. Los tiempos de procesamiento largos no son ya motivo de preocupación debido a potentes procesadores digitales actuales. Sin embargo, cuando se trata de mediciones en recintos que aún se ocupen, o en otros ambientes ruidosos, las secuencias de máxima longitud (MLS) todavía pueden ser superiores a las técnicas de barrido.

1.8.3. El método de respuesta del impulso integrado

Cuando un sistema acústico se excita con una función delta de Dirac la respuesta resultante es la respuesta al impulso de ese sistema [Carl, 9], $h(t)$. Un sistema acústico se define de tal manera que incluye el espacio sometido a prueba, así como la cadena del equipo de medición. En la práctica, $h(t)$ es la señal recibida por el analizador desde un micrófono colocado en un recinto. Para un sistema acústico lineal, la respuesta de impulso describe completamente ese sistema.

El método de respuesta de impulso integrado implica la generación de un impulso, y la grabación o el muestreo de la respuesta de un sistema acústico de este impulso. Debido a su infinita altura y anchura infinitamente estrecha, no es posible crear una función delta de Dirac en la práctica. Sin embargo, es posible crear un impulso de duración suficientemente corta que puede representar la función delta de Dirac. En recintos un impulso se puede generar con un disparo de una pistola de salva, haciendo explotar un globo, con palmadas, o ráfagas de ruido a través de un altavoz. Aunque estas fuentes de impulso se han utilizado en los recintos por muchos años, no todas son omnidireccionales ni son capaces de generar un espectro plano a un nivel suficientemente alto, evitando altos factores de cresta (relación entre valor pico y valor RMS). Todos estos problemas pueden ser evitados, cuando el sistema a ser medido es lineal e invariante en el tiempo (LTI). En este caso, la respuesta al impulso se puede medir con señales de barrido sinusoidal [Müller y Massarani, 15] o una señal que se define como una secuencia de longitud máxima (MLS).

El método de respuesta de impulso integrado se introdujo por Schroeder [14] e implica el procesamiento de señales de una respuesta de impulso utilizando la integración inversa en tiempo. El uso de este método proporciona la misma curva de decaimiento que se determinaría promediando un número infinito de curvas de decaimiento a partir de mediciones utilizando el método del ruido interrumpido. El resultado es una curva de decaimiento que realmente representa las características del sistema acústico. Además, proporciona en una única medición, una curva de decaimiento sin fluctuaciones aleatorias, lo que aumenta la exactitud de los cálculos del tiempo de reverberación. Recordemos que para las mediciones con ruido interrumpido, es necesario tomar más de una medición en cada posición del receptor para reducir el efecto de las variaciones aleatorias.

Desde [14], la comprobación del método de respuesta de impulso integrado se fundamenta en mediciones de ruido interrumpido realizadas con ruido blanco como señal de entrada, $x(t)$. Supongamos que la señal de entrada se conecta en algún momento con el pasado, representado por el tiempo $t=-\infty$, y que el sistema acústico alcanza un estado estacionario antes de $t=0$. La señal de entrada se interrumpe en el instante $t=0$ con el fin de realizar la medición. El sistema acústico bajo prueba tiene una respuesta de impulso, $h(t)$, por lo tanto, la señal de salida, $y(t)$, donde u es una variable de tiempo simulado, y la posición del receptor está dada por la integral de convolución.

$$y(t) = \int_{-\infty}^0 h(t-u)x(u)du \quad (1.24)$$

Sustitución de (t-u) por una variable, w, da:

$$y(t) = \int_t^{\infty} h(w)x(t-w)dw \quad (1.25)$$

Debido a la naturaleza aleatoria del ruido blanco, es necesario promediar todas las posibles señales de entrada (promedio del ensamble) para encontrar el valor esperado del cuadrado de la señal de salida:

$$E[y^2(t)] = \int_t^{\infty} \int_t^{\infty} h(t_1)h(t_2)E[x(t-t_1)x(t-t_2)]dt_1dt_2 \quad (1.26)$$

$E[x(t-t_1)x(t-t_2)]$ es el valor esperado del producto de la señal consigo misma en otro momento del tiempo; esto es igual a la función de auto-correlación. Por lo tanto, la sustitución de la función de auto-correlación de ruido blanco, da:

$$E[y^2(t)] = N \int_t^{\infty} h^2(w)dw \quad (1.27)$$

Donde N es la densidad espectral de potencia.

La ecuación 1.27 muestra que la respuesta de impulso al cuadrado, adquirida mediante una sola medición puede integrarse para dar el valor esperado del decaimiento al cuadrado, $E[Y_2(t)]$ de un gran número de mediciones de ruido interrumpido.

La aplicación práctica de la ecuación 1.27 involucra la grabación de la respuesta al impulso, y luego reproducirla al revés en un analizador, donde se eleva al cuadrado la señal y luego se integra. La dirección de análisis de la señal es desde el extremo del decaimiento al comienzo del decaimiento; por lo tanto, este proceso se conoce como integración en tiempo inverso o integración al revés. Efectivamente, la integración comienza en el extremo final de la señal cuadrada. Desde este punto de partida, cada muestra de la señal de decaimiento se sustituye por la suma de la presión sonora cuadrática media de la muestra y la presión sonora cuadrática media sumada de todas las muestras anteriores, de nuevo al punto de partida. Esto da lugar a una nueva curva de decaimiento de nivel en función del tiempo, la respuesta logarítmica de impulso integrado. Para una curva de decaimiento normalizada a la energía total de la respuesta al impulso, el proceso de integración en tiempo inversa da la respuesta de impulso integrado logarítmica como

$$L_p(t) = 10 \log \left(\frac{\int_t^\infty h^2(w) dw}{\int_0^\infty h^2(w) dw} \right) = 10 \log \left(\frac{\int_\infty^t h^2(w) d(-w)}{\int_0^\infty h^2(w) dw} \right) \quad (1.28)$$

En la práctica, el extremo final de cualquier señal de decaimiento está oculto debajo del ruido de fondo. Por lo tanto, como la integración en tiempo inverso no se puede iniciar en realidad en $t=\infty$, es necesario encontrar un punto de partida que proporcione una curva de decaimiento que no se altere significativamente por la presencia de ruido de fondo [16,17 y 18]. El efecto de diferentes puntos de partida en la respuesta de impulso integrada se puede calcular utilizando una respuesta de impulso idealizada. Una respuesta de impulso al cuadrado idealizada con un decaimiento exponencial definido por el tiempo de reverberación está dada por:

$$h^2(t) = \exp\left(\frac{-6t \ln 10}{T}\right) \quad (1.29)$$

Se asume que durante la medición de impulso hay ruido de fondo constante con una presión promedio al cuadrado, p_{ruido}^2 . Como ejemplo, si tenemos un nivel de ruido de fondo de 40 dB por debajo del nivel en $t=0$, entonces $p_{\text{ruido}}^2 = 10^{\frac{-40}{10}}$.

La señal medida se compone de la respuesta de impulso idealizada combinado con el ruido de fondo. Por lo tanto en la ecuación 1.28 tenemos que reemplazar $h_2(w)$ con $h_2(w) + p_{\text{ruido}}^2$, y sustituir el límite de integración, ∞ , con t_{max} . Para la respuesta de impulso idealizada esto da la respuesta de impulso integrado logarítmica como:

$$L_p(t) = \left\{ \begin{array}{l} 10 \log \left(\frac{10^{-6t/T} - 10^{-6t_{\text{max}}/T} + \frac{6p_{\text{ruido}}^2 \ln 10}{T} (t_{\text{max}} - t)}{1 - 10^{-6t_{\text{max}}/T} + \frac{6p_{\text{ruido}}^2 t_{\text{max}} \ln 10}{T}} \right) \text{ para } 0 \leq t \leq t_{\text{max}} \\ -\infty \text{ dB para } t \geq t_{\text{max}} \end{array} \right. \quad (1.30)$$

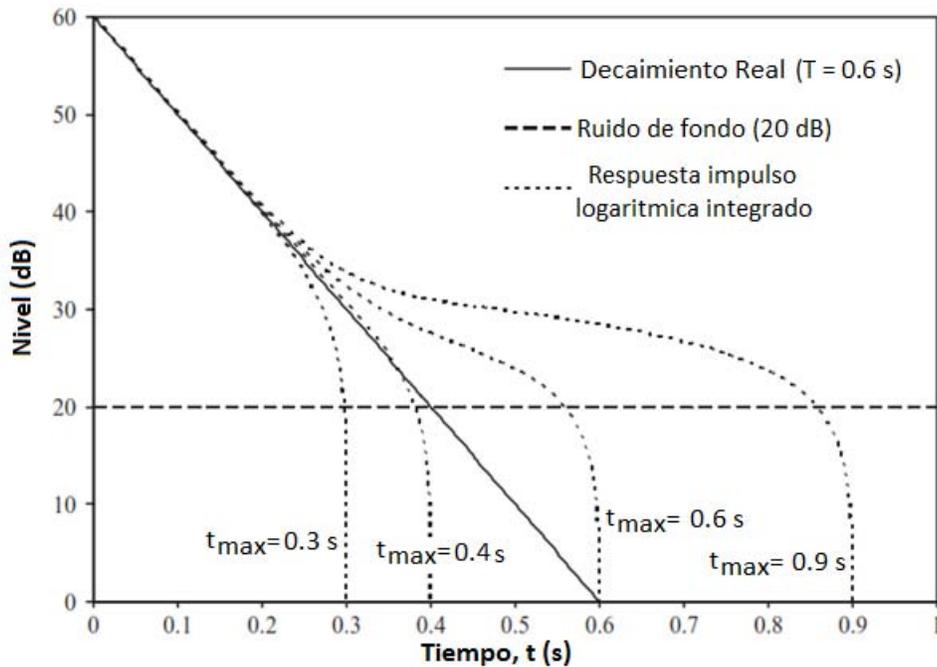


Figura 1.14. Ejemplos de curvas de decaimiento utilizando el método de la respuesta impulso integrada.

En la figura 1.14 se muestran ejemplos de la respuesta logarítmica de impulso integrado calculada mediante la ecuación 1.30 para diferentes valores de T_{max} . La curva de decaimiento real tiene un tiempo de reverberación de 0.6 s y ha sido trasladado para que se inicie en un nivel de 60 dB. El nivel de ruido de fondo es de 20 dB. La parte posterior de decaimiento medido se hace más corto o más largo dependiendo del valor de T_{max} . En este ejemplo, el nivel de decaimiento real es igual al nivel de ruido de fondo en $t=0.4$ s. Cuando $t_{max}=0.4$ s la respuesta al impulso integral logarítmica entre $t= 0$ y 0.4 s es sólo ligeramente afectada por la presencia de ruido de fondo. Por lo tanto, a pesar del hecho de que sólo podemos estimar el ruido de fondo real, valores adecuados de t_{max} pueden fácilmente permitir calcular el tiempo de reverberación.

El método utilizado para determinar t_{max} depende de la disponibilidad del nivel de ruido de fondo durante la medición de respuesta de impulso [13]. Para el ruido de fondo constante este nivel por lo general puede estimarse a partir del extremo final de la respuesta de impulso. Como se indica en el ejemplo, el valor óptimo para T_{max} es en el momento en que la curva de decaimiento real es igual a la del ruido de fondo. En la práctica, no conocemos la curva de decaimiento real, ya que esta es la razón por la que estamos llevando a cabo la medición. Además, las fluctuaciones que existen en la zona de ruido de fondo se traducen en que no siempre se puede obtener una buena estimación en un tramo corto del extremo final de la respuesta impulsiva. Por estas razones, los procedimientos utilizados para determinar el valor óptimo tienden a basarse en los procesos iterativos que están automatizados en el equipo de medición [16 y 13].

Al igual que con el método del ruido interrumpido, se necesitan diferentes posiciones de la fuente y del receptor para determinar el tiempo de reverberación promedio espacial.

1.8.3.1 Variación estadística de los tiempos de reverberación en cuartos

Para las mediciones de ruido interrumpido, el tiempo de reverberación varía según Carl [9] entre diferentes posiciones de medición, así como entre las mediciones repetidas en la misma posición. Para el método de respuesta de impulso integrado, sólo se necesita una sola medición en cada posición; por lo que sólo la variación espacial dentro del recinto es la que necesita ser considerada. En un campo difuso la curva de decaimiento es una línea recta. Sin embargo, la naturaleza aleatoria del ruido blanco se traduce en que la curva de decaimiento medida tendrá fluctuaciones aleatorias sobre esta línea recta; el enfoque adoptado por Davy [19] para determinar el tiempo de reverberación es ajustar una línea recta a la curva de decaimiento utilizando el método de mínimos cuadrados. Se supone que los filtros y los detectores no tienen efecto sobre la forma de la curva de decaimiento dentro del rango de evaluación.

Para la variación espacial del tiempo de reverberación, la desviación estándar espacial $\sigma_{T,s}$, es según Davy [19],

$$\sigma_{T,s} = \sqrt{\frac{720T}{B_s X^3} \left(\frac{10}{\ln 10}\right)^2 F\left(\frac{\ln 10}{10} X\right)} \quad (1.31)$$

Donde X es el rango de evaluación (dB) que se utiliza para calcular el tiempo de reverberación, B_s , es el ancho de banda estadístico del filtro y la función $F(z)$ es:

$$F(z) = 1 - \frac{3}{z}(1 + \exp(-z)) - \frac{12}{z^2} \exp(-z) + \frac{12}{z^3}(1 - \exp(-z)) \quad (1.32)$$

Para el método de ruido interrumpido se usa un dispositivo de promedio exponencial con su propio tiempo de decaimiento, T_{detector} , la desviación estándar, $\sigma_{T,r}$, para repetir las mediciones en la misma posición del micrófono [Davy, 19] es:

$$\sigma_{T,r} = \sqrt{\frac{720T}{B_s X^3} \left(\frac{10}{\ln 10}\right)^2 F\left(\frac{\ln 10}{10} \frac{T}{T_{\text{detector}}} X\right)} \quad (1.33)$$

Para el método del ruido interrumpido, ya que implica el uso de un dispositivo de promediación lineal, hay un mayor número de variables que determinan la desviación estándar. Para un dispositivo que promedia N muestras durante un tiempo de integración, T_{int} ,

con un intervalo de tiempo, \mathbf{a} , entre el inicio de los promedios sucesivos ($\mathbf{a} \geq \mathbf{T}_{\text{int}}$), la desviación estándar, $\sigma_{T,r}$, para mediciones repetidas en la misma posición del micrófono [19], es:

$$\sigma_{T,r} = \sqrt{\frac{\left(\frac{10}{\ln 10}\right)^2 \left(\frac{1}{B_s T_{\text{int}}} + \frac{2}{N}\right)}{\frac{X^3}{720aT} + \frac{X^2}{4T^2} + \frac{10aX}{T^3}}} \quad (1.34)$$

Los filtros pasa bandas por octava tendrán desviaciones estándar más bajas que por banda de tercio de octava, aunque estos últimos se utilizan con mayor frecuencia en las mediciones de absorción sonora.

Para los filtros tipo Butterworth la desviación estándar puede calcularse a partir del ancho de banda efectivo, usando la ecuación $B_s = \frac{2n}{2n-1} B_e$, según Davy [19]. Si no se conoce el ancho de banda estadístico, puede utilizarse la frecuencia central de la banda, \mathbf{f} , lo que da un ancho de banda de $0.23f$, para una banda de tercio de octava y $0.707f$ para bandas de octava.

Para el método del ruido interrumpido, con \mathbf{Nr} mediciones en cada una de las \mathbf{Ns} diferentes posiciones de los micrófonos, la desviación estándar total en segundos se puede estimar usando:

$$\sigma_{T,r} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sigma_{T,s}^2 + \frac{\sigma_{T,r}^2}{N_r} \right)} \quad (1.35)$$

Para el método de respuesta de impulso integrado, la desviación estándar total en segundos se puede estimar usando:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{\sigma_{T,s}^2}{N_s}} \quad (1.36)$$

La variación espacial en términos de $\sigma_{T,s}$ se muestra en la figura 1.15 para una banda de tercio de octava con un tiempo de reverberación de 1 s. Esto ilustra cómo la desviación estándar disminuye al aumentar la frecuencia y cada vez con mayor rango de evaluación. Sin embargo, no se debe inferir que las mediciones deben utilizar siempre la más amplia gama de evaluación (es decir, T_{60}) con el fin de minimizar la desviación estándar. Este modelo sólo se aplica a la situación del campo difuso, donde hay una línea recta de decaimiento. Para campos no difusos, cuando la curva de decaimiento no es una línea recta, T_{10} , T_{15} , o T_{20} deben utilizarse para relacionar la presión acústica reverberante a la potencia acústica radiada en un cuarto. Hay que tener en cuenta que la $\sigma_{T,s}$ calculada en esta sección sólo es aplicable a campos difusos.

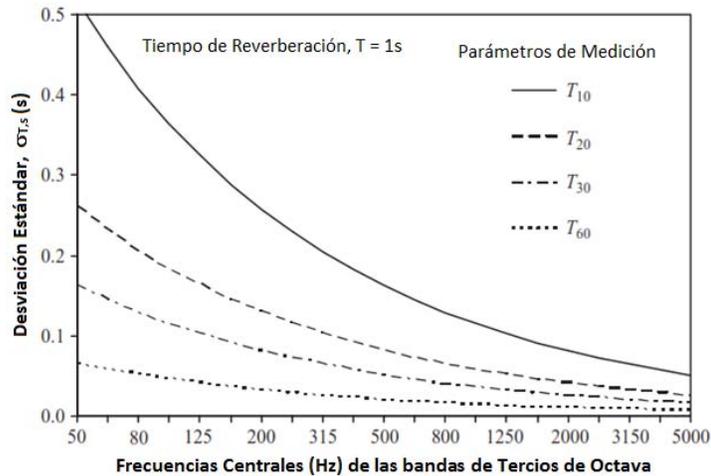


Figura 1.15. La desviación estándar de la variación espacial del tiempo de reverberación con diferentes rangos de evaluación.

1.8.4 Método utilizando Secuencias de Máxima de Longitud (MLS)

Las mediciones con MLS, [Carl, 9] son muy adecuadas para las mediciones de tiempo de reverberación, ya que determinan la respuesta al impulso de un sistema acústico; esto facilita el uso del método de respuesta de impulso integrado, así como el análisis de filtro inverso.

El procesamiento de la señal para las mediciones con MLS es más complejo que con las mediciones con ruido de banda ancha.

Las MLS son señales deterministas; en otras palabras, son exactamente repetibles. En contraste con el ruido blanco, que es una señal aleatoria y por lo tanto se describe por sus características estadísticas [9]. Sin embargo, al igual que el ruido blanco, la forma del espectro de frecuencia de la MLS es blanca. Una señal MLS teóricamente tiene un factor de cresta unitaria y este valor bajo es conveniente, ya que proporciona una alta relación señal a ruido.

Una señal MLS consiste en una secuencia binaria periódica, donde cada valor de la secuencia es o bien +1 o -1 y está igualmente espaciados en el tiempo. Un período de MLS contiene $2^n - 1$ valores donde n es un número entero y describe el orden de la secuencia. Por ejemplo, un período de MLS de orden $n = 15$ comprende una secuencia de valores $2^{15} - 1$. Los valores en la secuencia se generan a partir de registros de desplazamiento digitales [21]. La duración del período de la MLS, T_{MLS} , en segundos, se calcula dividiendo el número de valores en la secuencia, por la frecuencia de muestreo del reloj, f_{clock} , que se utiliza para generar la secuencia,

$$T_{MLS} = \frac{2^n - 1}{f_{clock}} \quad (1.37)$$

Para enviar la señal MLS a un altavoz, esta secuencia binaria se convierte en una señal analógica de pulsos bipolares. Parte de una secuencia de la MLS y su forma analógica se muestran en la figura 1.16. La secuencia de MLS de valores +1 y -1 se puede ver como una secuencia de impulsos de diferente polaridad.

El proceso de medición MLS se utiliza para determinar la respuesta de impulso de un sistema, $h(t)$, donde el sistema se define como la combinación del equipo de medición y el sistema acústico que se está midiendo. Para un sistema lineal invariante en el tiempo y con una respuesta de impulso, $h(t)$, la señal de entrada $x(t)$ está relacionada con la señal de salida, $y(t)$, por la convolución de $x(t)$ y $h(t)$.

$$y(t) = x(t) * h(t) \quad (1.38)$$

La respuesta de impulso se determina a partir de la función de correlación cruzada, $R_{xy}(\tau)$ entre las señales de entrada y salida. La correlación cruzada describe la relación entre las señales de entrada y de salida en términos del desplazamiento de tiempo, τ , entre estas dos señales después de que la señal de salida ha sido modificada por el equipo de medición y el recinto bajo prueba.

Este procesamiento es particularmente útil en la extracción de señales sumergidas en ruido, donde la señal de entrada está relacionada con la señal de salida. Esta es la situación en la que MLS se puede usar para superar el problema del alto ruido de fondo. Recordamos que la señal MLS es determinista; por lo tanto, se sabe todo acerca de la señal que sale del analizador para que se pueda correlacionarla con la señal recibida de vuelta al analizador a través del micrófono.

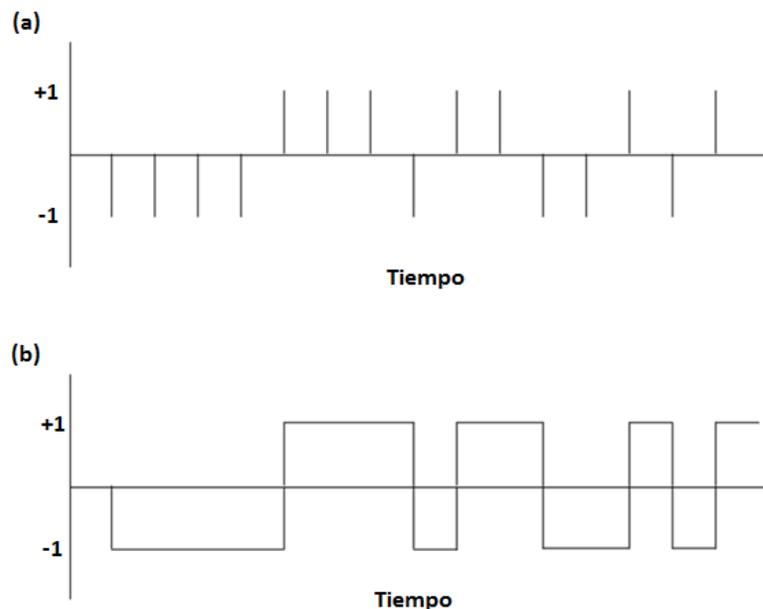


Figura 1.16. Parte de un período de una MLS: (a) Comprende una secuencia de impulsos con diferentes polaridades y (b) La versión analógica de la señal MLS.

La naturaleza repetitiva de la señal MLS significa que al promediar la respuesta de un sistema lineal invariante en el tiempo para una señal MLS, será la misma cada vez, mientras el ruido de fondo no correlacionará en diferentes instantes de tiempo. La correlación cruzada también puede llevarse a cabo con técnicas de la Transformada Rápida de Fourier (FFT).

La función de correlación cruzada se determina a partir de la función de auto-correlación de la entrada, $R_{xx}(\tau)$, convolucionada con la respuesta de impulso, y está dada por:

$$R_{xy}(\tau) = R_{xx}(\tau) * h(\tau) \quad (1.39)$$

Para la señal MLS, la función de auto-correlación, $R_{xx}(\tau)$, es muy similar a la función delta de Dirac, $\delta(\tau)$. Esto nos simplifica el cálculo, ya que la convolución de un impulso con una función cualquiera resulta la misma función. Por lo tanto la respuesta de impulso, $h(\tau)$, es igual a la función de correlación cruzada, $R_{xy}(\tau)$.

$$R_{xy}(\tau) = \delta(\tau) * h(\tau) = h(\tau) \quad (1.40)$$

Para las señales de la MLS, $R_{xy}(\tau)$ se puede calcular utilizando la transformada rápida de Hadamard (FHT), un algoritmo de correlación cruzada eficiente. La secuencia medida de los impulsos que se reciben desde el micrófono ocurre en diferentes momentos, y tienen diferentes polaridades debido a los valores 1 y -1 utilizados para crear la secuencia. La transformación de Hadamard toma todas las respuestas de impulso y los cambia de modo que todos ellos están alineados para ocurrir al mismo tiempo con la misma polaridad. Esto da lugar a la respuesta de impulso, $h(t)$. La respuesta al impulso se procesa para dar el espectro o la curva de decaimiento. Un esquema del proceso de medición MLS se muestra en la figura 1.17.

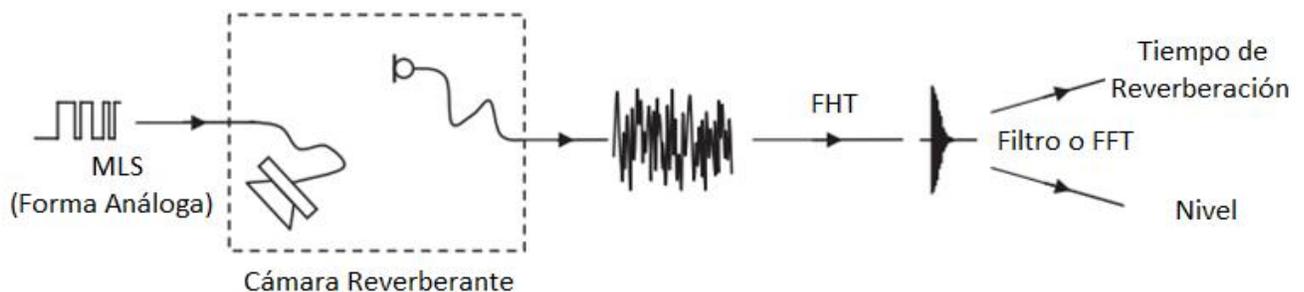


Figura 1.17. Diagrama esquemático de la medición con MLS.

