



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**TRATAMIENTO ACÚSTICO DE UN RECINTO
ESCOLAR EMPLEANDO LA NORMA ANSI/ASA
S12.60-2010/PART1**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO
(ÁREA ELECTRÓNICA)**

PRESENTA:

ARELLANO FIGUEROA JOSÉ ALBERTO



DIRECTOR DE TESIS:

ING. DANIEL MARTÍNEZ GUTIÉRREZ

MÉXICO, D. F., 2014

A mi madre

Por educarme en los valores de la honradez, justicia, humildad, responsabilidad, libertad, respeto y tolerancia, por su amor, comprensión y apoyo en todas las decisiones que hasta ahorita han guiado y guiarán mi vida.

A mi padre

Por los consejos y apoyo que han servido de guía en mi vida.

A mis hermanos

Por la fraternidad, apoyo y amor incondicional que me han brindado.

A mi familia y amigos

Todos aquellos con los que he compartido una parte de mi vida y han dejado su granito de arena en mí.

A mi Alma Mater UNAM

Por ese apoyo incondicional que a través de sus profesores forjaron de mí esa persona llena de valores y amor hacia mi país y gente, por nutrirme de conocimientos y aplicarlos a las necesidades de mi nación.

A los Ingenieros Daniel Martínez y Abel Villanueva

Por lo que he aprendido, las experiencias que he vivido y esa hermandad que me han brindado.

Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico

Por el apoyo en el préstamo de las instalaciones y asesoría que me brindaron en la realización de este trabajo, en especial al Ing. Ricardo Dorantes, al M. I. Antonio Pérez, al Dr. Jesús Santiago y al Dr. Felipe Orduña.

Dedicatoria

Esta tesis la dedico con todo mi cariño a la memoria de mi hermano Manuel Alejandro Arellano Figueroa, que fue un hermano, amigo y padre.

También quiero dedicarla a mi madre Alejandrina Figueroa Méndez, mi padre José Manuel Arellano Rodríguez, mi hermano Ángel Gabriel Arellano Figueroa, mi tía Leonor Figueroa Méndez y mi novia Mirna Hidalgo Morales, con todo el cariño y amor que me han brindado quiero dejarles estas palabras:

Son lo mejor que he podido tener en esta vida que es tan suya, siempre los llevo en mi mente y en mi corazón y cada paso que dé quiero hacerlo a su lado.

Índice General

1. INTRODUCCIÓN	- 8 -
2. MARCO TEÓRICO	- 10 -
2.1. Conceptos Básicos de acústica	- 10 -
2.1.1. Nivel de presión sonora y potencia sonora	- 10 -
2.2. Conceptos Básicos de acústica de recintos	- 11 -
2.2.1. Onda estacionaria en recintos rectangulares	- 12 -
2.2.2. Absorción y reflexión	- 13 -
2.2.3. Área de absorción equivalente	- 14 -
2.2.4. Reverberación y tiempo de reverberación	- 14 -
2.2.5. Acústica de rayos y una formula general del tiempo de reverberación	- 15 -
2.2.6. Fuentes imagen y fuentes secundarias	- 17 -
2.2.7. Dispersión	- 18 -
2.2.8. Aislamiento Acústico	- 19 -
2.2.9. Algunos aspectos de la audición humana	- 20 -
Curvas de ponderación sonora	- 21 -
2.3. El ruido y sus efectos en el ser humano	- 22 -
2.4. Normatividad	- 24 -
3. INSTRUMENTACIÓN Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE LOS PARÁMETROS ACÚSTICOS	- 27 -
-	-
3.1. Construcción y Caracterización de la fuente omnidireccional sonora	- 27 -
3.1.1. Construcción	- 27 -
3.1.2. Caracterización	- 30 -
Análisis en la cámara reverberante	- 31 -
Análisis en la cámara anecoica	- 37 -
3.2. Obtención de la respuesta al impulso a través de secuencias de máxima longitud y barridos exponenciales	- 44 -
3.2.1. Método de secuencias de máxima longitud (MLS)	- 44 -
3.2.2. Método de barridos Sinusoidales Exponenciales (ESS)	- 46 -
3.3. Obtención de niveles de ruido en puntos aleatorios del plantel escolar	- 48 -
3.3.1. Procesamiento de las señales adquiridas	- 51 -
4. ANTECEDENTES Y SITUACIÓN ACÚSTICA ACTUAL DEL PLANTEL 5 DE LA E.N.P.	- 55 -
4.1. Elaboración del mapa de ruido	- 56 -

4.2. Valoración Acústica de los salones del plantel escolar	- 63 -
4.2.1. Parámetros acústicos obtenidos a partir de la respuesta al impulso	- 64 -
Salón F23	- 65 -
Laboratorio B27	- 70 -
Salón A22	- 75 -
5. PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO PARA EL RECINTO ESCOLAR	- 80 -
5.1. Obtención del tiempo de reverberación óptimo	- 80 -
5.1.2. Obtención de los parámetros <i>EDT</i> y <i>T30</i> simulados y su comparación	- 86 -
Salón F23	- 86 -
Propuesta de tratamiento acústico para salones del tipo F23	- 88 -
Salón A22	- 94 -
Propuesta de tratamiento acústico para salones del tipo A22	- 95 -
Laboratorio B27	- 98 -
Propuesta de tratamiento acústico para salones del tipo B27	- 99 -
5.2. Propuestas de aislamiento acústico del ruido exterior en las áreas problemáticas	- 102 -
5.2.1. Aislamiento Acústico de los alrededores	- 104 -
5.2.2. Aislamiento acústico de puertas	- 106 -
5.2.3. Aislamiento acústico de ventanas	- 108 -
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y MEJORAS A LA PROPUESTA	- 109 -
7. ANEXOS	- 112 -
7.1. Anexo referente al capítulo 3	- 112 -
7.1.1. Códigos en Matlab de las mediciones en la cámara reverberante	- 112 -
7.1.2. Código en Matlab de las mediciones realizadas en la cámara anecoica	- 115 -
7.2. Anexo referente al capítulo 4	- 116 -
7.2.1. Como almacena los datos el sonómetro	- 116 -
7.2.2. Código en Matlab para el análisis de las muestras de ruido	- 117 -
7.2.3. Descripción sobre el programa en Matlab para las muestras de ruido	- 124 -
7.2.3. Descripción del uso de <i>Dirac</i> para la obtención de la respuesta al impulso	- 128 -
7.3. Anexo referente al capítulo 5	- 131 -
7.3.1. Descripción sobre el uso de <i>Odeon</i> para simular los parámetros deseados	- 131 -
BIBLIOGRAFÍA	- 135 -

Índice de figuras y gráficas

Figura 2.1. Típica curva de decaimiento medida con ruido interrumpido en el tiempo $t=0$.	- 15 -
Figura 2.2. Representación de una onda plana que viaja en forma de rayo entre muros en un recinto.	- 16 -
Figura 2.3. (a) Reflexión en una superficie, (b) Reflexión en dos superficies. A es la fuente y R el receptor. Fuentes imagen de primer orden son representadas con A' y de segundo orden con A''.	- 17 -
Figura 2.4. Método de fuentes secundarias. Reduce el tiempo de cálculo de las reflexiones tardías.	- 18 -
Figura 2.5. Dispersión dada por distintas irregularidades: (a) $d \ll \lambda$, (b) $d \approx \lambda$ y (c) $d \gg \lambda$.	- 18 -
Figura 2.6. Curvas de igual sonoridad. La curva punteada corresponde a la curva umbral promedio del escucha humano y corresponde a 3 fones aproximadamente.	- 20 -
Figura 2.7. Curvas de ponderación A, C.	- 21 -
Figura 3.1. Representación pictórica de una fuente omnidireccional del tipo dodecaedro.	- 27 -
Figura 3.2. Diagrama de conexión de los altavoces de la fuente omnidireccional.	- 28 -
Figura 3.3. Dodecaedro utilizado en la construcción de la fuente omnidireccional.	- 28 -
Figura 3.4. Comienzo de ensamble de los altavoces en el dodecaedro.	- 28 -
Figura 3.5. Ensamble y conexión de altavoces en el dodecaedro.	- 29 -
Figura 3.6. Fuente omnidireccional.	- 29 -
Figura 3.7. Fuente omnidireccional.	- 29 -
Figura 3.8. Fuente omnidireccional terminada.	- 29 -
Figura 3.9. Conector <i>SpeakOn</i> de 4 polos o dos canales de audio.	- 30 -
Figura 3.10. Conexión RCA a XLR desbalanceada.	- 30 -
Figura 3.11. Filtro paso-banda utilizado para limitar el ancho de banda de la fuente omnidireccional.	- 32 -
Figura 3.12. Espectro en frecuencia del micrófono 1 en la primera posición con el ajuste realizado.	- 33 -
Figura 3.13. Posición 1 de la fuente omnidireccional en la cámara reverberante.	- 33 -
Figura 3.14. Espectro en frecuencia del micrófono 2 en la segunda posición.	- 34 -
Figura 3.15. Posición 2 de la fuente omnidireccional en la cámara reverberante.	- 34 -
Figura 3.16. Espectro en frecuencia del micrófono 3 en la 3ra. posición.	- 35 -
Figura 3.17. Posición 3 de la fuente omnidireccional en la cámara reverberante.	- 35 -
Figura 3.18. Ecuilibración para obtener una respuesta plana de los niveles emitidos por la fuente.	- 36 -
Figura 3.19. Promedios espaciales de los niveles de presión sonora emitidos por la fuente.	- 37 -
Figura 3.20. Caracterización de la fuente omnidireccional sonora en la cámara anecoica.	- 38 -
Figura 3.21. Patrón de radiación de la Fuente omnidireccional en 125 Hz.	- 39 -
Figura 3.22. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 250 Hz.	- 40 -
Figura 3.23. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 500 Hz.	- 40 -
Figura 3.24. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 1 kHz.	- 41 -
Figura 3.25. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 2 kHz.	- 41 -
Figura 3.26. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 4 kHz.	- 42 -
Figura 3.27. Desviación en la omnidireccionalidad de la fuente según la norma ISO-3382.	- 43 -
Figura 3.28. Desviación en la omnidireccionalidad de la fuente según la norma ISO-140.	- 43 -
Figura 3.29. Obtención de la respuesta al impulso por el método de las MLS. Diagrama a bloques.	- 45 -
Figura 3.30. Grabación del tono de calibración.	- 50 -
Figura 3.31. Calibración del sonómetro.	- 50 -
Figura 3.32. Posición del micrófono para la toma de niveles de ruido de fondo.	- 51 -
Figura 4.1. Colocación de micrófonos para la grabación de niveles de ruido.	- 57 -
Figura 4.2. Grabación con un solo micrófono.	- 57 -
Figura 4.3. Mapa de ruido de la E.N.P plantel 5 UNAM.	- 58 -
Figura 4.4. GUI de Matlab para las muestras de ruido.	- 62 -
Figura 4.5. Respuesta al impulso generada en "Dirac" y algunos parámetros que la acreditan.	- 64 -
Figura 4.6. Parámetro T_{30} del tiempo de reverberación y su desviación estándar.	- 65 -
Figura 4.7. Parámetro T_{30} del tiempo de reverberación y valores máx. y mín. de las posiciones.	- 66 -
Figura 4.8. EDT con su desviación estándar.	- 67 -
Figura 4.9. EDT con sus valores máximos y mínimos.	- 67 -
Figura 4.10. Posición 1 de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del salón F23.	- 68 -

Figura 4.11. Posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso en el salón F23.	- 68 -
Figura 4.12. Posición 3 de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del salón F23.	- 69 -
Figura 4.13. Posición 4 de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del salón F23.	- 69 -
Figura 4.14. Representación pictórica del salón F23.	- 70 -
Figura 4.15. T_{30} del laboratorio B27 con su desviación estándar.	- 71 -
Figura 4.16. Gráfica del T_{30} con sus valores máximos y mínimos.	- 71 -
Figura 4.17. Gráfica del EDT con su respectiva desviación estándar.	- 72 -
Figura 4.18. Gráfica del EDT con sus valores máximos y mínimos.	- 72 -
Figura 4.19. Primera posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso lab. B27.	- 73 -
Figura 4.20. Segunda posición de micrófono para la obtención de la respuesta al impulso lab. B27.	- 73 -
Figura 4.21. Tercera posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del lab. B27.	- 74 -
Figura 4.22. Cuarta posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del lab. B27.	- 74 -
Figura 4.23. Dibujo en 3D del laboratorio B27 con vista al interior.	- 75 -
Figura 4.24. Gráfica del T_{30} con su desviación estándar.	- 75 -
Figura 4.25. Gráfica del T_{30} con sus valores máximos y mínimos.	- 76 -
Figura 4.26. Gráfica del EDT con su respectiva desviación estándar.	- 76 -
Figura 4.27. Gráfica del EDT con sus valores máximos y mínimos.	- 77 -
Figura 4.28. Primera posición de micrófono para la obtención de la respuesta al impulso.	- 77 -
Figura 4.29. Segunda posición de micrófono para la obtención de la respuesta al impulso.	- 78 -
Figura 4.30. Vista en 3D del salón A22.	- 78 -
Figura 5.1. Salón F23 a detalle de superficie.	- 81 -
Figura 5.2. Salón F23 a detalle con vista al interior.	- 82 -
Figura 5.3. Salón F23 con reducción de superficies.	- 82 -
Figura 5.4. Salón F23 con reducción de superficie para la eficiencia de cálculos en <i>Odeon</i> .	- 83 -
Figura 5.5. Salón A22 a detalle de superficie.	- 83 -
Figura 5.6. Salón A22 con detalles de superficie y vista al interior.	- 84 -
Figura 5.7. Salón A22 con reducción de superficie para su simulación en <i>Odeon</i> .	- 84 -
Figura 5.8. Laboratorio B27 a detalle de superficie.	- 85 -
Figura 5.9. Laboratorio B27 con reducción en superficies.	- 85 -
Figura 5.10. Laboratorio B27 superficies reducidas con vista al interior.	- 85 -
Figura 5.11. Salón F23. El color en cada superficie indica la absorción acústica en analogía con la luz.	- 86 -
Figura 5.12. EDT del salón F23 simulado vs medido.	- 87 -
Figura 5.13. T_{30} del salón F23 medido vs simulado.	- 87 -
Figura 5.14. Modificaciones propuestas al salón F23 realizadas en <i>SketchUp</i> para su simulación.	- 90 -
Figura 5.15. Salón F23 con las mejoras propuestas. La coloración indica la absorción acústica.	- 90 -
Figura 5.16. Gráfica del EDT . Salón F23, simulación con mejoras vs medido actuales.	- 91 -
Figura 5.17. Gráfica del T_{30} . Salón F23, simulación con mejoras vs medidos actuales.	- 91 -
Figura 5.18. Salón F23 con el agregado de alfombra en piso.	- 92 -
Figura 5.19. Salón F23 con el añadido de alfombrado al piso. La coloración indica la absorción acústica en analogía con la luz.	- 92 -
Figura 5.20. EDT . Gráfica de valores obtenidos de la simulación comparados con los valores medidos actuales.	- 93 -
Figura 5.21. Gráfica del T_{30} , Simulación con agregado de alfombra en piso vs medidas actuales.	- 93 -
Figura 5.22. Salón A22. El color en cada superficie indica la absorción acústica (análogo a la luz).	- 94 -
Figura 5.23. EDT del salón A22 simulado vs medido.	- 94 -
Figura 5.24. T_{30} del salón A22 medido vs simulado.	- 95 -
Figura 5.25.- Salón A22 con mejoras. El color en cada superficie indica la absorción acústica.	- 96 -
Figura 5.26. Salón A22 con las modificaciones propuestas, plafón acústico con lana mineral.	- 96 -
Figura 5.27. Gráfica del EDT del salón A22, simulación con mejoras vs medidas actuales.	- 97 -
Figura 5.28. Gráfica del T_{30} , simulación con las mejoras propuestas vs la medidas actuales.	- 97 -
Figura 5.29. Salón B27. El color en cada superficie indica la absorción acústica.	- 98 -
Figura 5.30. Gráfica del EDT del salón B27, simulación vs medidas actuales.	- 98 -
Figura 5.31. Gráfica del T_{30} del salón B27, simulación vs medidas actuales.	- 99 -

Figura 5.32. Salón B27 con mejoras. El color en cada superficie indica absorción acústica.	- 100 -
Figura 5.33. Salón B27 con las mejoras propuestas (plafón acústico con lana mineral y cortinas).	- 101 -
Figura 5.34. Gráfica del EDT. Comparación de valores simulados con propuesta y medidos actuales.	- 101 -
Figura 5.35. Gráfica del T30. Simulado con mejoras propuestas vs los medidos actualmente.	- 102 -
Figura 5.36. Porcentaje de inteligibilidad en función de la relación señal a ruido y el tiempo de reverberación.	- 103 -
Figura 5.37. Actual situación en la E.N.P. plantel 5, donde no existe un aislamiento adecuado del ruido exterior.	- 105 -
Figura 5.38. Propuesta de aislamiento acústico para problemas de ruido exterior.	- 105 -
Figura 5.39. Bosquejo con posible ubicación de los árboles para el aislamiento.	- 106 -
Figura 5.40. Mal aislamiento acústico en puertas de los tres tipos de salones.	- 107 -
Figura 5.41. Sección de una ventana doblemente vidriada	- 108 -
Figura 5.42. Gráfica de aislamiento acústico para ventanas doblemente vidriadas con distintos grosores de espaciamiento.	- 108 -
Figura 7.1. Barra de herramientas del programa "Análisis de muestras de ruido".	- 124 -
Figura 7.2. Interfaz gráfica de Usuario de Matlab para el análisis de muestras de ruido.	- 125 -
Figura 7.3. Pasos para la obtención de los niveles equivalentes y gráfica del ruido.	- 125 -
Figura 7.4. Cálculo y obtención de la gráfica del ruido.	- 126 -
Figura 7.5. Selección y gráfica de los archivos del sonómetro.	- 126 -
Figura 7.6. Como mantener ambos gráficos.	- 127 -
Figura 7.7. Botones para mostrar los niveles equivalentes.	- 127 -
Figura 7.8. Panel de grabación de la respuesta al impulso para la obtención de parámetros.	- 128 -
Figura 7.9. Descripción sobre el panel del receptor para la grabación de la respuesta al impulso.	- 129 -
Figura 7.10. Descripción de la última parte del panel de grabación de la respuesta al impulso.	- 129 -
Figura 7.11. Descripción sobre como aparece el retardo de la tarjeta de sonido en <i>Dirac</i> .	- 130 -
Figura 7.12. Forma manual de calibrar el equipo de cómputo para las mediciones.	- 130 -
Figura 7.13. Botón que se utiliza para encontrar fallos en el modelo 3D	- 131 -
Figura 7.14. Pantalla de definición de fuente y receptor para la simulación.	- 132 -
Figura 7.15. Acceso a la pantalla de asignación de materiales.	- 132 -
Figura 7.16. Estimación del tiempo de reverberación.	- 133 -
Figura 7.17. Pantalla de "Job list" para la obtención de los parámetros seleccionados.	- 134 -

Índice de Tablas

Tabla 4.1. Salones de la E.N.P. plantel 5 UNAM.	- 56 -
Tabla 4.2. Niveles equivalentes de las grabaciones para la creación del mapa de ruido.	- 59 -
Tabla 5.1. Límites de los niveles de ruido de fondo en ponderación A y tiempo de reverberación.	- 80 -
Tabla 5.2. Área mínima requerida de material absorbente para los distintos α_1 y un $T_{60} = 0.6s$.	- 88 -
Tabla 5.3. Coeficientes de absorción de materiales propuestos para la adecuación del salón F23.	- 89 -
Tabla 5.4. Coeficientes de absorción de materiales propuestos para la adecuación del salón A22.	- 96 -
Tabla 5.5. Área mínima requerida de material absorbente para los distintos α_1 y un $T_{60} = 0.7s$	- 99 -
Tabla 5.6. Coeficientes de absorción de materiales propuestos para la adecuación del Salón B27.	- 101 -
Tabla 5.7. Fragmento de la tabla 4.1.	- 103 -
Tabla 5.8. Niveles sonoros en ponderación A, a un metro de distancia del escucha.	- 104 -

1. Introducción

Uno de los factores que influyen en el proceso enseñanza-aprendizaje en salones de clase de un recinto escolar, es la inteligibilidad del habla, la cual depende de dos variables acústicas: nivel de ruido de fondo y tiempo de reverberación. Estudios teóricos sobre los tiempos de reverberación óptimos en salones de clase no ocupados¹ basados en la teoría del campo difuso y el uso de métricas apropiadas de la inteligibilidad del habla mencionan que una escuela con niveles de ruido elevados y salones con tiempos de reverberación inadecuados no son aptos para impartir clases; esto tiene como consecuencia, problemas de salud tanto a los alumnos como a los maestros. Un estudio en psicología realizado por Rodríguez Estrada², proporciona un esquema donde integra todos los problemas físicos y psicológicos, al destacarse daño auditivo acumulativo, irritabilidad, bajo rendimiento y alteraciones del sueño ocasionados por estar expuestos a niveles altos y en tiempos prolongados de ruido con la añadidura de que la energía acústica dentro del salón tarde inadecuadamente en extinguirse (ejemplos de fuentes de ruido: tránsito vehicular, platica de alumnos fuera de su salón de clases, mantenimiento de áreas verdes del campus).

El objetivo del presente trabajo es proponer una solución al problema de las malas condiciones acústicas que padecen en la actualidad la mayoría de los recintos escolares de nuestro país, “donde las mismas autoridades educativas reconocen un rezago de 25 años en la infraestructura educativa”¹. Debido a la creciente queja en la Escuela Nacional Preparatoria plantel No. 5 de la UNAM (E.N.P. plantel 5) sobre fuertes ruidos producidos tanto en el interior como en el exterior de las instalaciones y a que alumnos no distinguen lo que el profesor dice en clase se realizó con base en el criterio establecido por la norma ANSI/ASA S12.60-2010/part1 un estudio en el que: Se obtienen tiempos de reverberación en tres tipos de salones, además de niveles de ruido de fondo en puntos al azar dentro del complejo para saber su influencia y así determinar una solución adecuada para cada salón de clases a través de sistemas de absorción y aislamiento con la ayuda de programas de computación y documentación especializada en el tema.

Capítulo 2

Marco Teórico

2. Marco Teórico

2.1. Conceptos Básicos de acústica

La acústica se encarga del estudio del sonido, que es la propagación de vibraciones mecánicas en forma de onda a través de un medio elástico. Las ondas sonoras producen movimientos hacia atrás y hacia delante de las moléculas del fluido en la dirección de propagación (ondas longitudinales) sin que haya un flujo neto de este, como consecuencia hay cambios en presión y densidad.

Si el medio es un líquido o gas, se deforma fácilmente y por tanto es incapaz transmitir esfuerzos cortantes, por lo que responde ante cualquier cambio de forma sólo por inercia. Por otra parte, se puede decir que un fluido reacciona contra un cambio en el volumen con un cambio en la presión.

En las ondas sonoras se presentan los fenómenos de: interferencia, reflexión, absorción, difracción y refracción. Su velocidad de propagación tiene una ligera dependencia con la frecuencia, medio de propagación y temperatura entre otros factores. En términos generales se puede definir una velocidad de grupo en el aire y su expresión es la siguiente:

$$c = 331.4 + 0.6 \cdot \theta \text{ [m/s]} \quad 2.1$$

Donde θ es la temperatura del aire. En condiciones de 15 °C la velocidad es de 340 m/s.

2.1.1. Nivel de presión sonora y potencia sonora

Antes de definir el nivel de presión sonora y potencia sonora, conviene revisar la definición de decibel y valor eficaz de una señal.

El decibel es la décima parte de un bel y relacionan dos magnitudes de manera logarítmica y se define como:

$$dB = 10 \log \left(\frac{C_1}{C_0} \right) dB \quad 2.2$$

Donde C_0 por lo general es la cantidad de referencia y C_1 es la cantidad de la cual queremos saber su valor en decibeles.

El valor eficaz de una señal es la raíz del promedio cuadrático de los valores instantáneos de la señal durante un periodo completo y su expresión es la siguiente:

$$p_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt\right)} = (\overline{p^2})^{1/2} \quad 2.3$$

El nivel de presión sonora relaciona logarítmicamente dos cantidades, una de ellas se llama valor umbral de la audición o referencia, donde los trabajos de Fletcher y Munson llegaron a la conclusión de que el oído humano puede captar niveles de presión sonora de $20 * 10^{-6} Pa @ 1kHz$ o bien 20 millonésimas de pascal a una frecuencia de 1000 Hz; la otra cantidad es la que se quiere conocer su valor en esta escala logarítmica y la expresión se define:

$$NPS = 20 \log\left(\frac{p_1}{p_0}\right) dB \quad 2.4$$

Donde p_0 es la presión de referencia que es la cantidad de $20 \mu Pa$ mencionados y p_1 es la presión que se quiere expresar en dB. Las razones principales de su uso son porque el comportamiento del oído puede modelarse logarítmicamente, además, trabajar con cantidades de presión sonora es muy grande debido a que la relación de los valores comprendidos desde el umbral de la audición hasta el umbral del dolor ($20 Pa$) es de 1 millón.

Para una señal estacionaria no limitada en tiempo podemos utilizar su valor eficaz de presión sonora para encontrar esta relación en dB y es:

$$NPS = L_p = 20 \log\left(\frac{p_{rms}}{p_0}\right) dB \quad 2.5$$

Esta expresión no solo se limita a la relación de una cantidad respecto de un nivel de referencia por lo que si nosotros deseamos saber la diferencia de niveles que existen entre dos campos o señales estacionarias podemos definirlo de la siguiente manera:

$$\Delta L_p = \Delta SPL = 20 \log\left(\frac{p_{rms1}}{p_{rms2}}\right) dB \quad 2.6$$

2.2. Conceptos Básicos de acústica de recintos

Principalmente la acústica de recintos estudia el comportamiento de la propagación del sonido en espacios cerrados. Las fronteras del recinto hacen que la energía sea distribuida de la siguiente manera: una parte se refleja, otra parte se extrae de este campo sonoro y se convierte ya sea en calor o se transmite hacia el exterior de la superficie incidente. La combinación de las numerosas

componentes reflejadas y la complejidad del campo sonoro es lo que se conoce como acústica del recinto.

2.2.1. Onda estacionaria en recintos rectangulares

La ecuación de onda en un recinto rectangular con dimensiones en l_x , l_y y l_z según [1], se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad 2.7$$

Donde p es la presión sonora y $k = \omega/c$ es el número angular de onda, ω es la frecuencia angular y c es la velocidad del sonido en el aire. La ecuación se resuelve por separación de variables y suponer que la solución puede escribirse como:

$$p = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \cdot e^{j\omega t} \quad 2.8$$

Si se sustituye en 2.7 y se divide entre p nos queda:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{Y} \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} + k^2 = 0 \quad 2.9$$

Donde el número angular de onda es:

$$k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 \quad 2.10$$

Al separarse y tomar únicamente la dirección en x queda:

$$\frac{1}{X} \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + k_x^2 = 0 \quad 2.11$$

Esta es la ecuación de onda unidimensional en dirección de x y una solución general es:

$$X(x) = C_x \cos(k_x x + \varphi_x) \quad 2.12$$

Donde C_x y φ_x se determinan por las condiciones de frontera. Si estas condiciones asumen que el cuarto tiene superficies rígidas significa que la componente normal de la velocidad de partícula es cero en la frontera y su expresión es:

$$u_x = -\frac{1}{j\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \text{para } x = 0 \text{ y } x = l_x \quad 2.1$$

Esta ecuación significa, por un lado, que el ángulo de desfaseamiento se hace cero ($\varphi_x = 0$). Por el otro lado, de la solución general se observa que el coseno en $x = 0$ posee la tangente horizontal requerida para hacer cero a la velocidad de partícula, de manera similar se debe cumplir para $x = l_x$ y eso se logra con $\cos(k_x l_x) = \pm 1$, por lo que el factor $k_x l_x$ debe ser un número entero de π . Por tanto el número angular de onda está dado por la siguiente expresión:

$$k_x = \frac{\pi}{l_x} n_x \quad \text{donde } n_x = 0, 1, 2, 3 \dots \quad 2.14$$

Un proceso similar se aplica al resto de las direcciones. Así que la solución a la ecuación de onda (ecu. 2.8) queda:

$$p = p_0 \cos\left(\pi n_x \frac{x}{l_x}\right) \cdot \cos\left(\pi n_y \frac{y}{l_y}\right) \cdot \cos\left(\pi n_z \frac{z}{l_z}\right) e^{j\omega t} \quad 2.15$$

Podemos observar que la amplitud sonora no se mueve respecto al tiempo por lo que a esta solución se le llama onda estacionaria o en ocasiones también la llaman los modos del recinto y cada uno de ellos está relacionado a una frecuencia natural o dada por:

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{ck}{2\pi} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad 2.16$$

Donde los modos pueden dividirse en tres grupos: si ningún entero es cero, el modo se llama oblicuo. Si uno de los enteros es cero el modo se llama tangencial porque el vector de propagación es paralelo a un par de superficies. Si dos enteros son cero, se llama axial debido a que el vector de propagación es paralelo a uno de los ejes.

2.2.2. Absorción y reflexión

Para describir estos fenómenos en acústica, se supone una onda plana que incide en una superficie muy grande, de ahí, parte de su energía se refleja en forma de onda originada por el muro, su amplitud y fase difieren de la onda incidente; ambas se interfieren y dan lugar a una onda estacionaria de manera parcial. Los cambios en la amplitud y fase que sufre la onda al momento de reflejarse en la superficie se le conoce como factor de reflexión y se expresa como $R = |R|e^{j\chi}$, la cual es una propiedad del muro. Su valor absoluto y ángulo de fase depende de la frecuencia y ángulo de la onda incidente.

De la ecuación $I = \hat{p}^2/2\rho_0c$, la intensidad de energía de la onda sonora es proporcional al cuadrado de la amplitud de la presión sonora (\hat{p}), por tanto la intensidad de la onda reflejada es menor en un factor de $|R|^2$ de la onda incidente y la fracción $1 - |R|^2$ de esta energía se pierde durante la reflexión. A esto se le llama coeficiente de absorción:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad 2.17$$

El valor del coeficiente está en el intervalo de 0 y 1, en donde valores cercanos a cero indican superficies altamente reflejantes y valores cercanos a 1, superficies altamente absorbentes. Además, al depender del factor de reflexión, el coeficiente de absorción α también depende de la frecuencia.

2.2.3. Área de absorción equivalente

La fracción de energía que se pierde durante la reflexión o la relación entre la energía sonora no reflejada a la energía incidente en una superficie es lo que conocemos como coeficiente de absorción. Si se multiplica ese coeficiente por el área total de dicha superficie se obtiene el área de absorción equivalente y para un recinto es:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2 \dots = S \alpha_m \quad 2.18$$

Donde S es el área total del recinto y α_m el coeficiente de absorción promedio. En general el área de absorción equivalente también puede incluir la absorción debida al aire, personas y otros objetos en el cuarto.

2.2.4. Reverberación y tiempo de reverberación

Para explicar la reverberación, se considera que una fuente sonora comienza a emitir energía en el interior de un recinto, ésta al interactuar con las paredes se refleja, otra parte de esa energía se absorbe y otro tanto se transmite hacia fuera del recinto. Si la fuente continúa con esta emisión de energía habrán ocurrido muchas reflexiones en el lugar, tantas que ahora el campo sonoro es una mezcla al azar de ondas que viajan en todas direcciones. Bajo esta condición existe un balance energético que equilibra la energía disipada mediante la absorción y transmisión; con la energía emitida por la fuente, es decir, se llega a un estado estable.

Si la fuente sonora ha emitido energía y el recinto ha alcanzado su estado estable y en el tiempo $t = 0$ se apaga, continuarán las reflexiones hasta que alcance el estado estable anterior a la emisión, es decir, habrá un balance entre la energía emitida con la energía absorbida y transmitida hasta que se extinga. Cada reflexión existente tendrá las características de amplitud en la frecuencia debida al coeficiente de absorción. A todo este proceso es lo que se llama **reverberación**. Se observa que el comportamiento de la presión y por tanto la energía sonora siguen un decaimiento exponencial que en escala logarítmica se identifica como un comportamiento lineal, a esto se le llama *curva de decaimiento*.

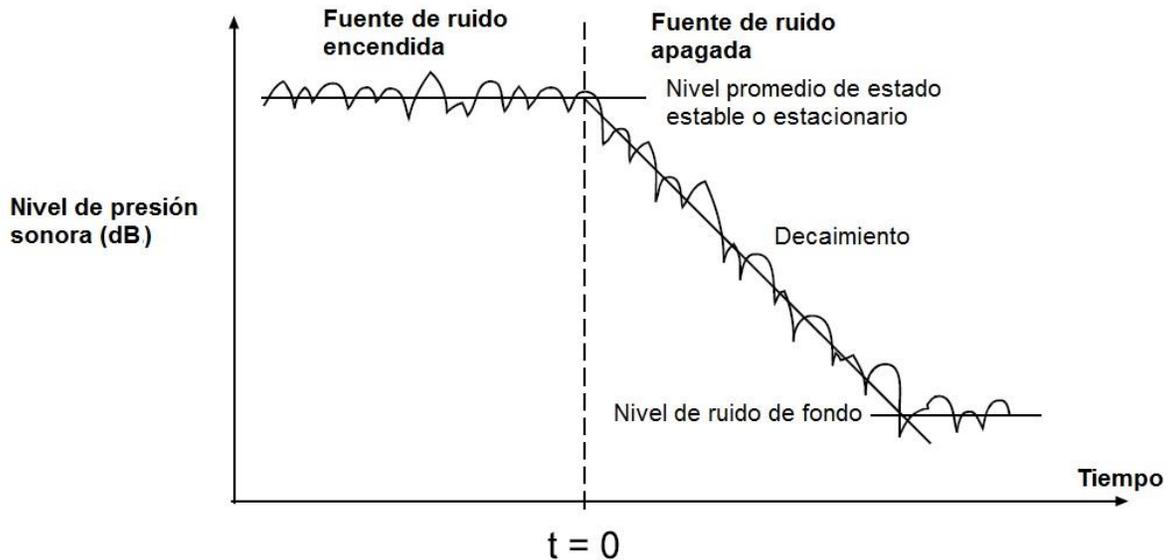


Figura 2.1. Típica curva de decaimiento medida con ruido interrumpido en el tiempo $t=0$.

A partir de la curva de decaimiento se determina un parámetro llamado **tiempo de reverberación**, el cual se define como el tiempo requerido para que la energía sonora decaiga a la millonésima parte de su valor inicial, es decir, se reduce en 60 dB el nivel de presión sonora desde su valor en estado estable. Sabine propone calcular este tiempo mediante la ecuación:

$$T_{60} = 6 \cdot \ln(10) \frac{4V}{cA} = \frac{55.3V}{cA} \quad 2.19$$

La fórmula de Sabine indica que el tiempo de reverberación es inversamente proporcional al área de absorción equivalente. La fórmula anterior es indistinta de las unidades, sin embargo para el sistema internacional donde el área y el volumen son dados en m^2 y m^3 respectivamente es común escribirla como:

$$T_{60} = 0.16 \frac{V}{A} \quad 2.20$$

Al sustituir la velocidad del sonido en el aire a $20\text{ }^\circ\text{C}$ $c = 343\text{ m/s}$.

2.2.5. Acústica de rayos y una fórmula general del tiempo de reverberación

En la acústica geométrica, los rayos son utilizados para describir la propagación sonora. El concepto de rayo implica que la fase y la longitud de onda son despreciadas al sólo considerar la dirección de propagación de la energía. El decaimiento sonoro ahora se estudia por medio de una onda plana que viaja como rayo de un muro al otro como lo muestra la figura 2.2 la energía disminuye gradualmente debido a la absorción de las superficies. Este rayo puede dirigirse en

cualquier dirección y considerar que su disminución energética es representativa para el decaimiento de energía del recinto, cualquiera que sea su forma.

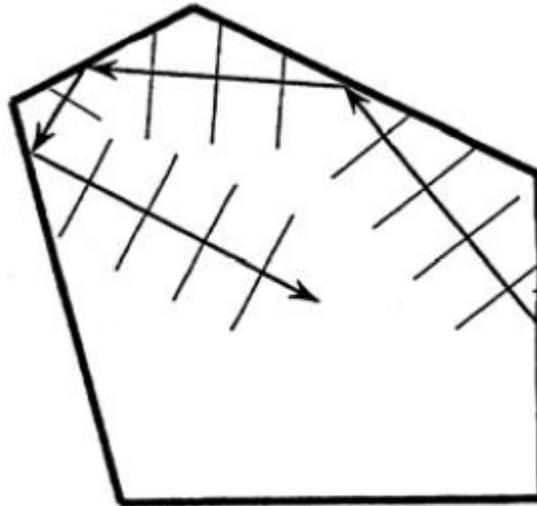


Figura 2.2. Representación de una onda plana que viaja en forma de rayo entre muros en un recinto.

Para un rayo que viaja en el interior de un recinto, por cada reflexión la energía disminuirá por un factor de $(1 - \alpha_m)$ y la distancia total recorrida por el rayo en el recinto a través del tiempo será igual al número de reflexiones multiplicadas por el recorrido medio libre l_m . Por tanto la expresión para el cuadrado de la presión sonora en el tiempo es:

$$p(t)^2 = p_0^2 \cdot e^{n \cdot \ln(1 - \alpha_m)} = p_0^2 \cdot e^{\frac{c}{l_m} \cdot \ln(1 - \alpha_m) \cdot t} \quad \text{donde } n \cdot l_m = c \cdot t = \sum_i l_i \quad 2.21$$

Ahora bien si nos vamos al punto en el que la presión ha disminuido a su millonésima parte del valor inicial, tenemos:

$$10^{-6} = e^{\frac{c}{l_m} \cdot \ln(1 - \alpha_m) \cdot T_{60}} \quad 2.22$$

Si se despeja al tiempo de reverberación queda:

$$T_{60} = \frac{13.8 \cdot l_m}{-c \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \approx \frac{13.8 \cdot l_m}{c \cdot \alpha_m} \quad 2.23$$

Esta última aproximación solo es válida sólo para coeficientes de absorción promedio menores a $\alpha_m < 0.3$ o recintos altamente reverberantes ya que proviene de:

$$-\ln(1 - \alpha_m) = \ln\left(\frac{1}{1 - \alpha_m}\right) = \alpha_m + \frac{\alpha_m^2}{2} + \frac{\alpha_m^3}{3} + \dots \quad 2.24$$

Si se supone que todas las direcciones de propagación sonora se dan con la misma probabilidad, el recorrido medio libre l_m está en función del volumen y el área total del recinto esto es:

$$l_m = 4V/S \quad 2.25$$

Si sustituimos l_m en el primer término de la ecuación 2.22 se le conoce de la ecuación se le conoce como fórmula de *Eyring*.

$$T_{60} = \frac{13.8 \cdot l_m}{-c \cdot \ln(1 - \alpha_m)} = \frac{55.3 V}{-c \cdot S \cdot \ln(1 - \alpha_m)} \quad 2.26$$

Si sustituimos l_m en el último término de la ecuación 2.22 nos da como resultado la ecuación de Sabine (ecuación 2.19).

2.2.6. Fuentes imagen y fuentes secundarias

La dirección de la reflexión sonora en una superficie plana sigue las mismas leyes geométricas conocidas en la óptica en las que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia; esto significa que el sonido reflejado se puede interpretar como un rayo acústico proveniente de una fuente que está por detrás de la superficie reflejante, este principio puede extenderse o altos ordenes de reflexión. Esto puede visualizarse en la figura 2.3.

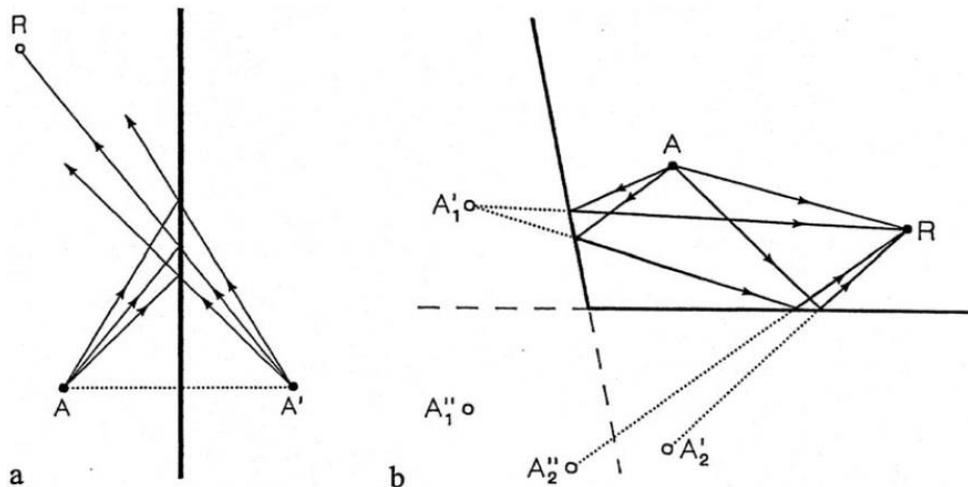


Figura 2.3. (a) Reflexión en una superficie, (b) Reflexión en dos superficies. A es la fuente y R el receptor. Fuentes imagen de primer orden son representadas con A' y de segundo orden con A''.

El método de las fuentes imagen es empleado en los programas de cómputo para el cálculo de las reflexiones tempranas, sin embargo al aumentar el orden de las reflexiones los procesos de cálculo pueden ser lentos y en algunas ocasiones innecesarios. Por esta razón, para las reflexiones tardías se utilizan las fuentes secundarias, las cuales se ubican en cada superficie y tienen un retardo que depende de la traza del rayo. Además contienen la información de absorción sonora y éstas sólo

aparecen según la visibilidad del receptor respecto a la fuente (ver figura 2.4). En otras palabras, los rayos son considerados secuencias de portadores de energía acústica la cual es reducida en cada reflexión acorde con los coeficientes de absorción de las superficies.

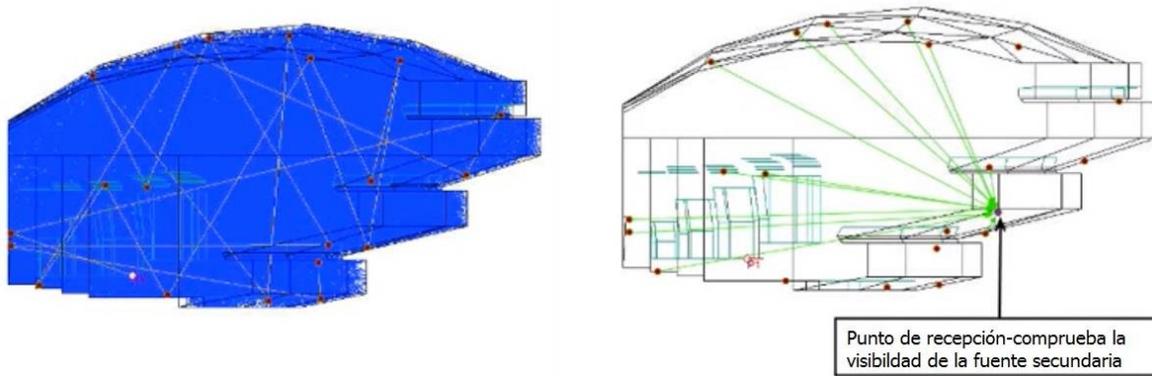


Figura 2.4. Método de fuentes secundarias. Reduce el tiempo de cálculo de las reflexiones tardías.

2.2.7. Dispersión

Cuando un muro no es completamente liso, sino que su superficie es irregular, puede contener salientes, bordes o algunas protuberancias. Si estas formas irregulares en los muros no son comparables con la longitud de onda, serán invisibles para la energía sonora incidente. Sin embargo, en el caso contrario donde éstas sean mayores a la longitud de onda, habrá que considerarlas como un muro con su respectivo factor de reflexión. Hay un tercer caso en el que el tamaño de estas irregularidades es comparable con la longitud de onda, por tanto, habrá una notable fracción de componentes dispersadas en todas partes e incorporadas al campo reflejado de cada una de ellas. Tal caso se conoce como un muro difusamente reflejante. La figura 2.5 muestra estos tres casos:

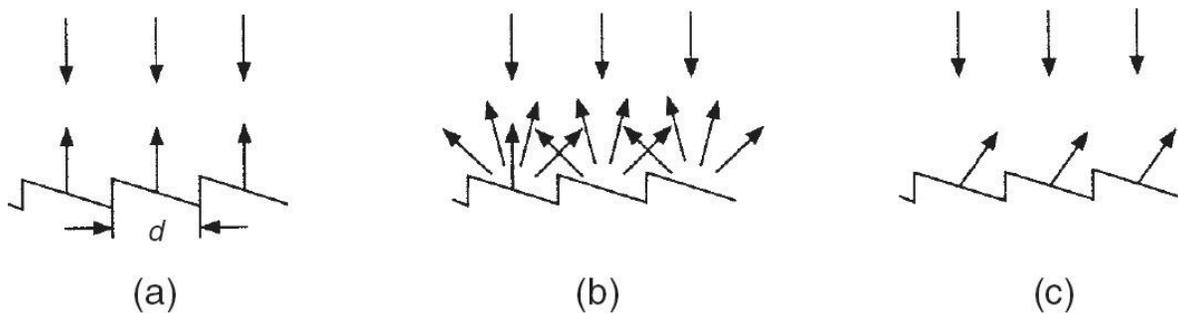


Figura 2.5. Dispersión dada por distintas irregularidades: (a) $d \ll \lambda$, (b) $d \approx \lambda$ y (c) $d \gg \lambda$.

