



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO PARA EL ÁGORA DE
LA CASA DE LA CULTURA ECUATORIANA

Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor Guía
Yolanda Carreño Pozo

Autores
Andrés Fernando Andrade Granda
Manuel Alejandro Mendoza Cadena

2009

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

“Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con los estudiantes, orientando sus conocimientos para un adecuado desarrollo del tema escogido, y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.”

Yolanda Carreño Pozo
Ingeniero Civil Acústico
172169464-2

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DE LOS ESTUDIANTES

“Declaramos que este trabajo es original, de nuestra autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

Andrés Fernando Andrade Granda

171584825-3

Manuel Alejandro Mendoza Cadena

100205604-0

AGRADECIMIENTOS

A Eleonora Egger
por su enorme ayuda en la parte arquitectónica,
fuiste muy importante,
de verdad un millón de gracias.

A la Dirección de Teatros y Servicios Técnicos
de la Casa de la Cultura Ecuatoriana,
por todas las facilidades brindadas
para el desarrollo del estudio.

DEDICATORIA

A mi mamá Susana
por todos sus esfuerzos hechos.

Y a mi primo Ricardo
por todo su apoyo y ayuda.

Andrés

RESUMEN

El Ágora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana es un recinto cerrado, en el cual se realizan eventos culturales de todo tipo donde se requiere amplificación electroacústica. Éste recinto posee en la actualidad serios problemas acústicos debido a la falta de estudios previos a la construcción y ubicación del cielo de membrana sintética. En el presente proyecto se plantea una propuesta para un diseño acústico que solucione en gran medida la mala calidad acústica que posee la sala. Los principales cambios que se proponen son: la construcción de un cielo falso suspendido del cielo original, reduciendo de ésta manera el volumen total del recinto para lograr un tiempo de reverberación mucho menor más fácilmente; la colocación de nubes para dirigir las reflexiones de manera adecuada sobre la audiencia y la ubicación de materiales absorbentes en la mayoría de superficies. Con éstos cambios propuestos se logrará reducir el tiempo de reverberación actual, que es de 6 segundos aproximadamente, a uno óptimo, que debería variar de 1,5 a 2 segundos entre 125 Hz y 4 Khz.

ABSTRACT

The Ágora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana is a closed venue for the presentation of various cultural performances, in that is necessary to use an electroacoustical amplification. This venue has a lot of acoustical issues because lack of previous studies to build it and the right location of the synthetic membrane on the ceiling. The present project proposes a new acoustical design, that will fix the bad acoustical quality of the venue. The first change proposed is the build of a new false ceiling, this will reduce de total volume of the venue and will help to obtain a lower reverberation time in easy way. Furthermore is necessary to hang an acoustical reflectors to obtain better sound reflections over the public and to place acoustical material on some surfaces. With all these changes the result is an optimal reverberation time, that may vary between 1,5 to 2 seconds at 125 Hz to 4 kHz.

ÍNDICE

	Pág.
Introducción.....	1
1 Antecedentes. Marco Teórico.....	2
1.1 Antecedentes	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 Marco teórico.....	5
1.3.1 Acústica de locales	5
1.3.2 Propagación del sonido en un recinto cerrado.....	5
1.3.2.1 Campo sonoro y caracterización de reflexiones.....	6
1.3.2.2 Acústica geométrica.....	10
Análisis por trazado de rayos.	10
1.3.2.3 Percepción subjetiva de las primeras reflexiones. Ecos.....	11
1.3.2.4 Eco flotante	12
1.3.2.5 Focalizaciones de sonido.....	13
1.3.2.6 Modos normales de vibración	14
1.3.2.7 Campo sonoro en recintos irregulares. Caracterización de reflexiones	16
1.3.3 Tiempo de Reverberación (T_{60}).....	17
1.3.3.1 Medida y cálculo del T_{60} . Absorción sonora.....	17
1.3.3.2 Tiempo de reverberación óptimo.	19
1.3.3.3 Absorción producida por el aire	20
1.3.4 Parámetros acústicos.....	22
1.3.4.1 Calidez Acústica (BR) y Brillo (Br)	22
1.3.4.2 <i>Early Decay Time</i> (EDT)	23
1.3.4.3 Sonoridad (G).	23
1.3.4.4 Intimidad acústica.	23
1.3.4.5 Claridad musical (C_{80}).....	24
1.3.4.6 Claridad de la voz (C_{50}).....	24
1.3.5 Acondicionamiento acústico.....	25
1.3.6 Materiales y elementos acústicos	25
1.3.6.1 Materiales absorbentes acústicos.....	25
1.3.6.2 Absorción de personas y sillas.	29
1.3.6.3 Montaje de materiales absorbentes.....	30
1.3.6.4 Influencia de la densidad	32
1.3.6.5 Absorción de superficies vibrantes.	33
1.3.6.6 Resonadores.....	33
1.3.6.7 Reflectores de sonido	35
Reflectores curvos	35

1.3.6.8 Difusores de sonido	36
1.3.7 Criterios de diseño	37
1.3.7.1 Criterios para prevenir ecos, ecos flotantes y focalizaciones de sonido..	37
1.3.8 Mediciones acústicas	37
1.3.8.1 Instrumentos de medición	38
1.3.8.2 Filtros de ponderación de frecuencia	38
1.3.9 Sistemas electroacústicos	39
1.3.9.1 <i>Line Arrays</i> (Arreglos Lineales)	39
1.3.9.2 Propagación del sonido en un arreglo lineal	40
1.3.9.3 Fase	41
1.3.9.4 Importancia de la fase	41
2 Descripción de la Sala. Problema Acústico	42
2.1 Arquitectura de la sala	42
2.1.1 Geometría de la planta	42
2.1.2 Puertas de acceso	42
2.1.3 Cubierta del recinto	42
2.1.4 Escenario	42
2.1.5 Graderios y pasillos	43
2.1.6 Capacidad de audiencia	43
2.1.7 Volumen de la sala	43
2.1.8 Planos del recinto. Corte lateral y planta.	44
2.2 Diseño acústico actual del recinto	46
2.2.1 Superficies de las paredes de la platea	46
2.2.2 Adecuamiento en escenario	46
2.2.3 Materiales acústicos existentes	46
2.3 Problema acústico	47
3 Mediciones Acústicas	48
3.1 Mediciones	48
3.1.1 Equipo de medición	48
3.1.2 Diagrama de conexiones	48
3.1.3 Ubicación del equipo de audio	48
3.1.4 Método de medición	49
3.1.5 Puntos de medición	52
3.2 Resultados de las mediciones	53
3.2.1 Punto 1	53
3.2.2 Punto 2	54
3.2.3 Punto 3	54
3.2.4 Punto 4	54
3.2.5 Punto 5	54
3.2.6 Punto 6	55

3.2.7 Punto 7	55
3.2.8 Punto 8	55
3.2.9 Punto 9	55
3.3 Promedio de resultados.....	55
3.3.1 Promedio de T_{60}	56
3.3.2 Promedio de EDT (<i>Early Decay Time</i>)	57
3.4 Comparación entre T_{60} y EDT.....	57
4 Evaluación y Diagnóstico.....	59
4.1 Análisis de parámetros geométricos.....	59
4.1.1 Geometría de la planta.....	59
4.1.2 Parte posterior del recinto (accesos)	59
4.1.3 Escenario	60
4.1.4 Cubierta del techo	60
4.1.5 Paredes laterales del escenario	60
4.2 Análisis de materiales.....	61
4.3 Análisis de los resultados de mediciones	61
4.3.1 Análisis mediante <i>Sprectra Lab</i>	61
4.3.2 Problema de tiempo de reverberación	64
4.4 Ecos potenciales	65
4.5 Conclusiones	65
5 Diseño y Propuesta de Acondicionamiento Acústico.....	66
5.1 Desarrollo del diseño.....	66
5.1.1 Reformas geométricas	66
5.1.1.1 Paredes de la Planta.....	66
5.1.1.2 Cielo	68
Cielo Falso	68
Paneles reflectantes o nubes	69
5.1.1.3 Escenario	73
5.1.2 Tratamiento acústico	73
5.1.2.1 Escenario	73
5.1.2.2 Paredes laterales semicirculares del escenario.....	73
5.1.2.3 Pasillos.....	73
5.1.2.4 Paredes de la sala	74
5.1.2.5 Cielo	74
5.1.2.6 Nubes.....	74
5.1.2.7 Puertas de acceso	74
5.1.3 Resonadores.....	74
5.1.3.1 Cálculo del número de resonadores.....	75
5.1.3.2 Ubicación de los resonadores.....	77

5.1.4 Cálculo del tiempo de reverberación.....	78
5.1.5 Cálculo de descriptores.....	81
5.1.5.1 RT_{mid}	81
5.1.5.2 Calidez Acústica (BR, <i>Bass Ratio</i>).....	81
5.1.5.3 Brillo (Br).....	82
5.2 Costos del diseño.....	82
6 Conclusiones y Recomendaciones	85
6.1 Conclusiones.....	84
6.2 Recomendaciones.....	85
Bibliografía	87
Anexos	88

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo trata sobre una propuesta de acondicionamiento acústico para un importante recinto cultural que es el Ágora de la Casa de la Cultura Ecuatoriana, ubicado en la ciudad de Quito, Ecuador. La institución Casa de la Cultura se dedica a promover la cultura y posee dentro de su complejo varios teatros, centro de danza, música, bibliotecas.

El Ágora sirve comunmente para la realización de todo tipo de conciertos nacionales e internacionales, desde folclor hasta rock y pop. La acústica del recinto no cumple con los parámetros adecuados para una buena propagación del sonido, complicando técnicamente la realización de conciertos con equipos de amplificación electroacústica.

El desarrollo de esta propuesta, pasa primeramente por el análisis de las condiciones acústicas actuales del lugar a tratar, realizando mediciones acústicas y observación de los planos para poder generar planteamientos sobre posibles causas de sus condiciones acústicas, además de tomar en cuenta la opinión de ingenieros de audio que han trabajado en el lugar. Las mediciones acústicas fueron de gran ayuda para obtener datos importantes como tiempo de reverberación y, mediante la generación de espectrogramas, hallar las frecuencias exactas en las que se tiene resonancias.

Una vez organizados los datos y teniendo claros los problemas a resolver, los cuales resultaron ser muy complejos, se desarrolló una propuesta de diseño acústico, que incluye cambios drásticos en la estructura, empezando por reducir el volumen total del recinto, y la variación de parámetros geométricos para una mejor distribución del sonido. Luego de esto se plantea como solución para la reducción del tiempo de reverberación, la ubicación de varios tipos de materiales absorbentes sobre muchas de las superficies.

Los resultados que se obtuvieron teóricamente, fueron bastante buenos, logrando los objetivos acústicos propuestos al inicio y durante el desarrollo del trabajo.

1 ANTECEDENTES. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

La Casa de la Cultura Ecuatoriana, en una organización que fue creada mediante decreto durante el mandato del presidente José María Velasco Ibarra, en el año de 1944, cuyo propósito era incentivar la cultura ecuatoriana en todos los aspectos posibles. Para cumplir con estos propósitos se requería infraestructura adecuada, para lo cual se dio inicio a la construcción del edificio donde hasta el momento funciona la Casa de la Cultura, en el año de 1946, en terrenos donados por el Municipio de Quito. Las edificaciones construídas incluían museos, bibliotecas, salas de exposición y oficinas. Luego se requirió de nueva infraestructura para lograr los objetivos que tenía la Casa de la Cultura, además en 1959 se llevaría a cabo la X Conferencia Interamericana en Quito. En 1953 se construyó el nuevo edificio, en el mismo lugar donde ya funcionaban las anteriores instalaciones. En este nuevo edificio se construyeron varios teatros entre ellos el Teatro Nacional, la Biblioteca Nacional, Sala de Cine Demetrio Aguilera y un Teatro al Aire Libre o Ágora que es el recinto de nuestro interés y estudio.

El nombre de ágora (*αγορά*, mercado) viene de la antigua Grecia, y era un espacio al aire libre que funcionaba como plaza pública de las ciudades-estado griegas siendo una parte fundamental de éstas, donde se desarrollaban todas las actividades culturales, comerciales y políticas.

El Ágora de la Casa de la Cultura se construyó como un lugar destinado a la exposición de artes musicales y coreográficas. Era un teatro totalmente abierto, sin cubierta alguna sobre el techo, que únicamente estaba rodeada de paredes laterales en forma semicircular. Con el paso de los años se vio la necesidad de ubicar una cubierta debido a que las condiciones climáticas muchas veces no aportaban para el desarrollo de los eventos que se realizaban.

Se decidió entonces ubicar una cubierta de membrana sintética sobre una estructura de aluminio de arcos de sección triangular, que posee una superficie de 5300 m². Esta cubierta fue construída sin realizar previamente un estudio acústico del lugar, siendo esto un requisito importante tomando en cuenta que la principal función del ágora es la de realizar conciertos musicales. Debido a la falta del estudio acústico, se obtuvo como consecuencia una deficiente calidad acústica debido a la cantidad excesiva de reflexiones que se generan dentro del recinto.

Se realizó posteriormente un acondicionamiento acústico en el recinto, el cual incluye el uso de varios materiales absorbentes y difusores, que realmente no ayudaron al mejoramiento acústico del lugar, se analizará la razón de ésto en el desarrollo del presente trabajo. El recinto posee serios problemas acústicos como tiempo de reverberación excesivo para el uso que se le da, teniendo problemas de inteligibilidad especialmente cuando se utiliza un sistema de audio en arreglo L-R en bloque y no sistemas line-array o cuando se tiene poca audiencia dentro del recinto, al contrario de cuando existe gran cantidad de público de alguna manera ayuda a la reducción de reflexiones molestas debido a la absorción extra que aporta. En gran medida se soluciona ubicando un equipo en arreglo lineal, el cual ayuda a tener un control direccional de frecuencias sobre la zona de la audiencia.

El presente proyecto presenta una propuesta de diseño para un acondicionamiento acústico adecuado del recinto enfocado hacia sala de conciertos, que incluya reducción del tiempo de reverberación (T_{60}), distribución adecuada de reflexiones, uniformidad de los modos normales de vibración en el espectro de frecuencias entre otros problemas que se irán encontrando conforme se realicen estudios y mediciones en el lugar. Desde el punto de vista acústico el diseño y acondicionamiento de salas de conciertos es uno de los más complejos, además de esto no existe un recinto que responda de igual manera con los diferentes tipos de música, por lo cual se buscará el diseño

más versátil y viable para lograr nuestros objetivos, reduciendo los problemas que normalmente tienen los ingenieros de audio en los conciertos en vivo.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar estudios acústicos en el Ágora de la Casa de la Cultura para desarrollar un plan de acondicionamiento con un diseño viable económica y técnicamente, que mejore las condiciones acústicas actuales del recinto.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar mediciones acústicas de tiempo de reverberación y EDT.
- Realizar un análisis de las mediciones obtenidas, con la ayuda de programas acústicos computarizados.
- Desarrollar una propuesta de diseño que tome en cuenta únicamente el uso de sistemas de amplificación en arreglo lineal (*Line Array*).
- Lograr en la propuesta de diseño un tiempo de reverberación (T_{60}) que se encuentre dentro del margen de 1,5 a 2 segundos y se ajuste al volumen del recinto, utilizando materiales adecuados para obtener una buena calidad acústica.
- Reducir la resonancia en frecuencias problemáticas específicas, que serán indicadas por las mediciones que se realicen durante el estudio del recinto.
- Lograr una buena respuesta de la sala en cada banda de frecuencia, es decir tratar, en lo posible, que no existan resonancias o cancelaciones considerables de frecuencias.

- Lograr una distribución uniforme del sonido directo y de las reflexiones en todo el graderío de la audiencia.
- Evitar en lo posible que en la propuesta de diseño se requiera realizar grandes cambios geométricos de la planta, para de esta manera reducir los costos finales.

1.3 MARCO TEÓRICO.

1.3.1 ACÚSTICA DE LOCALES

La acústica de locales o acústica arquitectónica busca en principio la propagación del sonido adecuada, fiel y funcional dentro de un recinto, ya sea este un estudio de grabación, una sala de conciertos, un teatro, un auditorio, una sala de clases o cualquier tipo de sala que requiera una reproducción fiel del sonido. Cada uno de los recintos requiere de cualidades acústicas adecuadas distintas, dependiendo el uso que se le vaya a dar. Las cualidades acústicas de un recinto son parámetros que tienen que ver con el comportamiento del sonido dentro del mismo. Algunos de los parámetros acústicos básicos son el tamaño de la sala, el tiempo de reverberación, campo sonoro directo y reverberante, las reflexiones tempranas, ecos, resonancias, difusión del sonido, ubicación de fuentes sonoras. Una buena acústica requiere de un balance entre el sonido directo proveniente de las fuentes y el campo sonoro reverberante; debido a que la ley del inverso cuadrático dice que el nivel del sonido directo decrece 6 dB cada vez que se duplica la distancia de la fuente al receptor. Es imposible tener una relación de nivel de presión sonora constante a través de todo el recinto sin la ayuda de la acústica del mismo.

1.3.2 PROPAGACIÓN DEL SONIDO EN UN RECINTO CERRADO.

La propagación del sonido en un recinto cerrado es totalmente diferente a su comportamiento en campo libre, debido a todos los obstáculos que tienen las ondas sonoras en un local, empezando por las paredes, suelo y techo y las reflexiones que éstas superficies producen. Las reflexiones se las puede tomar como fuentes secundarias de sonido, lo cual trae consigo varias consecuencias

como: aumento de nivel de presión sonora, acumulación de energía sonora, resonancias o modos normales de vibración y un fenómeno importante que es la reverberación sonora o campo reverberante. El campo reverberante está formado por todas las reflexiones que las superficies producen y se llega a diferenciar del campo sonoro directo, conceptos que se explican en el siguiente apartado.

1.3.2.1 Campo Sonoro y Caracterización de Reflexiones.

El valor que adquiere la presión sonora en el espacio se lo conoce como campo sonoro. El sonido en un recinto cerrado llega de dos maneras diferentes hacia el oyente, la primera es el sonido directo proveniente de la fuente sin sufrir reflexiones en el camino, conocido como campo sonoro directo; y el segundo, el sonido proveniente de las sucesivas reflexiones producidas por las superficies del local, este se lo toma en cuenta a partir de la primera reflexión y se lo conoce como campo sonoro reverberante. La distancia a partir de la fuente en la cual el campo sonoro directo es igual al campo reverberante se lo conoce como distancia crítica:

$$Dc = 0,14\sqrt{QR} \quad (1.1)$$

Donde:

Q = Factor de directividad de la fuente sonora

R = Constante de la sala = $\frac{St * \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}}$ en m²

De la fórmula constante de la sala (R):

St = Superficie total de la sala

$\bar{\alpha}$ = Coeficiente de absorción medio de la sala

En la figura 1.1 se muestra el campo directo, reverberante y campo sonoro total. La distancia crítica se muestra como Dc.

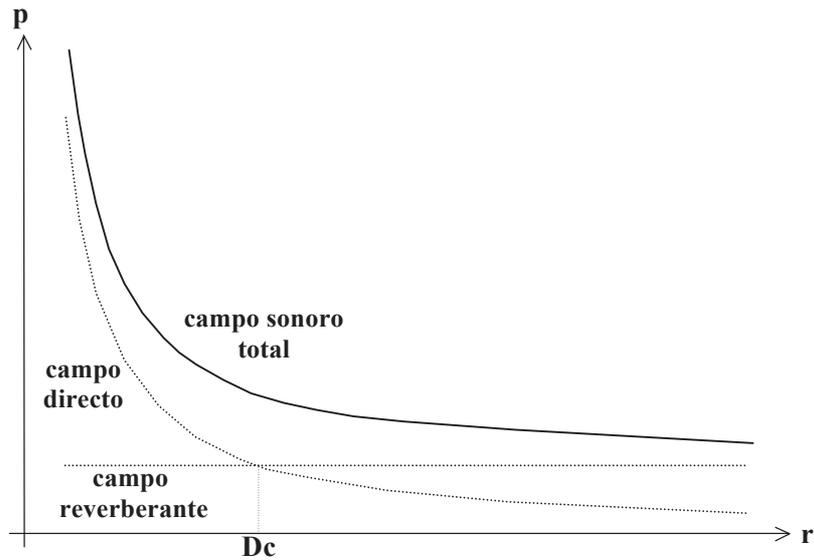


Figura 1.1 Representación del campo sonoro total y la distancia crítica D_c .¹

En la figura 1.2 se presenta de manera clara la caracterización de las reflexiones existentes en un recinto, primero el sonido directo proveniente de la fuente, luego las primeras reflexiones o reflexiones tempranas y las reflexiones tardías o reverberación.

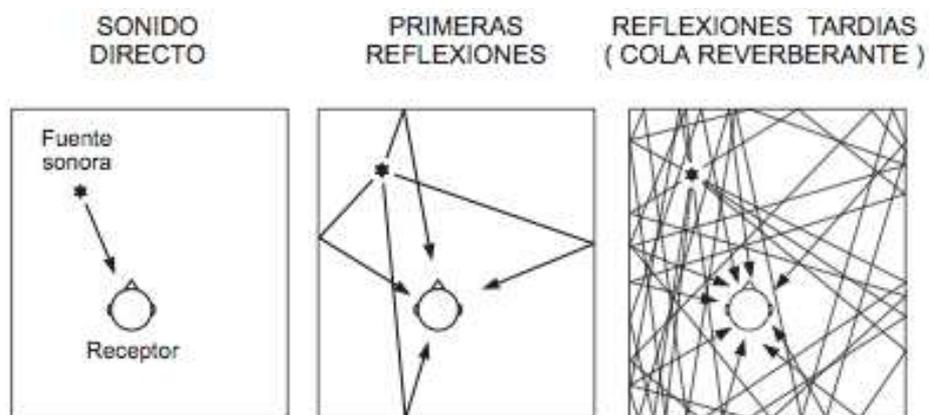


Figura 1.2 Sonido directo, primeras reflexiones y reflexiones tardías.²

El sonido directo depende únicamente de la distancia de la fuente al oyente y disminuye 6dB por cada duplicación de la distancia con respecto a ésta, mientras que el sonido proveniente de las reflexiones depende del trayecto

¹ Figura tomada de Control de Ruido, Federico Miyara, 1999, página 5-27.

² Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 50.

recorrido por las ondas sonoras y por la absorción sonora que brinden los materiales de las superficies del recinto. De esta manera mientras más largo sea el camino recorrido por las ondas y mayor sea la absorción de las superficies menor será la energía sonora tanto directa como la reflejada.

El sonido reflejado en un recinto se divide en dos zonas claramente diferenciadas, la primera es aquella donde las reflexiones llegan inmediatamente luego del sonido directo, estas se les llama primeras reflexiones o reflexiones tempranas, y la segunda parte de la energía son las reflexiones tardías o llamada cola reverberante. La cantidad de energía contenida en cada una de estas zonas depende básicamente del tamaño y absorción de las superficies del recinto.

La cola reverberante o campo reverberante es constante, esto es debido a que el sonido sufre múltiples reflexiones sumándose todas y produciendo así una distribución uniforme del sonido en todo el recinto.

Las reflexiones tempranas llegan de manera más discretizada que las tardías al oyente, debido a que son reflexiones de orden bajo, generalmente de orden menor o igual a 3. El orden de las reflexiones lo determina el número de veces que un rayo sonoro ha incidido sobre las superficies de un recinto antes de llegar al punto del oyente. Las primeras reflexiones siempre poseen un nivel energético mucho mayor que las reflexiones tardías debido al orden al que pertenecen, es decir que en su trayecto han perdido menos energía que la cola reverberante.

Para la zona de las primeras reflexiones se ha dispuesto un límite de tiempo de 100 ms (milisegundos) aproximadamente, a partir de la llegada del sonido directo, aunque este valor es muy variable dependiendo del tamaño y forma del recinto estudiado. En recintos grandes las primeras reflexiones están bastante separadas en el tiempo, las cuales se pueden tomar como ecos, mientras que en salas no muy grandes las reflexiones están bastante cerca en tiempo unas de otras y por lo tanto no llegan a percibirse como eco (Apartado 1.2.3).

La gráfica que muestra la llegada temporal de las reflexiones y su nivel energético se denomina reflectograma. En la figura 1.3. se muestra un reflectograma indicándose el sonido directo, las primeras reflexiones y las reflexiones tardías.

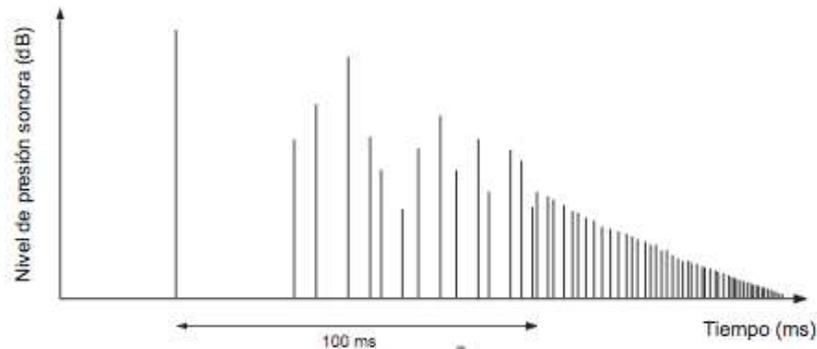


Figura 1.3 *Reflectograma. Se muestra el sonido directo, las primeras reflexiones y la cola reverberante.*³

Para la obtención de un reflectograma se requiere de un ruido impulsivo; y con la ayuda de *software*, que utilizan técnicas TDS (*Time Delay Spectrometry*) o MLS (*Maxium Lenght Secuence*) se puede obtener una curva de decaimiento energético en varios puntos del recinto conocida como curva energía-tiempo ETC (*Energy Time Curve*), con éste gráfico se puede obtener información importante sobre la acústica de un recinto.

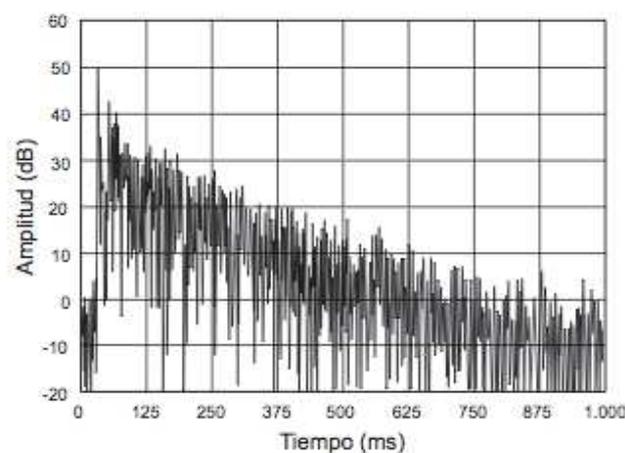


Figura 1.4 *Curva ETC.*⁴

³ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 50.

⁴ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 51.

1.3.2.2 Acústica Geométrica.

Las primeras reflexiones dependen netamente de la geometría de la sala y además de esto son específicas en cada punto de la misma, así determinan las cualidades propias del recinto en conjunto con el sonido directo.

La acústica geométrica se basa en considerar al sonido como si se tratase de rayos de luz. Se toma a los rayos reflejados como especulares, es decir que su ángulo de incidencia sobre la superficie es exactamente igual al ángulo reflejado, además se considera que las superficies son lo suficientemente grandes en comparación con la longitud de onda reflejada, lisas como para provocar reflexiones regulares y muy reflectantes. Este método es una aproximación debido a que dichas condiciones son ideales, es decir no se encuentran normalmente en la realidad.

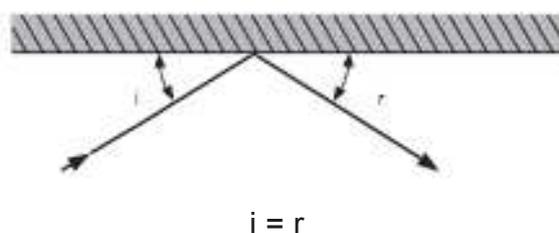


Figura 1.5 Reflexión del sonido sobre una superficie totalmente reflectante y lisa (Reflexión especular).⁵

Análisis por trazado de rayos.

El análisis por trazado de rayos es una técnica que ayuda mucho a detectar problemas en grandes recintos. Consiste en ubicar una fuente virtual perpendicular y a igual distancia que la fuente real sobre la cara opuesta a la superficie reflectante, como se ve en la figura 1.6. Luego se hacen trazos de rayos desde la fuente virtual hacia los puntos de los rayos incidentes de la fuente real sobre la superficie, así mostrando las reflexiones producidas dentro de la sala.

⁵ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 52

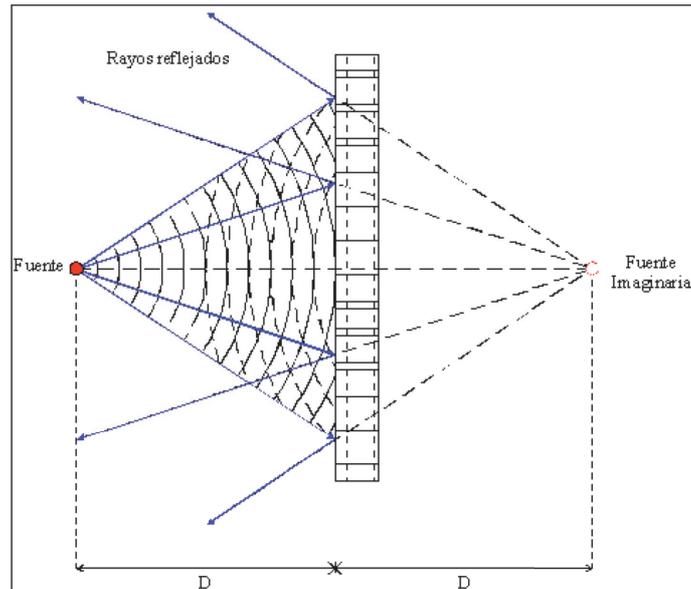


Figura 1.6 Técnica de trazado de rayos.

En el caso de que la longitud de onda sea mayor o igual a la superficie, la onda sonora rodea el obstáculo y sigue su camino de propagación como si la superficie no existiera, este fenómeno se denomina difracción sonora. Si la superficie presenta irregularidades de dimensiones aproximadas a la longitud de onda incidente se produce una reflexión en varias direcciones, y esto se conoce como difusión sonora.

1.3.2.3 Percepción Subjetiva de las Primeras Reflexiones. Ecos

Todas las reflexiones que llegan al oyente dentro de los primeros 50 ms a partir de la llegada del sonido directo son integrados por el oído humano y por esta razón no se lo puede percibir como un sonido diferente al sonido directo, esto en el caso de voz hablada se toma como un aumento de presión sonora, lo cual ayuda a reforzar el mensaje hablado. Por otro lado una diferencia de tiempo mayor a 50 ms entre las reflexiones o cuando la reflexión está totalmente dissociada del sonido directo, no es integrada por el oído humano y es tomado como una repetición del sonido directo, este tipo de reflexiones se lo conoce como eco. La existencia de eco es totalmente desfavorable para la inteligibilidad de la palabra. Los 50 ms, dependiendo de la velocidad del sonido en el ambiente, representan unos 17 m aproximadamente.