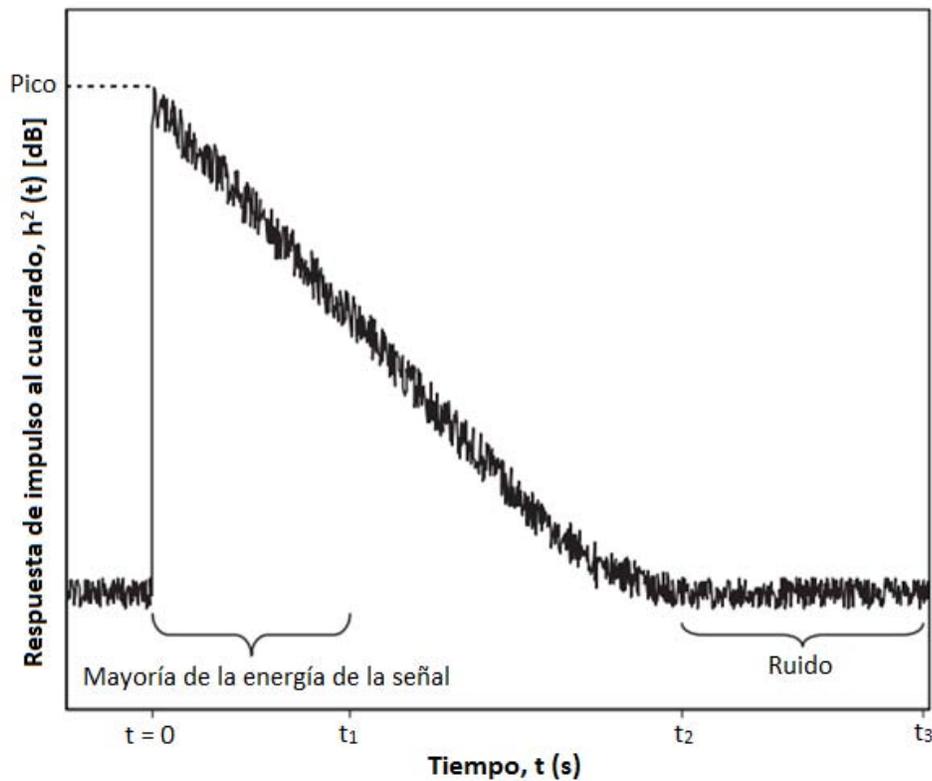


Figura 1.18. Respuesta de impulso al cuadrado de un sistema acústico.

Para las mediciones de nivel, la respuesta de impulso cuadrado, $h^2(t)$ se muestra en la figura 1.18 se utiliza para calcular la energía que se debe sólo a la señal evitando al mismo tiempo las partes que se ven afectados por el ruido de fondo.

El tiempo de reverberación se determina a partir de la respuesta de impulso integrada de la misma manera como con otras mediciones de impulso, tales como un disparo de pistola, por la aplicación de la integración en tiempo inverso.

La duración del período de la MLS, T_{MLS} , debe ser igual a, y preferiblemente más larga que el tiempo de reverberación del sistema que se está midiendo, T . Esto asegura que el período de la MLS excita cada resonancia en el sistema [22]. Por lo general, es necesario promediar las respuestas de impulso medidas a partir de varios períodos de la MLS para proporcionar la requerida relación de señal a ruido. Por lo tanto, esta longitud mínima del período también evita problemas con los extremos finales de las respuestas al impulso medidas, superpuestas en los subsiguientes ciclos de la MLS, efecto conocido como aliasing. Por tanto, es necesario tener idea del valor del tiempo de reverberación antes de que podamos establecer la duración del período de la MLS en el analizador, para medir confiablemente el tiempo de reverberación. Esto no es un problema en la práctica debido a que el tiempo máximo de reverberación que típicamente se encuentra en los cuartos, en particular en las viviendas, es menor a 8 s. Por lo tanto, el orden de la secuencia de la MLS y la frecuencia de muestreo se puede configurar para dar una duración del período válido para la mayoría de las mediciones.

Se considera que se toma ventaja del hecho de que la MLS es determinista y varios períodos de la MLS se pueden sincronizar y promediar para mejorar la relación señal a ruido. Entre estos períodos de la MLS habrá correlación entre las respuestas de impulso, pero no habrá ninguna correlación entre el ruido de fondo durante estos períodos. Al promediar N períodos de la MLS, la mejora estimada en la relación señal a ruido en dB mediante MLS en comparación con ruido de banda ancha es [23, 24]:

$$\Delta SNR = 10 \log \left(\frac{NT_{MLS}}{t_1} \right) \quad (1.41)$$

Por lo tanto al duplicar el número de períodos de la MLS en el proceso de promediado, se incrementará la relación señal a ruido en 3 dB.

1.8.4.1. Limitaciones

Hay muchas ventajas de utilizar el método de medición con MLS, pero hay limitaciones que es necesario examinar como en cualquier tipo de medición. Estas limitaciones se derivan de que el sistema que se está midiendo necesariamente debe ser lineal e invariante en el tiempo.

Los elementos relevantes de este sistema son la cadena de equipos de medición, las condiciones ambientales en las que se toman las mediciones, y de todos los elementos físicos, tales como las paredes, pisos o suelo, que afectan a la propagación del sonido y la transmisión del altavoz al micrófono.

En mediciones de absorción el principal factor que afecta a la linealidad es la distorsión del altavoz y/o el amplificador cuando se operan con nivel de volumen alto. La no linealidad es identificable por grandes picos en la cola de la respuesta de impulso. Este problema es fácil de resolver mediante la reducción del nivel de la señal de salida, y, cuando sea necesario, aumentando el número de promedios para lograr la relación señal a ruido requerida. Por lo tanto, la invariancia en el tiempo, más que la linealidad, el problema más difícil de resolver para las mediciones de absorción. En contraste, las mediciones con ruido de banda ancha son relativamente inmunes a la variación de tiempo y hay menos problemas con la variación de tiempo si la respuesta de impulso se determina usando una señal de barrido sinusoidal en lugar de la MLS.

Como la medición MLS se basa en la transformación de Hadamard para cambiar las respuestas de impulso medidas de modo que todas se den al mismo tiempo con la misma polaridad. Por lo tanto, cualquier variable que cambia la propagación del sonido o de transmisión entre el altavoz y el micrófono es una fuente potencial de error si cambia la respuesta de impulso del sistema durante la medición. Las causas más comunes de este tipo de variación de tiempo son el movimiento del aire, la variación de la temperatura, la variación en la humedad, altavoces en

movimiento, y los micrófonos en movimiento. Hay dos tipos de variación de tiempo que es necesario considerar: la variación dentro de un período de la MLS (intra-periódico) y la variación entre los períodos de la MLS (inter-periódicos). La varianza temporal tiene el potencial para cambiar la frecuencia, amplitud, y la fase de una onda. Sin embargo, sólo se necesita un pequeño cambio en la velocidad del sonido para introducir desfases significativos; por lo tanto, esto tiende a ser el factor más importante para controlar [23]. Tanto el movimiento del aire y las variaciones en la temperatura cambian la velocidad del sonido. El desplazamiento de fase resultante reduce la correlación entre la respuesta de impulso del sistema y la señal MLS, causando una disminución en el nivel de presión de sonido medido.

Por lo tanto es una buena práctica supervisar las condiciones ambientales, tanto en mediciones en el laboratorio como en mediciones de campo durante las mediciones cuando se utilicen tiempos de promediación largos. También es beneficioso evitar el uso de tiempos de medición más largos de los que realmente se necesita para conseguir la relación señal a ruido.

Capítulo II. Desarrollo Experimental

2.1. Mediciones suponiendo la existencia de un campo difuso

Inicialmente se planteó medir el coeficiente de absorción de un material, con el procedimiento normalizado ISO 354, pero extendiendo la medición en la gama de frecuencias bajas hasta 50 Hz. Es decir, salvo la gama de frecuencias de medición, la medición se trató de apegar estrictamente a lo especificado en ISO 354. En esta norma se especifica un intervalo de medición entre 100 Hz y 5000 Hz y presupone que en el recinto que se realiza la medición, se cumplen las condiciones de un campo difuso. Pese a que la ecuación de Schroeder proporciona un indicativo de la frecuencia en la que el campo deja de ser difuso dentro de la Cámara Reverberante (CR), experimentalmente se tiene dudas sobre el tiempo de reverberación que debe emplearse en el cálculo de esta frecuencia; la ecuación de Schroeder es como sigue:

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_R}{V}}$$

Se sabe que el volumen de la Cámara Reverberante del CCADET, es 216.66 m³ pero no es claro cuál es el tiempo de reverberación T_R . Se supone que tiempo de reverberación, por la ecuación de Sabine, es inverso al área de absorción sonora equivalente A_{aeq} ; ésta a su vez depende del área de la superficie total de la cámara reverberante (222 m²) multiplicada por el coeficiente de absorción α del concreto (solo la puerta de acceso no es de concreto). El coeficiente (α), en frecuencias bajas, es incierto, ya que se ubica entre 0.002 y valores tan pequeños como $\alpha = 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{f}$ [26]. Por esta incertidumbre, en primera instancia, se tratará de determinar experimentalmente hasta que frecuencia, más baja, se tiene un campo difuso en el interior de la cámara reverberante. Adicionalmente se consideró conveniente investigar tanto el comportamiento de algunos eslabones de la cadena instrumental (fuente de excitación, sistema de adquisición, modo de procesar), como las condiciones del arreglo de medición (posiciones de la fuente de excitación y micrófonos, tamaño de la muestra a medir y su colocación dentro del recinto) en frecuencias por debajo de 100 Hz. Para determinar los tiempos de reverberación se utilizó el procedimiento de ruido interrumpido con ruido blanco. Las mediciones se realizaron en cámara reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones (LAV) ubicada en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET).

En las mediciones se siguieron las recomendaciones de la norma ISO 354-2003 [3], la cual nos dice que tenemos que colocar la muestra en el piso de la cámara reverberante, separada, tanto de paredes, micrófonos y fuente de excitación, a más de 1 metro de distancia; el área de la muestra debe tener entre 10 a 12 m², la figura 2.1 muestra la colocación que se consideró mostrando el tipo de material que se analizó en este proyecto (15 paneles ADD125 de Arquitectura Aural; cada panel con dimensiones de 0.60 m x 1.20 m).

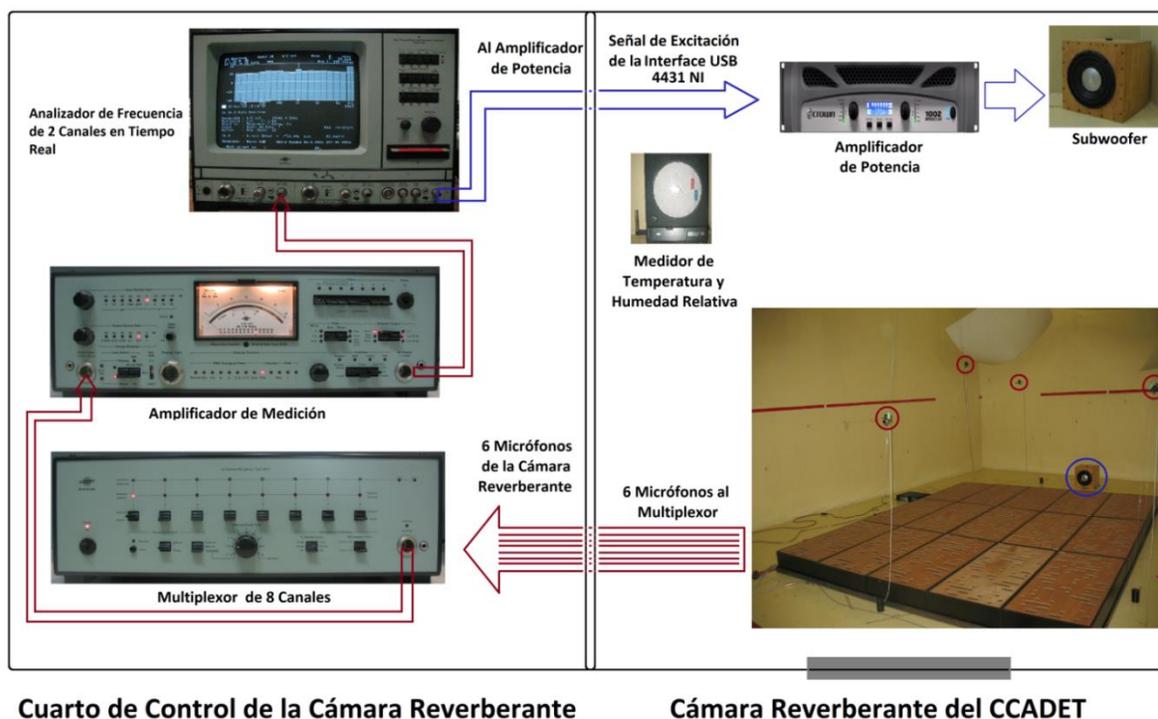


Figura 2.1. Diagrama esquemático medición, bajo la norma ISO 354-2003, utilizando ruido interrumpido

La tabla I muestra el equipo utilizado para la medición del tiempo de reverberación con el método de ruido interrumpido. Se menciona en general las características generales del equipo que se ocupó.

Cantidad	Descripción	Marca	Modelo	N/Serie
1	Analizador de Espectro	B&K	2133	185360
1	Multiplexor de 8 canales	B&K	2811	1825513
1	Amplificador de medición	B&K	2636	1064056
1	Fuente de excitación (Subwoofer)	JBL		S/N
1	Amplificador de potencia	Crown	XTi 1002	8500493184
1	Medidor de temperatura	White Box	CT485	CT485-RS-011037
1	Micrófono de medición 1/2" (P y IA)	B&K	4166	2749906
1	Micrófono de medición 1/2" (P y IA)	B&K	4166	1440630
1	Micrófono de medición 1/2" (P y IA)	B&K	4166	1440619
1	Micrófono de medición 1/2" (P y IA)	B&K	4166	1440633
1	Micrófono de medición 1/2" (P y IA)	B&K	4166	1440624
1	Micrófono de medición 1/2" (P y IA)	B&K	4166	1201096

Tabla I. Equipo utilizado para medir el tiempo de reverberación para el método de ruido interrumpido

P= Presión y **IA=** Incidencia Aleatoria.

2.1.1 Método de ruido interrumpido

Utilizando el analizador de espectro B&K 2133, se midieron los tiempos de reverberación por el método de ruido interrumpido promediando 30 veces en cada punto; el promedio espacial se obtuvo mediante 12 combinaciones de posiciones fuente-micrófonos. Debido a que el intervalo de medición se amplió hasta 50 Hz no fue posible utilizar la fuente omnidireccional desarrollada en el CCADET, pues en frecuencias por debajo de 200 Hz se obtenían niveles de excitación en presión muy bajos (menores a 70 dB), lo cual reducía la relación señal a ruido de las señales de decaimiento registradas y no se podía lograr el mínimo de 35 dB que establece ISO 354. Por lo tanto se utilizó un subwoofer para cubrir el intervalo de frecuencias bajas, de modo que la medición de absorción en todo el intervalo de 50 Hz a 5000 Hz, se realizó en dos pasos, el primero cubría frecuencia bajas utilizando un subwoofer, 50 Hz a 1250 Hz; el segundo paso cubría el intervalo de frecuencias altas, utilizando la fuente omnidireccional, 1000 Hz a 5000 Hz.

Los resultados se muestran en la figuras 2.2 y 2.3. En la figura 2.2, se muestran los tiempos de reverberación medidos con y sin muestra (cámara vacía), medidos en los dos intervalos de frecuencia considerados, en azul el que corresponde al utilizar el subwoofer, en rojo el que corresponde al utilizar la fuente omnidireccional. Observe que la zona de traslape, entre 800 Hz y 1250 Hz, existe buena coincidencia, en los valores medidos utilizando las dos fuentes de excitación.

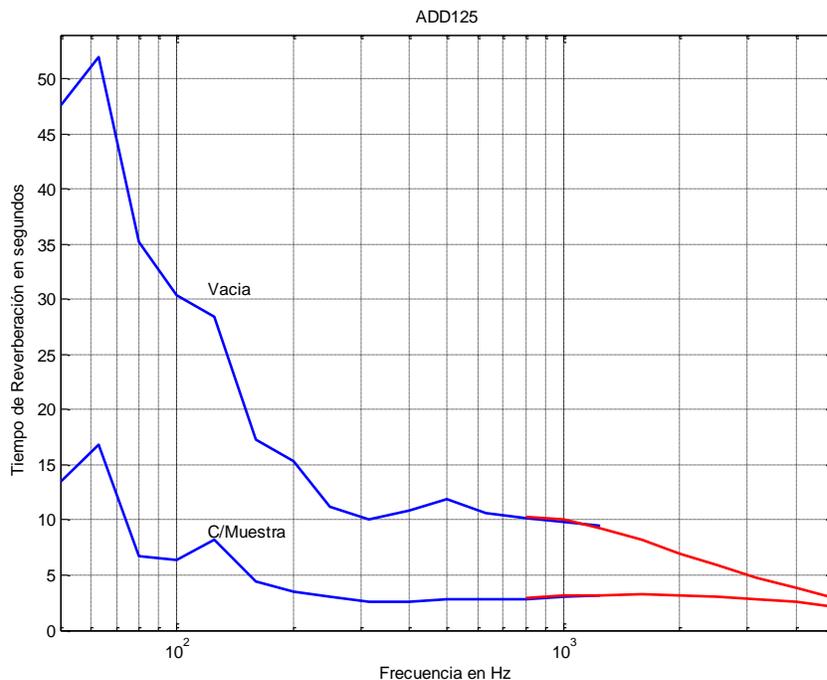


Figura 2.2 Tiempos de reverberación, en azul se muestran los datos en el primer intervalo de frecuencias de 50-1250 Hz; en rojo el segundo intervalo en frecuencias de 1000-5000 Hz.

En la figura 2.3 se muestran los mismos valores de tiempo de reverberación medidos, un solo trazo negro, y su desviación (\pm una desviación normal) en trazo rojo. Como era de esperarse la desviación en frecuencias por debajo de 100 Hz crece, aunque el pico en que se da mayor desviación ocurre a 60 Hz y no en 50 Hz, cómo podría pensarse. En la Tabla I se tabulan los valores de la figura 2.3.

De acuerdo al modelo cuyos resultados se muestran en la figura 1.13 [20], para un gama de 30 dB en la curva de decaimiento en 50 Hz, se tendría una desviación de 0.18 en un tiempo de reverberación de 1 segundo, lo cual representa aproximadamente una desviación del 18 % del valor medido del tiempo de reverberación. Si utilizamos estos valores como referencia (aunque en realidad en nuestra medición tenemos una gama de 35 dB); podemos observar que en nuestras mediciones en 50 Hz tenemos un tiempo de reverberación de 47.6 segundos, con una desviación de 5.28 segundos lo que representa una desviación de aproximadamente un 11%, para la cámara reverberante vacía, y con muestra, tenemos un tiempo de reverberación de 13.5 segundos con una desviación de 3.43 segundos lo que representa aproximadamente el 25% de desviación, esto quiere decir que cuando se introduce la muestra a medir, las condiciones del campo sonoro dentro de la cámara reverberante se alejan más de las características de un campo difuso. Este resultado se explica con el hecho de que una condición para que exista un campo difuso es que el material absorbente esté distribuido uniformemente dentro del recinto, situación que se aleja cuando se acepta la recomendación de ISO 354 de colocar el material de prueba en el piso, además de que el material bajo medición, ADD125 es altamente absorbente.

Debido a que las mediciones de tiempos de reverberación se realizaron con el analizador 2133, solo es posible aumentar la relación señal a ruido, aumentando a su vez el nivel de presión sonora de excitación o aumentando el número de promedios. Aunque se realizaron otras mediciones contemplando estas consideraciones, los resultados no mejoraron significativamente.

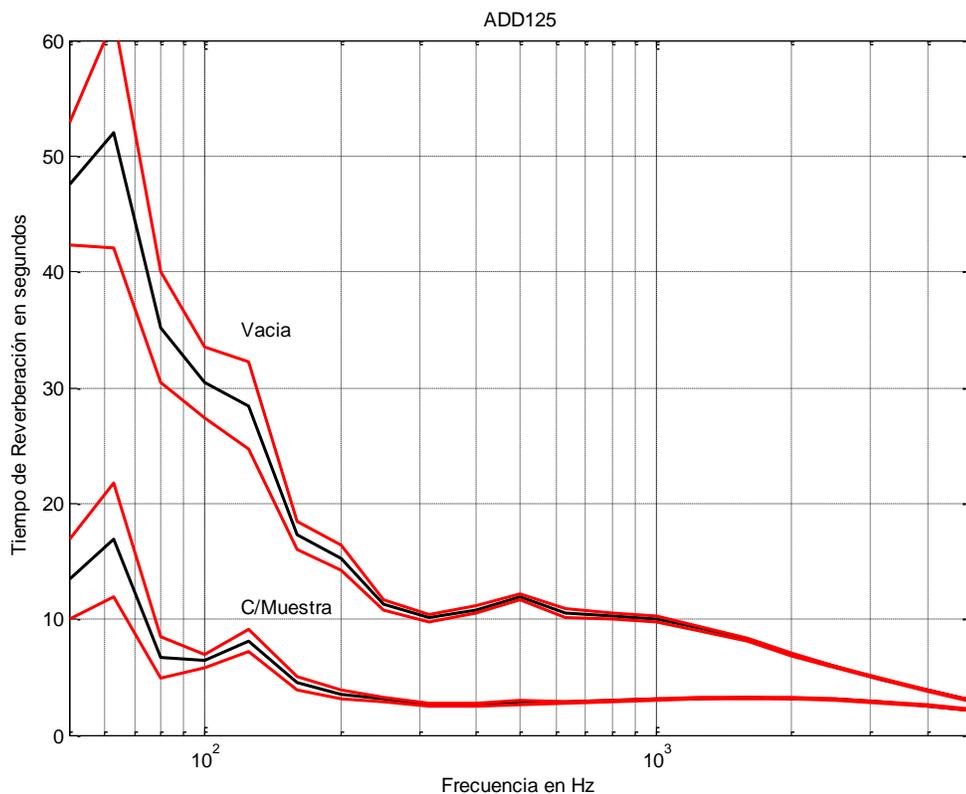


Figura 2.3 Tiempos de reverberación medidos, línea negra, y su desviación en rojo

CR vacía			CR con muestra	
Frecuencia Hz	TR [s]	Desviación estándar ±	TR [s]	Desviación estándar ±
50	47.6	5.28	13.5	3.43
63	52.0	9.99	16.9	4.89
80	35.2	4.76	6.7	1.79
100	30.4	3.06	6.4	0.55
125	28.4	3.78	8.2	0.91
160	17.2	1.19	4.5	0.63
200	15.3	1.06	3.5	0.34
250	11.3	0.47	3.1	0.21
315	10.1	0.33	2.6	0.14
400	10.8	0.33	2.6	0.14
500	11.9	0.27	2.8	0.19
630	10.6	0.38	2.8	0.08
800	10.3	0.21	3.0	0.06
1000	10.0	0.21	3.1	0.08
1250	9.2	0.17	3.2	0.09
1600	8.2	0.09	3.2	0.08
2000	7.0	0.12	3.2	0.05
2500	5.9	0.07	3.1	0.06
3150	4.8	0.04	2.8	0.05
4000	3.8	0.04	2.5	0.04
5000	3.0	0.05	2.2	0.03

Tabla II. Datos del tiempo de reverberación con el método de ruido interrumpido

2.2 Mediciones suponiendo la existencia de un campo modal

Es posible intentar mejorar las desviaciones de las mediciones de tiempo de reverberación aumentando el número de promedios [29], colocando difusores de volumen y área conocidos para cuantificar debidamente la trayectoria libre media [30, 31, 32], utilizando una superficie reflejante de referencia [33], o calibrando la cámara reverberante con una muestra de absorción de referencia o patrón [34]. Todas estas estrategias tienen en común el intentar mejorar las condiciones del campo sonoro en el interior de la cámara reverberante, para lograr un campo difuso. El problema con este enfoque es que, a frecuencias cada vez más bajas, el comportamiento del campo sonoro está dominado por el comportamiento modal. Por esta razón se decidió realizar mediciones considerando que el comportamiento del campo sonoro dentro de cámara reverberante es modal y no suponer que es difuso.

En términos experimentales, lo que se pretende es que: cuando la fuente de excitación se apaga, no suponer que los modos del recinto, que se ubican en una banda de frecuencias, decaen con una sola pendiente, sino que decaen con diferentes pendientes, según el tipo de modo que se trate (axial, tangencial, oblicuo) [35].

Con la ayuda de las ecuaciones desarrolladas en la sección 1.7 se pueden estimar las pendientes de decaimiento por modo y de ahí los tiempos de reverberación. Es necesario calcular las frecuencias de los modos con las dimensiones de la cámara reverberante.

Se midieron las dimensiones de la cámara reverberante (8.10 m x 5.74 m x 4.66 m) para poder calcular las frecuencias de los modos propios de la cámara.

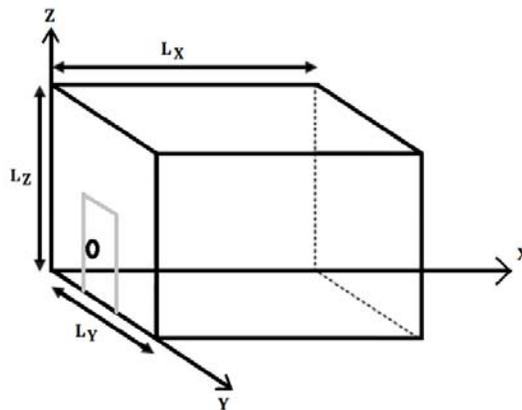


Figura 2.4. Eje de referencia de la cámara reverberante, para calcular las frecuencias de los modos

Como referencia se mostrarán de nuevo las ecuaciones necesarias; la ecuación de las frecuencias propias es la siguiente:

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

Para la trayectoria libre medio, por modo, la ecuación es:

$$l = \frac{\sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}}{\left(\frac{n_x}{L_x^2}\right) + \left(\frac{n_y}{L_y^2}\right) + \left(\frac{n_z}{L_z^2}\right)}$$

Para determinar el nivel en estado estable antes de apagar la fuente se utiliza:

$$\left(\frac{P_{oi}}{P_{Bo}}\right)^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{T_i}{(\varepsilon_{ix} \varepsilon_{iy} \varepsilon_{iz})^2} 10^{-\frac{6t}{T_i}}}{\sum_{i=1}^N \frac{T_i}{(\varepsilon_{ix} \varepsilon_{iy} \varepsilon_{iz})^2}}$$

$$dB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{io}}{P_{BO}} \right)^2$$

Y para el cálculo del tiempo de reverberación propuesta, tendremos que:

$$T_i \approx \frac{6 * l_i * \ln 10}{c * \alpha}$$

Se obtuvieron los modos propios de la cámara reverberante, para las bandas de 50, 63 y 80 Hz en 1/3 de Octava. Con estos datos, se calculó la trayectoria libre media, el nivel de inicio y, finalmente, el tiempo de reverberación. Para este último cálculo se propuso un valor del coeficiente (α) de absorción sonora a la frecuencia del modo, ya que no existen datos para el concreto en ninguna tabla de coeficientes conocida por debajo de 100 Hz, en estos casos se utilizó la ecuación aproximada:

$$\alpha = 1.8 \times 10^{-4} \sqrt{f}$$

La tabla III muestra los cálculos efectuados resumidos para la banda de 50 Hz, y en la figura 2.5 una gráfica con las pendientes correspondientes a cada uno de los modos incluidos y la suma de ellos. Esta última correspondería, teóricamente, al tiempo de reverberación medido en esa banda. Las pendientes de la figura 2.6, son las mismas que las mostradas en la figura 2.5, excepto la pendiente que corresponde al modo oblicuo.

