

Caracterización Acústica de las salas Cinematográficas del Centro Cultural
Universitario de la UNAM

Dr. Santiago Jesús Pérez Ruiz, M. en I. Antonio Pérez López.
México DF, diciembre de 2011

Informe Técnico

RESUMEN.

La renovación de las salas de proyección cinematográfica del Centro Cultural Universitario de la UNAM, implicó la división, en dos salas contiguas mediante un muro común, de lo que fuera la Sala José Revueltas. Para sonorizar ambas salas se adquirió equipo de reproducción de audio con sistema normalizado THX para garantizar la alta fidelidad del sonido de las películas exhibidas. Los hechos mencionados anteriormente, se realizaron antes de solicitar la consultoría al Grupo de Acústica y Vibraciones del CCADET y de llevar a cabo el estudio acústico descrito en este informe. Las condiciones de desempeño acústico específicas que las salas deben cumplir imponen la caracterización de las dos salas instrumentando los siguientes métodos de medición: Medición de aislamiento sonoro, Medición de tiempo de reverberación y Valoración de ruido transmitido por cuerpos sólidos. En este informe se resaltan las anomalías encontradas en el mal acondicionamiento implementado originalmente y los resultados obtenidos del estudio acústico realizado para la caracterización de las salas construidas, con el fin de dictaminar si cumplen con las condiciones de desempeño acústico necesarias; es decir, dictaminar:

- a) Si pueden operar simultáneamente.
- b) Si califican como recintos apropiados para una reproducción sonora bajo la norma THX.

INDICE.

RESUMEN	1
INTRODUCCIÓN	3
1.- EQUIPO Y ACCESORIOS UTILIZADOS PARA LAS MEDICIONES	4
2.- MEDICIONES	4
2.1.- Medición de aislamiento sonoro	5
2.1.1.- Resultados	6
2.2.- Medición de tiempo de reverberación	6
2.2.1.- Resultados	6
2.3.- Valoración de ruido transmitido por cuerpos sólidos	8
2.3.1.- Resultados	9
3.- ANÁLISIS Y CONCLUSIONES	11
4.- REFERENCIAS	12

Lista de figuras y Tablas.

Figura 1	3
Figura 2	4
Figura 3	5
Figura 4	5
Figura 5	6
Figura 6	7
Figura 7	7
Figura 8	8
Tabla 1	8
Figura 9	9
Figura 10	10
Figura 11	10
Figura 12	11

INTRODUCCIÓN.

Para la caracterización acústica de las salas cinematográficas se realizaron las mediciones siguientes:

- 1.- Medición de aislamiento sonoro (reducción de ruido según Norma ASTM336-05).
- 2.- Medición de tiempo de reverberación (según Normas ISO 3382-1 [2] e ISO 18233).
- 3.- Valoración de ruido transmitido por cuerpos sólidos (según Norma ASTM E 336-2005).

Estas mediciones tuvieron el objetivo de determinar si las condiciones acústicas cumplían con lo exigido con la norma THX. Cabe mencionar que esta norma en realidad es una serie de recomendaciones que un fabricante de sistemas de audio (JBL, 1998)elaboró para la industria cinematográfica y que actualmente algunas empresas utilizan como norma para certificar comercialmente a las salas cinematográficas. En este trabajo solo se abordaran las recomendaciones **acústicas** más relevantes de la norma THX, a saber: a) requisito de aislamiento sonoro entre salas y b) requisito de tiempo de reverberación óptimo dentro de las salas.

Previamente a las mediciones se realizaron un par de visitas a las salas como inspecciones preliminares. Las salas prácticamente estaban terminadas y aparentemente solo faltaban las butacas. El piso tiene alfombra y, a modo de recubrimiento acústico, el mismo tipo de alfombra cubre la parte baja de las paredes de las salas (hasta una altura de aproximadamente 2 m), incluyendo el muro divisorio que separa las dos salas. En la parte alta de las paredes de las salas (desde aproximadamente 2 m hasta el techo) se colocó un plafón de tabla roca al que se aplicó un recubrimiento tipo pasta por la parte exterior.

Para tener idea de la densidad de masa y rigidez del muro divisorio, se golpeo con el puño de la mano un lado del muro, al hacerlo el otro lado del muro vibró de tal manera que el golpe fue perfectamente audible. La especificación de este muro divisorio es de dos hileras de tabique rojo separadas por un espacio de 1 ó 2 cm, con lo que se obtiene un grosor total aproximado de 32 cm. Con estas características es difícil pensar que sea posible ponerlo a vibrar con el golpe de un puño de la mano. Este hecho parecería indicar que existe una trayectoria estructural a través del muro que facilita la transmisión de vibraciones debido a una construcción inapropiada.



Figura 1.- Montaje utilizado para la colocación del plafón.