El eco se determina en base a la siguiente fórmula:

$$t = \frac{2d}{c} \text{ [segundos]} \quad (1.2)$$

Donde,

t = tiempo

d = distancia recorrida por el sonido directo

c = velocidad del sonido en el medio (344 m/s, a 20 °C).

Para una sala de conciertos el eco resulta un efecto muy desfavorable tanto para los músicos como para la audiencia. La existencia de eco se da, la mayoría de veces, por una superficie posterior muy reflectante dentro del recinto, con un ángulo de 90 grados en relación al cielo raso, siempre y cuando la distancia entre el escenario y dicha superficie supere los 16 metros aproximadamente.

1.3.2.4 Eco Flotante

El eco flotante consiste en una repetición sucesiva de un sonido generado por una fuente sonora entre dos superficies paralelas, lisas y poco absorbentes, en un intervalo corto de tiempo.

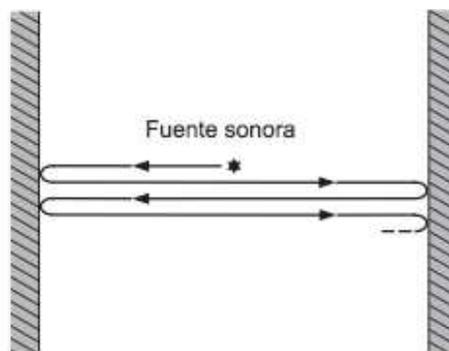


Figura 1.7 *Comportamiento del eco flotante entre dos paredes reflectantes.*⁶

⁶ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 56.

1.3.2.5 Focalizaciones de Sonido

La focalización de sonido se debe a una acumulación de energía en cierto lugar del recinto debido a superficies reflectantes que dirigen el sonido proveniente del escenario hacia dicha zona. También se tiene focalizaciones de sonido en superficies cóncavas reflectantes como por ejemplo cúpulas, o la zona posterior de las salas tipo herradura (Figura 1.8), por esta razón se debe evitar salas de tipo elíptico o circular. La focalización se da en el foco geométrico de la elipse.

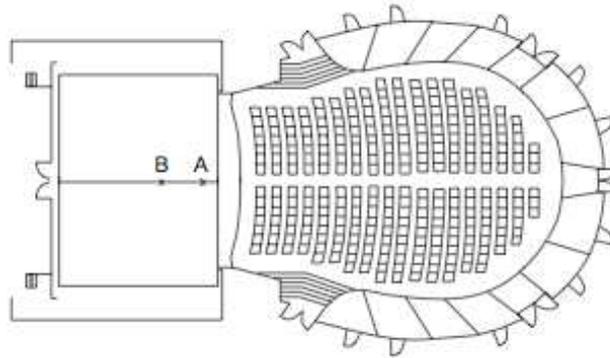


Figura 1.8 Recinto en forma de “herradura”.⁷

En el caso de recintos circulares la energía se acumula en el centro y además el sonido tiende a arrastrarse por las paredes, efecto conocido como “galería de los susurros”.

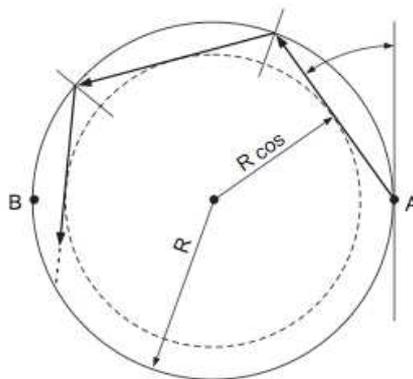


Figura 1.9 Manera en que el sonido recorre una superficie circular reflectante.⁸

⁷ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 50.

⁸ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 50.

1.3.2.6 Modos Normales de Vibración

En un sistema vibratorio existen frecuencias en las cuales dicho sistema puede oscilar durante algún tiempo luego de que la excitación termine, a éstas frecuencias se las conoce como modos normales de vibración. Si no existieran elementos que disipen dicha oscilación como ocurre en la realidad, el sistema quedaría vibrando infinitamente a frecuencia y amplitud constantes; en la realidad la energía se transforma en calor y la oscilación va disminuyendo hasta extinguirse. Cada sistema dependiendo de las características del mismo, tiene una frecuencia natural de resonancia, en ese punto el sistema vibrará a la mayor amplitud posible.

Cuando el sistema es excitado en alguno de sus modos normales, la amplitud de oscilación se incrementa y la energía se acumula. Esto también es conocido como resonancias.

Los modos normales de vibración de una sala se producen cuando las ondas que inciden en una superficie se combinan con ondas que son reflejadas, dando lugar a interferencias destructivas y constructivas, generando ondas estacionarias o los modos propios de la sala. Cada sala posee sus propios modos, dependiendo principalmente de las dimensiones y geometría de la misma. La determinación de los modos normales de una sala es en general bastante compleja, solamente se los puede calcular de manera sencilla, a los modos de salas rectangulares y superficies totalmente reflectantes mediante la siguiente formula:

$$f_{a,b,c} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{a}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{b}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{c}{L_z}\right)^2} \quad (1.3)$$

Donde:

L_x, L_y, L_z = Valores de las dimensiones de la sala en metros.

a, b, c = Cualquier valor entero positivo. Estos ubican una frecuencia y modo propio asociado a dicha combinación de números.

Los modos normales de vibración son inevitables, pero lo que se trata de hacer es distribuirlos de manera uniforme en el espectro de frecuencias, esto se consigue eligiendo una relación adecuada entre las dimensiones de la sala, evitando así tener concentraciones excesivas de energía en alguna banda de frecuencias. El siguiente gráfico se lo conoce como grafico de Bolt, el mismo indica proporciones adecuadas para obtener una distribución uniforme de modos normales únicamente en recintos rectangulares, la zona sombreada indica las relaciones recomendadas.

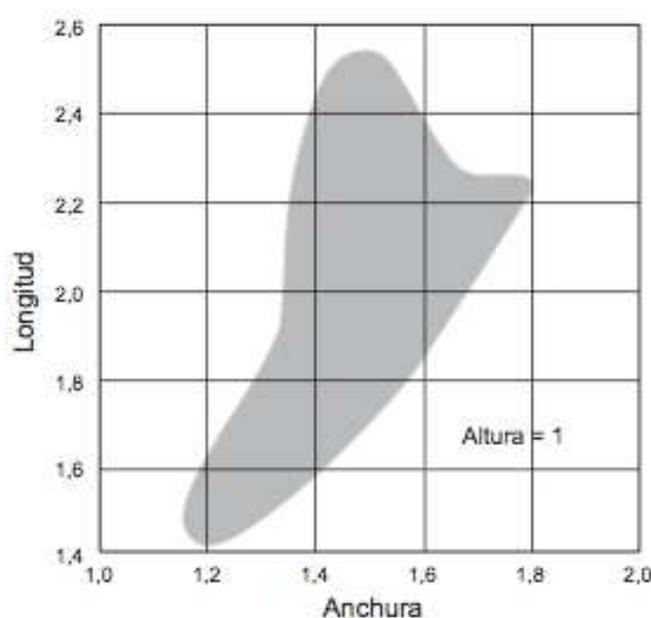


Figura 1.10 *Gráfico de Bolt. Proporciones recomendadas para un recinto paralelepípedo.*⁹

La concentración de modos normales de vibración va aumentando con la frecuencia, pero se debe considerar que mientras mayor es la densidad de éstos, deja de existir concentración discreta de energía. La siguiente fórmula empírica indica la frecuencia máxima a la cual estos dejan de tener incidencia.

$$f_{\max} = 1849 \sqrt{\frac{RT_{mid}}{V}} \text{ [Hz]} \quad (1.4)$$

⁹ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 58.

Donde:

RT_{mid} = Tiempo de reverberación promedio a las bandas de octava entre 500 Hz y 1 kHz [segundos].

V = Volumen de la sala [m^3]

Los modos normales afectan principalmente a salas pequeñas y en rangos de frecuencia menores a los 200 Hz, por lo que para el diseño de salas de conciertos y teatros no se toma en cuenta su incidencia.

Un criterio que siempre se debe tomar en cuenta en los diseños para evitar concentración de modos normales es tratar de no construir paredes paralelas, además los recintos totalmente cúbicos generalmente suelen ser deficientes en el aspecto acústico; también se debe evitar simetrías, si en algún caso no se puede evitar paralelismos se recomienda ubicar material absorbente en una o las dos paredes paralelas, siendo este el último recurso recomendado para ser utilizado.

1.3.2.7 Campo Sonoro en Recintos Irregulares. Caracterización de Reflexiones

Los recintos grandes e irregulares también poseen modos normales de vibración. En este tipo de recintos el número de frecuencias es muy grande y la distribución de presión sonora es tan compleja que cuando una fuente sonora entra en interacción con el recinto se crean ondas estacionarias que dependen de cada pared cercana a la fuente y todos los ángulos de incidencia. En cualquier punto del recinto, las ondas viajan en todas las direcciones, el campo sonoro, en estos casos, se convierte en campo sonoro difuso. Si una fuente sonora con un ancho de banda con un contenido de varias frecuencias entra en interacción con un recinto grande e irregular, y se toman varias mediciones en distintos puntos del recinto con un micrófono, se podrán observar variaciones en la presión sonora, tal y como ocurre en un recinto regular y pequeño, sin embargo, en el caso del recinto irregular, los máximos y mínimos de las mediciones de presión sonora varían bastante de un punto a otro del recinto.

1.3.3 TIEMPO DE REVERBERACIÓN (T_{60}).

Reverberación es el conjunto de reflexiones sucesivas que se dan luego de las primeras reflexiones. Wallace C. Sabine definió el T_{60} como el tiempo necesario para que la energía disminuya a su millonésima parte (decaimiento de 60 dB) una vez apagada la fuente. Para poder cuantificar la reverberación de un recinto se tiene el parámetro de tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación varía con la frecuencia y depende básicamente de qué tan absorbente sea la sala y de su volumen. Se denomina una sala viva cuando la sala posee un decaimiento energético lento; y sala seca o muerta cuando se tiene un decaimiento energético rápido.

1.3.3.1 Medida y Cálculo del T_{60} . Absorción Sonora.

El tiempo de reverberación se lo puede calcular mediante la formula de Sabine, que es la siguiente:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{A_{total}} \text{ [segundos]} \quad (1.5)$$

Donde:

V = Volumen de la Sala [m^3].

A_{Total} = Absorción total del recinto [m^2 sabine]

La absorción de un material se lo mide mediante el coeficiente de absorción α , el cual se define como la relación entre energía absorbida sobre la energía incidente y sus valores varían entre 0 y 1, siendo 1 totalmente absorbente y 0 totalmente reflectante. El valor de α varia con la frecuencia.

El valor de la absorción de una superficie específica o un material se la obtiene multiplicando su coeficiente de absorción por la superficie del mismo,

$$A = \alpha \cdot S \text{ [m}^2 \text{ sabine]} \quad (1.6)$$

Para obtener la absorción total de un recinto se deben sumar todas las absorciones de cada uno de los materiales existentes en la sala, así:

$$A_{total} = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots + \alpha_n \cdot S_n \quad (1.7)$$

A partir de la absorción total es posible encontrar la absorción media del recinto:

$$\bar{\alpha} = \frac{A_{total}}{S_{total}} \quad (1.8)$$

Donde:

$$S_{total} = S_1 + S_2 + \dots + S_n \text{ (suma de todas la superficies del recinto)}$$

De esto se puede expresar la fórmula de T_{60} como:

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{\bar{\alpha} \cdot S_{total}} \quad (1.9)$$

Esta fórmula se rige por ciertos parámetros para su validez como por ejemplo decaimiento energético exponencial, recinto de geometría regular y un coeficiente medio de absorción menor a 0,4 aproximadamente.

El T_{60} se lo calcula partiendo de la curva de decaimiento energético medida en cualquier punto del recinto. Como se dijo anteriormente la curva de decaimiento energético se la puede obtener mediante un ruido impulsivo o por MLS o TDS.

El T_{60} es un parámetro fundamental dentro del diseño acústico de una recinto. Existen otros parámetros y descriptores que se fundamentan en la acústica geométrica por esta razón dependen netamente de la ubicación del receptor. Para lograr un diseño confiable y una acústica adecuada se deben optimizar todos ellos junto con el tiempo de reverberación.

1.3.3.2 Tiempo De Reverberación Óptimo.

A partir de opiniones e investigaciones se ha determinado que existe un tiempo de reverberación óptimo para cada tipo de sala según el uso que se le vaya a dar, que varía dependiendo de su volumen con una relación directamente proporcional. En la figura 1.11 se muestra un gráfico basado en los trabajos de investigación de Leo Beranek para tiempo de reverberación a la frecuencia de 500 Hz.

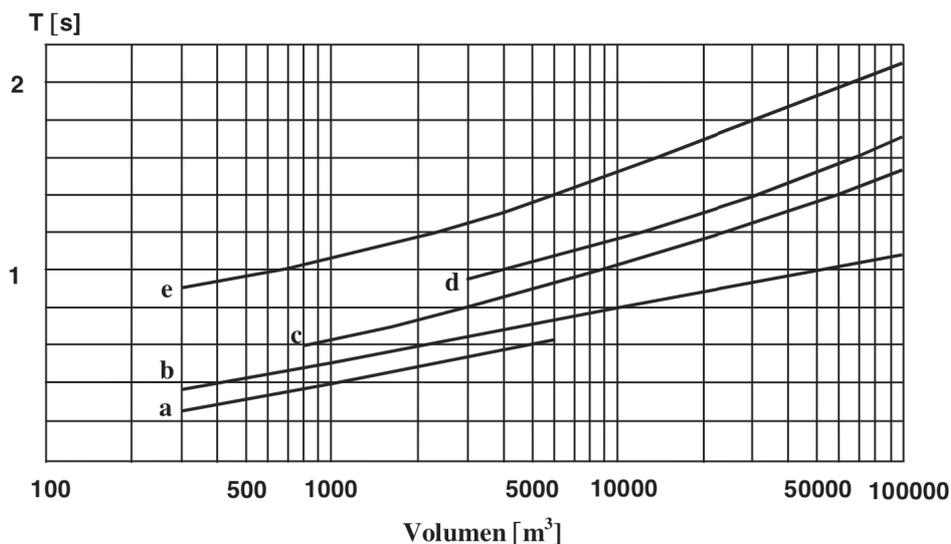


Figura 1.11 T_{60} óptimo en función del volumen de la sala según Beranek. a. Estudios de radiodifusión para voz, b. Salas de conferencias, c. Estudios de radiodifusión para música, d. Salas de conciertos, e. Iglesias.¹⁰

Podemos ver que la música requiere un T_{60} mayor al de la voz hablada debido a que la reverberación ayuda a acoplar mejor los sonidos; por el contrario, la voz requiere que cada palabra y sílaba se entiendan perfectamente, siendo la reverberación excesiva contraproducente para lograr éste fin.

En el siguiente cuadro (Tabla 1.1) se muestran tiempos de reverberación medios recomendados para diferentes tipos de salas suponiendo que estén totalmente ocupadas.

¹⁰ Figura tomada de Control de Ruido, Miyara, Federico, 1999, página 5-15.

Tabla 1.1 Valores de RT_{mid} dependiendo del tipo de sala¹¹

TIPO DE SALA	RT_{mid} , SALA OCUPADA (EN s)
Sala de conferencias	0,7 – 1,0
Cine	1,0 – 1,2
Sala polivalente	1,2 – 1,5
Teatro de ópera	1,2 – 1,5
Sala de conciertos (música de cámara)	1,3 – 1,7
Sala de conciertos (música sinfónica)	1,8 – 2,0
Iglesia/catedral (órgano y canto coral)	2,0 – 3,0
Locutorio de radio	0,2 – 0,4

1.3.3.3 Absorción Producida por el Aire

Este tipo de absorción solamente es significativa en recintos de volúmenes grandes ($V > 1000 \text{ m}^3$), frecuencias mayores o iguales a 2 kHz y porcentajes de humedad relativa entre 50 % y 80 % aproximadamente. La absorción del aire está representada por una constante de atenuación de sonido en el aire [m].

El producto $4m$ sirve para calcular el tiempo de reverberación en un recinto. En el siguiente gráfico (Figura 1.12) se puede ver el resultante de $4m$ en condiciones normales de temperatura y presión es decir 10^5 Pascales y 20°C , en función de la frecuencia (a partir de 2kHz) y de la humedad relativa a partir de 20 %. Multiplicando $4m$ por el volumen del recinto se tendrá la atenuación producida por el aire en dicho recinto (fórmula 1.10).

El producto $4m$ tiene como unidades los sabines/ m^3 . La unidades del producto $4m \cdot V$ son los sabines.

¹¹ Tabla tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 64.

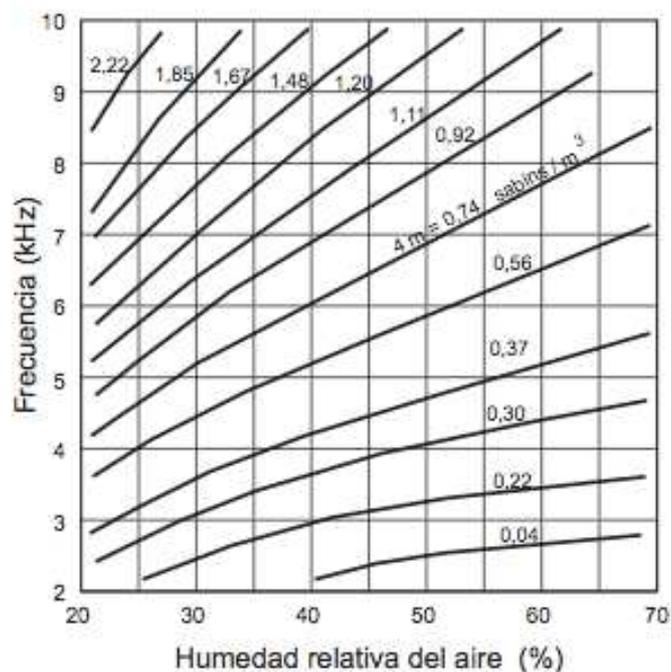


Figura 1.12 Gráfico para determinar el producto $4m$.¹²

A continuación se presenta una fórmula para el tiempo de reverberación de un recinto, tomando en cuenta la absorción producida por el aire, en función del volumen del recinto y del producto $4m$:

$$T_{60} = \frac{0,161 \cdot V}{A_{total} + 4m \cdot V} \quad [\text{segundos}] \quad (1.10)$$

Donde:

A_{total} = Absorción total del recinto.

V = Volumen total del recinto.

$4m$ = Valor dado por tablas.

¹² Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 74.

1.3.4 PARÁMETROS ACÚSTICOS

1.3.4.1 Calidez Acústica (BR) y Brillo (Br)

La calidez y brillo de una sala están asociados con el tiempo de reverberación de la misma.

Se dice que una sala tiene calidez acústica cuando posee riqueza en bajas frecuencias. Para poder cuantificar la calidez acústica se utiliza un parámetro llamado Bass Ratio (BR), el cual se define como,

$$BR = \frac{RT_{125Hz} + RT_{250Hz}}{RT_{500Hz} + RT_{1kHz}} \quad (1.11)$$

Los valores recomendados para una sala de conciertos para música sinfónica y llena de público son:

$$1,10 \leq BR \leq 1,25 \quad (\text{si } RT_{mid} = 2,2 \text{ seg})$$

$$1,10 \leq BR \leq 1,45 \quad (\text{si } RT_{mid} = 1,8 \text{ seg})$$

El término de brillo se refiere al refuerzo que una sala brinda a las altas frecuencias, obteniendo un sonido claro. El brillo Br de una sala se define como,

$$Br = \frac{RT_{2kHz} + RT_{4kHz}}{RT_{500Hz} + RT_{1kHz}} \quad (1.12)$$

Se recomienda que el valor de Br para salas totalmente ocupadas sea:

$$Br \geq 0,87$$

En todo caso el brillo no tendrá que ser mayor a 1. La sala se podría volver extremadamente brillante en el caso que se utilice de forma incorrecta un sistema de amplificación de sonido en la sala.

1.3.4.2 *Early Decay Time (EDT)*

El EDT se define como seis veces el tiempo que pasa desde que la fuente sonora se apaga hasta que el nivel de presión decae 10 dB. El EDT se encuentra más relacionado con la viveza de una sala que el tiempo de reverberación, esto quiere decir que en aquellos puntos donde el EDT sea inferior al T_{60} , subjetivamente la sala parecerá ser más apagada.

Para obtener una buena difusión del sonido con una sala llena, es recomendable que el EDT medio de las bandas de 500 Hz y 1kHz sea semejante al RT medio de la sala.

$$EDT_{mid} \approx RT_{mid}$$

1.3.4.3 *Sonoridad (G)*.

Se define como la diferencia entre el nivel de presión sonora total L_p que produce una fuente omnidireccional en un punto de la sala y el nivel de presión sonora producido por la misma fuente al aire libre y medido a 10 metros. Los dos niveles se miden por bandas de frecuencias de octava entre 125 Hz y 4 kHz. El nivel de referencia para cada banda de frecuencia es de 69 dB de NPS.

Por su definición se puede decir que la sonoridad tiene que ver con el grado de amplificación que tiene una sala y depende del T_{60} , la superficie de la audiencia, la distancia del oyente hasta el escenario, y la energía de las primeras reflexiones.

1.3.4.4 *Intimidad Acústica*.

Está relacionado con el aspecto audible del sonido que le indica al público el tamaño del recinto. Permite describir la capacidad del recinto para dar la impresión de que el sonido viene del escenario. Depende principalmente del *Initial-Time-Delay Gap* o Intervalo Temporal Inicial (ITI).

El Intervalo Temporal Inicial es la diferencia de tiempo que existe entre la llegada del sonido directo y la llegada de la primera reflexión al oyente. Se considera como primera reflexión útil si tiene una intensidad menor a 10 dB que el sonido directo.

Beranek estableció que si el ITI es mayor a 20 milisegundos la calidad de la sala se considera muy buena; y si se tiene un ITI de más de 70 milisegundos la calidad de la sala sería deficiente, independientemente de la geometría del recinto.

1.3.4.5 Claridad Musical (C_{80}).

La Claridad Musical indica el grado de separación entre cada uno de los sonidos de una composición musical y se define como la relación entre la energía sonora que llega al oyente en los primeros 80 milisegundos a partir de la llegada del sonido directo y la energía que llega luego de los primeros 80 milisegundos entre las bandas de frecuencia desde 125 Hz hasta 4 kHz, el C_{80} se expresa en escala logarítmica:

$$C_{80} = \frac{\text{Energía hasta } 80ms}{\text{Energía a partir de } 80ms} [dB] \quad (1.13)$$

Beranek recomienda que el valor medio de C_{80} para 500 Hz, 1kHz, y 2kHz en una sala vacía sea:

$$-4dB \leq C_{80} \leq 0dB$$

1.3.4.6 Claridad de la voz (C_{50})

Es la relación entre la energía sonora que llega dentro de los primeros 50 ms a partir de la llegada del sonido directo y la energía que llega luego de los primeros 50 ms, medidos en las bandas desde 125 Hz y 4kHz.

$$C_{50} = \frac{\text{Energía hasta } 50ms}{\text{Energía a partir de } 50ms} [dB] \quad (1.14)$$

Los valores recomendados de C_{50} en toda la sala son $C_{50} \geq 2 dB$.

1.3.5 ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

La finalidad de acondicionar acústicamente un determinado recinto es lograr que el sonido proveniente de una fuente o fuentes sea irradiado por igual en todas direcciones logrando un campo sonoro ideal. Esta uniformidad no siempre se consigue y, la acústica arquitectónica, intenta aproximarse a este ideal a través de ciertas técnicas que aprovechan las cualidades de absorción o reflexión de los materiales de construcción usados como revestimientos interiores de techos, paredes, suelos y de los objetos u otros elementos presentes en el recinto. Cosas que no parecen importantes como la colocación o eliminación de una moqueta, una cortina o un panel, son cruciales y pueden cambiar las condiciones acústicas de un recinto.

1.3.6 MATERIALES Y ELEMENTOS ACÚSTICOS

Una parte importante en el diseño y acondicionamiento acústico, luego de tener el volumen y forma del recinto, es la correcta selección de los materiales que se van a utilizar para obtener el tiempo de reverberación óptimo para la sala. Los materiales que se escojan, ayudarán a tener una difusión adecuada del sonido en el recinto así como crear primeras reflexiones suficientes.

Dependiendo de los elementos que se utilicen se podrá tener diferentes tipos de efectos sobre las ondas sonoras, por ejemplo:

- Absorción de sonido
- Reflexión de sonido
- Difusión de sonido

1.3.6.1 Materiales Absorbentes Acústicos

Todos los materiales encontrados en un recinto ofrecen un cierto grado de absorción sonora dependiendo de su densidad y porosidad principalmente, mientras mayor es su porosidad y menor su densidad mayor será la absorción producida. La calidad acústica de local dependerá de cuánta reducción de energía sonora ofrezcan todas sus superficies en conjunto. Por ejemplo, en el

caso de un teatro, los materiales que ofrecen mayor absorción son las butacas, la audiencia, todos los materiales absorbentes selectivos como resonadores colocados en partes específicas del lugar y en menor grado todo tipo de material o juntas que puedan exponerse a vibración, el aire, y todos los materiales de construcción no porosos rígidos como el hormigón y madera. El sonido incidente sobre el material es atrapado por éste debido a su superficie rugosa o porosa, provocando que la onda choque internamente hasta transformarse completamente en calor.

Para obtener un valor real de la absorción producida por un material es importante determinar su coeficiente de absorción el cual varía con la frecuencia. La única manera de obtener el coeficiente de absorción de algún objeto específico, es midiéndolo dentro de una cámara anecoica. Existen tablas publicadas con valores de los coeficientes de absorción de la mayoría de materiales de construcción y diseño, encontrados en recintos acústicos. En la siguiente tabla (1.2) se puede observar coeficientes de absorción de algunos materiales en función de la frecuencia.

Tabla 1.2 Tabla de coeficientes de absorción para diversos materiales.¹³

Material	Coeficiente de absorción α . Frecuencias en Hz					
	125	250	500	1 k	2 k	4 k
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m ²	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m ²	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m ² fruncida al 50%	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 25 mm	0,15	0,25	0,40	0,50	0,65	0,70
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 50 mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 25 mm	0,20	0,40	0,80	0,90	1,00	1,00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 50 mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04
Panel cielorraso Spanacustic (Manville) 19 mm	–	0,80	0,71	0,86	0,68	–
Panel cielorraso Acustidom (Manville) 4 mm	–	0,72	0,61	0,68	0,79	–
Panel cielorraso Prismatic (Manville) 4 mm	–	0,70	0,61	0,70	0,78	–
Panel cielorraso Profil (Manville) 4 mm	–	0,72	0,62	0,69	0,78	–
Panel cielorraso fisurado Auratone (USG) 5/8”	0,34	0,36	0,71	0,85	0,68	0,64
Panel cielorraso fisurado Cortega (AWI) 5/8”	0,31	0,32	0,51	0,72	0,74	0,77
Asiento de madera (0,8 m ² /asiento)	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Asiento tapizado grueso (0,8 m ² /asiento)	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Personas en asiento de madera (0,8 m ² /persona)	0,34	0,39	0,44	0,54	0,56	0,56
Personas en asiento tapizado (0,8 m ² /persona)	0,53	0,51	0,51	0,56	0,56	0,59
Personas de pie (0,8 m ² /persona)	0,25	0,44	0,59	0,56	0,62	0,50

¹³ Tabla tomada de Acústica y Sistemas de Sonido, Miyara, Federico, página 47.

Uno de los materiales comunmente utilizados para la absorción de sonido es la lana de vidrio por ser más económico, también es común encontrar lana mineral con la desventaja de tener un costo elevado. La cantidad de absorción y rango de frecuencias afectadas depende del espesor y densidad del material. También existen materiales absorbentes especialmente diseñados para este fin, de espuma de poliuretano o melamina, a estos se lo conoce comúnmente como sonex; poseen una estructura de cuñas salientes lo cual funciona como una trampa de sonido, es decir que el sonido que no haya sido absorbido al chocar con una cuña es reflejado hacia la cuña adyacente así atenuándola en mayor grado, ésto se puede ver en la figura 1.12.

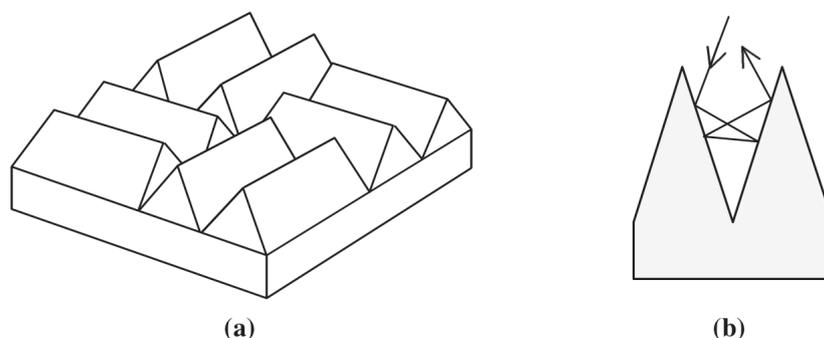


Figura 1.12 a. Material absorbente de espuma de poliuretano en forma de cuñas anecóicas, b. Forma en la que las cuñas actúan sobre la onda logrando mayor absorción.¹⁴

Una forma de obtener mayor absorción es mediante la creación de cámaras de aire detrás de los materiales absorbentes, por ejemplo para los techos se puede suspender cielorraso de materiales como fibras minerales, lana de vidrio, corcho, etc., a cierta distancia de la losa así creando un espacio de aire, mientras mayor sea la cámara de aire mayor será la absorción producida y mucho mejor si se rellena el espacio con algo de lana mineral o de vidrio.

El tratamiento sobre pisos normalmente se lo realiza con alfombras, y es mejor si bajo la alfombra se coloca materiales porosos como fibra vegetal.

¹⁴ Figura tomada de Acústica y Sistemas de Sonido, Miyara, Federico, página 53.

Algunas butacas están diseñadas para proporcionar la misma cantidad de absorción que una persona, de esta manera si el auditorio no se llena tendría una absorción parecida a que si estuviera con un número menor de personas que al de su capacidad total.

En estudios de grabación, radiodifusión y en teatros, se puede crear una acústica variable ubicando paneles movibles, cortinas o puertas corredizas que oculten o dejen al descubierto paredes recubiertas con algún tipo de material absorbente o viceversa.

1.3.6.2 Absorción de Personas y Sillas.

Se considera al público como un material absorbente extra al momento que el auditorio de encuentra lleno. Para mantener la acústica de un local casi constante se fabrican sillas que tienen un coeficiente de absorción parecido al de una persona, de esta manera brindan la misma absorción si es que el auditorio no se llena. La absorción total de público viene dada por:

$$A_p = NA_{pp} \text{ [sabines]} \quad (1.15)$$

Donde:

A_{pp} = absorción de una persona en sabines.