Esto se hizo para poner de manifiesto que la pendiente de decaimiento del modo oblicuo tiene poca influencia en la pendiente total, compuesta por modos tangenciales. Esto se debe a que la energía de los modos tangenciales es 8 veces mayor que la de los modos oblicuos [7].

i	Modo	n_{xi}	n_{yi}	n_{zi}	$\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z$	f_i [Hz]	l_i [m]	$10 \log \left(\frac{p_{i0}}{p_{B0}} \right)^2$ [dB]	$\alpha = 0.004$ T_i [s]
1	Tangencial	0	1	1	4	47.4	3.6	-7.1	36.8
2	Tangencial	2	1	0	4	51.8	5.0	-5.8	50.5
3	Oblicuo	1	1	1	8	51.9	3.3	-13.6	33.6
4	Tangencial	2	0	1	4	56.1	4.3	-6.4	43.5
									$\Sigma TR = 47.6$ s

Tabla II. Resumen de los cálculos de los tiempos de reverberación según el coeficiente (α) obtenido para la banda de 50 Hz

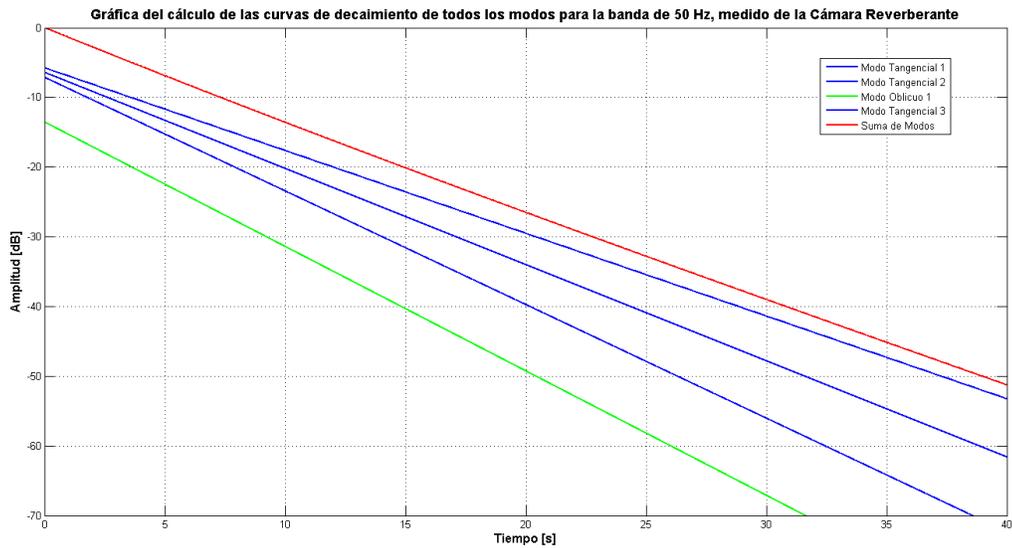


Figura 2.5 Gráfica de las pendientes correspondientes a los tiempos de reverberación de todos los modos en la banda de 50 Hz, la suma total es: $\Sigma TR = 47.6$ segundos

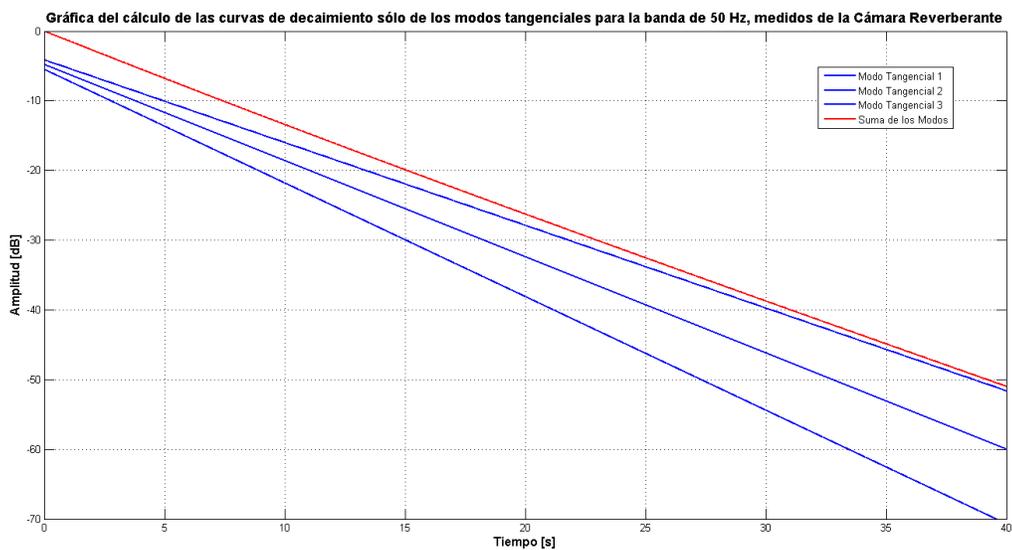


Figura 2.6 Gráfica de las pendientes correspondientes a los tiempos de reverberación de únicamente los modos tangenciales, en la banda de 50 Hz, la suma es: $\Sigma TR = 47.8$ segundos

La misma información se muestra en las Tabla IV, para la banda de 63 Hz.

i	Modo	n_{xi}	n_{yi}	n_{zi}	$\epsilon_x \epsilon_y \epsilon_z$	f_i [Hz]	l_i [m]	$10 \log \left(\frac{p_{io}}{p_{Bo}} \right)^2$ [dB]	$\alpha = 0.006$ T_i [s]
1	Axial	0	2	0	2	59.8	5.7	-4.9	38.3
2	Tangencial	1	2	0	4	63.4	4.9	-11.6	32.5
3	Axial	3	0	0	2	63.5	8.1	-3.4	54.1
4	Oblicuo	2	1	1	8	63.6	3.5	-19.1	23.2
5	Tangencial	0	2	1	4	70.2	3.8	-12.6	25.6
6	Tangencial	3	1	0	4	70.2	5.4	-11.2	35.9
$\Sigma TR = 51.8$ s									

Tabla IV. Resumen de los cálculos de los tiempos de reverberación según el coeficiente (α) obtenido para la banda de 63 Hz

En la figura 2.7 se muestran las pendientes de los todos los modos y su correspondiente suma en la banda de 63 Hz. En la figura 2.8 se muestran las pendientes de los modos axiales y su correspondiente suma. En este caso, también los resultados no cambian al omitir tanto los modos tangenciales como los oblicuos. Esto se debe a que los modos axiales contienen 4 veces más energía que los tangenciales y 32 veces más energía que los oblicuos.

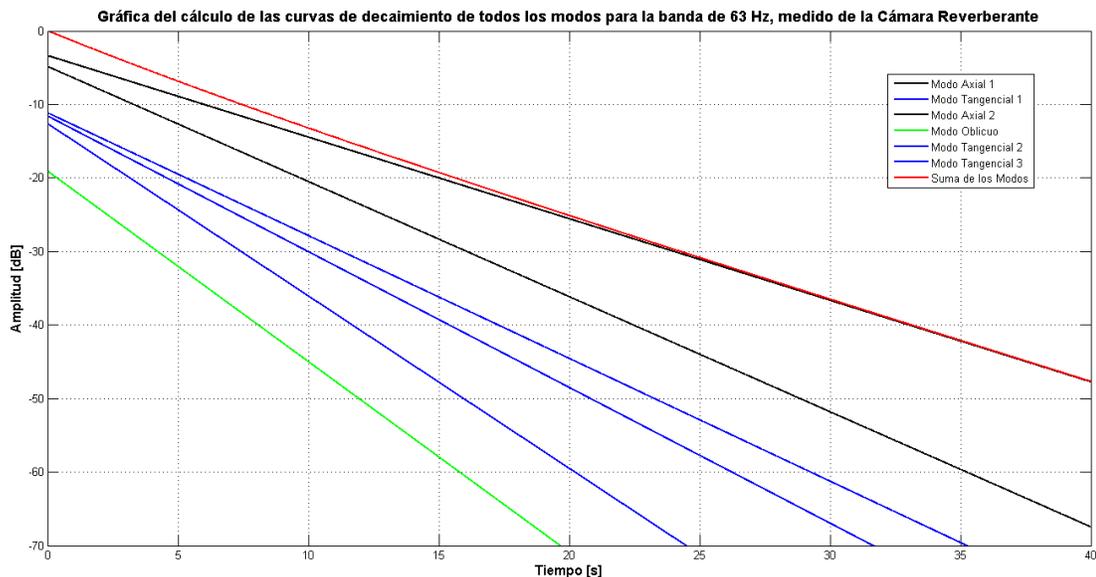


Figura 2.7 Grafica de las pendientes correspondientes a los tiempos de reverberación de todo los modos, en la banda de 63 Hz, la suma es: $\Sigma TR = 51.8$ segundos

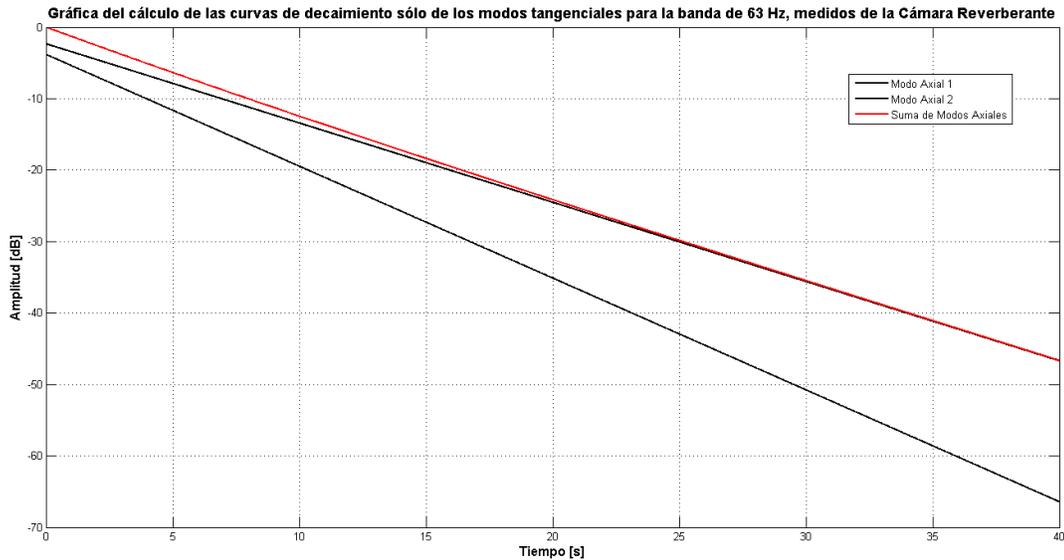


Figura 2.8 Grafica de las pendientes correspondientes a los tiempos de reverberación de únicamente los modos axiales, en la banda de 63 Hz, la suma es: $\Sigma TR= 52.4$ segundos

En la Tabla V, se muestra la información para los modos en la banda de frecuencia de 80 Hz. En este caso existen 12 modos. En la figura 2.9, se muestran las pendientes de estos modos incluyendo su suma total. En la figura 2.10 se muestran las pendientes de únicamente los modos axiales y su suma correspondiente. Una vez más se confirma que la influencia de los modos de menos energía no modifica significativamente el tiempo de reverberación en la banda. Esto podría sugerir un procedimiento de medición basado en localizar los modos de más energía en la banda y medir el tiempo de decaimiento de esos modos dominantes, ignorando el resto.

i	Modo	n_{xi}	n_{yi}	n_{zi}	ϵ_x ϵ_y ϵ_z	F_i [Hz]	l_i [m]	$20 \log \frac{p_{i0}}{p_{B0}}$ [dB]	$\alpha = 0.0091$ T_i [s]
1	Tangencial	2	2	0	4	73.2	4.7	-12.4	21.0
2	Oblicuo	1	2	1	8	73.3	3.5	-19.6	15.5
3	Tangencial	3	0	1	4	73.4	4.7	-12.4	20.6
4	Axial	0	0	2	2	73.6	4.7	-6.4	20.6
5	Tangencial	1	0	2	4	76.6	4.2	-12.9	18.4
6	Oblicuo	3	1	1	8	79.3	3.8	-19.3	17.0
7	Tangencial	0	1	2	4	79.4	3.8	-13.3	17.0
8	Oblicuo	2	2	1	8	82.0	3.5	-19.7	15.4
9	Oblicuo	1	1	2	8	82.2	3.5	-19.7	15.4
10	Axial	4	0	0	2	84.7	8.1	-4.0	35.8
11	Tangencial	2	0	2	4	84.9	4.0	-13.0	17.8
12	Tangencial	3	2	0	4	87.2	4.8	-12.3	21.1
									$\Sigma TR= 35.1$ s

Tabla V. Resumen de los cálculos de los tiempos de reverberación según el coeficiente (α) obtenido para la banda de 80 Hz

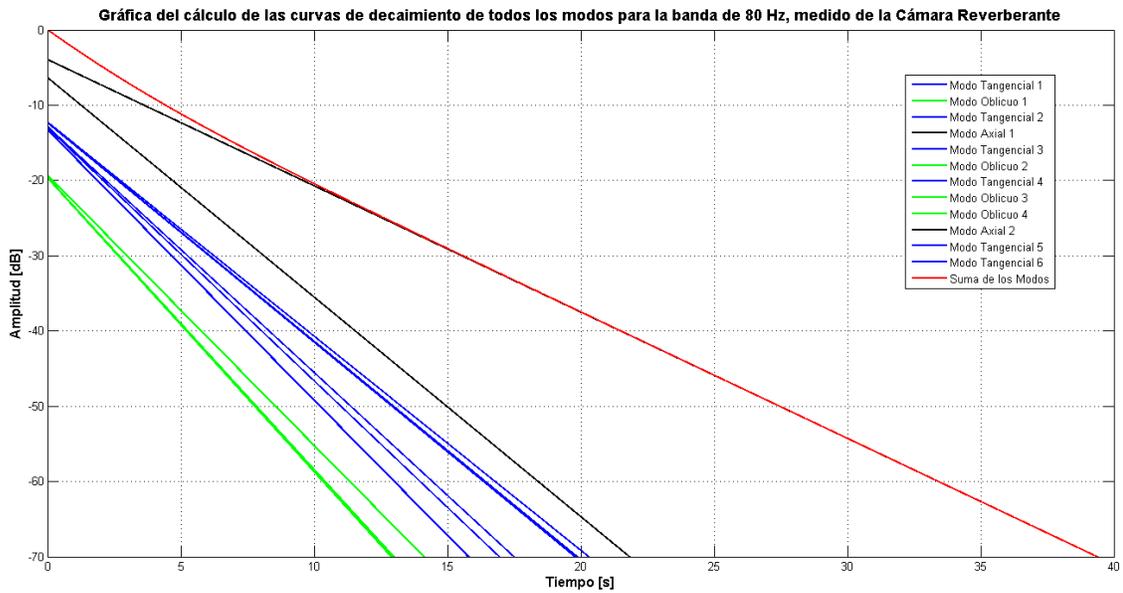


Figura 2.9 Grafica de las pendientes correspondientes a los tiempos de reverberación de todos los modos en la banda de 80Hz, la suma es: $\Sigma TR= 35.1$ segundos

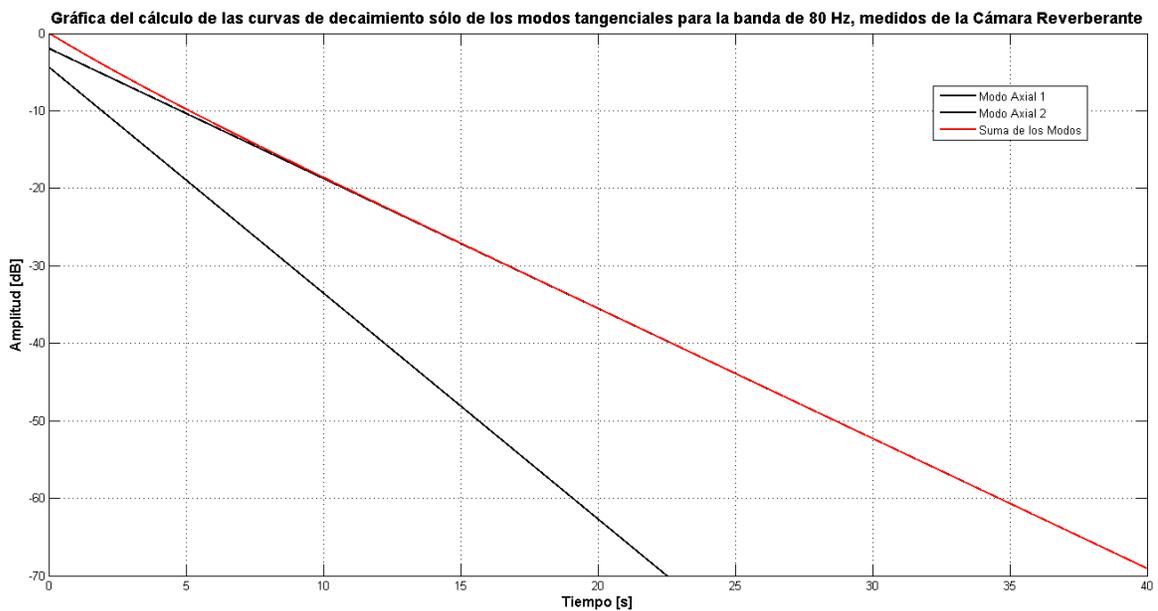


Figura 2.10 Grafica de las pendientes correspondientes a los tiempos de reverberación de únicamente los modos axiales, en la banda de 80 Hz, la suma es: $\Sigma TR= 35.4$ segundos

En la Tabla VI, se comparan los cálculos anteriores y los valores medidos en la cámara reverberante vacía, por el método de ruido interrumpido. De estos resultados se puede desprender que los coeficientes absorción para el concreto ($\alpha_{50}=0.004$, $\alpha_{63}=0.006$, $\alpha_{80}=0.009$) utilizados son los correctos; desafortunadamente no tenemos forma de comprobar este resultado.

Frecuencia	Modos	TR (s) Calculados	TR (s) Ruido interrumpido
50	Todos	47.6	47.6
50	Tangenciales	47.8	
63	Todos	51.8	52
63	Axiales	52.4	
80	Todos	35.1	35.2
80	Axiales	35.4	

Tabla VI. Comparativa de los TR obtenidos por el método Larsen y ruido interrumpido

2.2.1 Método propuesto por Zha y Fuch

En la sección anterior las frecuencias de los modos se calcularon a partir de las dimensiones de la cámara reverberante, un avance en el procedimiento de medición sería obtenerlos directamente. Eso fue lo que propusieron Zha y Fuch [8]. Colocando la fuente de excitación en una esquina del recinto y el micrófono de medición en la esquina opuesta, (ver figura 2.11), de este modo se garantizaría excitar y registrar la mayoría de los modos del recinto, obteniéndose una curva como la mostrada en la figura 2.12. Esta curva representa la función de transferencia de la esquina contraria de la cámara reverberante vacía.

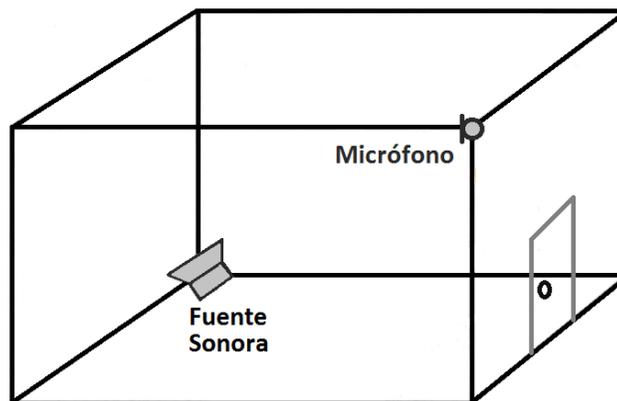


Figura 2.11. Colocación de fuente y micrófono dentro de la cámara reverberante, para garantizar excitar y registrar la mayoría de los modos del recinto

A partir de esta curva pueden determinarse las frecuencias de los modos de la cámara reverberante. Una vez obtenidas estas frecuencias, se excita la cámara reverberante en estas frecuencias con tonos puros y se mide el tiempo de decaimiento para cada modo con la cámara reverberante vacía, para posteriormente colocar dentro de la cámara reverberante la muestra absorbente a medir y volver a medir el tiempo de decaimiento. Teniendo ambas curvas de decaimiento (vacía y con muestra) en la frecuencia de cada modo, se podría cuantificar la cantidad de absorción de la muestra (ya sea, obteniendo el área equivalente de absorción, o el coeficiente de absorción).

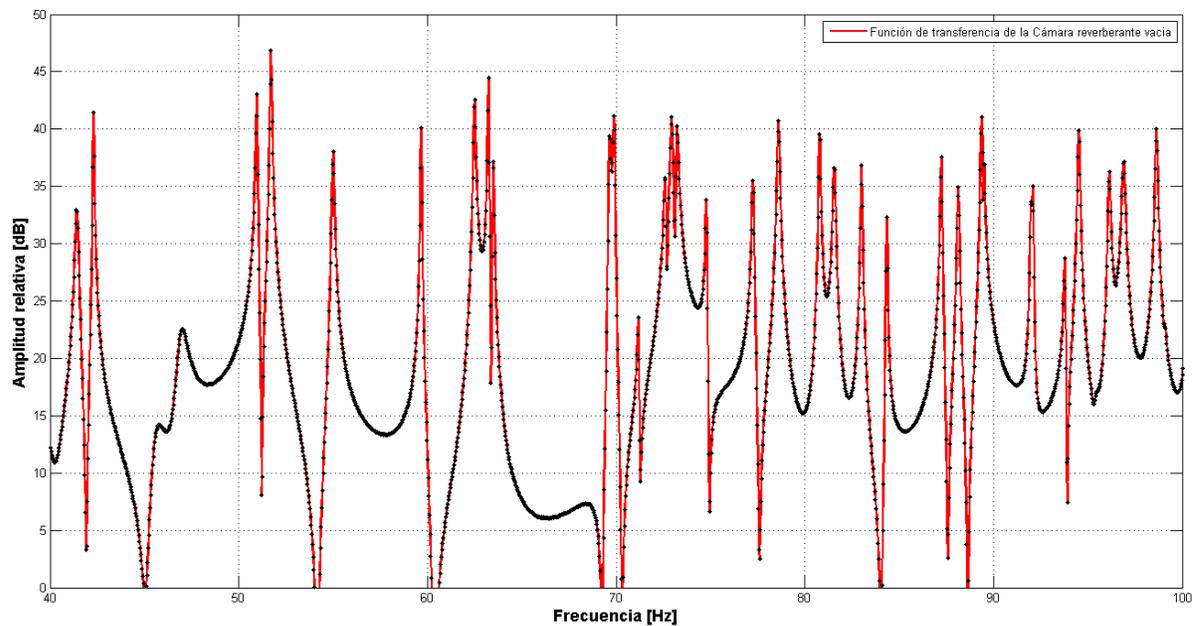


Figura 2.12. Función de transferencia de la cámara reverberante vacía, entre dos esquina opuestas.

2.2.1.1 Mediciones en campo modal

Inicialmente, para determinar la función de transferencia de la curva mostrada en la figura 2.12, se utilizó el analizador de señal de 2 canales B&K 2034, pero posteriormente se utilizó una tarjeta de adquisición NI modelo USB4431, que se programó con MATLAB. El programa se depuró hasta obtener los mismos resultados que con el analizador B&K 2034. Además, se agregó otro programa con el código para realizar la tarea de generar las señales de excitación que consisten en tonos puros con frecuencia igual a la de los modos, y capturar el decaimiento después de apagar el estímulo. Los micrófonos utilizados son los que actualmente están fijos dentro de la cámara reverberante; de los 6 micrófonos solo se movió el número 3, para colocarlos en la esquina opuesta de donde se colocó el altavoz (ver figura 2.11); los 5 micrófonos restantes se dejaron en la misma posición usual dentro de la cámara reverberante. Como fuente de excitación se utilizó un subwoofer. Para elegir el intervalo de frecuencias de medición, se decidió ubicarlo entre 40 Hz y 100 Hz, seleccionando los modos cuyas frecuencias se ubicaran en este intervalo de frecuencias.

La siguiente tabla VII muestra el equipo utilizado para la medición de la función de transferencia y el tiempo de reverberación con el método de Fuch y se menciona en general las características generales del equipo que se ocupó.

Cantidad	Descripción	Marca	Modelo	N/Serie
1	Interface de adquisición de datos	National Instrument	USB-4431	1665A42
1	Computadora PC	Dell	C7GJMM1	26572440889
1	Multiplexor de 8 canales	B&K	2811	1825513
1	Amplificador de medición	B&K	2636	1064056
1	Fuente de excitación (Subwoofer)	JBL		S/N
1	Amplificador de potencia	CROWN	XTi 1002	8500493184
1	Medidor de temperatura	White Box	CT485	CT485-RS-011037
1	Micrófono de medición	B&K	4166	2749906
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440630
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440619
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440633
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440624
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1201096

Tabla VII. Equipo utilizado para la medición propuesto por Zha y Fuch

Las frecuencias que se obtuvieron de dicha función de transferencia de la cámara reverberante son las que podemos ver en la tabla I que abarcan desde 40 a 100 Hz.