Los muros difusamente reflectores no son la única manera de dispersar las ondas sonoras, también lo puede hacer un muro con una impedancia no uniforme, si esto ocurre en los límites de cada una de estas impedancias habrá una onda difractada que se dispersa.

2.2.8. Aislamiento Acústico

Existen diferentes formas de determinar el aislamiento acústico de un sistema: aislamiento acústico bruto, normalizado e índice de reducción sonora aparente.

El **aislamiento acústico bruto** como su nombre lo indica toma los valores promedio en tiempo y espacio de los niveles de presión sonora del recinto emisor y receptor y los resta como lo expresa la siguiente formula:

$$D = L_{P_1} - L_{P_2} [dB] \quad 2.27$$

Donde L_{P_1} y L_{P_2} es la media de los niveles de presión acústica en tiempo y espacio del recinto emisor y receptor respectivamente.

El **aislamiento acústico normalizado** es la diferencia de niveles que se calcula con respecto al tiempo de reverberación del recinto receptor. Se designa por la letra R y su expresión es la siguiente:

$$R = D + 10 \log \left(\frac{T}{T_0} \right) [dB] \quad 2.28$$

Donde D es el aislamiento acústico bruto, T y T_0 es el tiempo de reverberación del recinto receptor y emisor respectivamente.

El **aislamiento acústico aparente** es la diferencia de niveles con referencia al área de absorción equivalente del recinto receptor y se calcula con la ecuación:

$$R' = D + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) [dB] \quad 2.29$$

Donde D es el aislamiento bruto, S es el área de la muestra y A es el área de absorción equivalente del recinto receptor ambas en m^2 .

2.2.9. Algunos aspectos de la audición humana

Uno de los hechos evidentes de la audición humana es que el oído no percibe de igual manera sonidos de diferentes frecuencias; la sonoridad de un sonido depende generalmente de su nivel de presión sonora, su duración y de una manera más complicada de su composición espectral además de otros factores. La sonoridad se caracteriza por el “nivel de sonoridad” con el “fon” como su unidad y consiste en igualar el nivel de presión sonora de un tono de 1000 Hz al del sonido a caracterizar. La figura 2.6 muestra las curvas de igual sonoridad para señales sinusoidales audibles irradiadas al escucha frontalmente y en forma de ondas planas. La descripción de lo que significan estas curvas es la siguiente:

Si se genera un tono 1000 Hz a 40 dB que incide sobre el escucha, su nivel de sonoridad será de 40 fones, sin embargo, si el tono es de 100 Hz a ese mismo nivel de presión sonora, su nivel de sonoridad será de aproximadamente 24 fones, para que ambos tonos sean de igual sonoridad o que pertenezcan a la curva de los 40 fones el tono de 100 Hz debe tener un nivel de presión sonora de aproximadamente de 50 dB.

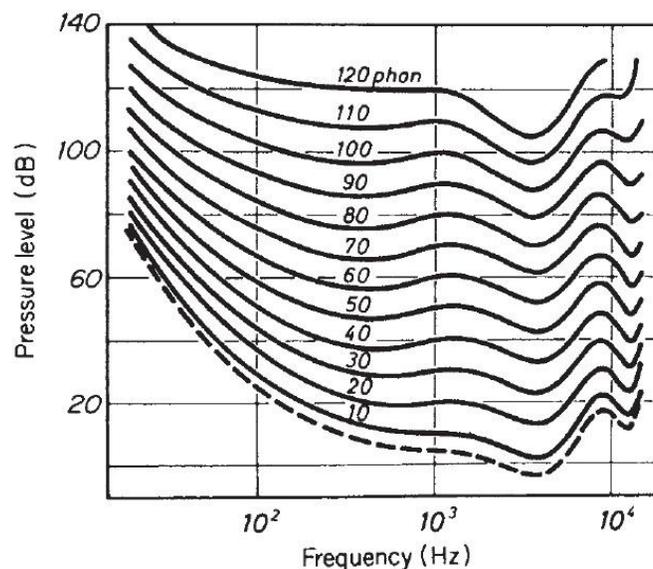


Figura 2.6. Curvas de igual sonoridad. La curva punteada corresponde a la curva umbral promedio del escucha humano y corresponde a 3 fones aproximadamente.

Al usar estas curvas, la sonoridad de un tono puro puede determinarse a partir de su frecuencia y su nivel de presión sonora. Con el fin de poder medir la sonoridad de un sonido se crearon los

sonómetros, los cuales consisten básicamente de: un micrófono calibrado, amplificadores y lo más importante, una red de ponderación, hecha por medio de filtros que atenúan en frecuencia y tratan de aproximarse a las curvas de igual sonoridad, sin embargo las mediciones de tales instrumentos no son las curvas de sonoridad en sí, sino el nivel de presión sonora medido a dicha ponderación. Existen varias funciones de ponderación sin embargo las más usadas son la ponderación "A" y "C".

Curvas de ponderación sonora

Las curvas de ponderación sonora son herramientas creadas con el propósito de que analizadores sonoros se aproximen a la respuesta de escucha del oído a distintos niveles de presión sonora, a continuación se definen dos curvas:

Ponderación A de nivel de sonido. Es el nivel de presión sonora medido con una ponderación de frecuencia convencional que más o menos aproxima a como el oído humano escucha las diferentes componentes de frecuencia de sonido a un nivel típico del habla. La ponderación A atenúa los niveles de frecuencias bajas del contenido de sonido. La ponderación A del nivel de sonido esta expresado en decibeles, su símbolo dB.

Ponderación C de nivel de sonido. Es el nivel de presión sonora medido con una ponderación de frecuencia convencional la cual no atenúa significativamente las componentes de baja frecuencia del contenido de sonido. La ponderación C de nivel de sonido es expresado en decibeles, su símbolo dB.

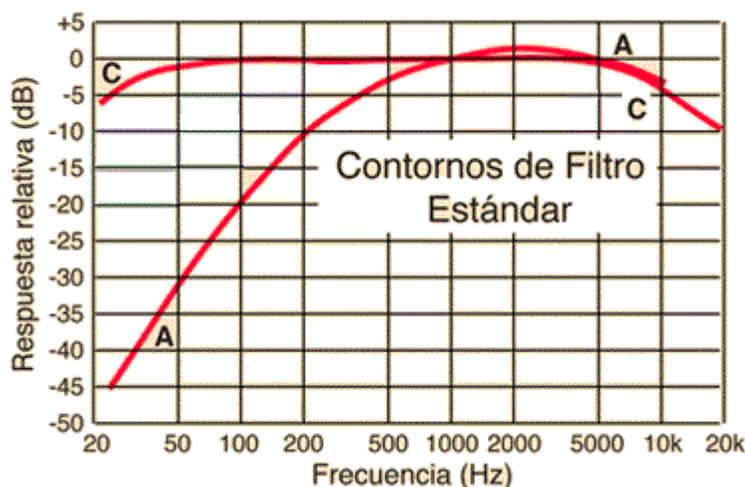


Figura 2.7. Curvas de ponderación A, C.

2.3. El ruido y sus efectos en el ser humano

Cuando se ejercen actividades escolares el ser humano necesita de concentración para llevarlas a cabo, por lo que es de vital importancia para un recinto escolar que los alumnos tengan las condiciones necesarias para llevar a acabo dichas actividades. Cualquier perturbación indeseada en el recinto durante la impartición de clases será considerada como ruido. Muchas son las fuentes que contribuyen al ruido y son aquellas que produzcan vibraciones en el rango auditivo del ser humano (20 Hz a 20 kHz) y que interfieren en la actividad desarrollada, por ejemplo, el motor de un automóvil al transitar la calle o una cortadora de césped. En las líneas siguientes se dará mención a la clasificación de tipos de ruido descritas en las normas NMX-AA-040-1976 y ANSI/ASA S12.60-2010/PART1:

Fuente interna de ruido de fondo. Ruido generado por los servicios públicos y del complejo escolar en cuestión por ejemplo el mantenimiento del césped o las actividades de recreo.

Fuente de ruido de fondo externa. Ruido de las fuentes de transporte, tales como el tráfico de aviones, vehículos, o de otras fuentes de ruido al aire libre (por ejemplo fuentes industriales).

Ruido de fondo. El sonido de espacios amueblados o de aprendizaje desocupados, incluyendo los de fuentes externas, servicios de construcción y servicios públicos. A los efectos de esta norma (ANSI/ASA S12.60-2010-Part1), el ruido de fondo no incluye sonido generado por las personas dentro del edificio o el sonido generado por los equipos de instrucción temporal o permanente.

Clasificaciones del ruido según NMX-AA-040-1976:

Según el tiempo:

- *Ruido estacionario:* Ruido cuyo nivel de presión sonora permanece constante a lo largo del tiempo.
- *Ruido fluctuante:* Ruido cuyo nivel de presión sonora varía en función del tiempo. Las fluctuaciones pueden ser periódicas o aleatorias (no periódicas). Se puede escoger un límite fluctuación para intentar separar lo que es un ruido estacionario, de uno fluctuante, que suele estar en torno a 6 dBA.
- *Ruido intermitente:* Ruido que aparece solamente en determinados instantes.

- *Ruido impulsivo*: Ruido cuyo nivel de presión sonora aumenta de manera muy acusada por encima del ruido de fondo en instantes muy cortos de tiempo (impulsos). Los impulsos pueden presentarse de manera aleatoria o repetitiva. Suele ser bastante más molesto que el ruido continuo.

Según la frecuencia:

- *Ruido Blanco*: Es un tipo de ruido con espectro plano, es decir, tiene la misma energía en todas las frecuencias. Si se representa esta energía en bandas de frecuencia el nivel aumenta 3dB por octava.
- *Ruido magenta*: Es aquel ruido de energía controlada cuyo espectro presenta una pendiente de - 5 dB /octava.
- *Ruido morado*: Es aquel ruido de energía controlada cuyo espectro presenta una pendiente de - 6 dB /octava.
- *Ruido rojo*: Es aquel ruido de energía controlada cuyo espectro presenta un pendiente de 3dB/octava.
- *Ruido Rosa*: Es un tipo de ruido que no tiene respuesta uniforme en todo el ancho de banda, sino que el nivel de energía decrece a razón de 3dB por octava. Si se representa esta energía en bandas de frecuencia vemos que el nivel permanece constante.
- *Ruido Tonal*: Este tipo de ruido presenta en su espectro una marcada componente tonal y puede oírse claramente el tono puro.
- *Ruido de Baja Frecuencia*: Consideraremos valores de baja frecuencia todo ruido que se encuentre entre 20 y 125 Hz. Algunas fuentes que generan componentes de baja frecuencia se encuentran dentro del grupo de maquinaria industrial, principalmente motores, así como transformadores.

Los efectos que puede tener el ruido sobre el ser humano pueden ser trastornos fisiológicos, esto es, la pérdida progresiva de la audición y psicológicos, al producir irritación y cansancio que desemboca en disfunciones de la vida cotidiana, ya sea en el rendimiento escolar y su relación interpersonal; algunos de los problemas que se han asociado a la exposición continua del ruido son: interferencias en la comunicación, perturbación del sueño, estrés, irritabilidad, disminución de rendimiento y concentración, agresividad, cansancio, dolor de cabeza, problemas de estómago, alteración del ritmo cardíaco, depresión del sistema inmunológico, etc.

Pérdidas en la audición como lesiones físicas inmediatas e irreversibles del órgano auditivo (dislocación de los huesillos del oído medio, pérdida de las células pilosas o hasta ruptura del tímpano), se deben a exposiciones de ruidos sumamente intensos pero de corta duración. La exposición continúa a niveles de ruido altos, ocasionan irreversibles pérdidas como la elevación temporal o permanente del umbral de la audición. Los efectos psicológicos que han sido relacionados con la exposición al ruido son el aislamiento, depresión, insomnio, fatiga, falta de concentración y de productividad entre otros. Todo individuo necesita que su aprendizaje anterior pueda ser memorizado de una manera correcta para mayor rendimiento y como en el caso de una actividad escolar, una persona expuesta a ruido se sobre activa, por lo que pierde concentración y ocasiona reducción en su rendimiento, por ejemplo, hace que la articulación en una tarea de repaso sea más lenta, especialmente cuando se tratan palabras desconocidas o de mayor longitud, como resultado, un individuo se desgasta psicológicamente para mantener su nivel de rendimiento. Además la exposición a ruido elevado, enmascara e interfiere con la percepción de las palabras emitidas en el salón de clases. Por otra parte un ruido repentino producirá distracciones que reducen el rendimiento en las actividades y del alumno, en especial las que requieren un mayor nivel de concentración.

2.4. Normatividad

Al buscar en el catálogo de normas mexicanas no se encontró alguna norma dedicada al tratamiento acústico de complejos escolares existentes o para construcción de nuevos con especificaciones acústicas. Por tanto se recurrió a una norma Internacional dedicada a los criterios de rendimiento, requerimientos de diseño y lineamiento acústico para existentes o nuevas construcciones. El listado de normas a las que se hace referencia en este trabajo se proporciona a continuación:

ANSI/ASA S12.60 2010/Part 1 Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools.

ISO 3382-1:2006 Medición de parámetros acústicos en recintos.

NMX-AA-040-1976 CLASIFICACION DE RUIDOS.

Hasta aquí la descripción de los conceptos básicos que sustentan e introducen en contexto con los capítulos siguientes, se recomienda leer la bibliografía que está al final de este trabajo para complementar los temas aquí tratados.

Capítulo 3
Instrumentación
y técnicas de
medición de los
parámetros
acústicos.

3. Instrumentación y técnicas de medición de los parámetros acústicos

3.1. Construcción y Caracterización de la fuente omnidireccional sonora

Para el análisis acústico de los salones, se requiere de una fuente de sonido que excite uniformemente al recinto, ayude con la obtención de la respuesta al impulso y a partir de ésta, determinar el tiempo de reverberación (EDT , T_{20} y T_{30}).

3.1.1. Construcción

Una fuente omnidireccional de sonido ideal irradia presión sonora en todas direcciones a la misma amplitud y en toda la gama de frecuencias audibles, sin embargo, en la realidad esta característica se verá limitada por las partes que la componen (altavoces, principalmente su respuesta en frecuencia y la forma del dodecaedro) por tanto, se pretende que la fuente sea lo más omnidireccional posible.

Para lograr una excitación uniforme y con ello un estado estable en el recinto es necesario que se irradie energía acústica en todas las direcciones, una aproximación a ese objetivo es colocar altavoces sobre las caras de un dodecaedro como se muestra en la figura 3.1. Por tanto, se construye una fuente omnidireccional de sonido para realizar dicha tarea y determinar algunas de las características acústicas de cualquier recinto cerrado como los salones de clase.

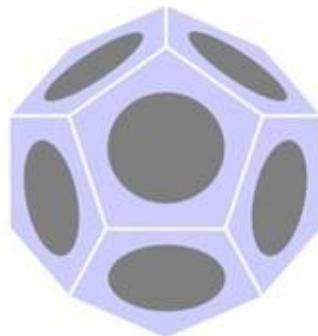


Figura 3.1. Representación pictórica de una fuente omnidireccional del tipo dodecaedro.

El dodecaedro para la fuente omni-direccional está hecho de “fibra de madera de mediana densidad” comúnmente conocido por MDF por sus siglas en inglés (*Medium density Fribeboard*). Los altavoces montados en cada cara del poliedro son de 5 pulgadas. La conexión de los altavoces se muestra en la figura 3.2 y fue diseñada así para ser conectados a cada canal del amplificador; eléctricamente la impedancia de cada altavoz es de 8Ω , por tanto para cada canal se tiene una impedancia de 12Ω .

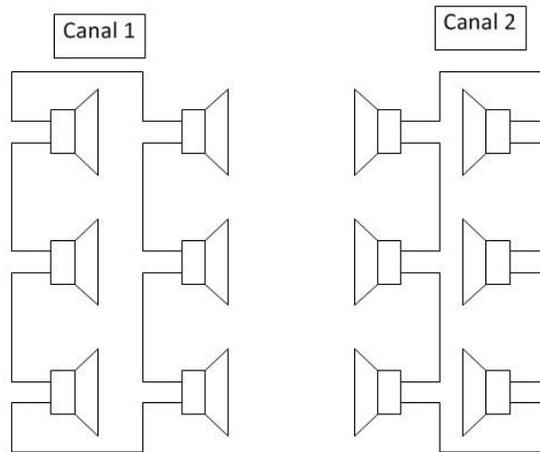


Figura 3.2. Diagrama de conexión de los altavoces de la fuente omnidireccional.

De las figuras 3.3 a 3.8 se muestra una cronología sobre el armado de los componentes de la fuente omnidireccional.

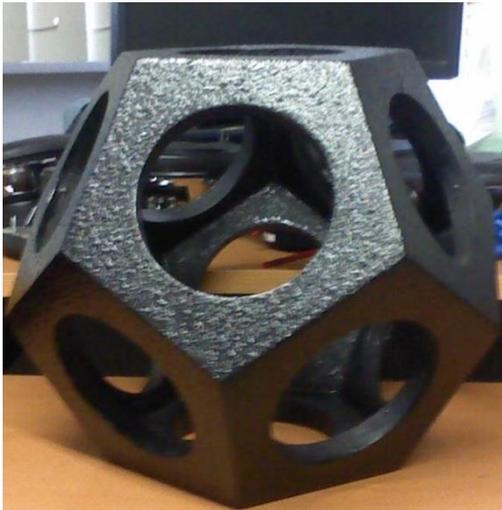


Figura 3.3. Dodecaedro utilizado en la construcción de la fuente omnidireccional.



Figura 3.4. Comienzo de ensamble de los altavoces en el dodecaedro.



Figura 3.5. Ensamble y conexión de altavoces en el dodecaedro.



Figura 3.6. Fuente omnidireccional.



Figura 3.7. Fuente omnidireccional.



Figura 3.8. Fuente omnidireccional terminada.

Como complemento de la instrumentación necesaria para excitar los recintos y obtener sus características acústicas, se debe utilizar un **amplificador de audio de potencia, una interfaz de audio, computadora y cables de conexión**. El amplificador utilizado cuenta con un chasis de salida del tipo NL4MD-H1 (*speakON chassis* de 4 polos), por tanto, se utilizó un cable de 4 hilos con un conector del tipo NL4FX (*speakON connector* de 4 polos) en la conexión que va de la salida del amplificador y los altavoces del dodecaedro. Para la conexión que va de la salida de la interfaz de

audio a la entrada del amplificador, se utilizaron dos cables en los que en un extremo es conexión “RCA” y en el otro es “XLR” (comúnmente conocido como canon).

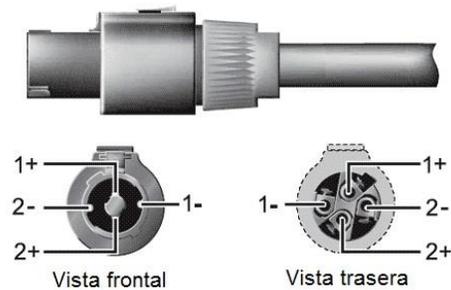


Figura 3.9. Conector *SpeakOn* de 4 polos o dos canales de audio.

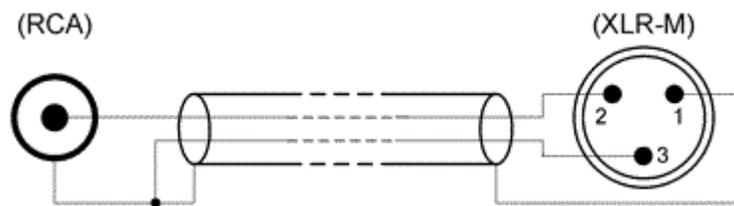


Figura 3.10. Conexión RCA a XLR desbalanceada.

3.1.2. Caracterización

La norma ISO/DIS 3382-1:2006 (E) apartado de procedimientos de medición, indica cómo tiene que caracterizarse la fuente y así corroborar su aproximación omni-direccional. La caracterización consiste en medir los niveles de presión sonora emitidos en la gama de frecuencias por bandas de octava desde los 125 a 4000 Hz (como mínimo) y en los 360° para corroborar que sus amplitudes sean aproximadamente igual, si no es así, se tendrán que ajustar esos niveles por medio de filtrado.

El proceso para caracterizar y adecuar la omni-direccionalidad de la fuente consiste en hacer que irradie energía acústica en un recinto con alta reverberación y en otro con nula (recinto anecoico).

Análisis en la cámara reverberante

La caracterización en la cámara reverberante tiene como propósito verificar que el nivel de presión sonora de la fuente omnidireccional tenga una respuesta plana en el intervalo de frecuencias de 80 Hz a 10 kHz. La justificación de su realización en la cámara reverberante es con el fin de formar un campo sonoro difuso al interior y medir los niveles de presión sonora de cuatro micrófonos en combinación con tres posiciones de la fuente y verificar que sean semejantes en el ancho de banda.

Material utilizado:

- Fuente omnidireccional sonora.
- Tripie para fuente.
- Micrófonos tipo 4943 de Brüel & Kjær.
- Interface de sonido Tascam US-122.
- Computadora.
- Amplificador de potencia (Crown XTi 1000).
- Cables de conexión Fuente-amplificador (speakON cuatro polos), cables de conexión.
- amplificador-interface de sonido tipo RCA-XLR. (RCA-Canon) y Plug_6.3mm-XLR.
- Analizador de espectros (B&K 2133).
- Multiplexor para micrófonos.

Se acota el ancho de banda al especificado, para ello se utilizan filtros paso-bajas y paso-altas, topología Buterworth de orden 4 (24dB/oct). El filtro paso-altas está a las frecuencia de corte de 80 Hz y el filtro paso-bajas su frecuencia de corte a 10 kHz en ambos canales de audio.

Con la ayuda del analizador de espectros se verifica la amplitud por cada tercio de octava de frecuencia del ancho de banda, si no tiende a una respuesta plana, se utiliza una equalización con filtros paramétricos digitales para ajustar la respuesta de la fuente omnidireccional. Las figuras 3.12, 3.14 y 3.16 muestran el espectro en frecuencia de la fuente omni-direccional sonora en la tras 3 posiciones de medida y de 3 micrófonos distintos y las figuras 3.13, 3.15 y 3.17 muestran las posiciones de la fuente dentro de la cámara reverberante.

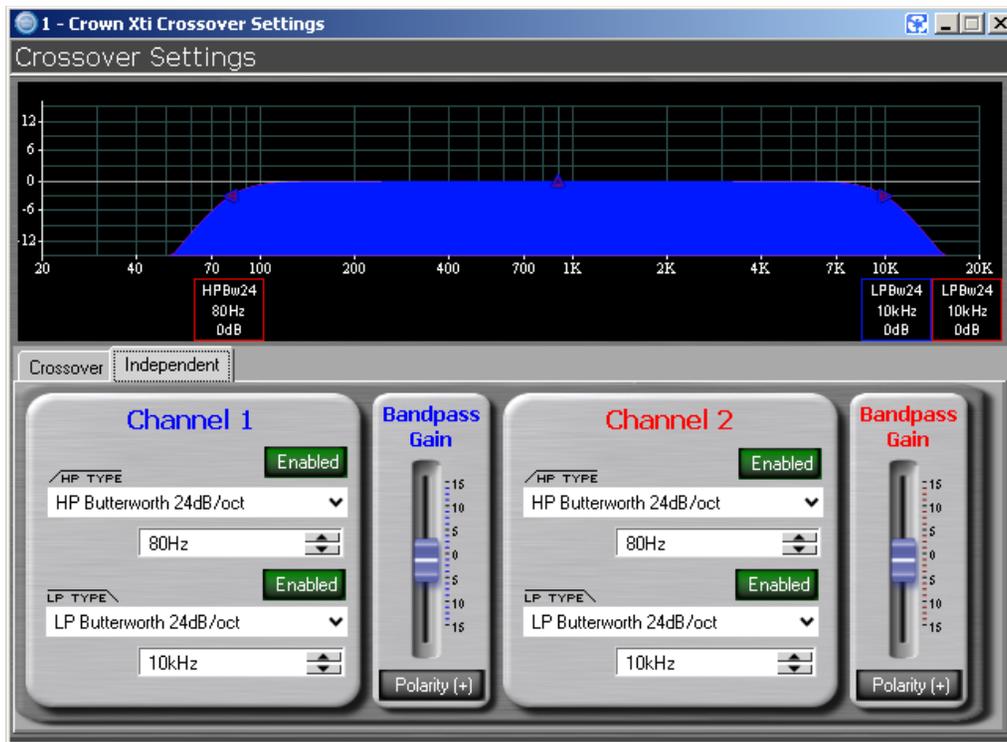


Figura 3.11. Filtro paso-banda utilizado para limitar el ancho de banda de la fuente omnidireccional.

El procedimiento de caracterización realizado en la cámara reverberante fue:

Se escogen posiciones arbitrarias de la ubicación de la fuente (mínimo 3) con la finalidad de obtener un promedio espacial de la omnidireccionalidad, para comprobar y garantizar su aproximación a la homogeneidad en el nivel de presión sonora dentro del ancho de banda.

Contar con un mínimo de 2 posiciones de micrófono ubicados en distancia crítica, es decir, donde el campo directo y reverberante tiene aproximadamente el mismo nivel.

Para todas las posiciones se irradia ruido blanco porque tiene una densidad espectral de potencia plana, es decir, la amplitud en todas sus frecuencias es la misma.

Utilizar el analizador de espectros (*B&K 2133 Frequency Analyzer*) para obtener los niveles de presión sonora captados por los micrófonos en las bandas de frecuencia por tercios de octava en el rango de los 100 a 10,000 Hz. Para visualizar los niveles obtenidos por cada micrófono se usa el multiplexor. En la primera posición se ajusta el nivel en la banda de frecuencia que lo necesite, para aplanar la respuesta en frecuencia. Para las siguientes posiciones sólo se recopilan los niveles de presión sonora en cada banda de frecuencia de todos los micrófonos.

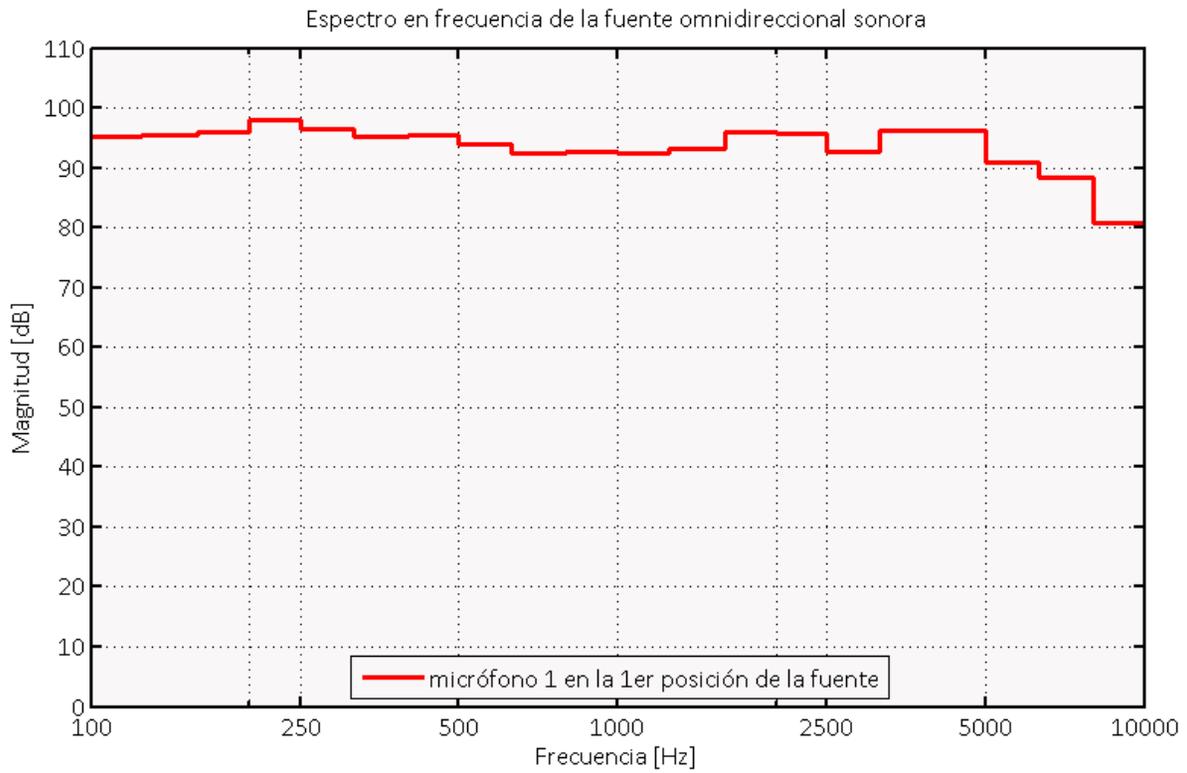


Figura 3.12. Espectro en frecuencia del micrófono 1 en la primera posición con el ajuste realizado.



Figura 3.13. Posición 1 de la fuente omnidireccional en la cámara reverberante.

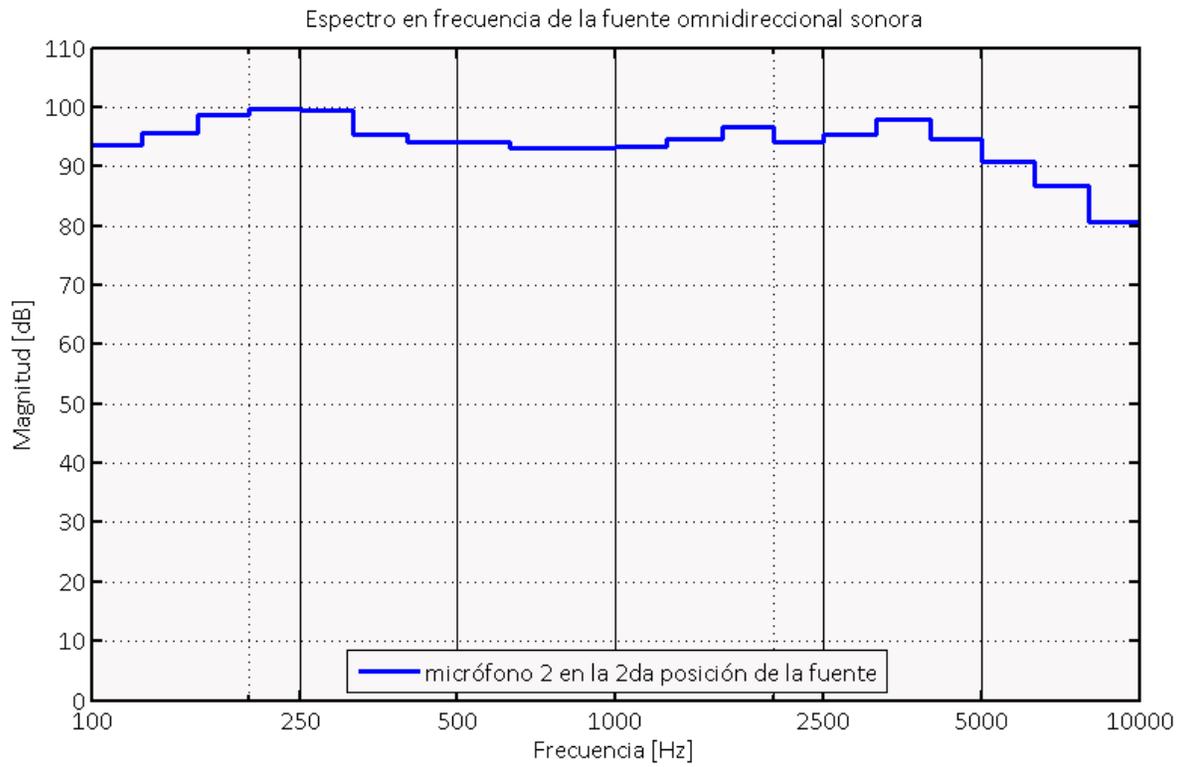


Figura 3.14. Espectro en frecuencia del micrófono 2 en la segunda posición.



Figura 3.15. Posición 2 de la fuente omnidireccional en la cámara reverberante.

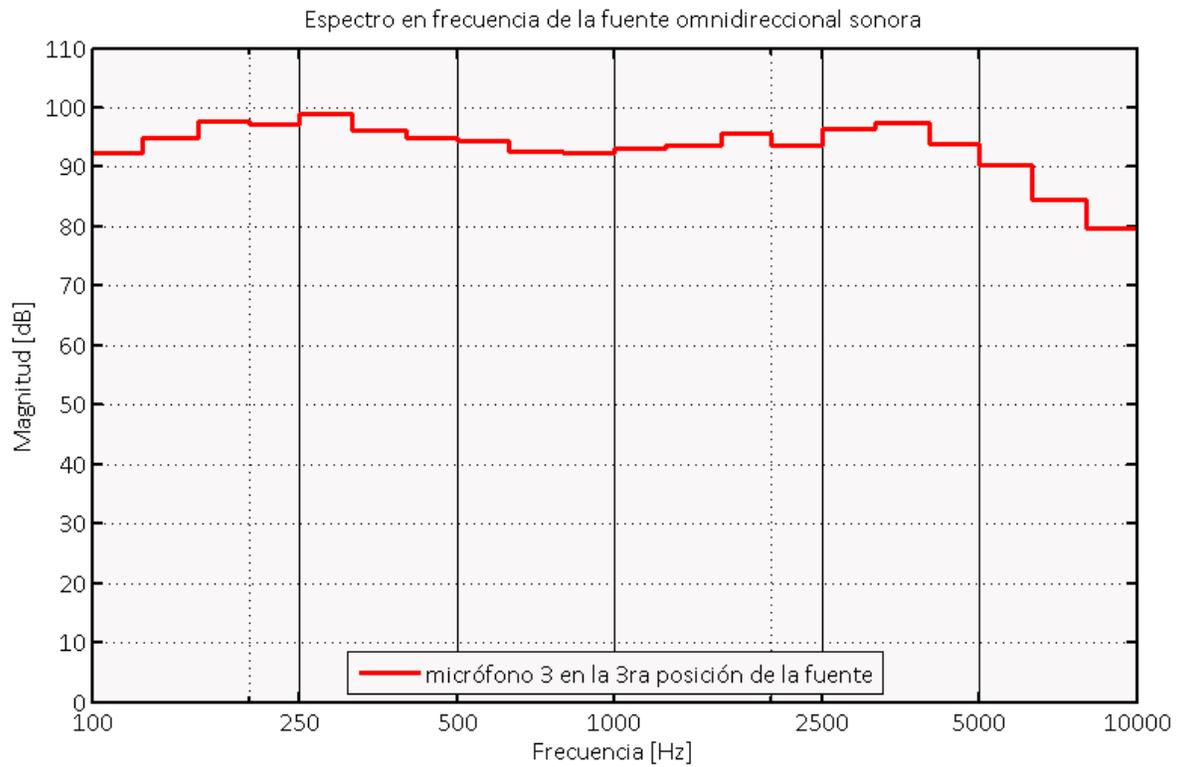


Figura 3.16. Espectro en frecuencia del micrófono 3 en la 3ra. posición.



Figura 3.17. Posición 3 de la fuente omnidireccional en la cámara reverberante.

Se hizo un ajuste con los filtros paramétricos, un aumento de 12dB y selectividad del filtro $Q = 4$ para la banda de 100Hz, una reducción de -12dB y $Q = 32$ en la banda de 200Hz y un aumento de 12dB y $Q = 2$ en la banda de los 6.3 kHz (ver figura 3.9). La no homogeneidad en los niveles y el consecuente ajuste con la ecualización se debe a las interferencias dadas por la geometría del dodecaedro y en mayor proporción a las deficiencias en la respuesta en frecuencia de los altavoces. La figura 3.18 muestra el promedio de los niveles obtenidos por los micrófonos en cada una de las tres posiciones y el promedio por posiciones.

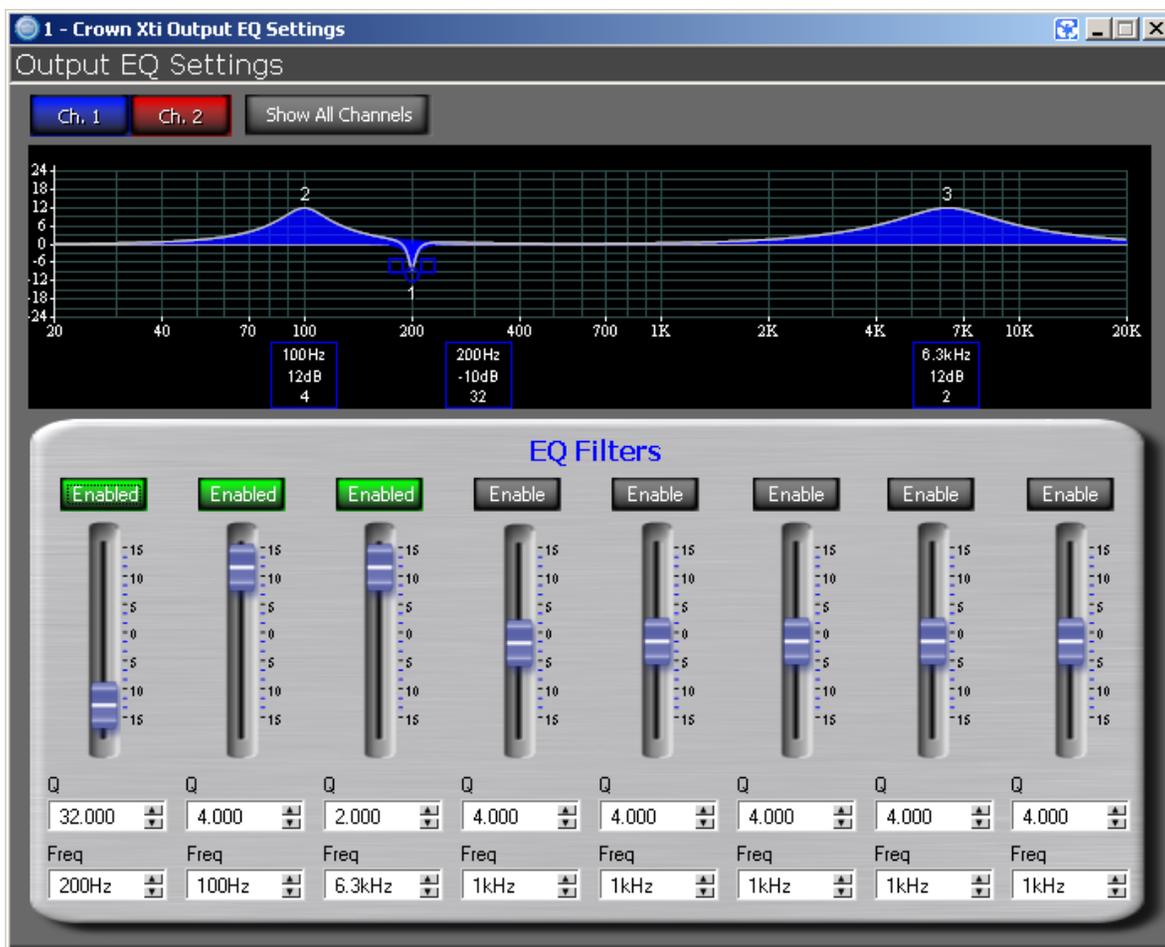


Figura 3.18. Ecualización para obtener una respuesta plana de los niveles emitidos por la fuente.

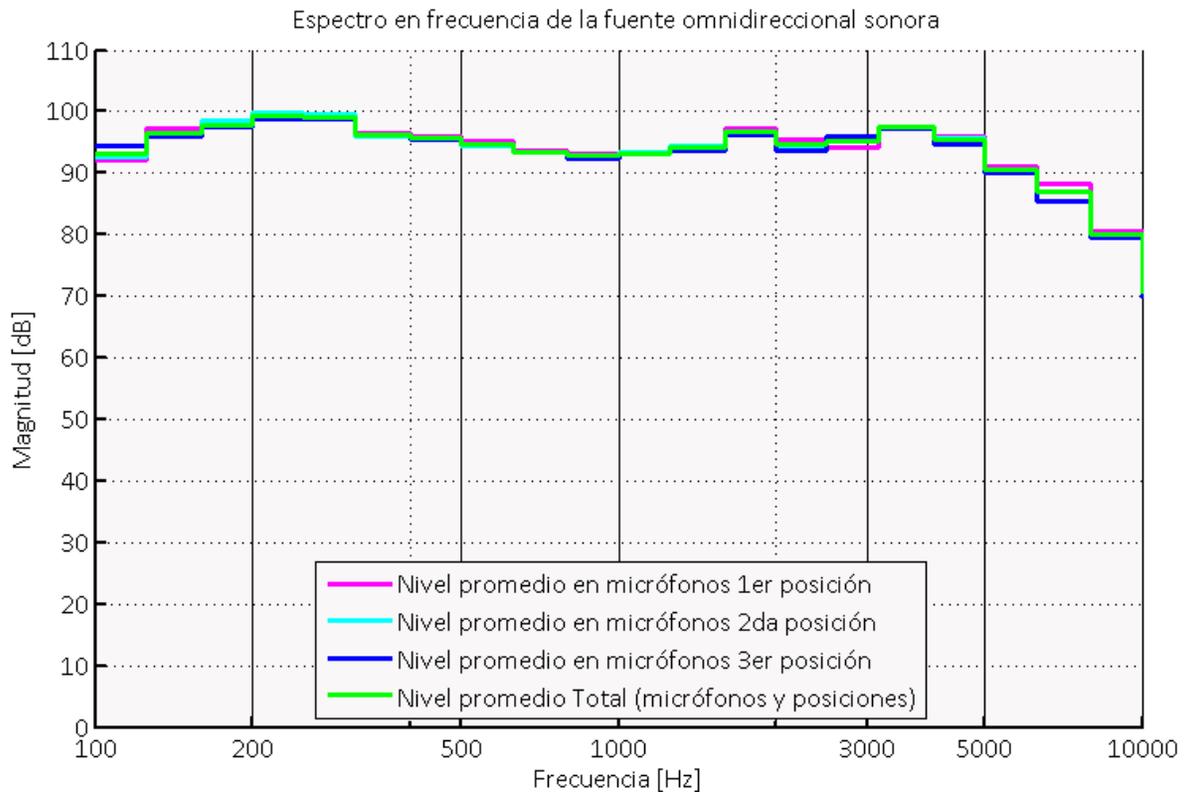


Figura 3.19. Promedios espaciales de los niveles de presión sonora emitidos por la fuente.

Análisis en la cámara anecoica

La cámara anecoica se utiliza para determinar su patrón de radiación en el plano horizontal, en esta cámara, se comprueba en sí, la omnidireccionalidad de la fuente, para ello se debe hacer rotar la fuente omni-direccional sobre su eje vertical y capturar los niveles de presión sonora con base en el procedimiento establecido en la norma ISO 3382-1: 2006 (E). Debido a la propiedad del recinto (sin reflexiones) se garantiza que los valores captados son únicamente el sonido directo en ese punto; con el analizador de espectros se obtienen los valores de presión sonora para cada punto por frecuencias en bandas de 1/3 de octava en el rango de los 50Hz a 10kHz.

Material utilizado:

- Fuente omnidireccional sonora.
- Goniómetro.
- Tripie para micrófono y tripie para fuente.
- Micrófono tipo 4943 de Brüel & Kjær.
- Interfaz de sonido por USB Tascam US-122.

- Computadora personal.
- Amplificador de potencia Crown XTi 1000.
- Cables de conexión Fuente amplificador (speakON cuatro polos)
- cables tipo RCA-XLR. (RCA-Canon)
- Plug_6.3mm-XLR.
- Analizador de espectros Brüel & Kjær tipo 2133.

El procedimiento en la cámara anecoica es el siguiente:

Ubicar la fuente omnidireccional en el centro de la cámara anecoica y a una altura tal que se encuentre a la mitad del recinto.

El micrófono debe ubicarse a una distancia de 1.5 m de la fuente y a una altura tal que se encuentre a la mitad del dodecaedro.