N= Número de personas.

A continuación se muestra una tabla de coeficientes de absorción de una persona en diferentes situaciones:

Tabla 1.3 *Coefficientes de absorción para una persona.*¹⁵

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Persona de pie con abrigo	0,17	0,41	0,91	1,3	1,43	1,47
Persona de pie sin abrigo	0,12	0,24	0,59	0,98	1,13	1,12
Músico sentado con instrumento	0,6	0,95	1,06	1,08	1,08	1,08

¹⁵ Tabla tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 109.

La absorción total de las sillas se calcula de la siguiente manera:

$$A_s = S_A \cdot \alpha_s \quad (1.16)$$

Donde:

S_A = Superficie efectiva ocupada por la sillas en m^2 , incluyendo bandas perimetrales y exceptuando zonas contiguas a paredes.

α_s = Coeficiente de absorción de una silla.

Tabla 1.4 Coeficientes de absorción de una silla de teatro común tapizada.¹⁶

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k
Silla con alto porcentaje de superficie tapizada	0,72	0,79	0,83	0,84	0,83	0,79
Silla con porcentaje medio de superficie tapizada	0,56	0,64	0,7	0,72	0,68	0,62
Silla con bajo porcentaje de superficie tapizada	0,35	0,45	0,57	0,61	0,59	0,55

1.3.6.3 Montaje de materiales absorbentes.

En el montaje de los materiales acústicos se debe tomar en cuenta algunos parámetros, por ejemplo uno importante tiene que ver con la distancia del material a la pared sobre la cual se ubicará, que dependerá básicamente de la longitud de onda de la frecuencia a la cual se pretende atenuar. Si se ubica el material directamente sobre la pared que generalmente será mas rígida, esto no permitirá un movimiento libre de las moléculas de aire, mientras se va alejando de la pared el movimiento de las partículas irá incrementándose hasta llegar a su máximo cuando la distancia sea igual a $\lambda/4$ (λ = longitud de onda). Esto quiere decir que es mucho más conveniente ubicar el material alejado de la pared una distancia minima de $\lambda/4$, y así se obtendrá una eficiencia mayor en la absorción. Se tiene la fórmula siguiente para calcular la frecuencia a tratar en función de la distancia del material a la superficie sobre la que se montará:

$$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4d} \quad (1.17)$$

¹⁶ Tabla tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Isbert, página 111.

Donde:

f_n = Frecuencia a tratar

d = Distancia entre el material y el material

c = Velocidad del sonido

No todas las frecuencias se benefician de esta separación. Una manera de asegurarse de tener una absorción adecuada en la frecuencia de interés es escogiendo el espesor del material acústico, el que deberá ser igual a $\lambda_{m\acute{a}x}/4$, aunque en la práctica es suficiente con $\lambda_{m\acute{a}x}/10$.

Es necesario proteger a los materiales acústicos, debido a que generalmente son blandos, y en el caso de la lana de vidrio, sus partículas son perjudiciales al tacto y a la respiración. Para esto se deberá recubrir con un material acústicamente transparente que influya poco en la absorción; en el mercado se encuentran materiales fibrosos los cuales son muy efectivos.

Tabla 1.5 *Tipos de montaje de materiales acústicos.*¹⁷

Montaje	Descripción
Tipo A	El material acústico se apoya directamente contra una superficie rígida.
Tipo B	El material acústico se cementa en puntos aislados a una placa de yeso dejando un mínimo espacio de aire (3 a 4 mm) entre ambos.
Tipo C	El material acústico se encuentra protegido por una placa perforada directamente yuxtapuesta al mismo, y el conjunto separado por una distancia en mm especificada después de la "C".
Tipo D	El material se encuentra separado por una distancia en mm (especificada luego de la "D") de la superficie a tratar, por medio de listones de madera.
Tipo E	El material se instala colgando de un cielorraso por medio de una suspensión metálica, dejando un espacio de aire cuyo espesor en mm se especifica a continuación de la "E".
Tipo F	El material se encuentra montado sobre una chapa metálica a una distancia en mm especificada luego de "F".

¹⁷ Tabla tomada de Control de Ruido, Miyara, Federico, página 7-5.

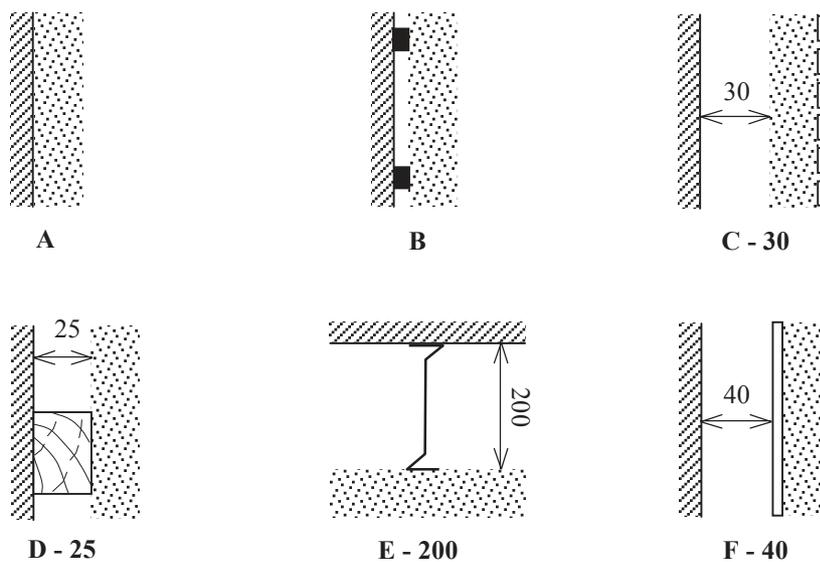


Figura 1.13 Tipos de montaje de materiales acústicos.¹⁸

En la tabla 1.5 se explican diferentes tipos de montaje de materiales absorbentes, y en la figura 1.13 se muestran los mismos montajes de manera gráfica.

Otro criterio a tomar en cuenta es que al ubicar un material absorbente sobre una superficie reflectante tendrá como efecto una mayor absorción debido a que la energía que no sea absorbida traspasa el material, choca y se refleja sobre la superficie reflectante y regresa al material absorbente siendo mayormente atenuada.

1.3.6.4 Influencia de la Densidad

Se debe tomar en cuenta también que la absorción depende también de la densidad del material, siempre y cuando la densidad del material este bajo los 100 kg/m^3 , mientras mayor sea la densidad mayor será el coeficiente de absorción. Pasado este valor de densidad, la absorción de nuevo empezará a disminuir.

¹⁸ Figura tomada de Control de Ruido, Miyara, Federico, página 7-5.

1.3.6.5 Absorción de Superficies Vibrantes.

También se pueden considerar objetos absorbentes a toda superficie que esté expuesta a sufrir vibración; en el caso de los materiales absorbentes comunes, éstos transforman la energía sonora en energía calórica, al contrario de este caso en el cual las superficies que vibran transmiten el sonido hacia el exterior lo cual se puede tomar como absorción de las ondas incidentes sobre la superficie. El principio de funcionamiento se compara con el de un sistema resorte-masa.

A continuación se presenta una expresión la cual entrega un coeficiente de absorción aproximado de una superficie vibrante:

$$\alpha = \left(\frac{2\rho_0 c}{\omega M} \right) \quad (1.18)$$

Donde:

ρ_0 = Densidad del aire = 1,18 [kg/m³]

ω = 2 π f

M = masa por unidad de superficie [Kg/m²]

c = Velocidad del sonido en el medio.

1.3.6.6 Resonadores

También se puede construir elementos absorbentes dedicados para cierto rango de frecuencias como son los resonadores. Son especialmente utilizados para bajas frecuencias, ya que para estos rangos se requeriría gran cantidad de material absorbente, además de gran cantidad de espacio físico, debido al tamaño de la longitud de onda. Los resonadores poseen una absorción máxima a una cierta frecuencia (frecuencia de resonancia) para la cual hayan sido diseñados, por lo que son efectivos en recintos donde haya problemática con una frecuencia específica. Existen varios tipos de estos:

- **De membrana o diafragmático:** Formado de un panel de material poroso y flexible distanciado de la pared, formando una cámara de aire, soportado por listones y totalmente sellado. La frecuencia de resonancia esta dada por:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho_o}{d \cdot \rho_{\text{sup}}}} = \frac{60}{\sqrt{d \cdot \rho_{\text{sup}}}} \quad (1.19)$$

Donde:

c = Velocidad del sonido [m/s]

d = Distancia de la pared hasta el panel [m]

ρ_{sup} = Densidad superficial del panel [kg/m^2]

ρ_o = Densidad del aire = 1.18 [kg/m^3]

- **Resonador de Helmholtz:** Formado por una cavidad totalmente cerrada de aire y conectada con el exterior mediante un cuello o abertura. La frecuencia de resonancia viene dado por:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{M_A \cdot C_A}} \quad [\text{Hz}] \quad (1.20)$$

- **Resonador múltiple de paneles perforados o ranurados:** Se compone de un panel de material flexible y poroso con perforaciones o ranuras en toda su superficie a una distancia determinada entre cada una de ellas y separada la de la pared una cierta distancia, formando una cavidad de aire, soportada por listones y totalmente cerrada a sus laterales.

Todos los parámetros de medidas de estos resonadores son calculados y dependen netamente de la frecuencia de resonancia para la cual están siendo diseñados. El material flexible utilizado para la construcción de estos resonadores comúnmente es la madera.

1.3.6.7 Reflectores de Sonido

El diseño de elementos reflectantes ayuda a crear la aparición de reflexiones útiles en la zona del público de un recinto. Estos elementos son construidos de materiales lisos, no porosos y rígidos que tienen la capacidad de reflejar la mayor cantidad de sonido incidente sobre ellos.

La utilización de elementos reflectores es únicamente necesaria en salas destinadas para el habla y a la música no amplificada como por ejemplo salas de música sinfónica y auditorios.

Hablar de reflexiones útiles quiere decir todas aquellas que llegan al receptor entre los primeros 50 ms a partir de la llegada del sonido directo, las cuales ayudan a incrementar la inteligibilidad de la palabra y la sonoridad.

En el caso de salas de conciertos se mantiene el criterio anterior con la diferencia de que el tiempo de las reflexiones que llegan al receptor aumenta a 80 ms. Las reflexiones en este caso ayudan a la sonoridad y a la claridad musical; además si estas reflexiones vienen de las paredes laterales existe un aumento del grado de impresión espacial.

De todas las superficies de un recinto, solamente algunas son especialmente diseñadas para producir reflexiones hacia la zona de la audiencia, el resto de superficies, sean absorbentes o reflectantes, únicamente ayudan a obtener el tiempo de reverberación deseado para la sala. Si las superficies reflectantes son ubicadas de una manera no adecuada y sin estudio pueden provocar efectos contraproducentes como por ejemplo ecos.

Reflectores curvos

Los reflectores que poseen un perfil convexo, tienen la capacidad de dispersar el sonido sobre una mayor área que los reflectores planos. Para que un reflector convexo tenga un funcionamiento óptimo, su radio de curvatura debe

ser mayor a 5 metros aproximadamente; para radios menores el reflector actúa como difusor de sonido.

Los rayos reflejados sobre la superficie de este tipo de reflectores son especulares es decir que los ángulos de incidencia y reflexión son iguales y además éstos toman la dirección del radio de curvatura del mismo en cualquier punto de la superficie.

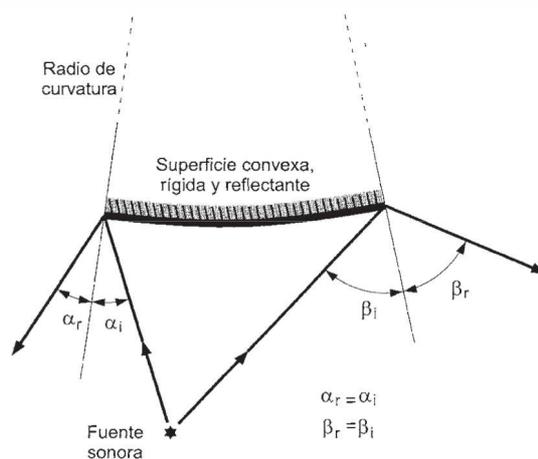


Figura 1.14 Obtención gráfica de las reflexiones especulares¹⁹

1.3.6.8 Difusores de Sonido

La difusión del sonido en un recinto se logra ubicando superficies que dispersen el sonido de manera uniforme y en múltiples direcciones. La diferencia entre un difusor y un reflector de sonido está en que el difusor logra una energía sonora elevada y reparte las reflexiones en todas las direcciones, mientras el reflector logra reflexiones especulares y concentra la energía en un punto específico.

El uso de difusores es amplio es salas de conciertos donde no existe amplificación electroacústica, principalmente para que la energía de campo reverberante llegue a los espectadores por igual desde todas las direcciones del recinto. También son utilizados para eliminar focalizaciones y coloraciones de sonido, ecos, y desplazamiento de la fuente sonora.

¹⁹ Figura tomada de Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Antoni, página 120.

1.3.7 CRITERIOS DE DISEÑO

1.3.7.1 Criterios para prevenir ecos, ecos flotantes y focalizaciones de sonido.

- Colocar superficies convexas sobre las superficies conflictivas, si se pretende que sean reflectores convexos se debe respetar la regla de que el radio de curvatura no sea inferior a más o menos 5 metros para lugares pequeños.
- Dar inclinación de 5 grados a una de las paredes entre las cuales se produce eco.
- En el caso de que el techo sea el culpable de una focalización de sonido de se deberá ubicar material absorbente bajo el mismo, si no es suficiente con esto se podría ubicar superficies convexas reflectantes o nubes.
- Para evitar eco flotante de se debe evitar paredes reflectantes paralelas, ubicando material absorbente en una o ambas, dando una inclinación a una de ellas o ubicando difusores de sonido.
- Para recintos elípticos y circulares que provocan focalización de sonido se debe ubicar difusores policilíndricos sobre toda la superficie circular con un radio de curvatura no mayor a 5 metros y un espesor máximo de 0,20 metros. Evitar recintos circulares y elípticos.
- Colocar material absorbente sobre las superficies donde se ubica el problema, y colocar un material acústicamente transparente para proteger el material absorbente. Ésta debe ser la última alternativa, al hacer esto se provoca que cambie el espectro de frecuencias de la sala.

1.3.8 MEDICIONES ACÚSTICAS

Las mediciones acústicas nos permiten realizar evaluaciones sobre varios aspectos del sonido. Por un lado nos dan información sobre las características acústicas de un recinto o un sistema electroacústico de audio para lograr corregir cualquier problema acústico que se aprecie; en otro aspecto ayudan a evaluar espacios donde existe ruido excesivo para poder tener un indicador de cuánto daño auditivo puede estar causando sobre las personas que se

encuentran en dichos medios constantemente, e implementar medidas correctivas.

1.3.8.1 Instrumentos de Medición

El principal instrumento de medición es el sonómetro. Otro elemento importante es el calibrador acústico que comúnmente genera un tono puro de 1 kHz a 94 dB. La calibración acústica del sonómetro debe realizarse según las indicaciones del fabricante.

Actualmente también se tienen otros instrumentos de medición acústica a través de programas de computación. Para su utilización se requiere de un computador portátil, un micrófono de medición y una interfaz de audio. Los programas mas conocidos en el mercado son el SIA SMAART Live, SAT Live, SIM de Meyer Sound, SpectraLab, SpectraFoo y Mac FOH. Además de éstos, se tienen programas para predicción acústica de un recinto con instalación de sistemas electroacústicos como el EASE.

1.3.8.2 Filtros de Ponderación de Frecuencia

La sonoridad percibida por el oído humano es totalmente subjetiva y depende de varios factores psicoacústicos. Hay que tomar en cuenta que el oído humano no posee la misma sensibilidad para cada frecuencia del espectro, es mucho más sensible entre las frecuencias de 2 kHz y 5 kHz, de esta manera un tono puro de 200 Hz tendrá un efecto diferente sobre nuestro oído que un tono puro de 2 kHz al mismo NPS el cual es más pernicioso. Además, la diferencia de la sensibilidad es más pronunciada en bajos niveles de presión que a altos niveles de presión sonora.

La respuesta de un micrófono de medición es totalmente plana para todas las bandas de frecuencia desde 20 Hz hasta 20 kHz, por el contrario como ya se dijo, el oído no posee igual sensibilidad para cada frecuencia. Para esto se crearon las curvas de ponderación que son filtros que se aplican al audio medido para tener una emulación de la respuesta del oído al espectro de frecuencias. En la figura 1.14 se muestran dichas curvas que se clasifican en A,

B, C y D, cada una tiene una aplicación diferente, siendo la ponderación A la que mejor emula la respuesta del oído; la ponderación D esta dirigida para mediciones de ruido aeronáutico.

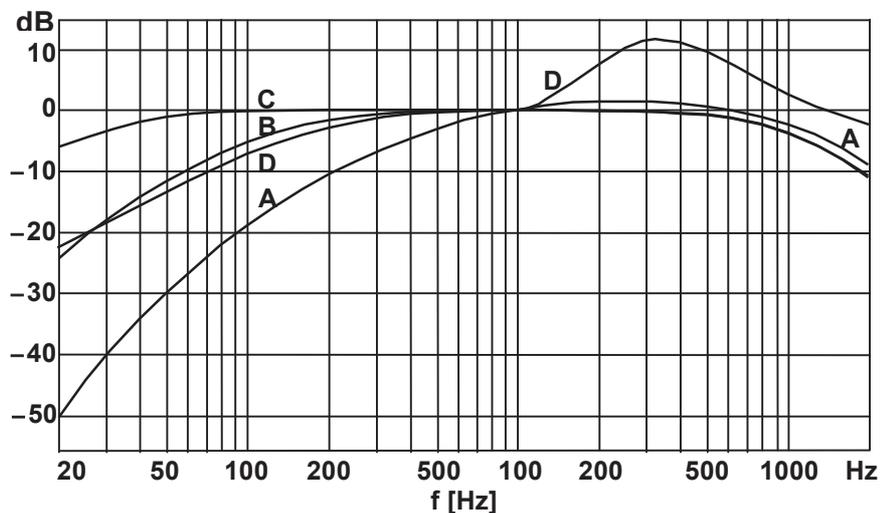


Figura 1.15. Curvas de ponderación A, B, C y D para cada frecuencia.²⁰

1.3.9 SISTEMAS ELECTROACÚSTICOS

1.3.9.1 Line Arrays (Arreglos Lineales)

El arreglo lineal fue dado a conocer por Harry Olson en su libro “*Acoustical Engineering*” en 1957, y lo describió como un “grupo de fuentes de radiación omnidireccional dispuestos en línea recta, muy cercanos uno de otro y operando con igual fase y amplitud”. Hoy en día los “*Line Arrays*” son los sistemas de refuerzo sonoro que más se utilizan, especialmente cuando se requiere cubrir largas distancias debido a que tienen una cobertura vertical bastante direccional y producen una proyección de sonido muy efectiva.

En la práctica el uso de un arreglo lineal curvo ayuda a tener una cobertura vertical mucho mayor, calculando que las cajas más altas del arreglo lleguen a la mayor distancia de cobertura y las más bajas a las zonas más cercanas. Por estas razones estos sistemas ayudan a tener un mejor control direccional de las frecuencias, por lo que en recintos muy complejos con tiempos de reverberación muy altos se puede dirigir de mejor manera el sonido para las

²⁰ Figura tomada de Control de Ruido, Miyara, Federico, página 4-3.

zonas donde realmente se requiere cobertura, minimizando reflexiones sobre superficies no absorbentes, especialmente en altas frecuencias.

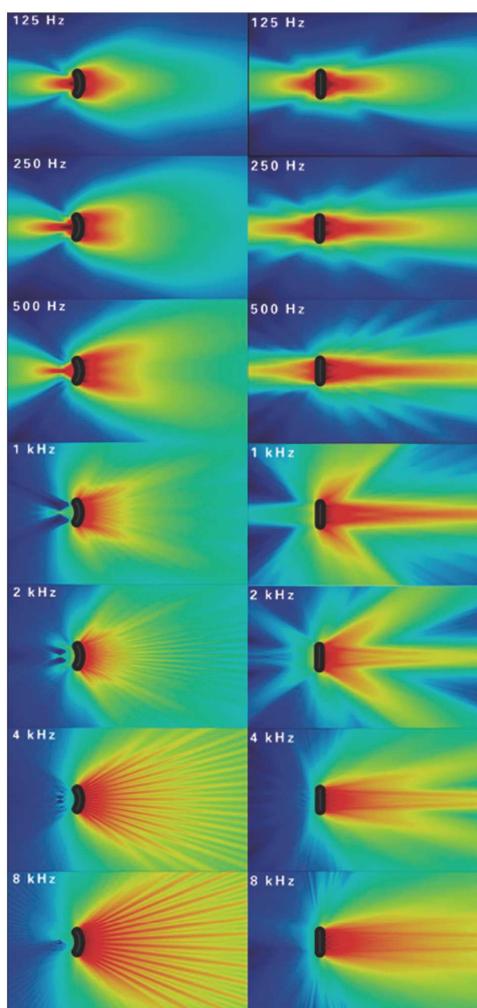


Figura 1.16. Gráficas de NPS de un arreglo lineal para bandas de octava. A la izquierda se muestra un arreglo con ángulos de inclinación, a la derecha un arreglo recto. Se observa la direccionalidad que se puede llegar a tener con un sistema de este tipo.²¹

1.3.9.2 Propagación del sonido en un arreglo lineal

Los arreglos lineales trabajan mediante interferencia constructiva y destructiva de las ondas. Si se toma un cono de 12" se sabe que su direccionalidad cambia en función de la frecuencia que reproduce, a menor frecuencia más omnidireccional se vuelve. Al juntar dos de estos altavoces alimentados por la misma señal se obtiene un patrón de radiación muy diferente que tener uno solo. En el eje de estos dos se obtiene una interferencia constructiva sumando

²¹ Tomado del Documento “Line Arrays, Theory, Fact and Myth”, Meyer Sound Labs. Inc.

6dB en el mejor de los casos, mientras que en puntos fuera del eje se tiene interferencia destructiva, es decir cancelaciones, teniendo un menor nivel de presión sonora. Los altavoces de un arreglo lineal están espaciados una distancia específica dependiendo de la frecuencia más baja que se reproduzca, de esta forma se logra una interferencia constructiva en el eje del arreglo y una interferencia destructiva o cancelación a los costados del mismo.

Debido a que para las altas frecuencias, la distancia máxima de separación entre un *driver* y otro resulta ser tan pequeño para mantener la directividad, se crearon las guías de onda, los cuales son difusores acoplados a *drivers* de compresión. Las guías de onda vienen a ser cualquier estructura física para el guiado de ondas sonoras, que poseen un medio elástico (aire) para soportar la propagación. En el caso de los arreglos lineales, son canales por los cuales el sonido en altas frecuencias viaja; poseen la separación necesaria uno de otro para mantener suma máxima en su eje y cancelación a los costados. Un punto importante es que, además de que deben mantener esta separación también deben mantener la misma fase, para esto cada fabricante ha creado su propio diseño de guía de onda.

1.3.9.3 Fase

La fase indica la situación instantánea en el ciclo, de una magnitud que varía cíclicamente. Un valor realmente útil es la diferencia de fase o desfase entre dos sitios, instantes u ondas.

1.3.9.4 Importancia de la fase

Ya se explicó la manera como trabajan los arreglos lineales, pero para que esto funcione es imperativo que todos los elementos del arreglo estén operando en fase, si esto no se cumple el diseño que logra interferencia destructiva y constructiva no funcionará de manera correcta. De aquí se deriva la importancia del diseño de las guías de onda, las cuales deben lograr que cada uno de los canales de la guía emita la onda en igual fase y amplitud.

2 DESCRIPCIÓN DE LA SALA. PROBLEMA ACÚSTICO

2.1 ARQUITECTURA DE LA SALA

2.1.1 GEOMETRÍA DE LA PLANTA

El Ágora de la Casa de la Cultura es un recinto destinado a eventos culturales de toda índole. La estructura perimetral es una semicircunferencia que se podría comparar con una sala de forma de herradura teniendo al lado oeste de la sala el escenario, el cual está rodeado de paredes de concreto semicirculares en los laterales del mismo, a manera de reflectores acústicos. La pared posterior del escenario es una pared simple de concreto plana. El escenario se levanta sobre el piso con una altura de 1,13 metros, a partir de los 7,30 metros del borde del escenario empieza la primera fila de graderíos que tienen una inclinación de 7,4 grados con respecto al piso más bajo de recinto.

2.1.2 PUERTAS DE ACCESO

El ingreso principal del ágora es por el lado este de la misma, es decir justamente al otro extremo del escenario. El ingreso hacia el escenario es por el lado izquierdo del mismo. Los accesos desde el escenario hacia los graderíos son por el pasillo sur del recinto. Todas son puertas metálicas, simples con juntas y no se encuentran bien selladas. Ver anexo 3.

2.1.3 CUBIERTA DEL RECINTO

La cubierta del ágora es una estructura de arcos de sección triangular de aluminio que soporta una membrana sintética que cubre una superficie de 5.300 m², dejando pequeños espacios sin recubrir entre la cubierta y las paredes laterales.

2.1.4 ESCENARIO

El escenario esta a 1,13 metros de altura por sobre el nivel más bajo del piso del recinto. Sobre éste se encuentra una estructura metálica de secciones triangulares sin cubierta, que abarca toda la superficie del escenario y que soportan 4 telones laterales. No posee paredes laterales. La superficie total del

piso del escenario es de 377 m², formado de tablonces de madera sobre concreto.

2.1.5 GRADERIOS Y PASILLOS

Los graderíos poseen forma de abanico con un radio de curvatura de 46 metros, formados por gradas de concreto cubiertas de madera, separados en 6 secciones por dos pasillos longitudinales y uno transversal de 2 metros de ancho, todos los pasillos son de concreto. Los graderíos no poseen separación para cada una de las ubicaciones y la separación entre cada una de las filas es de 40 cm. La superficie total de los graderíos es de 1.753,75 m², y de los pasillos es de 838,39 m².

2.1.6 CAPACIDAD DE AUDIENCIA

Al no poseer butacas y tampoco separaciones entre cada una de las ubicaciones, tomando en cuenta que cada asistente ocupa aproximadamente 50 cm en el graderío, se calcula que el ágora posee un capacidad de 3.993 espectadores.

2.1.7 VOLUMEN DE LA SALA

El volumen total de la sala incluido el que ocupa la cubierta es de 72.795 m³. El volumen solamente de la cubierta es de 25.400 m³.

2.1.8 PLANOS DEL RECINTO. CORTE LATERAL Y PLANTA.

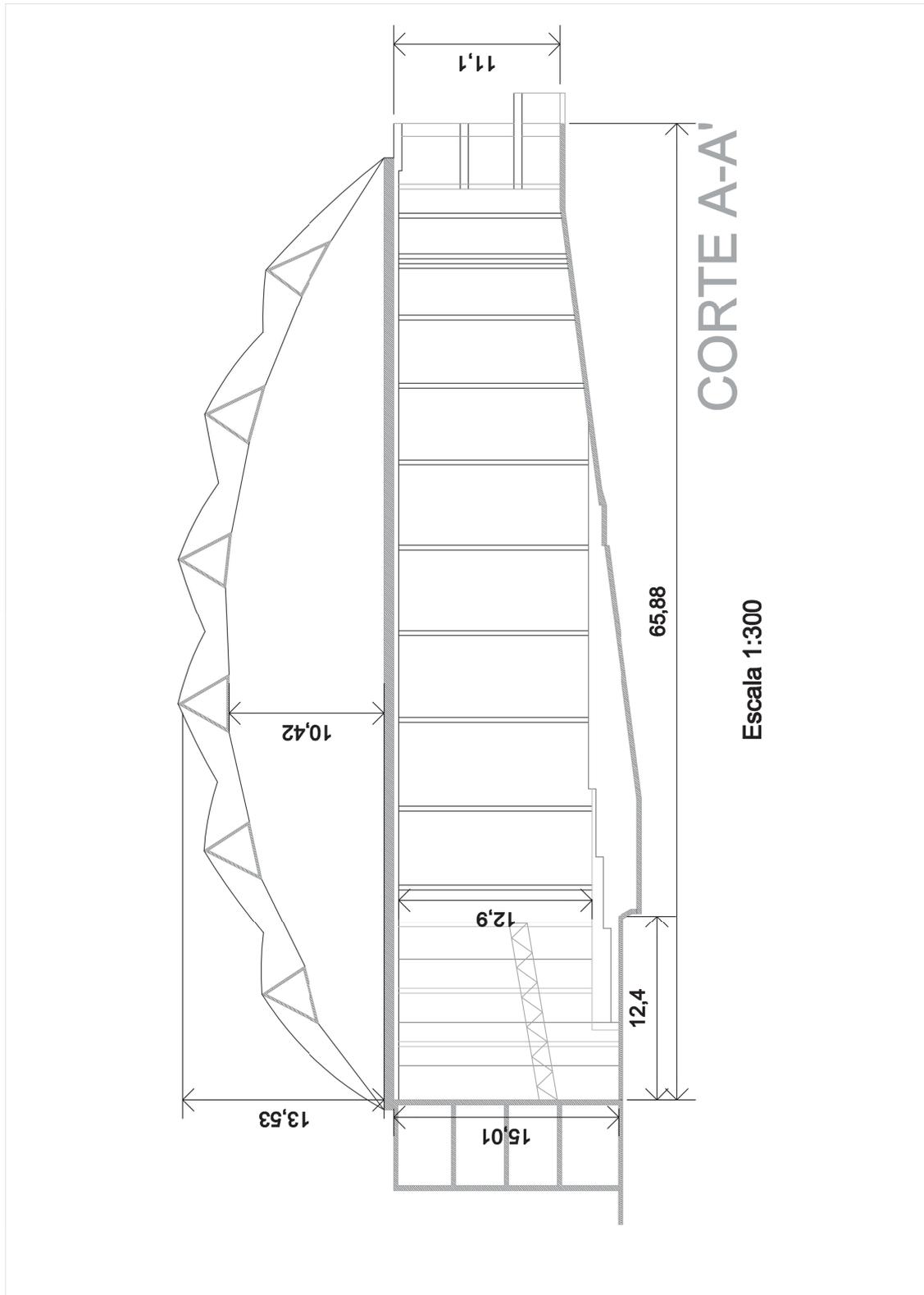


Figura 2.1. Corte lateral.