Frecuencia calculada	Frecuencia medida	p	q	r	Modo
42.3	41.44	2	0	0	Axial
42.5	42.34	1	0	1	Tangencial
47.4	46.97	0	1	1	Tangencial
51.8	50.97	2	1	0	Tangencial
51.9	51.74	1	1	1	Oblicuo
56.1	55.04	2	0	1	Tangencial
59.8	59.67	0	2	0	Axial
63.4	62.50	1	2	0	Tangencial
63.6	63.27	2	1	1	Oblicuo
63.5	63.50	3	0	0	Axial
70.2	69.67	0	2	1	Tangencial
70.2	69.94	3	1	0	Tangencial
73.2	72.64	2	2	0	Tangencial
73.3	72.97	1	2	1	Oblicuo
73.4	73.27	3	0	1	Tangencial
73.6	74.8	0	0	2	Axial
76.6	77.27	1	0	2	Tangencial
79.3	78.64	3	1	1	Oblicuo
79.4	80.84	0	1	2	Tangencial
82.0	81.60	2	2	1	Oblicuo
82.2	83.04	1	1	2	Oblicuo
84.7	84.37	4	0	0	Axial
84.9	No hay	2	0	2	Tangencial
87.2	87.27	3	2	0	Tangencial
89.6	88.17	0	3	0	Axial
89.8	89.40	4	1	0	Tangencial
90.0	89.50	2	1	2	Oblicuo
92.1	92.14	1	3	0	Tangencial
92.3	93.81	4	0	1	Tangencial
94.7	94.57	3	2	1	Oblicuo
94.8	95.47	0	2	2	Tangencial
96.9	96.17	0	3	1	Tangencial
97.1	96.94	1	2	2	Oblicuo
97.1	No hay	4	1	1	Oblicuo
97.2	No hay	3	0	2	Tangencial
99.1	98.67	2	3	0	Tangencial
99.2	100.2	1	3	1	Oblicuo
101.7	103.20	3	1	2	Oblicuo

Tabla VIII. Frecuencias de los modos propios de la cámara reverberante

- 1 Modo ocupados para la medición
- 2 Modulación y Rango Dinámico bajo
- 3 Posible
- 4 Rango Dinámico bajo
- 5 Modulación
- 6 Modo ocupado, pero se eliminó por error
- No hay Rango Dinámico muy bajo o fuera de rango

En la tabla VIII podemos ver un conjunto de columnas, la primera son las frecuencias calculadas con ayuda de la ecuación (1.6) para obtener las frecuencias propias y la segunda columna son las frecuencias que se obtuvieron de la gráfica de la figura 2.12., y las últimas son las referentes a los modos que están relacionadas dichas frecuencias.

Con la cámara reverberante vacía, se medía la función de transferencia, con el micrófono 3, a continuación se medía los tiempos de reverberación en los 6 micrófonos. Se introducía el material absorbente a medir dentro de la cámara reverberante. En las mediciones reportadas en el presente se utilizaron dos posiciones esquematizadas en la figuras 2.13 y 2.14 con la variante de poner 1 y 2 muestras por lado.

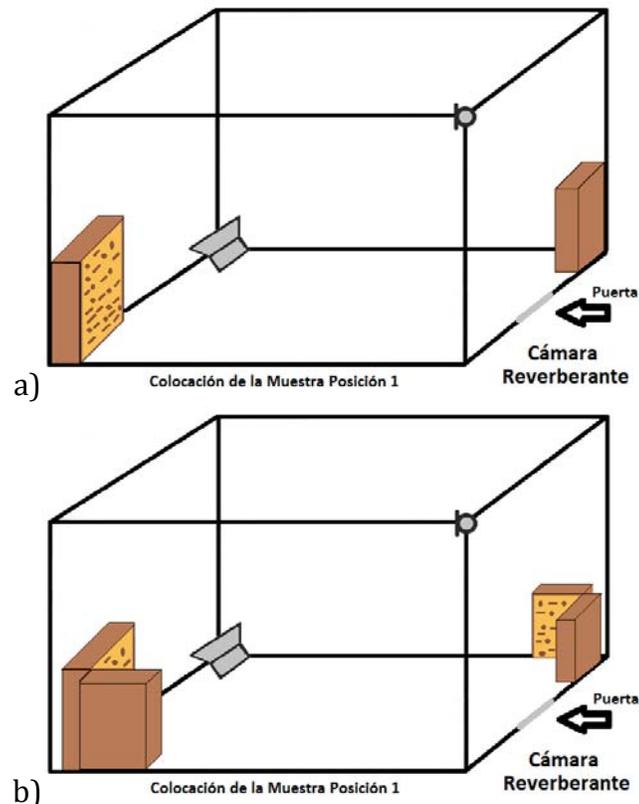


Figura 2.13. Primera posición de la(s) muestra(s) absorbente a medir. a) 1 Muestra por esquina, b) 2 muestras por esquina.

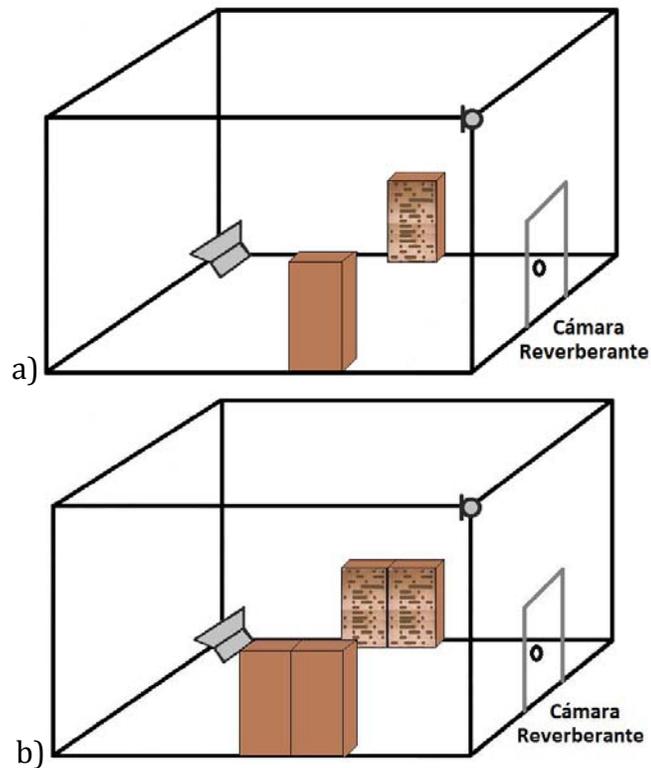


Figura 2.14. Segunda posición de la muestra absorbente a medir. a) 1 Muestra por lado en el eje X, b) 2 muestras por lado en el eje X.

En la gráfica de la figura 2.15 se puede ver en azul la función de transferencia atenuada al meter 1 muestra por lado a comparación con la gráfica roja que es la función de transferencia de la cámara reverberante vacía y por último la gráfica negra se ve más atenuada con 2 muestras por lado, en algunos casos se atenúa mucho y se combinan modos en la última gráfica.

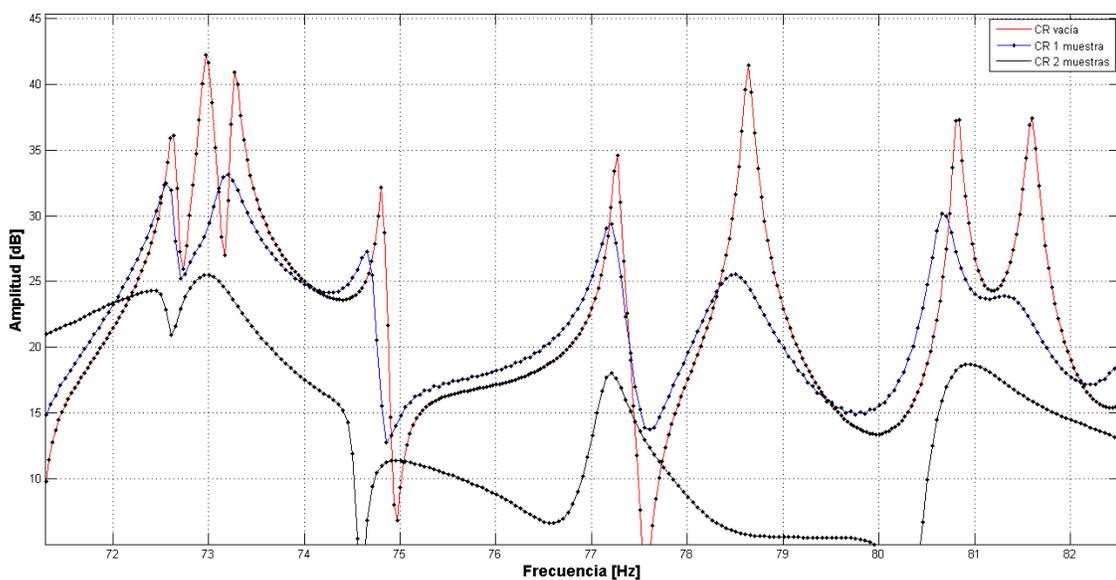


Figura 2.15. Atenuación del modo al colocar las muestras.

Posteriormente se obtuvieron las curvas de decaimiento con las frecuencias que se obtuvieron con las funciones de transferencia, pero se tuvo dificultad al medir los tiempos de reverberación con dichas curvas de las frecuencias de los modos que se encontraban muy cerca uno de otro. Esto hacia que la señal que captaba el micrófono se modulara por la interacción de dos o más modos cercanos en frecuencia; en la figura 2.16 se muestra ejemplos de curvas de decaimiento con y sin modulación.

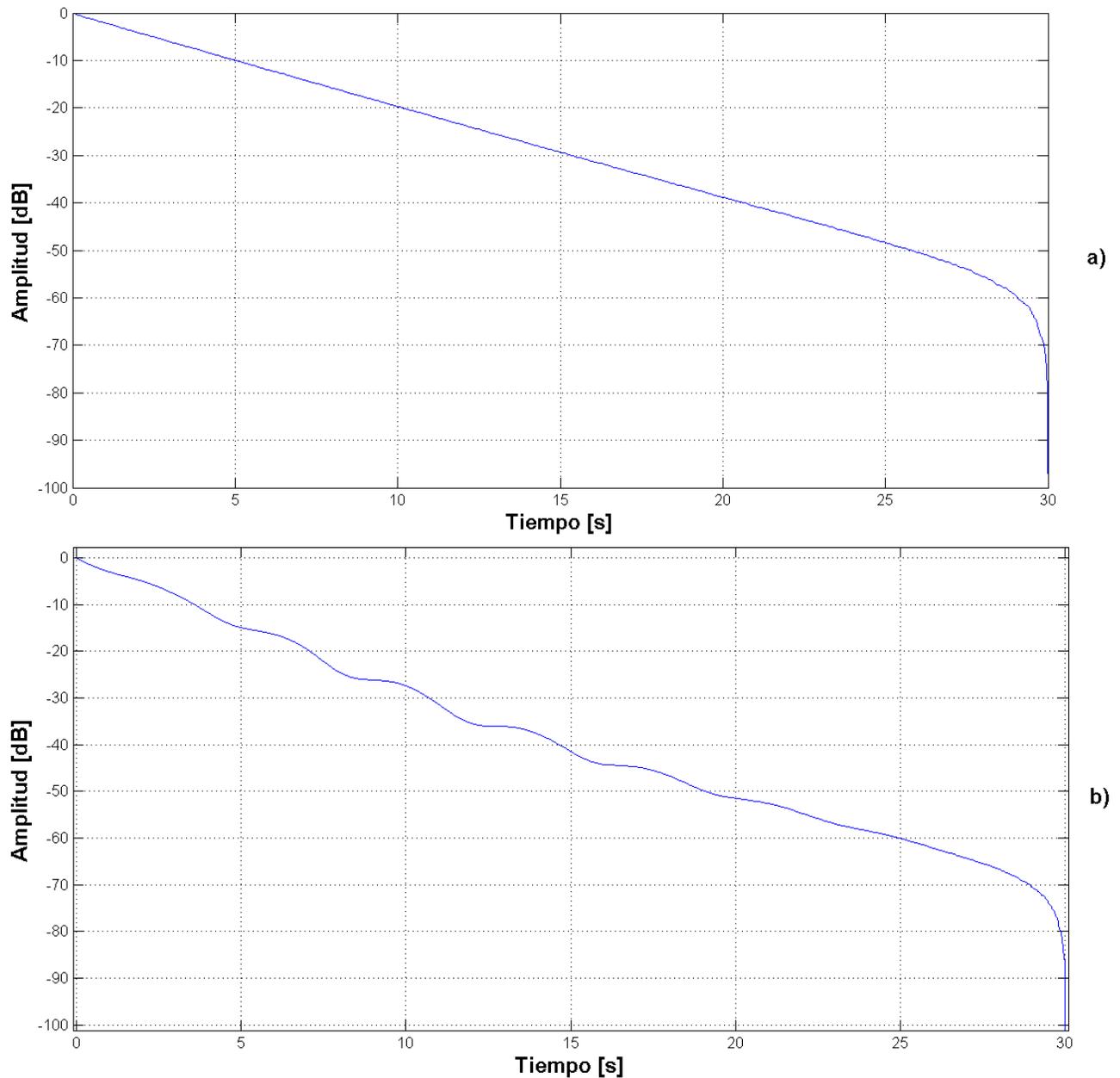


Figura 2.16. Ejemplos de curvas de decaimiento medidas a) sin modulación b) con modulación

El efecto de modulación puede aparecer por la existencia de 2 o más modos que estén ubicados cerca uno del otro(s) por la posición del micrófono. En la figura 2.17 podemos observar la existencia de 3 modos (axial (3,0,0), tangencial (1,2,0) y oblicuo (2,1,1)) en la frecuencia cercana a 63 Hz. La interacción con estos modos provocan la modulación de la curva de decaimiento entregándonos un error muy grande y por lo tanto, un tiempo de reverberación incorrecto y se evita no excitando a esa frecuencia. Este comportamiento se obtuvo en varias frecuencias y por lo tanto se tuvieron que desechar varias de ellas. En relación a la posición del micrófono y el comportamiento modal del campo sonoro dentro de la cámara reverberante también se ve dicha modulación por el bajo rango dinámico que está registrando dicho micrófono en la posición que está. Como se sabe de qué tipo de modo se trata (axial, tangencial, oblicuo), la modulación puede evitarse colocando el micrófono donde uno de los modos, de los que estén cercanos, tenga un mínimo de presión. Desafortunadamente, en nuestro arreglo experimental tenemos la limitante de que la colocación de los micrófonos esta fija y no fue posible moverlos para reducir el efecto de modulación.

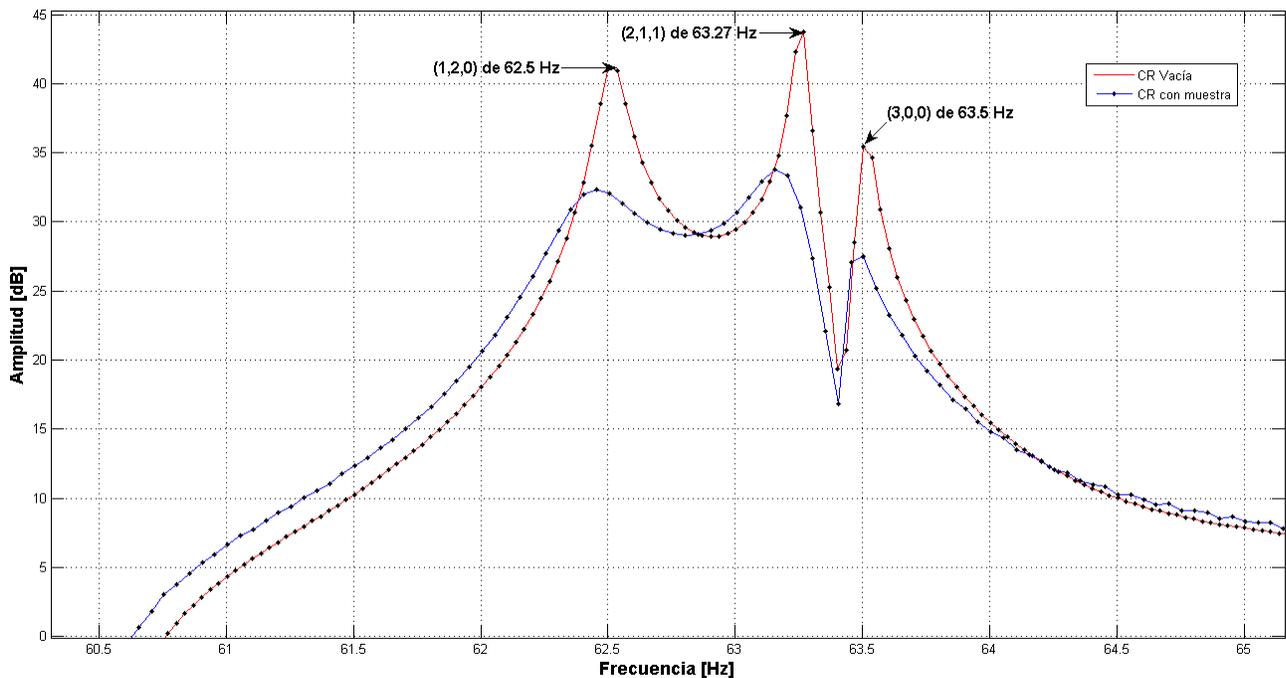


Figura 2.17. Efecto de modulación por la interacción de 3 modos.

Otro problema está referenciado al rango dinámico, bajo norma se requiere un nivel superior a los 35 dB y al no obtenerlo se tiene un error muy elevado y por lo tanto un tiempo de reverberación incorrecto. En la figura 2.18 se puede ver un ejemplo del nivel de presión de un modo axial y la distribución de los 6 micrófonos en la cámara, y en colores se puede ver la distribución del nivel normalizado de (0 en azul a 1 en rojo).

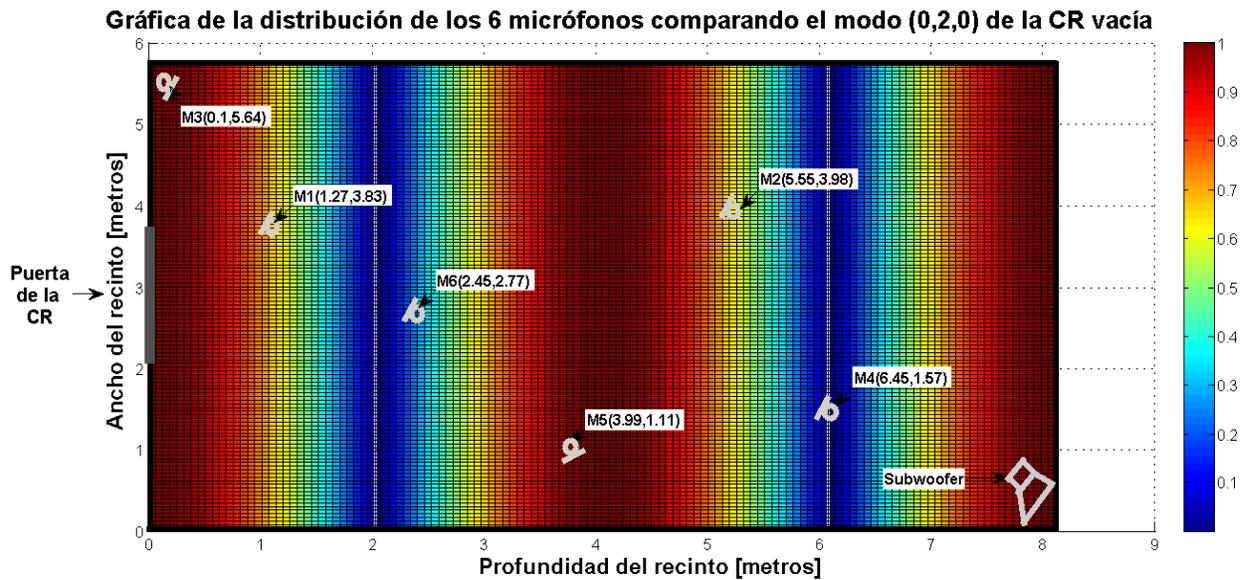


Figura 2.18. Niveles bajos de presión (zona azul) por la ubicación para micrófonos 4 y 6 y niveles altos para el micrófono 3.

Para cuantificar la modulación se determinó el grado de linealidad de la curva de decaimiento según lo que recomienda la norma [36]; esta evaluación del grado de linealidad equivale a una cuantificación del error con que se determinan los tiempos de reverberación.

Debido a que el material absorbente que se decidió medir son paneles diseñados para absorber en frecuencias bajas, estos tienen dimensiones que exceden lo recomendado por ISO 354, para considerarlos como absorbentes planos, por esta razón se decidió mostrar la absorción como la diferencia de los tiempos de reverberación (sin y con muestra) y posteriormente definir si al resultado conviene considerarlo como coeficiente de absorción o como área equivalente de absorción.

Teniendo un panorama general de los problemas que se tuvieron tanto por modulación como por rango dinámico las siguientes gráficas mostrarán dichos problemas y por lo tanto iniciaré a descartar los micrófonos y frecuencias para obtener un tiempo de reverberación apropiado para así obtener el área equivalente.

La figura 2.19 muestra la atenuación en decibelios de la función de transferencia considerando la cámara reverberante vacía, con 1 muestra y 2 muestras por esquina; y además en conjunto con la segunda posición en el eje de X considerando nada más la colocación de 1 y 2 muestras y la podemos ver en la figura 2.20 y con esto podemos descartar los micrófonos y la mayor parte de frecuencias. En comparación con las gráficas de las figuras 2.19 y 2.20, la figura 2.19 hay una gran atenuación entre la 1er y 2da muestra por lado y en la colocación de la 1 a 2 muestras por lado de la figura 2.20 no repercute mucho en la atenuación.

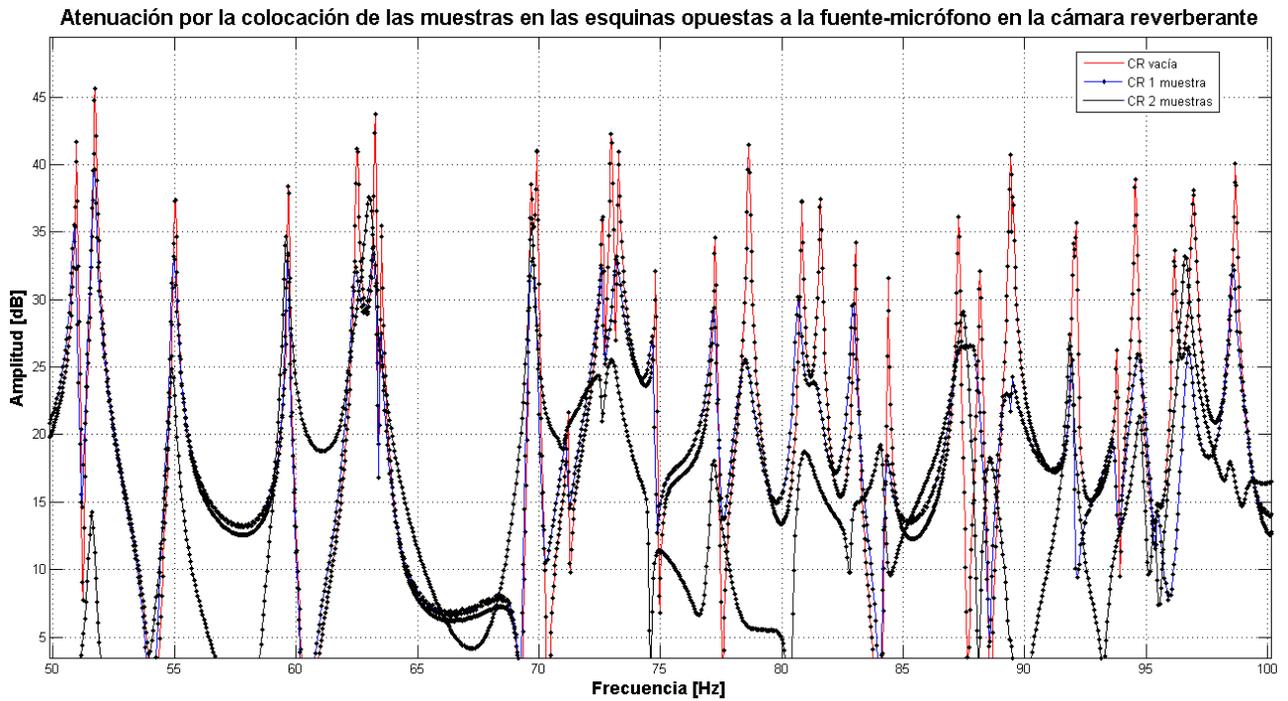


Figura 2.19. Atenuación de la función de transferencia con la cámara reverberante vacía y con muestras en contra esquinas a la colocación de la fuente-micrófono.

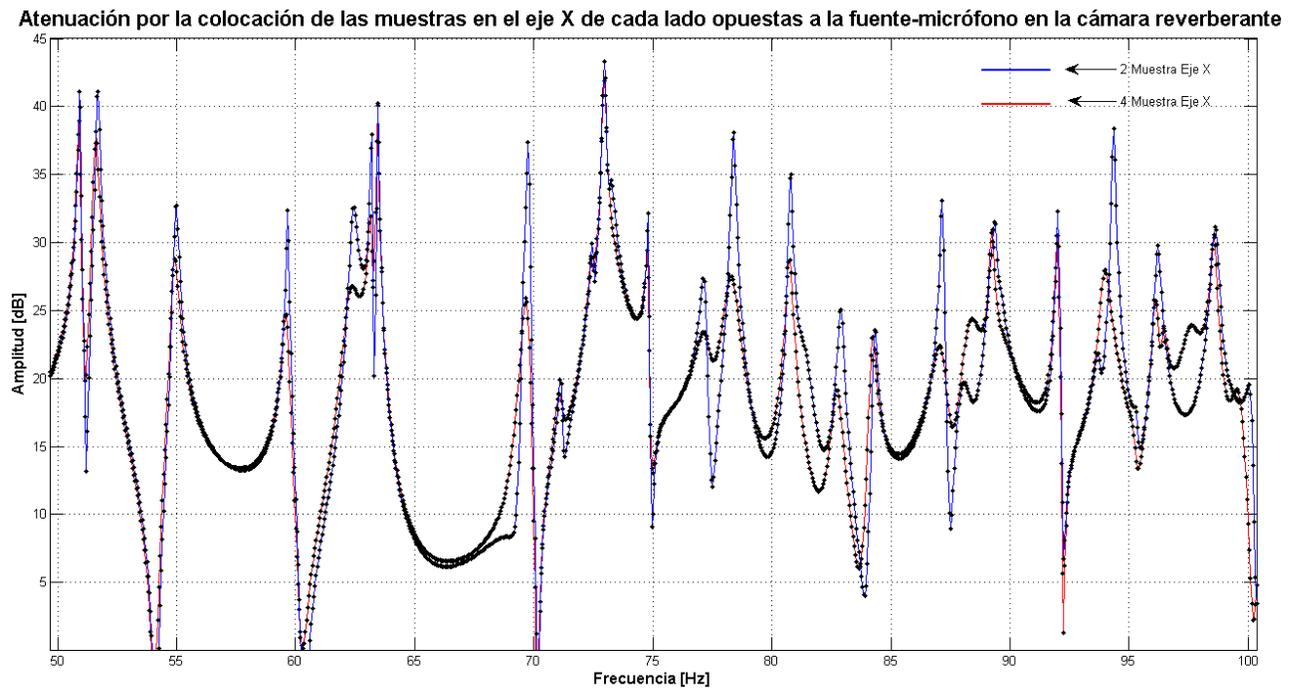


Figura 2.20. Atenuación de la función de transferencia con la cámara reverberante vacía y con muestras en el eje X.