Con el uso del analizador de espectros, recopilar los niveles de presión sonora de las frecuencias por bandas de tercios de octava, al hacer girar la fuente cada 5°, esto se realiza con la ayuda de un goniómetro.

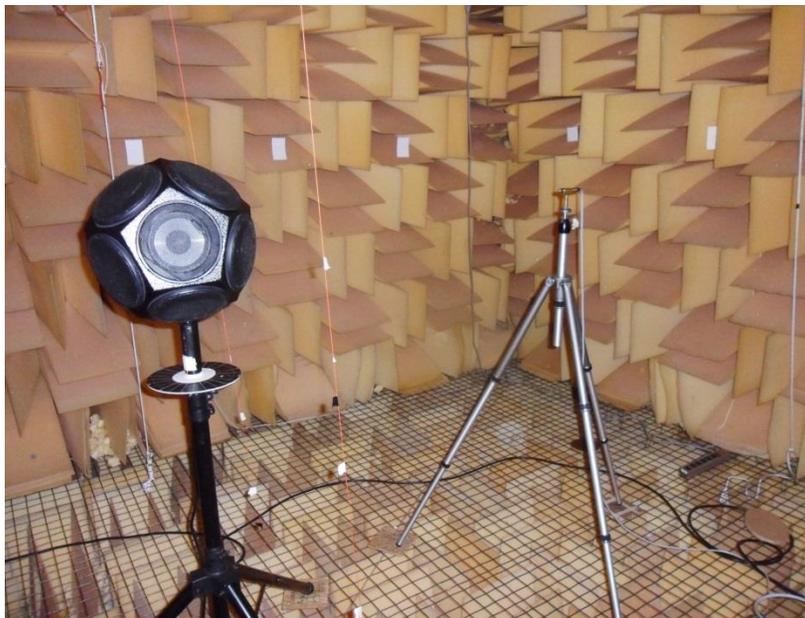


Figura 3.20. Caracterización de la fuente omnidireccional sonora en la cámara anecoica.

En estas mediciones se omitió el *crossover* utilizado para la caracterización en la cámara reverberante porque se tomaron los niveles en las bandas de frecuencia de 50 Hz y 10 kHz. Con este análisis se puede obtener su desviación mínima y máxima y comprobar que esté dentro de los márgenes especificados por la norma ISO 3382-1:2006 (E) e ISO 140. En las figura 3.19 se muestra la disposición de la fuente omnidireccional para su caracterización y en las figuras 3.20 a 3.25 los patrones de radiación en las frecuencias por octavas de 125 Hz a 4000 Hz. En el anexo de este trabajo dedicado al capítulo 3 se encuentran listados los códigos implementados en MATLAB para procesar los datos obtenidos de las caracterizaciones tanto en la cámara anecoica como en la reverberante.

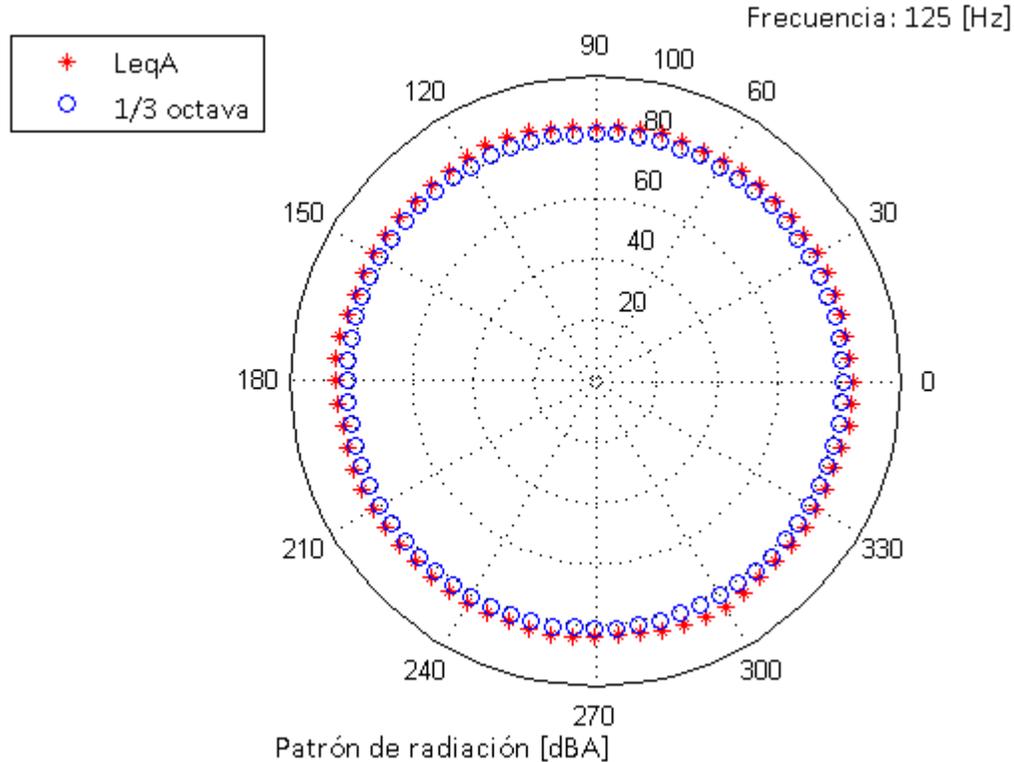


Figura 3.21. Patrón de radiación de la Fuente omnidireccional en 125 Hz.

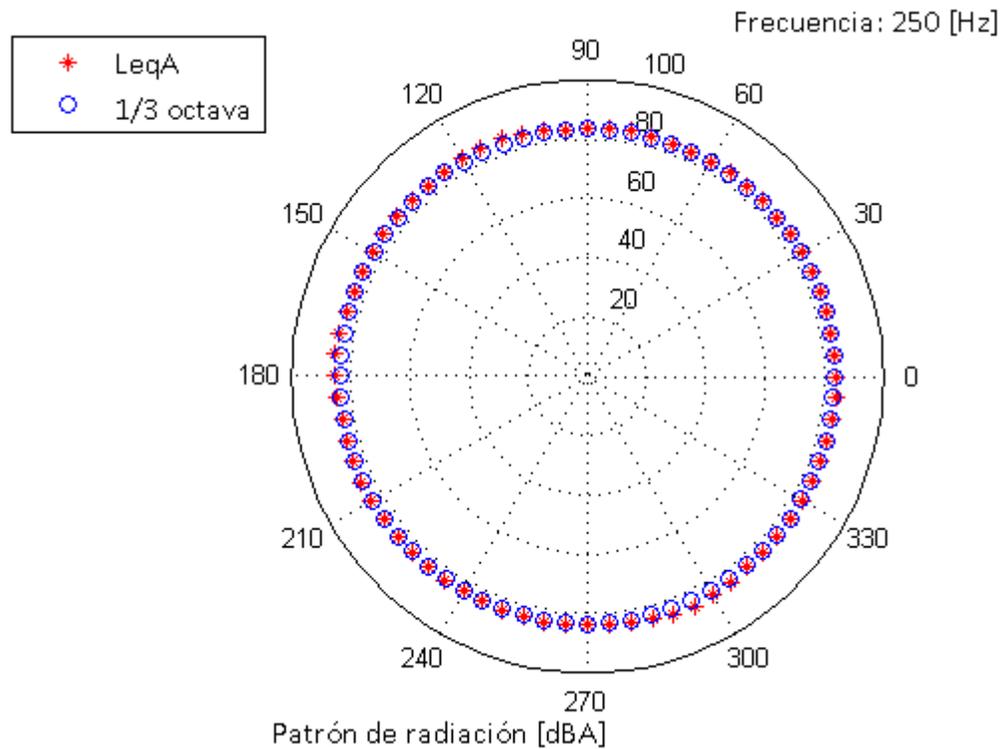


Figura 3.22. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 250 Hz.

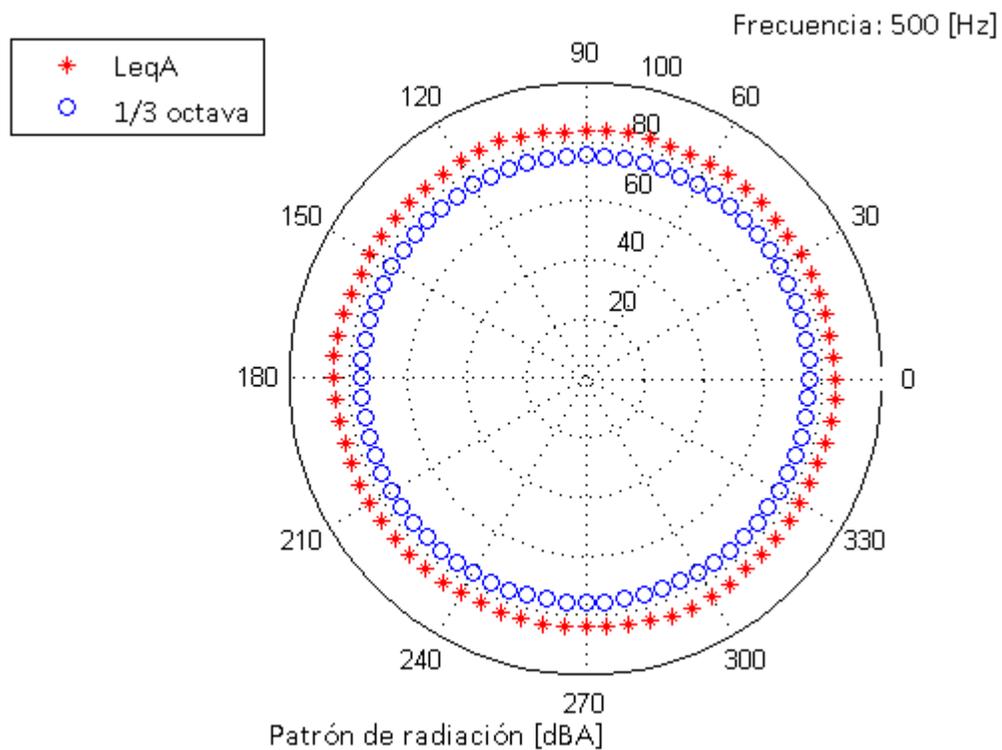


Figura 3.23. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 500 Hz.

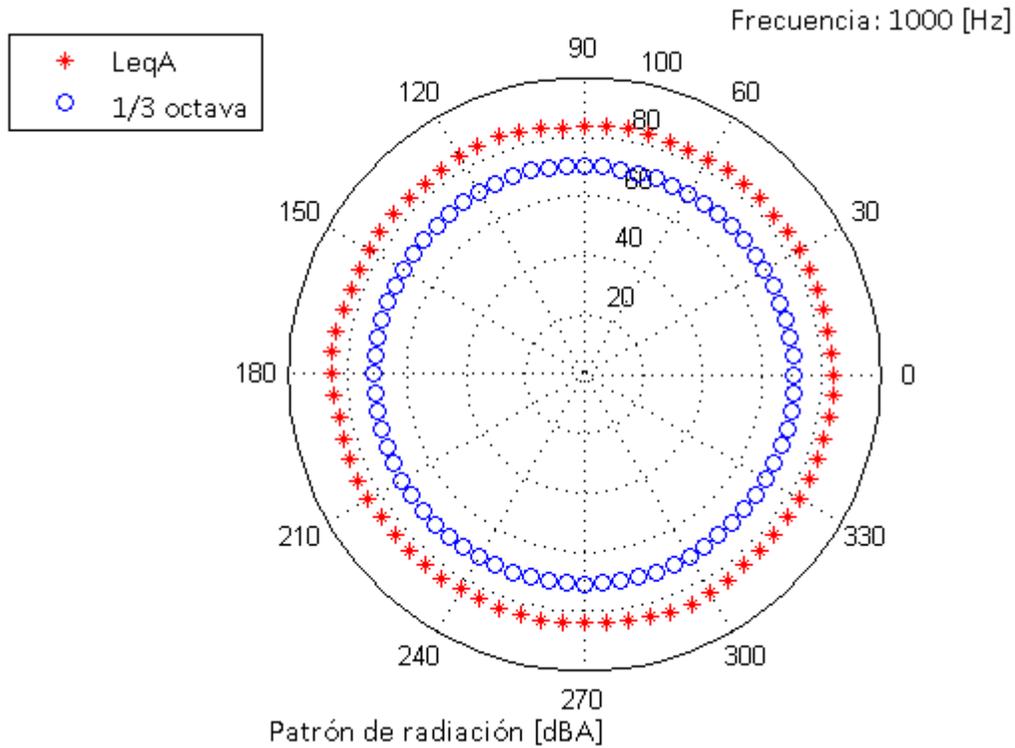


Figura 3.25. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 1 kHz.

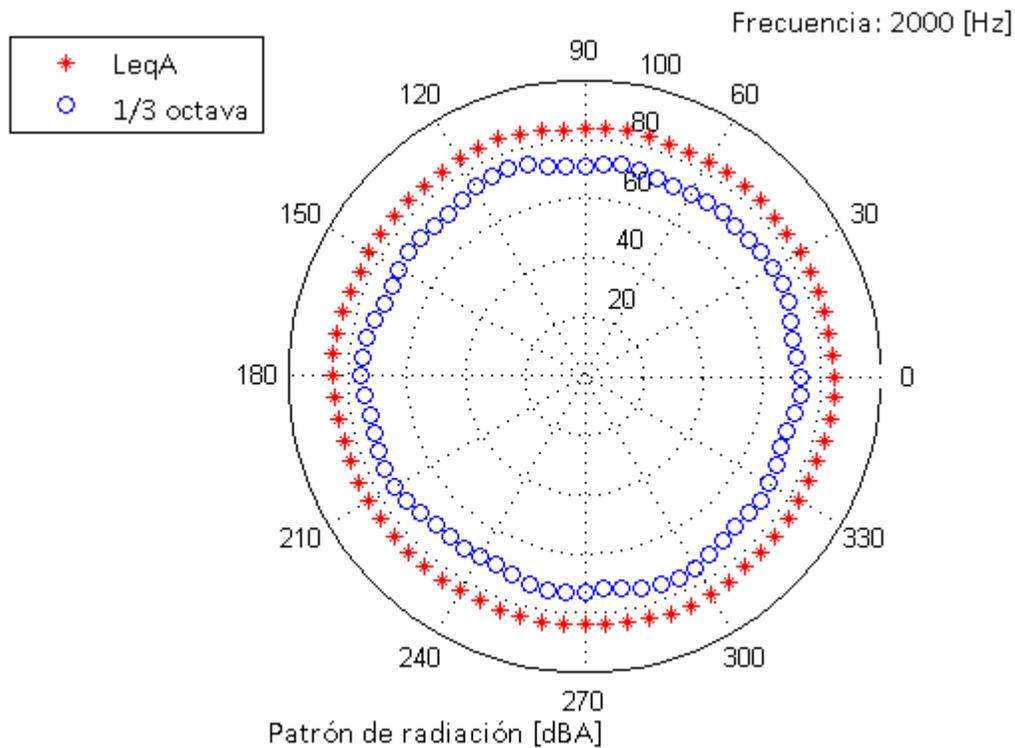


Figura 3.25. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 2 kHz.

Como se puede observar en las figuras 3.28 y 3.29 conforme la frecuencia incrementa, los limitantes del dodecaedro y de los altavoces se hacen presentes.

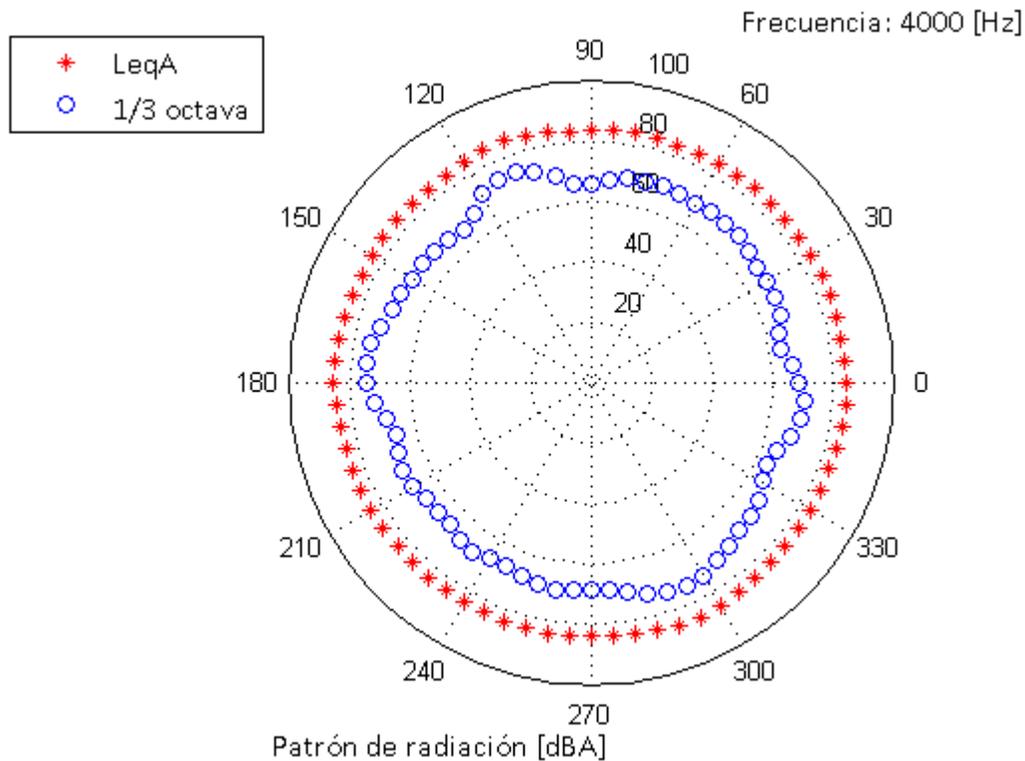


Figura 3.26. Patrón de radiación de la fuente omnidireccional en 4 kHz.

Las normas ISO 3382 e ISO 140 especifican que hay límites en la desviación de la omnidireccionalidad, si se superan estos deben corregirse. De los niveles recopilados mencionados en el procedimiento, se hizo el promedio por cada seis puntos cercanos y en todas las bandas de frecuencia y se obtuvieron los valores máximos y mínimos. Estos deben estar dentro de los rangos de desviación de la omnidireccionalidad establecidos (ver figuras 3.26 y 3.27). Cabe mencionar que en el apartado de anexos de este trabajo, el correspondiente al capítulo 3 se agregan los códigos realizados en MATLAB para procesar los datos obtenidos de las caracterizaciones tanto en la cámara anecoica como en la reverberante.

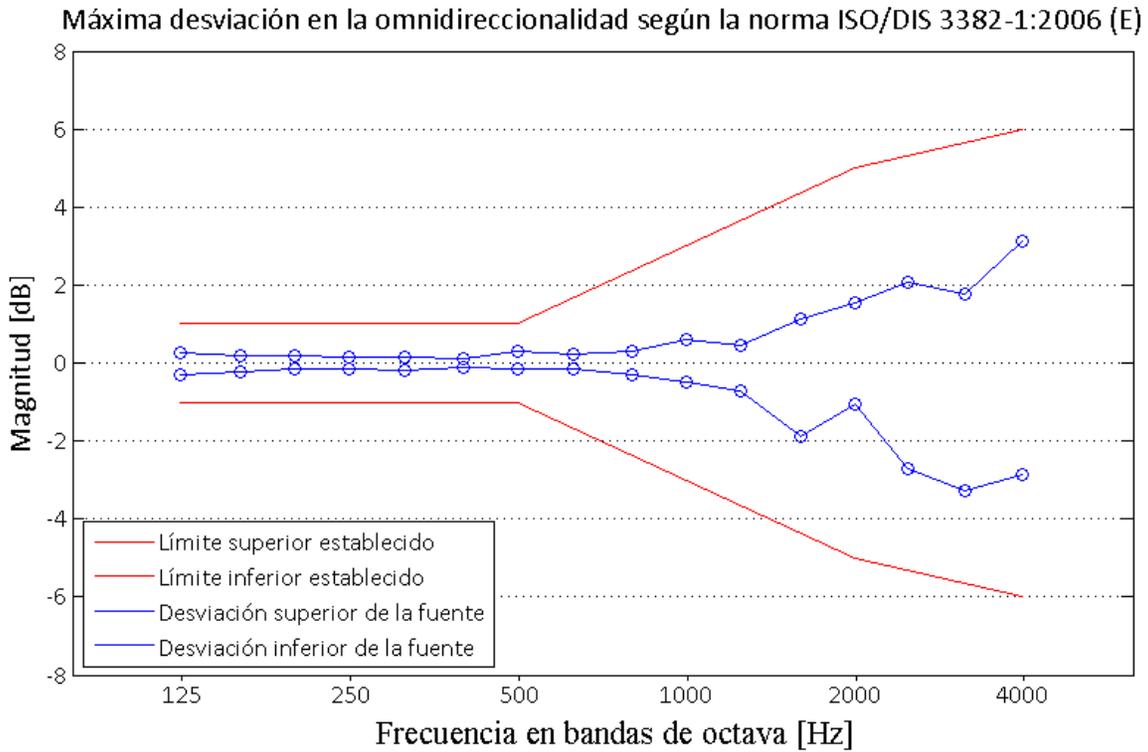


Figura 3.27. Desviación en la omnidireccionalidad de la fuente según la norma ISO-3382.

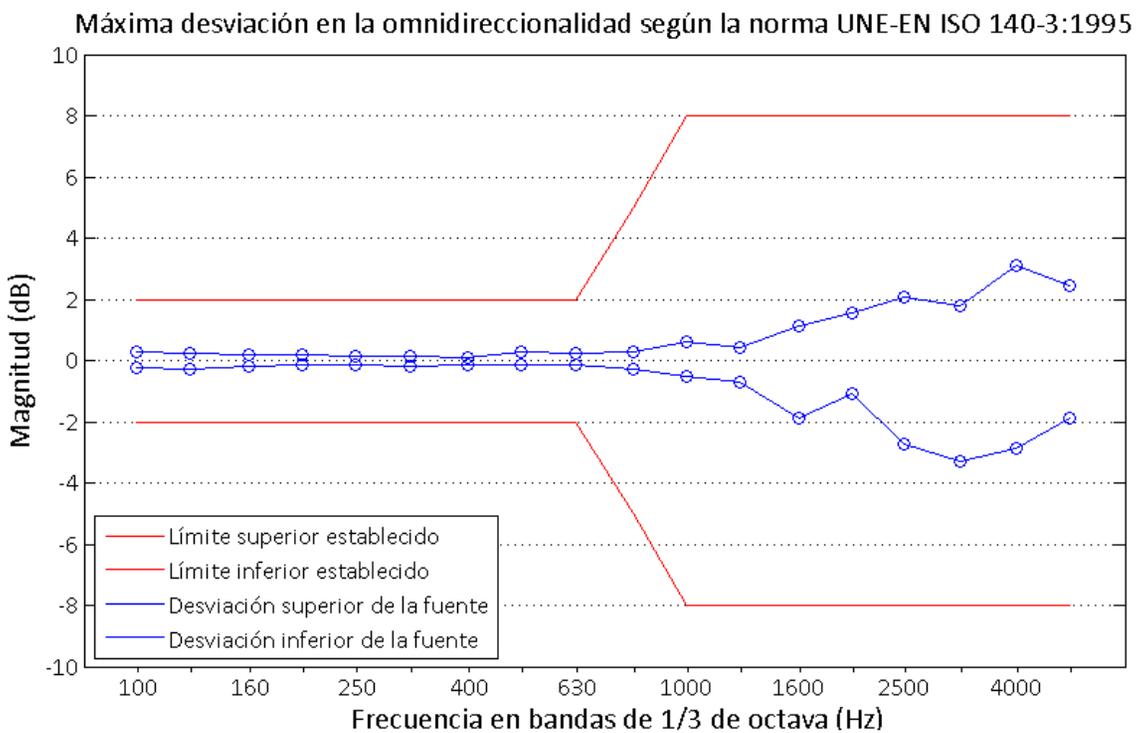


Figura 3.28. Desviación en la omnidireccionalidad de la fuente según la norma ISO-140.

3.2. Obtención de la respuesta al impulso a través de secuencias de máxima longitud y barridos exponenciales

Si se requiere interactuar, construir y/o modificar cualquier cosa es vital conocer sus propiedades y comportamientos y para ello necesitamos de herramientas que lo faciliten. En el caso del comportamiento acústico de los recintos es importante conocer sus características como el tiempo de reverberación, definición, claridad entre otros. Cada uno de estos parámetros debe tener distinto valor si se trata de una sala de conciertos, de conferencias, salón de clases, etc. Si consideramos al salón de clases como un sistema acústico lineal e invariante en el tiempo, se pueden encontrar sus características mediante la obtención de su respuesta al impulso. Dicha consideración es debido a que una de las propiedades básicas de los sistemas lineales e invariantes con el tiempo, es la superposición y el impulso es una función primaria, es decir, cualquier otra puede construirse mediante la superposición en tiempo de múltiples impulsos. Si esto se da en un diagrama de nivel de presión sonora respecto al tiempo, se trata de un impulso seguido de picos y valles correspondientes a la variación en tiempo de la densidad de energía con una tendencia decreciente, tal diagrama a menudo se llama reflectograma o ecograma; por tanto esta respuesta nos dará una visión general del comportamiento del sistema. Actualmente las herramientas computacionales como lo es el *software "Dirac"* (utilizado en el presente trabajo) facilitan la implantación de los métodos para encontrar la respuesta al impulso de un sistema acústico que se describen a continuación:

3.2.1. Método de secuencias de máxima longitud (MLS)

Todos los parámetros acústicos de un recinto se obtienen a través de la respuesta al impulso si se garantiza que sea un sistema lineal. Las Secuencias de Máxima Longitud es uno de varios métodos que pueden encontrar la respuesta al impulso; basada en la técnica correlación cruzada de la señal que es altamente inmune a ruidos extraños como chasquidos, explosiones, pisadas etc. y pueden resultar en ruido benéfico distribuido en la respuesta al impulso por tanto este método puede ser usado en ambientes ruidosos.

Las secuencias de máxima longitud son secuencias de tipo binario pseudo-aleatorias periódicas reproducibles en sistema electroacústico como señal de prueba en el recinto a caracterizar. Esta

secuencia se representa por valores +1 y -1 que son generados por corrimientos en un registro con realimentación.

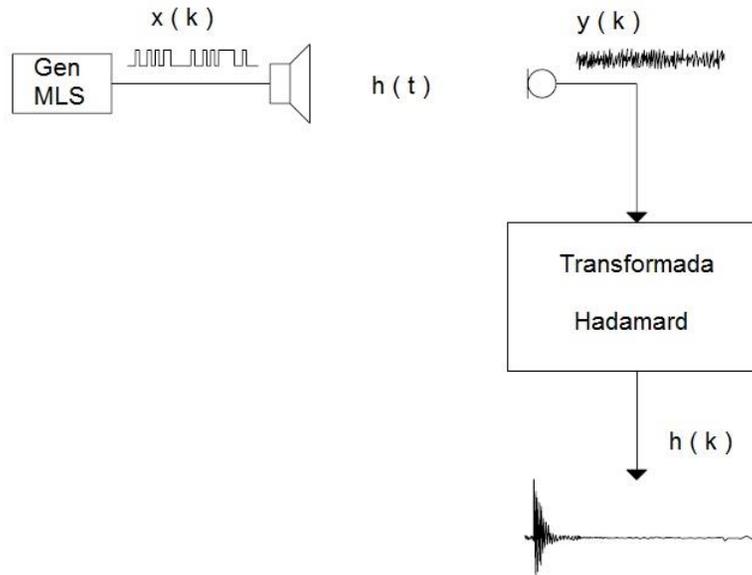


Figura 3.29. Obtención de la respuesta al impulso por el método de las MLS. Diagrama a bloques.

De la teoría de señales se sabe que la correlación cruzada de la señal de entrada con la señal de salida es la autocorrelación de la señal de entrada convolucionada con la respuesta al impulso del recinto. A su vez se puede decir que la función de autocorrelación es casi un impulso y se representa por la delta de Dirac $\delta(k)$ y la convolución de cualquier señal con ésta es la señal en sí misma. Por tanto si uno desea saber la respuesta al impulso de un recinto, hay que realizar la correlación cruzada de la señal de entrada (MLS) con la señal de salida que en este caso es la posición del micrófono en el recinto. La expresión matemática que describe esto es:

$$R_{xy}(k) = R_{xx}(k) * h(k) = \delta(k) * h(k) = h(k) \quad 3.1$$

La forma más eficiente de obtener la correlación cruzada de la señal MLS y la salida obtenida en el micrófono debido a la pseudo-aleatoriedad de las MLS es la transformada rápida de HADAMARD conocida como FHT por sus siglas en inglés (FAST HADAMARD TRANSFORM).

Debido a la periodicidad de las MLS, son consideradas como señales determinísticas (aunque en cada periodo sus propiedades espectrales corresponden a un verdadero ruido blanco), por tanto, se puede repetir la reproducción de un periodo y hacer posible el incremento de la relación señal a

ruido contra ruidos de fondo no correlacionados, al promediar sincrónicamente la señal de salida; la relación señal a ruido se incrementa al doblar el número de promedios.

3.2.2. Método de barridos Sinusoidales Exponenciales (ESS)

Este método utiliza un barrido exponencial en frecuencia para excitar el recinto y una deconvolución no periódica extrae la respuesta al impulso de la grabación obtenida.

La función matemática que describe al barrido sinusoidal exponencial en tiempo continuo es la siguiente:

$$s(t) = \text{sen} \left[\frac{\omega_1 T}{\ln \left[\frac{\omega_2}{\omega_1} \right]} \left[e^{\frac{t}{T} \ln \left[\frac{\omega_2}{\omega_1} \right]} - 1 \right] \right] \quad 3.2$$

Donde

$$K = \frac{\omega_1 T}{\ln \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)} \quad , \quad L = \frac{T}{\ln \left(\frac{\omega_1}{\omega_2} \right)} \quad 3.3$$

Este barrido comienza en la frecuencia angular ω_1 y termina en ω_2 durante el tiempo T dado en segundos.

Su frecuencia instantánea es:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{K}{L} e^{t/L} \quad 3.4$$

Dado que esta señal cambia su frecuencia conforme el tiempo T transcurre, la energía es proporcional al tiempo de duración de cada frecuencia dentro de ese intervalo, es decir, está relacionada con la razón de cambio de la frecuencia instantánea y debido a que la frecuencia crece de manera exponencial la energía será inversamente proporcional a la razón de cambio de esta frecuencia instantánea $\omega(t)$:

$$E(t) \propto \frac{1}{\frac{d\omega(t)}{dt}} = \frac{L^2}{K} e^{t/L} \quad 3.5$$

Para conocer su contenido energético en frecuencia se hace la transformación en Fourier de 3.2.4 da como resultado:

$$E(j\omega) \propto \frac{L^2}{K} \frac{1}{L + j\omega} = \frac{kL^2}{K} \frac{1}{L + j\omega} \quad 3.6$$

Donde k es la constante de proporcionalidad. Esta ecuación nos dice que con el barrido exponencial la energía decrece conforme la frecuencia aumenta y para más precisos si se dobla la frecuencia el factor $\frac{1}{\omega}$ de la ecuación 3.2.5 pasa a ser $\frac{1}{2\omega}$ que corresponde a un cambio de $10 \log(1/2) \cong -3dB$ por tanto es una caída de energía de 3dB por cada octava de frecuencia.

La señal obtenida de generar el barrido dentro del recinto se le llama “respuesta del recinto” $r(t)$, para obtener la respuesta al impulso hay que deconvolucionar con la señal de referencia $s(t)$, sin embargo el espectro debe ser plano, por lo que una modulación en amplitud debe de aplicarse y su función matemática es:

$$m(t) = \frac{A}{\omega(t)} = A \left[\frac{K}{L} e^{t/L} \right]^{-1} \quad 3.7$$

El proceso de post-modular en amplitud el espectro de la señal de referencia es el filtro inverso $f(t)$ el cual se convoluciona con la respuesta del recinto $r(t)$.

$$h(t) = r(t) * f(t) \quad 3.8$$

La técnica de barridos sinusoidales exponenciales proviene de su antecesor, el barrido lineal que es la generación de ondas senoidales en las que su frecuencia crece linealmente con el tiempo, sin embargo tanto el comportamiento de la música como del oído humano se rigen bajo leyes logarítmicas, algo que las ESS logran, además otra ventaja es que no utiliza promedios síncronos para aumentar la relación respuesta al impulso a ruido “INR” por sus siglas en inglés (*Impulse response to Noise Ratio*).

En cuanto a las ventajas que tienen las ESS sobre las MLS es la facilidad de separar las no linealidades que el sistema pueda presentar debido a la distorsión que se produce en la señal en bajas frecuencias, principalmente al reproducirse en los altavoces de la fuente y ello no garantiza el comportamiento invariante en el tiempo del recinto. Para evitar estas no linealidades al utilizar las ESS con el programa de Dirac, la documentación proporcionada por los fabricantes, menciona

que una manera simple y práctica de eliminarlas es el descartar la parte inicial y el lóbulo que se ve al final de la respuesta.

3.3. Obtención de niveles de ruido en puntos aleatorios del plantel escolar

Determinar el nivel de ruido dentro del plantel escolar y en sus alrededores es necesario para evaluar si afectan el rendimiento académico y salud física y psicológica de los alumnos, así como de los profesores. Con la obtención de los niveles de ruido en distintos puntos dentro del plantel y registrados en un croquis del recinto escolar se construye un mapa de ruido.

Una forma de obtener el nivel de ruido es mediante los procedimientos establecidos por la norma NOM-081 ECOL-1994, en la que se deben tomar los valores que registra un sonómetro en intervalos de 5 segundos y con número mínimo de 35 muestras por punto y, obtener el nivel equivalente. No obstante existe un método realizado por personal del CCADET en la cual, se realizan grabaciones de 15 minutos del ruido de fondo en el punto crítico seleccionado para hacer un pos proceso con el uso de herramientas computacionales (MATLAB) para obtener los niveles equivalentes (L_{eq}) de dichas grabaciones.

El procedimiento para la obtención de las grabaciones es el siguiente:

Material a utilizar:

- Computadora personal.
- Programa para grabar archivos de audio (Adobe Audition).
- Interfaz de audio por USB Tascam US-122.
- 2 Micrófonos de condensador para medición Berhinger modelo ECM8000.
- Sonómetro programable TES 1352A.
- Calibrador acústico modelo TES 1356.
- Cables de interconexión micrófono-interface: Plug-RCA.
- Cables de interconexión interface-computadora: cable USB un extremo el conector es tipo A y el otro tipo B.
- Base para micrófono.

Pasos para la realizar las grabaciones:

1. Grabar por 30 segundos el tono que produce el calibrador ($94\text{ dB @ }1\text{kHz}$) para cada canal de la interfaz (L y R, en caso de usar ambos). El control de ganancia de la interfaz de audio para el micrófono debe ajustarse al máximo sin producir distorsión. Esto con el propósito de usar en su totalidad la capacidad del convertidor analógico/digital. La interfaz indica si la señal ha saturado el convertidor por medio del destello de un led.

Nota: Una vez grabado el tono de calibración, por ningún motivo se debe mover el ajuste del control de ganancia del canal, si no, los niveles obtenidos de las posteriores grabaciones no corresponderán a la señal de referencia grabada por haberse movido el ajuste de la ganancia que se traduce en un nivel distinto del convertidor analógico/digital.

Cuidar que durante la grabación del tono de calibración el micrófono este apartado de superficies reflejantes y de ruido intenso ya que este debe ser un tono puro de $94\text{ dB @ }1\text{kHz}$ (ver foto 3.29).

2. Calibrar el sonómetro para que las mediciones sean correctas (ver foto 3.30). El sonómetro debe tener la capacidad de grabar los valores medidos (en tiempos de integración de 2 segundos), ya que será utilizado a la par en las grabaciones del nivel de ruido porque es el nivel de referencia.
3. La colocación del sonómetro y micrófono debe ser lo más cerca posible entre ellos y a una altura respecto al piso de 1.5m y alejados por lo menos 1 m de cualquier superficie reflejante para evitar su contribución a la grabación (ver foto 3.31).
4. Ubicar los puntos críticos a medir y comenzar con la grabación de las muestras de ruido que son de 15 minutos.



Figura 3.30. Grabación del tono de calibración.



Figura 3.31. Calibración del sonómetro.



Figura 3.32. Posición del micrófono para la toma de niveles de ruido de fondo.

3.3.1. Procesamiento de las señales adquiridas

Ahora es el turno de pos procesar las señales adquiridas descritas en la sección anterior. Lo que a continuación se describe sirve como una introducción para poder realizar el programa en MATLAB y con ello la obtención de los niveles equivalentes del ruido de fondo adquirido por las grabaciones.

Como se vio en el marco teórico, trabajar con presión sonora así como tal, es muy complicado ya que el intervalo de valores posibles es muy grande y hace difícil su manejo y visualización, por

tanto, se recurre a los niveles de presión sonora medidos en decibeles y son la relación de dos cantidades, una de referencia y otra de interés. La señal de referencia o umbral auditivo es el valor mínimo que puede escuchar un oído humano completamente sano y es $20 * 10^{-6} Pa @ 1kHz$ y en las grabaciones se encuentra implícito en el tono de calibración. Para obtener este valor de referencia se tiene lo siguiente:

El tono que produce el calibrador es de $94 dB @ 1kHz$ este valor es el nivel que produce $1 Pa$ de presión sonora eficaz (p_{rms}) referidos a $20 \mu Pa$ y la grabación es la señal eléctrica equivalente a ese Pascal; de acuerdo con la ecuación 2.3 el valor eficaz de la grabación sería:

$$tono_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (tono \text{ de calibración})^2 dt\right)} \quad 3.9$$

Donde T son los 30s de grabación. Ahora de la ecuación 2.5 sabemos que:

$$94 dB = 20 \log \left[\frac{1 Pa}{20 \mu Pa} \right] = 20 \log \left[\frac{tono_{rms}}{señal \text{ de referencia}} \right] \quad 3.10$$

De la ecuación 3.10 despejamos a la señal de referencia y nos queda:

$$s_r = \frac{tono_{rms}}{10^{94/20}} \quad 3.11$$

Por otro lado a los 15 minutos de grabación se les aplica un análisis semejante al anterior en lo referente a la obtención del valor eficaz, sin embargo primero se utiliza un filtro con características de ponderación A ya que esta curva semeja el comportamiento del oído humano en situaciones de bajo nivel de presión sonora como lo es el caso de una actividad escolar:

$$ruido_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T (muestra \text{ de ruido})^2 dt\right)} \quad 3.12$$

Donde T son los 15 minutos o 900s de la grabación. Ahora a este valor lo dividimos entre la señal de referencia s_r y nos da el nivel equivalente de presión sonora de la grabación en ese punto de la medición.

$$L_{eq} = 20 \log \left(\frac{ruido_{rms}}{s_r} \right) \quad 3.13$$

Con lo hasta aquí descrito se pueden obtener los parámetros importantes para evaluar los parámetros principales que rigen a la inteligibilidad del habla de un recinto escolar que es de lo que trata el siguiente capítulo.

Capítulo 4
Antecedentes y
situación acústica
actual del plantel
5 de la E.N.P.

4. Antecedentes y situación acústica actual del plantel 5 de la

E.N.P.

En un plantel escolar la inteligibilidad del habla de sus salones de clases es primordial. A lo largo de este trabajo se han descrito algunos de los parámetros de los que depende y como medirlos; la norma ANSI/ASA S12.60 2010/Part1 establece cuales son los niveles óptimos del tiempo de reverberación y ruido de fondo. Si estos no corresponden con lo establecido por la norma se tendrán deficiencias en el aprendizaje de los alumnos, además, con base en los estudios realizados por Trejo Collazo [2] y Estrada [3] se tendrán problemas físicos y psicológicos y cabe mencionar que si existe un ruido de fondo muy elevado, estos problemas también se extienden a todo personal que labore en el plantel (maestros, trabajadores, personal administrativo). Por tanto, todo plantel debe cumplir con estos requisitos de valoración acústica que garanticen la transmisión correcta y eficaz del conocimiento.

La situación actual en el plantel 5 de la E.N.P. UNAM conforme al sondeo realizado a algunos maestros, trabajadores y alumnos, da una idea sobre las condiciones de ruido y características acústicas del plantel, las cuales no son favorables. Argumentan que existe mucho la presencia del ruido exterior producido por el paso de los automovilistas (motores muy ruidosos, manejo inadecuado del claxon, demasiado transito) así como en las labores de mantenimiento de las áreas verdes del plantel y de los alumnos que gritan constantemente en los pasillos muy cerca de los salones. En consecuencia, las palabras emitidas por el orador dentro del salón de clases son enmascaradas e ininteligibles para el escucha que, según [3], deriva en problemas de salud para ambos. Para comprobar esto se llevó a cabo un estudio de valoración acústica acorde con lo establecido en la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1 para verificar la existencia del problema en el recinto escolar.

A continuación se detalla la realización del mapa de ruido a partir de los niveles equivalentes de las muestras y, los tiempos de reverberación de tres tipos de salón del plantel. Las características dimensionales de los salones de clase se proporcionan en la tabla 4.1. La norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1 hace una restricción donde los valores de óptimos proporcionados para tiempos de reverberación y ruido de fondo, sólo son válidos para salones de clase con volumen interior menor a 566 m³.

Tabla 4.1. Salones de la E.N.P. plantel 5 UNAM.

Tipo de salón	Volumen (m^3)	Largo (m)	Ancho (m)	Altura (m)
Aula del edificio A	141	8	5.91	3
Laboratorio del edificio B	307	11.07	8.71	3.21
Aula del edificio F	262	9.39	7.58	3.68

4.1. Elaboración del mapa de ruido

Al conocer los niveles de ruido de fondo dentro y en los alrededores del plantel escolar, podemos aplicar medidas preventivas o restrictivas si estos exceden los límites permitidos por la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1, para ello un mapa de ruido se debe elaborar. Como se ha hecho mención, el ruido en un plantel escolar es proveniente de fuentes internas y externas ocasionadas por factores como: tránsito vehicular pesado, comercio aledaño al recinto, alumnos en transición de clases o en receso, trabajadores en labores de mantenimiento entre otros, por tanto, se seleccionaron puntos críticos donde todas estas fuentes de ruido tiene alta contribución al ruido de fondo para tener conocimiento sobre los niveles existentes.

El método utilizado en la toma de las muestras de ruido es el proporcionado en el apartado 3.3, los dos micrófonos utilizados, uno por cada canal de la interfaz, están conectados a cables de 6 m de longitud, por tanto, la separación entre ellos está alrededor de los 10 m (ver figura 4.1). Se cuenta con un sonómetro, por lo que sólo una grabación cuenta con el nivel de referencia y no puede utilizarse para ambas grabaciones debido que la separación entre el micrófono del sonómetro y el micrófono de grabación debe ser lo más corta posible (Capítulo 3.3 paso 3). Con las grabaciones obtenidas, se somete al procesamiento descrito en el apartado 3.3.1 y para ello se realizó una interfaz gráfica de usuario con MATLAB en la cual se seleccionan los archivos del tono de calibración, muestra de ruido y del sonómetro, para obtener y mostrar los niveles de presión sonora en una gráfica respecto al tiempo y los niveles equivalentes de cada muestra, sin embargo, se limita a sólo mostrar los archivos grabados por el sonómetro TES 1356. En el anexo referente al capítulo 4 se añade el código y la forma de uso de la interfaz gráfica de usuario.

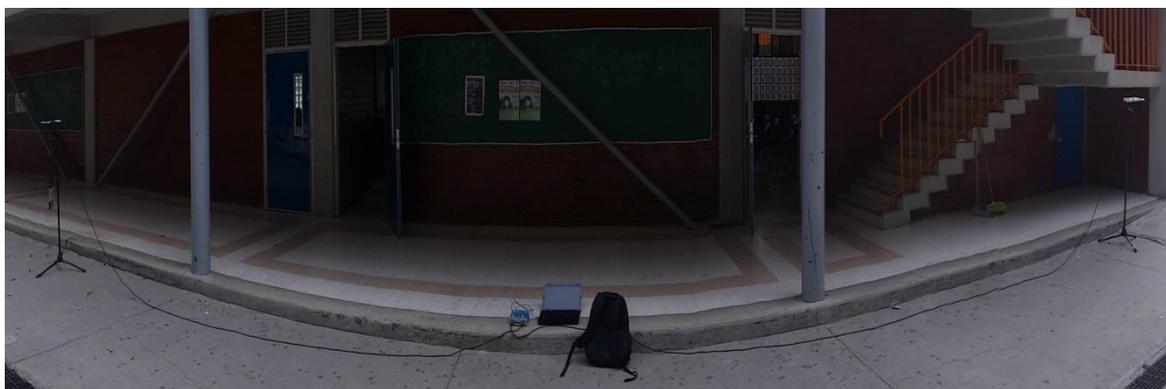


Figura 4.1. Colocación de micrófonos para la grabación de niveles de ruido.