En la figura 1, se muestra el anclaje empleado para el montaje del plafón en la parte superior de las paredes de las salas, esto puede ser una de las causas por las cuales la transmisión de la vibración a través del muro se facilite, haciendo que el aislamiento sonoro entre las dos salas se reduzca. En la misma figura se muestran los soportes de sujeción del plafón al muro que actúan como trayectorias mecánicas (puentes) para la transmisión de la vibración del muro al plafón, esto hace las veces de acoplador y permite que la vibración transmitida a través del muro divisorio se traduzca en sonido radiado por el plafón.

Por esta razón se planeo; además, cuantificar el nivel de aislamiento, para tratar de valorar si la vibración provocada por la incidencia del sonido en las paredes de una de las sala, puede generar sonido que sea significativamente perceptible en la sala contigua, de modo que pudiera interferir con el sonido generado por el sistema de reproducción de la sala contigua y, sobre todo, en los momentos de bajo nivel sonoro o silencio.

Otro aspecto que quedo de manifiesto en estas inspecciones preliminares, fue el relacionado con las puertas, tanto las de acceso principal como las de salida de emergencia. En todas se carece de un diseño adecuado que garantice el sello necesario para evitar filtraciones de sonido; los marcos de las puertas son de diseño convencional y no tiene la forma escalonada que se requiere, tampoco se colocaron sellos apropiados y además las puertas de acceso a las salas no son lisas sino onduladas, lo que dificulta aún más lograr el sello necesario. En resumen, el aspecto general de las puertas denota una construcción e instalación deficiente y descuidada. En la figura 2 se muestran detalles que ilustran el hecho.



a)

b)

Figura 2.- a) Detalle del exterior de las puertas de acceso a las salas cinematográficas, donde se puede observar las ondulaciones en la superficie que impiden el sello perimetral de la puerta y b) Detalle de una puerta de emergencia.

El problema que se indica en el párrafo anterior no es de ninguna manera menor, ya que si las puertas no proveen el sello necesario, es posible que existan filtraciones importantes de sonido de una sala a la otra, o del exterior hacia el interior de cualquiera de las dos salas cinematográficas.

1.- EQUIPO Y ACCESORIOS UTILIZADOS PARA LAS MEDICIONES.

Para las mediciones se utilizó el equipo que se muestra en la figura 3 y que consiste en:

- 1 Sonómetro-analizador de mano, clase 1, marca B&K, tipo 2250.
- 1 Calibrador de micrófonos, marca B&K, tipo 4230.
- 5 Cajas acústicas auto-amplificadas, marca EVENT, modelo TR8.
- 1 Micrófono de condensador, marca BEHRINGER, modelo ECM 8000.
- 1 Interfaz de audio, marca TASCAM, modelo US-122.
- 1 Laptop, marca HP, modelo Pavilion.
- Programa de procesamiento de cómputo, marca MATLAB.
- Varios cables, conexiones, Tripies, etc.

2.- MEDICIONES.

Se realizaron tres mediciones utilizando los métodos correspondientes para obtener el Aislamiento Sonoro, el Tiempo de Reverberación y la Valoración de ruido transmitido por cuerpos sólidos como se indica a continuación.

2.1.- Medición de Aislamiento Sonoro.

Esta medición se realizó de acuerdo a la norma ASTM336-05 y para su instrumentación se colocaron, en el interior de una de las salas (recinto fuente), 5 cajas acústicas auto-amplificadas para reproducir la señal de sonido de prueba, las cajas acústicas (indicadas con una F) se colocaron alineadas al centro de la sala. Se eligieron 3 puntos de medición (indicados como M1, M2 y M3) en el interior del recinto fuente y otros 3 puntos de medición (indicados como M4, M5 y M6) en la otra sala (recinto receptor); esto se muestra en el esquema de la figura 4. En los puntos de medición se colocó el sonómetro-analizador en un tripié a una altura de 1.70 m.



Figura 3.- Equipo utilizado en las mediciones.