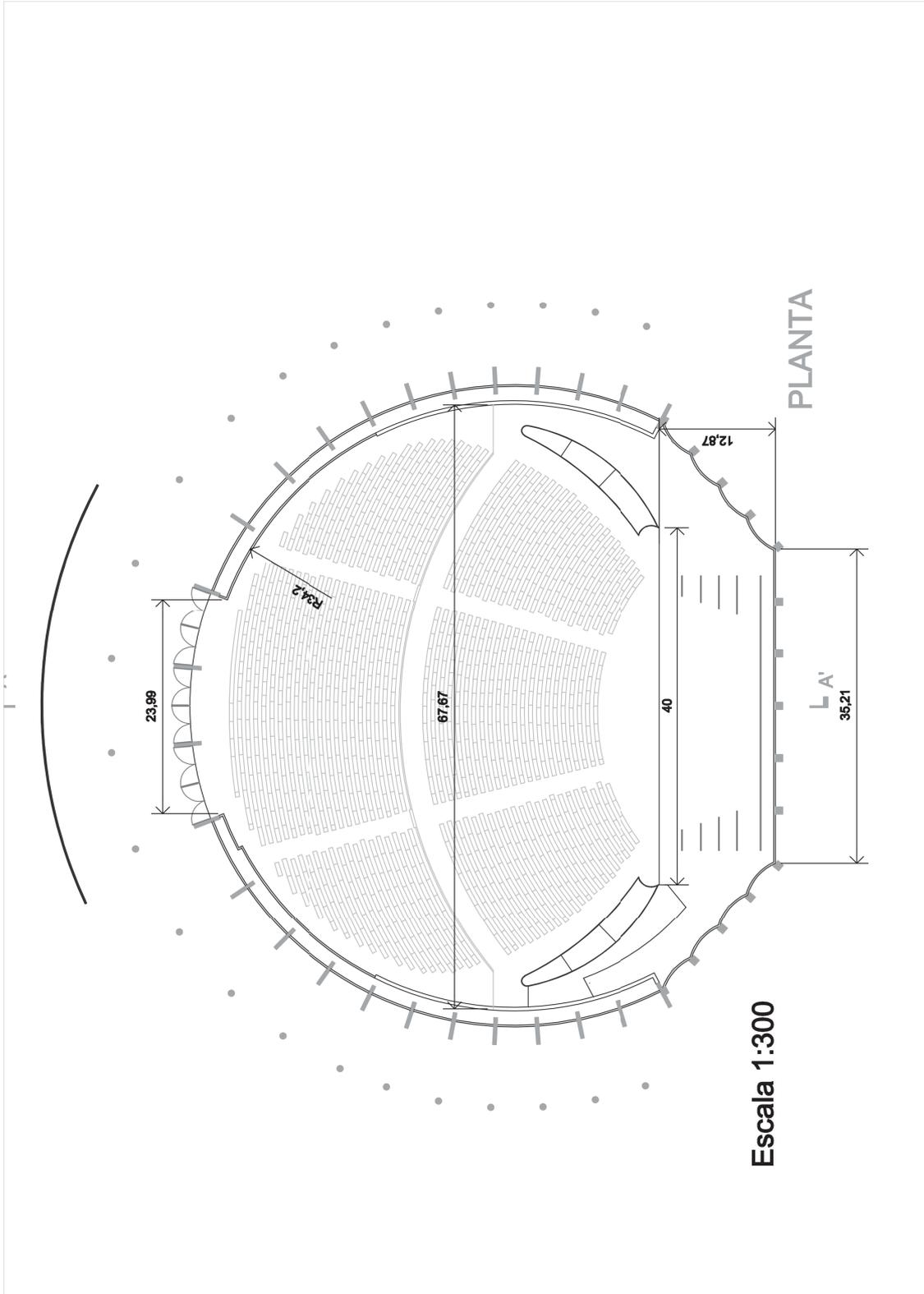


Figura 2.2. Vista de la planta.

2.2 DISEÑO ACÚSTICO ACTUAL DEL RECINTO

2.2.1 SUPERFICIES DE LAS PAREDES DE LA PLATEA

Las superficies de las paredes que forman parte de la platea, poseen una cubierta de esponja común que descansa sobre una malla soportada sobre una estructura metálica en forma de paralelepípedo, con una cámara de aire de 30 cm de distancia entre la pared y la esponja, la cámara de aire no está herméticamente sellada. La esponja se encuentra recubierta de una tela de fibra transparente acústicamente de color verde. Esta estructura ocupa una superficie de 1686,16 m².

En las superficies de paredes laterales del recinto se encuentran estructuras de concreto con forma de prismas a manera de difusores acústicos, ubicados en dos filas paralelas horizontales. La toma de medidas de estas estructuras se hizo bastante complicada por lo que no se pudo obtener la superficie exacta que ocupan. Se puede calcular que aproximadamente ocupan unos 100 m².

2.2.2 ADECUAMIENTO EN ESCENARIO

Los únicos materiales que pueden ayudar en la acústica del local son 4 telones de color rojo pesados que están suspendidos de la estructura sobre el escenario antes descrito, además posee un telón negro ligero en la parte posterior del escenario que está suspendido de la misma estructura metálica.

2.2.3 MATERIALES ACÚSTICOS EXISTENTES

- Telones
- Esponja común
- Madera del piso del escenario y graderíos
- Difusores de concreto

2.3 PROBLEMA ACÚSTICO

En este punto se van a exponer los problemas acústicos que según músicos, personal del teatro, ingenieros de sonido y de sistemas de audio con amplia experiencia realizando conciertos en ese lugar, afectan al recinto. Los siguientes son:

- Demasiado tiempo de reverberación.
- Dificultad de escuchar una voz no amplificadas en cualquier punto del recinto debido a la falta de inteligibilidad.
- Según ingenieros de audio, existen problemas en la frecuencia de 250 Hz, es decir que el recinto posee una resonancia en dicha frecuencia.
- Dificultad de obtener una buena cobertura e inteligibilidad del sonido con una cantidad pequeña de equipo de amplificación de audio, esto quiere decir un arreglo lineal de 4 a 6 cajas acústicas por lado.
- El sonido de la amplificación de monitoreo en escenario se percibe con altos niveles de presión sonora en la sala.
- Se asegura que la cubierta sintética del ágora es la culpable de la mala distribución del sonido.

3 MEDICIONES ACÚSTICAS

3.1 MEDICIONES

3.1.1 EQUIPO DE MEDICIÓN

El equipo de medición que se utilizó fue el siguiente:

- Micrófono de medición *Goldline* con pedestal.
- Interfaz de audio *M-Audio Mobile Pre*.
- Computador portátil.
- *Software* de audio *Adobe Audition* con el *plug-in* *Aurora*.
- Sistema *line array* de sonorización en vivo: 4 cajas acústicas por lado más dos subgraves por lado marca *SKP*.
- Consola de mezcla de 8 canales *Mackie*.

3.1.2 DIAGRAMA DE CONEXIONES

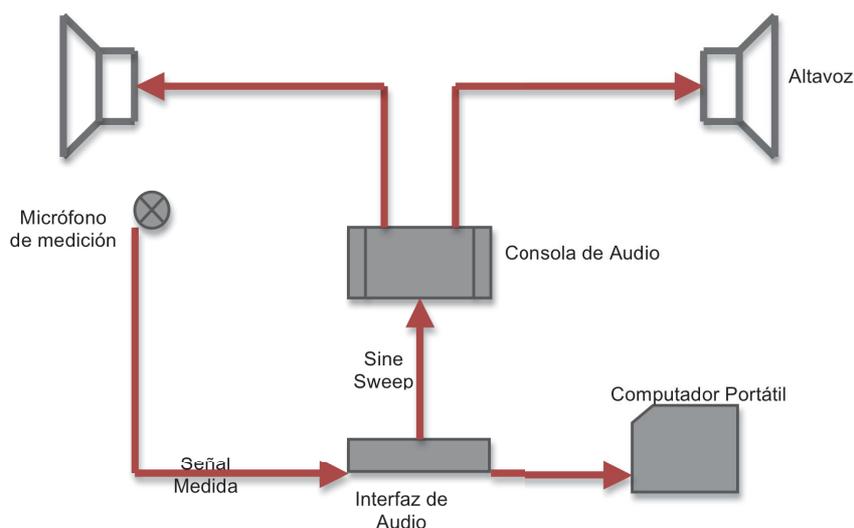


Figura 3.1 Diagrama de conexiones del equipo de medición.

3.1.3 UBICACIÓN DEL EQUIPO DE AUDIO

Como se describe en los objetivos de la propuesta de acondicionamiento, ésta se rige en base al uso de un sistema de sonorización en arreglo lineal, por lo cual las mediciones se realizaron con un equipo de este tipo. La ubicación del sistema fue a cada lado del escenario tal y como se ubica siempre este tipo de sistemas, pero en esta ocasión no se colgó el sistema y se lo ubico al piso, con

dos subgraves y sobre éstos 4 cajas acústicas por cada lado. El sistema estuvo controlado mediante la consola de mezcla. Esta configuración del sistema de audio no es suficiente para lograr una buena cobertura de la audiencia, pero para objeto de las mediciones tomadas no representa mayor problema, ya que se tiene la fuente en la ubicación deseada y con un nivel de presión sonora suficiente para la toma de los datos.

3.1.4 MÉTODO DE MEDICIÓN

El *software* de medición *Adobe Audition* posee el *plug-in* *Aurora*, mediante el mismo se crea un barrido de frecuencias o “*sine sweep*” desde 20Hz hasta 20kHz con una duración de 60 segundos.

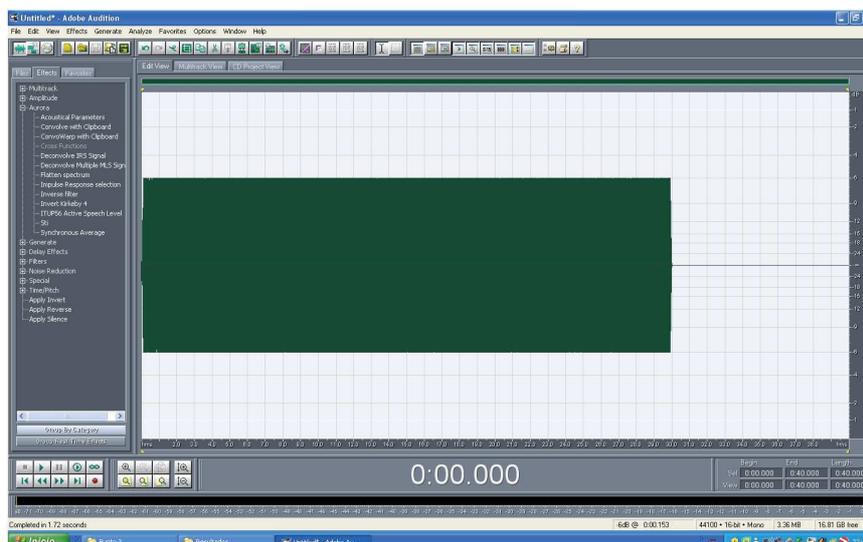


Figura 3.2 Vista del barrido de frecuencias de 60 segundos de duración.

Este *track* que se crea será reproducido por el sistema de audio y mediante el micrófono será grabado en el *software* en otro *track* distinto, esto se lo hizo en varios puntos de medición que cubrieron toda el área del recinto que a continuación se describirán. El micrófono no debe estar a menos de un metro y medio del suelo para evitar cualquier tipo de reflexiones que creen filtro peine.

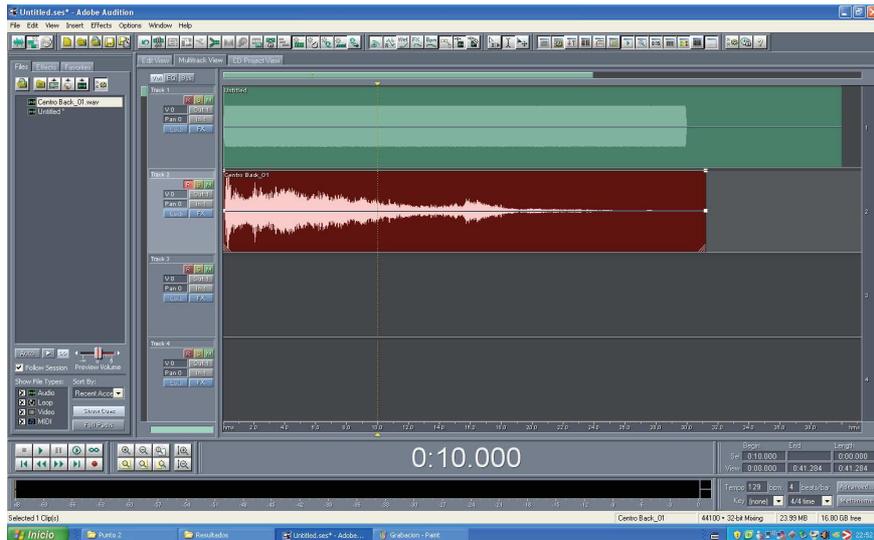


Figura 3.3 Vista de las pistas de audio medido y del barrido de frecuencias.

Luego de obtener el *track* de la medición, se lo lleva hacia la pantalla de edición y mediante el *plug-in* Aurora se realiza una convolución del audio, esto genera un impulso que contiene todo el espectro de frecuencias.

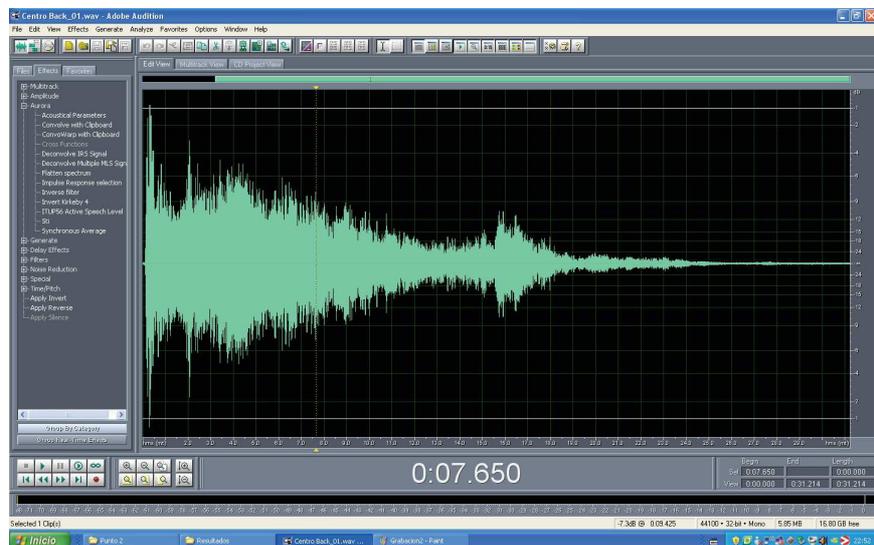


Figura 3.4 Vista del audio medido en la pantalla de edición antes de aplicar la convolución.

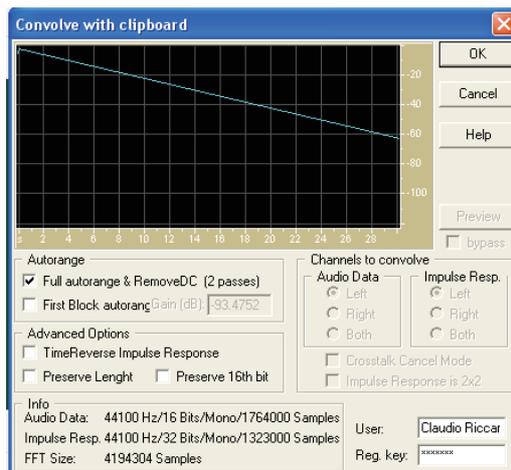


Figura 3.5 Ventana de las opciones de convolución.

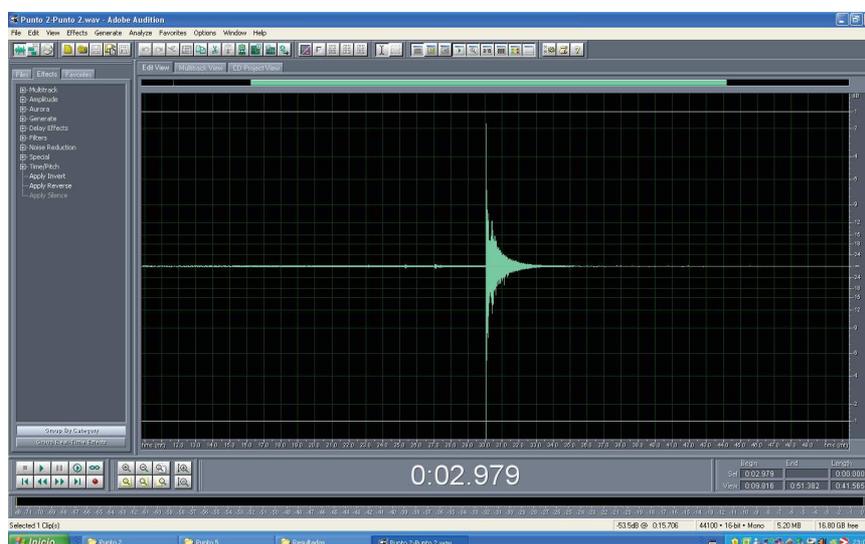


Figura 3.6 Audio aplicado la convolución. Se observa que el resultado es un impulso que contiene toda la información del barrido de frecuencias.

Teniendo el impulso, en el mismo menú de Aurora existe la opción de obtener los parámetros acústicos de dicho impulso según la norma ISO 3382-1997 (Ver Anexo 1) que incluye los siguientes parámetros acústicos:

- Señal [dB]
- Ruido de fondo [dB]
- Strength [dB]
- C50 [dB]
- C80 [dB]
- D50 [%]

- Ts [ms]
- EDT [s]
- T20 [s]
- T30 [s]
- Tuser, en este caso T60 [s]

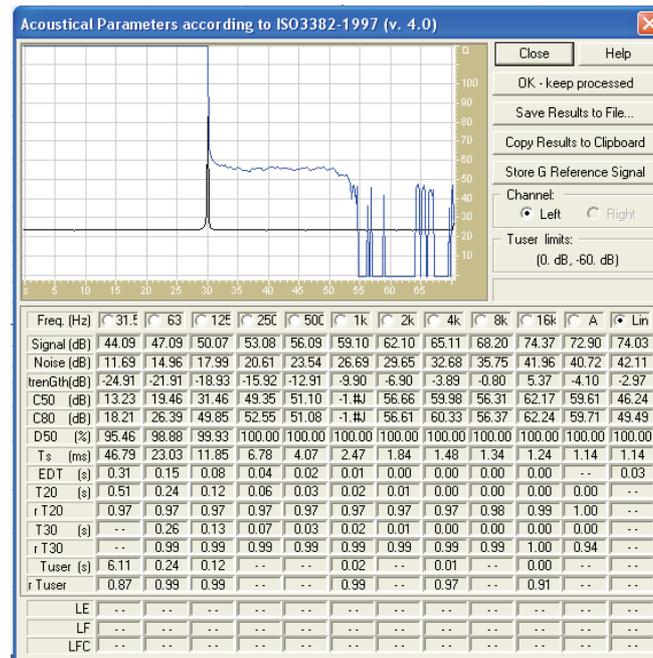


Figura 3.7 Ventana de los resultados de parámetros acústicos.

Todos estos parámetros los entrega en una tabla, los cuales son guardados como archivo de Excel. Para este estudio y plan de acondicionamiento no se necesitará todos los parámetros acústicos, únicamente haremos uso del C80, C50, EDT y T₆₀.

3.1.5 PUNTOS DE MEDICIÓN

Los puntos de medición deben escogerse, según la norma ISO 3382, de manera que cubran uniformemente todo el recinto. Se eligieron 9 puntos de medición bien distribuidos por toda el área del ágora, tomando el criterio de que si es un recinto simétrico el sonido actúa de la misma manera en el lado izquierdo que en el derecho, es decir como un espejo, de esta manera se distribuyó 3 puntos longitudinalmente, 1 punto en el centro del escenario y 5

puntos aleatorios en las demás zonas de los graderíos. En la figura 3.8 se muestra la ubicación en el plano de todos los puntos medidos.

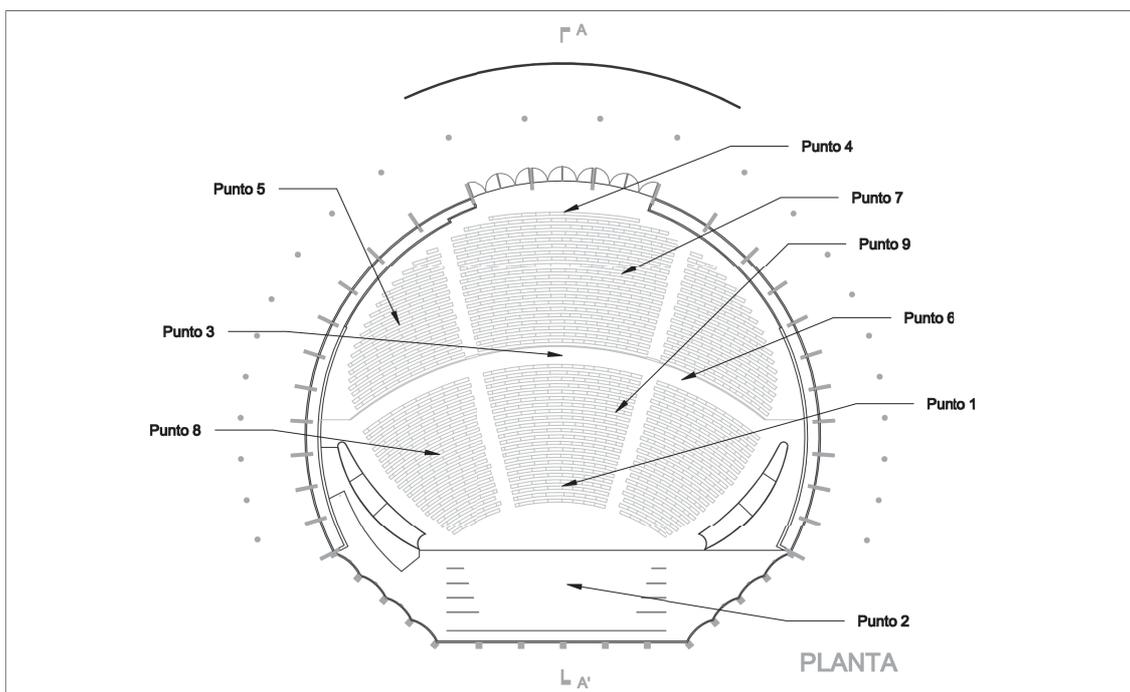


Figura 3.8 Puntos de medición tomados.

3.2 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

A continuación se presentan los resultados de nivel de señal, ruido de fondo, C50, C80, EDT y T60, obtenidos por cada punto de medición.

3.2.1 PUNTO 1

Tabla 3.1 Datos obtenidos en el punto de medición 1.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	51.31	70.34	63.63	68.06	71.71	74.87	71.50	73.72	78.91	85.28	83.11	84.21
Noise [dB]	35.43	20.52	17.45	20.44	23.20	26.14	29.17	32.11	35.25	41.39	40.21	42.43
C50 [dB]	6.74	4.35	2.34	-3.01	1.95	3.70	-3.50	3.47	12.53	24.38	5.95	6.44
C80 [dB]	7.59	5.54	2.94	-1.84	2.89	4.46	-2.52	3.86	13.83	27.61	6.54	7.09
EDT [s]	--	--	3.61	6.00	7.01	7.49	5.74	5.24	--	--	5.97	--
T60 [s]	3.01	2.60	4.37	5.38	6.49	6.81	5.29	4.17	1.19	--	5.43	5.38

3.2.2 PUNTO 2

Tabla 3.2 Datos obtenidos en el punto de medición 2.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	69.81	85.80	81.22	84.46	85.09	89.93	87.52	87.14	86.54	85.02	95.04	96.00
Noise [dB]	52.22	35.51	17.38	20.17	23.18	26.10	29.17	32.21	35.28	41.50	40.25	52.31
C50 [dB]	6.94	4.61	5.17	-2.75	-3.66	0.81	-5.27	-7.90	-9.78	-1.78	-3.81	-2.28
C80 [dB]	7.61	8.11	6.32	-1.46	-3.06	1.61	-4.50	-4.57	-3.04	4.30	-2.14	-0.64
EDT [s]	--	0.50	--	5.30	7.11	6.74	5.64	3.85	2.27	0.83	5.02	5.09
T60 [s]	4.12	5.16	4.13	5.38	6.34	6.05	5.12	3.63	1.83	0.81	5.14	5.26

3.2.3 PUNTO 3

Tabla 3.3 Datos obtenidos en el punto de medición 3.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	54.36	73.66	63.62	69.90	73.50	73.50	75.31	75.52	78.42	77.65	83.18	83.97
Noise [dB]	38.73	19.91	16.90	19.93	23.18	26.07	29.03	32.13	35.17	41.31	40.11	43.20
C50 [dB]	-2.54	-1.39	-2.59	-7.23	0.11	-7.91	-3.31	0.46	8.09	14.27	0.95	0.92
C80 [dB]	-2.23	-0.39	-2.23	-6.38	0.28	-7.42	-3.12	0.63	8.34	14.83	1.11	1.13
EDT [s]	--	1.55	3.15	5.91	6.60	6.30	4.84	3.85	--	0.02	4.47	4.24
T60 [s]	23.61	2.70	4.11	5.48	6.89	6.45	5.34	3.63	1.73	--	5.29	5.46

3.2.4 PUNTO 4

Tabla 3.4 Datos obtenidos en el punto de medición 4.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	58.67	78.93	70.11	77.51	78.51	81.47	82.75	82.83	80.85	76.20	89.29	89.73
Noise [dB]	46.90	34.54	17.10	20.01	23.40	26.24	29.12	32.17	35.29	41.50	40.24	47.77
C50 [dB]	-0.71	0.13	-7.01	-7.95	-6.12	-1.96	-0.22	0.52	4.53	8.80	0.06	-0.78
C80 [dB]	1.41	5.96	-3.26	-5.03	-4.15	-0.41	1.00	2.58	7.50	13.44	1.69	1.33
EDT [s]	--	0.56	3.39	6.14	6.69	6.15	5.22	3.96	0.87	--	4.92	4.95
T60 [s]	--	--	4.29	5.98	6.58	6.07	5.16	3.88	1.91	0.67	5.18	5.50

3.2.5 PUNTO 5

Tabla 3.5 Datos obtenidos en el punto de medición 5.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	57.20	74.76	66.86	74.12	75.46	77.56	79.34	79.56	78.35	80.16	86.12	86.56
Noise [dB]	43.17	28.04	17.09	20.01	23.05	26.08	29.00	32.05	35.18	41.32	40.11	45.27
C50 [dB]	-9.10	-8.72	-6.48	-1.99	-0.54	-4.17	1.20	1.40	3.30	12.27	0.94	0.19
C80 [dB]	-6.54	2.30	-0.49	-1.06	-0.14	-2.03	1.99	2.68	4.92	14.76	2.11	1.77
EDT [s]	1.34	1.79	3.94	5.94	7.30	6.22	5.81	3.50	1.16	--	4.92	4.87
T60 [s]	4.85	1.74	3.64	5.05	6.49	6.16	5.61	3.88	2.24	0.43	5.31	5.39

3.2.6 PUNTO 6

Tabla 3.6 Datos obtenidos en el punto de medición 6.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	52.00	72.05	65.96	73.25	74.69	77.26	77.98	77.62	79.40	76.62	85.18	85.63
Noise [dB]	37.97	20.28	17.02	19.93	22.97	26.15	29.16	32.14	35.21	41.45	40.18	43.00
C50 [dB]	0.88	3.54	-3.70	-2.65	-1.30	-1.73	0.36	-0.01	6.43	10.94	1.13	1.08
C80 [dB]	2.50	5.58	-1.84	-2.29	-1.18	-1.34	0.55	0.15	6.69	11.63	1.34	1.41
EDT [s]	--	--	2.75	5.09	6.19	5.45	4.96	3.23	--	--	4.07	4.12
T60 [s]	--	3.03	3.34	5.52	6.17	6.07	5.29	3.66	1.44	0.85	5.01	5.15

3.2.7 PUNTO 7

Tabla 3.7 Datos obtenidos en el punto de medición 7.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	53.49	73.33	64.47	72.76	73.90	74.62	77.19	77.67	77.93	79.13	84.37	84.91
Noise [dB]	39.65	22.88	17.18	20.01	23.13	26.05	29.17	32.14	35.19	41.33	40.14	43.48
C50 [dB]	-4.00	-5.82	-13.78	-10.15	-6.34	-9.29	-4.32	-1.35	4.10	12.80	-1.47	-1.98
C80 [dB]	1.41	-2.49	-9.38	-9.17	-5.55	-8.08	-3.24	-0.41	5.33	14.15	-0.63	-1.11
EDT [s]	1.72	0.91	2.84	4.10	6.15	6.43	4.37	2.92	1.59	--	3.94	3.86
T60 [s]	--	3.12	3.97	6.04	5.81	6.01	5.32	3.40	1.59	--	5.14	5.33

3.2.8 PUNTO 8

Tabla 3.8 Datos obtenidos en el punto de medición 8.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	47.18	63.93	58.76	67.13	68.69	69.65	72.50	73.20	76.78	78.23	80.83	81.15
Noise [dB]	30.40	17.38	17.02	19.91	23.14	26.11	29.03	32.05	35.21	41.39	40.14	41.83
C50 [dB]	3.35	-0.44	-2.08	0.30	1.55	-1.68	4.11	6.71	12.55	18.00	6.39	5.94
C80 [dB]	4.08	0.71	-0.20	0.82	2.09	-0.10	4.41	7.03	14.38	21.50	7.05	6.61
EDT [s]	--	--	3.50	5.00	6.56	6.18	5.96	--	--	--	4.57	4.81
T60 [s]	3.21	1.60	3.79	5.45	6.00	5.98	5.52	3.91	0.89	--	4.97	4.93

3.2.9 PUNTO 9

Tabla 3.9 Datos obtenidos en el punto de medición 9.

Freq. [Hz]	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	16000	A	Lin
Señal [dB]	51.06	67.92	63.92	71.94	74.93	77.33	78.44	77.13	82.13	84.17	86.28	86.62
Noise [dB]	34.42	18.94	16.94	19.85	23.03	26.10	29.09	32.16	35.22	41.38	40.16	42.27
C50 [dB]	1.42	4.34	-6.87	-2.56	-0.19	1.27	2.72	2.96	12.93	20.29	5.07	4.88
C80 [dB]	4.19	6.57	-5.36	-2.20	0.18	1.70	2.91	3.26	13.48	22.48	5.34	5.21
EDT [s]	58.11	73.11	17.04	35.66	48.93	57.28	65.17	66.42	95.15	99.07	76.28	75.47
T60 [s]	5.76	3.27	3.80	5.65	6.20	6.18	4.90	3.70	--	--	4.98	5.18

3.3 PROMEDIO DE RESULTADOS

Los resultados que serán de mayor utilidad son el T_{60} y el EDT obtenidos en las mediciones. Los valores de C50 y C80 únicamente son mostrados para tener

conocimiento de ellos, ya que esos valores no se podrán calcular teóricamente luego de realizar el diseño acústico, únicamente se los puede medir dentro del recinto una vez implementado el acondicionamiento. También se va a obviar la banda de frecuencia de 31.5 Hz debido a que el software entregó resultados poco coherentes en algunos de los puntos y en otros casos los datos no pudieron ser procesados. La frecuencia de 16 kHz generalmente no da problemas, como vemos en los resultados su T_{60} no va más allá de 0,85 segundos y el *software* no ha podido generar algunos valores, por éstas razones no serán considerados. Se puede explicar la ausencia o poca coherencia de datos debido a que las cajas o el micrófono no responden en esas bandas de frecuencia.