Figura 4.2. Grabación con un solo micrófono.

La figura 4.2 muestra el mapa de ruido creado a partir de la recopilación de los niveles equivalentes obtenidos en el procesamiento de las grabaciones, una de las conclusiones es que el ruido interno es uno de los mayores problemas en la escuela, sin embargo, la contribución acaecida por la creciente urbanización es considerable, al observarse niveles de ruido que están hasta por 30 dB encima de los recomendados en la norma.

Se utilizó la interfaz gráfica para obtener los niveles equivalentes de cada muestra de ruido, junto con la referencia dada por el sonómetro, estos valores fueron recopilados y mostrados en la tabla 4.2 para posteriormente ser colocados en el croquis del plantel.

Tabla 4.2. Niveles equivalentes de las grabaciones para la creación del mapa de ruido.

Muestras de Ruido de la prepa	L_{eq} dBA	L_{eq} dBA Sonómetro
13 DE NOVIEMBRE 2012		
Ruido en patio Ed F 12:45 pm	61.12	61.24
14 DE NOVIEMBRE 2012		
Ruido Estacionamiento punto 1 Ed. A 10:45 am	58.08	59.89
Ruido Estacionamiento punto 1 Ed. F 9:55 am	61.23	61.61
Ruido Estacionamiento punto2Ed. F 10:15 am	64.06	63.9
Ruido Estacionamiento punto 3 Ed. F 11:00 am	59.21	60.05
Ruido Estacionamiento punto 4 Ed. F 11:25 am	55.2	56.68
21 DE NOVIEMBRE DE 2012		
Ruido Estacionamiento punto5 canal L Ed. F 8:20 am	56.89	55.83
Ruido Estacionamiento punto 5 canal R Ed. F 8:20 am	56.09	
Ruido Estacionamiento punto 6 canal L Ed. F 8:45 am	66.33	65.6
Ruido Estacionamiento punto 6canal R Ed.F_8:45 am	61.44	
Ruido Estacionamiento punto 7 canal L Ed. F 9:15 am	61.45	61.23
Ruido Estacionamiento punto 7 canal R Ed. F 9:15 am	56.24	
Ruido Estacionamiento punto 8 canal L Ed. F 10:15 am	58.79	
Ruido Estacionamiento punto 8 canal R Ed. F 10:15 am	55.99	
Ruido Estacionamiento punto 9 canal L Ed. F 11:20 am	57.25	56.21
Ruido Estacionamiento punto 9 canal R Ed. F11:20 am	57.19	
22 DE NOVIEMBRE DE 2012		
Ruido Edificio A punto1 canal L 12:25 pm	63.93	63.43
Ruido Edificio A punto 1 canal R 12:25 pm	66.17	
Ruido Edificio A punto2 canal L 12:50 pm	74.25	74.26
Ruido Edificio A punto 2 canal R 12:50 pm	69.54	
Ruido Edificio A punto 3canal L 1:10 pm	63.98	63.27
Ruido Edificio A punto 3 canal R 1:10 pm	67.25	
Ruido Edificio A punto 4 canal L 1:30 pm	69.45	68.06
Ruido Edificio A punto 4 canal R 1:30 pm	70.38	
Ruido Edificio A punto 5 canal L 1:50 pm	71.27	70.01
Ruido Edificio A punto 5 R 1:50 pm	61.91	
23 DE NOVIEMBRE DE 2012		
Ruido Biblioteca punto 1 canal L 10:46 am	66.45	65.73
Ruido Biblioteca punto 1 canal R 10:46 am	66.33	
Ruido Biblioteca punto 2 canal L 11:07 am	64.86	63.48

Ruido Biblioteca punto 2 canal R 11:07 am	64.93	
Ruido Cafetería patio central canal L 11:30 am	69.59	68.9
Ruido Cafetería patio central canal R 11:30 am	69.24	
Ruido Patio central Asta Bandera canal L 11:55 am	68.06	66.55
Ruido Patio central Asta Bandera canal R_11:55 am	71.02	
Ruido Patio central Labs. Física y Química canal L 12:40 pm	67.6	
Ruido Patio central Labs. Física y Química canal R 12:40 pm	72.35	
Ruido Patio central Teatro y Pintura canal L 12:18 pm	67.47	66.75
Ruido Patio central Teatro y Pintura canal R 12:18 pm	63.74	
26 DE NOVIEMBRE DE 2012		
Ruido Pasillo Auditorio dirección canal L 12:47 pm	69.63	69.63
Ruido Pasillo Auditorio dirección canal R 12:47 pm	73.23	
Ruido Patio central centro punto1 canal L 10:43 am	69.12	69.61
Ruido Patio central centro punto 1 canal R 10:43 am	66.65	
Ruido Patio central centro punto 2 canal L 11:07 am	67.96	67.9
Ruido Patio central centro punto 2 canal R 11:07 am	70.91	
Ruido Patio central centro punto 3 canal L 11:32 am	62.74	62.96
Ruido Patio central centro punto 3 canal R 11:32 am	64.56	
Ruido Patio central centro punto 4 canal L 11:57 am	66.18	66.23
Ruido Patio central centro punto 4 canal R 11:57 am	65.66	
Ruido Ed. Teatro Pintura cerca de baños canal L 12:24 pm	61.9	61.22
Ruido Ed. Teatro Pintura cerca de baños canal R 12:24 pm	62.98	
27 DE NOVIEMBRE DE 2012		
Ruido Alberca punto 1 canal L 12:54 pm	68.35	68.09
Ruido Alberca punto 1 canal R 12:54 pm	70.59	
Ruido Alberca punto 2 canal L 1:20 pm	65.35	64.87
Ruido Alberca punto 2 canal R 1:20 pm	65.89	
Ruido Auditorio canal L 12:30 pm	79.68	79.03
Ruido Auditorio canal R 12:30 pm	78.75	
Ruido Auditorio toma 2 canal L 1:40 pm	80	79.29
Ruido Auditorio toma 2 canal R 1:40 pm	80.32	
Ruido Explanada Vasconcelos canal L 11:39 am	63.41	62.98
Ruido Explanada Vasconcelos canal R 11:39 am	63.19	
Ruido Patio Dirección canal L 12:04 pm	72	71.78
Ruido Patio Dirección canal R 12:04 pm	70.43	
28 DE NOVIEMBRE 2012		
Ruido Biología pasillo alberca canal L 3:07 pm	68.45	67.45

Ruido Biología pasillo alberca canal R 3:07 pm	70.14	
Ruido Biología pasillo cgh canal L 3:32 pm	66.67	65.92
Ruido Biología pasillo cgh canal R 3:32 pm	69.08	
Ruido Biología pasillo exterior canal L 2:40 pm	60.52	60.22
Ruido Biología pasillo exterior canal R 2:40 pm	59	
Ruido Biología pasillo interior canal L 2:20 pm	69	68.59
Ruido Biología pasillo interior canal R 2:20 pm	69.48	
Ruido Biología pasillo sala computo punto 1 canal L 1:30 pm	68	67.5
Ruido Biología pasillo sala computo punto 1 canal R 1:30 pm	69.48	
Ruido Biología pasillo sala computo punto2 copias 1:56 pm	67.64	67.68
29 DE NOVIEMBRE 2012		
Ruido 1er piso Material didáctico idiomas canal L 12:15 pm	65.15	65.85
Ruido 1er piso Material didáctico idiomas canal R 12:15 pm	65.59	
Ruido Dibujo 1er piso canal L 11:35 am toma 1	55.4	55.34
Ruido Dibujo 1er piso canal L 11:55 am toma 2	73.07	72.55
Ruido Dibujo 1er piso canal R 11:35 am toma 1	54.54	
Ruido Dibujo 1er piso canal R 11:55 am toma 2	72.8	
Ruido Sala de computo 12:49 pm	59.91	61
30 DE NOVIEMBRE 2012		
Ruido A08 canal L 10:35 am	68.64	68.71
Ruido A08 canal R 10:35 am	64.72	
Ruido A23 canal L 8:54 am	76.71	76.27
Ruido A23 canal R 8:54 am	74.53	
Ruido B27 Mic Prof-Alumno canal L 07:57 am	72.39	72.98
Ruido B27 Mic Prof-Alumno canal R_07:57 am	73.79	
Ruido B27 Mic Dentro Sonómetro Fuera canal L 8:25 am	63.08	63.42
Ruido B27 Mic Dentro Sonómetro Fuera canal R 8:25 am	73.36	
Ruido F22 Abierto canal L 9:40 am	63.03	63.24
Ruido F22 Abierto canal R 9:40 am	62.78	
Ruido F22 Cerrado canal L 9:22 am	60.26	59.67
Ruido F22_Cerrado canal R 9:22 am	59.95	
05 DE DICIEMBRE 2012		
Ruido A109 canal L 11:20 am	70.48	70.31
Ruido A109 canal R 11:20 am	70.28	
Ruido A202 canal L 11:45 am	73.15	73.31
Ruido A202 canal R 11:45 am	71.92	
Ruido F20 canal L 10:30 am	73.66	72.75

Ruido F20 canal R 10:30 am	71.79	
7 DE DICIEMBRE DE 2012		
Ruido F23 puerta abierta canal L 11:00 am	71.69	71.58
Ruido F23 puerta abierta canal R 11:00 am	71.63	
Ruido F23 puerta cerrada canal L 10:45 am	68.08	67.65
Ruido F23 puerta cerrada canal R 10:45 am	68.84	

Termina tabla 4.2

La figura 4.4 muestra visualmente a la “interfaz gráfica de usuario” (GUI por sus siglas en inglés) realizada en MATLAB para la obtención de los niveles equivalentes del ruido de fondo. Muestra claramente cada panel de selección de archivos para calcular su nivel equivalente y mostrar su gráfica. Debido a que los archivos de ruido están alrededor de los cientos de Mega Bytes, la gráfica está en tiempo discreto con niveles equivalentes cada 2 segundos.

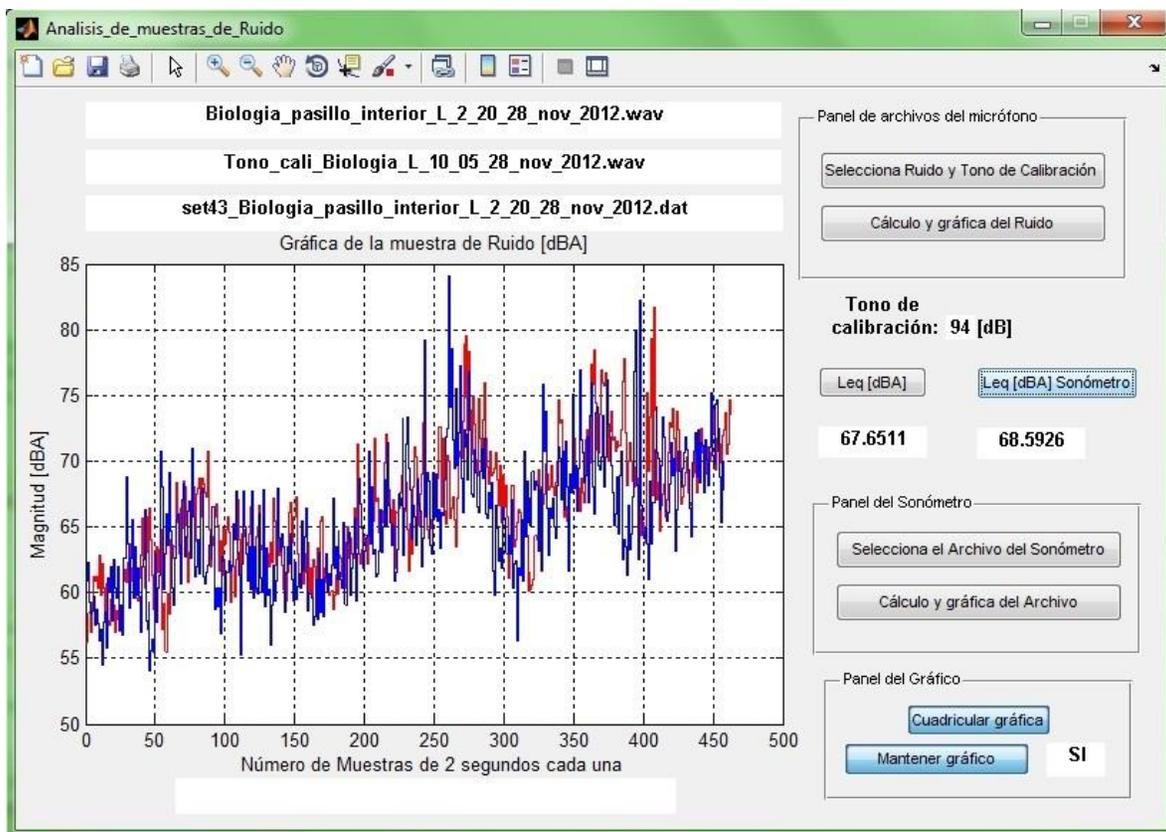


Figura 4.4. GUI de Matlab para las muestras de ruido.

4.2. Valoración Acústica de los salones del plantel escolar

Como parte de la valoración acústica del recinto escolar, se realizó un estudio para obtener el tiempo de reverberación para cada tipo de salón con base en la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1 y con el antecedente del sondeo realizado a profesores y alumnos, donde argumentan que en la mayoría de los salones principalmente en el edificio F, la percepción auditiva se hace casi ininteligible debido a la alta reverberación junto con la fuerte presencia del ruido exterior. Mediante el uso del *software* “Dirac” se obtuvo la respuesta al impulso y con ello dos parámetros que definen indirectamente el tiempo de reverberación (EDT y T_{30}).

El material y procedimiento utilizado es el siguiente:

Material utilizado:

- Fuente omnidireccional sonora.
- 2 micrófonos de condensador para medición Berhinger modelo ECM8000.
- Sonómetro programable TES 1352A.
- Interfaz de audio por USB Tascam US-122.
- Computadora personal.
- Dirac 3.0.
- Amplificador de potencia Crown XTi 1000.
- Cables de conexión Fuente-amplificador (speakON cuatro polos).
- Cables tipo RCA-XLR. (RCA-Canon).
- Cables tipoPlug_6.3mm-XLR.
- Tripies para fuente y tripies para micrófonos.

El procedimiento empleado para obtener la respuesta al impulso por medio de la herramienta computacional de Brüel & Kjær, “Dirac” es el siguiente:

La computadora a través del software genera la señal de prueba, la cual pasa a través de la interface de sonido hacia el amplificador de potencia, para emitirse a través de la fuente omnidireccional ubicada dentro del recinto y formar un campo sonoro difuso; con el micrófono se captura (en una posición lejana a la fuente y de cualquier superficie altamente reflejante) una señal eléctrica equivalente de la presión sonora generada en dicho punto que la envía de regreso a

la interfaz de audio y luego a la computadora, se procesa por en Dirac mediante los métodos descritos en la sección 3.2. El uso del sonómetro es con el propósito de conocer el nivel de presión sonora del ruido de fondo para hacer que la señal emitida por la fuente esté por lo menos 30 dB ($SNR = 30dB$) por encima; se evita el enmascaramiento y el valor del T_{30} podrá calcularse. Esto es muy importante porque acorde con la ayuda que proporciona Dirac, si el nivel de la relación Respuesta al impulso a ruido ($INR= Impulse response to Noise Ratio$) no está por encima de los 35 dB para cada banda de frecuencia los valores de los parámetros no serán confiables. Este proceso se hace en varios puntos con el fin de tener un promedio espacial de los parámetros del recinto. Se debe tener una noción aproximada o subjetiva del tiempo de reverberación (esto se logra con el método tradicional de aplaudir y hacer contar el tiempo en que decae la energía), para ajustar la longitud en tiempo de las ESS o MLS según el caso, según la ayuda de Dirac debe ser de por lo menos $\frac{3}{4}$ del tiempo de reverberación. Como recomendación práctica, es mejor que sea un 40% más que el tiempo predicho subjetivamente. En la figura 4.5 se muestra la respuesta al impulso en un punto y algunos parámetros obtenidos con el software.

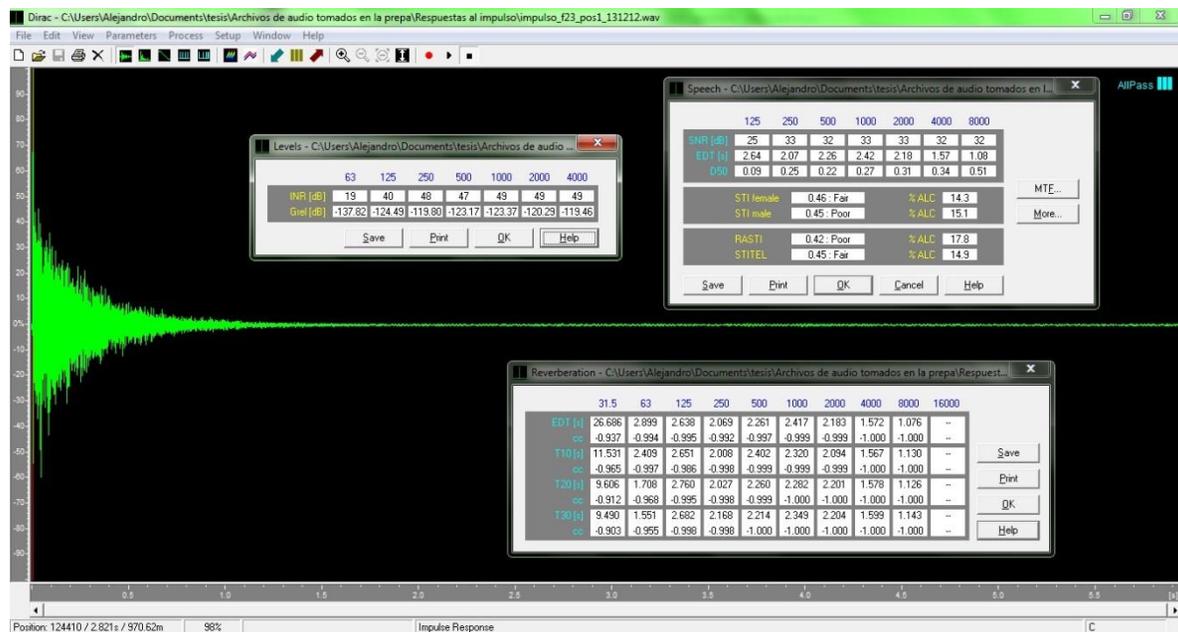


Figura 4.5. Respuesta al impulso generada en "Dirac" y algunos parámetros que la acreditan.

4.2.1. Parámetros acústicos obtenidos a partir de la respuesta al impulso

En la sección 2.2.4 se define al tiempo de reverberación como el tiempo que tarda en disminuir 60 dB el nivel de presión sonora, sin embargo, se complica algo el hacer esta medición debido que

son valores muy pequeños y con la cercanía al ruido de fondo habrá problemas al momento de hacer el cálculo. Para evitar eso, se propusieron varias maneras de llegar a ese valor, una de ellas es el *EDT* el cual fue sugerido por el doctor V.L. Jordan y se define como 6 veces el tiempo transcurrido en intervalo desde los 0dB hasta los -10dB de la curva de decaimiento y en las normas y herramientas de predicción se define como la línea recta que mejor se ajusta a los datos que están dentro del rango de 0 a -10dB. De manera similar, se define el T_{30} como la línea que mejor se ajusta a los datos en un rango de 30 dB de la curva de decaimiento y se calcula como el tiempo transcurrido desde los -5dB a los -35dB de dicha curva.

En este apartado se muestran los resultados del tiempo de reverberación en el parámetro *EDT* y T_{30} para salones de tres edificios distintos del plantel escolar, dos salones y un laboratorio, cada uno con distintos volúmenes (mostrados en la tabla 4.1) y formas; se mostrarán gráficas, posición de cada medición así como un boceto del salón.

Salón F23

Los resultados que a continuación se mencionan son el promedio de las respuestas al impulso de cuatro posiciones de micrófono realizadas en salón del Edificio F (F23) obtenidas con el software “Dirac” a través de barridos sinusoidales exponenciales, el recinto tiene un volumen aproximado de 262 m^3 . La figura 4.6 muestra los valores promedio y la desviación estándar por frecuencias en bandas de octava, de las cuatro posiciones de micrófono en el parámetro T_{30} :

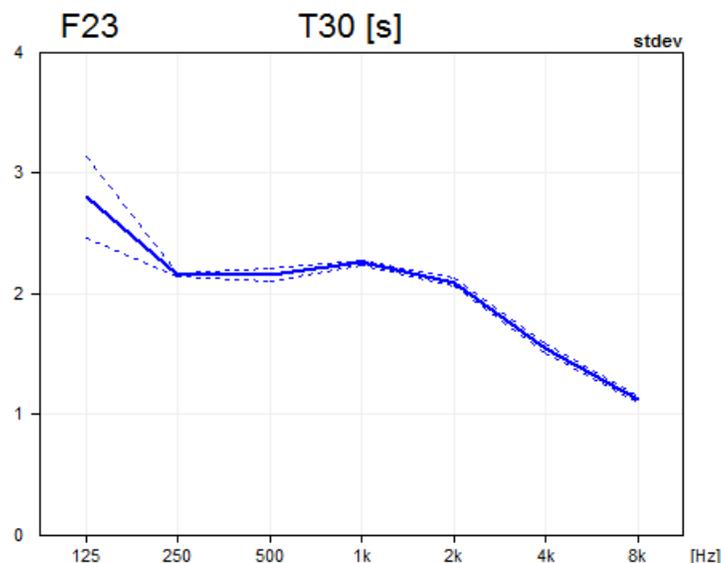


Figura 4.6. Parámetro T_{30} del tiempo de reverberación y su desviación estándar.

Claramente se observa que los tiempos de reverberación en este salón son muy elevados, en el capítulo siguiente se muestran los niveles recomendados por la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1. Sin embargo podemos anticipar que con esos tiempos la energía acústica tarda mucho en decaer, por lo que a los alumnos le costará entender sobre lo que habla el docente.

La figura 4.7 muestra al T_{30} por frecuencias en bandas de octava con sus curvas de valores máximos y mínimos de las cuatro posiciones medidas:

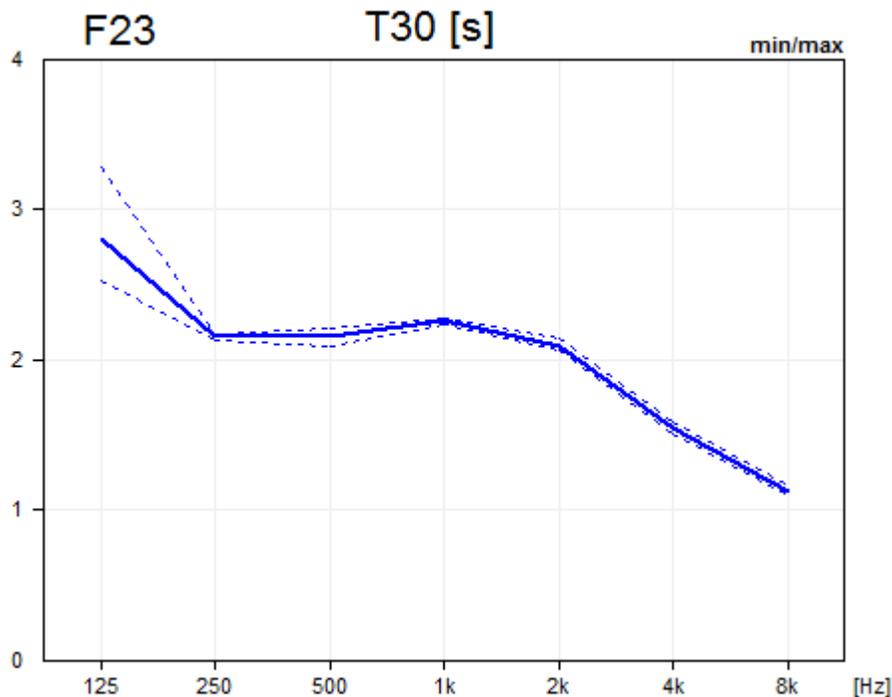


Figura 4.7. Parámetro T_{30} del tiempo de reverberación y valores máx. y mín. de las posiciones.

Se observa que si un campo sonoro se forma, la energía tarda en disiparse porque contiene muchas superficies reflejantes y en cada punto, la medición es muy similar, por lo que si existe una presencia de ruido elevada será muy molesto para todos.

Ahora se muestra la figura 4.8 del parámetro EDT por frecuencias en bandas de octava y su curva de desviación estándar:

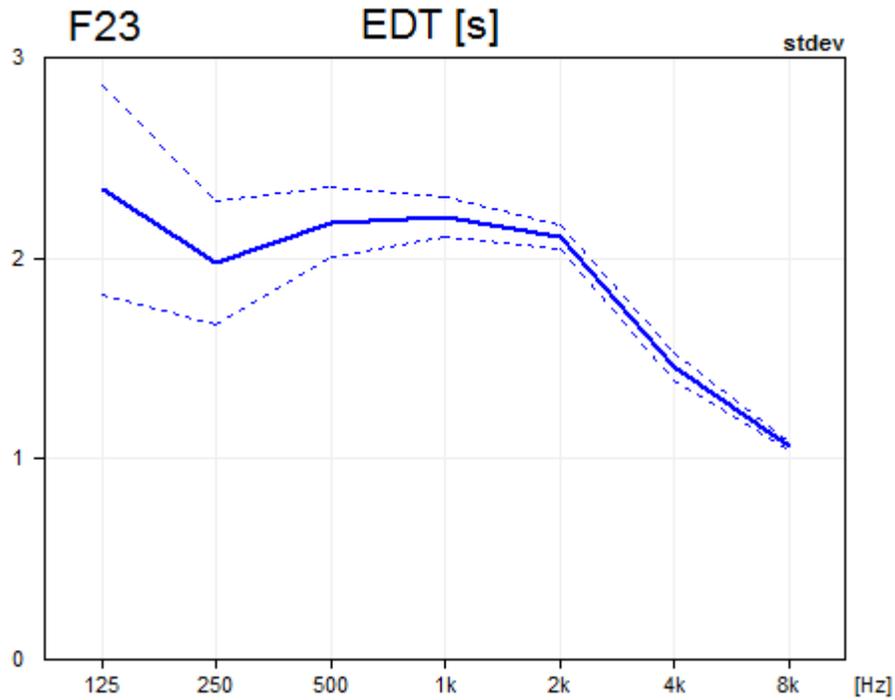


Figura 4.8. EDT con su desviación estándar.

La Figura 4.9 muestra el EDT por frecuencias en bandas de octava con valores máximos y mínimos:

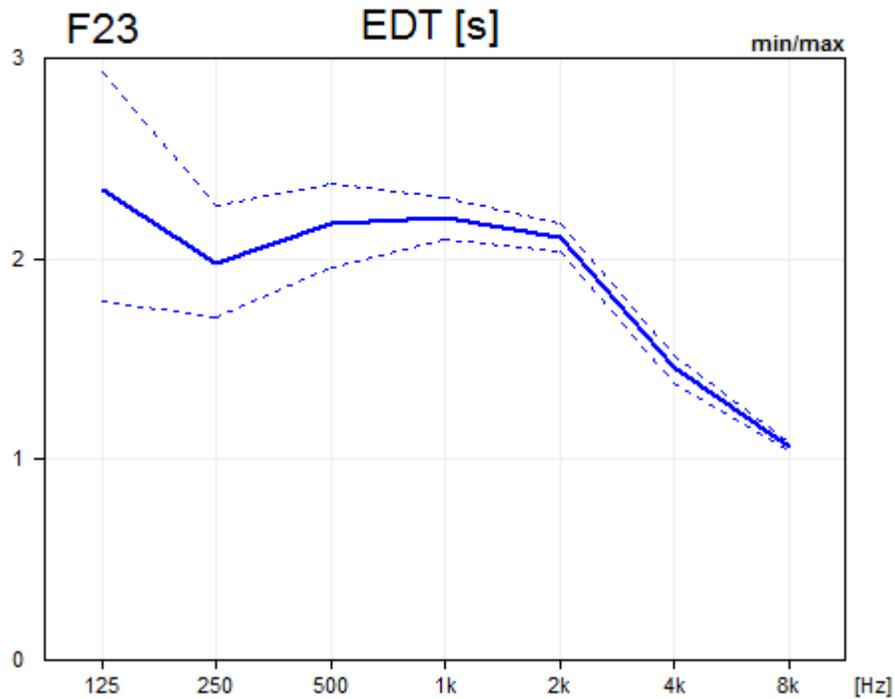


Figura 4.9. EDT con sus valores máximos y mínimos.

El *EDT* es una medida que considera las reflexiones tempranas y lo último que emite la fuente sonora (0 a -10 dB). Este valor nos da una noción de la reverberación percibida o subjetiva, no así el valor real.



Figura 4.10. Posición 1 de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del salón F23.



Figura 4.11. Posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso en el salón F23.

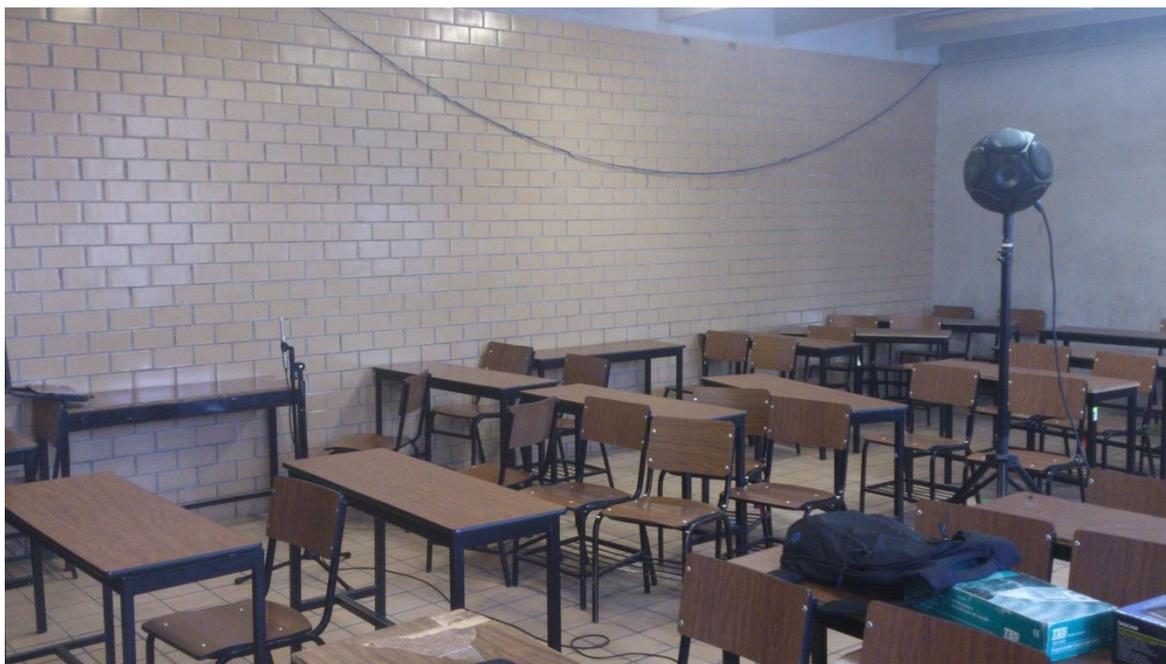


Figura 4.12. Posición 3 de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del salón F23.

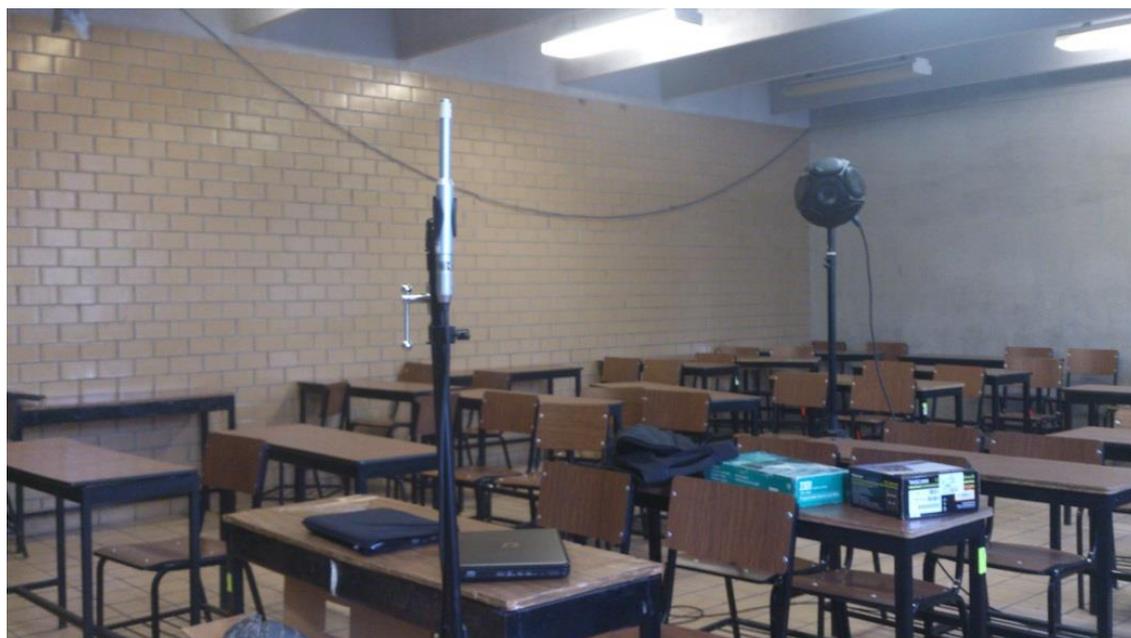


Figura 4.13. Posición 4 de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del salón F23.

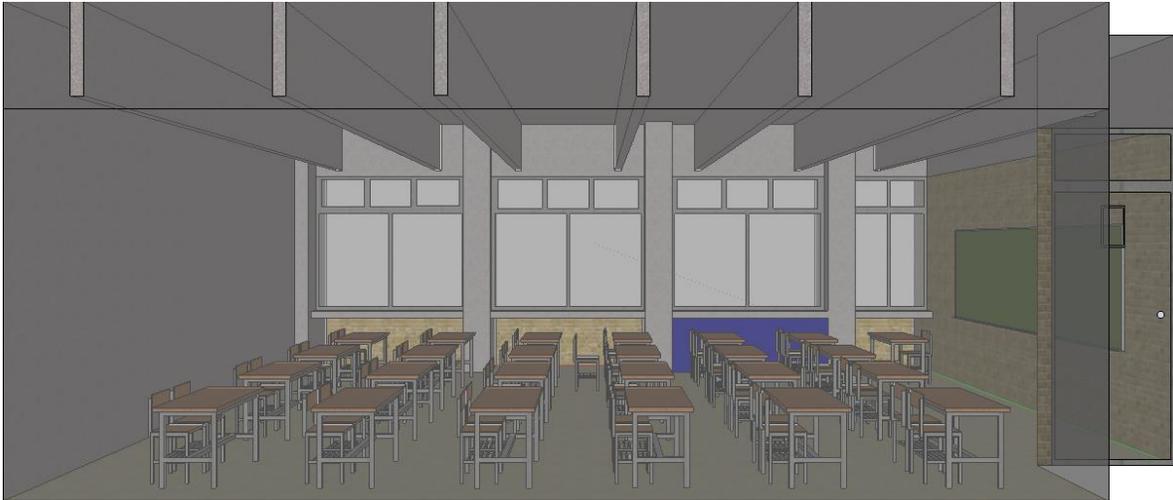


Figura 4.14. Representación pictórica del salón F23.

De la figura 4.10 a 4.13 se observan las fotografías sobre los puntos en los que se determinaron las respuestas al impulso y así poder obtener los parámetros del tiempo de reverberación, la figura 4.14 muestra un dibujo en 3D la forma del salón F23.

Laboratorio B27

Ahora se muestran las gráficas del EDT y T_{30} , se obtienen con el *software* "Dirac", al usar *ESS* para excitar el recinto. Este salón es un laboratorio el cual contiene muchas superficies reflejantes aunadas a las paredes, como los estantes y mesas de trabajo para los alumnos las cuales están hechas con los mismos ladrillos de las paredes, por tanto habrá muchas reflexiones y dispersión del sonido.

Las figuras 4.15 y 4.16 muestran el tiempo de reverberación en su modalidad de T_{30} con sus curvas de desviación estándar y, máximos y mínimos de las cuatro posiciones de micrófono realizadas. Los tiempos de reverberación en las bandas de frecuencia de 500 Hz, 1 kHz y 2 kHz son de 1.26 s, 1.29 s y 1.32 s respectivamente, como se verá en el siguiente capítulo, estos valores exceden por mucho los recomendados por la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1.

Gráfica del T_{30} con desviación estándar y valores máximos y mínimos:

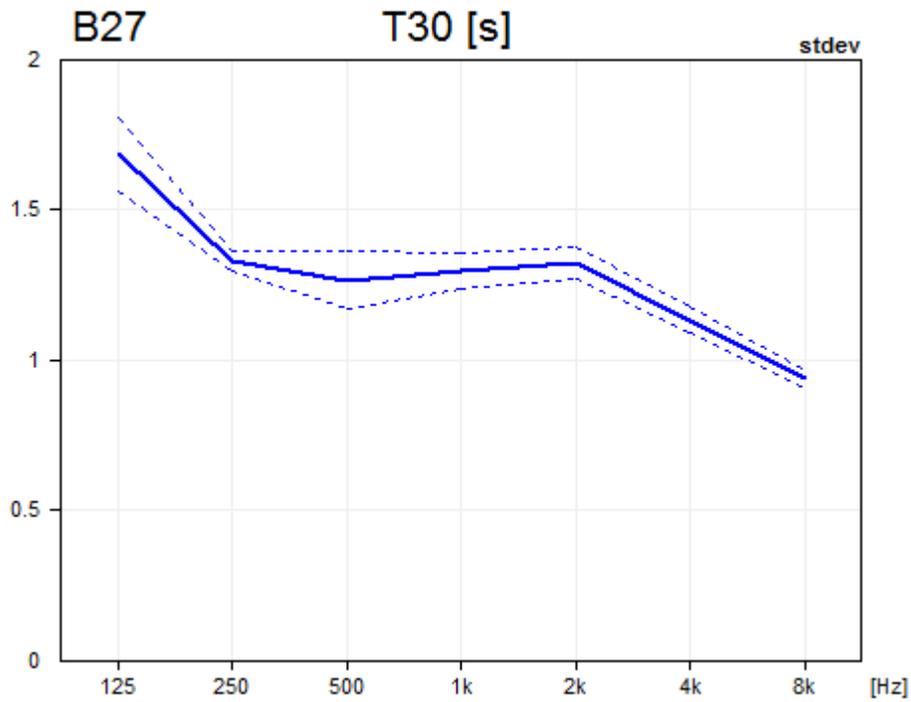


Figura 4.15. T_{30} del laboratorio B27 con su desviación estándar.

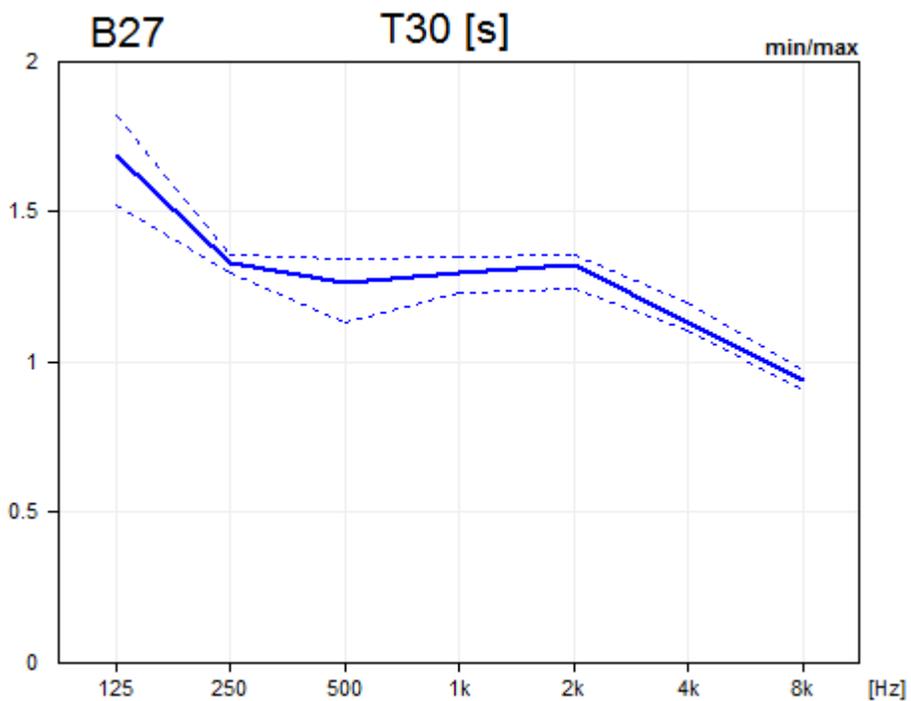


Figura 4.16. Gráfica del T_{30} con sus valores máximos y mínimos.

Gráficas del *EDT* con su desviación estándar y curvas de máximos y mínimos:

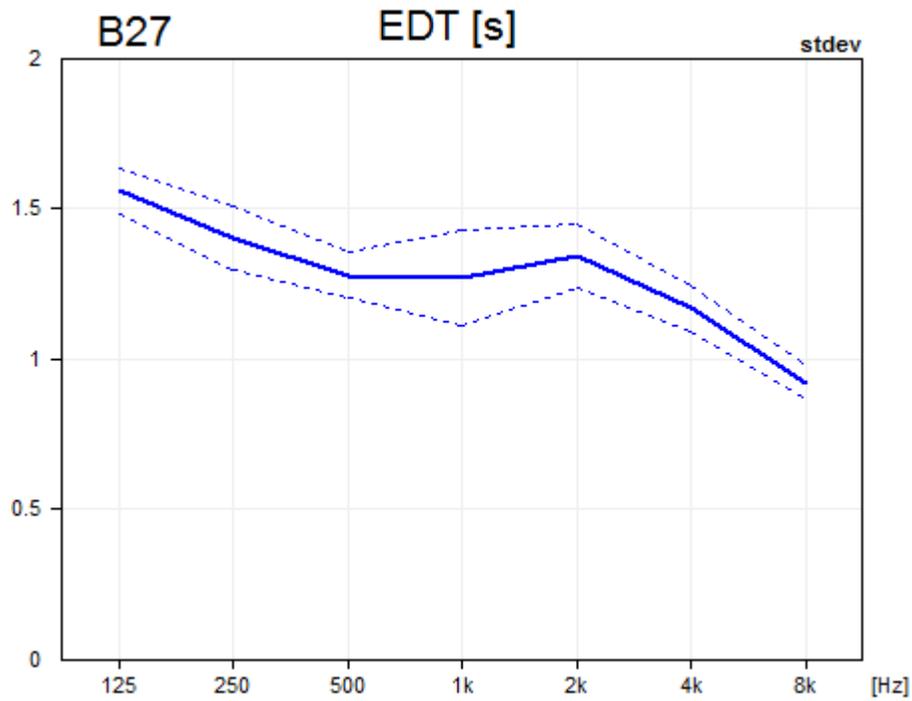


Figura 4.17. Gráfica del *EDT* con su respectiva desviación estándar.

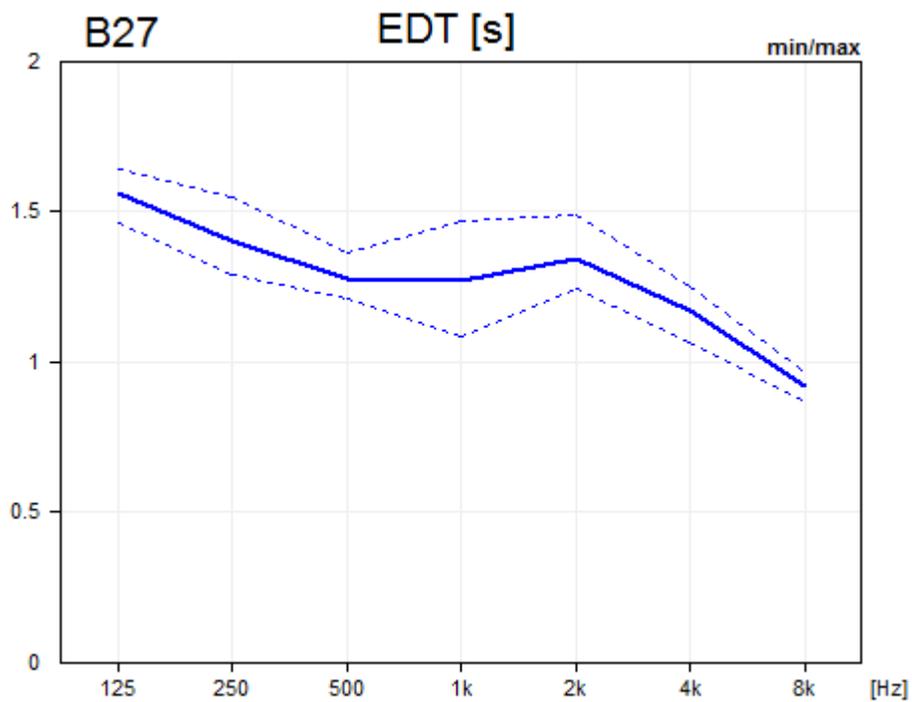


Figura 4.18. Gráfica del *EDT* con sus valores máximos y mínimos.