Una vez comparadas las funciones de transferencia de la cámara reverberante vacía y con muestras en las 2 posiciones, se prosiguió a obtener los tiempos de reverberación para cada frecuencia observando errores muy elevados y por lo tanto tiempos incorrectos. Por lo que se realizó a analizar cada micrófono para cada frecuencia tanto por la modulación como por el rango dinámico. En la figura 2.21 podemos ver el tiempo de reverberación para 10 frecuencias previamente seleccionadas, o sea que no estuvieran juntas, con poco rango dinámico y para tener en forma general por bandas de frecuencia. Pero aun así se tuvieron errores y con ayuda de la gráfica de la figura 2.22 y 2.23 se analizó profundamente cada frecuencia, en este caso la frecuencia de 51.74, 80.84, 83.04, 92, 92.14 y 98.67 Hz y se puede ver que el micrófono 5 y 6 están en el área de azul y por lo tanto están en un nivel muy bajo de presión. En el caso de los micrófonos del 1 al 4 algunos están más cerca de la zona amarillo en el cual cubre un rango dinámico adecuado y para el micrófono 3 en la mayoría de las frecuencias tiene un rango dinámico óptimo.

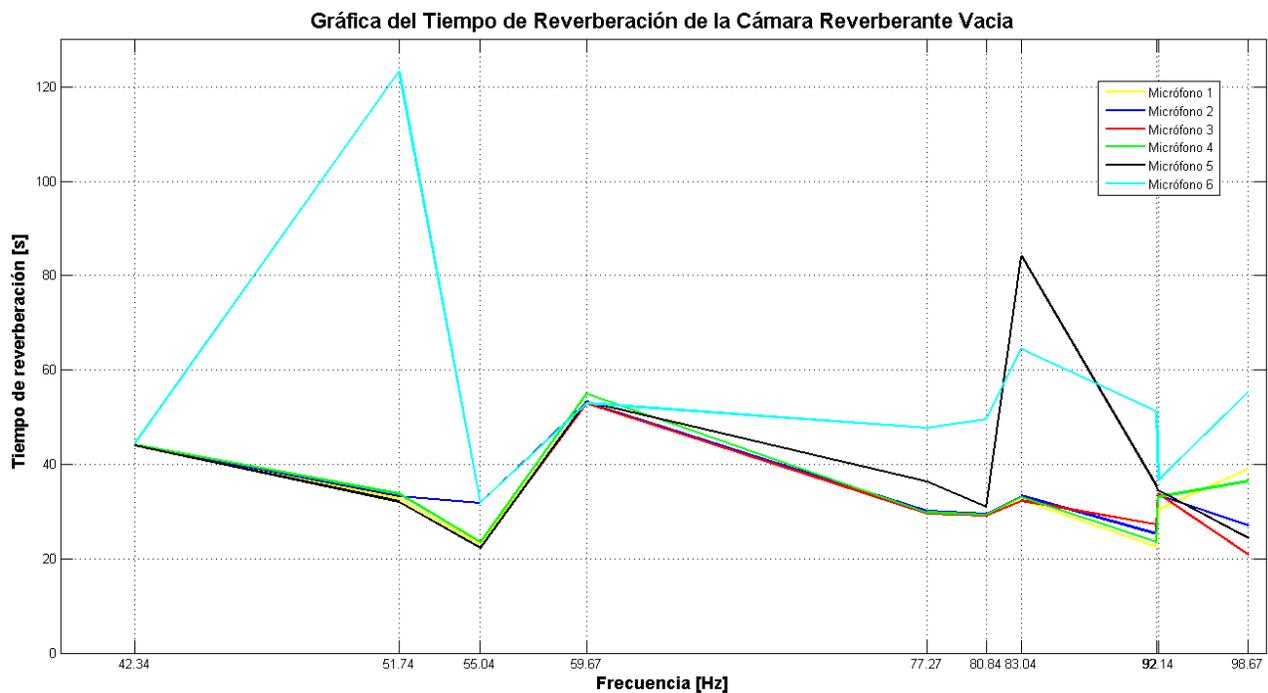


Figura 2.21. Atenuación de la función de transferencia con la cámara reverberante vacía y con muestras en el eje X.

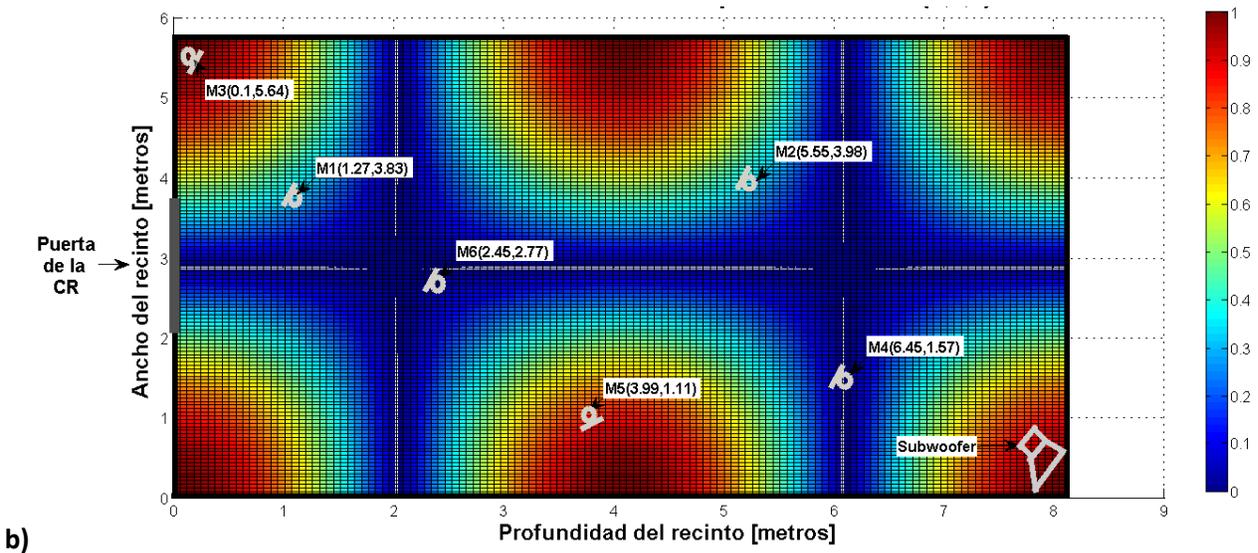
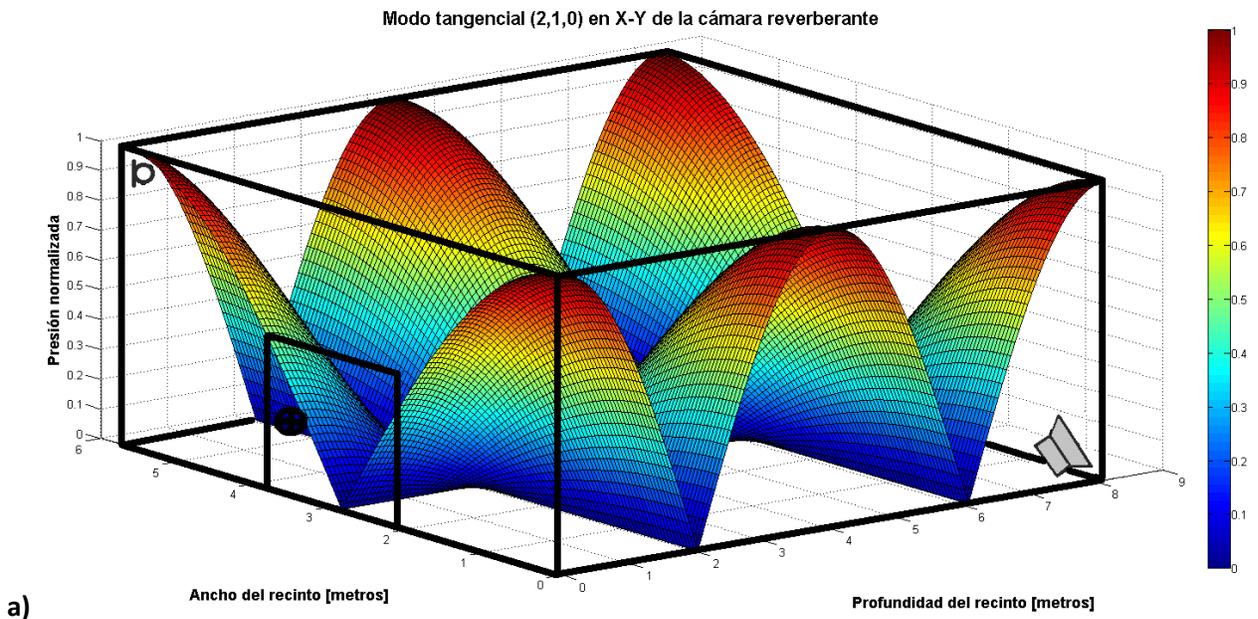


Figura 2.22. Vista del modo (2,1,0) de la frecuencia de 51.74 Hz, para la eliminación de los micrófonos.
a) Isométrico de la cámara reverberante. b) Vista de planta de la cámara

En la figura 2.23 podemos ver en relación al rango dinámico y la ubicación del micrófono afecta en la medición, recordando que para tener una curva de decaimiento debemos tener arriba de 35 decibeles para estar dentro de norma y no se tenga un error muy grande y por consecuencia un tiempo de reverberación incorrecto.

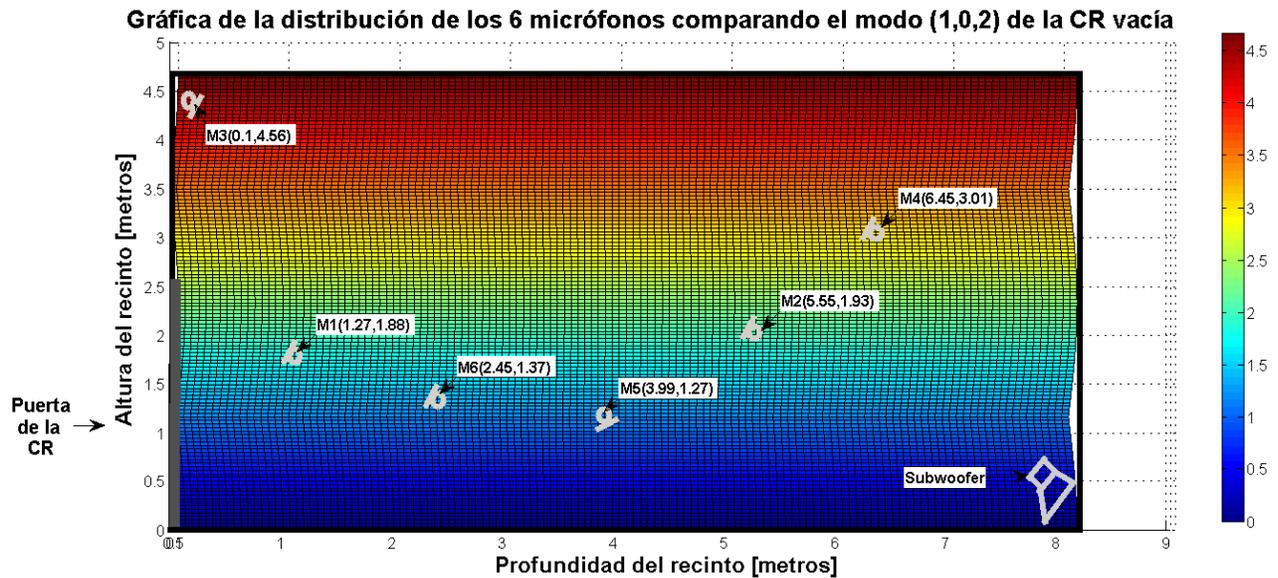


Figura 2.23. Vista lateral de la cámara reverberante y la colocación de los micrófonos para la visualización de los niveles de presión.

Al eliminar los micrófonos 5 y 6 por la mala posición que tiene dichos micrófonos con respecto a la mayoría de las frecuencias que se analizaron, la figura 2.24 podemos ver la comparativa de los tiempos de reverberación con y sin muestras en la posición de la esquina donde a) corresponde a el tiempo con 1 muestra por lado y b) corresponde a 2 muestras por lado.

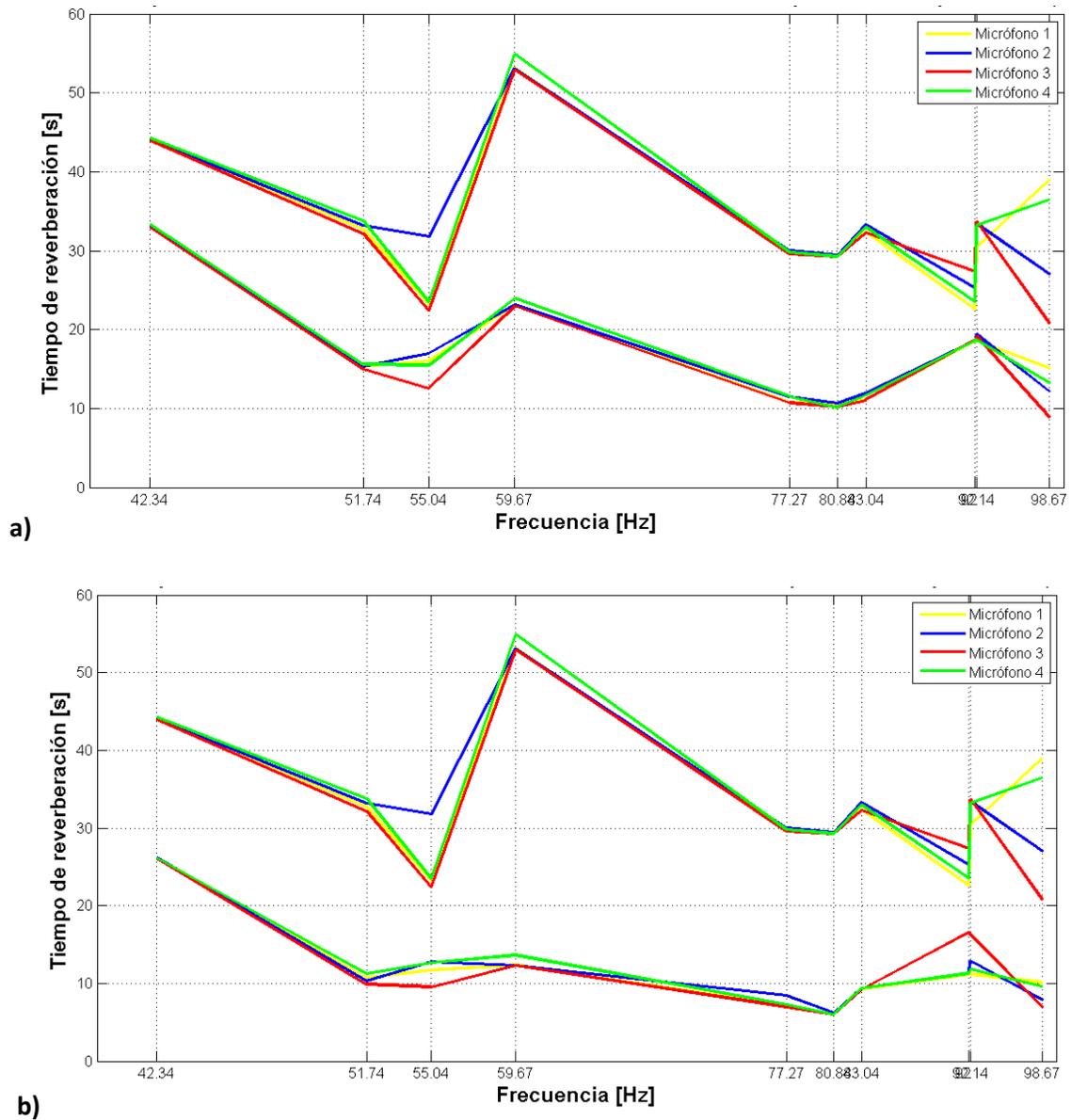


Figura 2.24. Tiempo de reverberación sin y 1 muestra en las esquinas por lado.
a) 1 muestra y b) 2 muestras

La gráfica 2.25 muestra la colocación en el eje X y además de la cantidad de las muestras, pero aún así el comportamiento por frecuencia varía, por lo que se analizará la eliminación de ciertas frecuencias.

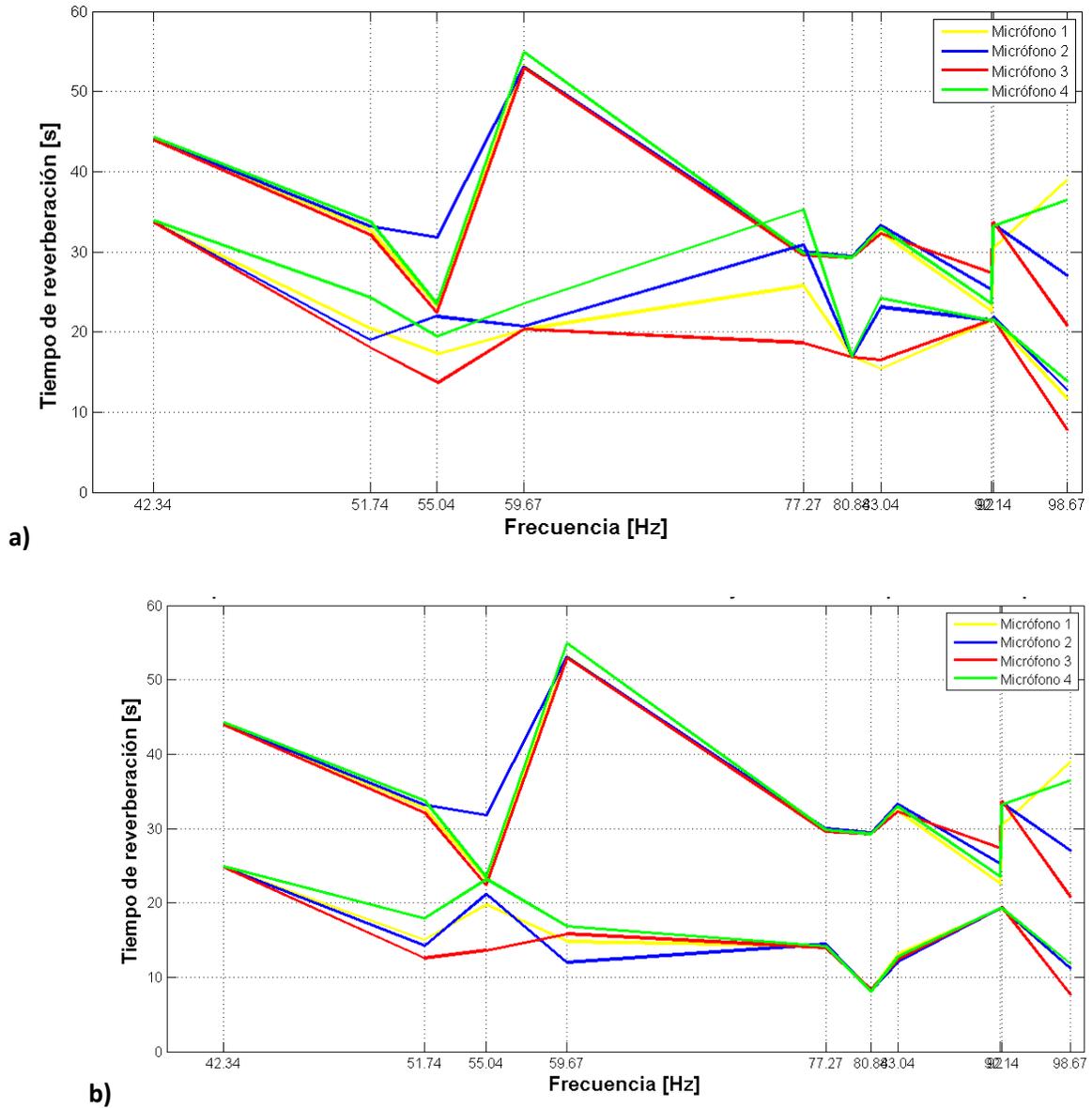


Figura 2.25. Tiempo de reverberación sin y 1 muestra en el eje X por lado.
a) 1 muestra y b) 2 muestras

Para la eliminación en relación a las frecuencias, se tomó la decisión que las frecuencias que varían el tiempo por micrófono, en la figura 2.26 se puede ver los tiempos de reverberación con respecto a la frecuencia con menos variación.

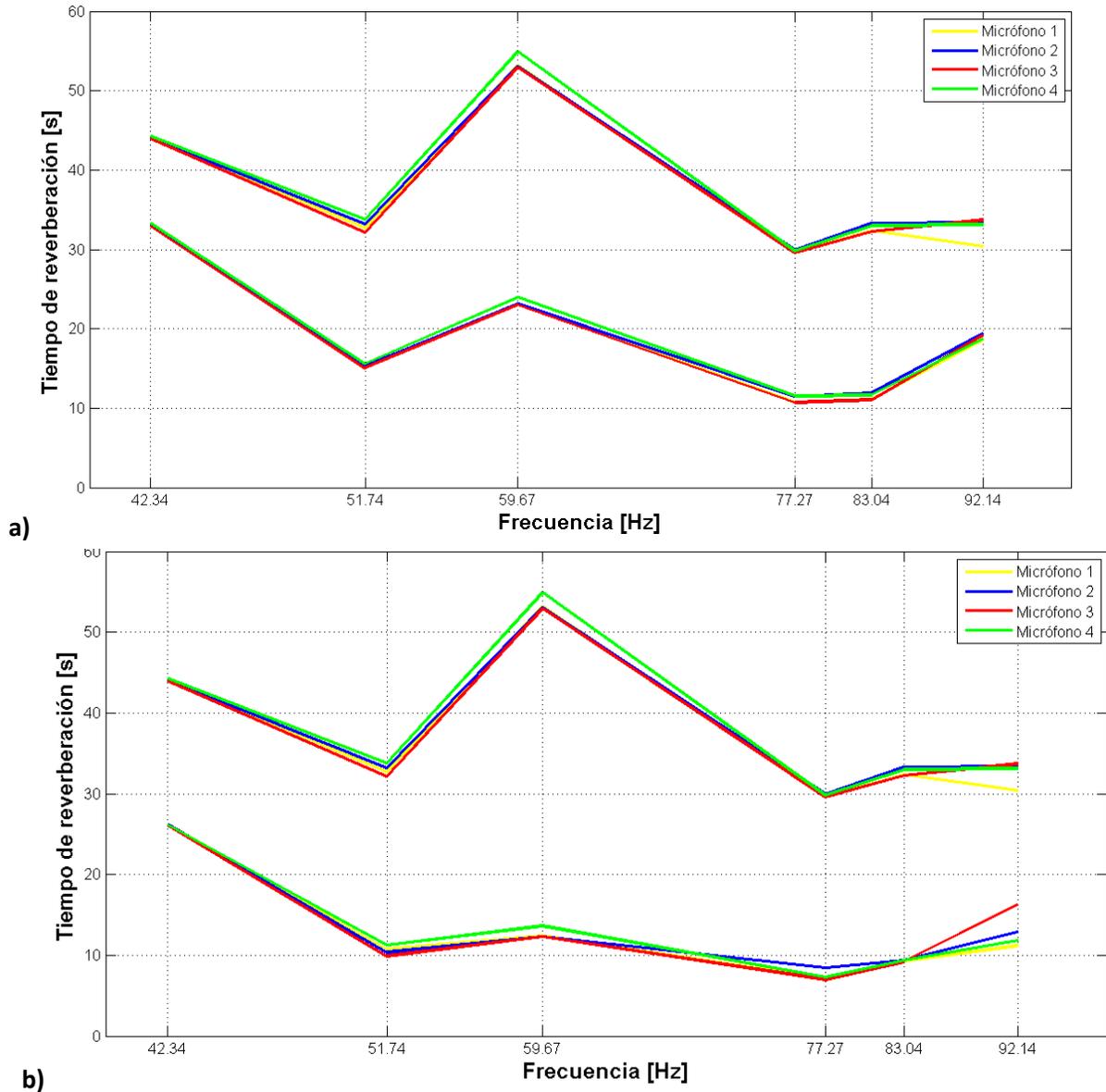


Figura 2.26. Tiempo de reverberación sin y con muestra en las esquinas por lado, para 6 frecuencias.
a) 1 muestra por esquina, b) 2 muestras por esquina.

Para la eliminación de la posición en el eje de X se tomó la decisión que las frecuencias que varían el tiempo con las 2 muestras por la gran variación y se puede observar en la figura 2.27. A comparación con la figura 2.26.