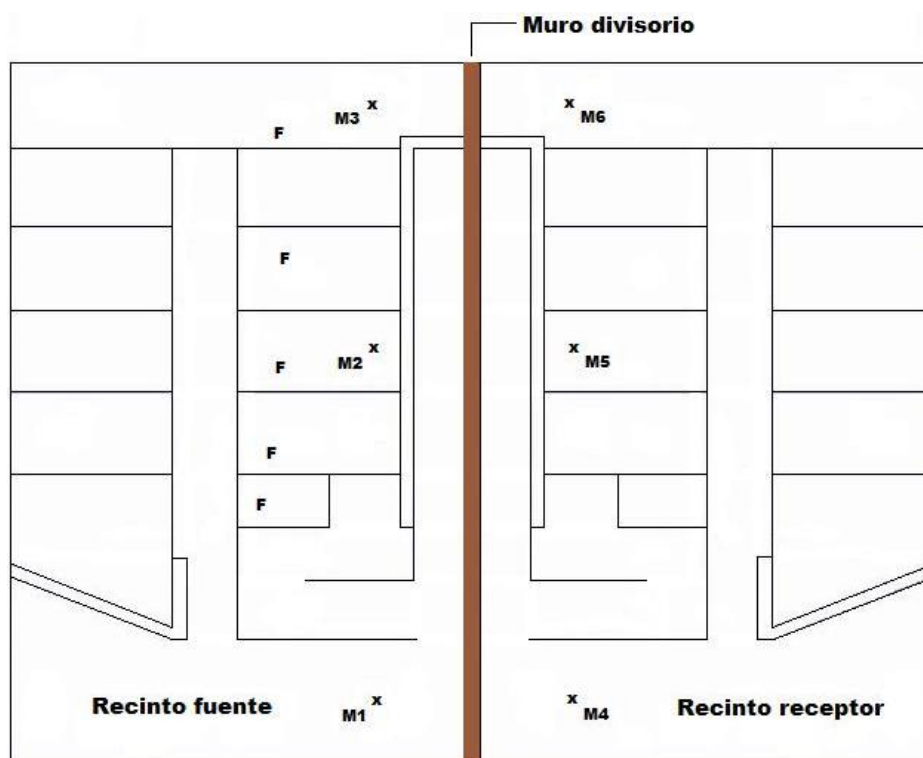


Figura 4.- Posición de las 5 cajas acústica (F) y de los puntos de medición donde se colocó el Sonómetro (M1, M2, etc.) para la medición de aislamiento sonoro.

El sonómetro-analizador se programó para obtener el nivel de presión sonora equivalente continua sin ponderación (L_{Zeq} , dB) de 3 minutos, con tiempo de promediación dinámico rápido (125 ms) de los

espectros en el intervalo de 20 a 20000 Hz en bandas de 1/3 de octava. Como señal de prueba se utilizó ruido blanco, que se generó con la Laptop, utilizando un programa comercial (Cool Edit Pro 2.0), y se conectó a las 5 cajas acústicas para reproducirla y amplificarla.

2.1.1.- Resultados.

Se determinó el nivel de ruido promedio de los valores registrados en los 3 puntos del recinto fuente, $\overline{L}_1$, y el correspondiente nivel promedio del recinto receptor, $\overline{L}_2$. Estos niveles se muestran en la gráfica de la figura 5 en bandas de frecuencia de 1/3 de octava (indicadas por los puntos).

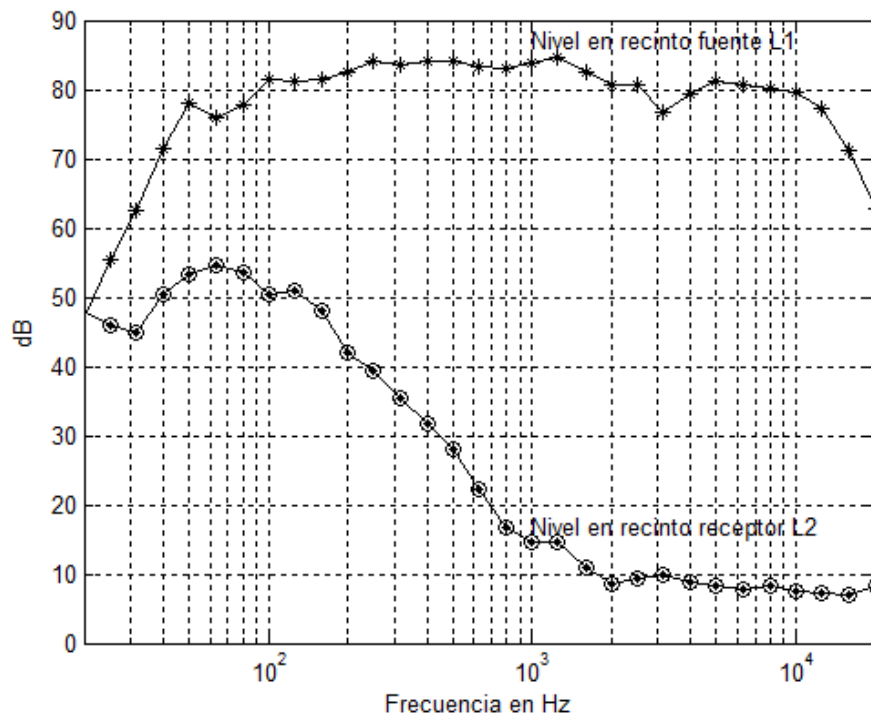


Figura 5.- Niveles promedio en 1/3 de octava del sonido medido en ambas salas, funcionando como un recinto fuente (donde se colocó la excitación sonora) y un recinto receptor.

Con estos valores se determina la diferencia $\overline{L}_1 - \overline{L}_2$ que se denomina reducción de ruido (NR, por sus siglas en inglés) [1]. Esta diferencia se muestra en la gráfica de la figura 6.

2.2.- Medición de tiempo de reverberación.