Las gráficas valores del EDT son elevados y al igual que en el T_{30} comprueba que se tendrán deficiencias en la inteligibilidad del habla.



Figura 4.19. Primera posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso lab. B27.



Figura 4.20. Segunda posición de micrófono para la obtención de la respuesta al impulso lab. B27.



Figura 4.21. Tercera posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del lab. B27.



Figura 4.22. Cuarta posición de micrófono en la obtención de la respuesta al impulso del lab. B27.

De la figura 4.19 a 4.22 se muestran las fotografías de las 4 posiciones y su consecuente respuesta al impulso, posteriormente se obtuvieron los promedios espaciales mostrados en las gráficas para obtener el tiempo de reverberación del salón de clases; si sólo se hace en un solo punto, los valores de los parámetros únicamente serán válidos para dicho punto.



Figura 4.23. Dibujo en 3D del laboratorio B27 con vista al interior.

Salón A22

Las gráficas que a continuación se muestran, son de los parámetros de EDT y T_{30} del promedio de 2 posiciones de micrófono realizadas en salón A22 del Edificio A. Se obtuvieron con el *software* "Dirac" a través de la excitación del recinto mediante barridos sinusoidales exponenciales.

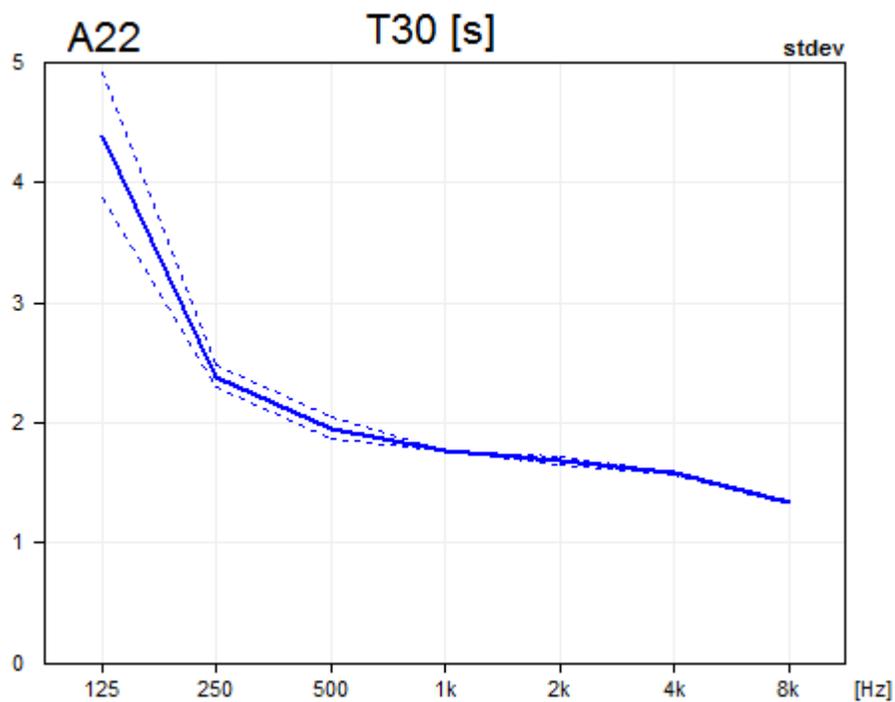


Figura 4.24. Gráfica del T_{30} con su desviación estándar.

Gráfica del T_{30} con curvas de valores máximos y mínimos:

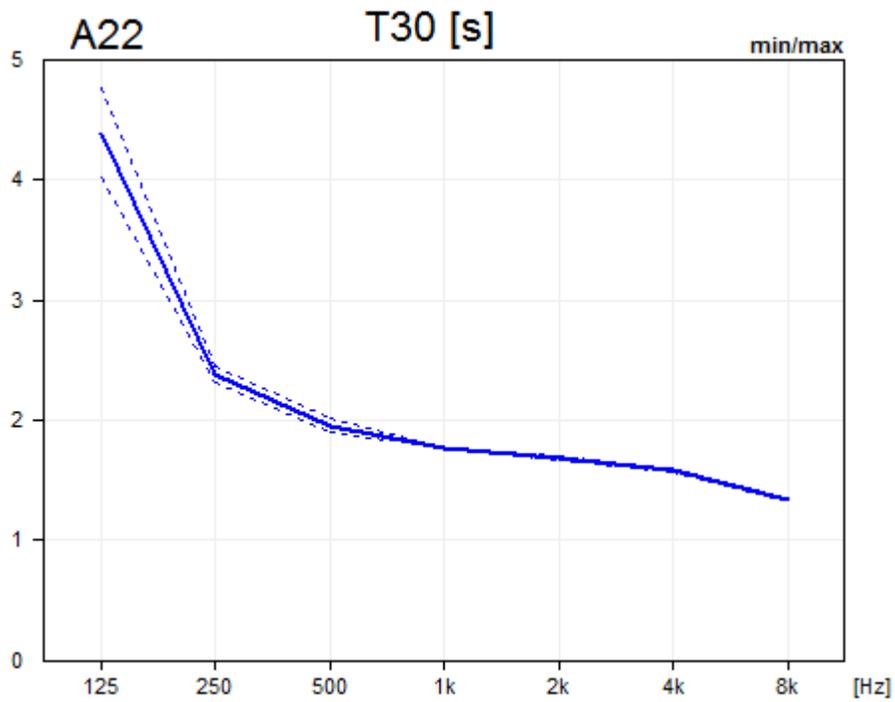


Figura 4.25. Gráfica del T_{30} con sus valores máximos y mínimos.

Gráfica del EDT con su desviación estándar:

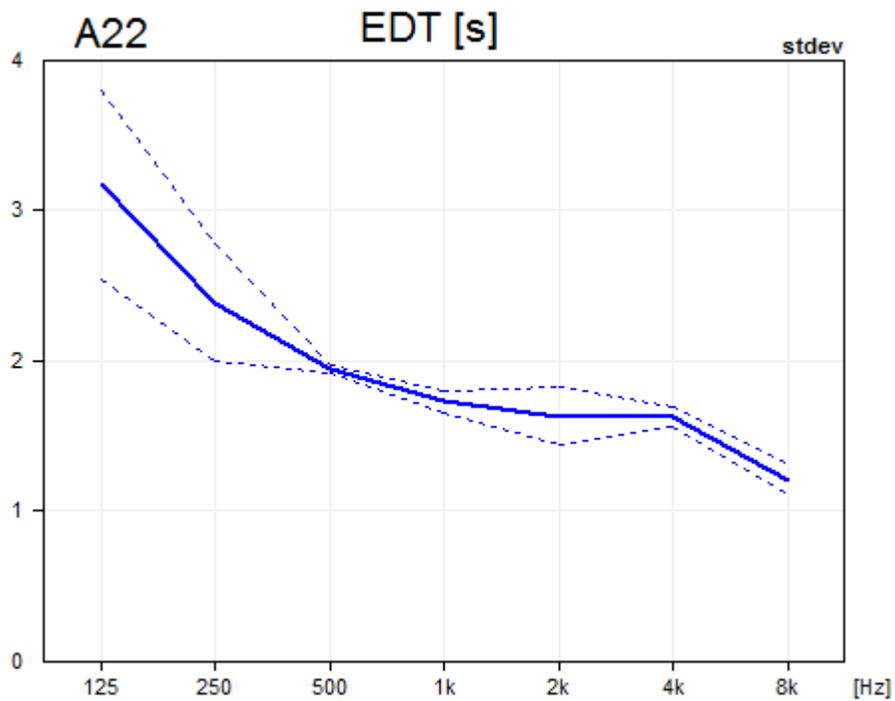


Figura 4.26. Gráfica del EDT con su respectiva desviación estándar.

Gráfica del *EDT* con curvas de valores máximos y mínimos:

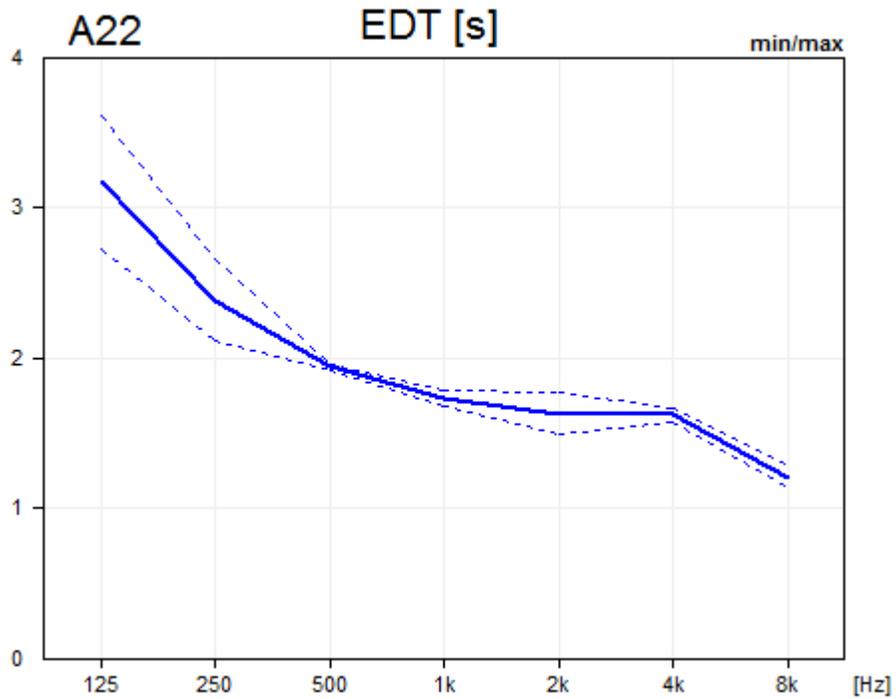


Figura 4.27. Gráfica del *EDT* con sus valores máximos y mínimos.

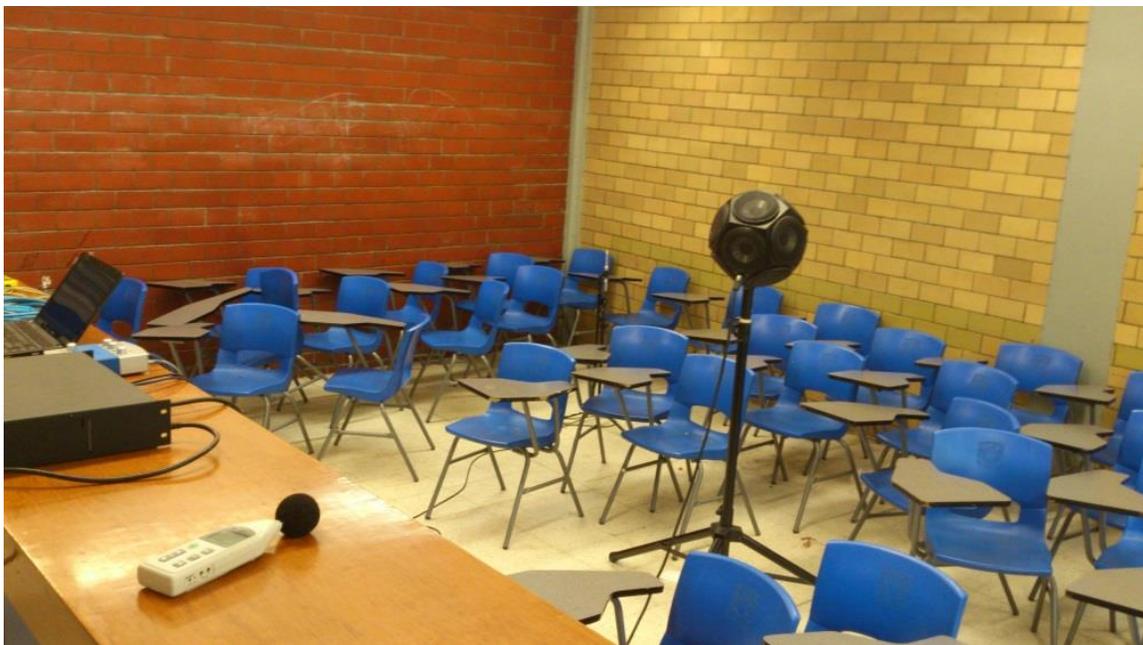


Figura 4.28. Primera posición de micrófono para la obtención de la respuesta al impulso.



Figura 4.29. Segunda posición de micrófono para la obtención de la respuesta al impulso.



Figura 4.30. Vista en 3D del salón A22.

Estos son los resultados de los parámetros de tiempo de reverberación para los salones estudiados (A22, F23 y B27) que, junto con los niveles altos de ruido de fondo, arrojan resultados negativos para la inteligibilidad del habla. En el capítulo siguiente se explicará la relación que tiene la inteligibilidad en función del ruido de fondo y el tiempo de reverberación.

Capítulo 5
Propuesta de
 acondicionamiento
 acústico para el
 recinto escolar

5. Propuesta de acondicionamiento acústico para el recinto escolar

El capítulo anterior se basó en encontrar los parámetros de tiempo de reverberación y niveles de ruido de fondo, es este capítulo se comparan con los valores recomendados por la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1 mostrados en la tabla 5.1. Se concluye que los niveles de ruido de fondo y tiempo de reverberación son excesivos, por lo que la inteligibilidad del habla en sus salones está en detrimento. Debido a esta situación surge la necesidad de dar respuesta a la actual problemática. En este capítulo se muestra una solución para la reducción de ruido de fondo y tiempos de reverberación en los salones de clase y en general el recinto escolar.

Tabla 5.1. Límites de los niveles de ruido de fondo en ponderación A y tiempo de reverberación.

Volumen cerrado del salón de clases	$L_{eq}(dBA)$ de ruido exterior	$L_{eq}(dBA)$ de ruido interior	Tiempo de reverberación máximo permitido para salones no ocupados (500, 1000, 2000 [Hz]) [s]
Vol. $\leq 283 \text{ m}^3$	35	35	0.6
$283 \text{ m}^3 < \text{Vol.} \leq 566 \text{ m}^3$	35	35	0.7

5.1. Obtención del tiempo de reverberación óptimo

Muchos trabajos sobre los tiempos de reverberación óptimos en salones de clase se han realizado, en un principio los estudios teóricos distaban de los experimentales, mientras que estos daban tiempos de reverberación óptimos de cero, los teóricos eran de algunos segundos, estos resultados tan contradictorios se debieron a que en ambos casos consideraban de manera no real al ruido de fondo; ambos trabajaron en ello, sin embargo el campo teórico dio resultados mucho más aceptables ya que incorpora el tratamiento del ruido cercano y el efecto de reverberación sobre éste, por lo que se llegó al acuerdo de: un tiempo de reverberación óptimo de cero es innatural porque para las personas presentes sería un ambiente no agradable, los escuchas que no estén posicionados directamente al orador les llegará muy poca energía de la señal ya que la voz es una fuente direccional (hacia el frente del hablante). En cuanto al orador, se le dificultaría monitorear su voz debido a inexistentes reflexiones. Además la implementación es impráctica y

costosa porque son muchos los materiales que se deben utilizar y la disposición es de manera especial para lograr ese tiempo de reverberación. Por lo tanto distintos tiempos de reverberación óptimos se recomiendan en la norma y son dependientes con el volumen de los salones.

Para hacer la propuesta se llevaron a cabo simulaciones sobre los tres recintos caracterizados. Mediante el uso del programa *SketchUp* versión 8 se crearon los salones en 3D y posteriormente se exportaron al programa *Odeon* para la simulación y obtención de los parámetros EDT y T_{30} . Una vez obtenidos los parámetros acústicos se comparan con los valores reales obtenidos, *Odeon* tiene la cualidad de importar las respuestas al impulso, obtener parámetros y colocarlos en una gráfica junto a los valores simulados para dicha comparación.

Las siguientes figuras muestran la realización del salón F23 en *SketchUp*, posteriormente se redujeron superficies que no interactúan con la simulación en *Odeon*, por ejemplo, no se trabajó con la cualidad de transmisión en las superficies, por tanto, se eliminaron las que están por fuera y que sólo le dan vista al modelo, también se eliminaron las que únicamente afectan a muy altas frecuencias y están fuera del enfoque del tratamiento (cómo las patas de las bancas y mesas).



Figura 5.1. Salón F23 a detalle de superficie.



Figura 5.2. Salón F23 a detalle con vista al interior.

La decisión de reducir superficies para su uso en *Odeon* es porque se acelera el proceso de cálculo y como se mencionó, algunas superficies no interactúan; además los algoritmos de programación trabajan con elemento finito y no es necesaria tanta exactitud en la forma. Las figuras 5.3 y 5.4 son comparaciones de las figuras 5.1 y 5.2.



Figura 5.3. Salón F23 con reducción de superficies.

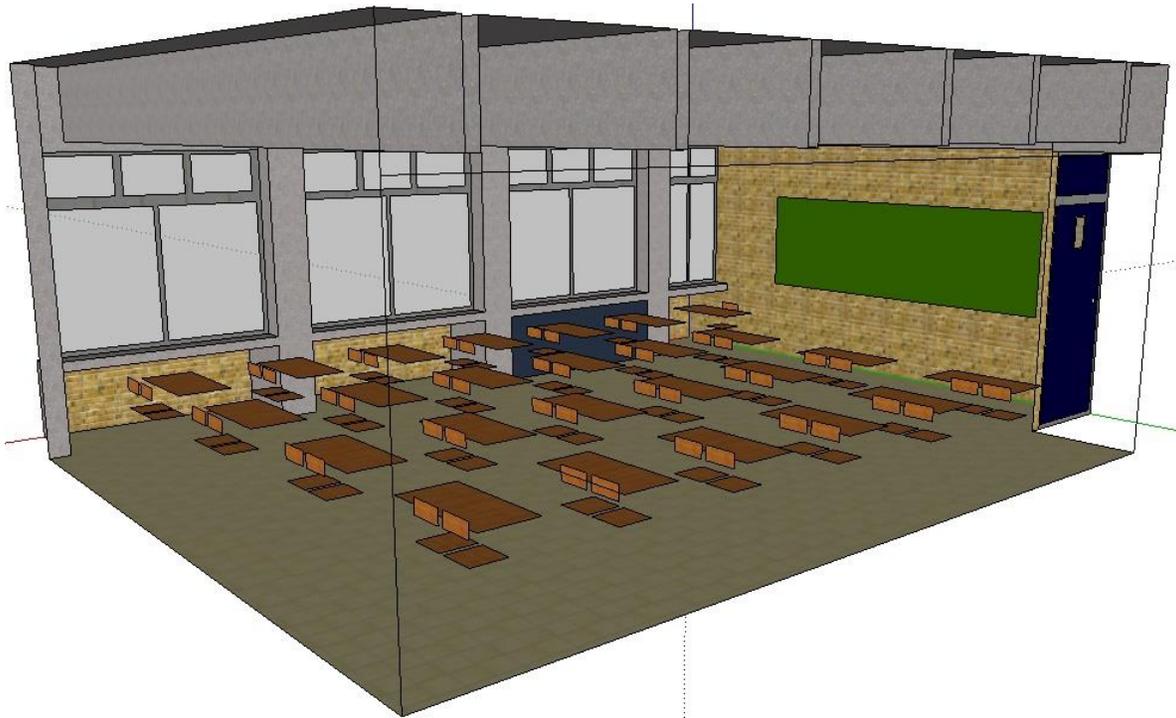


Figura 5.4. Salón F23 con reducción de superficie para la eficiencia de cálculos en *Odeon*.

Ahora toca el turno de presentar al salón A22 y las reducciones de superficie que se hicieron para su posterior simulación.

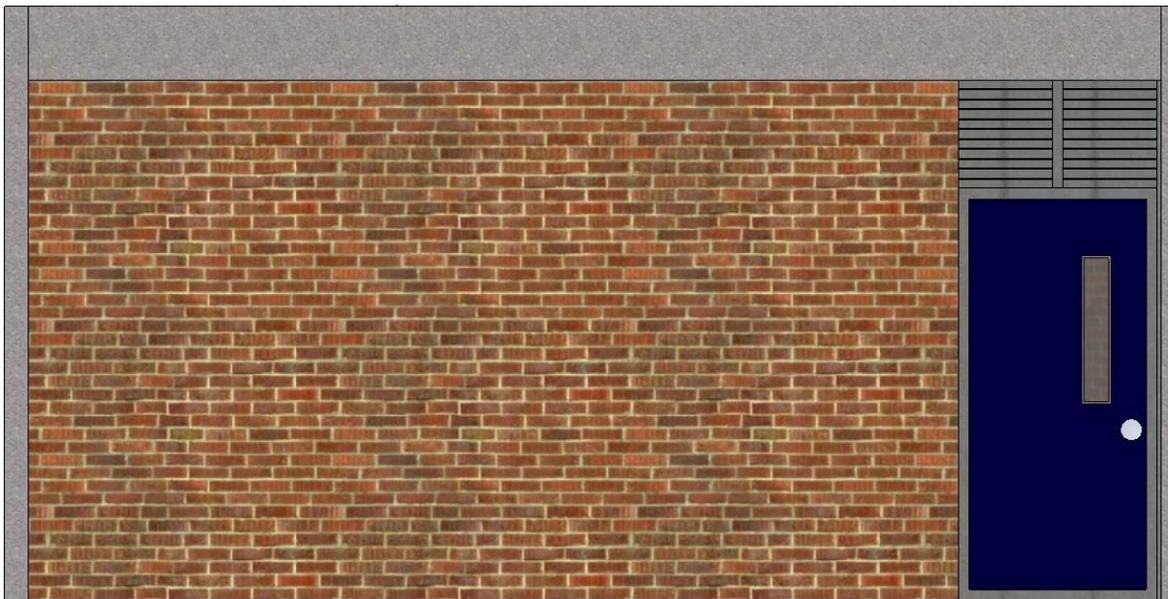


Figura 5.5. Salón A22 a detalle de superficie.

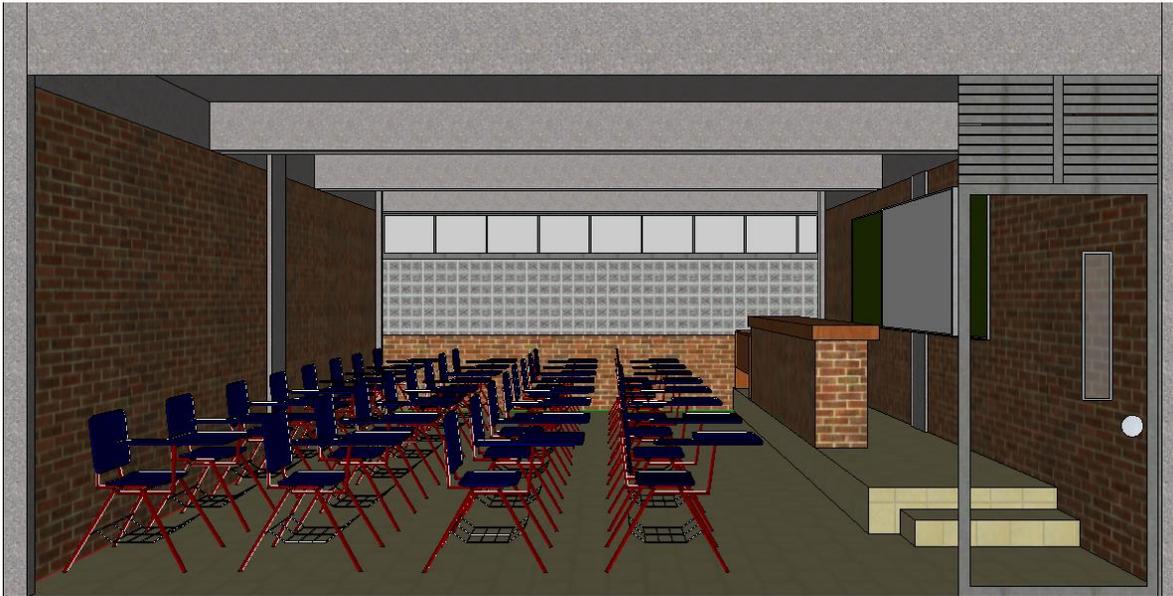


Figura 5.6. Salón A22 con detalles de superficie y vista al interior.



Figura 5.7. Salón A22 con reducción de superficie para su simulación en *Odeon*.

Estos salones tienen un volumen menor a 283 m^3 por lo cual su tiempo de reverberación debe ser de 0.6 segundos, sin embargo como se observa en la ilustración posee muchas superficies reflejantes que lo hacen muy reverberante, esto se detalla y demuestra en los subtemas siguientes, sin embargo antes se muestran ilustraciones del laboratorio B27 el cual su volumen es superior a los 283 m^3 pero menor a los 566 m^3 .

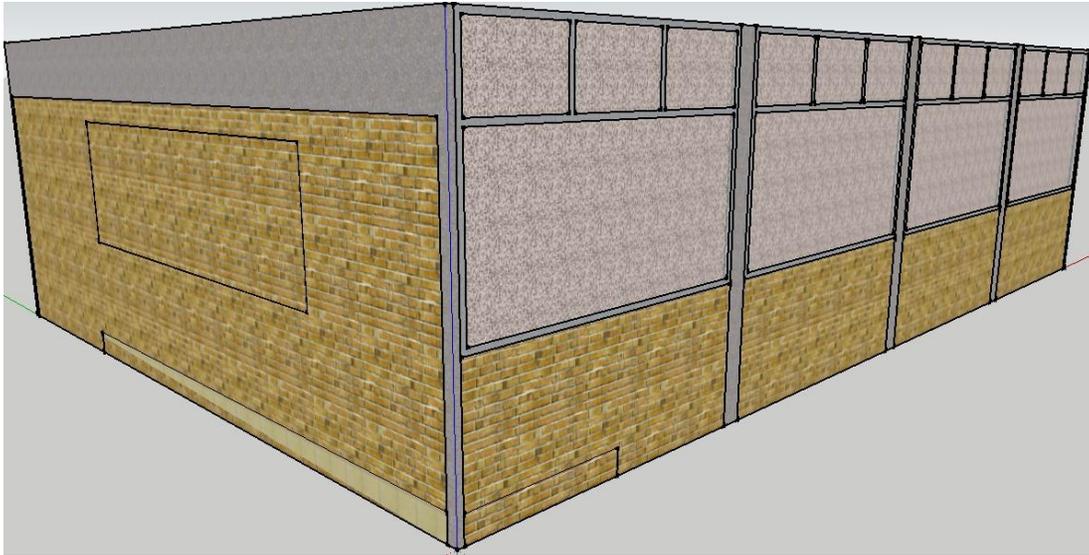


Figura 5.8. Laboratorio B27 a detalle de superficie.

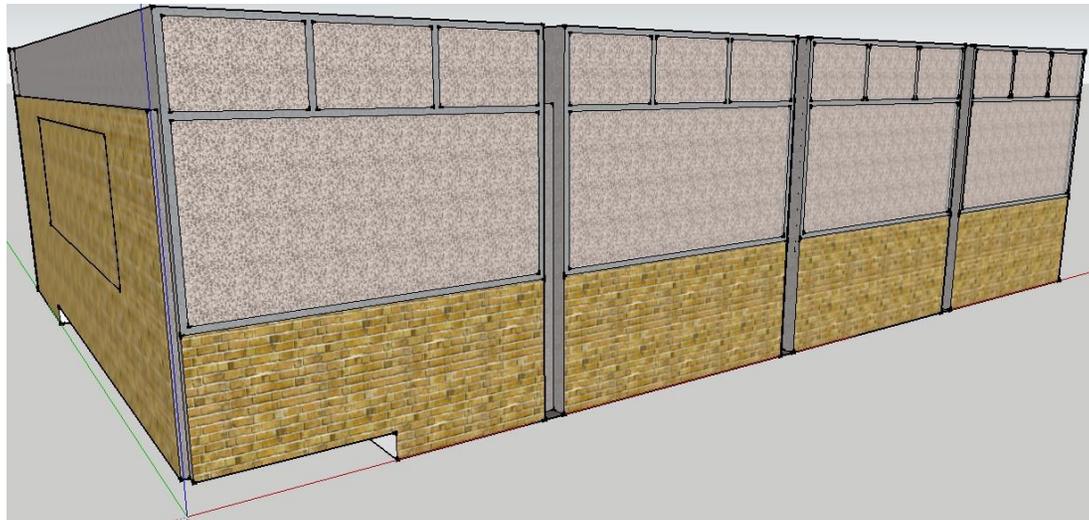


Figura 5.9. Laboratorio B27 con reducción en superficies.

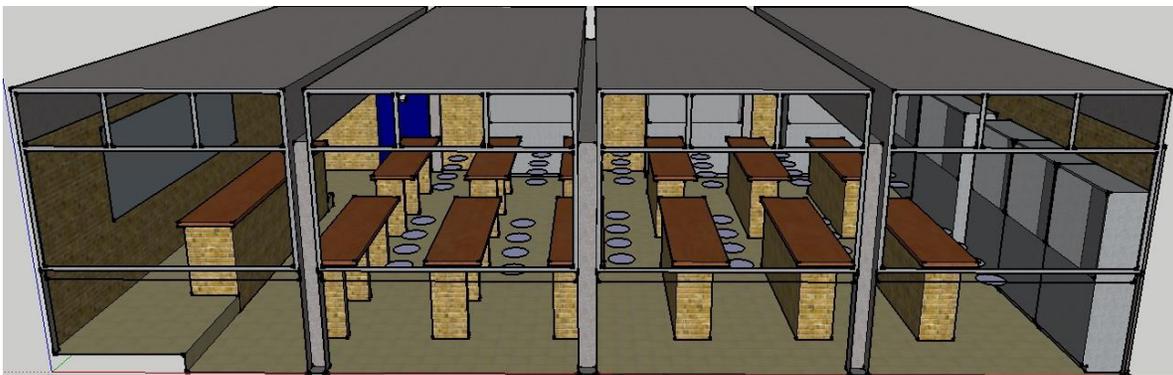


Figura 5.10. Laboratorio B27 superficies reducidas con vista al interior.

5.1.2. Obtención de los parámetros EDT y T_{30} simulados y su comparación

Para la obtención del EDT y T_{30} mediante la simulación en *Odeon*, se tuvo que dar propiedades de absorción a cada superficie creada en la importación de *SketchUp* a *Odeon*; se hizo una aproximación con los coeficientes que trae por defecto el programa *Odeon*. Se seleccionaron las mismas posiciones de micrófono y fuente que en las mediciones reales. Se importaron las respuestas al impulso obtenidas en *Dirac* y compararon con las simuladas.

Salón F23

La gráfica de la figura 5.12 muestra al EDT simulado (color rojo) y medido (color azul); se observa que en la parte correspondiente a la simulación la desviación estándar así como sus máximos y mínimos, no distan demasiado entre sí, esto se debe a la manera en que se simula, al ser trazado de rayos no considera los modos del recinto. Según la ayuda de *Odeon*, cuanto más grande sea el valor de la desviación estándar, significa que el comportamiento de los modos es dominante a esas frecuencias. Por tanto, es muy importante contar con ambas referencias, simulados y medidos, para hacer las consideraciones correspondientes y no se tengan problemas al momento de dar una solución.

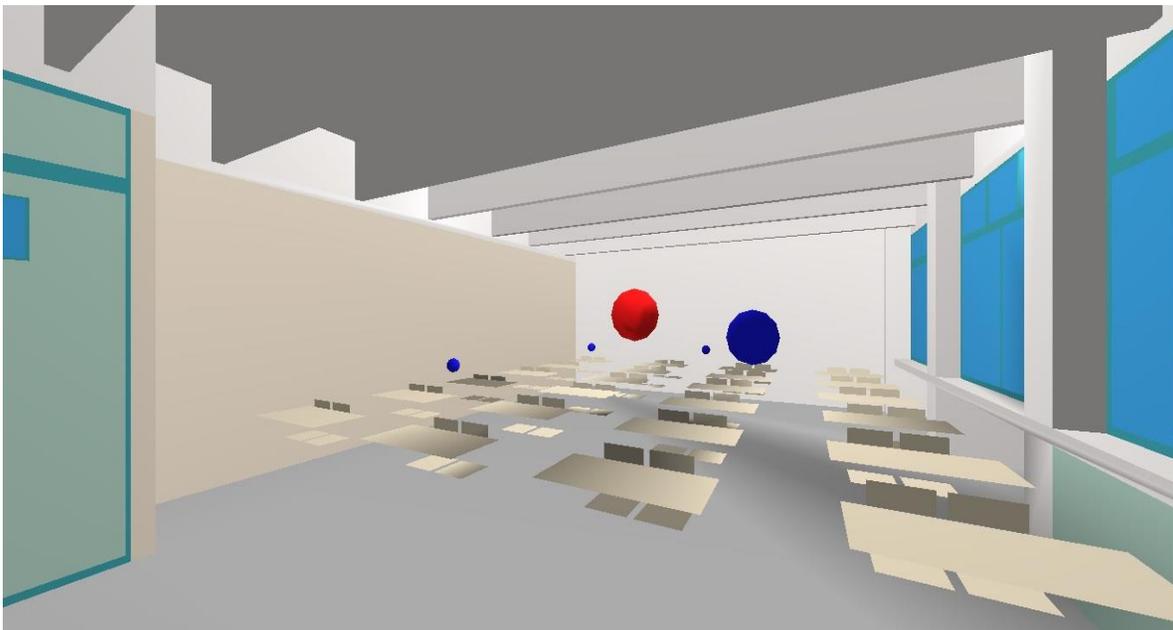
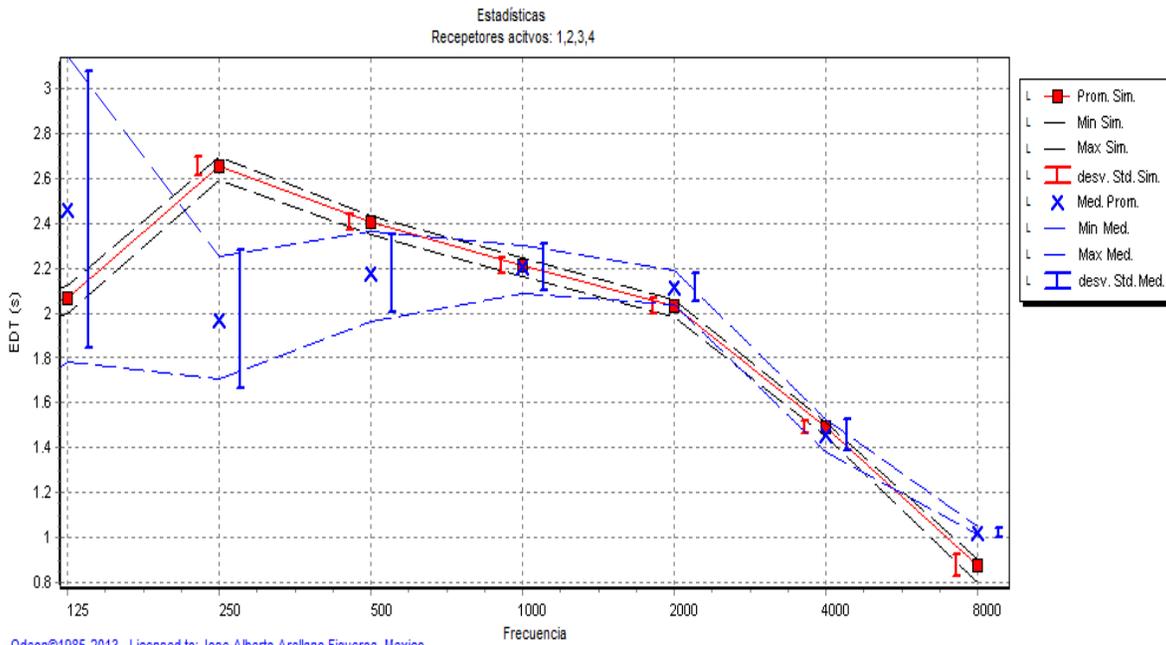


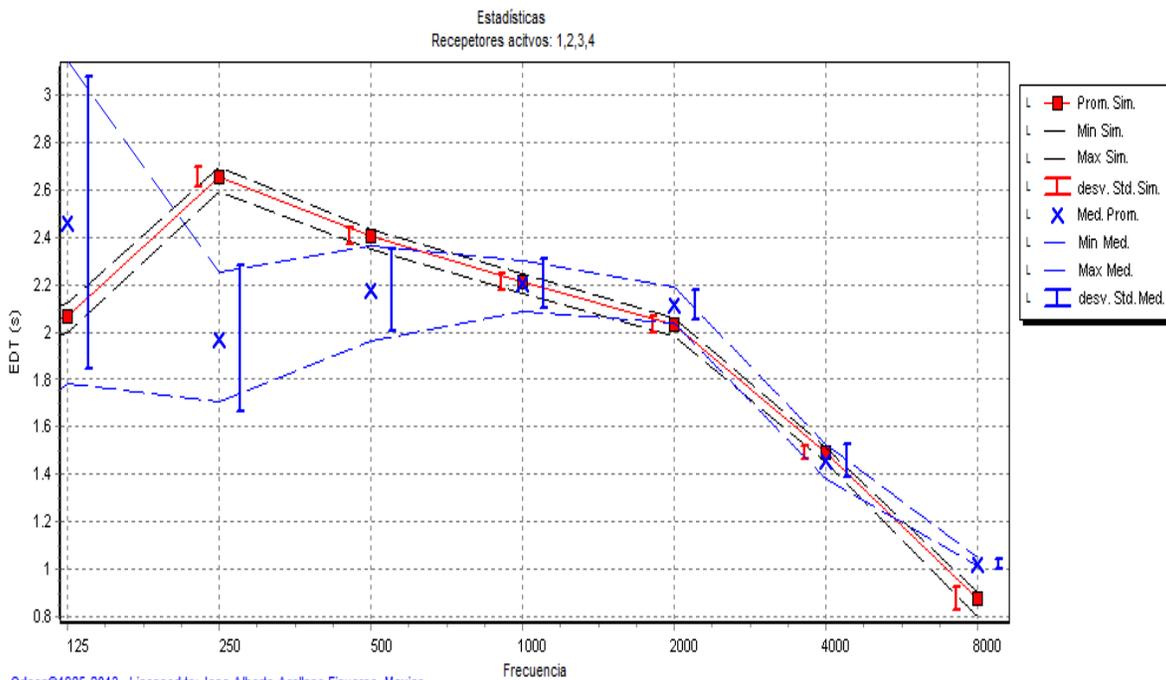
Figura 5.11. Salón F23. El color en cada superficie indica la absorción acústica en analogía con la luz.



Odeon@1985-2013 Licensed to: Jose Alberto Arellano Figueroa, Mexico

Figura 5.12. EDT del salón F23 simulado vs medido.

Ahora la siguiente gráfica de comparación de valores medidos contra simulados es del T_{30} :



Odeon@1985-2013 Licensed to: Jose Alberto Arellano Figueroa, Mexico

Figura 5.13. T_{30} del salón F23 medido vs simulado.

Propuesta de tratamiento acústico para salones del tipo F23

Con base en los resultados anteriores se comprueba que existen niveles muy elevados de tiempo de reverberación y por tanto no cumple con lo recomendado. La solución que se propone tiene fundamento en los lineamientos de diseño para el control de la reverberación proporcionados por la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1, la cual menciona que: Para la cantidad de absorción mínima requerida a partir de diversos materiales absorbentes se basa en la ecuación 2.18 descrita en la sección 2.2.3 y su expresión es:

$$A = \sum_i S_i \alpha_i + A_R \tag{5.1}$$

Donde A_R es el área de absorción residual y corresponde al 15% del área de piso.

El proceso se simplifica al utilizar un tipo de material absorbente. Si se considera al volumen del recinto como el producto del área de piso S_p y la altura H . Con base en la ecuación 5.2 se obtiene la tabla referente a *la superficie mínima requerida de material absorbente como porcentaje del área de piso S_1* :

$$100(S_1/S_p) \geq 100\{[(kH/T_{60}) - 15]/\alpha_1\} \tag{5.2}$$

Donde $k = 55.3/c = 0.161$ si $c = 341$ m/s. Esta ecuación es el resultado de combinar las ecuaciones 5.1 y la formula de Sabine 2.19.

Tabla 5.2. Área mínima requerida de material absorbente para los distintos α_1 y un $T_{60} = 0.6$ s.

Coeficiente de absorción	Altura, H (m)								
	2.44	2.74	3.05	3.35	3.66	3.96	4.27	4.57	4.88
	Área mínima requerida como porcentaje del área de piso								
0.45	112	130	148	167	185	203	221	239	257
0.5	101	117	134	150	166	183	199	215	232
0.55	92	107	121	136	151	166	181	196	211
0.6	84	98	111	125	139	152	166	179	193
0.65	78	90	103	115	128	141	153	166	178
0.7	72	84	95	107	119	130	142	154	166
0.75	67	78	89	100	111	122	133	144	154
0.8	63	73	83	94	104	114	124	135	145
0.85	59	69	79	88	98	107	117	127	136
0.9	56	65	74	83	92	101	111	120	129
0.95	53	62	70	79	88	98	105	113	116
1	50	59	67	75	83	91	100	108	116

Las variables en la tabla 5.2 son los coeficientes de absorción y la altura promedio del salón de clases, estos se especifican a las frecuencias por bandas de octava en 500, 1000 y 2000 Hz del material absorbente, la norma ofrece una ayuda en la que, al referirse a la banda de 500 Hz cubre la conformidad con las otras dos bandas de frecuencia. A partir de esta información obtenemos el área mínima requerida de material absorbente como porcentaje del área de piso para el salón F23 como sigue:

El área de piso es $S_p = 7.58 * 9.39 = 69.3 \text{ m}^2$, la altura es $H = 3.68 \text{ m}$ y el valor del coeficiente de absorción en la banda de 500 es $\alpha_1 = 0.65$ por tanto el área mínima requerida de material absorbente como porcentaje del área de piso es $S_1 = 128\% * S_p = 88.7 \text{ m}^2$. El área disponible en el techo es sólo de 60 m^2 y en el costado debajo de las ventanas, se tiene aproximadamente un área de 4.5 m^2 , esto apenas cubre un 94% de lo que se requiere. Falta cubrir 34%, para ello se pretende agregar tratamiento con alfombra y cortinas; ambos materiales, su coeficiente de absorción en la banda de los 500 Hz es menor a 0.45 ($\alpha_1 = 0.39$ para cortinas y $\alpha_2 = 0.3$ para alfombra), así que se utiliza esta referencia para ambos materiales, por tanto el área mínima requerida es de 185% del área de piso, sin embargo, es del 34% restante, por tanto queda que: $S_2 = 1.85 * 0.34 * 69.3 \text{ m}^2 = 43.58 \text{ m}^2$; el área máxima que puede dedicarse a las cortinas es de 16 m^2 y en la pared es aproximadamente de 20 m^2 , al dar un total 36 m^2 que es el equivalente al 28% del 34% que se requiere, no obstante, es una buena aproximación.

La colocación de los materiales se detalla a continuación: Plafón acústico a la altura de las lámparas. A 30 cm por debajo del techo y 30 cm despegado de la pared en las áreas por debajo de las ventanas, lana mineral con un espesor de 5cm. En la pared trasera del salón, alfombra con espesor de 9mm. Por último, cambiar las persianas actuales por cortinas de tejido denso para ventana. En la tabla 5.3 se muestran sus especificaciones de coeficiente de absorción.

Tabla 5.3. Coeficientes de absorción de materiales propuestos para la adecuación del salón F23.