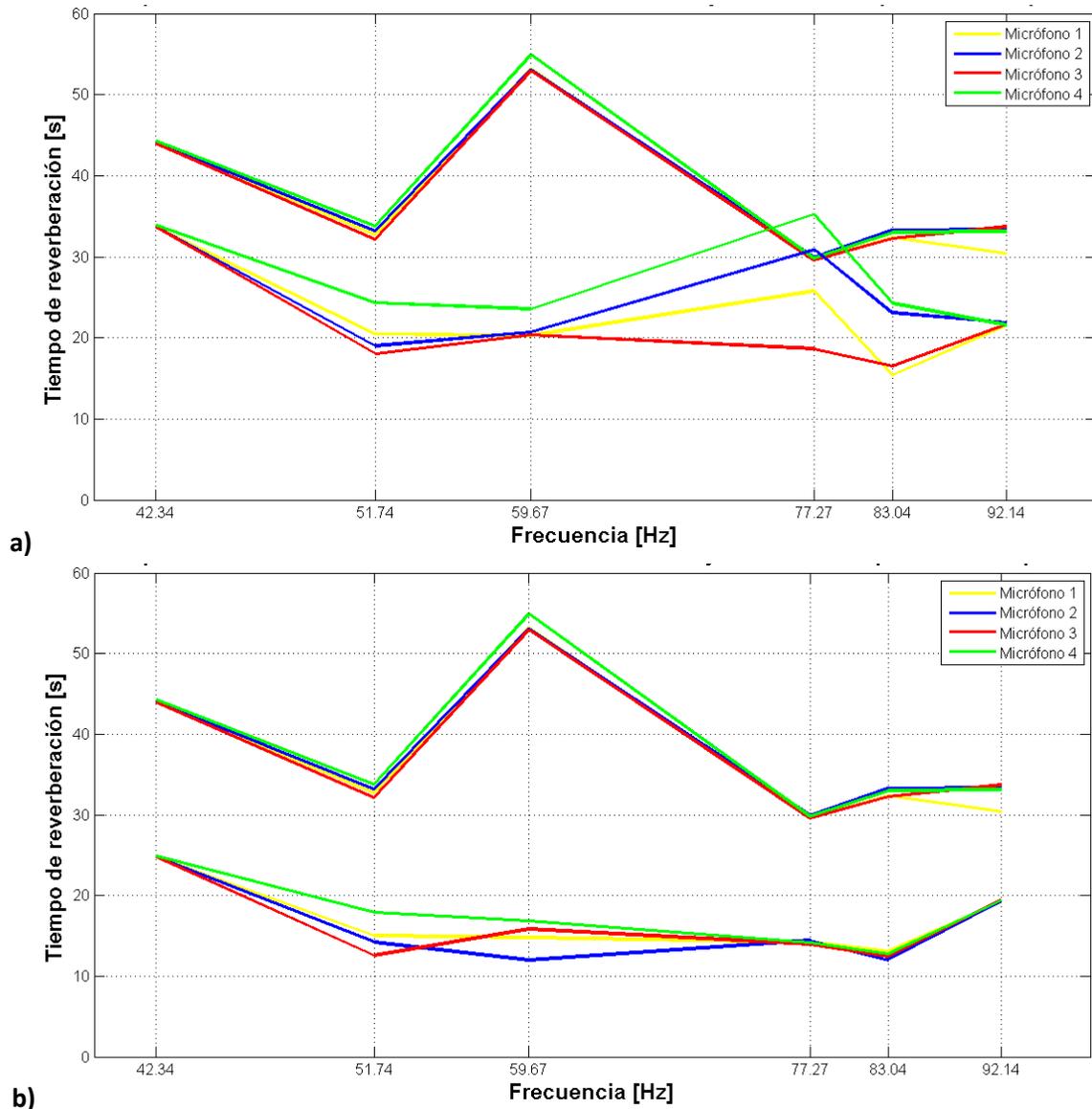


Figura 2.27. Tiempo de reverberación sin y con muestra en el eje X por lado, para 6 frecuencias.
a) 1 muestra por lado en el eje X, b) 2 muestras por lado en el eje X.

En el proceso de descartar micrófonos, se eliminó el micrófono 1 por la separación en la diferencia de los tiempos de reverberación de la figura 2.26 y 2.27 a) y b) y se obtuvo la figura 2.28, se ve la diferencia que existe entre la cámara reverberante vacía y con muestra en cada esquina, en la parte superior se observa la diferencia de la cámara vacía y 2 muestras por esquina y en la parte inferior es la vacía y 1 muestra por esquina. Los motivos fueron por la diferencia, la ubicación y que existe un error alto en una de sus frecuencias, y así tener los micrófonos necesarios para las conclusiones.

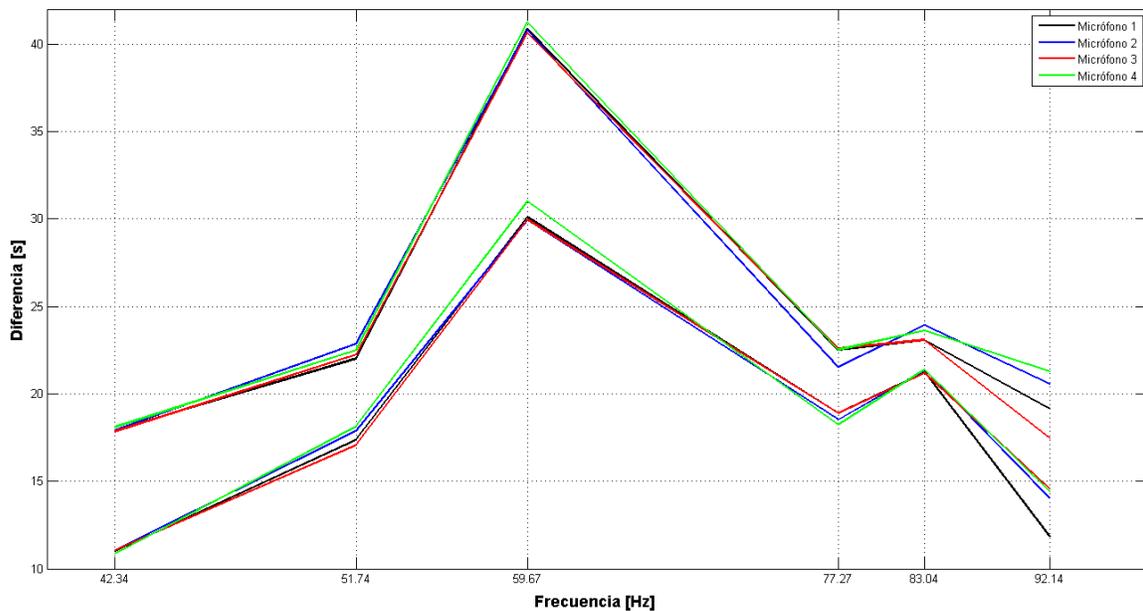


Figura 2.28. Diferencia de los Tiempo de reverberación sin y con muestra en las esquinas por lado, para 6 frecuencias. Arriba) 2 muestra por esquina, Abajo) 1 muestras por esquina.

Cabe mencionar que no se quito el micrófono 3 por ser la referencia y donde existe menor error, sin considerar la variación en la frecuencia de 92.14 Hz, posiblemente por la cavidad que se observa en la figura 2.29, y pueda afectar a frecuencias altas y por lo que me ocasione las variaciones de los tiempos.



Figura 2.29. Cavidad ocasionada en la colocación de 2 muestras por cada esquina.

Para terminar el método propuesto por Zha y Fuch, consideré la gráfica, de la figura 2.26 a) y b), con poca variación en el tiempo de reverberación y más estabilidad en relación a los micrófonos. La tabla IX contiene los tiempos de reverberación y el error del grado de no linealidad (EGNL) de la cámara reverberante vacía para cada una de las frecuencias de los modos propios y los 3 micrófonos seleccionados anteriormente en la figura 2.26 a).

Frecuencia	Micrófono 2		Micrófono 3		Micrófono 4	
	TR [s]	EGNL [%]	TR [s]	EGNL [%]	TR [s]	EGNL [%]
42.34	44.1	0.02	43.9	0.01	44.2	0.04
51.74	33.2	0.69	32.1	0.01	33.8	2.02
59.67	53.1	0.03	52.9	0.01	54.9	0.88
77.27	30.0	0.12	29.6	0.00	29.8	0.03
83.04	33.3	0.89	32.3	0.01	33.0	0.38
92.14	33.4	3.15	33.7	0.77	33.1	2.97

Tabla IX. Tiempo de reverberación de la cámara reverberante vacía para las 6 frecuencias y 3 micrófonos.

La tabla X contiene los tiempos de reverberación y el (EGNL) con 1 muestra por esquina de cada una de las 6 frecuencias de los modos propios y los 3 micrófonos seleccionados anteriormente en la figura 2.26 a).

Frecuencia	Micrófono 2		Micrófono 3		Micrófono 4	
	TR [s]	EGNL [%]	TR [s]	EGNL [%]	TR [s]	EGNL [%]
42.34	33.0	0.02	32.9	0.00	33.3	0.16
51.74	15.3	0.38	15.0	0.05	15.6	1.47
59.67	23.2	0.18	23.0	0.02	23.9	1.40
77.27	11.5	3.42	10.7	0.20	11.5	4.82
83.04	11.9	3.11	11.1	0.08	11.6	1.09
92.14	19.4	1.15	19.2	0.96	18.7	0.05

Tabla X. Tiempo de reverberación de la cámara reverberante con 1 muestra por esquina para las 6 frecuencias y 3 micrófonos.

La tabla XI contiene los tiempos de reverberación y el (EGNL) con 2 muestra por esquina para cada una de las 6 frecuencias de los modos propios y los 3 micrófonos seleccionados anteriormente en la figura 2.26 b). Podemos observar que el error aumenta por la situación que el material aumenta la absorción del nivel en la cámara reverberante y por lo tanto el rango dinámico disminuye, y causa que no se tenga el nivel necesario para obtener la curva de decaimiento con un buen nivel y por lo tanto aumente el error.

Frecuencia	Micrófono 2		Micrófono 3		Micrófono 4	
	TR [s]	EGNL [%]	TR [s]	EGNL [%]	TR [s]	EGNL [%]
42.34	26.1	0.01	26.1	0.00	26.1	0.11
51.74	10.3	2.00	9.9	0.25	11.2	9.71
59.67	12.3	0.01	12.3	0.01	13.6	2.19
77.27	8.5	16.73	7.0	1.57	7.2	4.20
83.04	9.4	0.18	9.2	0.05	9.4	0.26
92.14	12.9	13.56	16.3	74.13	11.8	2.18

Tabla XI. Tiempo de reverberación de la cámara reverberante con 2 muestra por esquina para las 6 frecuencias y 3 micrófonos.

En la figura 2.30 se ve el resumen de los tiempos de reverberación de la cámara reverberante vacía y con 1 y 2 muestras por esquina.

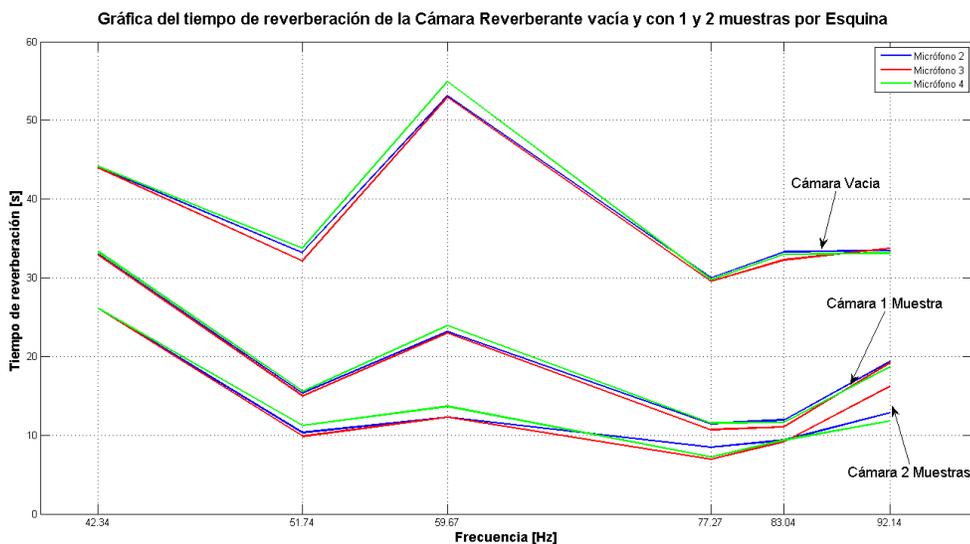


Figura 2.30. Tiempos de reverberación de la CR vacía y con 1 y 2 muestras por esquina.

El comportamiento de los tiempos de reverberación no existe mucha variación en dicho tiempo por lo que procederé a obtener las áreas equivalentes y coeficientes de absorción. Aunque al aumentar la cantidad de muestras se puede ver variación en la frecuencia de 92.14 Hz, por la posible disminución del rango dinámico, por el hueco que existe al tener 2 muestras por esquinas, porque en el caso de 1 muestra por esquina no existe variación. En la figura 2.31 podemos observar al área equivalente considerando solo 1 muestra por esquina, habiendo variación en las frecuencias de 77.27 y 83.04 Hz. Por otro lado, en la figura 2.32 se puede ver el coeficiente de absorción con 1 muestra por esquina.

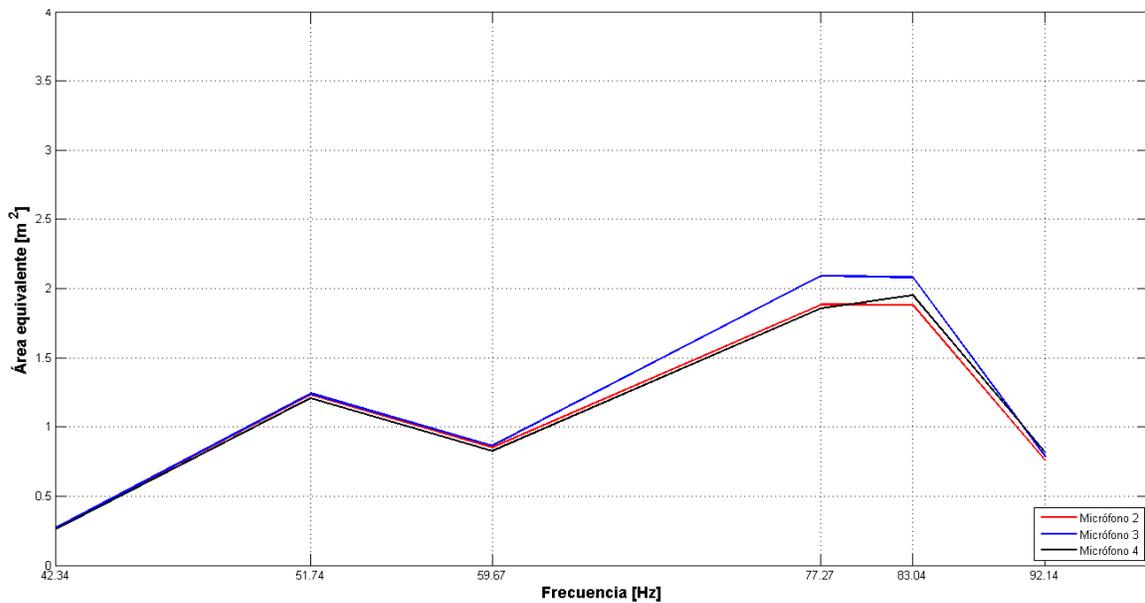


Figura 2.31. Área equivalente considerando 1 muestra por esquina.

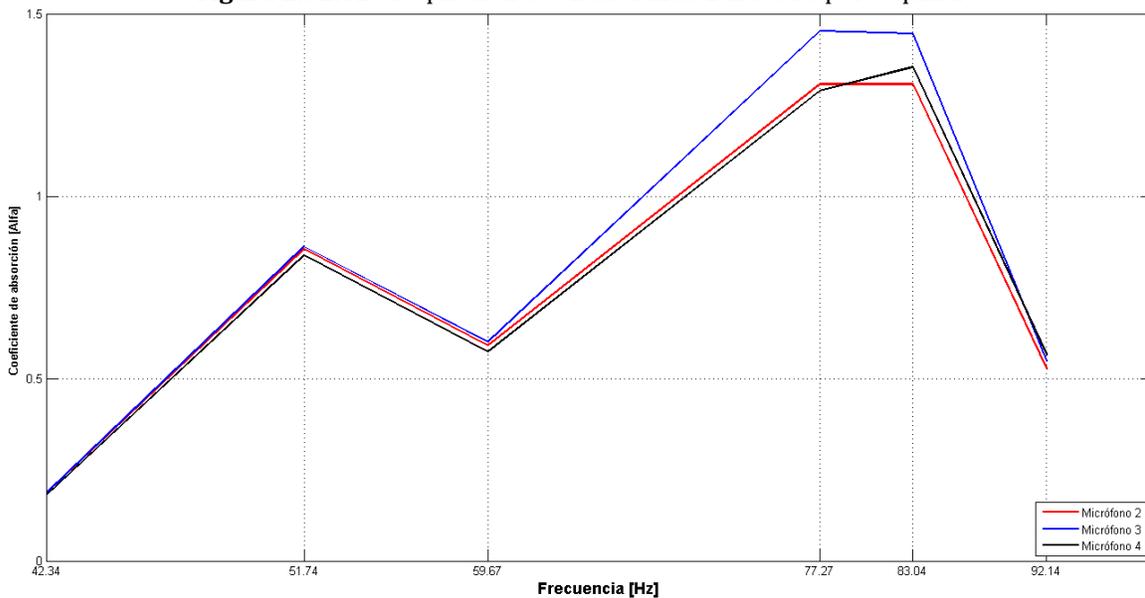


Figura 2.32. Coeficiente de absorción considerando 1 muestra por esquina.

En la figura 2.33 podemos observar al área equivalente considerando 2 muestras por esquina, habiendo variación en la mayoría de las frecuencias a causa de la absorción del material y por lo tanto, del modo. Por último, en la figura 2.34 se puede ver el coeficiente de absorción con 2 muestras por esquina.

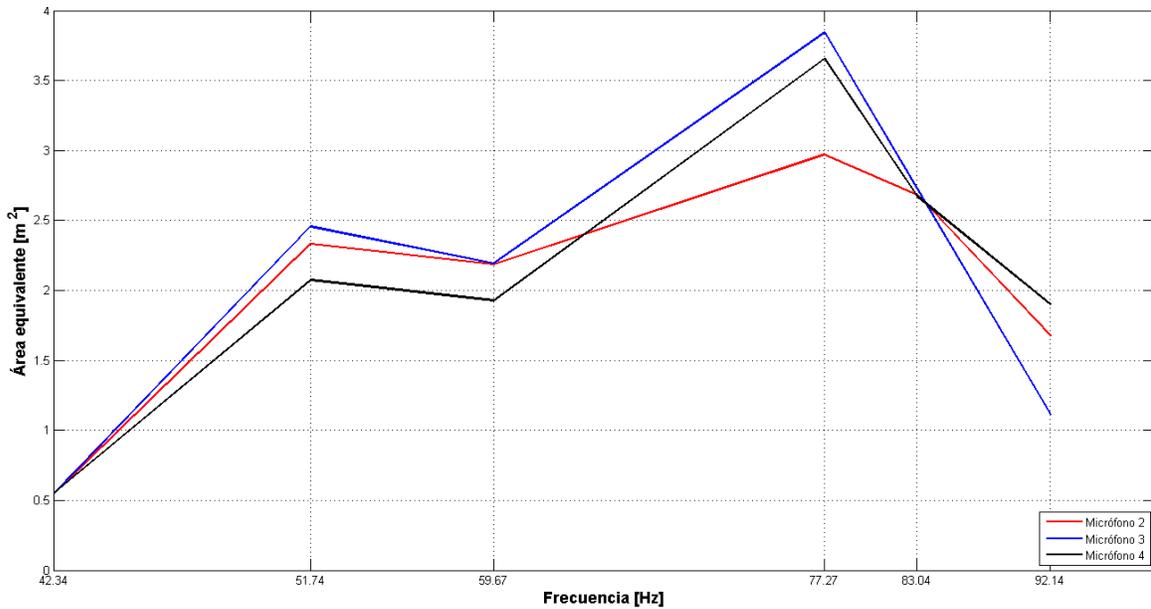


Figura 2.33. Área equivalente considerando 2 muestras por esquina.

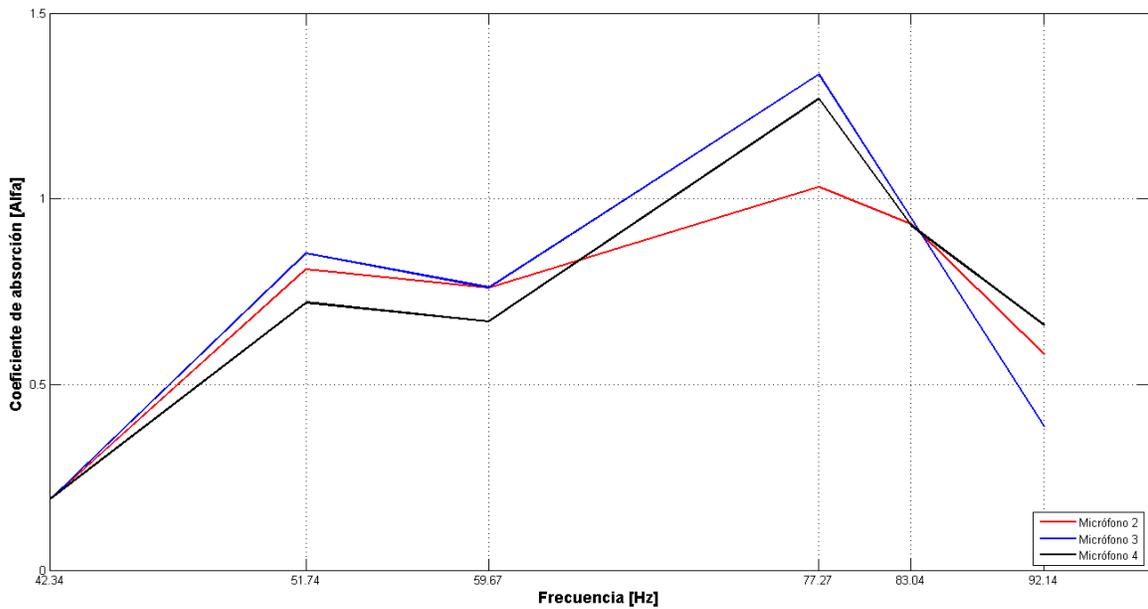


Figura 2.34. Coeficiente de absorción considerando 2 muestras por esquina.

Por último, se puede ver las tablas XII y XIII, los datos de los coeficientes de absorción y área equivalente, en la tabla XII se tienen para 1 muestra por esquina y en la tabla XIII se consideran 2 muestras por esquina.

		Frecuencias (Hz)					
		42.34	51.74	59.67	77.27	83.04	92.14
Micrófono 2	Área Eq	0.2663	1.2305	0.8512	1.8825	1.8818	0.7582
	α	0.1850	0.8545	0.5911	1.3073	1.3068	0.5265
Micrófono 3	Área Eq	0.2673	1.2405	0.8630	2.0915	2.0809	0.7880
	α	0.1856	0.8615	0.5993	1.4525	1.4450	0.5472
Micrófono 4	Área Eq	0.2586	1.2076	0.8264	1.8550	1.9499	0.8144
	α	0.1796	0.8386	0.5739	1.2882	1.3541	0.5656

Tabla XII. Áreas equivalentes y coeficientes de absorción con 1 muestra por esquina para las 6 frecuencias y 3 micrófonos.

		Frecuencias (Hz)					
		42.34	51.74	59.67	77.27	83.04	92.14
Micrófono 2	Área Eq	0.5446	2.3318	2.1876	2.9721	2.6837	1.6759
	α	0.1891	0.8096	0.7596	1.0320	0.9318	0.5819
Micrófono 3	Área Eq	0.5447	2.4560	2.1915	3.8434	2.7269	1.1156
	α	0.1891	0.8528	0.7609	1.3345	0.9468	0.3874
Micrófono 4	Área Eq	0.5494	2.0745	1.9276	3.6552	2.6732	1.9017
	α	0.1908	0.7203	0.6693	1.2692	0.9282	0.6603

Tabla XIII. Áreas equivalentes y coeficientes de absorción con 2 muestra por esquina para las 6 frecuencias y 3 micrófonos.

Capítulo III. Conclusiones y recomendaciones

La medición de absorción sonora (tiempo de reverberación) en frecuencias bajas, es una buena oportunidad de profundizar en las consideraciones físicas que sustenta el concepto de absorción sonora (tiempo de reverberación). La ecuación de Sabine, es un modelo sencillo que frecuentemente se aplica mal por hacer caso omiso de algunas consideraciones básicas. La condición de contar con un campo sonoro difuso dentro del recinto es la consideración fundamental. El riesgo de intentar medir en una gama de frecuencias donde no se cuenta con el comportamiento difuso del campo, obliga a examinar con cuidado prácticas de medición que damos por conocidas y dominadas.

La primera conclusión que se desprende de este trabajo es que la absorción medida dependerá de la posición donde se coloque la muestra a medir, contrariamente a lo que se logra en la medición de absorción en frecuencias altas (donde existe un campo difuso).

La segunda es que el tamaño de la cámara reverberante no importa, pero cabe mencionar que para recintos pequeños se tiene un mayor control sobre la posición de los micrófonos y esto facilita la medición de los modos.

La tercera es que es muy importante seleccionar cuidadosamente la colocación del micrófono para no tener problemas de bajos niveles de presión sonora y por lo tanto, tiempos incorrectos, por insuficiente relación señal a ruido.

La cuarta, evitar excitar con tonos muy próximos en frecuencia, o sea, que tengas 2 o más modos cerca uno de otro, como por ejemplo en la frecuencia de 63 Hz, se tuvo 3 modos un tangencial (1,2,0) con frecuencia de 62.5 Hz, uno oblicuo (2,1,1) con frecuencia de 63.27 Hz y un axial (3,0,0) con frecuencia de 63.5 Hz, y eso provocó modulación en la curva de decaimiento provocando un tiempo de reverberación incorrecto.

Como trabajo a futuro se consideran las siguientes actividades:

- Obtener la función de transferencia de la cámara reverberante, para visualizar los modos propios. Al tener dichos modos se tendrían 2 elementos para descartar las frecuencias con las que no se va a trabajar. La 1era sería la ubicación del modo con respecto al micrófono, si esta fuera de la presión máxima se tiene que descartar por deficiencia de rango dinámico y la 2da es porque estén muy cerca uno de otro (en este caso el de 63 Hz).
- Realizar mediciones comparativas empleando, por ejemplo, materiales con diferentes composiciones o un mismo material con diferentes cantidades. Se podría utilizar la misma cámara reverberante y las mismas condiciones de medición.
- Realizar mediciones comparativas empleando, por ejemplo, ubicaciones diferentes para un mismo material, o mismas posiciones (fuente micrófono) con diferentes materiales (o diferentes configuraciones del mismo material).
- Trabajar para mejorar la repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones y tratar de generar un proceso de medición normalizado.