3.3.1 PROMEDIO DE T_{60}

Tabla 3.10 Promedio de resultados de T_{60} de todos los puntos de medición.

Frecuencia [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	Lin
Punto 1	2,6	4,37	5,38	6,49	6,81	5,29	4,17	1,19	5,43	5,38
Punto 2	5,16	4,13	5,38	6,34	6,05	5,12	3,63	1,83	5,14	5,26
Punto 3	2,7	4,11	5,48	6,89	6,45	5,34	3,63	1,73	5,29	5,46
Punto 4	--	4,29	5,98	6,58	6,07	5,16	3,88	1,91	5,18	5,5
Punto 5	1,74	3,64	5,05	6,49	6,16	5,61	3,88	2,24	5,31	5,39
Punto 6	3,03	3,34	5,52	6,17	6,07	5,29	3,66	1,44	5,01	5,15
Punto 7	3,12	3,97	6,04	5,81	6,01	5,32	3,4	1,59	5,14	5,33
Punto 8	1,6	3,79	5,45	6	5,98	5,52	3,91	0,89	4,97	4,93
Punto 9	3,27	3,8	5,65	6,2	6,18	4,9	3,7	--	4,98	5,18
Tiempo [s]	2,90	3,94	5,55	6,3	6,20	5,28	3,76	1,60	5,16	5,29

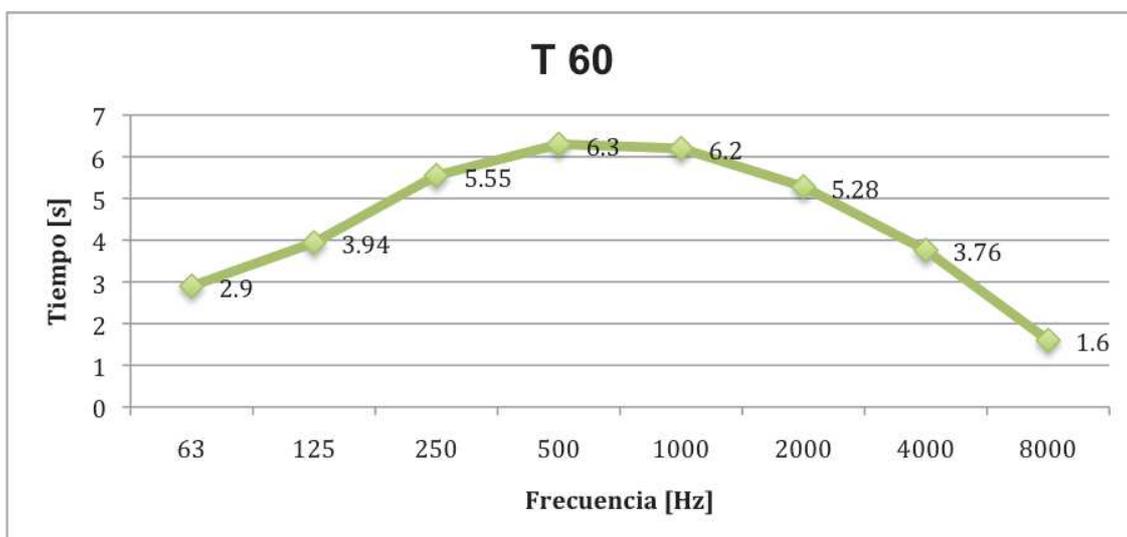


Figura 3.9 Curva del promedio de T_{60} entre todos los puntos.

3.3.2 PROMEDIO DE EDT (*EARLY DECAY TIME*)

Tabla 3.12 Promedio de resultados de EDT de todos los puntos.

Frecuencia [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	Lin
Punto 1	--	3,61	6	7,01	7,49	5,74	5,24	--	5,97	--
Punto 2	0,5	--	5,3	7,11	6,74	5,64	3,85	2,27	5,02	5,09
Punto 3	1,55	3,15	5,91	6,6	6,3	4,84	3,85	--	4,47	4,24
Punto 4	0,56	3,39	6,14	6,69	6,15	5,22	3,96	0,87	4,92	4,95
Punto 5	1,79	3,94	5,94	7,3	6,22	5,81	3,5	1,16	4,92	4,87
Punto 6	--	2,75	5,09	6,19	5,45	4,96	3,23	--	4,07	4,12
Punto 7	0,91	2,84	4,1	6,15	6,43	4,37	2,92	1,59	3,94	3,86
Punto 8	--	3,5	5	6,56	6,18	5,96	--	--	4,57	4,81
Punto 9	--	3,65	6,11	6,17	5,93	5,64	4,29	--	5,1	5,05
Promedio	1,06	3,35	5,51	6,64	6,32	5,35	3,86	1,47	4,78	4,62

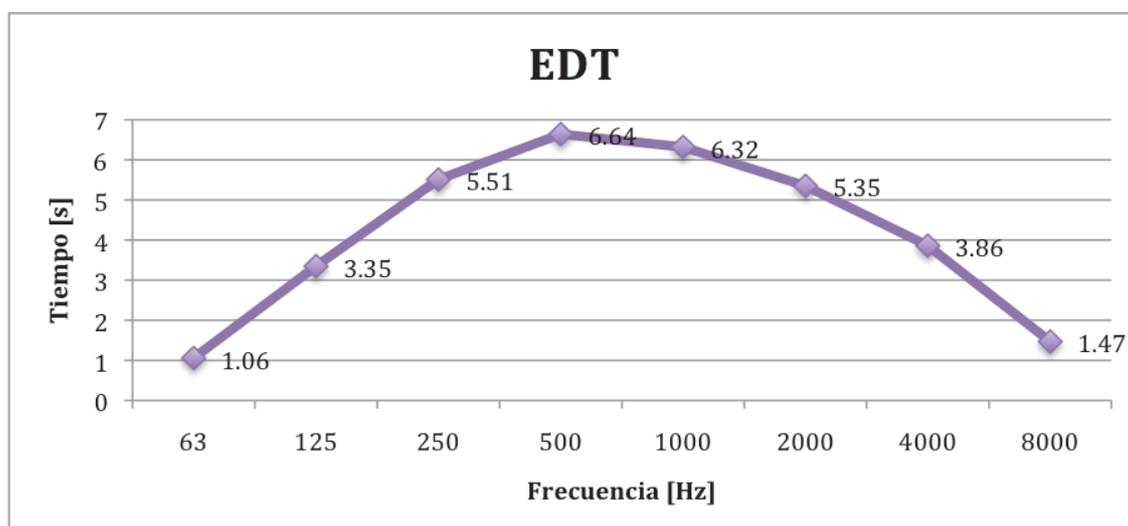


Figura 3.10 Curva del promedio de EDT entre todos los puntos.

3.4 COMPARACIÓN ENTRE T_{60} Y EDT

Es necesaria la comparación entre T_{60} y EDT debido a que se recomienda que el EDT_{mid} y el T_{60} de la sala, en las bandas de frecuencia de 500 Hz y 1kHz deben ser semejantes, de esta manera se tendrá una buena difusión del sonido en toda la sala al momento de estar llena de público (Apartado 1.3.4.2)²².

²² Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Carrión, Isbert, página 227.

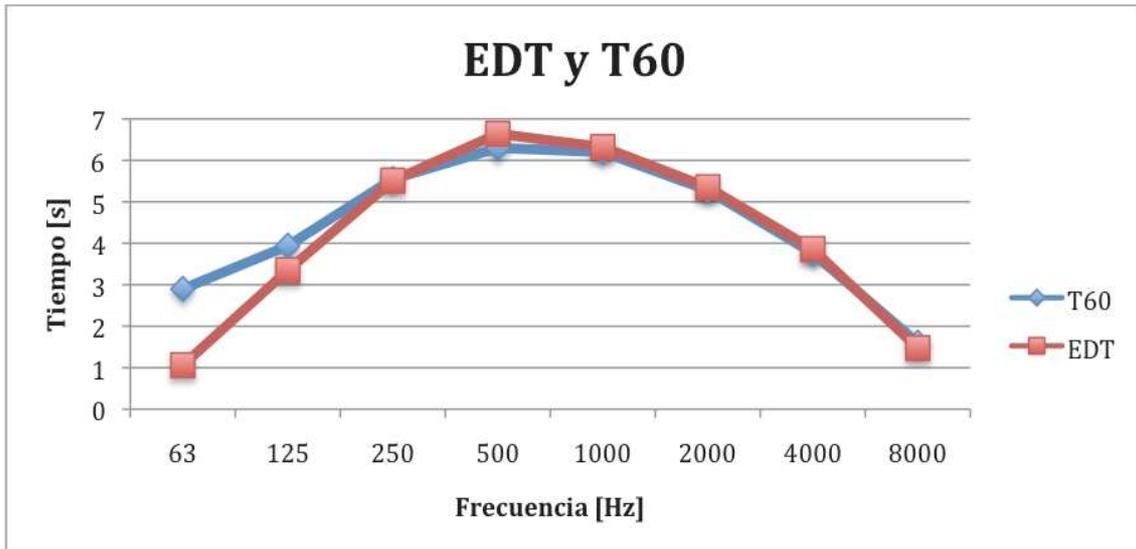


Figura 3.11 Comparación entre T_{60} y EDT.

Se puede observar en la figura 3.11 que los valores de EDT y T_{60} son semejantes a partir de la banda de 250 Hz, en la banda de 63 Hz el T_{60} es mucho mayor con una diferencia de aproximadamente 2 segundos, mientras en 125 Hz se aproximan ambos valores con una diferencia de casi un segundo.

Tomando el criterio anterior, que el EDT y el T_{60} deben ser semejantes en las bandas de 500 Hz y 1 kHz, se tiene en este caso, que son valores casi iguales con diferencias de máximo 0,5 segundos, esto quiere decir que se está cumpliendo con la recomendación, pero en todo caso los valores de T_{60} que posee actualmente la sala no son adecuados para una buena difusión del sonido.

4 EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO

4.1 ANÁLISIS DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

4.1.1 GEOMETRÍA DE LA PLANTA

El recinto tiene una geometría circular y al extremo del escenario se va abriendo a manera de una planta en forma de “herradura” (Ver figura 1.8, capítulo 1, página 12), teniendo casi una perfecta circunferencia (Ver figura 2.2, capítulo 2, página 43); partiendo de esto se encuentra el primer posible problema acústico, los criterios de diseño recomiendan evitar en todo caso las formas circulares o elípticas (Apartado 1.3.7); el recinto no posee superficies de paredes reflectantes en toda su zona circular, pero la mediciones con tan altos valores de T_{60} , indican que esa estructura absorbente no diseñada de manera adecuada, por lo que puede existir focalización de ciertas frecuencias en el centro del recinto.

En las paredes laterales de la sala existen difusores en forma de cuña consecutivos en dos filas horizontales, estos ayudan de cierta manera a evitar focalizaciones.

4.1.2 PARTE POSTERIOR DEL RECINTO (ACCESOS)

En la parte trasera del ágora se encuentran los accesos principales al recinto. Estos forman cubículos salientes fuera del perímetro de la circunferencia de la planta. En este sector se podrían estar formando resonancias que interfieren con el sonido dentro de la sala. Tienen paredes paralelas lo cual contribuye a la formación de modos normales de vibración y además, las puertas de acceso son muy reflectantes al ser totalmente metálicas.

Para respaldar la idea de que en los accesos se podrían formar resonancias, se comparó los resultados de las mediciones en el punto 4 (parte posterior de la sala) donde se tiene mayor nivel de señal especialmente desde 250 Hz hasta 4 kHz que en cualquier otro punto, incluso mas que en el punto 1 el cual estaba cerca a los altavoces. Además, por la forma del recinto, se puede

suponer una focalización de sonido en ese punto. En la tabla 4.1 se comparan los valores de señal obtenidos en los puntos de medición uno y cuatro.

Tabla 4.1 Comparación de medición de T60 entre punto 1 y punto 4.

Frecuencia [Hz]		31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Señal [dB]	Punto 4	58.67	78.93	70.11	77.51	78.51	81.47	82.75	82.83	80.85
	Punto 1	51.31	70.34	63.63	68.06	71.71	74.87	71.50	73.72	78.91

4.1.3 ESCENARIO

El escenario no posee cielo ni paredes que lo aíslen de la sala, es totalmente descubierto, con una estructura metálica sobre el mismo que sirve como soporte de telones y luces. Éste debería estar en lo posible cerrado a sus costados y cielo con paredes absorbentes para evitar la salida de sonido de monitoreo hacia la sala. La pared plana posterior actúa como reflector sonoro, siendo perpendicular al piso y totalmente de concreto; cubre un área aproximada de 420 m².

4.1.4 CUBIERTA DEL TECHO

La geometría de la cubierta sintética del techo, altamente reflectante, da como resultado un reflector acústico por cada sección triangular de la estructura, es decir por cada inclinación que posee, una hacia delante de la sala y otra hacia atrás de manera alternada. Al tener esta forma no genera focalización de sonido en el centro del recinto, pero sí genera mayores reflexiones difusas, no debidamente direccionadas hacia la zona del público únicamente, como debería ser.

4.1.5 PAREDES LATERALES DEL ESCENARIO

Las paredes que son parte de la planta de la sala, que se encuentran a la altura del escenario, poseen 4 difusores policilíndricos consecutivos a cada lado contruidos de concreto. Este diseño de difusor justamente se recomienda para lugares circulares y así evitar focalizaciones de sonido (Apartado 1.3.7), en este caso contribuyen al aumento de tiempo de reverberación y a la difusión regular del sonido en el escenario hacia la sala, que no es lo que se desea al

momento mezclar en vivo en el *FOH* (“*Front Of House*”, ubicación de la consola de sala en un sistema de refuerzo sonoro, la cual se ubica frente al sistema en el centro de ambas torres del arreglo lineal, formando un triángulo equilátero).

4.2 ANÁLISIS DE MATERIALES

A manera general se describen los materiales de construcción utilizados y su efecto sobre la acústica del recinto.

- La cubierta es bastante reflectante al ser de un tipo de material sintético impermeable.
- La mayoría de superficies son de concreto, que tiene un pobre coeficiente de absorción, alrededor de 0,02 a 1kHz.²³
- La madera tampoco posee un coeficiente de absorción alto, aproximadamente 0,1 a 1kHz²³, y ésta la encontramos en toda la superficie de los graderíos y en el piso del escenario.
- Las paredes interiores son de esponja con cámara de aire. La esponja es porosa pero no lo suficientemente densa ni gruesa como para provocar una cantidad significativa de absorción.
- Los telones ubicados a los costados del escenario son los que mayor absorción están brindando, estos podrían llegar a tener un coeficiente de absorción de hasta 0,7 en 1 kHz, pero ocupan relativamente muy poca área dentro del recinto.

4.3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE MEDICIONES

4.3.1 ANÁLISIS MEDIANTE *SPECTRA LAB*

El *software* de análisis acústico *Spectralab* fue utilizado para poder crear espectrogramas y modelos 3D a partir de un archivo de audio en formato .WAV de las mediciones realizadas en el recinto. A continuación en las figura 4.2 hasta la 4.4 se presentan los resultados de la medición tomada en el punto 3, se analizó esta zona por ser el centro de la sala.

²³ www.geocities.com/ACL071/.../01_coef_absorcion_2004.xls

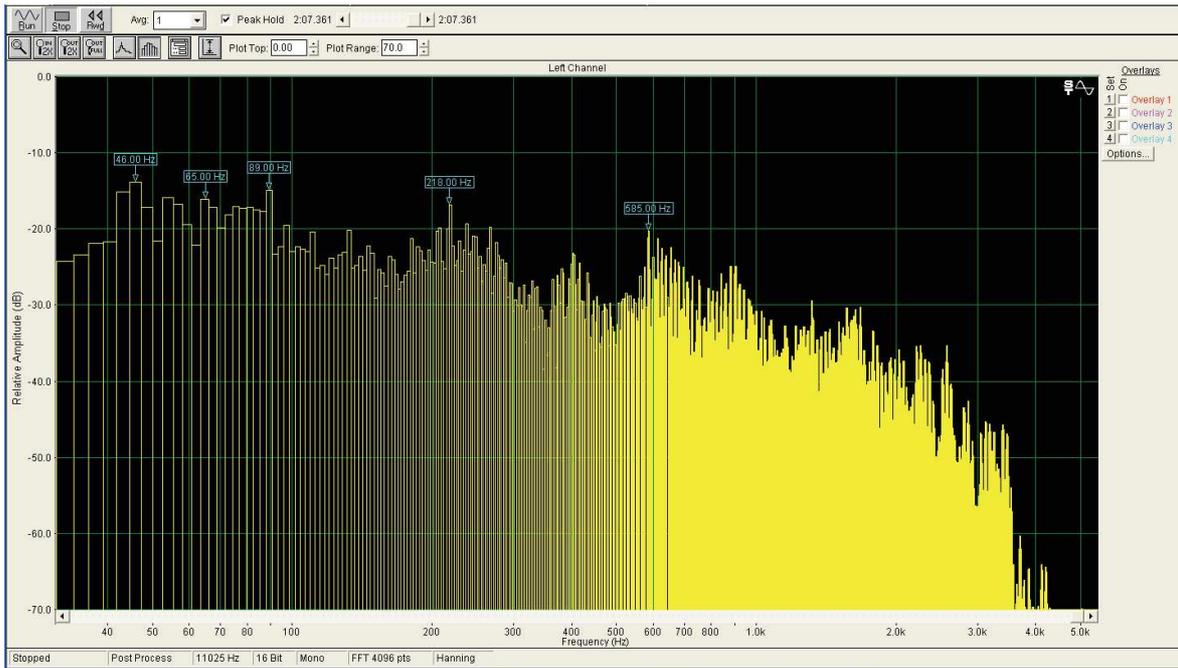


Figura 4.1 Espectro de frecuencias de la medición en el punto 3.

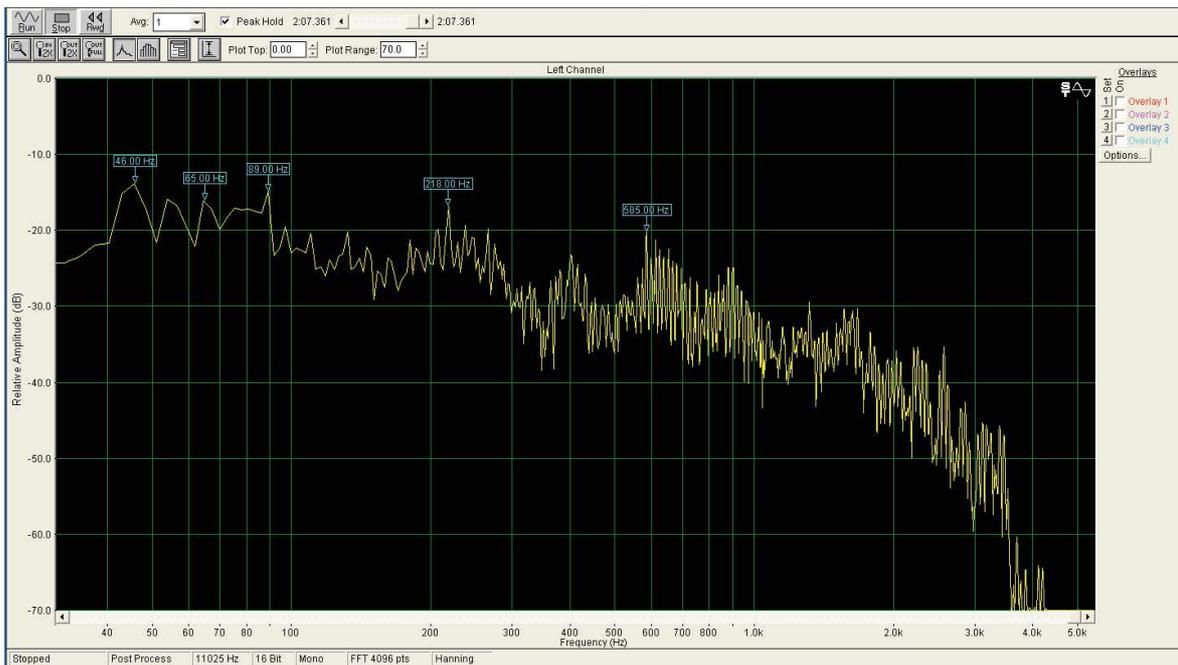


Figura 4.2 Espectro de frecuencias de la medición en el punto 3.

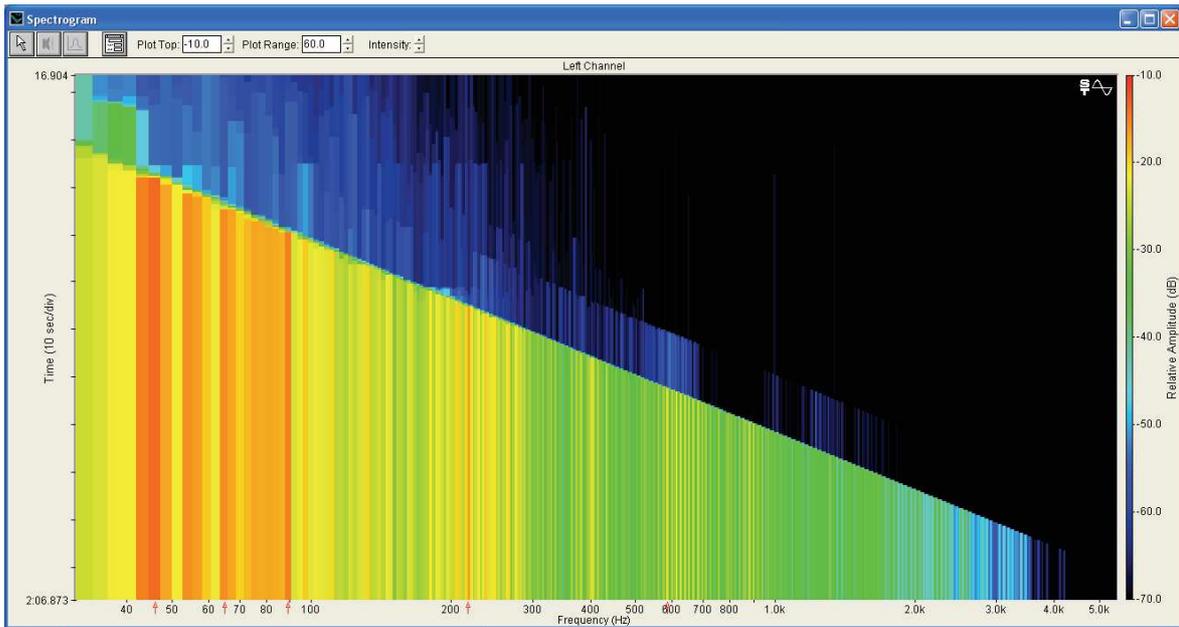


Figura 4.3 *Espectrograma.*

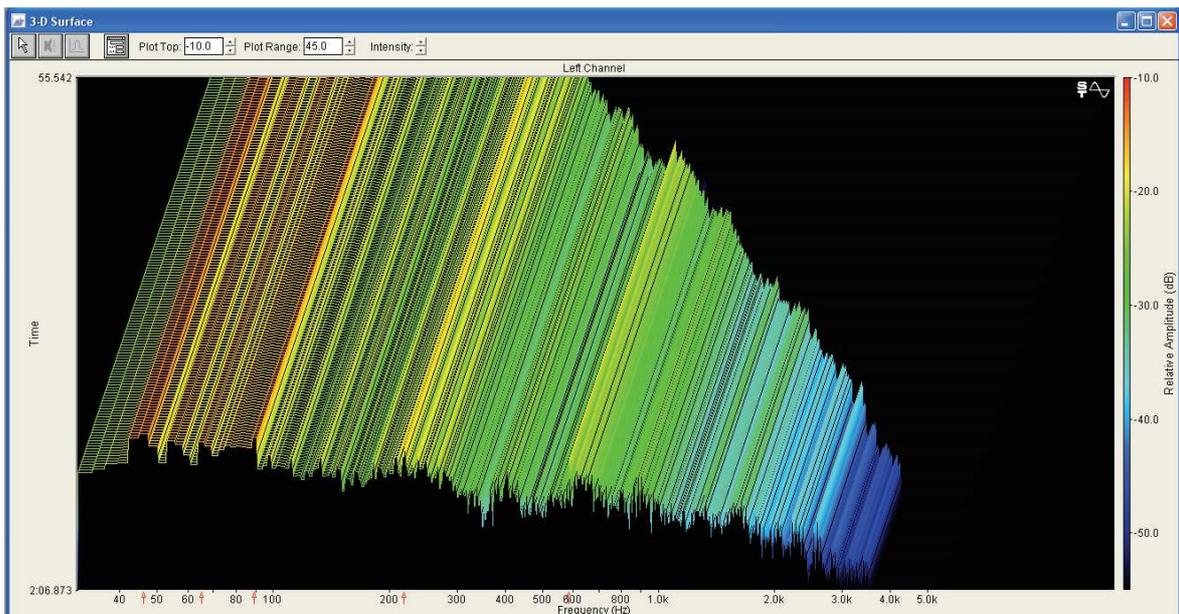


Figura 4.4 *Superficie en 3D.*

Analizando los resultados de los espectrogramas, podemos observar que se tiene un grave problema de resonancias en frecuencias bajas, teniendo picos en 40 Hz, 60Hz y 89 Hz. En frecuencias medias bajas se tiene picos en la zona de 250 Hz que llegan a ser múltiplos de 500 Hz, analizando de esta manera, se explica el por qué se tiene un aumento de nivel también en la zona de 500 Hz.

Atacando a las frecuencias cercanas a 250 Hz indirectamente se atenuarán las frecuencias problemáticas comprendidas en el rango de 500 Hz.

El problema en frecuencias bajas se soluciona mediante el diseño de resonadores diafragmáticos o de Helmholtz para frecuencias específicas.

4.3.2 PROBLEMA DE TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El problema más grande que posee el ágora es el excesivo tiempo de reverberación tal y como demuestran los resultados obtenidos mostrados en la tabla 4.2. Como se pudo observar en los apartados 4.4. y 3.3.1. el T_{60} en la banda de un 500 Hz es de 6,3 segundos, siendo el valor promedio más alto; esto provoca inteligibilidad al tener un campo reverberante muy grande.

Tabla 4.2 *Tabla de promedios de T_{60} .*

Frecuencia [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	Lin
Punto 1	2,6	4,37	5,38	6,49	6,81	5,29	4,17	1,19	5,43	5,38
Punto 2	5,16	4,13	5,38	6,34	6,05	5,12	3,63	1,83	5,14	5,26
Punto 3	2,7	4,11	5,48	6,89	6,45	5,34	3,63	1,73	5,29	5,46
Punto 4	--	4,29	5,98	6,58	6,07	5,16	3,88	1,91	5,18	5,5
Punto 5	1,74	3,64	5,05	6,49	6,16	5,61	3,88	2,24	5,31	5,39
Punto 6	3,03	3,34	5,52	6,17	6,07	5,29	3,66	1,44	5,01	5,15
Punto 7	3,12	3,97	6,04	5,81	6,01	5,32	3,4	1,59	5,14	5,33
Punto 8	1,6	3,79	5,45	6	5,98	5,52	3,91	0,89	4,97	4,93
Punto 9	3,27	3,8	5,65	6,2	6,18	4,9	3,7	--	4,98	5,18
Tiempo [s]	2,90	3,94	5,55	6,3	6,20	5,28	3,76	1,60	5,16	5,29

El tratamiento acústico que se debe implementar para reducción del tiempo de reverberación va dirigido a frecuencias medias especialmente. Según la figura 1.11 (Capítulo 1, página 19) el tiempo de reverberación óptimo debería estar entre 1 y 2 segundos para salas de conciertos, dependiendo del volumen de la sala. En el caso del recinto en cuestión, el volumen es de 72.795 [m³], esto quiere decir que el T_{60} óptimo recomendado para éste, debería estar entre 1,5 a 2 segundos.

Se tiene como objetivo reducir a valores que rodeen los 2 segundos en la mayor parte posible del espectro de frecuencias.

4.4 ECOS POTENCIALES

Analizando los planos del recinto se puede deducir que se podrían generar ecos entre el suelo de los graderíos y la cubierta del recinto ya que son superficies altamente reflectantes y superan los 17 metros. Hay que recordar que el oído humano percibe una reflexión como eco cuando ésta supera los 50 ms que en distancia es aproximadamente 17 metros. También se podrían generar ecos entre la pared posterior del escenario y la cubierta sintética.

4.5 CONCLUSIONES

- El mayor problema acústico que posee el recinto tiene que ver con un tiempo de reverberación excesivo, especialmente en frecuencias medias.
- Se observa un mal diseño de la geometría de la sala al ser una semicircunferencia, generándose focalizaciones y mala distribución de sonido. Además se crean ecos al tener reflexiones que recorren distancias mayores a 17 metros.
- La mayor parte de los materiales de la construcción no aportan una absorción adecuada del sonido, y la ubicación de superficies reflectantes no genera reflexiones beneficiosas ni bien dirigidas, generando un campo reverberante abundante en el recinto.
- La geometría de la sala genera resonancias en bajas frecuencias especialmente en el rango de 60 Hz y 250 Hz.

5 DISEÑO Y PROPUESTA DE ACONDICIONAMIENTO ACÚSTICO

5.1 DESARROLLO DEL DISEÑO

El principal objetivo que se logrará con el diseño acústico propuesto será el de reducir considerablemente el tiempo de reverberación, obteniendo un valor que sea adecuado para la sala. Además de esto, se tratará de reducir las resonancias y se logrará una distribución uniforme de las reflexiones en todo el recinto.

5.1.1 REFORMAS GEOMÉTRICAS

5.1.1.1 Paredes de la Planta

Por ser una planta circular se deberá tratar de que no existan focalizaciones de sonido en el centro del recinto por lo que se debe romper la forma circular de la planta. Para generar primeras reflexiones a partir de las paredes laterales de la sala, se deberá construir paredes de material macizo recubiertas en su totalidad de placas de madera de 3 cm con una cámara de aire de 5 cm rellena con fibra de vidrio o similar y ubicarlas de tal manera que las reflexiones que genere sean dirigidas hacia los graderíos cubriendo de manera uniforme todo este sector, evitando que superen los 17 metros para no tener ecos en ninguna parte de la audiencia. Se realiza este tipo de montaje ya que de ésta manera se logra una mayor absorción en la frecuencia de 125 Hz, lo cual se requiere para homogenizar el tiempo de reverberación de ésta frecuencia con las demás del espectro.

A través de cálculos se obtuvo la ubicación de las paredes laterales y se realizó un análisis de rayos mediante acústica geométrica de rayos especulares obteniendo lo que muestra la figura 5.1.