Para determinar la absorción del acondicionamiento acústico instalado en las salas cinematográficas se midió el tiempo de reverberación. Para el procedimiento de medición se utilizó la técnica de impulsos mediante señales sinusoides moduladas (swept sine method), el procedimiento se apegó a lo establecido en las normas ISO 3382-1 e ISO 18233. Para excitar el recinto se utilizaron la Laptop y las 5 cajas acústicas auto-amplificadas, la captura de las señales impulsivas se realizó con el micrófono, la interfaz de audio y la Laptop. Por considerar que las salas son de dimensiones similares y por agilizar la medición y reducir el tiempo en todo el proceso de medición y análisis de datos, solo se midió en la sala llamada recinto fuente. La respuesta al impulso de la sala se midió colocando el micrófono en 6 puntos, a una altura de 1.84 m, según se muestra en la figura 7.

La generación y el procesamiento de las señales se realizaron en la Laptop utilizando el programa MATLAB. Se determinó el tiempo de reverberación en tercios de octava desde la banda de 100 Hz a la de 5000 Hz.

2.2.1.- Resultados.

En la figura 8, se muestra la gráfica con los valores de tiempo de reverberación promediados (espacialmente) de las 6 posiciones en que se midió y para cada banda de frecuencia de 1/3 de octava (indicadas con puntos rojos).

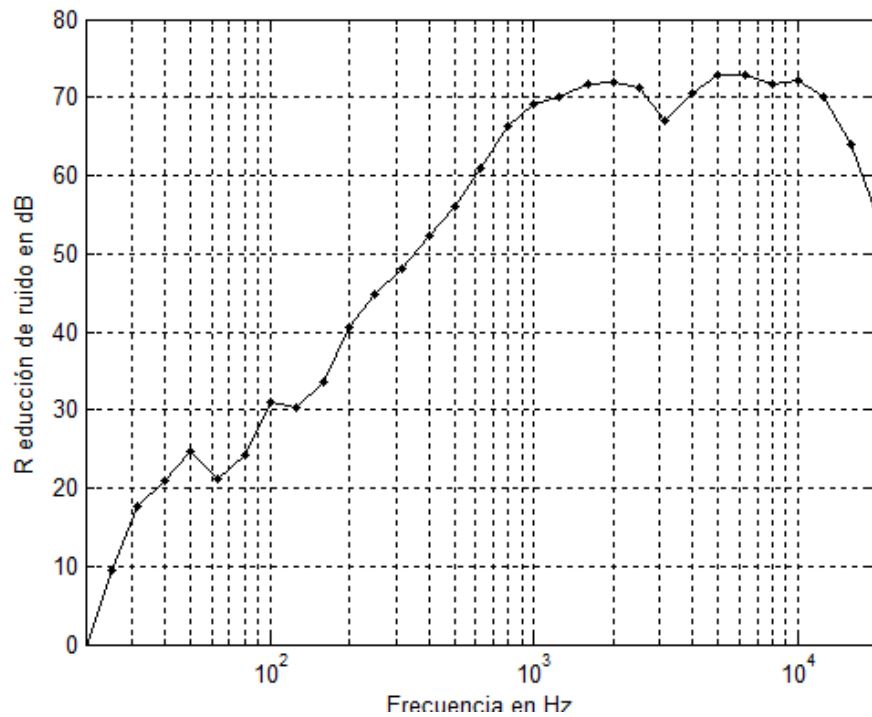


Figura 6.- Nivel de reducción de ruido (NR, por sus siglas en inglés).