Referencias

- [1] Who, 2011: Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf
- [2] Pedersen S., Moller H., Persson K. W. "Indoor measurements of noise t low frequencies – problems and solutions" Jr. Low frequency noise, vibration and active control vol 26 (4) pp 249-270, 2007.
- [3] Norma ISO 354:2003. Acoustics-measurement of sound absorption in a reverberation room. The international organization for standarization.
- [4] R. O. Neubauer, J. Kang, Subjective evaluation of airborne sound insulation below 100 Hz. Joint conference on acoustics - AIA-DAGA 2013, Merano, Italy, (2013).
- [5] B. Rasmussen, and J. Lang: How much protection do the sound insulation standards give and is this enough? Euronoise, Edinburgh, Scotland, (2009).
- [6] W. Scholl, J. Lang, V. Wittsock, Rating of sound insulation at present and in future. The revision of ISO 717, Acta Acustica United con Acustica 97 (4), (2011)
- [7] Holger Larsen, "Reverberation at low frequencies", Technical Review No. 4, 19
- [8] X. Zha, H.V. Fuchs, C. Nocke y X. Han, "Measurement of an effective absorption coefficient below 100 Hz", 1999.
- [9] Carl Hopkins, "Sound insolutions", 2007.
- [10] Kuttruff, Heinrich, "Room acoustics", 5ta. Edición, 2009.
- [11] Kosten, C.W. (1960). The mean free path in room acoustics, Acústica, 10, 245-250.
- [12] Kuttruff, H. (1979). Room acoustics, 2da. Edition, Applied Science Publishers Ltd, Barking, England.
- [13] Norma ISO 3382-1:2009. Acoustics "Measurement of room acoustic parameters"
- [14] Schroeder, M.R. (1965). New method of measuring reverberation time, Journal of the Acoustical Society of America, 37, 409–412.78.
- [15] Müller, S. and Massarani, P. (2001). Transfer-function measurement with sweeps. Journal of the Audio Engineering Society, 49, 443–471.

- [16] Lundeby, A., Vigran, T.E., Bietz, H. and Vorländer, M. (1995). Uncertainties of measurements in room acoustics, *Acustica*, 81, 344–355.
- [17] Nilsson, E. (1992). Decay processes in rooms with non-diffuse sound fields. Report TVBA-1004, Doctoral dissertation, Lund Institute of Technology, Sweden.
- [18] Vorländer, M. and Bietz, H. (1994). Comparison of methods for measuring reverberation time, *Acustica*, 80, 205–215.
- [19] Davy, J.L., Dunn, I.P. and Dubout, P. (1979). The variance of decay rates in reverberation rooms, *Acustica*, 43, 12–25.
- [20] Davy, J.L. and Dunn, I.P. (1987). The statistical bandwidth of butterworth filters, *Journal of Sound and Vibration*, 115 (3), 539–549.
- [21] Schroeder, M.R. (1979). Integrated-impulse method measuring sound decay without using impulses, *Journal of the Acoustical Society of America*, 66 (2), 497–500.
- [22] Bjor, O-H. (1995). M-sequence for building acoustic measurements, *Proceedings of the Institute of Acoustics*, 17 (5), 101–109.
- [23] Vorländer, M. and Kob, M. (1997). Practical aspects of MLS measurements in building acoustics, *Applied Acoustics*, 52 (3/4), 239–258.
- [24] ISO 18233:2006 Acoustics – Application of new measurement methods in building and room acoustics, International Organization for Standardization.
- [25] Stan GB, Embrechts JJ, Archambeau D. Comparison of different impulse response measurement techniques. *J Audio Eng Soc* 2002; 50:249, etc.
- [26] Cremer L., Muller H. Principles and applications of rooms acoustics. Applied Science Publishers Ltd. 1982
- [27] Farina A. “Simultaneous measurement of impulse response and distortion with swept-sine technique AES 108 Th Convention, Paris 2000.
- [28] ISO 18233. Applications of new measurement methods in building and room acoustics. 2006.
- [29] Vercammen M., Lautenbach M. “Can we use the standard deviation of the reverberation time to describe diffusion in a reverberation chamber?” AIA–DAGA, Merano Italy, 2013.
- [30] Lautenbach M., Vercammen M. “Volume diffusers in the reverberation room”. ICA Sydney, 2010.

- [31] Mange G. E. "The effect of mean free path on reverberation room measurement of absorption and absorption coefficients". Noise Control Eng. J. vol 53 (6), pp. 258-270, 2005.
- [32] Mašovic D. "Low frequency measurements in building acoustics. Analysis of reverberation time. Field measurement results". 20th Telecommunications forum TELFOR, Servia, 2012.
- [33] D'Antonio P., Rife B. "The use of multi-microphone measurements of directional and random incidence acoustical coefficients", Acoustics, Hong Kong, 2012.
- [34] Vercammen M. "Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354". International Symposium on Room Acoustics, ISRA, 29-31 August Melbourne Australia, 2010.
- [35] Jacobsen F. "Decay rates and wall absorption at low frequencies". Journal Sound and Vibration Vol. 81(3), pp. 405-412, 1982.
- [36] Norma ISO 3382-2:2008. Acoustics "Measurement of room acoustic parameters", Part 2: "Reverberation time in ordinary rooms"

Otras referencias

- American Standard Specification for "Octave, Half-Octave and Third-Octave Band Filter Sets", 1966.
- A. Cops, J. Vanhaecht dz K. Leppens, "Sound Absorption in a Reverberation Room: Causes of Discrepancies on Measurement Results", 1995.
- Murray Hodgson, "When is Diffuse-Field Theory Applicable?" 1996.
- H.V. Fuchs, X. Zha, M. Pommerer, "Qualifying freefield and reverberation rooms for frequencies below 100 Hz", 1999.
- H.V. Fuchs, X. Zha, X. Zhou, H. Drotleff, "Creating low-noise environments in communication romos", 2001.
- X. Zha, H.V. Fuchs, H. Drotleff, "Improving the acoustic working conditions for musicians in small spaces", 2002.
- Fergus Fricke, "The Accuracy of Sound Absorption Measurements", 2002.
- Emma J. Carlisle y Robert J. Hooker, "Small Chamber Reverberant Absorption Measurement", 2004.

- Zhu Xiaotian, Zhu Zhemin, Cheng Jianchun, “Using Optimized Surface Modifications to Improve Low Frequency Response in a Room”, 2004.
- Steffen Pedersen, Henrik Møller and Kerstin Persson Waye “Indoor Measurements of Noise at Low Frequencies – Problems and Solutions”, 2007.
- M.L.S. Vercammen, “Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354”, 2010.
- Higini Arau-Puchades, “Revisión del Tiempo de Reverberación: El Método de Cálculo, la Precisión Predictiva y la Ley”, 2010.
- Finn Jacobsen, “The Sound Field in a Reverberation Room”, 2011.
- Draško Mašović, “Low Frequency Measurements in Building Acoustics – Analysis of Reverberation Time Field Measurement Results”, 2012.
- Dr. Santiago Pérez Ruiz, Ing. Ricardo Franco Pérez y Arq. Antonio Bautista Kuri “Estudio sobre la determinación del Área de Absorción Sonora Equivalente de los paneles del Material A100, Método de la Cámara Reverberante”, 2013.
- David T. Bradley y Jacob Adalgren, “Comparison of hanging panels and boundary diffusers in a reverberation chamber”, 2013.
- *Eric Desart*, “Playing with Sabines for baffles, diagonal absorption & plain panels”.

Apéndice

A.1. Explicación (procedimiento) de los métodos

A.1.1 Procedimiento de medición de la función de transferencia para la obtención de las frecuencias de los modos propios y los tiempos de reverberación por debajo de 100 Hz, de la Cámara Reverberante del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM.

Introducción

Con este procedimiento de medición se obtendrán las frecuencias de los modos propios de excitación, las curvas de decaimiento del Nivel de Presión Sonora (NPS) y los Tiempos de Reverberación (TR) de la Cámara Reverberante (CR), por medio de algoritmos especializados programados en MATLAB con lo que se calculará el porcentaje de Error del Grado de No Linealidad (EGNL), de dichas curvas y así obtener los coeficientes de absorción por debajo de los 100 Hz, utilizando el método de H.V Fuchs.

Equipo de Medición

Cantidad	Descripción	Marca	Modelo	N/Serie
1	Interface de adquisición de datos	National Instrument	USB-4431	1665A42
1	Computadora PC	DELL	C7GJMM1	26572440889
1	Multiplexor de 8 canales	B&K	2811	1825513
1	Amplificador de medición	B&K	2636	1064056
1	Fuente de excitación (Subwoofer)	JBL		S/N
1	Amplificador de potencia	CROWN	XTi 1002	8500493184
1	Medidor de temperatura	White Box	CT485	CT485-RS-011037
1	Micrófono de medición	B&K	4166	2749906
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440630
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440619
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440633
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1440624
1	Micrófono de medición	B&K	4166	1201096

Procedimiento de medición

La medición de los coeficientes de absorción por debajo de 100 Hz por el método de H.V Fuchs, se dividirá en dos partes:

1. Medición de la función de transferencia y
2. Medición del tiempo de reverberación.

Para dicho procedimiento es necesario dar el dato: “d” que es la duración de la señal de prueba, que es chirp logarítmica va desde $f_0=20$ Hz a $f_1=600$ Hz para cubrir la gama de bajas frecuencias de interés, y al final del programa está la sección de salvar, donde se salvan los siguientes archivos: “M1h”, que es la respuesta impulso de la señal capturada y “M1HFT”, que corresponde a los datos de la función de transferencia y “M1f”, que es el eje de frecuencia.

Pasos a seguir para medir la función de transferencia y obtener las frecuencias propias de la Cámara Reverberante:

1.- Cargar el programa con nombre “funcion_de_transferencia_CR.m” elaborado con el software MATLAB® R2010b, que se localiza en la carpeta: “C:\Documents and Settings\acustica\Mis documentos\Proyecto Ricardo Agosto 2014\Función de Traserencia\ funcion_de_transferencia_CR.m”.

2.- Una vez cargado dicho programa asegúrese de tener conectado el equipo de medición como se muestra en la figura 1, en la que se puede ver la conexión del equipo en el cuarto de control y en la Cámara Reverberante.

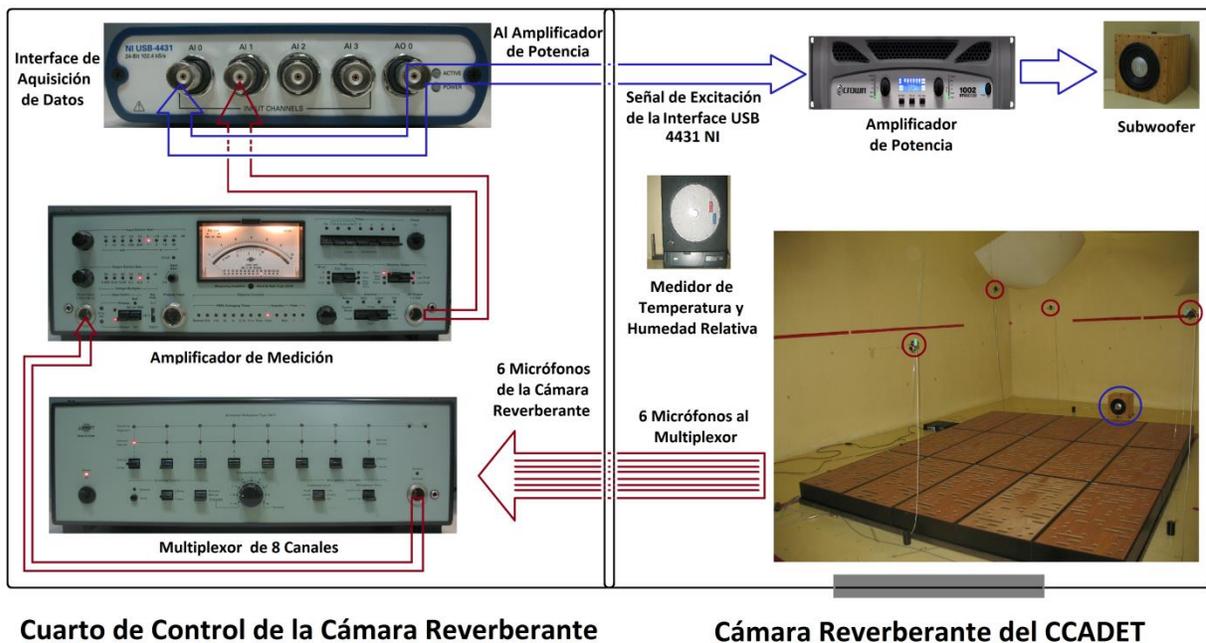


Figura 1. Diagrama esquemático de la conexión del equipo para la medición de la función de transferencia.

3.-Una vez conectado y encendido el equipo se mide la humedad relativa y la temperatura en la Cámara Reverberante, posteriormente se procede a correr el programa mencionado en el punto 1. La medición se debe realizar, primero con la Cámara Reverberante sin la muestra de material absorbente y posteriormente con la muestra, para obtener las frecuencias propias de la cámara. Un ejemplo de la gráfica de la función de transferencia que se obtiene con la Cámara Reverberante sin muestra se puede ver en la figura 2, donde se pueden observar los modos (picos de la gráfica) en un ancho de banda que va desde 50 hasta 100 Hz.

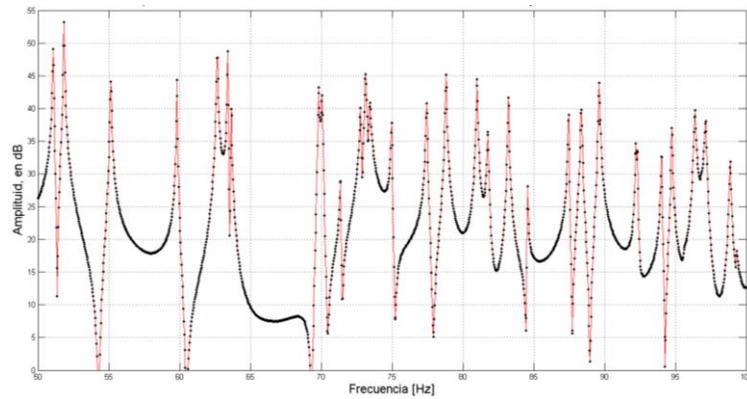
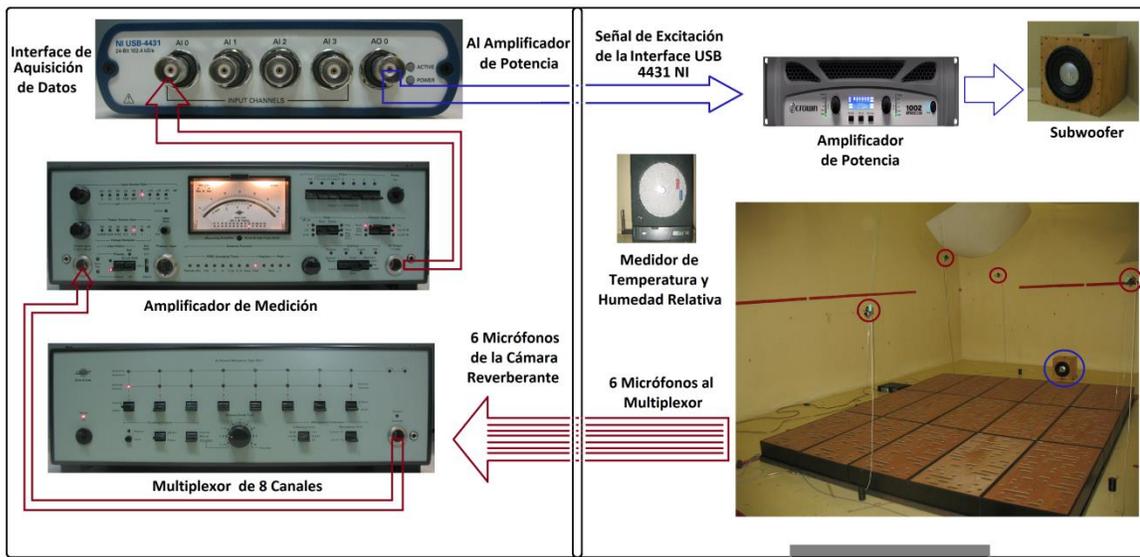


Figura 2. Función de transferencia de la CR sin muestra.

4.- Una vez obtenidas las frecuencias propias de la Cámara Reverberante, se procede a conectar el equipo, como se muestra en la figura 3, para medir los tiempos de reverberación a esas frecuencias.



Cuarto de Control de la Cámara Reverberante

Cámara Reverberante del CCADET

Figura 3. Diagrama esquemático de la conexión para la medición del tiempo de reverberación.

Para aplicar el procedimiento de medición de tiempo de reverberación es necesario suministrar los datos siguientes: “f” que es la frecuencia del modo propio que se desea medir, “N” que es el número de veces que se repetirá la señal, y en la línea del código del programa “set(ain,'SamplesPerTrigger',4*n_mues)” en el parámetro “4*n_mues” se coloca 3 ó 4 en el número entrecomillado para la CR sin muestra y 2 ó 3 con la muestra en la CR y al final del programa está la sección de Salvar, donde el programa salva los siguientes archivos: “Mh1” es la respuesta de la frecuencia del modo capturada (**el número corresponde al micrófono con que se está midiendo y afecta a las demás variables que se mencionan**), “Mcdh1”, que corresponde a los datos de la curva de decaimiento de la respuesta de la señal, “Mtr1”, es el tiempo de Reverberación que se obtuvo por la curva de decaimiento, “Myh1”, corresponde a los datos de la curva de decaimiento delimitada desde 0 a -25 dB, “ME1 y MEgn1” corresponde a porcentajes de error.

5.- Cargar el programa para obtener los tiempos de reverberación para los 6 micrófonos que se llama "Captura_y_Procesa_TR.m" elaborado con el software MatLab® y que se localiza en la carpeta que se encuentra en: "C:\Documents and Settings\acustica\Mis documentos\Proyecto Ricardo Agosto 2014\Tiempo de Reverberacion del CR con Función de Transferencia\1 Captura y Procesamiento de TR\Captura_y_Procesa_TR.m".

6.- Una vez conectado y encendido, se continúa midiendo la humedad relativa y la temperatura de la Cámara Reverberante, se procede a correr el programa de "Captura_y_Procesa_TR.m" en Matlab. La medición se realiza con la Cámara Reverberante con y sin la muestra, para obtener los tiempos de reverberación para cada micrófono de medición. Nota se propone un valor relativamente grande del valor de "N" que es el número de ciclos que se reproducirá la señal para la Cámara Reverberante vacía y un valor bajo para la Cámara Reverberante con la muestra. Parámetros obtenidos y salvados que son los siguientes:

- Respuesta de la frecuencia del modo propio, figura 4a.
- La curva de decaimiento total de dicho modo, figura 4b.
- El tiempo de reverberación
- La curva de decaimiento delimitado desde 0 a -25 dB, figura 4c.
- Errores, como el del grado de No linealidad

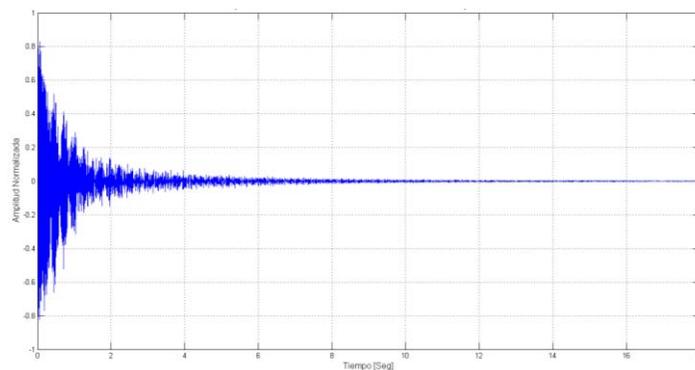


Figura 4a. Respuesta de la frecuencia del modo propio de la Cámara Reverberante.

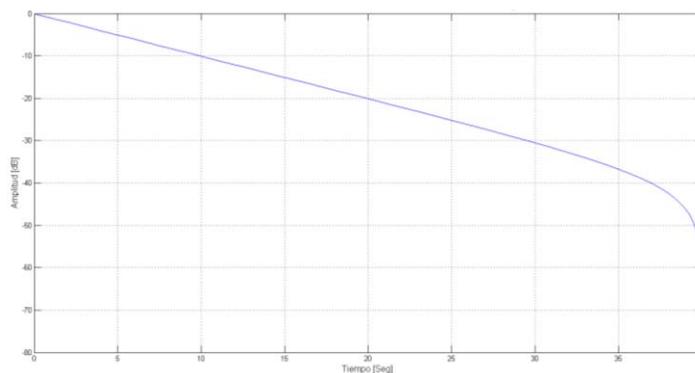


Figura 4b. Curva de decaimiento de 60 dB del modo propio de la Cámara Reverberante.

La figura 4c podemos observar las curvas de decaimiento cuando se mide una frecuencia de un modo propio y que no es afectado por otras frecuencias propias.

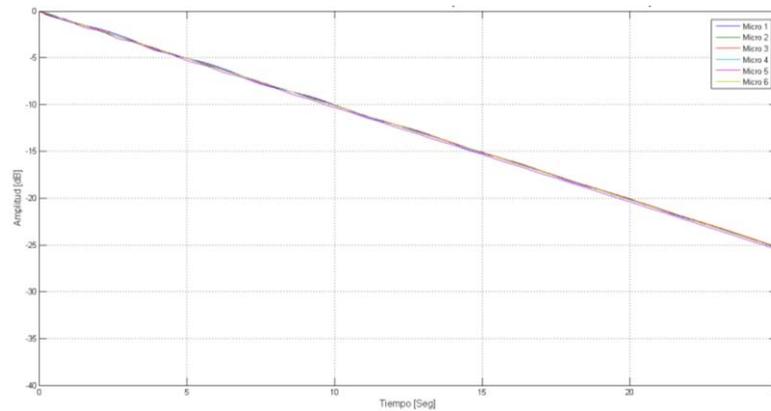


Figura 4c. Curva de decaimiento delimitada de 0 a -25 dB del modo propio de la Cámara Reverberante de los diferentes micrófonos.

La figura 4d podemos observar las curvas de decaimiento cuando se mide una frecuencia de un modo propio que es afectado por otra frecuencia propia.

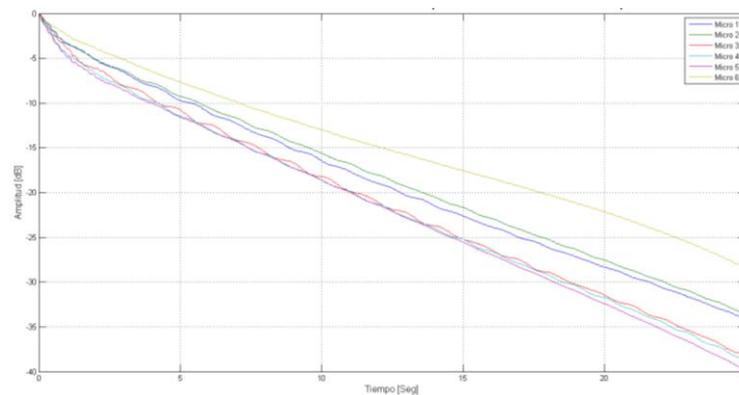


Figura 4d. Curva de decaimiento delimitada de 0 a -40 dB del modo propio de la Cámara Reverberante, afectada por otras frecuencias propias.

7.- Una vez obtenidos los tiempos de reverberación de cada micrófono se carga el programa “Matrix_Datos_TR.m” elaborado con el software MatLab® y que se localiza en la carpeta que se encuentra en: “C:\Documents and Settings\acustica\Mis documentos\Proyecto Ricardo Agosto 2014\Tiempo de Reverberacion del CR con Función de Transferencia\1 Captura y Procesamiento de TR\ Matrix_Datos_TR.m”. Para conjuntar los tiempos de reverberación y el Error del grado de no linealidad para continuar con la promediación espacial.

8.- Cargar el programa para obtener los promedios y su desviación estándar de los tiempos de reverberación y el error de grado de no linealidad, y se llama “ds_y_prom_senoidal_SM.m” elaborado con el software MatLab y que se localiza en la carpeta que se encuentra en: “C:\Documents and Settings\acustica\Mis documentos\Proyecto Ricardo Agosto 2014\Tiempo de Reverberacion del CR con Función de Transferencia\2 Promedio TR Senoide\Promedio TR Sin Muestra (SM)\ ds_y_prom_senoidal_SM.m”.

9.- Una vez obtenidos el promedio el cual se obtiene con y sin material del tiempo de reverberación a las 5 frecuencias y su error del grado de no linealidad y su desviación estándar en el cual podemos ver el ejemplo del tiempo de reverberación sin muestra el cual se ve en la tabla I.

Frecuencias (Hz)	EGNL	Tiempo Rev. (seg)	DST
55.24	0.41	27.16	1.19
63.57	3.16	51.32	3.87
73.2	4.04	21.94	3.46
84.8	0.59	43.03	1.23
92.4	4.98	36.28	1.99

Tabla I. Método de Fuchs de los valores obtenidos del tiempo de reverberación sin muestra, error del GNL y desviación estándar.

10.- Una vez obtenidos los tiempos de reverberación con y sin muestra se carga el algoritmo el cual se llama "Area_Eq.m" elaborado con el software MatLab® y que se localiza en la carpeta que se encuentra en: "C:\Documents and Settings\acustica\Mis documentos\Proyecto Ricardo Agosto 2014\Tiempo de Reverberacion del CR con Función de Transferencia\ 3 Area Eq \ Area_Eq.m". Una vez cargado el algoritmo de "Area_Eq.m", se requiere lo siguiente los siguientes datos:

Se requiere las dimensiones del recinto, para calcular el volumen y la superficie total, la temperatura que se estuvo midiendo y se cargan los archivos "TR_Prom_SM" que es el tiempo de reverberación sin muestra y "TR_Prom_CM" que es el tiempo de reverberación con muestra. Además de los datos de "MTEgnl_SM" que es el error del grado de no linealidad sin muestra y "MTEgnl_CM" que es el error del grado de no linealidad considerando la muestra. Y al final del programa te muestra el área equivalente obtenido con la ecuación [1] y su coeficiente de Absorción (α). Complementa con la obtención del área equivalente con el método [2] y su error del área equivalente del mismo método. Los resultados obtenidos son el área equivalente obtenida con el método [1] y el método del Dr. Santiago, además del error y el valor del coeficiente de absorción (α) y lo podemos ver en la tabla II.