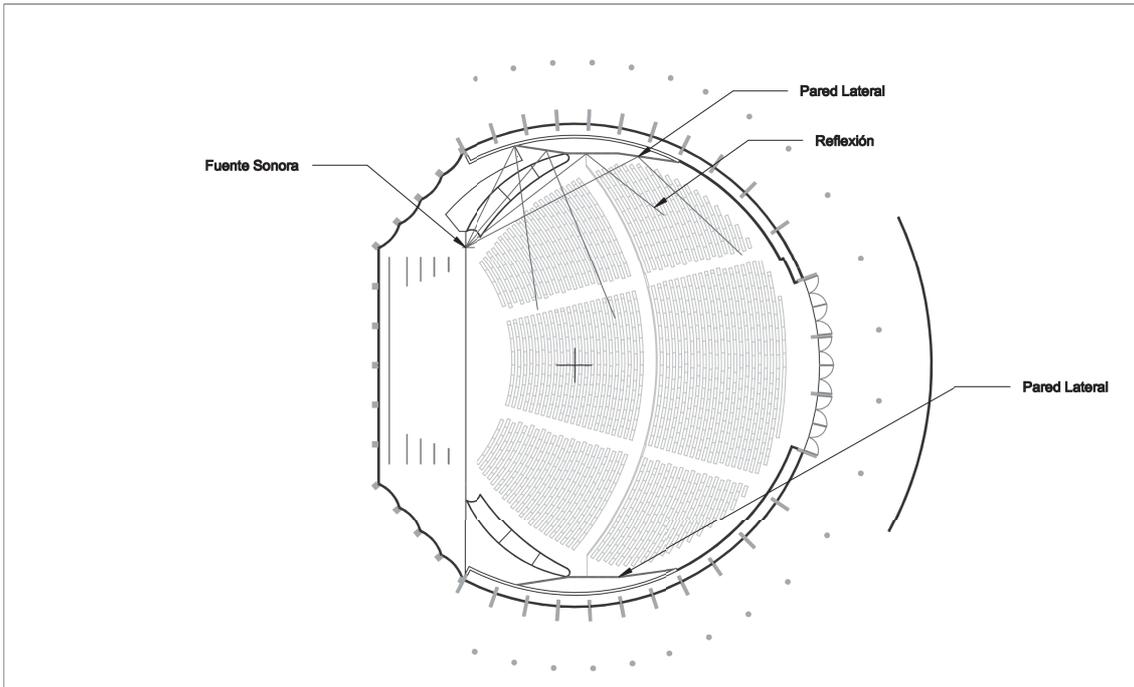


Figura 5.1 *Análisis de rayos especulares sobre las paredes laterales propuestas.*

La ubicación exacta y medidas propuestas para dichas paredes laterales se muestra en las figuras 5.2 y 5.3.

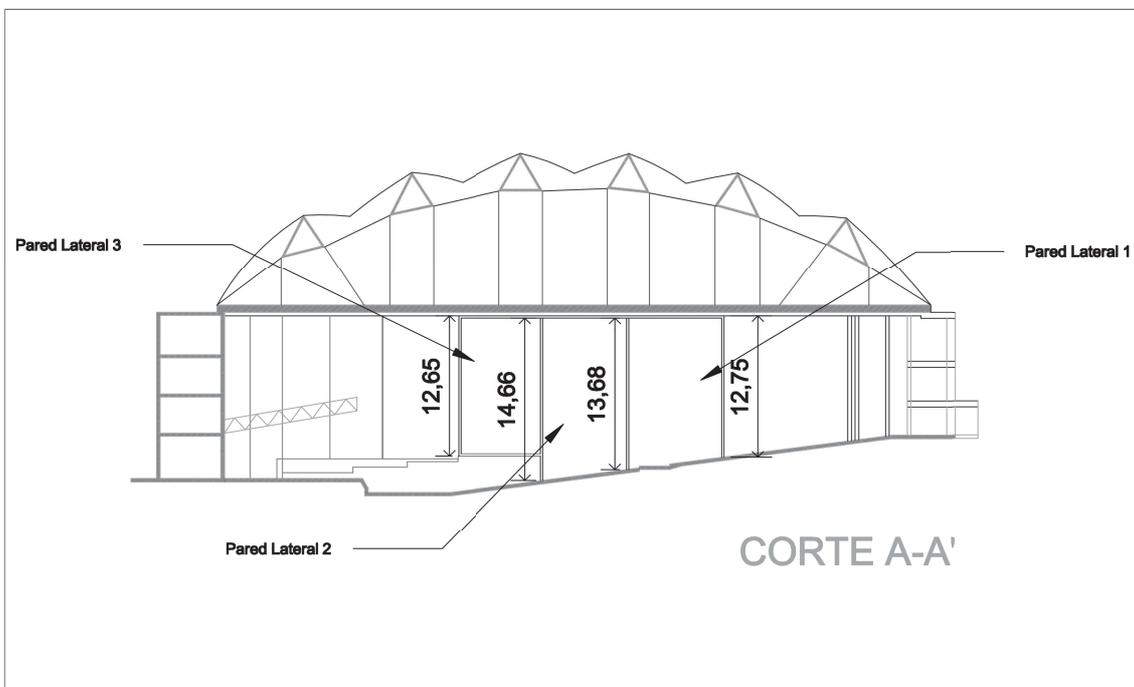


Figura 5.2 *Medidas de paredes laterales. Corte lateral.*

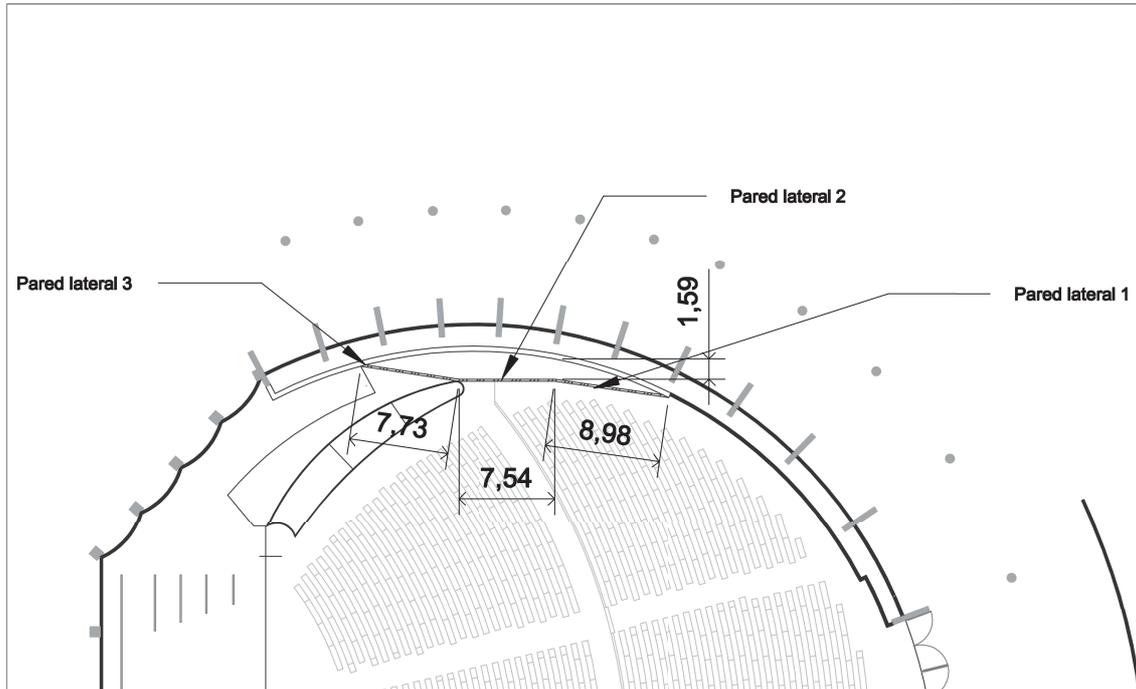


Figura 5.3 Medidas de paredes laterales. Vista superior.

5.1.1.2 Cielo

Cielo Falso

La reforma más drástica que se deberá realizar es la ubicación de un cielo falso que deberá cubrir la totalidad de la superficie del recinto que es de $3.462,7 \text{ m}^2$. La estructura de aluminio de sección triangular existente actualmente, funcionará como soporte para dicho cielo falso, el cual deberá ser suspendido de los nudos inferiores. En el Anexo 2 se muestra las cargas máximas adicionales en los nudos inferiores de la estructura.

El material a utilizar será perfilaría de aluminio o algún material similar que sea sumamente ligero. De ésta manera se reducirá el volumen efectivo del recinto, lo que ayudará a obtener un tiempo de reverberación mucho menor, además de solucionar el problema de las reflexiones que genera el cielo de membrana sintética. El volumen efectivo ahora será de 47.395 m^3 , que es el resultado del volumen total de 72.795 m^3 menos el volumen que ocupa la cubierta de 25.400 m^3 .

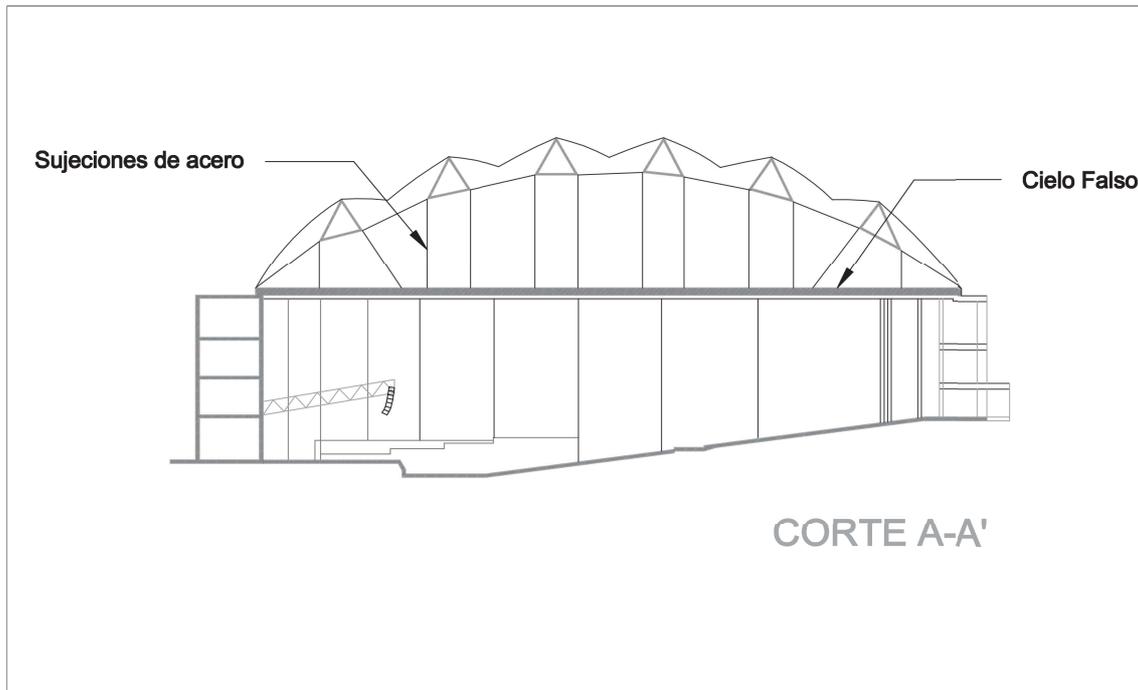


Figura 5.4 Ubicación del cielo falso.

Se tomó en cuenta la posibilidad de que la cámara de aire que se crea entre el cielo de membrana y el cielo falso propuesto, pueda entrar en resonancia y se comporte como un sistema resorte-masa, transfiriendo energía desde la cámara hacia el recinto. Se concluye que no se tendrá resonancias en el espectro audible debido a que, las dimensiones del diámetro y altura de la cámara de aire no son menores o iguales a la longitud de onda mas baja del espectro, es decir 20 Hz, dividida para 16. Se tiene que,

$$\lambda_{20Hz} = 17 m \qquad l \leq \frac{\lambda}{16} \qquad \frac{17}{16} = 1,06 m$$

Paneles reflectantes o nubes

Las nubes ayudarán a crear primeras reflexiones sobre los graderíos, desde las primeras filas hasta las últimas. Dichas reflexiones no sobrepasarán los 50 ms de retardo debido a que, el uso que se le da al recinto no requiere de reflexiones con mayor retardo; mientras mas retardo se tenga, el oído dejará de integrar el sonido directo y las reflexiones y se escucharán como eco. Además las reflexiones generadas no deben ser difusas para este caso.

Para calcular la distancia que recorre el sonido en 50 ms se tomó una temperatura promedio de 18 grados centígrados dentro del recinto, la velocidad del sonido calculada a esta temperatura será de 342,4 m/s; calculando la distancia que recorre el sonido a esta velocidad en 50 ms tenemos que son 17,12 metros.

Las reflexiones generadas por las nubes no deberán sobrepasar los 17,12 m de recorrido. Tomando en cuenta lo dicho, se realizó el análisis de rayos especulares sobre las nubes diseñadas, es decir que el rayo incidente tiene el mismo ángulo que el rayo reflejado, los resultados cuales se muestran en la figura 5.5. Se midió las longitudes de los rayos, teniendo como resultado que ninguno sobrepasa los 16 m, en la figura 5.6 se muestran las distancias que recorren los rayos reflejados. La nube más alejada del escenario se diseñó como reflector de perfil convexo para abarcar una mayor zona de cobertura debido a la dificultad que se tuvo al momento de lograr cubrir la zona posterior con mas reflectores planos como se lo hizo en las dos zonas próximas al escenario.

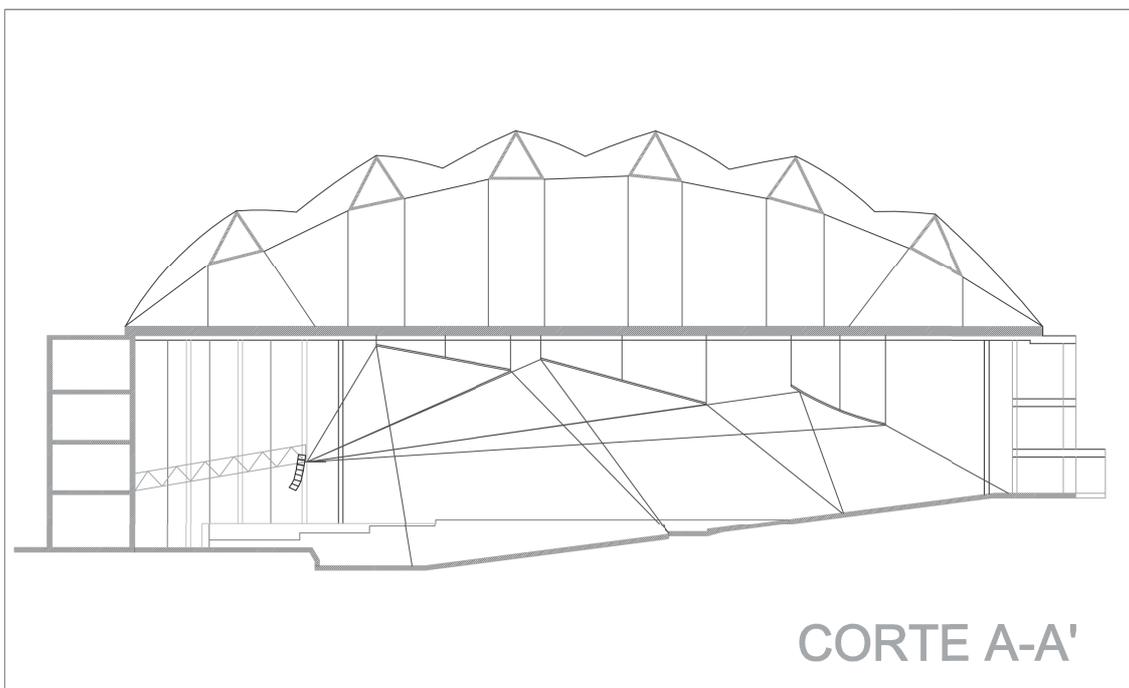


Figura 5.5 *Análisis de rayos sobre las nubes diseñadas.*

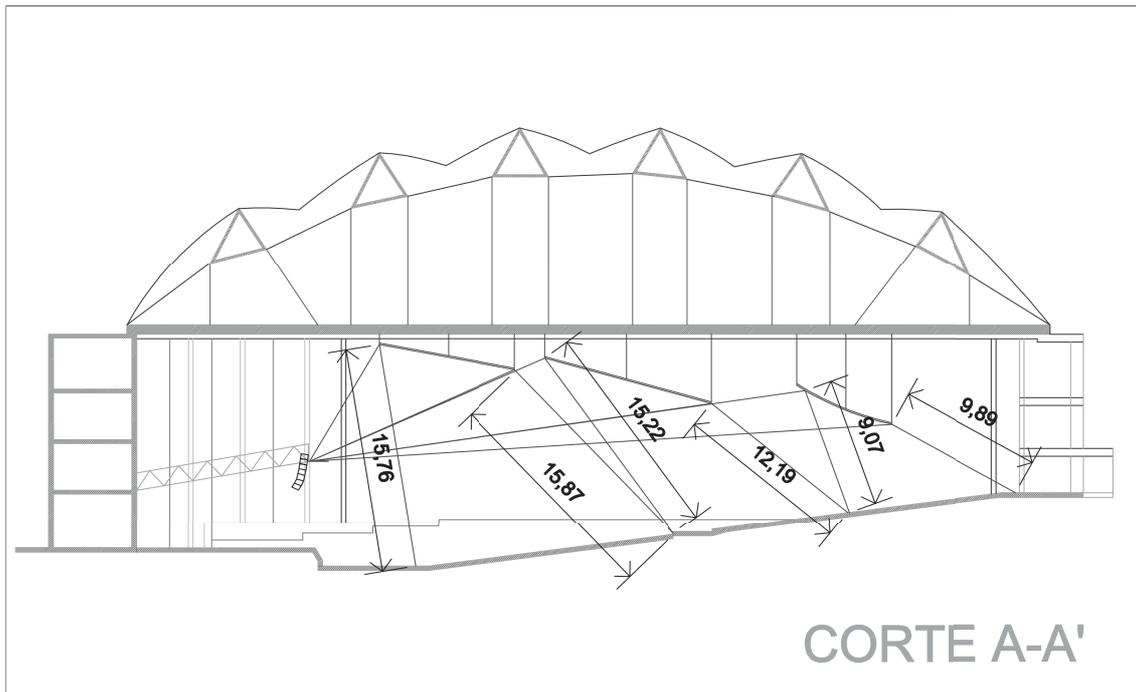


Figura 5.6 *Distancias máximas que recorren los rayos reflejados sobre las nubes.*

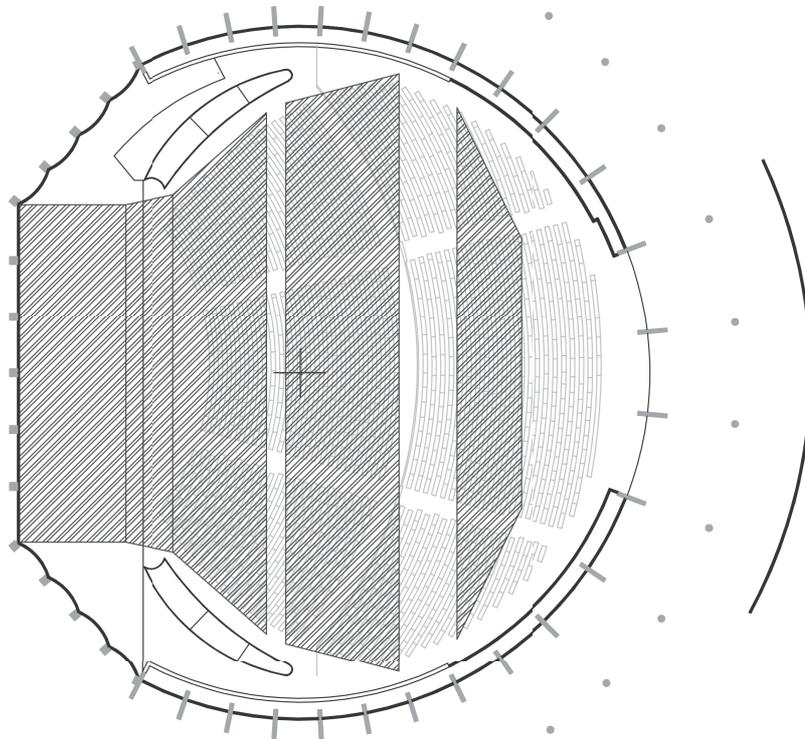


Figura 5.6 *Ubicación de los reflectores. Vista de la planta.*

El material de las nubes será madera triplex de 4 mm de espesor (Ver anexo 5). El detalle de las ubicaciones y medidas exactas se muestran en las figuras 5.7 y 5.8.

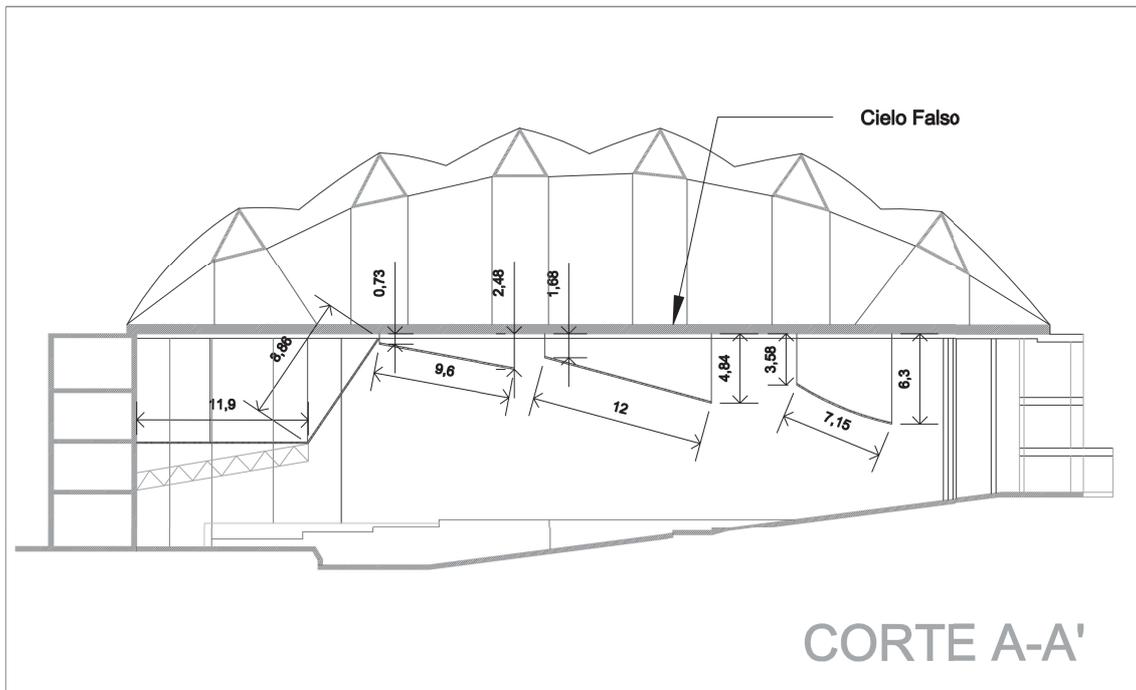


Figura 5.7 Medidas de los reflectores, cielo del escenario y alturas de colocación. Corte lateral.

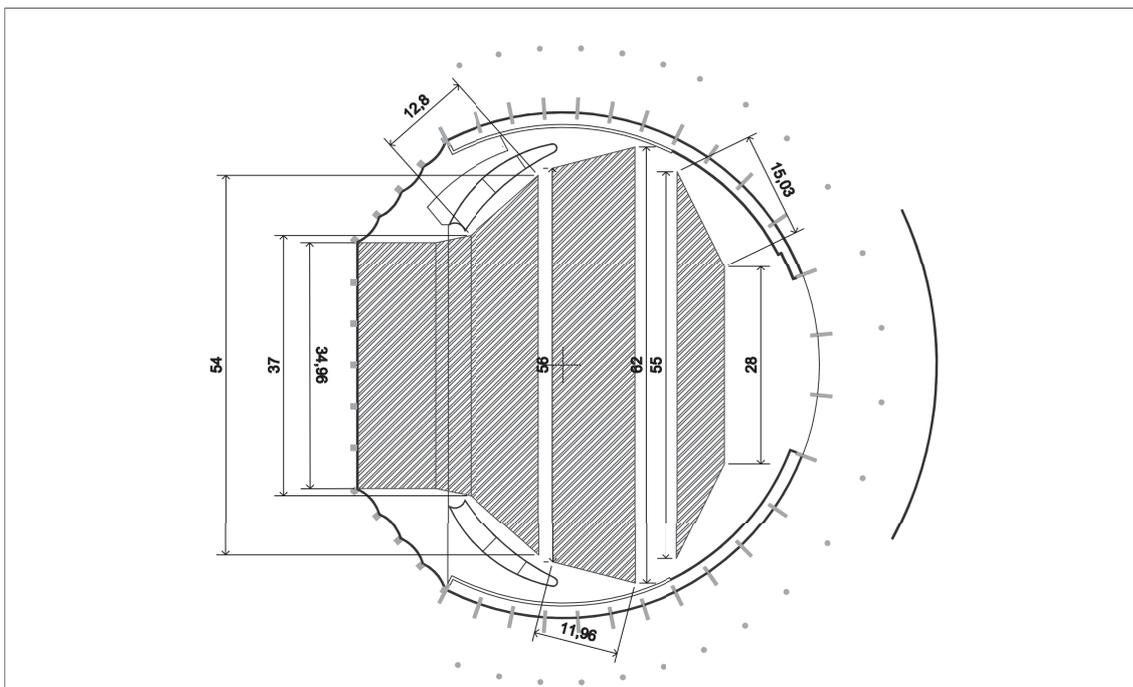


Figura 5.8 Medidas de los reflectores y cielo del escenario. Vista de la planta.

5.1.1.3 Escenario

Sobre el escenario se deberá ubicar un cielo falso similar a las nubes sobre los graderíos, las cuales ayudarán a que el sonido del escenario no sea expulsado hacia la sala.

Las nubes serán del mismo material que las anteriores. El detalle de ubicación y medidas se incluyen también en las figuras 5.6, 5.7 y 5.8.

5.1.2 TRATAMIENTO ACÚSTICO

5.1.2.1 Escenario

Se deberá cambiar el telón posterior del escenario, el cual es de tela muy delgada y ligera, por una cortina pesada o similar, al igual que todas las cortinas laterales suspendidas de la estructura metálica superior, la cual deberá cubrir la totalidad de la superficie de concreto posterior. El cielo falso ubicado deberá recubrirse en su totalidad con fibra de vidrio de 4 pulgadas o similar, recubierta con malla de fibra acústicamente transparente. De la misma manera que las nubes de la sala, se deberá cubrir la cara superior de las nubes con lana mineral de 2 pulgadas o similar para evitar la generación de reflexiones secundarias innecesarias.

5.1.2.2 Paredes Laterales Semicirculares Del Escenario

Se deberá recubrir con material absorbente toda la superficie de los difusores policilíndricos de concreto existentes en la parte posterior del escenario al igual que la pared central posterior. El material a utilizar será lana mineral de 10 cm recubierta de malla de fibra acústicamente transparente. El montaje se lo deberá hacer sobre listones de madera ubicados perpendicularmente al suelo a una distancia de 1 metro uno de otro.

5.1.2.3 Pasillos

Todos los pasillos incluyendo pasillos de acceso desde el escenario hacia los graderías y ante-escenario, deberán ser recubiertos en su totalidad con alfombra de goma de 0,5 cm o similar.

5.1.2.4 Paredes De la Sala

El material y la estructura que poseen actualmente las paredes del recinto deberán ser eliminadas. A su vez se tendrá que montar lana de vidrio de 10 cm de espesor en todas las superficies que no sean las paredes laterales propuestas anteriormente (Apartado 5.1.1.1). El método de montaje será directamente sobre la pared de concreto armados en bastidores de madera para su soporte, recubierto con malla de fibra acústicamente transparente.

5.1.2.5 Cielo

El cielo falso de perfilera de aluminio deberá recubrirse con fieltro de 2,5 cm de espesor en su totalidad recubierto con malla acústicamente transparente.

5.1.2.6 Nubes

Las nubes propuestas deberán ir recubiertas en su parte superior (no la cara que da hacia los graderíos, es decir, la cara que da hacia el cielo falso) por lana mineral de 2 pulgadas, esto para evitar seguir generando reflexiones una vez que el sonido alcance el cielo falso. Ver anexo 5.

5.1.2.7 Puertas De Acceso

Todas las puertas de acceso serán recubiertas en su totalidad con una capa de fieltro de 2.5 cm soportadas por bastidores de madera (Ver anexo 8), aplicadas directamente sobre la placa metálica de la puerta, recubierto con algún tipo de malla acústicamente transparente.

5.1.3 RESONADORES

Se diseñaron resonadores de Helmholtz con el objetivo de atacar a las frecuencias bajas que dan problema (Apartado 4.1.1), las cuales son 46 Hz, 65 Hz y 89 Hz. Este tipo de resonador consta de una cavidad de un volumen específico que puede ser una esfera o un paralelepípedo, conectado al medio externo mediante un tubo de radio específico.

Los resonadores diseñados constan de una cavidad paralelepípeda, con todos sus lados de igual longitud, y un tubo de radio específico. En el Anexo 6 se

muestra las medidas exactas de los tres resonadores diseñados. El material para la construcción debe ser de madera triplex de 4 mm o similar. Para ampliar el rango de frecuencias de absorción se debe rellenar la cara interna posterior de cada resonador con algún tipo de material absorbente como lana mineral o de vidrio, como se muestra en la figura 5.9.

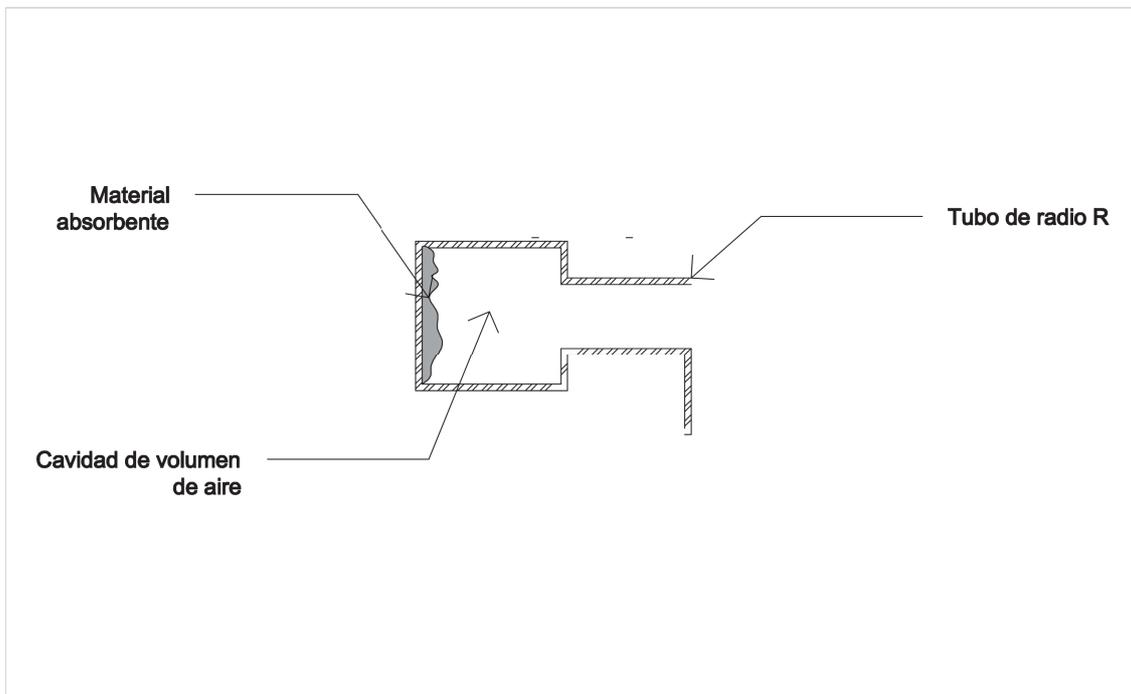


Figura 5.9 *Resonador con material absorbente en su cara posterior interna.*

La ubicación de los resonadores será en el perímetro superior de la circunferencia del recinto (Ver figura 5.10), soportados por sujeciones metálicas empotradas en la estructura de concreto original del recinto y con correas de acero. Se los ubicará en los lugares que indica la figura 5.11 (Apartado 5.1.3.2) y cumpliendo el número requerido para cada frecuencia (Apartado 5.1.3.1). Ésta ubicación ayuda a no ocupar espacio útil dentro del recinto.