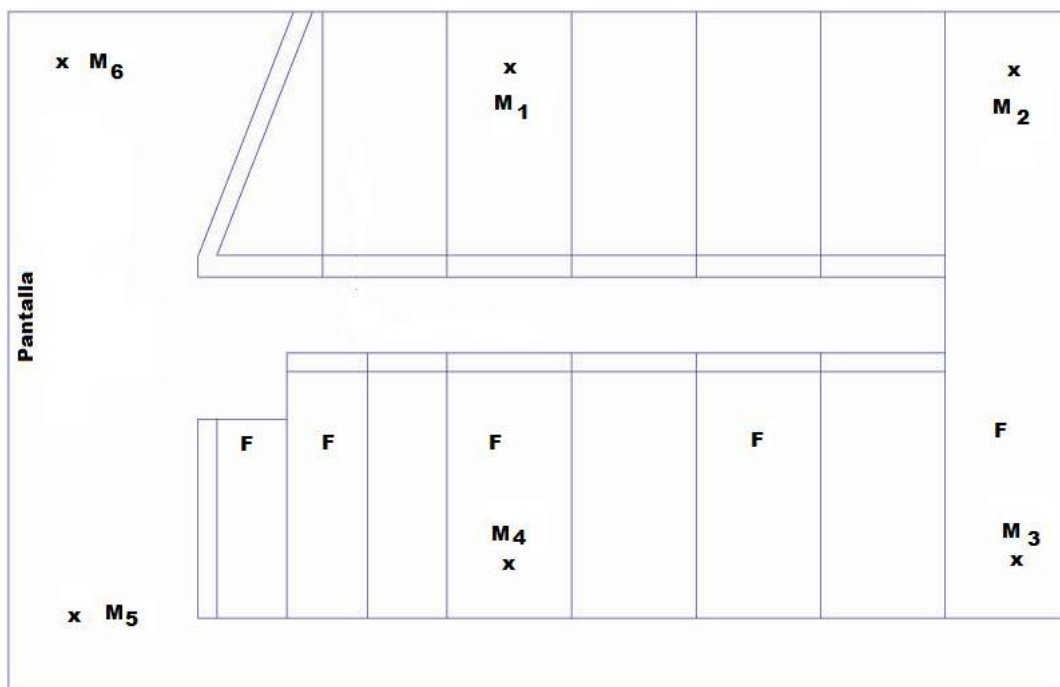


Figura 7.- Posiciones del micrófono (M₁, M₂, etc.) y de las 5 cajas acústicas (F) para la medición de tiempo de reverberación en el recinto fuente.

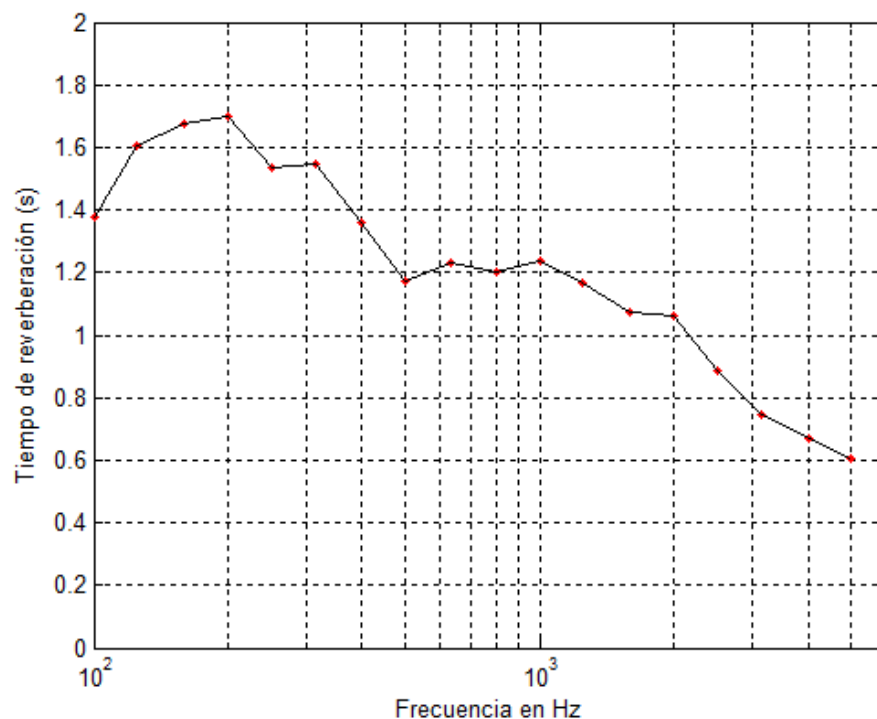


Figura 8.- Tiempos de reverberación en función de la frecuencia (bandas de 1/3 de octava, indicadas por los puntos rojos) medidos en el recinto fuente.

En la Tabla I se muestran los valores del tiempo de reverberación medido en bandas de 1/3 de octava y su respectiva desviación normal.

Frecuencia en Hz, por bandas de 1/3 de octava	TR en s	Desviación Normal
100	1.4	0.21
125	1.6	0.17
160	1.7	0.18
200	1.7	0.10
250	1.5	0.07
315	1.5	0.24
400	1.4	0.07
500	1.2	0.12
630	1.2	0.14
800	1.2	0.11
1 k	1.2	0.18
1.25 k	1.2	0.07
1.6 k	1.1	0.13
2 k	1.1	0.15
2.5 k	0.9	0.06
3.15 k	0.7	0.09
4 k	0.7	0.07
5 k	0.6	0.07

Tabla I.- Tiempos de reverberación medidos en el recinto fuente.

2.3.- Valoración de ruido transmitido por cuerpos sólidos.

Esta medición tiene la intención de poner de manifiesto de que el muro divisorio, ya acondicionado con los plafones y la alfombra, transmite la energía de vibración de una sala a la otra reduciendo el aislamiento sonoro que es necesario. Esta medición se llevó a cabo bajo la norma ASTM E 336-2005. La medición se realizó de la siguiente forma: Se generó una señal de prueba que consiste de una senoide modulada en frecuencia, que equivale a una onda senoidal de frecuencia variable desde 20 a 250 Hz, este cambio en frecuencia es proporcional en el tiempo. El espectrograma de la señal de prueba se muestra en la figura 9, donde se puede observar una franja roja ascendente, con pendiente constante, al aumentar el tiempo y la frecuencia. Esta señal se alimentó a las 5 cajas acústicas colocadas, en el recinto fuente, en la misma posición mostrada en la figura 4.