Material	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
lana mineral	0.7	0.7	0.45	0.65	0.6	0.75	0.65	0.65
plafón acústico	0.24	0.24	0.18	0.06	0.06	0.1	0.1	0.1
Cortinas de tejido denso	0.05	0.05	0.06	0.39	0.63	0.7	0.73	0.73
Alfombra de 9mm	0.08	0.08	0.08	0.3	0.6	0.75	0.8	0.8

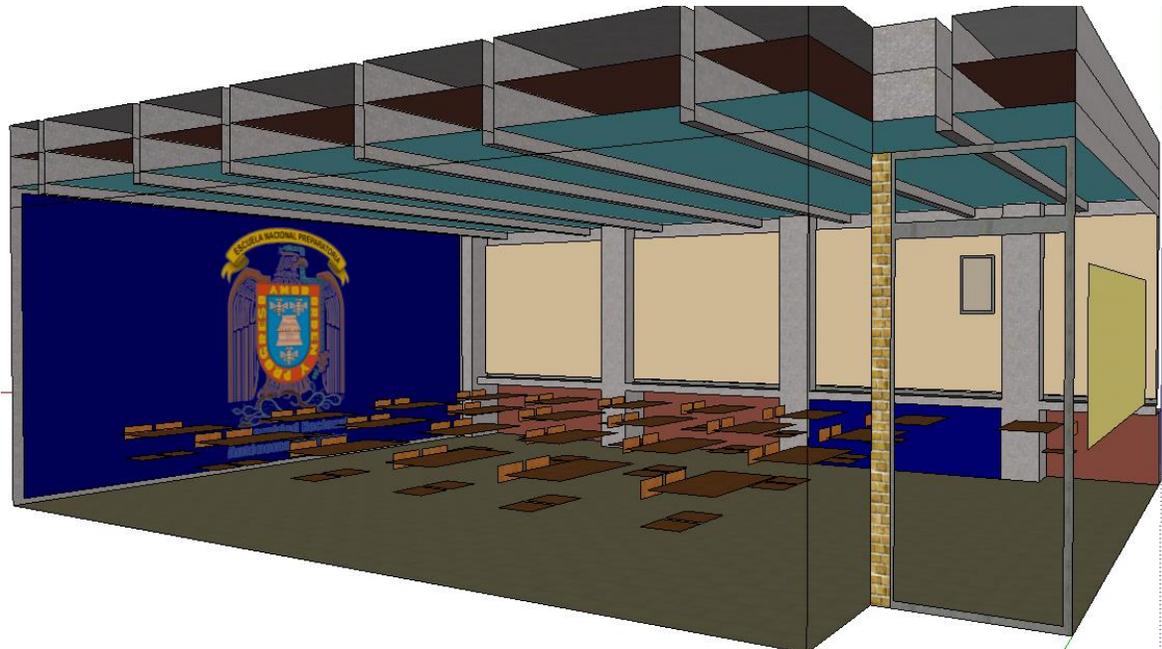


Figura 5.14. Modificaciones propuestas al salón F23 realizadas en *SketchUp* para su simulación.

Se hacen las modificaciones en *SketchUp* y se vuelve a exportar a *Odeon* para su simulación, la fuente y los receptores conservan su ubicación y las características de EDT y T_{30} se vuelven a obtener y comparar con las mediciones reales (sin tratamiento) para observar cuanto mejoró el parámetro del tiempo de reverberación.

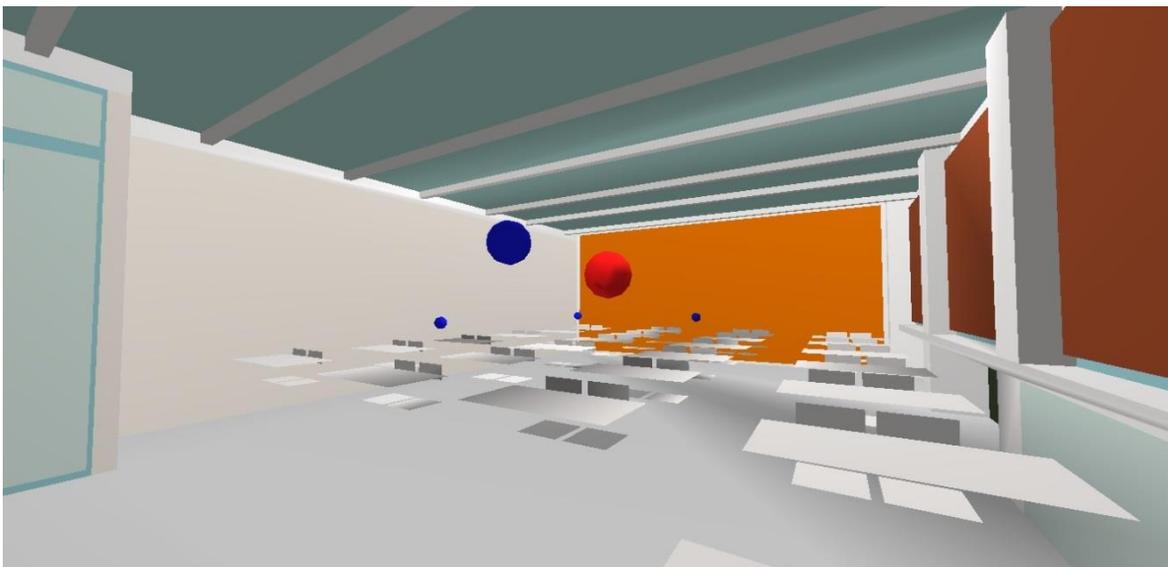


Figura 5.15. Salón F23 con las mejoras propuestas. La coloración indica la absorción acústica.

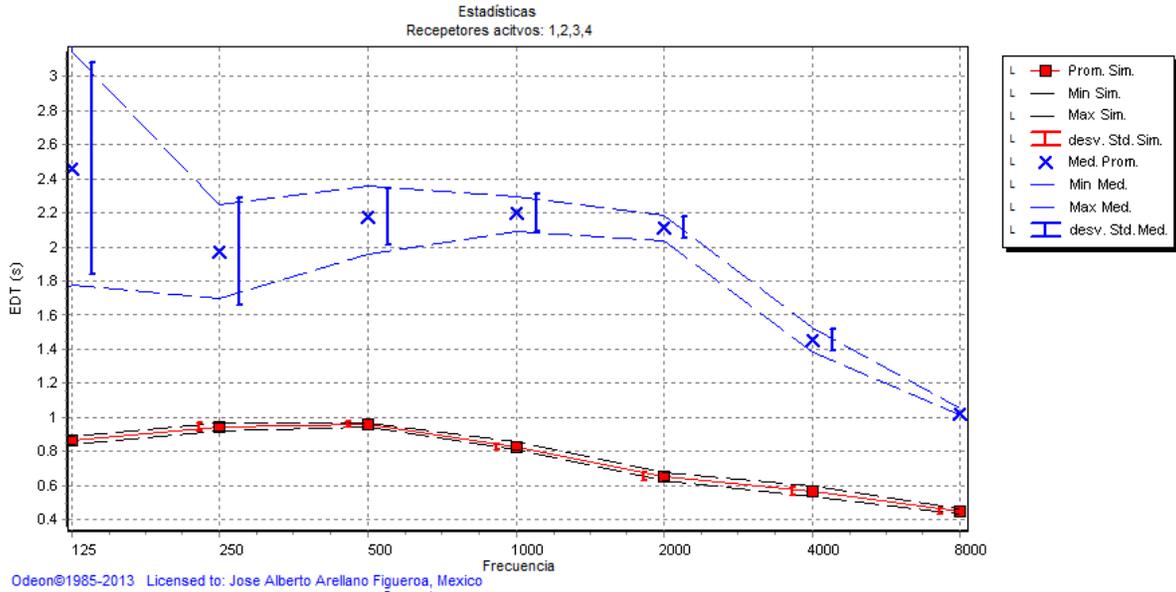


Figura 5.16. Gráfica del EDT. Salón F23, simulación con mejoras vs medido actuales.

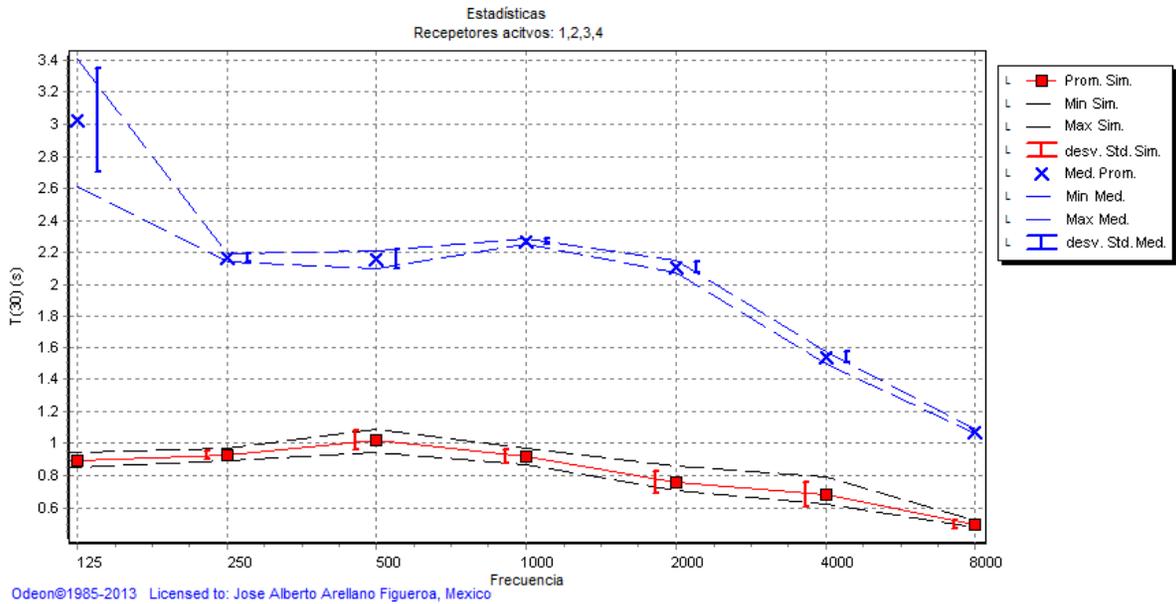


Figura 5.17. Gráfica del T₃₀. Salón F23, simulación con mejoras vs medidos actuales.

Si se analizan los valores obtenidos de la simulación, no cumple por 0.34 s (en la banda de 500 Hz), el valor recomendado por la norma, no obstante, es una buena aproximación y comparado con los valores actuales, se tendría una gran mejora. De manera didáctica se añade una segunda propuesta, debido a ser poco factible su realización porque se añade alfombra en el piso. La figura 5.18 muestra cómo quedaría con la adición de la alfombra junto con los anteriores materiales.



Figura 5.18. Salón F23 con el agregado de alfombra en piso.

Los parámetros de tiempo de reverberación para esta propuesta quedan de conformidad con la norma. Las gráficas, como en el caso anterior, muestran los parámetros de EDT y T_{30} comparados con los que se midieron en el salón (sin tratamiento), recuérdese que tanto en la simulación como en el recinto cada respuesta al impulso fue ubicada en el mismo lugar.

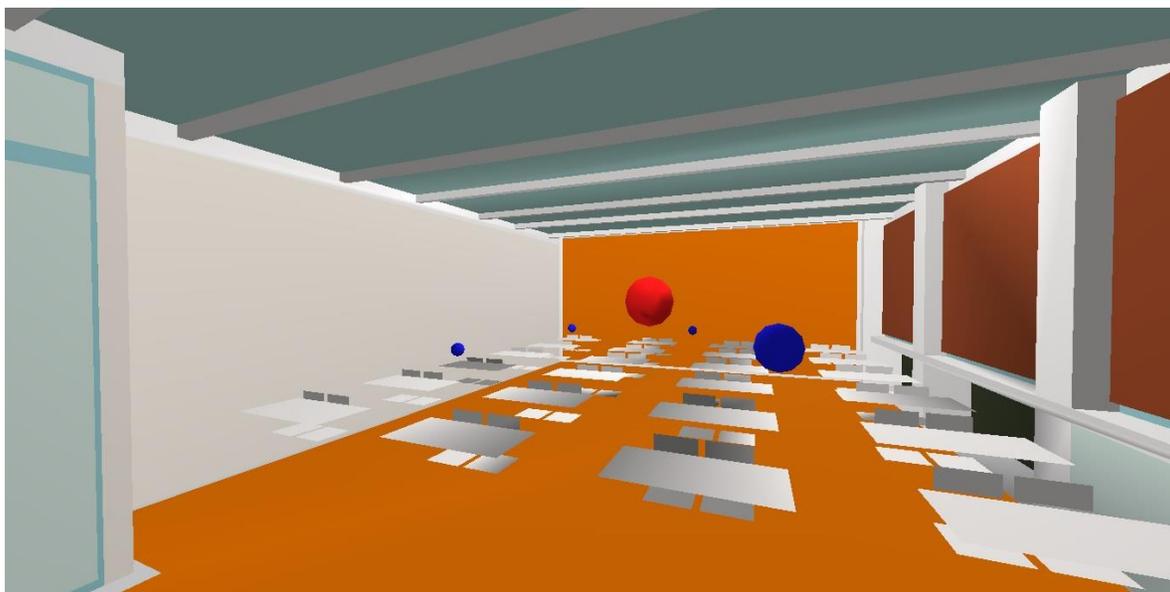
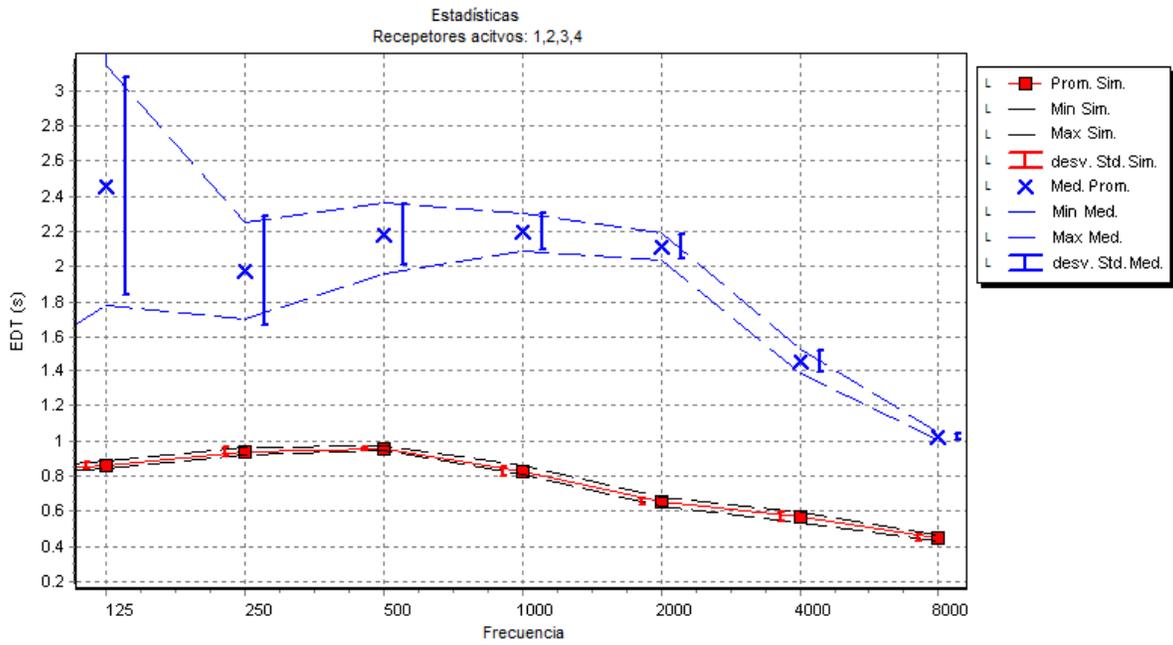
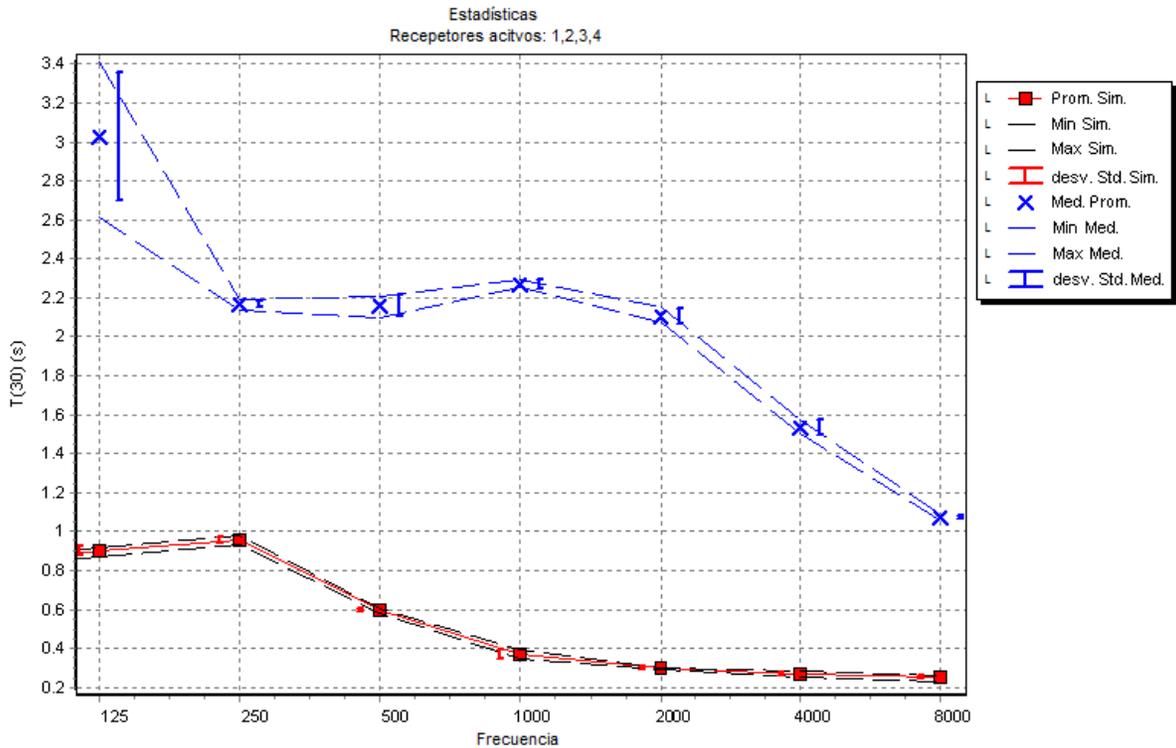


Figura 5.19. Salón F23 con el añadido de alfombrado al piso. La coloración indica la absorción acústica en analogía con la luz.



Odeon©1985-2013 Licensed to: Jose Alberto Arellano Figueroa, Mexico

Figura 5.20. EDT. Gráfica de valores obtenidos de la simulación comparados con los valores medidos actuales.



Odeon©1985-2013 Licensed to: Jose Alberto Arellano Figueroa, México

Figura 5.21. Gráfica del T_{30} , Simulación con agregado de alfombra en piso vs medidas actuales.

Salón A22

A continuación se muestran las gráficas de los parámetros EDT y T_{30} del salón A22. Nuevamente, se toman las propiedades de absorción para cada superficie, se coloca la fuente y los receptores en las mismas posiciones que las mediciones reales y se simula. Además también se muestran visualizaciones en 3D del salón donde la coloración indica la absorción, entre más oscuro sea, más absorbe y viceversa.

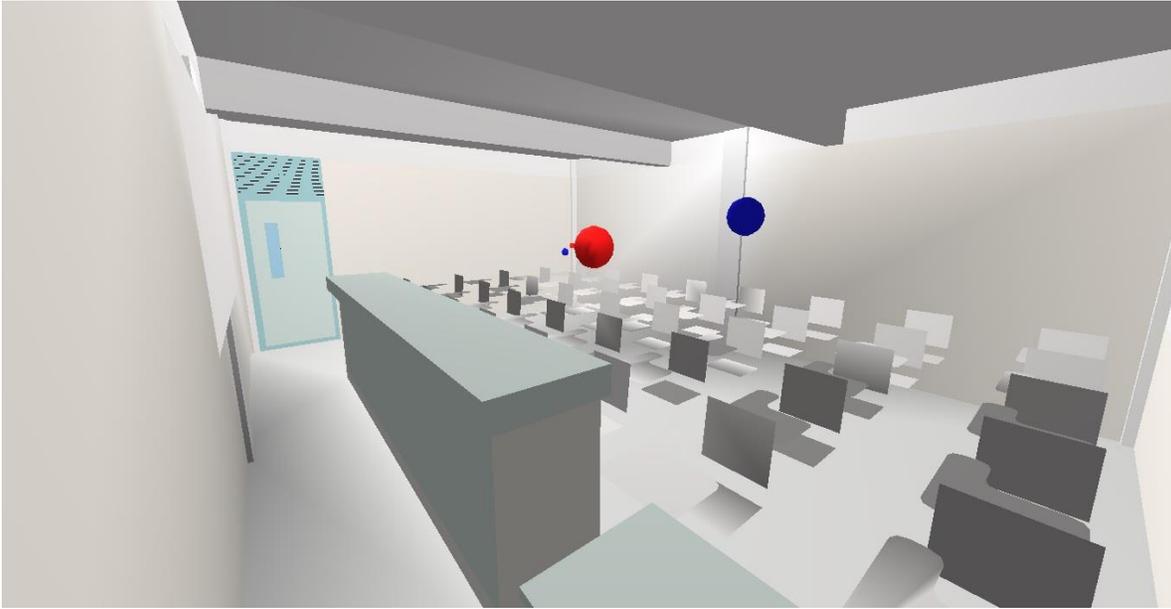


Figura 5.22. Salón A22. El color en cada superficie indica la absorción acústica (análogo a la luz).

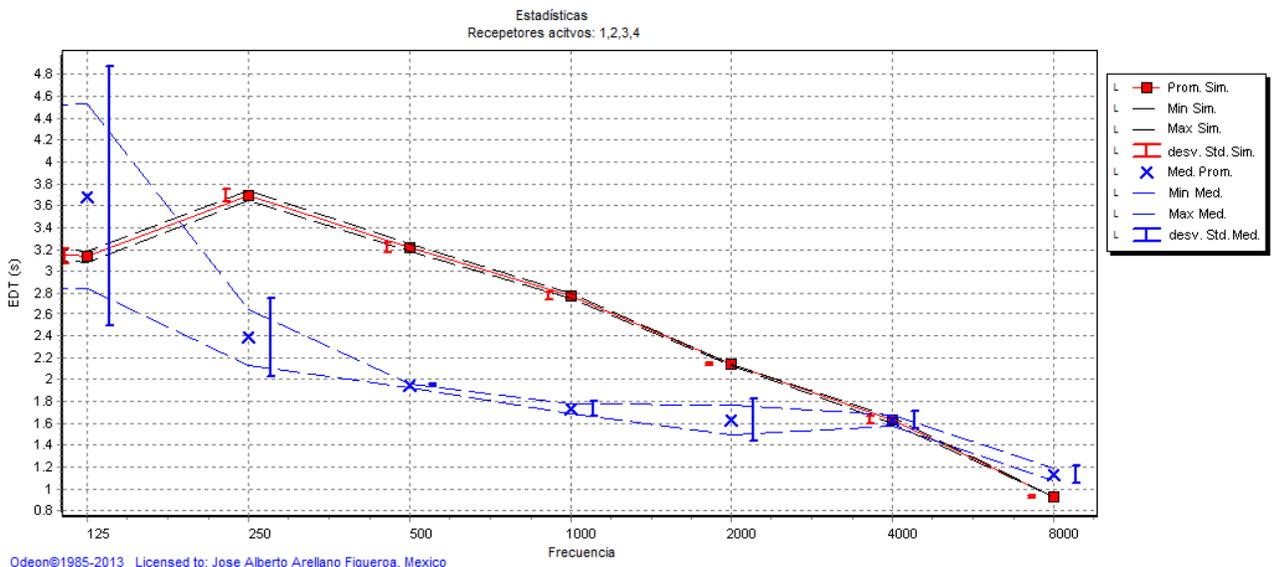


Figura 5.23. EDT del salón A22 simulado vs medido.

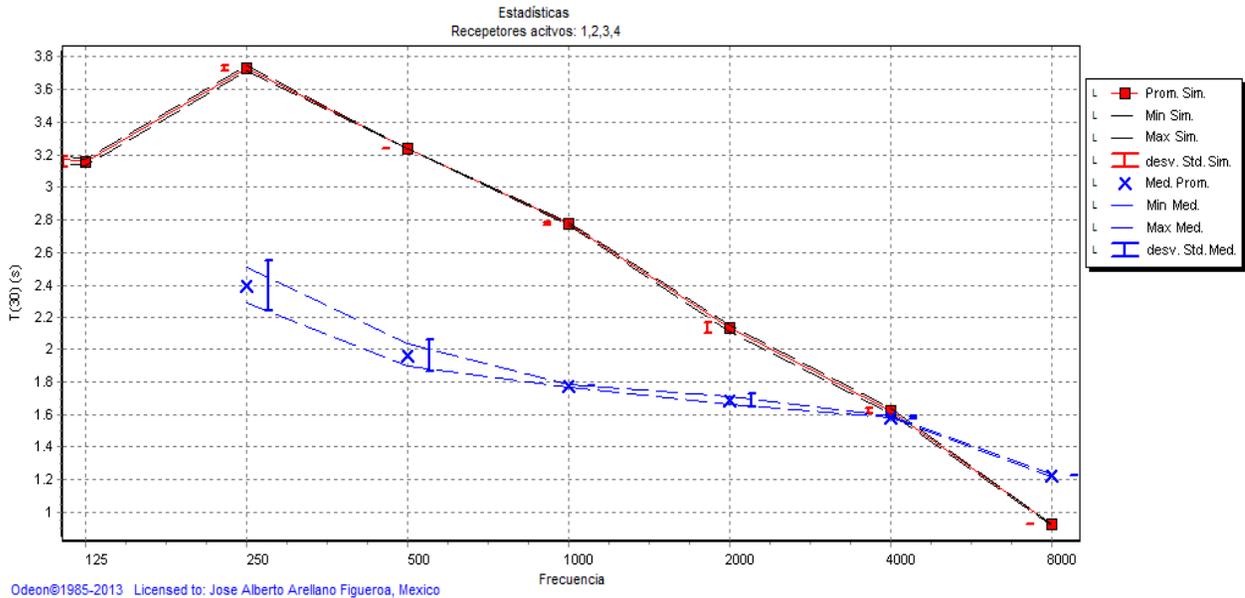


Figura 5.24. T_{30} del salón A22 medido vs simulado.

Propuesta de tratamiento acústico para salones del tipo A22

Los resultados simulados mostrados y comparados con los reales, comprueban que no está en conformidad con la norma y que excede por mucho en el tiempo de reverberación; para dar una respuesta se procede como en el caso del salón F23 el cual se basa en la misma tabla (tabla 5.2) para encontrar el área mínima requerida de material absorbente. El área de piso $S_p = 8 * 5.91 = 47.28 \text{ m}^2$, la altura es $H = 3 \text{ m}$ y el valor del coeficiente de absorción en la banda de 500 es $\alpha_1 = 0.65$ por tanto el área mínima requerida de material absorbente como porcentaje del área de piso es: $S_1 = 103\% * S_p = 48.69 \text{ m}^2$. El área total disponible en el techo es sólo de 44.7 m^2 , sin embargo se debe dejar un mínimo del 10% de esa área para la colocación de luminarias, cableado de proyectores entre otros, por tanto se reduce a 40 m^2 que apenas cubre un 84.6% de lo que se requiere; hace falta cubrir 18.4%, para ello se pretende agregar tratamiento con cortinas, su coeficiente de absorción en la banda de los 500 Hz es de $\alpha_1 = 0.39$ y como en el caso anterior se utiliza el valor mínimo que contiene la tabla ($\alpha_1 = 0.45$); por tanto el área mínima requerida es de 148% del área de piso, sin embargo, es del 18.4% restante, por tanto queda que: $S_2 = 1.48 * 0.184 * 48.69 \text{ m}^2 = 13.25 \text{ m}^2$; el área máxima disponible para colocar cortinas es de 13 m^2 lo que nos da el cumplimiento con la conformidad de la norma.

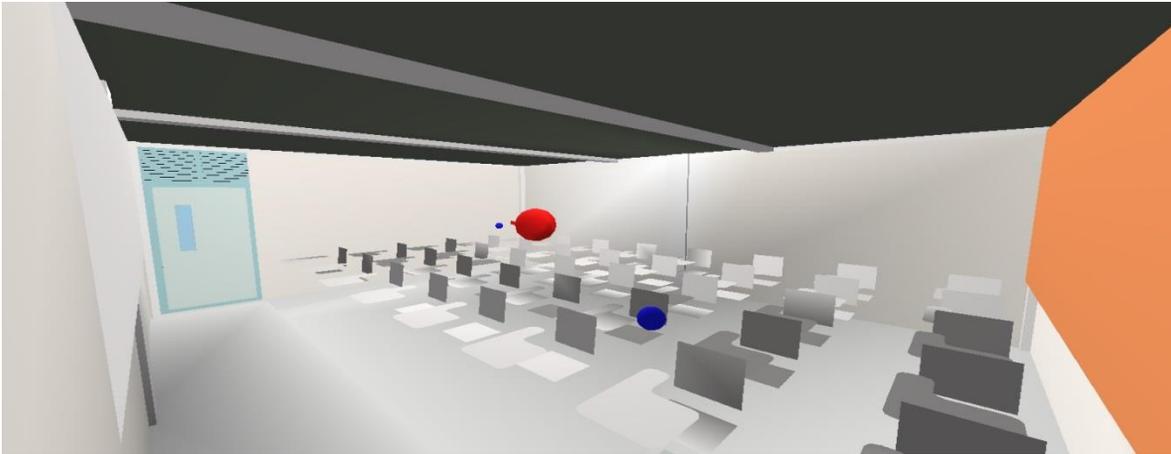


Figura 5.25.- Salón A22 con mejoras. El color en cada superficie indica la absorción acústica.

La colocación de los materiales se detalla a continuación: plafón acústico junto con la lana mineral a 30 cm debajo del techo, sobre el plafón ubicar las luminarias. Por último, cambiar las cortinas actuales por cortinas densas tejidas para ventana. En la tabla 5.4 se muestran sus especificaciones de coeficiente de absorción.

Tabla 5.4. Coeficientes de absorción de materiales propuestos para la adecuación del salón A22.

Material	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
lana mineral	0.7	0.7	0.45	0.65	0.6	0.75	0.65	0.65
plafón acústico	0.24	0.24	0.18	0.06	0.06	0.1	0.1	0.1
Cortinas	0.05	0.05	0.06	0.39	0.63	0.7	0.73	0.73

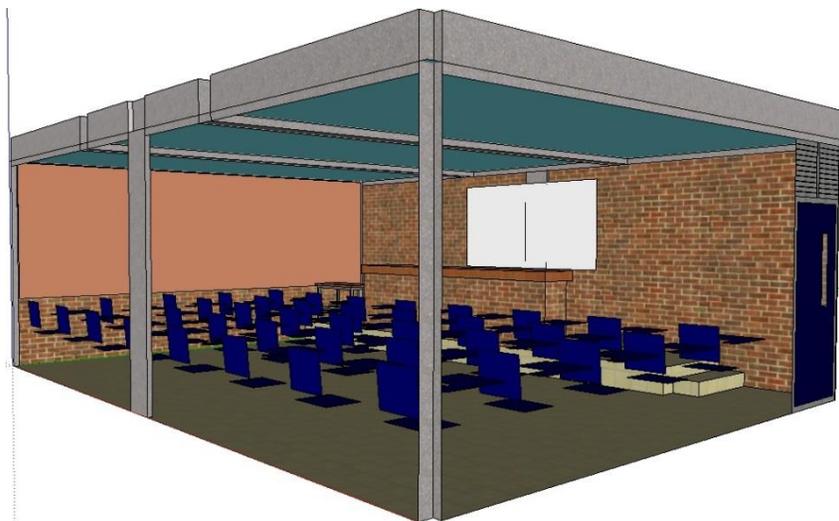


Figura 5.26. Salón A22 con las modificaciones propuestas, plafón acústico con lana mineral.

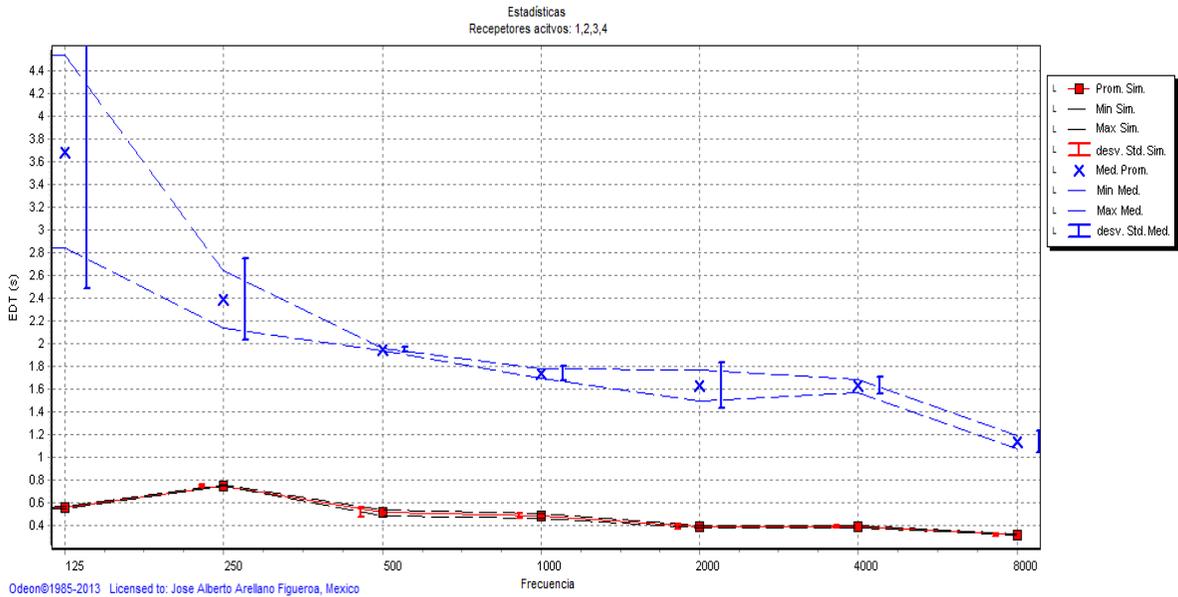


Figura 5.27. Gráfica del EDT del salón A22, simulación con mejoras vs medidas actuales.

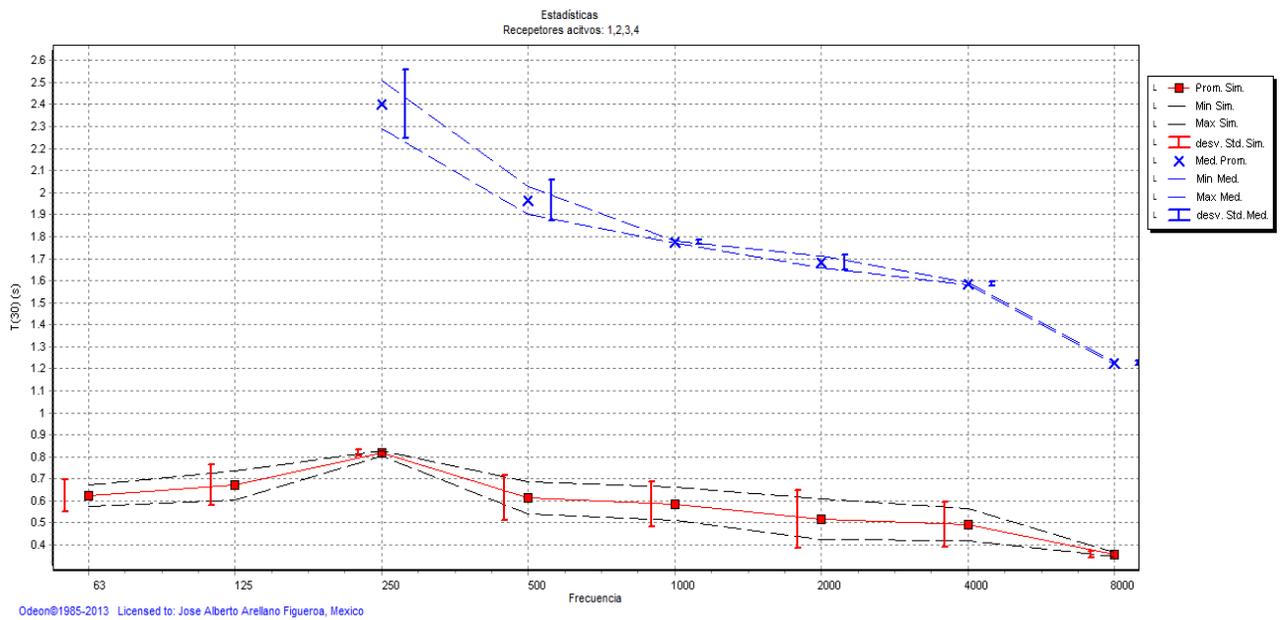


Figura 5.28. Gráfica del T_{30} , simulación con las mejoras propuestas vs las medidas actuales.

Las gráficas muestran que hay una considerable mejora en el tiempo de reverberación debido a la propuesta y queda en conformidad con la norma, sólo falta hacer la propuesta para mejorar el aislamiento acústico y que es parte del siguiente subtema.

Laboratorio B27

El siguiente salón de clases es un laboratorio, el cual tiene una diferencia con los dos anteriores, su volumen es mayor a 283 m^3 , por lo tanto se rige con otros valores recomendados en la norma y mostrados en la tabla 5.5. En las siguientes figuras se muestran sus parámetros de EDT y T_{30} y como en los casos anteriores, se crea el salón en *SketchUp* y se exporta a *Odeon* para obtenerlos.

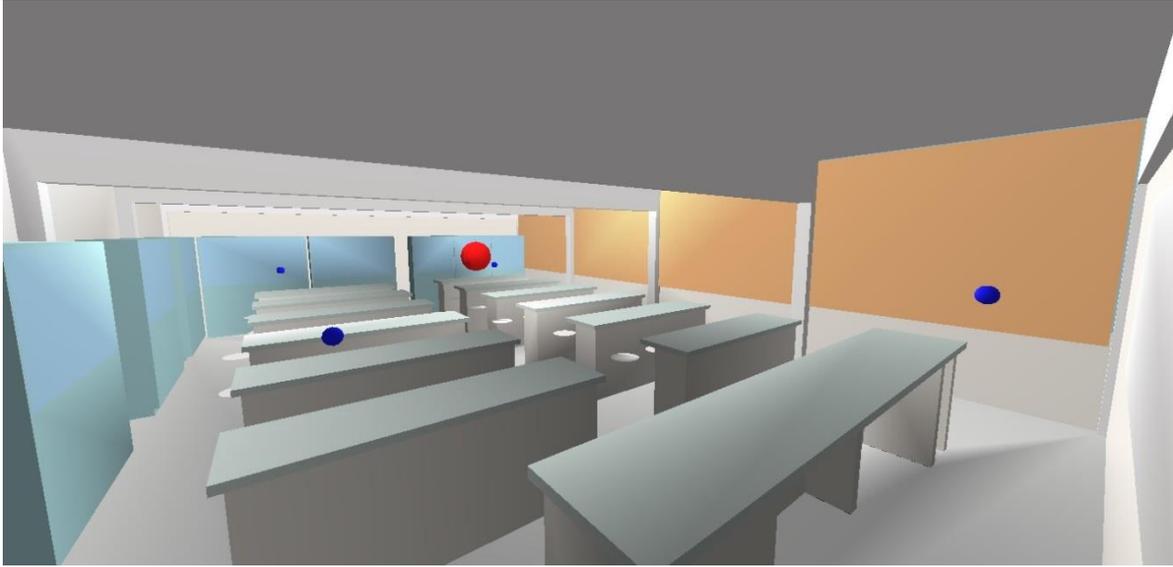


Figura 5.29. Salón B27. El color en cada superficie indica la absorción acústica.

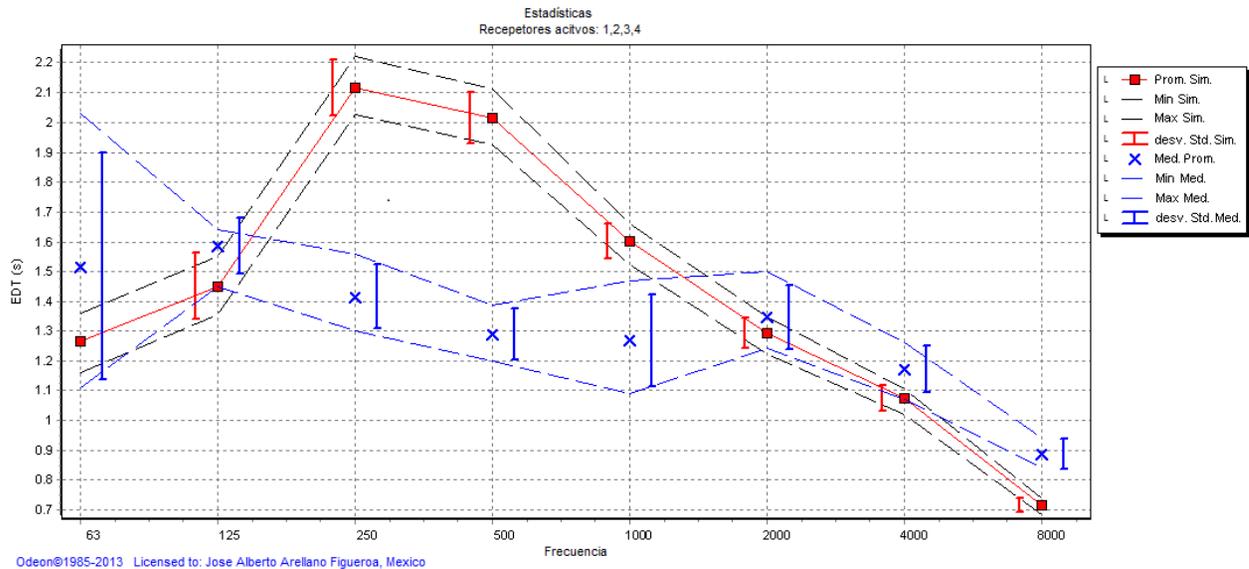


Figura 5.30. Gráfica del EDT del salón B27, simulación vs medidas actuales.

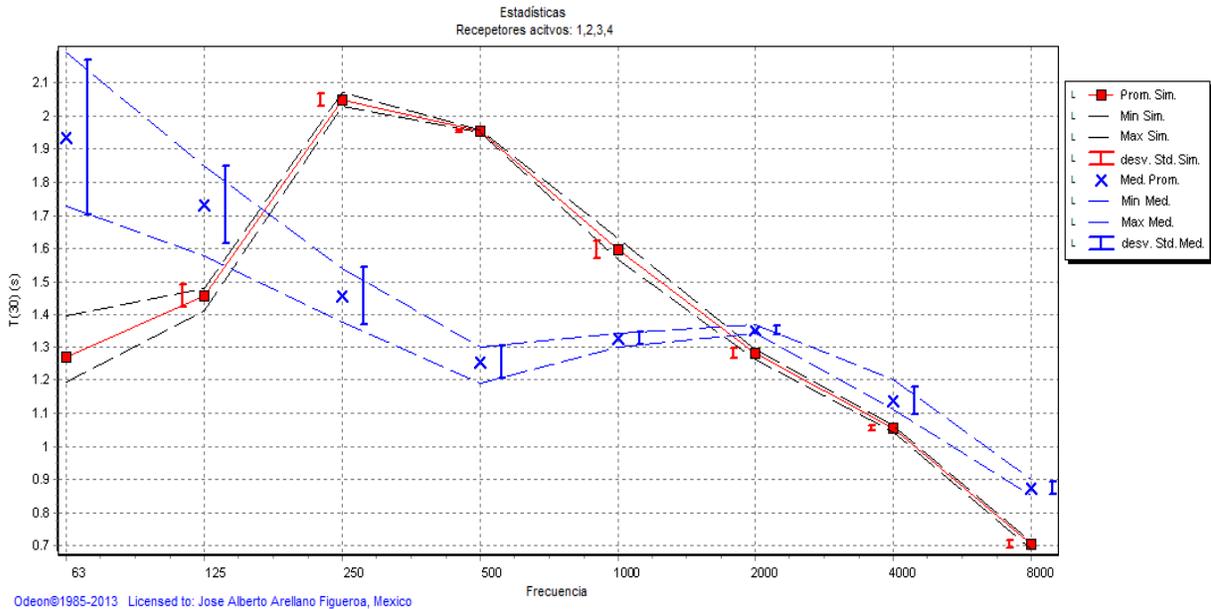


Figura 5.31. Gráfica del T_{30} del salón B27, simulación vs medidas actuales.