5.1.3.1 Cálculo del número de resonadores.

La manera que se calcula el número de resonadores se deriva de un análisis que se realiza con la fórmula de tiempo de reverberación.

$$T_{60\text{inicial}} = 0.161 \frac{V}{A} \qquad T_{60\text{objetivo}} = 0.161 \frac{V}{A'} \qquad (5.1)$$

Donde:

$T_{60\text{inicial}}$ es el tiempo de reverberación que se tiene actualmente en la sala.

$T_{60\text{objetivo}}$ es el tiempo de reverberación que se quiere lograr.

Analizando la fórmula se tiene que la absorción para el tiempo de reverberación buscado es decir A' , tiene que ser mayor que la absorción A , la cual es la absorción Sabine existente en la sala. Entonces:

$$A' = A + A_{\text{res}} \qquad (5.2)$$

Siendo A_{res} la absorción brindada por los resonadores, despejando se tiene que:

$$A_{\text{res}} = A' - A \qquad (5.3)$$

Por definición tenemos que:

$$A_{\text{res}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot q_t \qquad (5.4)$$

Donde:

λ = Longitud de onda [m]

q_t = Número total de resonadores.

Despejando q_t de 5.4:

$$q_t = \frac{4\pi \cdot A_{\text{res}}}{\lambda^2} \qquad (5.5)$$

Reemplazando 5.3 en 5.5 se obtiene:

$$q_t = \frac{4\pi \cdot (A' - A)}{\lambda^2} \qquad (5.6)$$

De ésta manera obtenemos la fórmula para calcular el número total de resonadores necesarios para lograr la absorción necesaria. En este caso el volumen no es constante debido a que en la propuesta de acondicionamiento se plantea un cielo falso, disminuyendo a 47.395 m³ el volumen efectivo.

Se procede a calcular el número de resonadores para cada frecuencia. Tomando en cuenta que el volumen inicial es de 72.795 m³, el tiempo de reverberación promedio que se quiere lograr es de 1,8 segundos y el T₆₀ inicial es el medido.

Para 89 Hz:

$$A = \frac{0.161 \cdot (72795)}{3} = 3906.66[sab]$$

$$A' = \frac{0.161 \cdot (47395)}{1,8} = 4239.21[sab], \text{este valor es igual para 65 Hz y 46 Hz.}$$

$$q_i = \frac{4\pi \cdot (4239.21 - 3906.66)}{3.86^2} = 280.5 \approx 281 \text{ resonadores.}$$

Para 65 Hz:

$$A = \frac{0.161 \cdot (72795)}{2.9} = 4041,37[sab]$$

$$q_i = \frac{4\pi \cdot (4239.21 - 4041.3)}{5.29^2} = 88.4 \approx 88 \text{ resonadores.}$$

Para 46 Hz:

$$A = \frac{0.161 \cdot (72795)}{2.8} = 4185.7[sab]$$

$$q_i = \frac{4\pi \cdot (4239.21 - 4185.7)}{7.47^2} = 12.04 \approx 12 \text{ resonadores.}$$

5.1.3.2 Ubicación de los resonadores.

Para una correcta ubicación, se plantea 3 tipos de montaje por grupos de resonadores para lograr una distribución homogénea por todo el recinto (Ver figura 5.10). De ésta manera se tienen: 12 resonadores de tipo de montaje A, es decir los tres resonadores juntos, que se montarán en la parte posterior del escenario; 88 del tipo de montaje B es decir uno de 65 Hz y uno de 89 Hz a los costados del recinto. Para completar el número de resonadores de 89 Hz se ubicarán 180 resonadores unitarios en la parte posterior del recinto (Ver en el Anexo 7 los montajes individuales A, B y C).

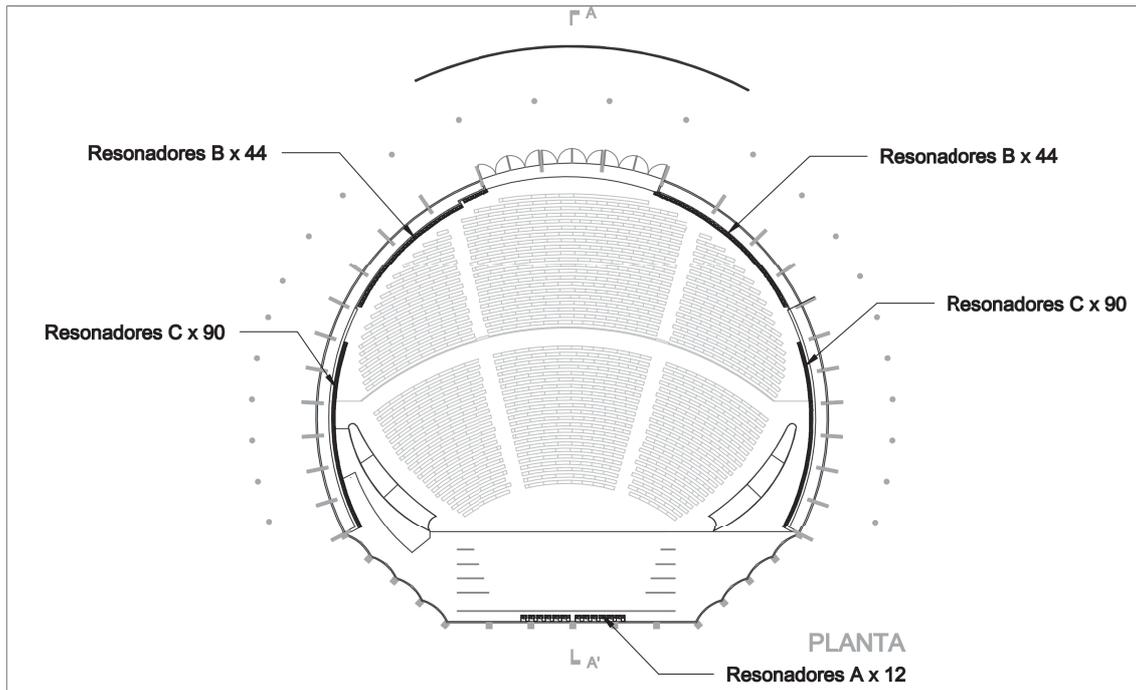


Figura 5.10 *Ubicación de resonadores. Deberán ser suspendidos en el borde superior de la pared del recinto. Ver en Anexo 7 los montajes individuales.*

5.1.4 CÁLCULO DEL TIEMPO DE REVERBERACIÓN

El cálculo del tiempo de reverberación se lo hizo de manera teórica, mediante la fórmula de Sabine,

$$T_{60} = 0,161 \frac{V}{\bar{\alpha} \cdot S_{total}} \quad (5.7)$$

En la figura 5.12 se presentan los tiempos RT obtenidos por banda de octava a partir de 125 Hz hasta 4 kHz, para el recinto con público y en la figura 5.13 para el recinto vacío; detallando las superficies y coeficientes de absorción por banda de octava.

Cumpliendo con la colocación de los materiales (Apartado 5.1.2) detallados en la tabla 5.1 y 5.2, se observa que el tiempo de reverberación logrado es el que se tenía como objetivo. Con el recinto lleno se tiene un T_{60} de 1,5 segundos en la frecuencia de 1 kHz, mientras que antes del acondicionamiento propuesto se tiene un T_{60} de 6,2 segundos de promedio en la misma banda de octava.

Tabla 5.3 Comparación de T_{60} actual y T_{60} logrado con el diseño.

Frecuencia [Hz]		125	250	500	1k	2k	4k
T_{60} actual sala vacía		4	5,5	6,3	6,2	5,3	3,8
T_{60} logrado con el diseño	Sala vacía	3,5	2,5	2,3	2,2	2,3	2,5
	Sala llena	2,3	1,7	1,6	1,5	1,6	1,7

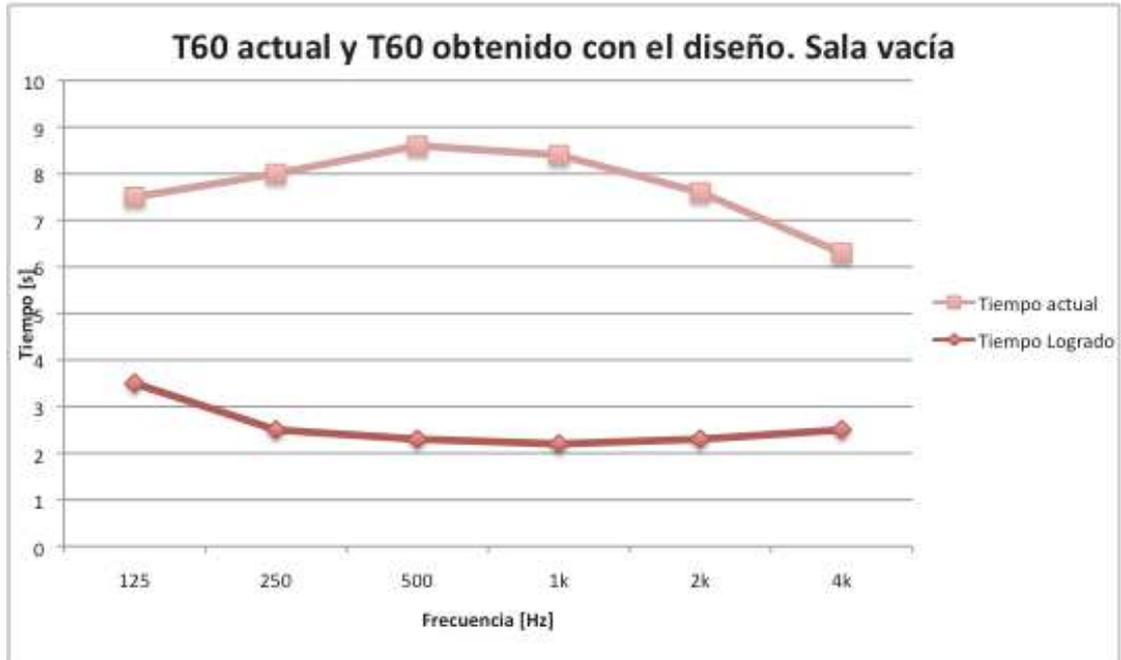


Figura 5.11 Se muestra el T_{60} que posee el recinto y el logrado con el diseño, con la sala vacía.

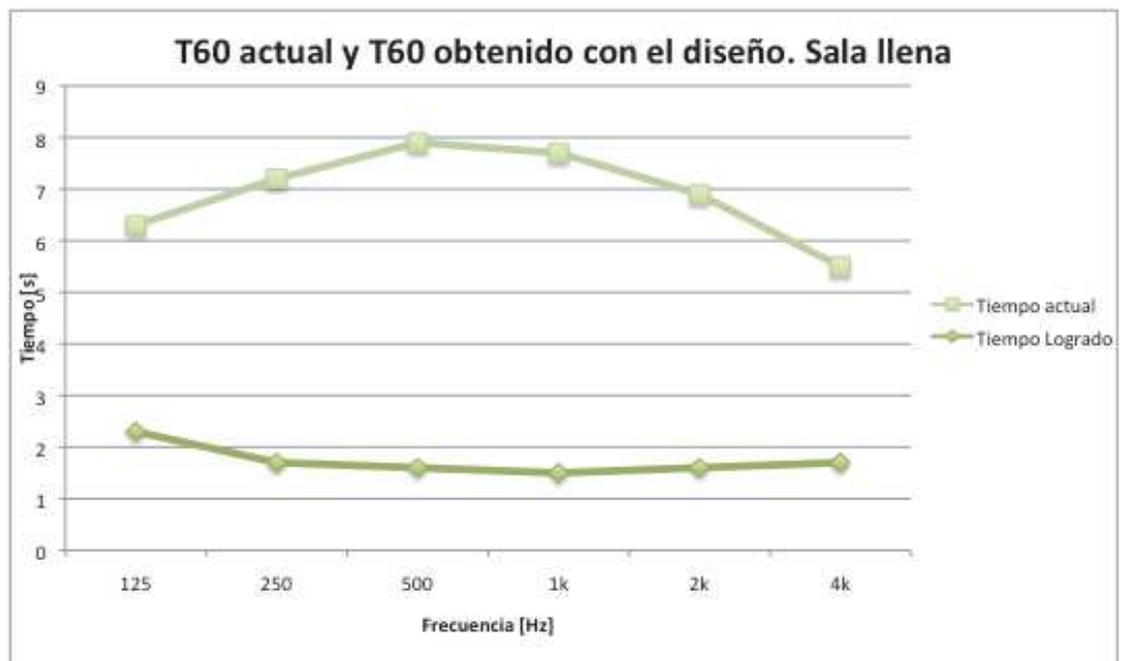


Figura 5.12 Se muestra el T_{60} que posee el recinto y el logrado con el diseño, con la sala llena.

5.1.5 CÁLCULO DE DESCRIPTORES

5.1.5.1 RT_{mid}

$$RT_{mid} = \frac{RT_{500Hz} + RT_{1kHz}}{2} \quad (5.2)$$

RT_{mid} con público

$$RT_{mid} = \frac{1,62 + 1,53}{2} = 1,57 \text{ s}$$

RT_{mid} sin público

$$RT_{mid} = \frac{2,37 + 2,27}{2} = 2,32 \text{ s}$$

5.1.5.2 Calidez Acústica (BR, *Bass Ratio*)

$$BR = \frac{RT_{125Hz} + RT_{250Hz}}{RT_{500Hz} + RT_{1kHz}} \quad (5.3)$$

Las recomendaciones del margen de valores que Beranek propone para la calidez acústica son:

$1,10 \leq BR \leq 1,25$ si $RT_{mid}=2,2$ segundos

$1,10 \leq BR \leq 1,45$ si $RT_{mid}=1,8$ segundos

BR con público

$$BR = \frac{2,39 + 1,79}{1,61 + 1,53} = 1,33$$

BR sin público

$$BR = \frac{3,5 + 2,5}{2,37 + 2,27} = 1,2$$

Se observa que los valores obtenidos de BR están dentro de los recomendados por Beranek.

5.1.5.3 Brillo (Br)

$$Br = \frac{RT_{2kHz} + RT_{4kHz}}{RT_{500Hz} + RT_{1kHz}} \quad (5.4)$$

Las recomendaciones de valores para el brillo que Beranek propone son:

$$Br \geq 0,87, \text{ si } RT_{mid} = 2 \text{ segundos}$$

Br con público

$$Br = \frac{1,6 + 1,73}{1,61 + 1,53} = 1,058$$

Br sin público

$$Br = \frac{2,38 + 2,56}{2,37 + 2,27} = 1,06 \text{ s}$$

Se observa que los valores obtenidos de Br están dentro de los recomendados por Beranek.

5.2 COSTOS DEL DISEÑO

Los costos que se tomaron en cuenta son, el total de los materiales acústicos que se proponen para la elaboración del diseño y los honorarios que se cobrarían por el desarrollo del diseño. Se exceptúan los costos extras por mano de obra de construcción, montaje y elaboración de resonadores; así mismo los honorarios por ingeniería civil de la obra, para lograr los montajes propuestos.

En la figura 5.14 se muestran los detalles de costos por materiales que se menciona en el diseño, los mismos están sujetos a descuentos por compra al por mayor, diferente proveedor o distinto tipo de material en el caso de que se decida reemplazar alguno por otro de iguales características acústicas pero más económico.

Tabla 5.4 Costos de materiales propuestos en el diseño.

Elemento	Material	Superficie [m ²]	Costo m ² [USD]	Costo total [USD]
Paredes sala	Fibra de vidrio 10 cm	1370,14	8,34	11426,9676
Pasillos y ante-escenario	Alfombra de goma de 0,5 cm	838,39	3,77	3160,7303
Paredes Laterales del diseño	Madera 3 cm	316,02	18,31	5786,3262
Paredes Laterales del diseño	Fibra de vidrio 5cm	316,02	4,17	1317,8034
Telón de Fondo	Cortina pesada	123	17,2	2115,6
Cielo falso de la sala	Planchas de aluminio	3462,7	35,9	124310,93
Cielo falso de la sala	Fieltro 2,5 cm	3462,7	2,3	7964,21
Cielo falso del escenario	Cartón de yeso	379,94	3	1139,82
Telones laterales	Cortina pesada	128,2	17,2	2205,04
Panel frontal superior del escenario	Cartón de yeso	305,55	3	916,65
Nubes de sala (Reflectores)	Madera triplex de 4 mm	1392,75	4,91	6838,4025
Nubes de sala parte superior (Reflectores)	Lana mineral de roca 4 pulgadas	1392,75	20,8	28969,2
Resonadores	Madera Triplex de 4 mm	230	4,91	1129,3
Puertas de acceso	Fieltro 2,5 cm	81,16	2,3	186,668
Materiales de montaje extras	Cables y sujeciones de acero, listones de madera, etc	1	2000	2000
			Total Materiales	197467,648

El costo total de materiales es de aproximadamente 197.467,6 USD. El costo promedio de honorarios por elaboración del diseño y asesoría acústica es de de aproximadamente 5.000 USD.

El presupuesto total del que debe disponer la Casa de la Cultura Ecuatoriana para la implementación del diseño acústico debe ser de 202.467,6 USD aproximadamente, excluyendo los extras que se mencionó con anterioridad.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

El diseño acústico logra el objetivo más importante, que es el de reducir el tiempo de reverberación de un promedio de 6 segundos en frecuencias medias a casi 1,5 segundos en el mismo rango de frecuencias cuando el recinto se encuentra lleno de público, y a 2,3 segundos en promedio, cuando el recinto se encuentra vacío.

Con la ubicación de reflectores (nubes) se logra una distribución uniforme de los rayos reflejados sobre toda la zona de la platea, cubriendo de igual manera todo el sector, y ayudando a crear primeras reflexiones, las cuales no sobrepasan los 50 milisegundos de retardo. La cubierta actual crea una mala distribución de reflexiones sobre la zona del público.

También se logra primeras reflexiones provenientes desde los costados de la sala con la ayuda de los paneles de madera que deberán ser ubicados en esta zona. En total son 3 paredes a cada costado, que además rompen la geometría circular que posee el Ágora, evitando focalización de sonido.

Con la ayuda de resonadores de Helmholtz, se logra la absorción de frecuencias bajas específicas, que fueron ubicadas mediante el análisis en *Spectralab*, con esto se completa la homogeneidad en el tiempo de reverberación de todo el espectro de frecuencias.

Calculando el brillo y la calidez acústica se logra concluir que los resultados encajan dentro de las recomendaciones de Beranek para estos dos descriptores acústicos que relacionan las frecuencias medias con las frecuencias bajas para la calidez acústica, y las frecuencias medias con las frecuencias altas para el brillo.

6.2 RECOMENDACIONES

Se deberá seguir estrictamente las medidas de todas las reformas geométricas, ubicación y montaje de nubes, paredes laterales y cielo falso; además de esto se deberá cumplir con las medidas y construcción indicadas de todos los resonadores. Se calculó con exactitud las reflexiones de los rayos sobre las superficies, y las medidas de los resonadores son las adecuadas para que brinden la absorción deseada en las frecuencias problemáticas; cualquier variación o error en su montaje y construcción, puede hacer variar los resultados finales que se obtengan en la práctica, llegando a ser no desados.

El montaje de los materiales acústicos debe ser lo más parecido posible a como se indica en el documento para lograr el objetivo deseado. En el caso de que los materiales sean reemplazados por similares, se deberá consultar el coeficiente de absorción de cada uno de ellos, el cual deberá ser aproximado al que se propone, de ésta manera se asegura obtener un tiempo de reverberación con variaciones mínimas al calculado.

Todas estas recomendaciones ayudarán a que se mantengan los resultados de los cálculos teóricamente obtenidos en el trabajo.

Con respecto a la seguridad industrial contra incendios, todos los materiales empleados en la propuesta deberán ser autoextinguibles, esto indica la capacidad del material de apagar la llama una vez retirada la fuente de calor. Para lograr esto se recomienda un tratamiento del material previo al montaje.

BIBLIOGRAFÍA

Libros:

CARRIÓN, Antoni, Diseño Acústico de Espacios Arquitectónicos, Ediciones UPC, Primera Edición, Barcelona, 1998.

MIYARA, Federico, Control de Ruido, ASOLOFAL, Argentina, 1999.

MIYARA, Federico, Acústica y Sistemas de Sonido, Tercera edición, Editorial UNR Editora, Argentina, 2006.

BERANEK, Leo, Acoustics, Acoustical Society of America, Estados Unidos, 1996.

RECUERO, Manuel, Acondicionamiento Acústico, Thomson Paraninfo, Madrid 2001.

Documentos:

MEYER SOUND, Line Arrays: Theory, Fact and Myth, Meyer Sound Laboratories Inc., 2002.

Brüel & Kjaer, Measuring Sound Booklet, Brüel & Kjaer Inc, 1984.

Documentos de Internet:

Asociación de Ingenieros Estructurales, Estructuras de aluminio, 2008,
<http://www.jornadasaie.com.ar/conferencias/ing-javier-cordero-castillo-estructuras-de-aluminio-sa-ecuador.html>

Descarga de la Norma ISO 3382, 2008,
<http://www.scribd.com/doc/3115570/Anexo1-Iso-3382>.

Golds, Bob, Coeficientes de Absorción, URL:
<http://www.bobgolds.com/sabin.htm>

Cuevas, Juan Antonio, Programas de Medición y Ajustes de Equipos de Sonido, 2006, <http://www.ispmusica.com/articulo.asp?id=714>.

Tabla de coeficientes de absorción, 2004,
www.geocities.com/ACL071/.../01_coef_absorcion_2004.xls

ANEXOS

ANEXO N° 1: ISO 3382
**Medición del tiempo de reverberación de salas con referencia a
otros parámetros acústicos.**

**INTERNATIONAL
STANDARD**

**ISO
3382**

Second edition
1997-06-15

**Acoustics — Measurement of the
reverberation time of rooms with reference
to other acoustical parameters**

*Acoustique — Mesurage de la durée de réverbération des salles en
référence à d'autres paramètres acoustiques*

This material is reproduced from ISO documents under International Organization for Standardization (ISO) Copyright License number IHS/ICC/1996. Not for resale. No part of these ISO documents may be reproduced in any form, electronic retrieval system or otherwise, except as allowed in the copyright law of the country of use, or with the prior written consent of ISO (Case postale 56, 1211 Geneva 20, Switzerland, Fax +41 22 734 10 79), IHS or the ISO Licensor's members.



Reference number
ISO 3382:1997(E)

ISO 3382:1997(E)

Contents

1 Scope	1
2 Normative references	1
3 Definitions	1
4 Measurement conditions	2
4.1 General	2
4.2 Equipment	3
4.3 Measurement positions	4
5 Measurement procedures	6
5.1 General	6
5.2 Interrupted noise method	6
5.3 Integrated impulse response method	7
6 Evaluation of decay curves	8
6.1 Interrupted noise method	8
6.2 Integrated impulse response method	9
6.3 Non-linear decay curves	9
6.4 Lower limits for reliable results caused by filter and detector	9
7 Spatial averaging	10
8 Statement of results	10
8.1 Tables and curves	10
8.2 Test report	10
Annex A (informative) Auditorium measures derived from impulse responses	12
Annex B (informative) Binaural auditorium measures derived from impulse responses	19
Annex C (informative) Bibliography	21

© ISO 1997

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from the publisher.

International Organization for Standardization
 Case postale 56 • CH-1211 Genève 20 • Switzerland
 Internet central@iso.ch
 X.400 c=ch; a=400net; p=iso; o=isocs; s=central
 Printed in Switzerland

Foreword

ISO (the International Organization for Standardization) is a worldwide federation of national standards bodies (ISO member bodies). The work of preparing International Standards is normally carried out through ISO technical committees. Each member body interested in a subject for which a technical committee has been established has the right to be represented on that committee. International organizations, governmental and non-governmental, in liaison with ISO, also take part in the work. ISO collaborates closely with the International Electrotechnical Commission (IEC) on all matters of electrotechnical standardization.

Draft International Standards adopted by the technical committees are circulated to the member bodies for voting. Publication as an International Standard requires approval by at least 75 % of the member bodies casting a vote.

International Standard ISO 3382 was prepared by Technical Committee ISO/TC 43, *Acoustics*, Subcommittee SC 2, *Building acoustics*.

This second edition cancels and replaces the first edition (ISO 3382:1975), which has been technically revised.

Annexes A, B and C of this International Standard are for information only.

Introduction

The reverberation time of a room used to be regarded as the predominant indicator of its acoustical properties. Whilst reverberation time continues to be regarded as a significant parameter, there is reasonable agreement that other types of measurements such as relative sound pressure levels, early/late energy ratios, lateral energy fractions, interaural cross correlation functions and background noise levels are needed for a more complete evaluation of acoustical quality of rooms. This International Standard continues to specify room acoustic quality by reverberation time alone, but introduces two other levels of complexity in room acoustics measurement.

Annex A presents measures based on squared impulse responses: a further measure of reverberation (early decay time) and measures of relative sound levels, early/late energy fractions and lateral energy fractions in auditoria. Within these categories there is still work to be done in determining which measures are the most suitable to standardize on but, since they are all derivable from impulse responses, it is appropriate to introduce the impulse response as the basis for standard measurements. Annex B introduces binaural measurements and the head and torso simulators (dummy heads) required to make the measurements in auditoria.

Reverberation time measurements are important in the field of noise control in rooms as well as for the assessment of rooms for speech and music; this International Standard also applies to measurements in these enclosures. However, it does not apply to laboratory measurements in test facilities or reverberation rooms. Laboratory measurements require other specifications of averaging single measurements at prescribed source and microphone positions. This International Standard establishes a method for obtaining reverberation times from impulse responses and from interrupted noise. In the annexes, the concepts and details of measurement procedures for some of the newer measures are introduced, but these annexes do not constitute a part of the formal specifications of this standard. The intention is to make it possible to compare reverberation time measurements with higher certainty, and to promote the use of and consensus in measurement of the newer measures.

Acoustics — Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters

1 Scope

This International Standard specifies methods for the measurement of reverberation time in rooms. It is not restricted to auditoria or concert halls; it is also applicable to rooms intended for speech and music or where noise protection is a consideration. It describes the measurement procedure, the apparatus needed, the coverage required, and the method of evaluating the data and presenting the test report. Furthermore, it is intended for application of modern digital measuring techniques and for evaluation of room acoustical parameters derived from impulse responses.

2 Normative references

The following standards contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this International Standard. At the time of publication, the editions indicated were valid. All standards are subject to revision, and parties to agreements based on this International Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the standards listed below. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

ISO 3741:1988, *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Precision methods for broadband sources in reverberation room.*

ISO 5725-2:1994, *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method.*

IEC 268-1:1985, *Sound system equipment — Part 1: General.*

IEC 651:1979, *Sound level meters.*

IEC 1260:1995, *Electroacoustics — Octave-band filters and fractional-octave-band filters.*

ITU Recommendation P.58:1994, *Head and torso simulator for telephonometry.*

3 Definitions

For the purposes of this International Standard, the following definitions apply.

3.1 decay curve:

Decay of sound pressure level as a function of time at one point of the room after the source of sound has ceased.

NOTE 1 This decay may be either measured after the actual cut-off of a continuous sound source in the room or derived from the reverse-time integrated squared impulse response of the room.

NOTE 2 The decay directly obtained after non-continuous excitation of a room (e.g. by recording a gunshot with a level recorder) is not recommended for accurate evaluation of the reverberation time. This method should only be used for survey purposes.

3.2 interrupted noise method:

Method of obtaining decay curves by direct recording of the decay of sound pressure level after exciting a room with broadband or band limited noise.

3.3 integrated impulse response method:

Method of obtaining decay curves by reverse-time integration of the squared impulse responses.

3.4 impulse response:

Plot as a function of time of the sound pressure received in a room as a result of excitation of the room by a Dirac delta function.

NOTE 3 It is impossible in practice to create and radiate true Dirac delta functions but short transient sounds (e.g. from gunshots) may offer close enough approximations for practical measurement. An alternative measurement technique, however, is to use a period of maximum-length sequence type signal (or other deterministic, flat-spectrum signal) and transform the measured response back to an impulse response.

3.5 reverberation time, T :

Time, expressed in seconds, that would be required for the sound pressure level to decrease by 60 dB, at a rate of decay given by the linear least-squares regression of the measured decay curve from a level 5 dB below the initial level to 35 dB below.

NOTE 4 Where a decay curve is not monotonic the range to be evaluated is defined by the times at which the decay curve first reaches 5 dB and 35 dB below the initial level respectively. A value for T based on the decay rate over a smaller dynamic range (down to a minimum of 20 dB extending from 5 dB down to 25 dB down) is also allowable provided the results are appropriately labelled. In the case of ambiguity the measure for T using the decay between 5 dB and 35 dB should be called T_{30} . Using 5 dB and 25 dB, the result should be labelled T_{20} and similarly for other evaluation ranges.

3.6 States of occupancy

NOTE 5 Reverberation time measured in a room will be influenced by the number of people present and the following states of occupancy are defined for measurement purposes.

NOTE 6 An accurate description of the state of occupancy of the room is of decisive importance in assessing the results obtained by measuring the reverberation time.

NOTE 7 In theatres, a distinction shall be made between "safety curtain up" and "safety curtain down", between "orchestra pit open" and "orchestra pit closed", and also between "orchestra seated on the stage" with and without concert enclosure. In all these cases, measurement may be useful. If the safety curtain is up, the amount of furnishing of the stage is of importance and shall be described.

3.6.1 unoccupied state:

State of the room prepared for use and ready for speakers or performers and audience, but without these persons present; for concert halls and opera houses the presence of chairs for performers, music stands and percussion instruments etc. shall be taken into account.