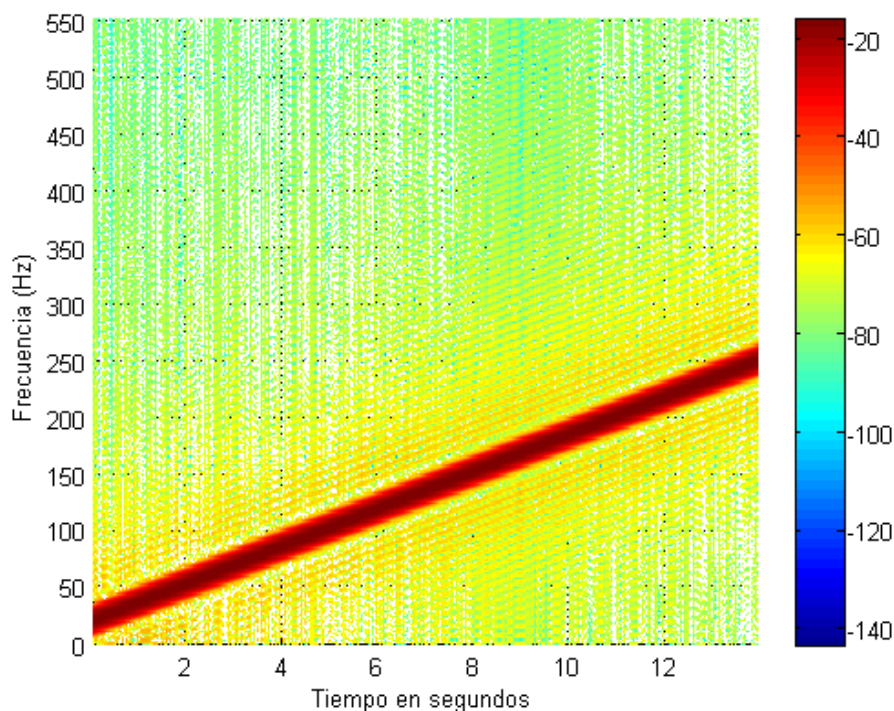


Figura 9.- Espectrograma de la señal de prueba. La barra de colores indica valores de nivel de energía arbitrarios en dB

Se colocó el micrófono en el recinto receptor en puntos previamente identificados; es decir, donde la vibración transmitida desde recinto fuente hacia vibrar lámparas y plafones en el recinto receptor. En estos puntos se grabó digitalmente el ruido producido por dicha vibración durante 200 segundos. Tanto la señal de prueba (generada en el recinto fuente) como el ruido producido en el recinto receptor debido a la transmisión del ruido y vibración se grabaron con la Laptop. Para verificar los niveles en ambas salas, se repitió esta medición utilizando el sonómetro.

2.3.1.- Resultados.

Al analizar la señal que se grabó digitalmente en el recinto receptor, excitando el recinto fuente, queda de manifiesto que la señal no es una réplica espectral, con nivel de energía menor, de la señal de excitación (ver figura 9), sino que aparecen otros componentes en frecuencia, como se muestra en la figura 10; donde se pueden ver las componentes de frecuencia que se generaron debido al ruido de lámparas y plafones producido por la vibración transmitida hacia la recinto receptor (mancha roja con bordes amarillos).

Al observar las figuras 9 y 10, es claro que el aislamiento que el muro divisorio debía proporcionar se ha reducido debido a que la vibración tiene condiciones mecánicas propicias para transmitirse y re-radiarse en forma de sonido en la sala receptora.