Tabla 5.5. Área mínima requerida de material absorbente para los distintos α_1 y un $T_{60} = 0.7s$

Coeficiente de absorción	Altura, H (m)								
	2.44	2.74	3.05	3.35	3.66	3.96	4.27	4.57	4.88
	Área mínima requerida como porcentaje del área de piso								
0.45	91	107	122	138	154	169	185	200	216
0.5	82	96	110	124	138	152	166	180	194
0.55	75	87	100	113	126	138	151	164	177
0.6	68	80	92	104	115	127	139	150	162
0.65	63	74	85	96	106	117	128	139	149
0.7	59	69	79	89	99	109	119	129	139
0.75	55	64	73	83	92	102	111	120	130
0.8	51	60	69	78	86	95	104	113	121
0.85	48	57	65	73	81	90	98	106	114
0.9	46	53	61	69	77	85	92	100	108
0.95	43	51	58	65	73	80	88	95	102
1	41	48	55	62	69	76	83	90	97

Propuesta de tratamiento acústico para salones del tipo B27

Al igual que en los casos anteriores, los resultados simulados y comparados con los reales, comprueban que no está en conformidad con la norma y que excede por mucho en el tiempo de reverberación. Para dar respuesta a este problema se propone encontrar el área mínima requerida

de material absorbente, mediante los valores proporcionados por la tabla 5.5. El área de piso $S_p = 11.07 * 8.71 = 96.42 \text{ m}^2$, la altura es $H = 3.21 \text{ m}$ y el valor del coeficiente de absorción en la banda de 500 es $\alpha_1 = 0.65$ por tanto el área mínima requerida de material absorbente como porcentaje del área de piso es $S_1 = 96\% * S_p = 92.56 \text{ m}^2$. El área total disponible en el techo es sólo de 90 m^2 , sin embargo las luminarias ocupan alrededor de 7 m^2 y al considerar modificaciones futuras se deja un espacio adicional de 3 m^2 (para cableado de proyectores entre otras cosas), por tanto se reduce a 80 m^2 que apenas cubre un 83% del 96% requerido; hace falta cubrir 13%, para ello se pretende agregar tratamiento con cortinas, su coeficiente de absorción en la banda de los 500 Hz es de $\alpha_1 = 0.39$ y como en el caso anterior se utiliza el valor mínimo que contiene la tabla ($\alpha_1 = 0.45$); por tanto el área mínima requerida es de 138% del área de piso, sin embargo, es del 13% restante, por tanto queda que: $S_2 = 1.38 * 0.13 * 92.56 \text{ m}^2 = 16.6 \text{ m}^2$; el área máxima disponible para colocar cortinas es de 28.6 m^2 , sin embargo lo ideal es un área de 23.2 m^2 porque cumple con la conformidad de la norma y da una estética al laboratorio, cosa que no se logra si se ponen exactamente los 16.6 m^2 .

Una colocación de materiales sería: plafón acústico junto con la lana mineral a 30 cm debajo del techo, sobre el plafón ubicar las luminarias y cambiar las cortinas actuales por unas de tejido denso. Los coeficientes de absorción para cada material utilizado es el mismo que en los anteriores casos.

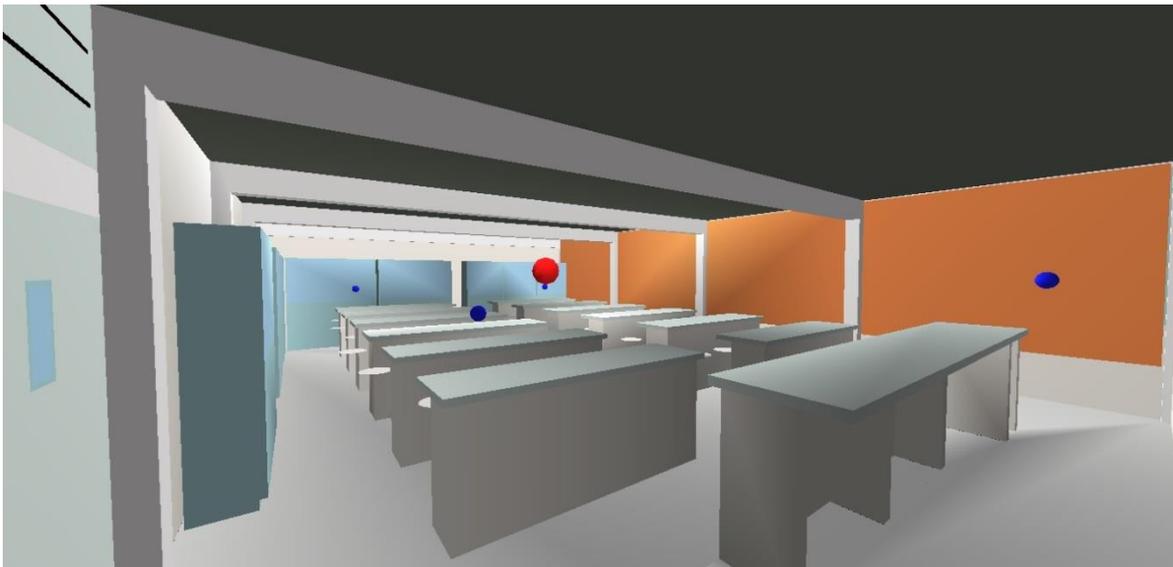


Figura 5.32. Salón B27 con mejoras. El color en cada superficie indica absorción acústica.

Tabla 5.6. Coeficientes de absorción de materiales propuestos para la adecuación del Salón B27.

Material	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz
lana mineral	0.7	0.7	0.45	0.65	0.6	0.75	0.65	0.65
plafón acústico	0.24	0.24	0.18	0.06	0.06	0.1	0.1	0.1
Cortinas	0.05	0.05	0.06	0.39	0.63	0.7	0.73	0.73



Figura 5.33. Salón B27 con las mejoras propuestas (plafón acústico con lana mineral y cortinas).

A continuación se muestran las gráficas del EDT y T_{30} con las modificaciones propuestas:

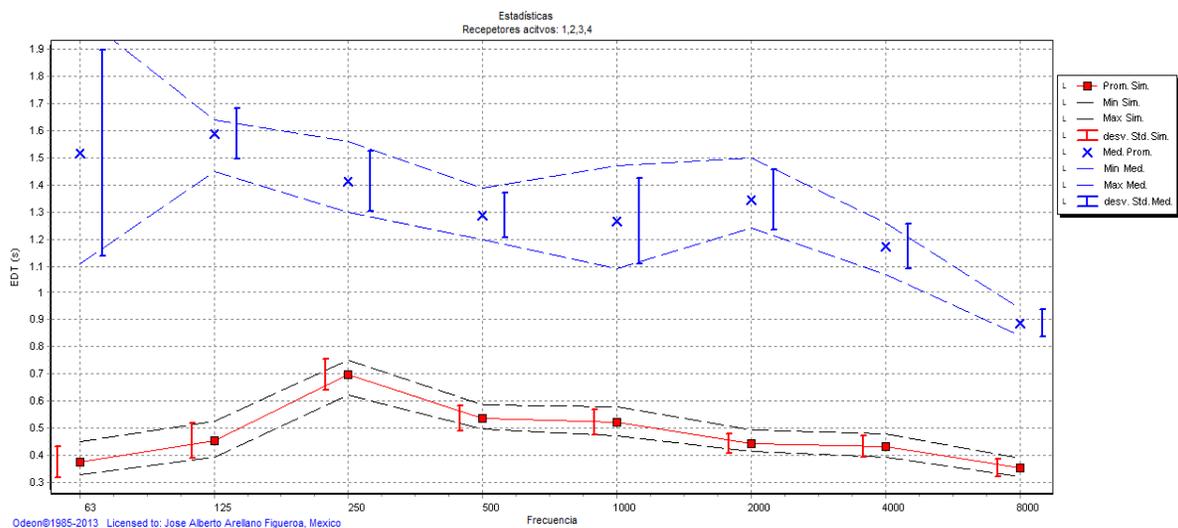


Figura 5.34. Gráfica del EDT . Comparación de valores simulados con propuesta y medidos actuales.

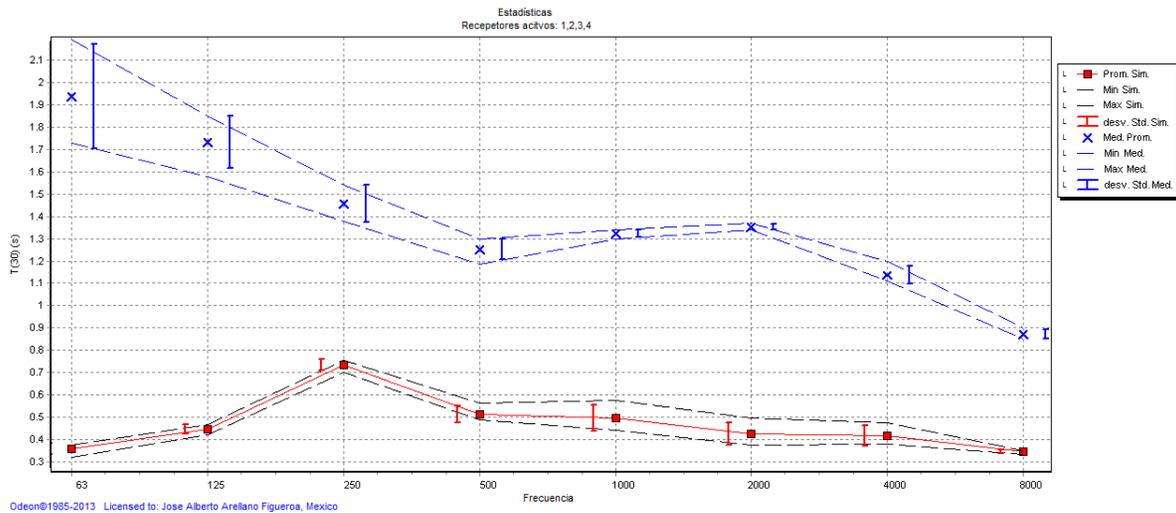


Figura 5.35. Gráfica del T_{30} . Simulado con mejoras propuestas vs los medidos actualmente.

En las gráficas de los valores obtenidos en la simulación con las mejoras propuestas puede comprobarse que, mediante las recomendaciones de la norma en lo referente al tiempo de reverberación y los programas de simulación, se tiene una visión de cómo tratar los salones para mejorar las condiciones acústicas.

5.2. Propuestas de aislamiento acústico del ruido exterior en las áreas problemáticas

El subtema anterior se trata únicamente sobre el mejoramiento del tiempo de reverberación del recinto, mediante la reducción del volumen y superficies altamente reflejantes al colocar material absorbente, de tal forma que el tiempo de reverberación se adecue a lo recomendado por la norma. Aunque esto es un gran avance, si el ruido de fondo es excesivo, no habrá una buena relación señal a ruido y habrá afectación a la inteligibilidad del habla. Para una clase en la que se requiere de concentración en lo que dice el orador, niveles de ruido de fondo que estén alrededor de los 60 dBA, puede ser un ruido molesto que interfiere con dicha actividad. La norma recomienda que los niveles máximos permitidos presentes en un plantel escolar estén en los 35 dBA, mostrados en la tabla 5.1. Al final de la tabla 4.1, se encuentran los niveles de ruido de fondo en el salón F23, los cuales se encuentran alrededor de los 70 dBA en los casos con puertas y ventanas abiertas y cerradas, donde sólo hay 3 dBA de diferencia entre ambos casos.

Tabla 5.7. Fragmento de la tabla 4.1.

Muestras de Ruido de la prepa	Leq dBA	Leq dBA Sonómetro
Ruido F23 puerta abierta canal L 11:00 am	71.69	71.58
Ruido F23 puerta abierta canal R 11:00 am	71.63	
Ruido F23 puerta cerrada canal L 10:45 am	68.08	67.65
Ruido F23 puerta cerrada canal R 10:45 am	68.84	

Si se considera que el nivel de presión sonora que emite un orador (hombre) a la distancia de 1m, es aproximadamente 58 dBA (ver tabla 5.8), entonces el ruido de fondo enmascara a la señal de voz emitida y obliga al orador elevar el nivel para que pueda escucharse, si además de esto se le añade el problema de alta reverberación hace que sea menos inteligible. Puede observarse en la gráfica de la figura 5.36, la interacción de la relación habla a ruido y el tiempo de reverberación en el porcentaje de inteligibilidad del habla.

Por ejemplo, si se toman en cuenta los valores de la tabla 5.8 vemos que el esfuerzo vocal elevado para un hombre es de 65 dBA y si tomamos el valor de ruido de fondo a puerta cerrada que es de 68 dBA, se tiene una relación señal a ruido de -3 dB y si consideramos que el tiempo de reverberación en ese salón a la frecuencia de 500 Hz es de 2.1 s, entonces el porcentaje de inteligibilidad será menor al 20%.

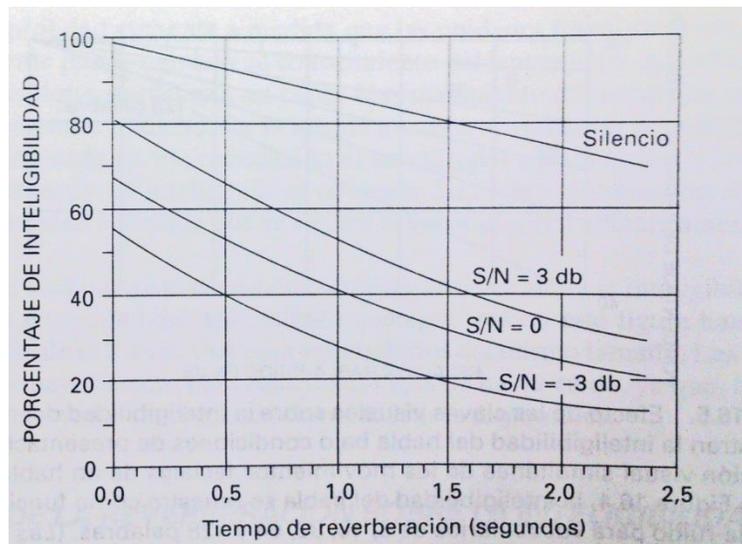


Figura 5.36. Porcentaje de inteligibilidad en función de la relación señal a ruido y el tiempo de reverberación.

Tabla 5.8. Niveles sonoros en ponderación A, a un metro de distancia del escucha.

Esfuerzo Vocal	Hombre, (dBA)	Mujer, (dBA)
Casual	53	50
Normal	58	55
Elevado	65	62
Alto	75	71
A gritos	88	82

Un tiempo de reverberación excesivo y exponerse a largos periodos de altos niveles de ruido de fondo, producidos por el tránsito vehicular y demasiado ruido generado por los alumnos en las áreas comunes (pasillos, patios, entre otros) y que es un problema común en la E.N.P. plantel 5, provoca, según la Organización Mundial de la Salud y la documentación de Estrada, daño auditivo acumulativo, irritabilidad, bajo rendimiento, alteraciones del sueño, padecimientos cardiovasculares como la hipertensión entre otros.

5.2.1. Aislamiento Acústico de los alrededores

Como propuesta de aislamiento acústico en los alrededores de las instalaciones se tiene lo siguiente:

Utilizar árboles de grueso follaje como barrera acústica es muy útil, tiene como beneficios a que en bajas frecuencias hay un incremento en la atenuación sonora del suelo debido a que las raíces hacen a la tierra más porosa. Para las altas frecuencias las dimensiones de las hojas son comparables con la longitud de onda y causa una atenuación significativa debido a la dispersión. En la actualidad, en la zona que da Calzada del hueso existen pocos árboles y su follaje es delgado, por tanto, una opción es plantar más pero con la restricción respecto a su follaje, deber ser grueso, para que las especificaciones anteriores se logren. Estos árboles pueden ser del tipo hule (*Ficus elastica*) y encino (*Quercus ilex*).



Figura 5.37. Actual situación en la E.N.P. plantel 5, donde no existe un aislamiento adecuado del ruido exterior.

Como lo podemos observar en la figura 5.37 la cual es un bosquejo del área donde más influencia del ruido exterior se tiene al estar a escasos 12 m de la avenida calzada del hueso y 5 m de la calle Guadalupe en donde solo existe una reja entre el edificio y la calle. Si a este problema se le añade el ruido ocasionado por los alumnos que no tienen clase o que están fuera de su salón se, tienen niveles de ruido de fondo muy elevados que complican la impartición de clases.



Figura 5.38. Propuesta de aislamiento acústico para problemas de ruido exterior.

Como se observa, existe una diferencia notoria entre ambas imágenes, al colocarse árboles de grueso follaje actuarán de barrera acústica contra el ruido proveniente de los alrededores siendo el principal cometido, también se contribuye al medio ambiente ya que habrá más vegetación que capte el CO₂ emitido por los automóviles que transiten en esos alrededores. Sin embargo esta medida solo aísla del ruido exterior, para el ruido interior, en el siguiente subtema se menciona la propuesta.

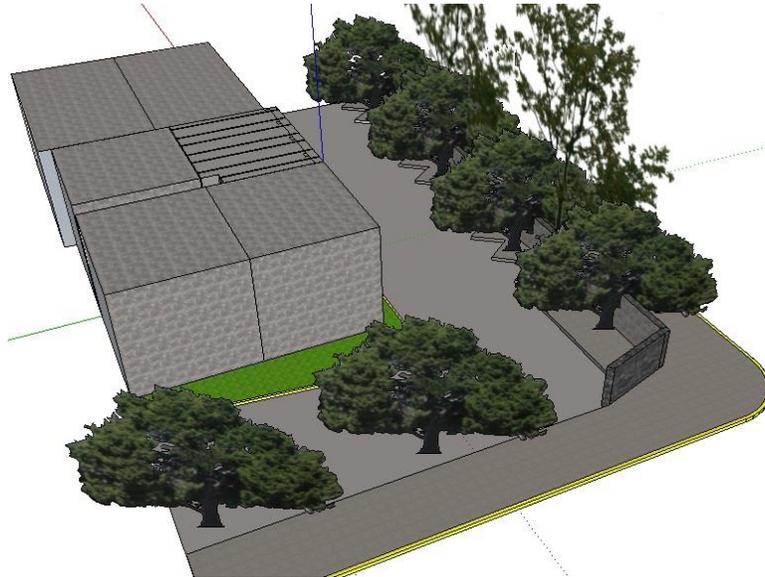


Figura 5.39. Bosquejo con posible ubicación de los árboles para el aislamiento.

5.2.2. Aislamiento acústico de puertas

Cualquier salón de un recinto escolar debe estar diseñado de tal modo que al cerrar las puertas y ventanas exista aislamiento acústico para disminuir el ruido de fondo a niveles adecuados y que son los recomendados en la norma. Un buen estado de aislamiento en puertas, significa que no debe existir rendija alguna, tanto en la puerta como en la unión marco-puerta y en casos muy poco comunes entre marco y muro; en cuanto a las ventanas estas deben cerrar de manera hermética o emplear el relleno de marcos para aumentar el aislamiento y, los vidrios deben ser de un espesor mínimo de 3mm.

El aislamiento acústico de una puerta depende del conjunto y disposición de los materiales, existen dos formas sencillas de evaluar su aislamiento que dependerán de la disposición y cantidad de materiales, por ejemplo, para puertas macizas, metálicas o de madera y

laminadas, estará en función de la cantidad de masa por unidad de superficie M que contenga dicha puerta y la formula es:

$$R = 16.61 \log M - 8 \text{ [dBA]} \quad 5.2.1$$

En las puertas de madera con laminados blandos, cartón, fibras minerales o vegetales montados sin unión rígida entre láminas y que incluyen capas de material absorbente amortiguador, su índice de reducción quedará en función de su masa por unidad de superficie M dada en kg/m^2 :

$$R = 16.61 \log M + 2 \text{ [dBA]} \quad 5.2.2$$

Lo que influye a la disminución del aislamiento acústico en puertas es el material con el que se hacen y el método de construcción, es decir, si la puerta presenta grietas alrededor del marco existirá este detrimento. Si estas son selladas habrá una ganancia de 5 a 7dB en el aislamiento acústico.

Con esta información se puede dar una solución al problema acaecido en cada puerta de los salones del plantel escolar, como se muestra en la figura 5.40, la mayoría de estas presentan el problema de grietas y aberturas en el marco-puerta y, marco-pared; para ello se propone el uso de juntas de estanqueidad o conocidos aquí como empaques y son piezas de material como silicona o neopreno entre otros y son fácilmente adaptables entre las superficies a unir para lograr el aislamiento.



Figura 5.40. Mal aislamiento acústico en puertas de los tres tipos de salones.

5.2.3. Aislamiento acústico de ventanas

Puertas y ventanas son los elementos de las paredes que tienen un pésimo aislamiento acústico, sin embargo las ventanas son aún más debido a su peso comparativamente bajo y en la mayoría de las veces no cierran herméticamente. Para compensar ello lo que se propone es poner ventanas con doble vidrio de 6 y 3mm de espesor para los marcos exteriores e interiores respectivamente. Con ventanas de este tipo se obtienen un aislamiento de hasta 33dB. La reducción sonora no sólo es por parte del doble vidriado, el espacio que está entre ellos tiene influencia en el aislamiento. Mediante la experimentación se llegó que el pequeño aumento adicional de reducción sonora debido al espaciamiento entre vidrios llegó a su máximo valor en los 20mm. Las siguientes figuras muestran la sección transversal de una doble ventana y las curvas de reducción sonora de distintos grosores de espaciamiento entre vidriado respecto a su frecuencia, la curva 3 y 4 muestran un cambio no significativo entre ellas por lo que demuestra que el máximo espesor es de 20mm.

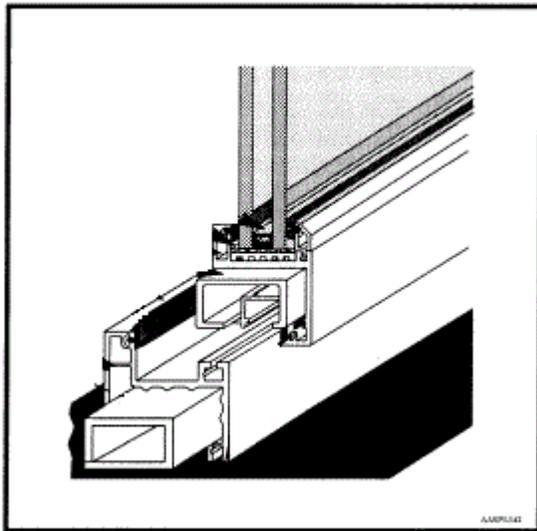


Figura 5.41. Sección de una ventana doblemente vidriada

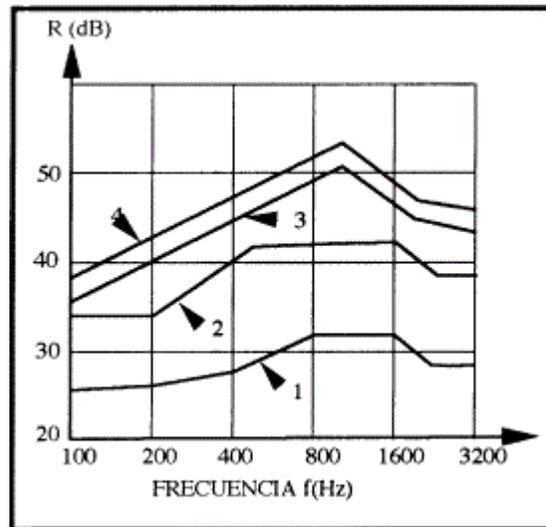


Figura 5.42. Gráfica de aislamiento acústico para ventanas doblemente vidriadas con distintos grosores de espaciamiento.

Conclusiones, recomendaciones y mejoras a la propuesta

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, la inteligibilidad del habla en un salón de clases es primordial, los principales factores que influyen en ella son el tiempo de reverberación y ruido de fondo los cuales fueron medidos y analizados y da como resultado, pésimas condiciones. En la mayoría de los casos, este problema se ve de manera superficial y hasta con un tono de burla, sin embargo salones con carencias en su rendimiento acústico pueden desatar problemas graves tanto al orador como al escucha; el mal entendimiento de la clase puede acarrear problemas de comprensión al alumno y con ello problemas de autoestima, se sentirá inferior a sus compañeros al no entender el tema y puede llevarlo a problemas de aislamiento junto a otros más graves. En cuanto al profesor, altos niveles de ruido y reverberación en el salón atrae problemas de salud como el deterioro temprano de la voz y problemas cardiovasculares como lo menciona la OMS; estos se complican conforme el profesor sea de edad mayor.

En consecuencia a lo anterior, las soluciones aquí expuestas dan una respuesta a las malas condiciones acústicas. Los procedimientos son aplicables a cualquier recinto escolar con este tipo de deficiencias, al tener sustento y cumplimiento satisfactorio con la conformidad de la norma ANSI/ASA S12.60-2010/PART1. Estas medidas fueron seleccionadas de manera minuciosa con la consideración del costo-beneficio para su implementación, es obvio que no será un costo pequeño, cualquier tratamiento acústico es caro, sin embargo se pensó con ese objetivo: una propuesta viable de tal manera que cuando se realice el costo de los materiales, sea razonable.

Toda propuesta que se emita tiende a ser mejorada y en cuanto a la parte del acondicionamiento acústico para el control de la reverberación se puede mencionar que para el caso de los salones F23 en los que posee mucho espacio en el techo, en lugar de utilizar una sola placa de 5 cm de espesor de lana mineral a 30 cm del techo, rellenar esos 30 cm de lana mineral ya que la absorción aumenta con el espesor y que la frecuencia en la que empieza a absorber, disminuye. El plafón acústico puede cambiarse por uno con un índice de reducción menor para que la lana mineral absorba mucho más energía. Otra mejora puede ser el programa de obtención de niveles de ruido de fondo, en el que pueda reconocer todo los tipos de archivo de los sonómetros existentes que tengan esta cualidad.

Aunque hay una gran cantidad de precedentes, Cabe mencionar que la realización de este trabajo tuvo sus complicaciones, desde lo más simple cómo seleccionar el tipo de material para la

construcción de la fuente omnidireccional, el tipo de bocinas, el software de simulación y obtención de parámetros, hasta lo más difícil, como ajustar, descartar o compensar las limitantes de cada parte de la instrumentación o programa de computación utilizada; otra parte fue el descubrimiento de errores cometidos y que se pudieron solucionar durante la realización, uno de ellos fue durante las primeras grabaciones de ruido de fondo, al cotejar el nivel equivalente que se obtuvo con el programa de Matlab en cada muestra, al realizar lo mismo con el analizador de espectros, dieron resultados distintos aún al ajustar la sensibilidad del analizador mediante la reproducción del tono de calibración grabado para cada muestra, estas diferencias fueron por no utilizar la misma tarjeta de audio con las que se grabaron (interfaz de audio por USB Tascam US-122), sino que se utilizó la tarjeta de sonido de la computadora, no obstante, al hacerse la prueba de medir y analizar a través de la misma interface, los niveles equivalentes obtenidos en este, coincidieron perfectamente con los obtenidos en el programa de Matlab de la grabación y el sonómetro. Por tanto se debe ser muy cuidadoso y minucioso en cada paso que se da para tener resultados confiables y dar soluciones confiables.

Anexos

7. Anexos

Este capítulo concierne sobre todo aquello que contribuyó a la realización de la tesis pero que no es propiamente el tema principal. Además de que los procedimientos aquí descritos son uno de muchas formas en que se puede realizar.

7.1. Anexo referente al capítulo 3

7.1.1. Códigos en Matlab de las mediciones en la cámara reverberante

El siguiente código en Matlab, muestra el espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional de las mediciones en la cámara reverberante; los datos los obtiene de archivos de Excel.

```
%Espectro en frecuencia de la fuente omni-direccional en la cámara
%reverberante por posiciones y micrófonos
clear
clc
[mic,posc] = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','A2:V13');
frecs = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B15:V26');

[prom_mic,poscs] = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','A29:V31');
frecs1 = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B15:V17');

[mics,prom_posc] = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','A33:V33');
frecs2 = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B1:V1');

%Gráficas
for l=1:12
    figure(l)
    if rem(l,2)==0
        stairs(frecs(l,:),mic(l,:), 'b', 'LineWidth',2.5);

set(gca, 'fontsize',12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98,0
.97,0.97], 'LineWidth',1.5)
        legend(posc(l), 'Location', 'South');
        xlabel('Frecuencia [Hz]');
        ylabel('Magnitud [dBA]');
        title('Espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional
sonora');
        grid on;

    else
        stairs(frecs(l,:),mic(l,:), 'r', 'LineWidth',2.5);
```

```

set(gca, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98, 0
.97, 0.97], 'LineWidth', 1.5);
    legend(posc(1), 'Location', 'South');
    xlabel('Frecuencia [Hz]');
    ylabel('decibeles [dBA]');
    title('Espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional
sonora');
    grid on;
end
f = [100 250 500 1000 2500 5000 10000];

set(gca, 'xtick', f, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'GridLineStyle', ':')
;
end

for k=1:3
    figure(k+12)
    stairs(freecs1(k,:), prom_mic(k,:), 'm', 'LineWidth', 2.5);

set(gca, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98, 0
.97, 0.97], 'LineWidth', 1.5);
    legend(poscs(k), 'Location', 'South');
    xlabel('Frecuencia [Hz]');
    ylabel('Magnitud [dBA]');
    title('Espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional sonora
(promedio por micrófonos)');
    f = [100 250 500 1000 2500 5000 10000];

set(gca, 'xtick', f, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'GridLineStyle', ':')
;
    grid on;
end

figure
stairs(freecs2, mics, 'g', 'LineWidth', 2.5)
set(gca, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98, 0
.97, 0.97], 'LineWidth', 1.5)
legend(prom_posc, 'Location', 'South');
xlabel('Frecuencia [Hz]');
ylabel('Magnitud [dBA]');
title('Espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional sonora
(promedio por micrófonos y posiciones)');
f = [100 250 500 1000 2500 5000 10000];
set(gca, 'xtick', f, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'GridLineStyle', ':')
;
grid on;

```

El código en Matlab que se muestra a continuación fue usado para obtener y mostrar la media y desviación estándar de las mediciones realizadas en la cámara reverberante al importar archivos en Excel.

P%rograma que obtiene en tres figuras el promedio de los niveles de presion
%sonora en frecuencias de 1/3 de octava respecto a las posiciones y a los
%micrófonos y su desviación estandar.

```
clear %limpiado de espacio de trabajo
clc %limpiado de ventana de comandos

mic = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B2:V13');
frecs = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B15:V26');
% se manda a llamar el archivo de excel "omni-datos.xlsx en distintas
para
% distintas celdas
[prom_mic,poscs] = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','A29:V31');
frecs1 = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B15:V17');

[mics,prom_posc] = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','A33:V33');
frecs2 = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B1:V1');

Desv_est = xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni-datos.xlsx','B14:V14');

figure;
grid on;
hold on;

for k=1:4;
    if k==1;
        stairs(frecs1(k,:),prom_mic(k,:), 'm', 'LineWidth', 2.5);

    elseif k==2;
        stairs(frecs1(k,:),prom_mic(k,:), 'c', 'LineWidth', 2.5);

    elseif k==3;
        stairs(frecs1(k,:),prom_mic(k,:), 'b', 'LineWidth', 2.5);
    else
        stairs(frecs2,mics, 'g', 'LineWidth', 2.5);
    end

set(gca, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98, 0
.97, 0.97], 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Frecuencia [Hz]');
ylabel('Magnitud [dBA]');
title('Espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional sonora');
legend('Promedio en micrófono 1er posición', 'Promedio en micrófono
2da posición', 'Promedio en micrófono 3er posición', ...
'Promedio Total (micrófonos y posiciones)', 'Location', 'South');
f = [100 200 500 1000 3000 5000 10000];
```

```

set(gca, 'xtick', f, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'GridLineStyle', ':')
;

end
hold off;

figure;
hold on;
for l=1:12;

    stairs(frecs(l,:), mic(l,:), 'b', 'LineWidth', 2.5);
for k=1:3;
    stairs(frecs1(k,:), prom_mic(k,:), 'm', 'LineWidth', 2.5);
    stairs(frecs2, mics, 'g', 'LineWidth', 2.5);
end

set(gca, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98, 0
.97, 0.97], 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Frecuencia [Hz]');
ylabel('Magnitud [dB]', 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri');
title('Espectro en frecuencia de la fuente omnidireccional sonora');
legend('Por micrófono en cada posición', 'Promedio en micrófonos por
posición', ...
    'Promedio Total (en micrófonos y
posiciones)', 'Location', 'South');
f = [100 200 500 1000 3000 5000 10000];

set(gca, 'xtick', f, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'GridLineStyle', ':')
;
grid on;
end
hold off;

figure;
plot(frecs2, Desv_est, 'LineWidth', 2.5);
grid on;
set(gca, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'XScale', 'log', 'Color', [0.98, 0
.97, 0.97], 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Frecuencia [Hz]');
ylabel('Magnitud [dB]', 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri');
title('Desviación Estandar respecto a la frecuencia de la fuente
omnidireccional sonora');

f = [100 300 500 1000 3000 5000 10000];
axis([100 10000 -0 3]);
ampl = 0:0.5:3;
set(gca, 'xtick', f, 'ytick', ampl, 'fontsize', 12, 'fontname', 'calibri', 'GridLi
neStyle', ':');

```

7.1.2. Código en Matlab de las mediciones realizadas en la cámara anecoica

```

%Programa que realiza las gráficas del patrón de radiación de la fuente
%omnidireccional en las frecuencias por bandas de 1/3 de octava.

```

```

datos=xlsread('C:\Users\Alejandro\Documents\tesis\fuente
omnidireccional\datos_fuente_omnidireccional\omni_anecoica.xlsx','B2:Z73'
);
f = [50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000
2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000];

ang = (0:5:355)*pi/180;
for k=1:24
    figure(k+1)
    polar(ang',datos(:,25),'*r')
    hold on
    polar(ang',datos(:,k),'ob')
    set(gca,'fontsize',12,'fontname','calibri light');
    text('position',[-50,-120],'string',['Patrón de radiación [dBA]'],...
        'HorizontalAlignment','center','fontsize',12,'fontname','calibri
light');
    char=['Frecuencia: ',num2str(f(k)), ' [Hz]'];

text('position',[50,120],'string',char,'fontsize',12,'fontname','calibri
light');
    legend('LeqA','1/3 octava','Location','NorthWestOutside');
    grid on
    hold off
end

```

7.2. Anexo referente al capítulo 4

7.2.1. Como almacena los datos el sonómetro

En el capítulo 4 se menciona que el programa realizado compara los valores obtenidos de la muestra grabada con los datos guardados por el sonómetro y esto puede ser un inconveniente si se utiliza, ya que fue implementado en la forma de como los guarda el modelo TES 1356 y están en formato “.DAT”; trae como información número de medición, fecha, hora el valor, la ponderación y la escala, para poder obtener los únicamente los valores y discriminar los demás datos se contó el número de tabulaciones (que se visualizan por medio de los espacios entre datos) hasta llegar dato deseado y de ahí almacenarlo.

"10	12/05/03	11:34:57	72.5	A	30-130	"
"11	12/05/03	11:34:59	71.9	A	30-130	"
"12	12/05/03	11:35:01	72.6	A	30-130	"
"13	12/05/03	11:35:03	71.5	A	30-130	"

7.2.2. Código en Matlab para el análisis de las muestras de ruido

El siguiente código de Matlab se utiliza para mostrar las gráficas y niveles equivalentes de las muestras de ruido grabadas junto a las del sonómetro.

```
function varargout = Analisis_de_muestras_de_Ruido(varargin)
% ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO M-file for
% Analisis_de_muestras_de_Ruido.fig
%     ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO, by itself, creates a new
%     ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO or raises the existing
%     singleton*.
%
%
%     H = ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO returns the handle to a new
%     ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%
%     ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...)
%     calls the local
%     function named CALLBACK in ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO.M with
%     the given input arguments.
%
%     ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO('Property','Value',...) creates a
%     new ANALISIS_DE_MUESTRAS_DE_RUIDO or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
%     are
%     applied to the GUI before Analisis_de_muestras_de_Ruido_OpeningFcn
%     gets called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
%     application
%     label. All inputs are passed to
%     Analisis_de_muestras_de_Ruido_OpeningFcn via varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only
%     one
%     instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help
% Analisis_de_muestras_de_Ruido

% Last Modified by GUIDE v2.5 07-Jan-2014 20:47:21

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @Analisis_de_muestras_de_Ruido_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @Analisis_de_muestras_de_Ruido_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [], ...
                  'gui_Callback',    []);
```

```

if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargin
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Analisis_de_muestras_de_Ruido is made visible.
function Analisis_de_muestras_de_Ruido_OpeningFcn(hObject, eventdata,
handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to Analisis_de_muestras_de_Ruido (see
VARARGIN)

% Choose default command line output for Analisis_de_muestras_de_Ruido
handles.output = hObject;
set(hObject, 'toolbar', 'figure');
% set(handles.checkbox1, 'string', 'Activa Grabación');
% set(handles.uipanel6, 'Title', 'Panel de Grabación');
set(handles.uipanel1, 'Title', 'Panel de archivos del micrófono');
set(handles.uipanel3, 'Title', 'Panel del Sonómetro');
set(handles.uipanel5, 'Title', 'Panel del Gráfico');
set(handles.Level_equ, 'string', 'Leq [dBA]');
set(handles.Level_equ_sound_level_meter, 'string', 'Leq [dBA] Sonómetro');
set(handles.open_noise_tone, 'string', 'Selecciona Ruido y Tono de
Calibración ');
set(handles.sample_noise_graph, 'string', 'Cálculo y gráfica del Ruido');
set(handles.open_sound_level_meter_data, 'string', 'Selecciona el Archivo
del Sonómetro');
set(handles.Sound_level_meter_graph, 'string', 'Cálculo y gráfica del
Archivo');
set(handles.grid, 'string', 'Cuadricular gráfica');
set(handles.hold_on_hold_off, 'string', 'Mantener gráfico');

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes Analisis_de_muestras_de_Ruido wait for user response (see
UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = Analisis_de_muestras_de_Ruido_OutputFcn(hObject,
eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure

```

```

% eventdata reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles structure with handles and user data (see GUIDATA)
msgbox(' AYUDA:
" La GUI siguiente muestra los botones para que selecciones tus
grabaciones de Ruido y Tono de Calibración, así como los archivos del
Sonómetro(TES). Si calculas antes de seleccionar los archivos marcará
error en la ventana de comandos pero sin detener sus funciones."');
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in sample_noise_graph.
function sample_noise_graph_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Obtención del filtro
f1 = 20.598997;
f2 = 107.65265;
f3 = 737.86223;
f4 = 12194.217;
A1000 = 1.9997;
NUMs = [(2*pi*f4)^2*(10^(A1000/20)) 0 0 0 0];
DENS = conv([1 +4*pi*f4 (2*pi*f4)^2], [1 +4*pi*f1 (2*pi*f1)^2]);
DENS = conv(conv(DENS,[1 2*pi*f3]),[1 2*pi*f2]);
[B,A] = bilinear (NUMs,DENS,44100);

%tratamiento del tono de calibración
tono = handles.tono;
P = length(tono);
Y2 = filter(B,A,tono);
tono_rms = sqrt((1/P)*sum(Y2.^2));
yref = tono_rms/10^(94/20);
dB_tono_calib = 20*log10(tono_rms/yref);
set(handles.text14,'string','Tono de calibración:');
set(handles.text15,'string',dB_tono_calib);
set(handles.text16,'string','[dB]');
%tratamiento de la muestra de ruido
ruido = handles.noi;
frs = handles.samratnoi;
N = length(ruido);
M = 2*frs;
n = floor(N/M);
Yrms=[];
for k = 1:n
    y = ruido(((k-1)*M)+1:k*M);
    Y = filter(B,A,y);
    yrms = sqrt((1/M).*sum((Y).^2));
    Yrms(k) = yrms; %#ok<AGROW>
end

%Muestra de Ruido en deciBeles
YdBA = 20*log10(Yrms/yref)';

%Obtención del nivel equivalente
Nequ = 10.^(YdBA./10);
Neq = (1/n).*sum(Nequ);
LeqdBA = 10*log10(Neq);
handles.nleq = LeqdBA;

```

```
%Grafica de la muestra de Ruido en deciBeles
stairs(handles.axes1, YdBA, 'r');
%hold on
title(handles.axes1, 'Gráfica de la muestra de Ruido [dBA]');
xlabel(handles.axes1, 'Nivel equivalente por muestra de 2 segundos de
longitud');
ylabel(handles.axes1, 'Magnitud [dBA]');

%"Update handles structure" Limpiado de variables que se utilizan en
otras funciones (actualizacion de
%los datos de dicha variable)
guidata(hObject,handles);

% hObject    handle to sample_noise_graph (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in open_noise_tone.
function open_noise_tone_Callback(hObject, eventdata, handles)
%Se borra todo contenido en los textos que aparecen
set(handles.text4, 'string', '');
set(handles.text1, 'string', '');
set(handles.text2, 'string', '');
set(handles.text14, 'string', '');
set(handles.text15, 'string', '');
%set(handles.text18, 'string', '');
set(handles.text3, 'string', 'Selecciona el Archivo de Ruido');

%Apertura del "selector de archivos" para escoger la señal de ruido
[name]= uigetfile('*.wav', 'Muestras de Sonido (Ruido)');
if name == 0
    set(handles.text1, 'string', 'No Seleccionaste Archivo(marcará error
si ejecutas)');
    return
end
set(handles.text1, 'string', name);
[noise FS] = wavread(name);

%Apertura del "selector de archivos" para escoger la señal "tono de
%calibración"
set(handles.text3, 'string', 'Selecciona el Tono de Calibración');
[name2]= uigetfile('*.wav', 'Tono de Calibración');
if name2 == 0
    set(handles.text2, 'string', 'No Seleccionaste Archivo(marcará error si
ejecutas)');
    return
end
set(handles.text2, 'string', name2);
set(handles.text3, 'string', '');
[tone fs] = wavread (name2);

%Creación de variables internas para que se puedan manejar en las demás
%funciones
handles.noi = noise;
handles.samratnoi = FS;
```

```
handles.ton = tone;
handles.samratton = fs;
guidata(hObject,handles);
% hObject    handle to open_noise_tone (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in grid.
function grid_Callback(hObject, eventdata, handles)
gdbn = get(handles.grid, 'Value');
switch gdbn
    case 1
        set(handles.axes1, 'xgrid', 'on' , 'ygrid', 'on');
    case 0
        set(handles.axes1, 'xgrid', 'off' , 'ygrid', 'off');
end
guidata(hObject,handles);
% hObject    handle to grid (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of grid

% --- Executes on button press in Level_equ.
function Level_equ_Callback(hObject, eventdata, handles)
    Nleq = handles.nleq;
    set(handles.text4, 'string', Nleq);
guidata(hObject,handles);

% hObject    handle to Level_equ (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of Level_equ

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% hObject    handle to text1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```

% hObject    handle to text2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text3_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% hObject    handle to text3 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
% hObject    handle to text4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% --- Executes on button press in Sound_level_meter_graph.
function Sound_level_meter_graph_Callback(hObject, eventdata, handles)
datname = handles.dat;
pathname = handles.path;
fullpath =strcat(pathname, datname);
[FID messege] = fopen (fullpath,'r');
datos_txt = fread(FID,'*char');
datos_bin=double(datos_txt);
salto=find(datos_bin==10);

N=length(salto);
nivel=[];
for k=1:N-1
    if k==1
        renglon=char(datos_bin(1:salto(1)))';
        tabs=find(renglon==9);
        dato=renglon(tabs(3):tabs(3)+4);
    elseif k~=1
        renglon=char(datos_bin(salto(k):salto(k+1)))';
        tabs=find(renglon==9);
        dato=renglon(tabs(3):tabs(3)+4);
    end
    nivel=[nivel dato];
end
Nivel=str2num(nivel);
assignin('base','Nivel',Nivel);

```

```

%Obtención del nivel equivalente total del sonómetro
l = length (Nivel);
Neq_sonometro = 10.^(Nivel./10);
Neq_sonometro = (1/l).*sum(Neq_sonometro);
LeqdBa_sono = 10*log10(Neq_sonometro);
handles.leq_sono = LeqdBa_sono;

stairs(handles.axes1, Nivel);
title(handles.axes1, 'Gráfica de la muestra de Ruido [dBA]');
xlabel(handles.axes1, 'Nivel equivalente por muestra de 2 segundos de
longitud');
ylabel(handles.axes1, 'Magnitud [dBA]');

guidata(hObject,handles);
% hObject    handle to Sound_level_meter_graph (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in Level_equ_sound_level_meter.
function Level_equ_sound_level_meter_Callback(hObject, eventdata,
handles)
    leq = handles.leq_sono;
    set(handles.text5, 'string', leq);
guidata(hObject,handles);
% hObject    handle to Level_equ_sound_level_meter (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject,'Value') returns toggle state of
Level_equ_sound_level_meter

% --- Executes on button press in open_sound_level_meter_data.
function open_sound_level_meter_data_Callback(hObject, eventdata,
handles)

set (handles.text5, 'string', '');
set (handles.text6, 'string', '');
set(handles.text3, 'string', 'Selecciona el archivo de datos del
sonómetro');
[datnamen pathnamen] = uigetfile('*.dat', 'Archivo de Datos del Sonómetro
"TES"');
if datnamen==0
    set(handles.text6, 'string', 'No Seleccionaste Archivo(marcará error
si ejecutas)');
    return
end
set(handles.text6, 'string', datnamen);
set(handles.text3, 'string', '');

handles.dat = datnamen;
handles.path = pathnamen;

guidata(hObject,handles);

```

```

% hObject    handle to open_sound_level_meter_data (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% --- Executes on button press in hold_on_hold_off.
function hold_on_hold_off_Callback(hObject, eventdata, handles)
holdb = get(handles.hold_on_hold_off, 'Value');
switch holdb
    case 1
        set(handles.text7, 'string', 'SI');
        axes(handles.axes1);
        hold on
    otherwise
        set(handles.text7, 'string', 'NO');
        axes(handles.axes1)
        hold off
end
if holdb == 1
else set(handles.grid, 'Value', 0);
end
guidata(hObject, handles);

% hObject    handle to hold_on_hold_off (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hint: get(hObject, 'Value') returns toggle state of hold_on_hold_off

```

7.2.3. Descripción sobre el programa en Matlab para las muestras de ruido

En la parte superior de la interfaz tenemos la clásica barra de herramientas de Matlab, la cual no todas las funciones están disponibles para esta interfaz, sin embargo las que sí, son útiles.