At	AT	Error Área Equivalente	α
0.00	0.00	0.20	0.00
0.70	0.71	0.04	0.16
0.26	0.26	0.29	0.06
0.91	0.92	0.46	0.21
1.06	1.07	0.25	0.25

Tabla II. Resultados de las áreas equivalentes, error y coeficiente de absorción.

A.1.2 Método de ruido interrumpido

1. Medición de los tiempos de reverberación con el analizador de frecuencia marca B&K modelo 2133

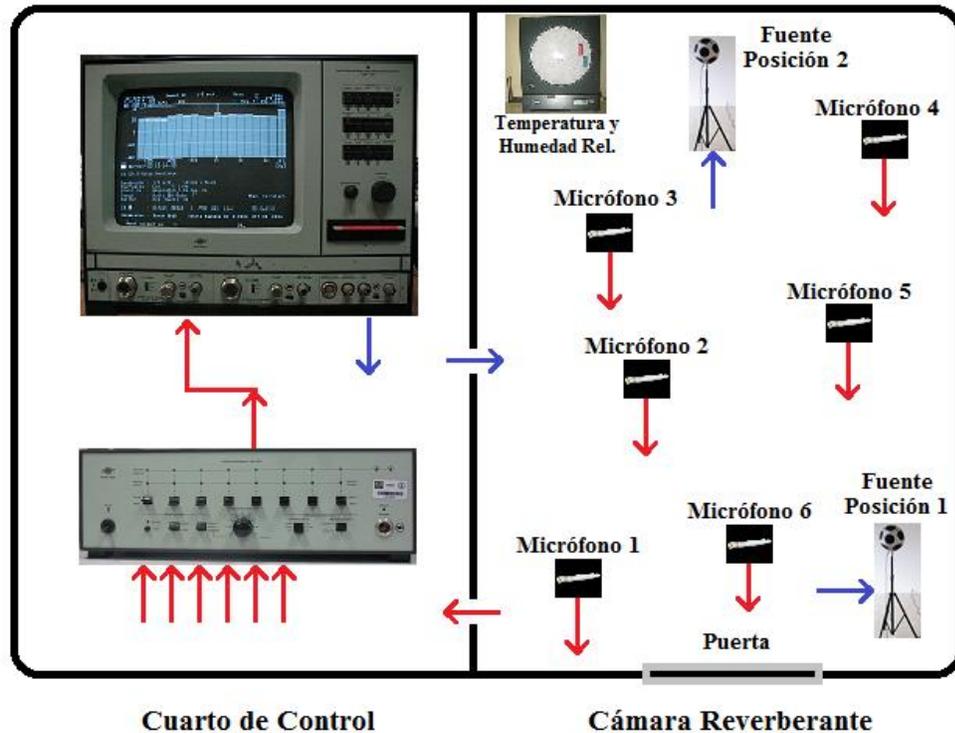


Figura 4. Diagrama de conexión para la medición del coeficiente de absorción de la cámara reverberante del CCADET

Proceso para medir el coeficiente de absorción con el analizador de frecuencia de doble canal en tiempo real marca B&K modelo 2133.

1. Preparar la cámara de reverberación, encendiendo el medidor de temperatura y humedad relativa y el amplificador de la fuente omnidireccional (Dodecaedro).
2. Cerrar la cámara de reverberación para evitar el ingreso de ruido.
3. Encender el multiplexor de 8 canales marca B&K modelo 2811, y activar el micrófono con el que se va a medir, así como el analizador de frecuencia modelo 2133. **Nota:** El teclado del analizador se encuentra ubicado en la parte inferior del monitor y se obtiene presionándolo.
4. Reseteo el analizador, oprimiendo las teclas "Reset+9" para borrar la información que pudiera quedar de mediciones pasadas.
5. Aparece la pantalla que corresponde a la gráfica del espectro en la primera mitad de la pantalla, y en la otra mitad de abajo presenta los datos para ajustar el analizador.
6. Para ubicarnos en la parte inferior de la pantalla usaremos las teclas "Field Select, FS". Y aquí se configuran los parámetros para la medición del tiempo de reverberación:



Figura 3. Pantalla de analizador de frecuencia marca B&K modelo 2133

- a. **Ancho de banda (Bandwidth):** Se ajusta a 1/3 de octava y se selecciona el ancho de banda de la señal que se va a utilizar, que en este caso fue desde 100 Hz hasta 5000 Hz que corresponde el espectro a analizar.

Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Bandwidth**” con las teclas de “**FS**” que se localizan en el teclado del analizador, en el correspondiente intervalo de la octava, si no está el 1/3 Oct. con el teclado numérico asigna el 3 y después el botón de “**Ent**”. Siguiendo la asignación, mueve con los botones de “**FS**” para ir al ancho de banda y se asigna los datos ya mencionados en el inciso (a) para tener dicho ancho de banda con el teclado numérico.

- b. **Promediando (Averaging):** Se ajusta el promedio de la medición en el tiempo de reverberación para 1/3 Oct. de forma “**lineal**” y T dependiendo en que tiempo se va promediar para la Cámara Reverberación vacía CRV o con muestra se recomienda un T de 1/4 a 1/12 seg y cuál va relacionado con el ancho de banda.

Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Averaging**” con las teclas de “**FS**”, en la función tiene que ser “**Lin**”, si no está el correspondiente “**Lin**” con los botones de “**Field Entry, FE**” asigne esa función. Mueva con los botones “**FS**” para ir al parámetro T y se asigna los datos con las teclas “**FE**” ya mencionados en el inciso (b).

- c. **Input:** Se ajusta el número de muestras, normalmente aparece “**Single**” y se tiene que ajustar a “**Multi**” con las teclas de “**FE**”, el siguiente número que aparece “**10**” corresponde el número de muestras en la que depende “**T**”.

Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Input**” con las teclas de “**FS**”, en la función esta “**single**” y tiene que ser “**Multi**”, y se asigna con los botones de “**FE**”. Siguiendo la asignación, mueve con los botones de “**FS**” para irte al parámetro “**10**” y se asigna los datos al número de muestras con las teclas “**FE**”, dependiendo del valor de “**T**” y depende del ancho de banda de frecuencia que se está analizando se recomienda para tiempos cortos 80 muestras y para tiempos largos 120 o más. El siguiente parámetro “**Rate**” no se modificará en esta medición. **Nota:** Cuando asigna este renglón “**Input**” habilita uno antes que es “**Start On**”, que se visualiza a subir el cursor y se explicará a continuación.

- d. **Start On:** Se ajusta para que inicie la medición al término de la generación del ruido blanco que va ser generado con el mismo analizador, normalmente aparece “**Free run**” y se tiene que ajustar a “**Generator**”, el siguiente parámetro es “**impulso de subida**” y queremos el contrario para que cuando termine de excitar el recinto realice la medición.

Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Start On**” con las teclas de “**FS**” sube después de asignar el del inciso (c), en la función esta “**free run**” y tiene que ser “**Generator**”, y se asigna con los botones de “**FE**”. Siguiendo la asignación, mueve con los botones de “**FS**” para irte al parámetro “**impulso de subida**” y se asigna el dato al impulso de bajada con los botones de “**FE**”, y el siguiente parámetro “**Delay**” deberá ser 0 s.

- e. **Buffer:** Se ajusta para poder almacenar los tiempos de reverberación y posteriormente promediar y tener un solo tiempo de reverberación por bandas de frecuencia o 1/3 oct con esto obtendremos 18 tiempos de reverberación, aparece “**Empty**” y se tiene que ajustar a “**Avg.**”, el siguiente parámetro es “**10**” y esto depende de cuantos datos queremos promediar y por default te da 10 datos a promediar. Se recomienda un número de mediciones (promedio 20), para reducir el margen de incertidumbre.

Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Buffer**” con las teclas de “**FS**” bajar después de asignar el inciso (d), en la función esta “**Empty**” y tiene que ser “**Avg**”, y se asigna con los botones de “**FE**”. Siguiendo la asignación, mueve con los botones de “**FS**” para ir al parámetro “**Multi**” y se asigna el número de datos que se quiera promediar, sugerido de 10 o más.

- f. **Ch A:** Se ajusta para poder medir la señal que entrega el multiplexor de 8 canales, que en cada caso entrega la señal desde el micrófono 1 hasta el 6 que tenemos situados en la cámara reverberante para medir dicho tiempo, normalmente aparece “**Preamp**” y se tiene que ajustar a “**Direct**”, el siguiente parámetro se ajusta al oprimir la tecla “**Input Autorange**” que se encuentra ubicado en el teclado del analizador, los demás se quedan así, hasta llegar al último que es “**1.00 V/V**” que corresponde a la sensibilidad del micrófono de medición marca B&K modelo 4166.

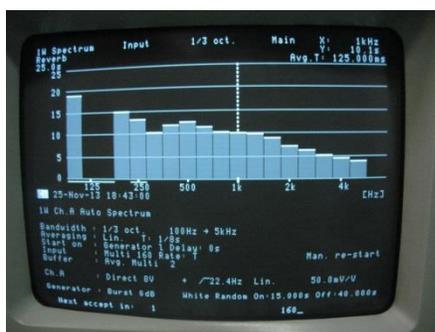
Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Ch. A**” con las teclas de “**FS**”, en la función esta “**Preamp**” y tiene que ser “**Direct**”, y se asigna con los botones de “**FE**”. Siguiendo la asignación, mueve con los botones de “**FS**” para ir al parámetro “**1.00 V/V**” y se asigna la sensibilidad de la señal que entrega el micrófono de medición y en el teclado numérico ingresar el valor de “**50m+Ent**”.

- g. **Generator:** Se ajusta para generar la señal que se requiere, que en este caso es ruido blanco que va a excitar la cámara reverberante y con ayuda de los micrófonos van a capturar el impulso que entrega el recinto y así obtener el tiempo de reverberación, normalmente aparece “**Cont**” y se tiene que ajustar a “**Burst**”, además seleccionas el nivel de dicho ruido, el tipo de ruido y el tiempo de generación y de apagado de dicho ruido.

Procedimiento: Se sitúa en el renglón de “**Generator**” con las teclas de “**FS**”, en la función esta “**Cont**” y tiene que ser “**Burst**”, y se asigna con los botones de “**FE**”. Siguiendo la asignación, nos vamos a “**0 dB**” y se asigna el nivel que requieras para la medición, posteriormente se sitúa en “**pink**” para asignar White, el ruido deberá ser de tipo aleatorio “**Random**” y posteriormente se asigna el “**tiempo**” en que va a estar encendido el generador “**On**” y eso depende de si tiene o no alguna muestra para analizar en la cámara y por último se asigna el tiempo en el que se apagará el generador, que dependerá si estará vacía (15+Ent seg On y 45+Ent seg Off) o con muestra (10+Ent seg On y 20+Ent seg Off), es recomendable que cuando inicie la medición al término de la generación del ruido se apague en forma Manual el generador, el botón se localiza de lado derecho donde se localiza la pantalla del generador “**Generator On**”.

Ya asignado los datos en pantalla se inician la medición.

7. Encender el canal del micrófono (1 a 6) que se vaya a utilizar para la medición con el multiplexor modelo 2811.
8. Encender el generador con el botón “**Generator On**” mencionado en el procedimiento del inciso (g), de inmediato.
9. Iniciar la medición oprimiendo el botón “**Start (letra A)**” que se encuentra ubicado en el teclado del analizador en el apartado “**Measurement**”. **Nota:** En la parte inferior de la pantalla del lado izquierdo aparece varias leyendas de cómo va el proceso de medición y cuando aparece “**Triggered**” se recomienda apagar el generador en forma manual para que no se esté generando el ruido, al final se despliega el tiempo de reverberación de la medición.
10. Para ir monitoreando si la medición no tiene error, se recomienda observar la gráfica del tiempo de reverberación, esto es, situándose en los corchetes “[]” que se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla con las teclas “**FS**”, y seleccionando en el teclado numérico 50 + Ent, posteriormente se recomienda regresar a el valor en decibeles oprimiendo las teclas numéricas 0 + Ent, para seguir la medición.
11. Si no hay error (sino tiene valor en una o varias bandas banda en el tiempo de reverberación, o con un tiempo de reverberación muy largo en una banda o varias bandas) se acepta la medición con el botón “**Man. Accept. (Letra K)**” que se ubica en el teclado de lado izquierdo, si hubiera un error se repite el procedimiento desde el paso 8 hasta el 11 hasta completar el renglón “**Buffer**” del número de muestras.



12. Una vez terminado las repeticiones de la medición, con las teclas de “FS” nos situamos en “Input” que se localiza en la parte superior de la pantalla y seleccionar con las teclas “FE” la función “Buffer” el cual realiza el promedio de las N mediciones y desplegará en pantalla la gráfica correspondiente al tiempo de Reverberación a 1/3 de oct del recinto con o sin muestra.
13. Así se repite estos pasos desde el 8 hasta el 12, desde el micrófono 1 hasta el 6 con 2 fuentes “si no hay error”.

A.1.2.1 Proceso para obtener los datos del analizador de frecuencia B&K modelo 2133 a una laptop HP 630, con ayuda de una interface USB modelo GPIB-USB-HS al programa “B&K2133” elaborado en LabView realizado en el CCADET

Nota: Al ejecutar este programa captura la información que contenga el analizador en el momento que inicia el programa, pero No está guardado en un archivo .TXT, todavía.



Figura 1. Analizador marca B&K modelo 2133 y programa en Labview B&K2133

1. Conecta la interface GPIB-USB-HS del analizador B&K2033 a la laptop HP630.
2. Iniciar el programa B&K2133. El programa inicia como se observa en la figura 2.

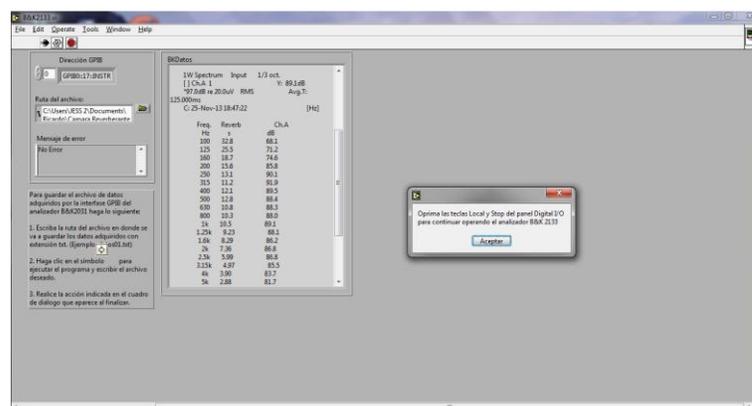


Figura 2. Inicio de programa B&K2133

3. Oprimir el botón de “Aceptar” del recuadro que aparece al centro de la pantalla como se ve en la figura 2.
4. Seguir las indicaciones que están a la izquierda de la pantalla para guardar la información, de la siguiente forma:
 - a. Crear el archivo en donde desea guardar la información, lo puedes hacer fuera del programa, ejemplo “Mis documentos” crea un archivo TXT o puedes crearlo al momento de seleccionar la ruta de donde lo vas a almacenar la medición.
 - b. Selecciona la ruta al archivo deseado en el programa B&K2133 por ejemplo (Mis Documentos\ejemplo.txt), se puede ver en la figura 3.

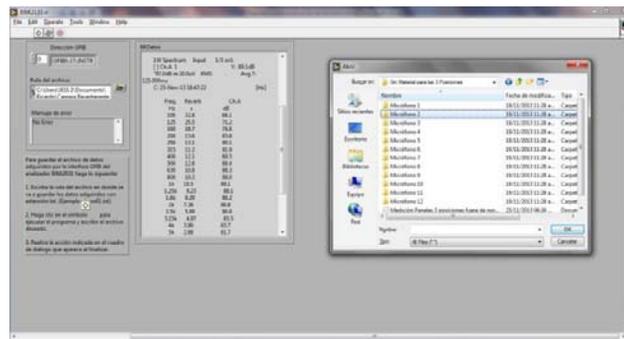
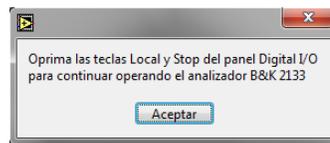


Figura 3. Ruta donde almacenará la medición.

5. Oprima el símbolo de “Flecha” que se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla.



6. Una vez guardada la información aparecerá un recuadro como se ve en la figura 5, en el cual deberá aceptar, y seguir las indicaciones del recuadro en el analizador 2133, para iniciar la siguiente medición.



7. Volver a iniciar el procedimiento para una nueva medición, a partir del punto 4 el cual tiene que crear y rutear el nuevo archivo donde quiere almacenar la nueva información de dicha medición.
8. Una vez terminado las mediciones cerrar el programa y conjuntar los archivos txt para el procesamiento.

Apéndice

Los diferentes programas que se utilizaron poder medir los diferentes métodos vistos en esta tesis se encuentran localizados en formato digital en un CD y se mencionan a continuación:

B. Programas para el método propuesto por Zha y Fuchs.

B.1 Programa el cual realiza la medición de la función de transferencia de la Cámara Reverberante para obtener los modos propios con el método propuesto por Zha y Fuchs.

Nota: la línea de “analoginput” la palabra ‘dev1’ depende de la interface de datos o audio que se tenga conectada.

```
% Este programa realiza la Medición de la función de transferencia
de la Cámara Reverberante para obtener los Modos Propios con el
método propuesto por ZHA y FUCHS
% Tutor: Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz
% Alumno: Ricardo Andrés Franco Pérez
%%
clear all; clc; close all;
n=1; % El número de veces que se va a repetir mi chirp
d=60; % Duración en tiempo que dura la chirp desde la f0 hasta f1
fs=1250; % Frecuencia de muestreo para Subwoofer se recomienda 1250
Hz
ts=1/fs; % Tiempo de la frecuencia de muestreo
t=(0:ts:d-ts).'; %La línea de tiempo para mi vector de la chirp
f0=20; % Frecuencia inicial de mi chirp para análisis en bajas
frecuencia con subwoofer se recomienda iniciar en 20 Hz
f1=600; % Frecuencia final de mi chirp para análisis en baja
frecuencia
%% Función que genera la chirp lineal desde 0 Hz hasta 600 Hz
[x, xinv] = s_log(d, fs, f0, f1);
x=x';
Nm=length(x);
%% 2 Entrada; 0.-Señal de Excitación y 1.-Señal del micrófono
ain=analoginput('nidaq', 'dev1');
acanal=addchannel(ain, [0,1]); % 0.-Señal de Excitación y 1.-Señal
del micrófono
set(ain, 'SampleRate', fs);
set(ain, 'SamplesPerTrigger', Nm);
set(ain, 'TriggerType', 'Immediate');
set(ain, 'TriggerRepeat', n-1);
set(acanal, 'InputRange', [-10 10])
%% Salida
aout=analogoutput('nidaq', 'dev1');
acanal=addchannel(aout, 0);
set(aout, 'Samplerate', fs);
```

```

frec_real=get(aout,'samplerate');
set(aout,'Triggertype','Immediate');
set(aout,'Repeatoutput',n-1);
putdata(aout,x);
%% Instrucción que espera que el usuario oprima una tecla para
iniciar el programa
disp('Para empezar, oprima una tecla');
pause
%% Inicia la tarjeta de Audio para la grabación y reproducción
start([ain aout]);
%%
while strcmp(aout.Running,'On');
end
y=zeros(Nm,1);
xx=zeros(Nm,1);

for n=1:n
    datos=getdata(ain);
    y=y+datos(:,2);
    xx=xx+datos(:,1);
end
y=y.*(1/n);
y=y/max(y);

xx=xx.*(1/n);
xx=xx/max(xx);
xx=xx';
%%
stop([ain,aout]);
delete([ain,aout]);
clear ain
clear aout
%% Gráficas de mi señal de Excitación que entra a la interface
% y de lo que obtiene del micrófono de medición
figure(1)
plot(t,xx,'b');% Señal de Excitación que entra a la interface
grid on;
figure(2)
plot(t,y,'k'); % Señal que obtiene el micrófono de medición
grid on;
%% Realiza el cálculo de la FFT y iFFT
[hLin, hNonLin] = impulse_log(y,xinv);
h=hLin/max(hLin); % Entrega la respuesta impulso Normalizado
%% Grafica la señal real
figure(3)
t2=(0:length(h)-1)*ts;
plot(t2,h);grid on; %Gráfica de la respuesta impulso del recinto
grid on;
%%

```

```

title('Gráfica Respuesta Impulso de la CR Vacía y Medida con el
Micrófono 3');
ylabel('Amplitud Normalizado');
xlabel('Tiempo [Seg]');
%%
H=fft(h);
N=length(h);
dBH=20*log10(abs(H(1:N/2)));
%%Ventaneo Rectangular con Hanning y la Hanning
Vab=rectwin(N).';
Var=tukeywin(N,0.1).';
VT=[Vab(1:N/2) Var(N/2+1:end)];
h=h.';
hvent=h.*VT;
H2=fft(hvent);
dBH2=20*log10(abs(H2(1:N/2)));
%% Grafica la señal real
figure(4)
f = fs/2*linspace(0,1,N/2);
plot(f,dBH,'r',f,dBH2,'k');
axis([50 100 0 55])
grid on;
%%
title('Gráfica comparativa de la Función de Transferencia de la CR
Vacía y Medida con el Micrófono 3');
ylabel('Amplitud, [dB]');
xlabel('Frecuencia [Hz]');
%% Salvado de señal Impulso "h"
save ('Mlh_CV','h');
save ('MlHFT_CV','H');
save ('Mlf_CV','f');

```

B.2 Programa que realiza la reproducción de la frecuencia de los modos propios de la CR, la obtención de la respuesta de la frecuencia del modo y obtener el Tiempo de Reverberación.

```
% Este Programa realiza la reproducción de las ondas Senoidales
para obtener su respuesta de la señal senoidal para la Medición del
tiempo de Reverberación
% Realizado por: Ing. Ricardo Franco Pérez
% Tutor: Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz
%%
% Frecuencias de los Modos de la Cámara Reverberante del CCADET,
ejemplos
% f1= 55.24 Hz
% f2= 63.57 Hz
% f3= 73.20 Hz
% f4= 84.80 Hz
% f5= 92.40 Hz
%%
clear all; clc; close all;
fs=12800; % Frecuencia de muestreo para Subwoofer se recomienda
1250 Hz
ts=1/fs; % Tiempo de la frecuencia de muestreo
f=55.24; % Frecuencia del modo de excitación en Hz, seleccionar de
los anteriores
T=1/f; % Periodo de la frecuencia del modo en seg
mues_peri=T/ts; % Número de muestras del periodos
N=1000; % N es el número de ciclos que se reproducirá la señal
n_mues=mues_peri*N;
d=n_mues*ts;
t=((0:n_mues)*ts).'; % La línea de tiempo para mi vector de la
% señal senoidal

%%
x=sin(2*pi*f*t);
% Nm=length(x); %Nm= la longitud del vector de la Señal senoidal
%% Programación de la tarjeta de Adquisición de Datos
% Salida
aout=analogoutput('nidaq','dev1');
acanal=addchannel(aout,0);
set(aout,'SampleRate',fs);
fs_real=get(aout,'SampleRate');
set(aout,'TriggerType','Manual');
putdata(aout,x);
%% Entrada
ain=analoginput('nidaq','dev1');
acanal=addchannel(ain,0);
set(ain,'SampleRate',fs);
set(ain,'TriggerType','Manual');
set(ain,'SamplesPerTrigger',4*n_mues);%Cuando la CR esta vacía 3*Nm
CR con muestra 2 o 3*Nm
```

```

set(acanal, 'InputRange', [-10 10])
%% Instrucción que espera que el usuario oprima una tecla para
iniciar el programa
disp('Para empezar la reproducción, oprima una tecla');
pause
%% Inicia la tarjeta de Audio para la reproducción
start([aout ain]);
%% Inicia la tarjeta de Audio para la grabación
trigger([aout ain]);
%%
while strcmp(aout.Running, 'On');
end
disp('Termina la reproducción de la onda Senoidal');
%%
datos=getdata(ain); %Extraer los datos analógicos de entrada, la
hora y la información de eventos de la interface de adquisición de
datos
y=datos;
y=y/max(y);
%%
stop([ain,aout]);
delete([ain,aout]);
clear ain
clear aout
y=y(n_mues:end);
%% Gráficas de onda senoidal y de la captura dl micrófono a la
salida del sistema
figure(1)
plot(t,x,'r'); %Gráficas de la onda Senoidal
grid on;
figure(2)
tt=(0:length(y)-1)*ts).';
plot(tt,y,'b'); %Gráficas de la captura del micrófono a la salida
del sistema
grid on;
%% Calculo de la curva de Decaimiento para el tiempo de
reverberación para la frecuencia de 47.4 Hz del micrófono 1
cdy=cdecay(y,fs); figure(3);plot(cdy,'k');grid; hold on;
cdy=cdy';
%%
clc
lf=input('Dame el límite superior en dB ');
clc
li=input('Dame el límite inferior en dB ');
[E,t1,y1,rcdy,tr,Egnl]=rt_x2(cdy(:,1),li,lf,fs);
figure(4)
plot(t1,y1,'b'); % gráfica de la Recta interpolada con
grid on; hold on; % los coeficientes obtenidos con los datos que
midió, colocación de cuadrilla en la grafica
plot(t1,rcdy,'r');

```

```
%% Salvado de respuesta de la señal senoidal de los tiempos de
reverberación y las curvas de decaimiento para cada frecuencia
save('M1y','y'); % Respuesta de la frecuencia, de la frecuencia del
modo
save('M1cdy','cdy');
save('M1tr','tr');
save('M1rcdy','rcdy');
save('M1E','E');
save('M1Egnl','Egnl');
```

Nota: El programa anterior salva los datos de las respuestas de las frecuencias de los modos, de las Curvas de Decaimiento, Tiempos de Reverberación y de los Errores por cada micrófono y frecuencia, por lo que si se analizan los 6 micrófonos se debe realizar 6 veces.