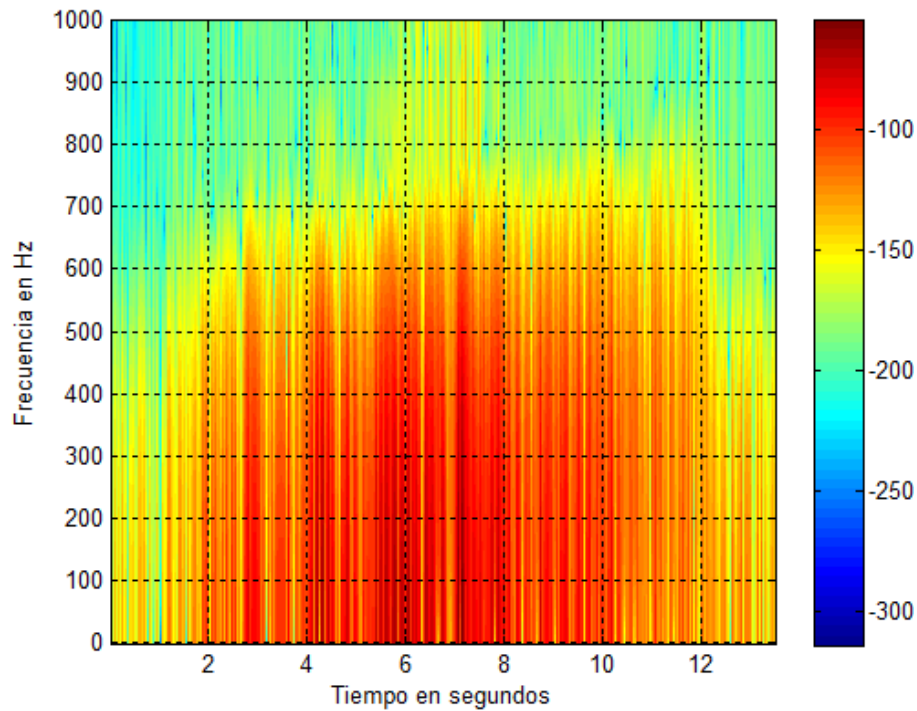


Figura 10.- Espectrograma de la señal registrada en el recinto receptor. La barra de colores indica valores de nivel de energía arbitrarios en dB

Los niveles totales en cada una de las recintos fueron los siguientes: para el recinto fuente, donde se generó la señal de excitación fue de 100.8 dB, sin ponderación; para el recinto receptor fue de 73.2 dB, sin ponderación, ver figura 11, para ver su distribución en frecuencia.

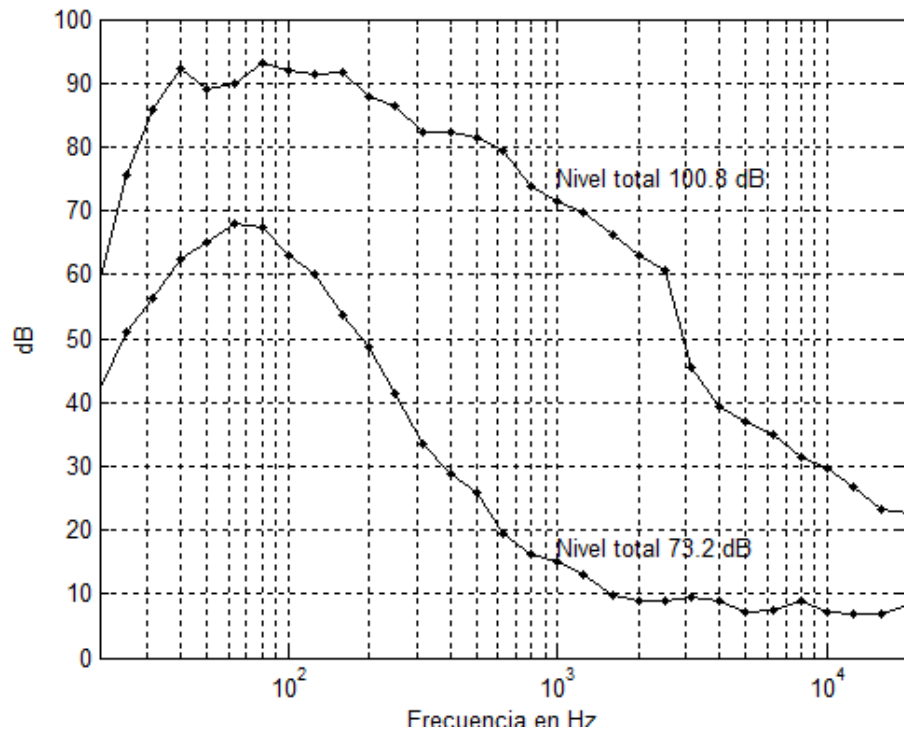


Figura 11.- Niveles medidos en las dos salas, el nivel de 100.8 dB se midió en el recinto fuente, donde se ubicó la excitación y el nivel de 73.2 dB en el recinto receptor.

3.- ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.

De acuerdo con las recomendaciones de los ingenieros de audio profesional y posteriormente reconocidas como norma THX [4], el nivel promedio esperado en el interior de un cine, durante la exhibición de una película, es de 95 dB, sin ponderación, con picos hasta de 105 dB (permitidos solo el 1% del tiempo, en multi-cines, según Lucasfilm, Ltd). De acuerdo a la figura 6, para estos niveles el aislamiento es insuficiente en frecuencias bajas, a partir de aproximadamente 400 Hz hacia abajo, ya que el nivel en la sala contigua sería $105-45 = 65$ dB, suficiente para ser claramente audible. Esta situación adversa seguramente será más marcada al emplear un sistema de reproducción "surrround sound" que opera en esta gama de frecuencias con niveles muy altos.

Esta conclusión es reforzada por la conclusión mencionada en el punto 2.3.1. En consecuencia, la conclusión final en este punto es que las salas no podrán operar simultáneamente por falta de aislamiento sonoro en frecuencias bajas.