Figura 7.1. Barra de herramientas del programa “Análisis de muestras de ruido”.

Después se tiene el panel de control para seleccionar las muestras de ruido y tono de calibración, al presionar el botón “Selecciona Ruido y Tono de calibración” aparecerá un pantalla a la cual te refiere a la carpeta de Matlab ubicada en “Mis Documentos” y es ahí donde deben estar los archivos (nota: siempre deben estar en esa ubicación, si los colocas en otro lado aunque los selecciones, marcará error); una vez seleccionados los archivos aparecerán consecutivamente en los recuadros que se ubican en la parte superior izquierda de la interfaz y después de ello podrás presionar el botón “Cálculo y gráfica del ruido” y así obtener su gráfica donde en el eje “y” es el nivel en dBA y el eje “x” es el valor correspondiente a dos segundos entre cada una de ellas. Las siguientes figuras muestran visualmente lo aquí descrito.

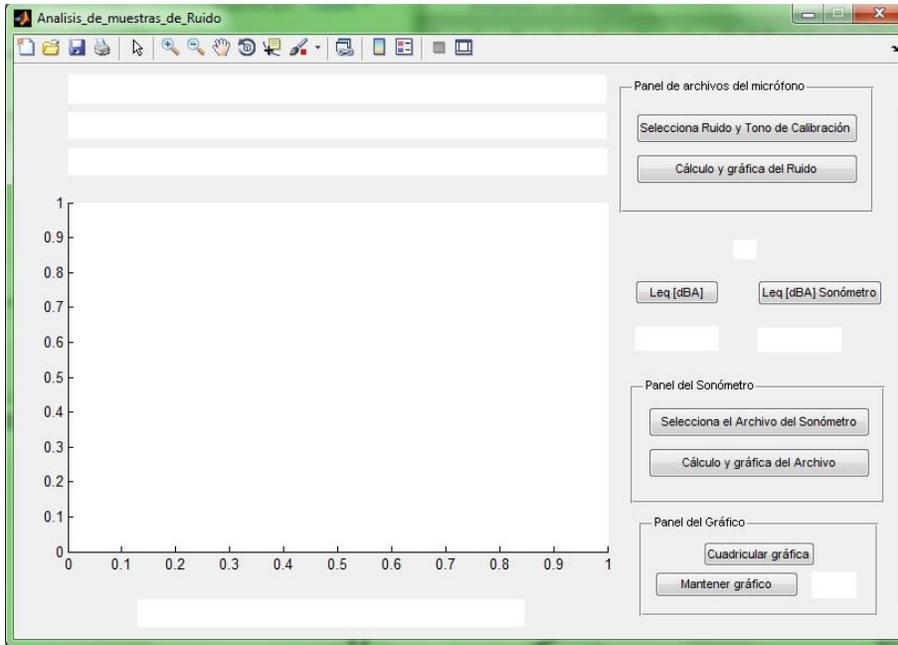


Figura 7.2. Interfaz gráfica de Usuario de Matlab para el análisis de muestras de ruido.

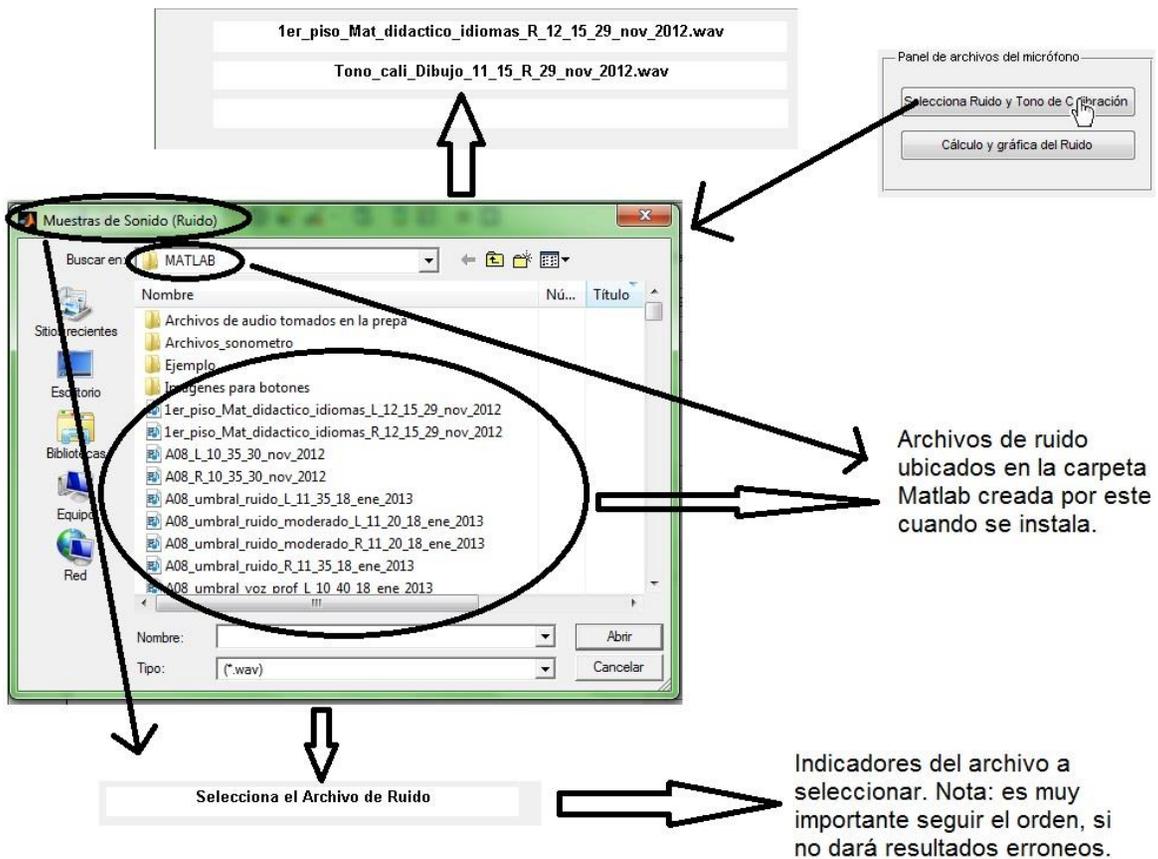


Figura 7.3. Pasos para la obtención de los niveles equivalentes y gráfica del ruido.

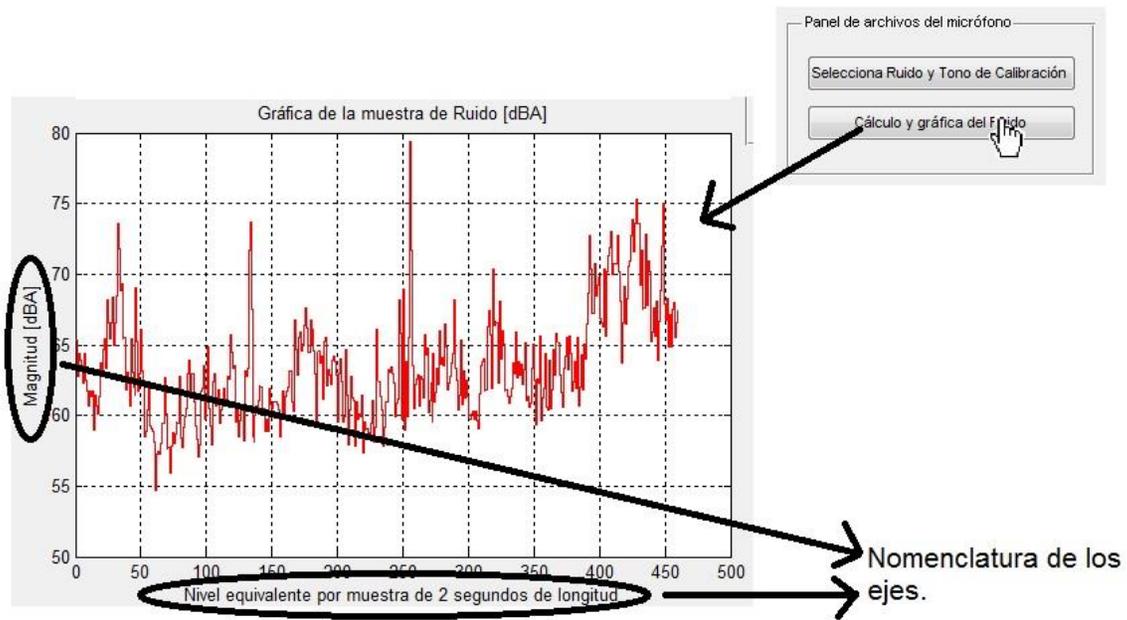


Figura 7.4. Cálculo y obtención de la gráfica del ruido.

De manera similar al procedimiento anterior es para los archivos del sonómetro, en el “Panel del Sonómetro” se encuentran los botones para seleccionar y graficar los datos; para mantener ambos gráficos (muestras de ruido y sonómetro) se debe utilizar el botón “Mantener gráfico” del “Panel del gráfico. En este caso, pueden almacenarse los archivos en una subcarpeta.

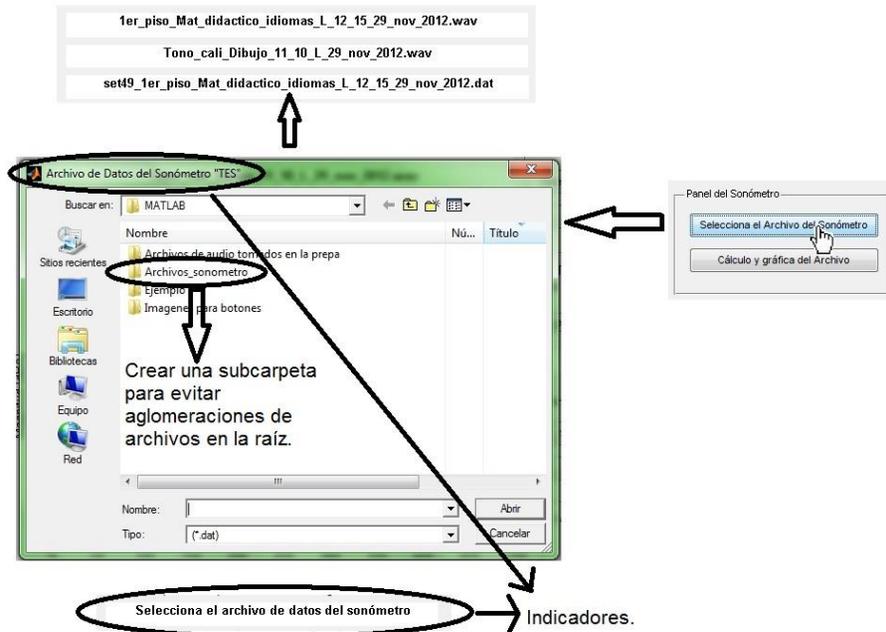


Figura 7.5. Selección y gráfica de los archivos del sonómetro.

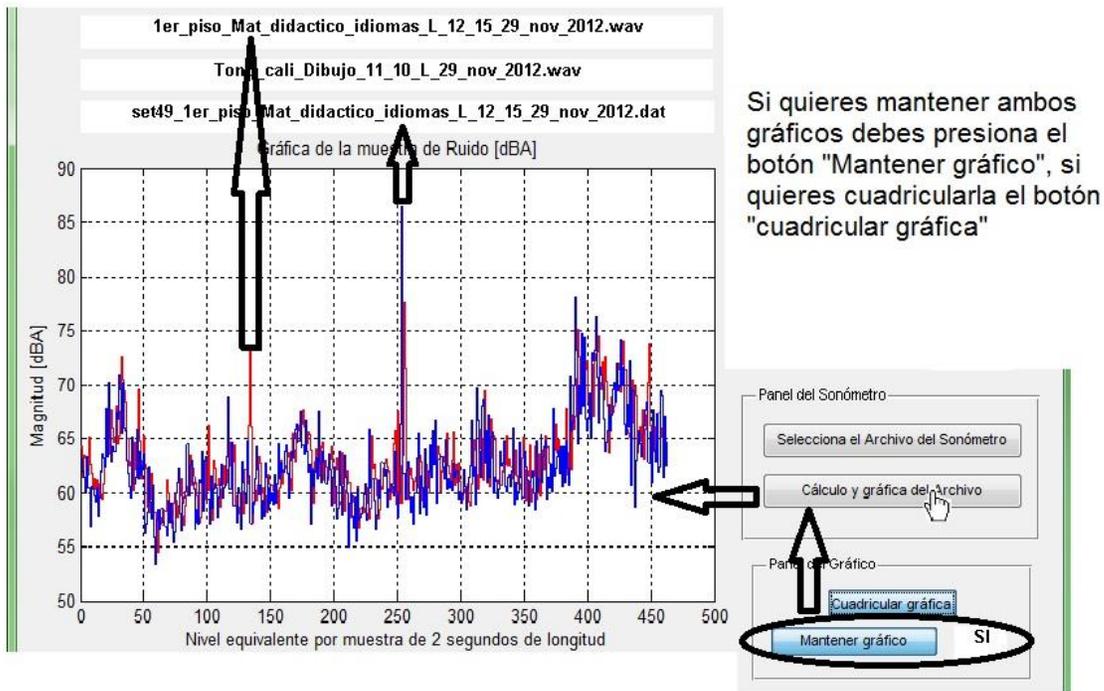


Figura 7.6. Como mantener ambos gráficos.

Si quieres conocer el nivel equivalente de los archivos del sonómetro y de la grabación, en la parte de en medio encontrarás sus respectivos botones, además del tono de calibración del micrófono, este programa tiene la limitante de ser sólo para muestras de ruido grabadas con una referencia de calibración de 94 dB, si tu calibrador cuenta con otro nivel sonoro del tono, por ejemplo 110 dB, no es compatible.

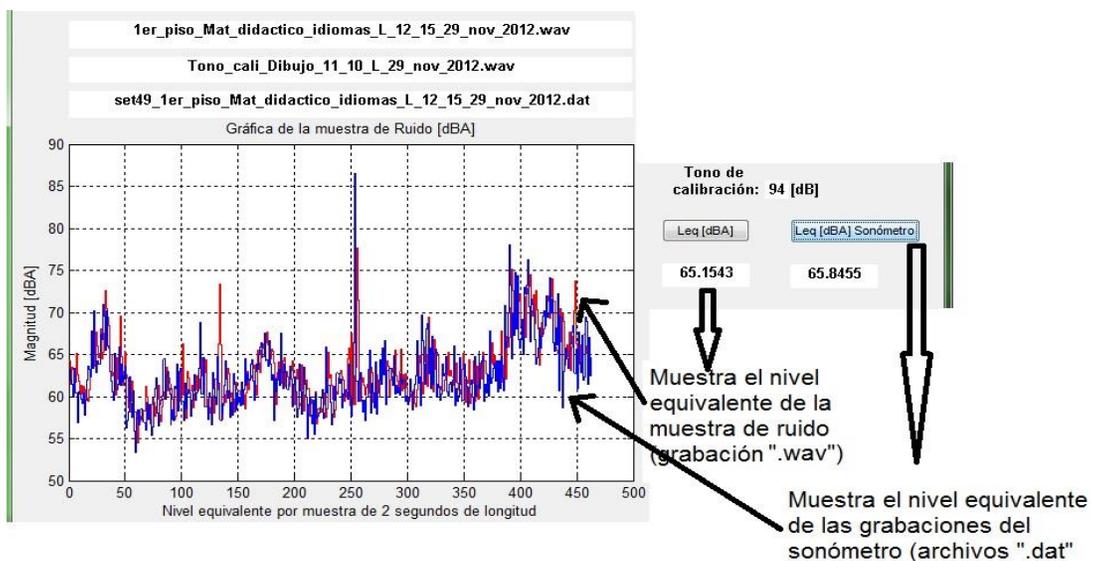


Figura 7.7. Botones para mostrar los niveles equivalentes.

7.2.3. Descripción del uso de *Dirac* para la obtención de la respuesta al impulso

Esta descripción no pretende suplir ninguna ayuda ofrecida por los creadores del software, sólo se mostrará el procedimiento realizado para obtener la respuesta al impulso de cada punto evaluado en los tres tipos de salones, es decir, si alguien está interesado en seguir el procedimiento mostrado a lo largo de este trabajo, estas pequeñas anotaciones sirven de guía.

Una vez ejecutado el programa, ubicar el botón de medición (measure) que es un ícono con un punto rojo (idéntico al ícono identificado para la grabación en un reproductor de música), una de las bondades de este software es que si con el puntero señalas cualquiera de los íconos, dirá de qué se trata. Después de presionarlo saldrá una ventana que contiene en su parte izquierda, el panel de fuente, contiene las señales de prueba o entrada al sistema descritas en el capítulo 3.2 (*ESS* y *MLS*), también se encuentra un apartado para escoger la longitud en tiempo de la señal, por lo tanto se debe tener una idea subjetiva del tiempo de reverberación del recinto para escoger la longitud adecuada, se recomienda que sea como mínimo $\frac{3}{4}$ del tiempo de reverberación, sin embargo es mejor escoger un rango por encima de los 2.97 s si es un recinto con la mayoría de sus superficies reflejantes.

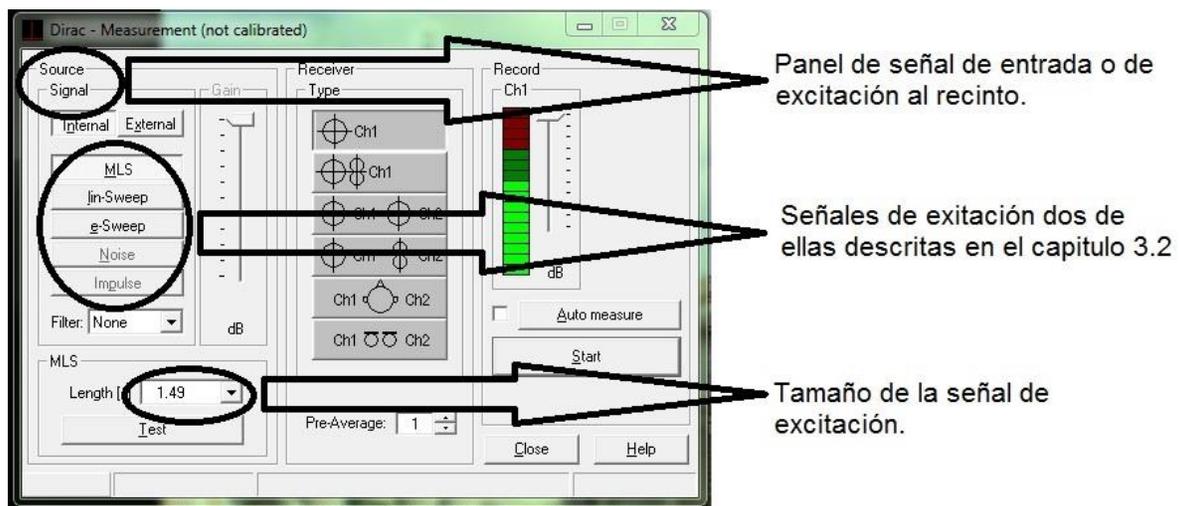


Figura 7.8. Panel de grabación de la respuesta al impulso para la obtención de parámetros.

En la parte central de la ventana se encuentra la configuración del receptor o receptores a utilizar, se observa que tiene varias configuraciones, uno o dos micrófonos, estos pueden tener un patrón de captación omnidireccional o lobular, además también cuenta con una opción donde esa señal reproducida en el recinto y captada por los micrófonos se hace pasar por una respuesta

HRTF (*Head Related Transfer Function*) que es la función de transferencia de cómo nuestros oídos perciben el sonido, esta es por si se cuenta con un maniquí que simula esa parte del cuerpo humano. Por último en la parte inferior tiene como función, seleccionar el número de pre-promedios, estos son muy útiles y recomendables (≥ 2) si se trata de las señales MLS y LSS.

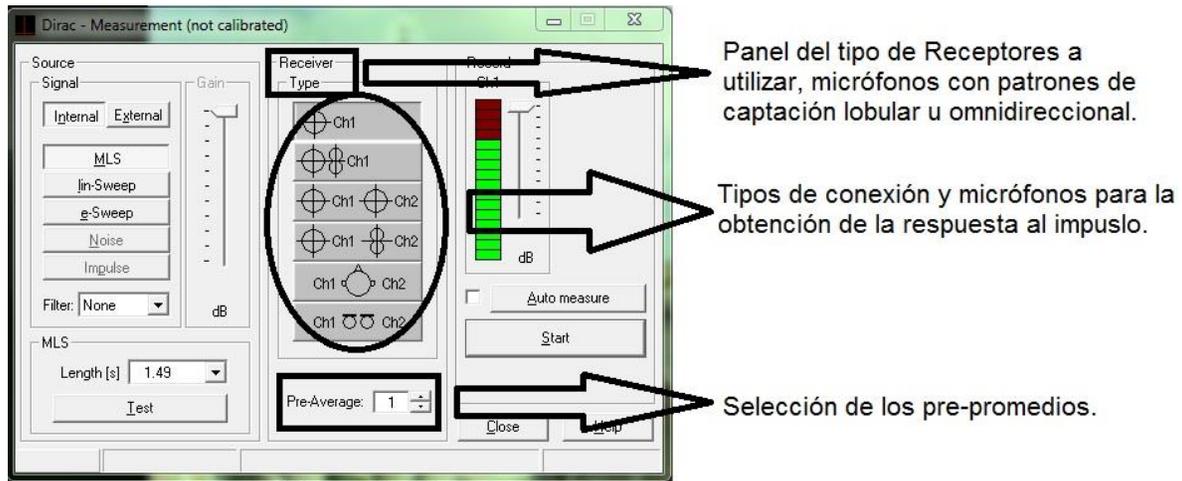


Figura 7.9. Descripción sobre el panel del receptor para la grabación de la respuesta al impulso.

Por último en la parte derecha de la ventana está el módulo de grabación el cual tiene dos opciones: hacerlo automáticamente o manual.

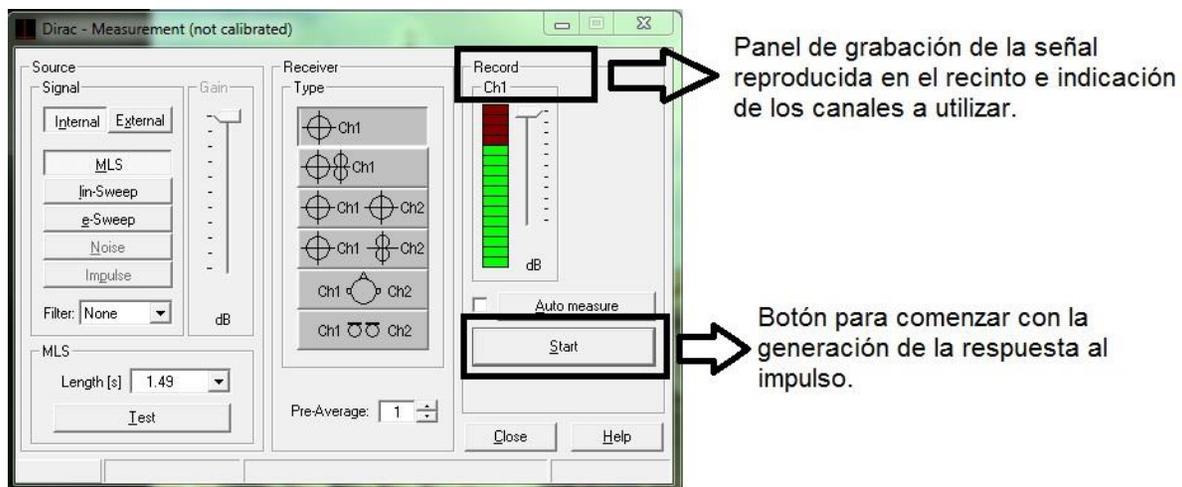


Figura 7.10. Descripción de la última parte del panel de grabación de la respuesta al impulso.

Antes de hacer cualquier medición se debe primero calibrar el equipo, *Dirac* cuenta con dos formas: una manual y otra automática. En la forma automática debes acceder al menú de configuración (*setup*) y en la opción calibrar (*calibrate*) seleccionas la opción de tarjeta de sonido

(*sound card*), sigues los pasos y listo, lo que hace es determinar el retardo (*delay*), la ganancia (*gain*) y el denominado *crosstalk* que es el nivel de interferencia eléctrica dada por el mismo circuito (en este caso la tarjeta de sonido), hacia el canal de la señal de interés. La forma manual se hace al realimentar con una señal *MLS*, *ESS* y obtener su retardo, que es la parte detrás de la respuesta al impulso, colocar el puntero del ratón al inicio de esta y ver la parte inferior de la pantalla en qué posición está, ese dato se debe insertar en la configuración ubicada en "*setup/options/soundcard*", se debe escoger un frecuencia de muestreo que por lo regular es de 44100 Hz.

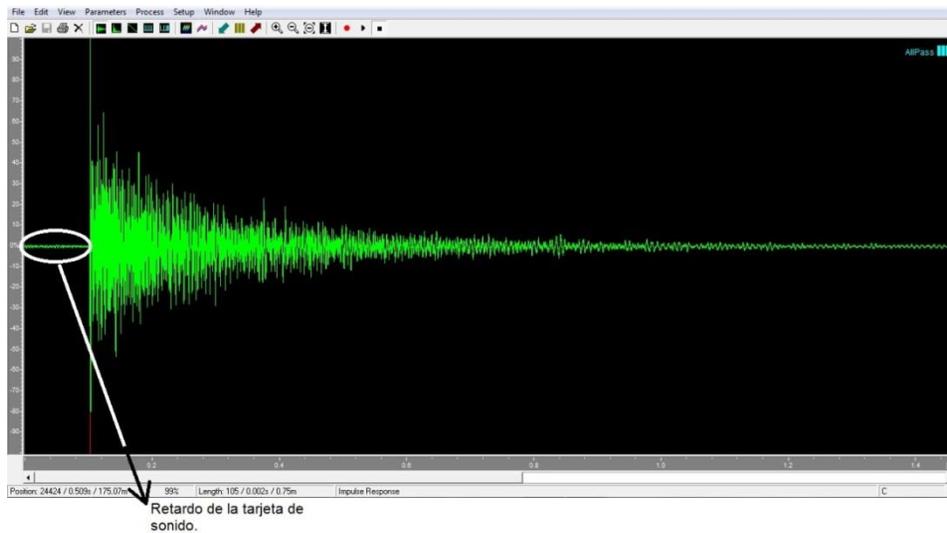


Figura 7.11. Descripción sobre como aparece el retardo de la tarjeta de sonido en *Dirac*.

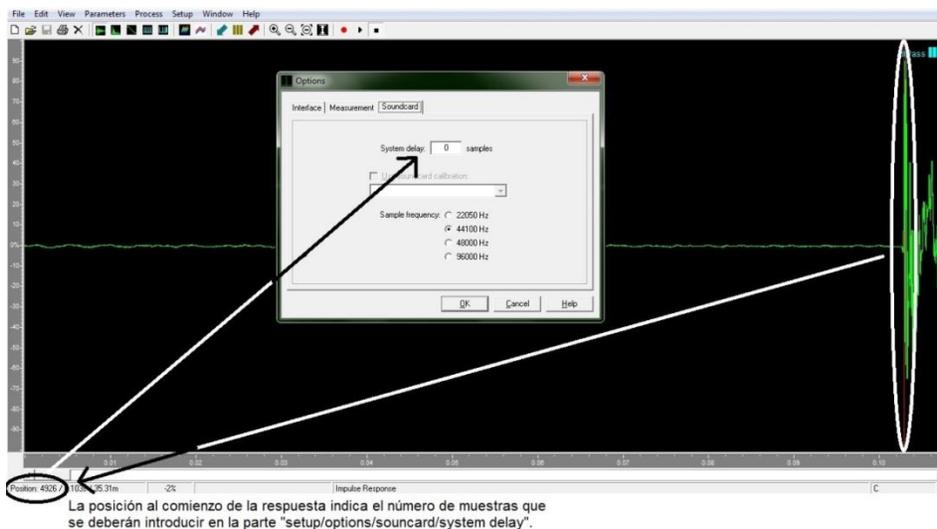


Figura 7.12. Forma manual de calibrar el equipo de cómputo para las mediciones.

7.3. Anexo referente al capítulo 5

7.3.1. Descripción sobre el uso de *Odeon* para simular los parámetros deseados

Si se utiliza esta forma para la simulación de los parámetros, cuando se exportan los modelos desde *SketchUp* al programa de simulación acústica *Odeon*, se debe tener un complemento o *plugin* que se añade a *SketchUp*, se puede descargar directamente de la página: <http://odeon.dk/su2odeon-plugin-google-sketchup>

Una vez en *Odeon* se abre el modelo en 3D, existen varias maneras de acceder a esa operación, la manera más fácil es desde los íconos presentes, la otra manera es desde la pestaña de “file” se encuentran dos formas de abrirlo: una es simplemente impórtalo y la otra es abrirlo y automáticamente repararlo en el caso de que haya algún traslape de superficies o que esté inconclusa. Si se optó por la forma de abrir sin reparar, se recomienda que antes de cualquier simulación se compruebe que el modelo no tenga algún error y para ello está la función “3D Geometry Debugger” o depurador de la geometría 3D y se accede mediante el comando “*shift-ctrl-w*” o su ícono representado así:



Figura 7.13. Botón que se utiliza para encontrar fallos en el modelo 3D

Al término de la depuración se procede a la colocación de la fuente y los receptores y se recomienda que las ubicaciones sean similares a las que se midieron directamente en el salón. *Odeon* cuenta con los archivos que simulan varios tipos de fuentes, omnidireccional, direccional, simuladores de boca, entre otros; también puedes crear tus propios patrones de direccionalidad. Los íconos de acceso y selección de fuente y receptor son los siguientes:

 Ícono que define fuentes y receptores

 Ícono de selección de fuentes puntuales.

 Ícono de selección de los receptores.

El ícono que define fuentes y receptores, al presionarlo muestra una pantalla en la que se encuentran los dos siguientes botones y muchos más, la siguiente figura lo ilustra.

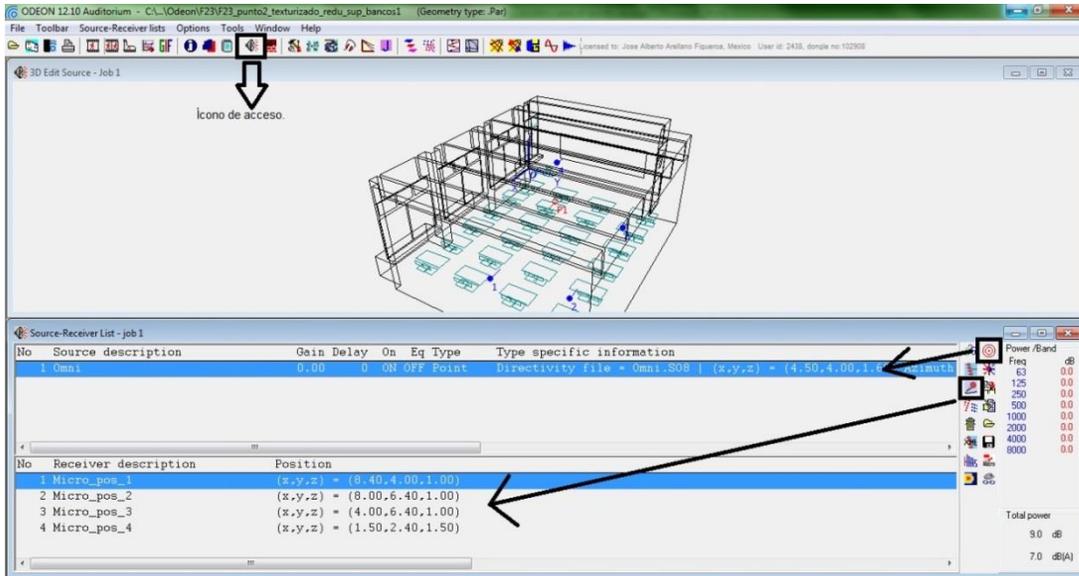


Figura 7.14. Pantalla de definición de fuente y receptor para la simulación.

Una vez colocados fuentes y receptores, se da a lugar la asignación de materiales, es decir, se le dan las propiedades de coeficientes de absorción a cada superficie del modelo, en esta parte es donde resalta la importancia de haber creado los “layers” o capas en SketchUp, ya que muchas de las superficies pueden contener un mismo material y será tardado asignarles las propiedades uno por uno, además, cuando se exporta se le asigna un número a cada una y pueden o no ser contiguas, con lo que te puedes perder fácilmente. La siguiente figura de muestra el modo de acceder a la lista de materiales y las funciones en este momento importantes.

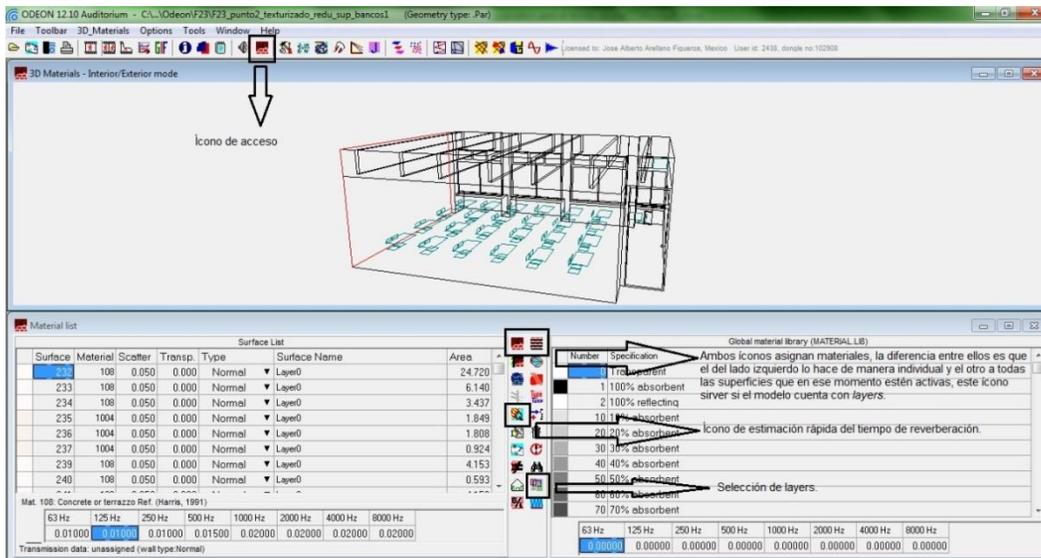


Figura 7.15. Acceso a la pantalla de asignación de materiales.

Cuando todas las superficies tengan sus características de absorción, hay una particular función en la que puedes obtener una estimación del tiempo de reverberación del recinto, este es un punto de referencia para asignar el intervalo de tiempo correcto para el cálculo de la respuesta al impulso porque debe estar por encima del tiempo más alto que hay en todas las octavas, si no, el parámetro T_{30} no será calculado.

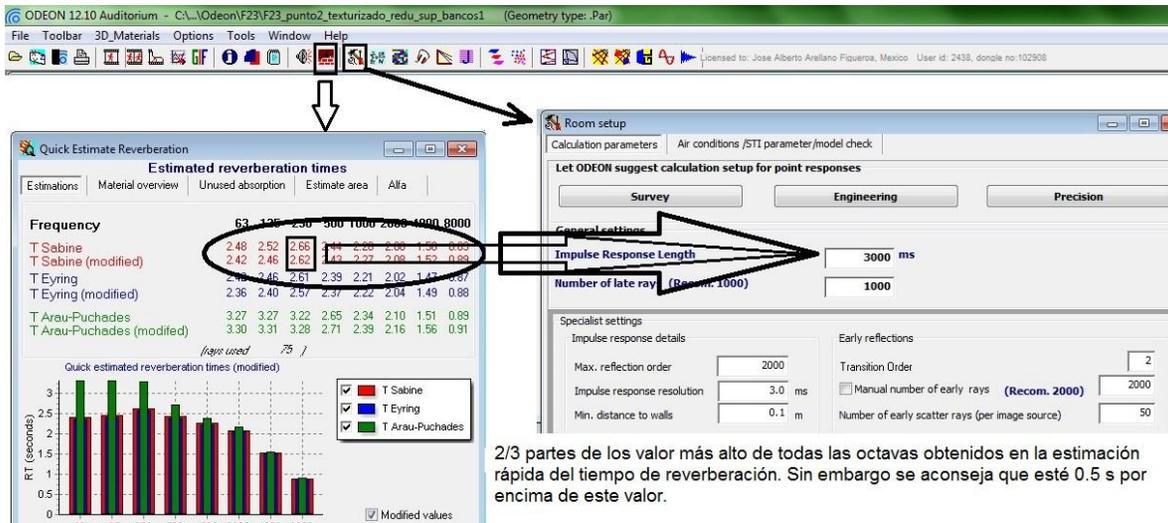


Figura 7.16. Estimación del tiempo de reverberación.

En el área de "Room setup"  o configuración de la sala el único parámetro que se cambia es la longitud de la respuesta al impulso que se referencia con la estimación anterior; en algunas ocasiones puede marcar error debido a la configuración de "Min. Distance to walls" o distancia mínima a los muros, viene configurado en cero pero puede ser cambiado a 0.1m para evitar este error.

Una parte importante del programa es la configuración de los parámetros que quieras calcular, para ello el ícono de "Room Acoustic parameter list" sirve para seleccionarlos y en la versión combinada de Odeon puedes modificarlo y/o agregar nuevos.



Ahora se procede al cálculo individual de las respuestas al impulso en el "Job list" o lista de trabajos, se asigna un "job" para cada receptor que a su vez se debe asociar con la fuente para luego calcular todos los parámetros seleccionados, se recomienda calcular todos los "jobs" para conocer sus estadísticas como promedios, valores máximos, mínimos y desviación estandar.

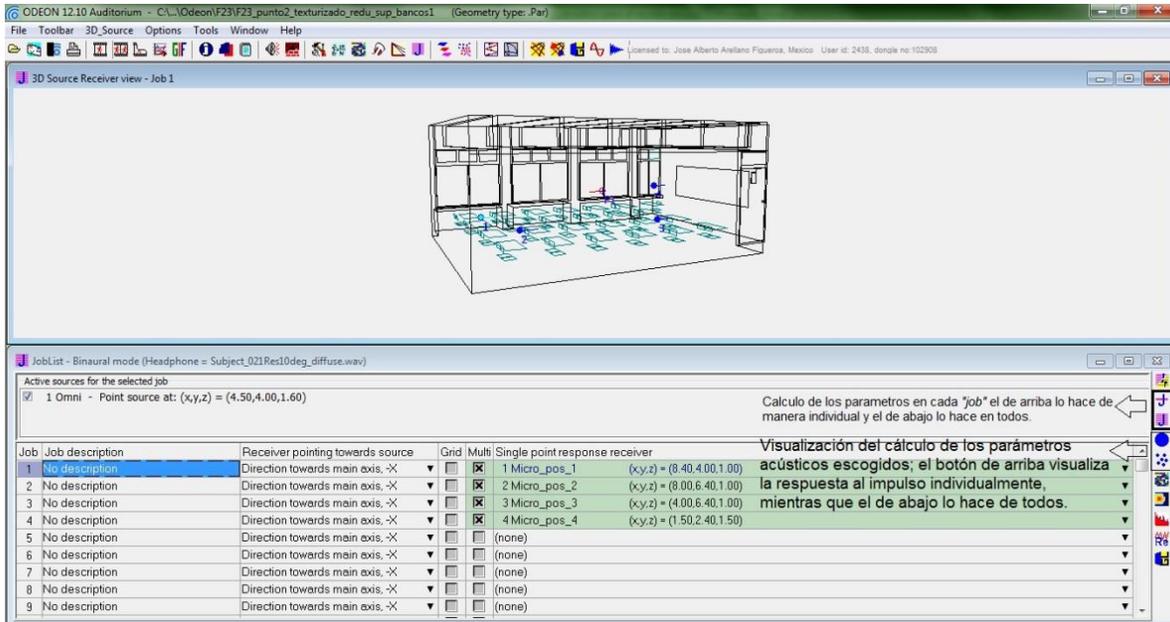


Figura 7.17. Pantalla de "Job list" para la obtención de los parámetros seleccionados.

En el ícono de "View Single Point respons"  se pueden ver los parámetros calculados de cada respuesta al impulso; en el ícono "View Multi Point response"  es donde se pueden visualizar las estadísticas de todos los receptores.

Una de las cualidades del programa de simulación acústica "Odeon" es que si se posee la respuesta al impulso medida como las mencionadas en el capítulo 4, se pueden añadir y comparar con los resultados simulados.

Bibliografía

- [1] F. Jacobsen, T. Poulsen, J. H. Rindel, A. Christian and M. Ohlrich, *Fundamentals Of Acoustics And Noise Control*, Denmark: Orsted, 2007.
- [2] T. C. Gustavo, *Acondicionamiento Acústico de los Salones de Clase del edificio 5 de ESIME Zacatenco*, México D.F., 2009.
- [3] C. R. Estrada, *Efectos Psicológicos de la contaminación por ruido en escenarios educativos*, México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2007.
- [4] G. Davis and R. Jones, *The Sound Reinforcement*, Milwaukee, WI: Yamaha, 1989.
- [5] C. Audio, «Crown Audio, Inc,» 2002. [En línea]. Available: <http://www.crownaudio.com/media/pdf/amps/139548.pdf>. [Último acceso: 6 noviembre 2013].
- [6] O. H. Bjor, *Maximun Length Sequence*, Norway: Norsonic, 1995-2000.
- [7] A. Farina, *Advancements in impulse response measurements by sine sweeps*, Vienna, Austria: Audio Engineering Society, 2007.
- [8] P. Driessen, M. Carson, H. Giesbrecht and T. Perry, *Surround Sound Impulse Response. Measurement with Sine Sweep; Application in Convolution Reverb*, Victoria, Canada, 2009.
- [9] U.-E. I. 140-3:1995, *Medición del aislamiento acústico de los edificios y de los elementos de construcción.*, 1995.
- [10] C. C. Hak, R. H. Wenmaekers, J. P. Hak y R. C. van Luxemburg, «The Source Directivity of a Dodecahedron Sound Source determined by stepwise rotation,» *Forum Acusticum 2011*, pp. 1875-1879, 2011.
- [11] H. Kuttruff, *Room Acoustics*, Fifth ed., Achen: Spon Press an imprint of Tylor & Francis, 2009.
- [12] M. R. López, *Acústica Arquitectónica Aplicada*, España: Paraninfo, 1999.
- [13] . B. S. R. and B. J. S., *Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics*, J. Acoust. Soc. Am, 2000.
- [14] M. Hodgsona y E. M. Nosal, *Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms*, Vancouver, British Columbia, 2001.
- [15] I. D. 3382-1:2006, *Medición de parámetros acústicos en recintos.*, 2006.
- [16] S. N. Yousri Gerges, *Ruido: Fundamentos y control*, Florianópolis, 1998.
- [17] M. S. Villafuerte Ramírez, *Desarrollo de un sistema de adquisición y medición de señales acústicas de amplio rango dinámico*, México D. F.: IPN, 2010.
- [18] A. S. o. America, ANSI/ASA S12.60-2010/PART1 *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines fot Schools Part 1: Permanent Schools*, EE. UU., 2010.
- [19] D. G. d. Normas, «NMX-AA-040-1976 "Clasificación de Ruidos"». México 1976.