En cuanto a las condiciones acústicas de absorción que deben reunir los recintos para cumplir los requisitos que exigen los sistemas THX; en la gráfica de la figura 12, se muestra una comparación entre del tiempo de reverberación medido en el recinto fuente, figura 8, y lo que recomienda THX.

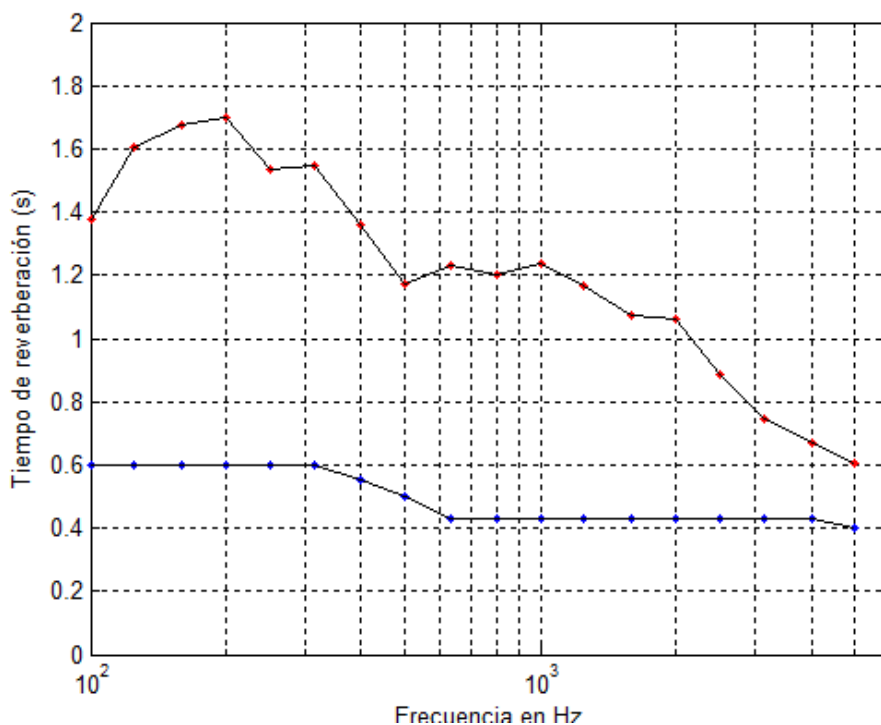


Figura 12.- Tiempos de reverberación medido en el recinto fuente, curva superior. Tiempo de reverberación óptimo, curva inferior. Se observan las diferencias extremadamente grandes entre los tiempos que establece la norma THX y los tiempos de reverberación (en función de la frecuencia) actuales.

En la curva de tiempo de reverberación requerido (óptimo) se ha tomado en cuenta la recomendación de tiempo de reverberación en función del volumen de la sala y; además, el balance del tiempo de reverberación en función de la frecuencia (JBL, 1988) .

Como puede observarse en la figura 12, el recinto no tiene la **absorción** que requieren los sistemas THX, debido a que el tiempo de reverberación es largo.

Del análisis se desprende lo siguiente:

- I. Hay que aumentar la absorción en cantidades significativas para ajustar el tiempo de reverberación. La absorción adicional difícilmente puede colocarse sobre el recubrimiento actual.
- II. El aislamiento que proporciona el muro divisorio se reduce debido al montaje del actual recubrimiento (Plafón y su recubrimiento), ya que introduce trayectorias que facilitan que la energía de vibración se transmita de una sala a la otra.
- III. La colocación del sistema de sonorización requiere montajes y características especiales [4] que hacen que no se pueda colocar en el plafón del recubrimiento actual.

Por todo lo anterior, la recomendación que se desprende, por las diferencias tan grandes entre lo deseado y lo que se tiene actualmente, es: desmontar completamente el recubrimiento actual y sustituirlo por otro que permita lograr tanto las exigencias que requiere el sistema THX, como que las salas puedan operar simultáneamente.

4.- REFERENCIAS.

American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Measurement Airborne Sound Attenuation between Rooms in Buildings, ASTM E 336-2005, USA, 16 pp, 2005.

International Organization for Standardization, Measurement of Room Acoustic parameters, ISO 3382-1, Switzerland, 22 pp, 2009.

International Organization for Standardization, Application of New Measurement Methods in Building and Room Acoustics, ISO 18233, Switzerland, 24 pp, 2006

JBL professional, Cinema Sound System Manual, USA, 30 pp, 1998.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dr. Ricardo Ruiz Boullosa y al Dr. Felipe Orduña Bustamante, del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM, por su asesoría. A Ing. Ricardo Dorantes Escamilla del Laboratorio de Acústica y Vibraciones del CCADET-UNAM, y al Ing. Ricardo Teo Vázquez Turner, alumno del Posgrado de Ingeniería opción Instrumentación, por su ayuda en las mediciones.