3.6.2 studio state (only for rooms for speech and music):

State of the room occupied by the performers or speakers only (without audience), for example at rehearsals or during sound recordings; the number of performers and other persons, such as technicians, corresponding to the usual number.

3.6.3 occupied state:

State of an auditorium or theatre when 80 % to 100 % of the seats are occupied

NOTE 8 Extraordinary occupancies (such as that which would be created in a concert hall by a larger than usual orchestra or the additional presence of a choir or standees) should be noted with the results.

4 Measurement conditions**4.1 General**

The measurements of reverberation time may be made with the room in any or all states of occupancy. Where the room has adjustable components for providing variable acoustical conditions, it may be relevant to carry out separate measurements with these components in each of their normal settings. The temperature and relative humidity of the air in the room should be measured to an accuracy of ± 1 °C and ± 5 % respectively.

NOTE 9 Where variable components involve active (i.e. electronic) techniques then the effects of these should be measured, too, but as certain types of electronic reverberation enhancement systems create non-time-stationary conditions in the room, a unique impulse response will not exist and caution should be exercised in using synchronous averaging during the course of making measurements.

4.2 Equipment

4.2.1 Sound source

The sound source should be as close to omni-directional as possible. It shall produce a sound pressure level sufficient to provide decay curves with the required minimum dynamic range without contamination by background noise (see 3.5). Commercial domestic loudspeakers are not acceptable as an omni-directional source. In the case of measurements of impulse responses using pseudo-random sequences, the required sound pressure level might be quite low because a strong improvement of the signal to noise ratio by means of correlated averaging is possible. In the case of measurements which do not use a synchronous averaging (or other) technique to augment the decay range then a source level will be required which gives at least 45 dB above the background level in the corresponding frequency band. If only T_{20} is to be measured it is sufficient to create a level at least 35 dB above the background level.

4.2.2 Microphones, recording and analysis equipment

Omni-directional microphones shall be used to detect the sound pressure and the output may be taken either

- directly to an amplifier, filter set and a system for displaying decay curves or analysis equipment for deriving the impulse responses, or
- to a signal recorder for later analysis.

4.2.2.1 Microphone and filters

The measurement equipment shall meet the requirements of a type 1 sound level meter according to IEC 651. The octave or one-third-octave filters shall conform with IEC 1260. The microphone should be as small as possible and preferably have a maximum diaphragm diameter of 13 mm. Microphones with diameters up to 26 mm are allowed, if they are of the pressure response type or of the free field response type but supplied with a random incidence corrector yielding a flat frequency response at random incidence.

4.2.2.2 Tape recorder

If the sound decay is initially recorded on magnetic tape, automatic gain control or other circuits for dynamic optimisation of signal-to-noise ratio shall not be used. A relatively long tape recording shall be made of each decay to enable determination of the final background level following the decay.

The tape recorder shall have the following characteristics, for the particular combination of record and playback speeds used:

- a) the frequency response shall be flat over the frequency range of measurement within a tolerance of ± 3 dB;
- b) the dynamic range shall be sufficient to allow the required minimum decay curve range. In the case of interrupted noise decays the recorder shall be capable of providing a signal-to-noise ratio of at least 50 dB in every frequency band concerned;
- c) the ratio of the playback speed to the record speed shall be $10^{0.01n}$ within $\pm 2\%$, where n is an integer including zero.

NOTE 10 If speed translation is used on playback, the corresponding frequency translation will then be a whole number of standard one-third-octave band spacings or if n is a multiple of three, of octave band spacings.

NOTE 11 Where a tape recorder is used then in the requirements in 4.2.2.3 below concerning the speed of response of the apparatus for forming a record of the decay of sound pressure level with time, T refers to the effective reverberation time of the signal being played back. This will differ from the true reverberation time of the enclosure only if the playback speed differs from the record speed.

NOTE 12 When the decay has been recorded for replay through filters and an integrating device, it can be beneficial to time-reverse the responses during replay (see [4]).

4.2.2.3 Apparatus for forming decay record of level

The apparatus for forming (and displaying and/or evaluating) the decay record shall use any of the following:

- a) exponential averaging, with continuous curve as output;
- b) exponential averaging, with successive discrete sample points from the continuous average as output;
- c) linear averaging, with successive discrete linear averages as output (in some cases with small pauses between performance of averages).

The average time, i.e. time constant of an exponential averaging device (or appropriate equivalent) shall be less than, but as close as possible to $T/20$. Similarly, the averaging time of a linear averaging device shall be less than $T/7$. (Here T is the reverberation time being measured or, if appropriate, the effective reverberation time as described in note 11 above.)

In apparatus where the decay record is formed as a succession of discrete points, the time interval between points on the record shall be less than 1,5 times the averaging time of the device.

In all cases where the decay record is to be evaluated visually, adjust the time scale of the display so that the slope of the record is as close as possible to 45° .

NOTE 13 The averaging time of an exponential averaging device is equal to 4,34 divided by the decay rate in decibels per second of the device.

NOTE 14 Commercial level recorders, in which sound pressure level is recorded graphically as a function of time, are approximately equivalent to exponential averaging devices.

NOTE 15 When an exponential averaging device is used there is little advantage in setting the averaging time very much less than $T/20$. When a linear averaging device is used there is no advantage in setting the interval between points at very much less than $T/7$. In some sequential measuring procedures it is feasible to reset the averaging time appropriately for each frequency band. In other procedures this is not feasible, and an averaging time or interval chosen as above with reference to the shortest reverberation time in any band has to serve for measurements in all bands.

4.2.2.4 Overload indication

No overloading shall be allowed in any stage of the measuring apparatus. Where impulsive sound sources are used, peak-level indicating devices shall be used for checking against overloading.

4.3 Measurement positions

As measurements may be required for different purposes the number of measurement positions are chosen in order to achieve an appropriate coverage in the room. Microphone positions shall be at least half a wavelength apart, i.e. a minimum distance of around 2 m for the usual frequency range. The distance from any microphone position to the nearest reflecting surface, including the floor, shall be at least a quarter of a wavelength, i.e. normally around 1 m.

No microphone position shall be too close to any source position in order to avoid too strong influence from the direct sound. The minimum distance d_{\min} , in metres, can be calculated from:

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}}$$

where

V is the volume, in cubic metres;

c is the speed of sound, in metres per second;

T is an estimate of the expected reverberation time, in seconds.

NOTE 16 In small rooms with very short reverberation time (e.g. talks studios) it may be impossible to fulfil the above requirement. In such cases, and only for the measurement of reverberation time, it is recommended that the direct sound is eliminated by insertion of a barrier (with negligible sound absorption) between source and receiver.

Each pair of measurement positions is a combination of one source position and one microphone position. The number of positions can be chosen to yield either a low coverage or a normal coverage.

4.3.1 Low coverage (least measurement effort)

Measurements are made for assessment of the amount of room absorption for noise control purposes, including measurement of sound reduction index, or assessment of the reverberation time for sound system calculations.

Make measurements of T for two source positions which are representative of those where noise sources are located or of those used by performers and find the average of results from three or four microphone positions in areas where people normally are present or in "centre of seating" areas. If the deviations between the results from the single positions extend the tolerances set for the purpose of the measurement, use more positions.

4.3.2 Normal coverage

Measurements made for verification of building performance against a design brief.

Choose the number and location of source positions so as to include all areas likely to be occupied by performers (e.g. upon stage, risers, orchestra pits and choral seating) in addition to main stage areas. A minimum of two source positions shall be used.

A distribution of microphone positions shall be chosen which anticipates the major influences likely to cause differences in reverberation time throughout the room. Obvious examples are the differences for seating areas close to walls, underneath balconies or in spaces which are decoupled (e.g. in church transepts and chancels compared with church naves). This requires a judgement of the evenness of the "acoustical" distribution to the different seating areas, the equality of the coupling of the separate parts of the volume and the proximity to local perturbations. For reverberation time measurement, it may be useful to assess the room against the following criteria (which in many cases will simply require a visual assessment) to determine whether single spatial averages will adequately describe the room:

- a) the materials of the boundary surfaces and any suspended elements are such that, judged in terms of their absorption and diffusion properties, they are reasonably evenly distributed amongst the surfaces which surround the room, and
- b) all parts of the room volume communicate reasonably equally with each other, then three or four microphone positions will be adequate – these positions being chosen to cover the seating area, in an evenly spaced array – and the results of the measurements may be averaged. In rooms for speech and music the height of the microphones above the floor should be 1,2 m corresponding to the ear height of average listeners in typical chairs.

NOTE 17 For a) above, if the ceiling, side, front and rear walls, when assessed individually, have no regions, covering more than 50 % of their respective areas, with properties different from those of the remaining surfaces, then it may be considered that the distribution is acceptably even. (In some spaces it may be helpful to approximate the room geometry to a rectangular parallelepiped for this assessment.)

NOTE 18 For b) above, the room volume may be considered to operate as a single space if there are no parts of the floor area which have their lines-of-sight blocked to any other part of the room which is more than 10 % of the total room volume.

NOTE 19 If conditions of notes 17 and 18 are not satisfied then the room is likely to show areas with differing reverberation times, and these should be investigated and measured separately.

5 Measurement procedures

5.1 General

Two methods of measuring the reverberation time are described in this standard: the interrupted noise method and the integrated impulse response method. Both methods have the same expectation value but the latter requires more sophisticated instrumentation. If room acoustic measures other than the reverberation time are to be measured only the latter method is relevant, as these are based on the impulse response.

NOTE 20 It is preferable to measure reverberation times in octave bands from 63 Hz to 4 kHz in concert halls and rooms for speech. For measurements in rooms for other purposes measurements in one-third-octave bands from 100 Hz to 5 kHz can be applied.

5.2 Interrupted noise method

5.2.1 Excitation of the room

A loudspeaker source shall be used and the signal fed into the loudspeaker shall be derived from broadband random or pseudo-random electrical noise. When using a pseudo-random noise, it shall be randomly ceased, not using a repeated sequence.

The sound source should be as omni-directional as possible.

For measurements in octave bands the bandwidth of the signal shall be greater than one octave and for measurements in one-third-octave bands the bandwidth of the signal shall be greater than one-third octave. The spectrum shall be reasonably flat within the actual octave band to be measured. Alternatively, the broadband noise spectrum may be shaped to provide an approximately pink spectrum of steady-state reverberant sound in the enclosure from 88 Hz to 5 657 Hz (i.e. a range covering the one-third-octave bands with midband frequencies from 100 Hz to 5 kHz or octave bands from 125 Hz to 4 kHz) with the reverberation time being measured simultaneously in different octave or one-third-octave bands.

The duration of excitation of the room needs to be sufficient for the sound field to have achieved a steady state before being allowed to decay, and thus it is essential for the noise to be radiated for a minimum period of $T/2$ seconds. In large volumes the duration of the excitation shall be at least a few seconds.

NOTE 21 Broadband noise excitation puts more severe requirements on the power handling capacity of the loudspeaker system to maintain the required signal-to-noise ratios.

5.2.2 Number of measurements

The number of microphone positions used will be determined by the coverage required. However, in view of the randomness inherent in the source signal, it is necessary to average over a number of measurements at each position in order to achieve an acceptable repeatability (see 6.1.1). Therefore, a minimum of three measurements shall be made at each position and the results averaged. Then, either

- find the individual reverberation times for all the decay curves and take the mean value, or
- make an ensemble average of the squared sound pressure decays and find the reverberation time of the resulting decay curve.

The method used shall be stated in the test report. If ensemble averaging is used it is allowed to make only one measurement in each of a minimum of 18 positions instead of using six positions with three measurements at each position.

NOTE 22 In the limit of an infinite number of measurements with interrupted noise the ensemble averaged decay curve will be identical with that of a single integrated squared impulse response.

5.3 Integrated impulse response method

5.3.1 General

The impulse response from a source position to a receiver position in a room is a well defined quantity, which can be measured in a variety of ways (e.g. using pistol shots, spark gap impulses, noise bursts, chirps or m-sequences as signals). It is not the aim of this standard to exclude any other method that can yield the correct impulse response.

5.3.2 Excitation of the room

The impulse response can be measured directly using an impulse source such as a pistol shot or any other source that is not reverberant itself as long as its spectrum is broad enough to meet the requirements of 5.2.1. The impulse source shall be able to produce a peak sound pressure level sufficient to ensure a decay curve starting at least 45 dB above the background noise in the corresponding frequency band. If only T_{20} is to be measured it is sufficient to create a level at least 35 dB above the background level.

Special sound signals may be used which yield the impulse response only after special processing of the recorded microphone signal. This can provide an improved signal to noise ratio. Tone sweeps or pseudo-random noise (e.g. maximum-length sequences) may be used if the requirements for the spectrum and directional characteristics of the source are fulfilled. Because of the improvement in signal to noise ratio, the dynamic requirements on the source can be considerably lower than those set in the previous paragraph. If time averaging is used (for example in order to enhance the signal to noise ratio) it is necessary to verify that the averaging process does not alter the measured impulse response.

For measurements in octave bands the bandwidth of the signal shall be greater than one octave and for measurements in one-third-octave bands the bandwidth of the signal shall be greater than one-third octave. The spectrum shall be reasonably flat within the actual octave band to be measured. Alternatively, the broadband noise spectrum may be shaped to provide an approximately pink spectrum of steady-state reverberant sound in the enclosure from 88 Hz to 5 657 Hz (i.e. a range covering the one-third-octave bands with midband frequencies from 100 Hz to 5 kHz or octave bands from 125 Hz to 4 kHz) with the reverberation time being measured simultaneously in different octave or one-third-octave bands.

5.3.3 Integration of the impulse response

Generate for each octave band the decay curve by a backward integration of the squared impulse response. In an ideal situation with no background noise the integration should start at the end of the impulse response ($t \rightarrow \infty$) and proceed to the beginning of the squared impulse response. Thus the decay as a function of time is

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau)$$

where

p is the impulse response.

This integral in reverse time is often derived by performing two integrations as follow:

$$\int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau$$

In order to minimise the influence of the background noise on the later part of the impulse response, use one of the following two different techniques for the implementation:

- a) If the level of the background noise is unknown, perform the backward integration of the squared impulse response using a sliding fixed integration time, T_0 , the size of which is a compromise.

$$E(t) = \int_{t+T_0}^t p^2(\tau) d(-\tau)$$

The optimum value of T_0 is 1/5 of the reverberation time. Estimate the expected reverberation time. If it turns out that the measured value of the reverberation time differs by more than 25 % from the estimated value, then change the integration time accordingly and repeat the integration. The starting time t_1 of the backward sliding integration is not critical, but it shall not be shorter than the reverberation time. The integrated background noise will appear on the decay curve as a horizontal tail, a noise floor. The level of the noise floor shall be at least 10 dB below the lower value of the evaluation range, e.g. for evaluation of T_{20} the noise floor shall be at least 35 dB below the maximum level of the integrated squared impulse response.

- b) If the level of the background noise is known, determine the starting point of the integration t_1 , as the intersection between a horizontal line through the background noise and a sloping line through a representative part of the squared impulse response, and calculate the decay curve from

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C$$

where

($t < t_1$) and C is an optional correction for integrated squared impulse response between t_1 and infinity.

The most reliable result is obtained when C is calculated under the assumption of an exponential decay of energy with the same rate as given by the squared impulse response between t_0 and t_1 , where t_0 is the time corresponding to a level 10 dB higher than the level at t_1 .

If C is set to zero, the finite starting point of the integration causes a systematic underestimation of the reverberation time. For a maximum underestimation of the reverberation time of 5 %, the response, which is at least 15 dB plus the dynamic range over which T is to be assessed: for instance, 45 dB below the maximum for determination of T_{30} .

6 Evaluation of decay curves

6.1 Interrupted noise method

In the case of measurements using the interrupted noise method, evaluate the decay curves over the range from 5 dB to 35 dB below the initial level for T_{30} and from 5 dB to 25 dB below for T_{20} . In this range a least-squares fit line shall be computed for the curve or, in the case of decay curves plotted directly by level recorder, a straight line shall be fitted manually as closely as possible to the decay curve. The slope of the straight line gives the rate of decay in decibels per second from which the reverberation time is calculated.

NOTE 23 If it is not possible to fit a straight line to the decay curve, it is considered as a non-linear decay curve (see 6.3).

If the technique used for determining the reverberation time is based on evaluating traces plotted out by a level recorder then a visual "best fit" line may be substituted for a computed regression line but this will not be as reliable as a regression analysis. The method of determining the decay rate shall be stated in the report.

The lowest point on the measurement range shall be sufficiently above the background noise level. For measurements of T_{30} the noise level shall be at least 45 dB below the initial level. For measurements over a 20 dB range the noise level shall be at least 35 dB below the initial level.

6.1.1 Measurement uncertainty

Due to the random nature of the excitation signal, the measurement uncertainty of the interrupted noise method strongly depends on the number of averages performed. Ensemble averaging and averaging individual reverberation times have the same dependences on the number of averages. The relationship between the

7 Spatial averaging

The results measured for the range of source and microphone positions can be combined either for separate identified areas or for the room as a whole to give spatial average values. This spatial averaging shall be achieved by either of the following procedures (the procedure used shall be stated in the test report):

- a) Arithmetic averaging of the reverberation times. The spatial average is given by taking the mean of the individual reverberation times for all the relevant source and microphone positions. The standard deviation may be determined to provide a measure of accuracy and the spatial variance of the reverberation time.
- b) Ensemble averaging of the decay curves. The individual decays are superposed with their beginnings synchronised. The discrete squared sound pressure sample values (after the exponential or linear averaging process, see 4.2.2.3) are summed for each time interval increment of the decays and the sequence of these sums is used as a single overall ensemble decay from which T is then evaluated (see clause 6).

8 Statement of results

8.1 Tables and curves

The evaluated reverberation times for each frequency of measurement shall be both plotted in the form of a graph and stated in a table.

In the case of graphs, the points shall be connected by straight lines. The abscissa shall present frequency on a logarithmic scale using a distance of 1,5 cm per octave, whilst the ordinate shall use either a linear time scale such that 2,5 cm corresponds to one second, or a logarithmic scale with 10 cm corresponding to 1 decade. The nominal midband frequencies for octave bands according to IEC 1260 should be marked on the frequency axis.

A single figure reverberation time $T_{30, \text{mid}}$ can be calculated by averaging T_{30} in the 500 Hz and 1 000 Hz octave bands. ($T_{20, \text{mid}}$ may also be used). Alternatively take averages over the six one-third-octave bands from 400 Hz to 1 250 Hz.

8.2 Test report

The test report shall state that the measurements were made in conformity with this International Standard. It shall include:

- a) the name and place of the room tested;
- b) a sketch plan of the room, with an indication of the scale;
- c) the volume of the room;

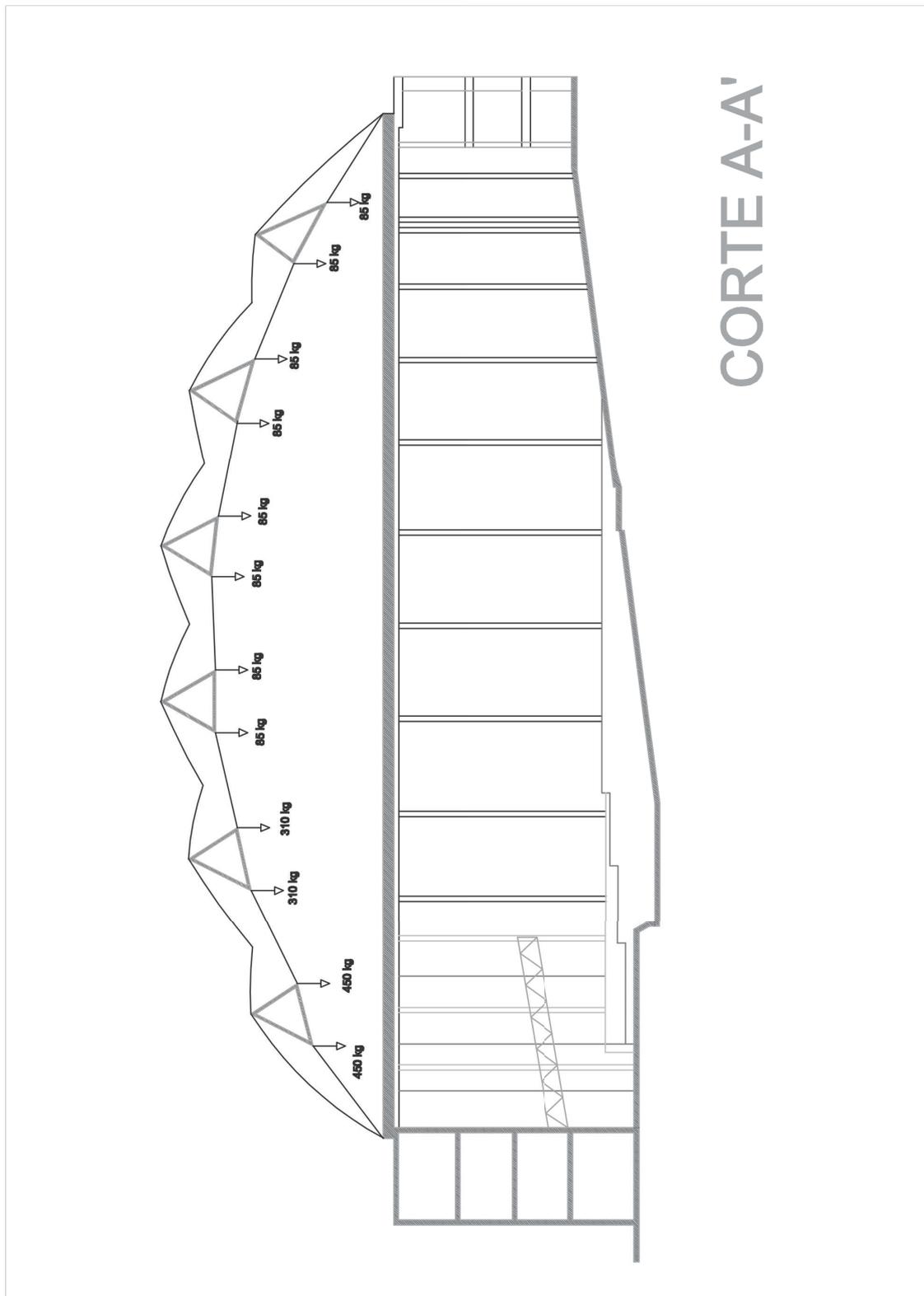
NOTE 25 If the room is not completely enclosed, an explanation shall be given of how the stated volume is defined.

- d) for rooms for speech and music: the number and type of seats (for example whether upholstered or not); if upholstered and if information available: thickness and kind of upholstery, kind of covering material (porous or non-porous seats raised or lowered) and which parts of the seat are covered;
- e) a description of the shape and material of the walls and the ceiling;
- f) the state or states of occupancy during measurements and the number of occupants;
- g) the condition of any variable equipment such as curtains, public-address system, electronic reverberation enhancement systems etc.;
- h) for theatres, whether the safety curtain or decorative curtains were up or down;
- i) a description, where appropriate, of the stage furnishing, including any concert enclosure, etc.;

© ISO

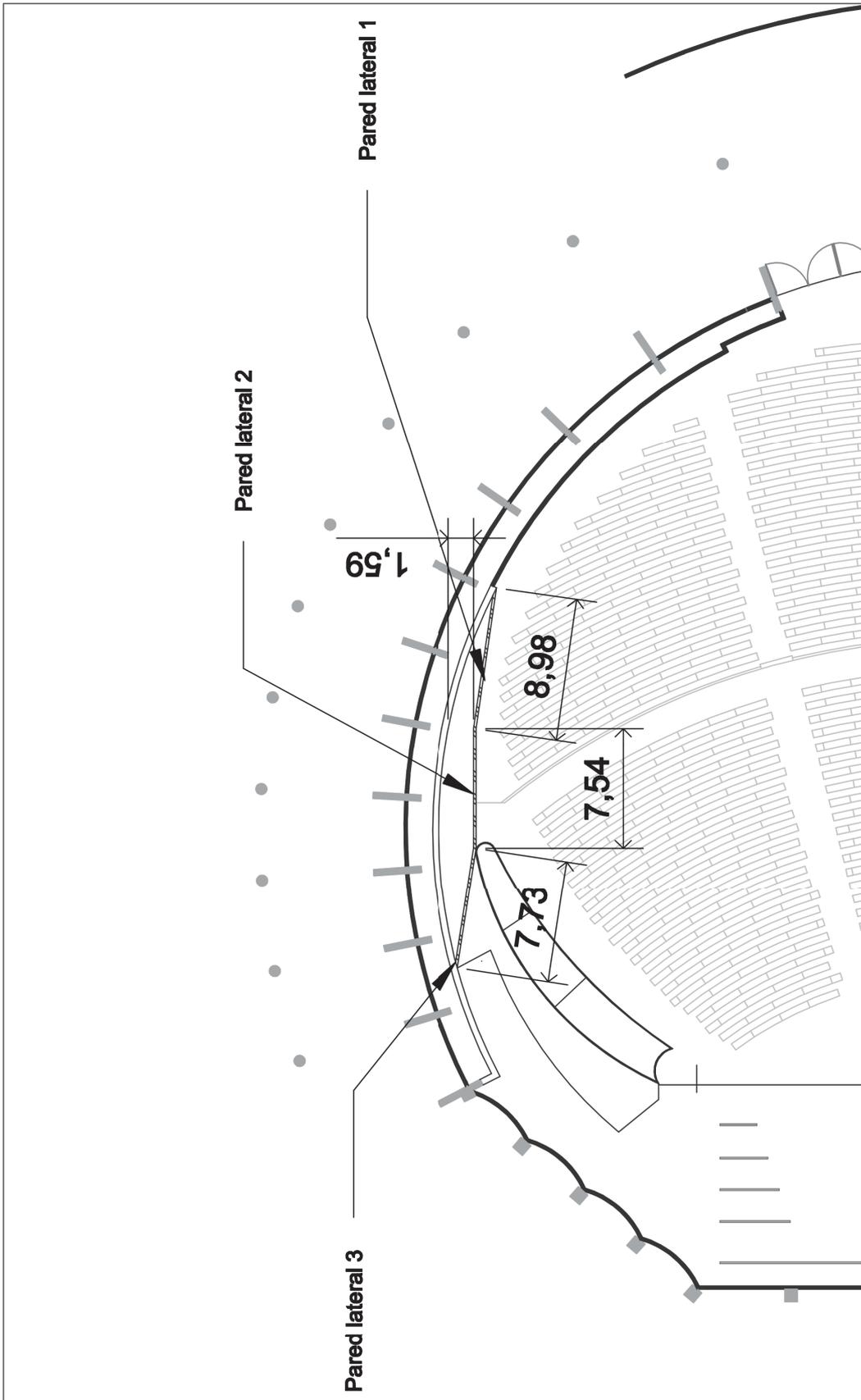
ISO 3382:1997(E)

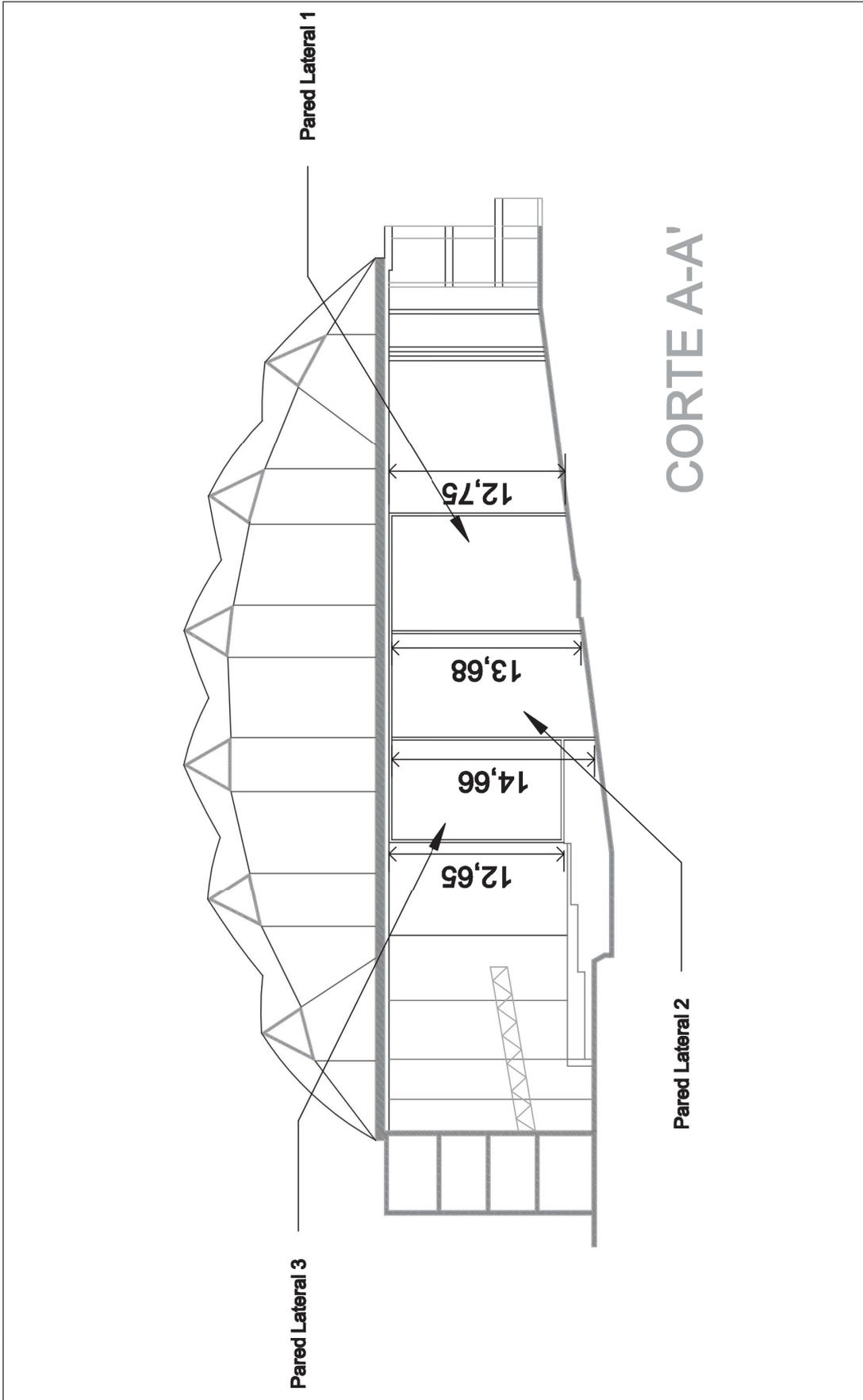
- j) the temperature and relative humidity in the room during the measurement;
- k) the type and position of sound sources employed;
- l) a description of the sound signal used;
- m) the coverage chosen including details of the microphone positions, preferably shown on a plan, together with the heights of the microphones;
- n) the description of measuring apparatus, of the source and the microphones and whether tape recorders were employed;
- o) the date of measurement and name of the measuring organisation.

ANEXO N° 2: Cargas máximas en nudos inferiores.

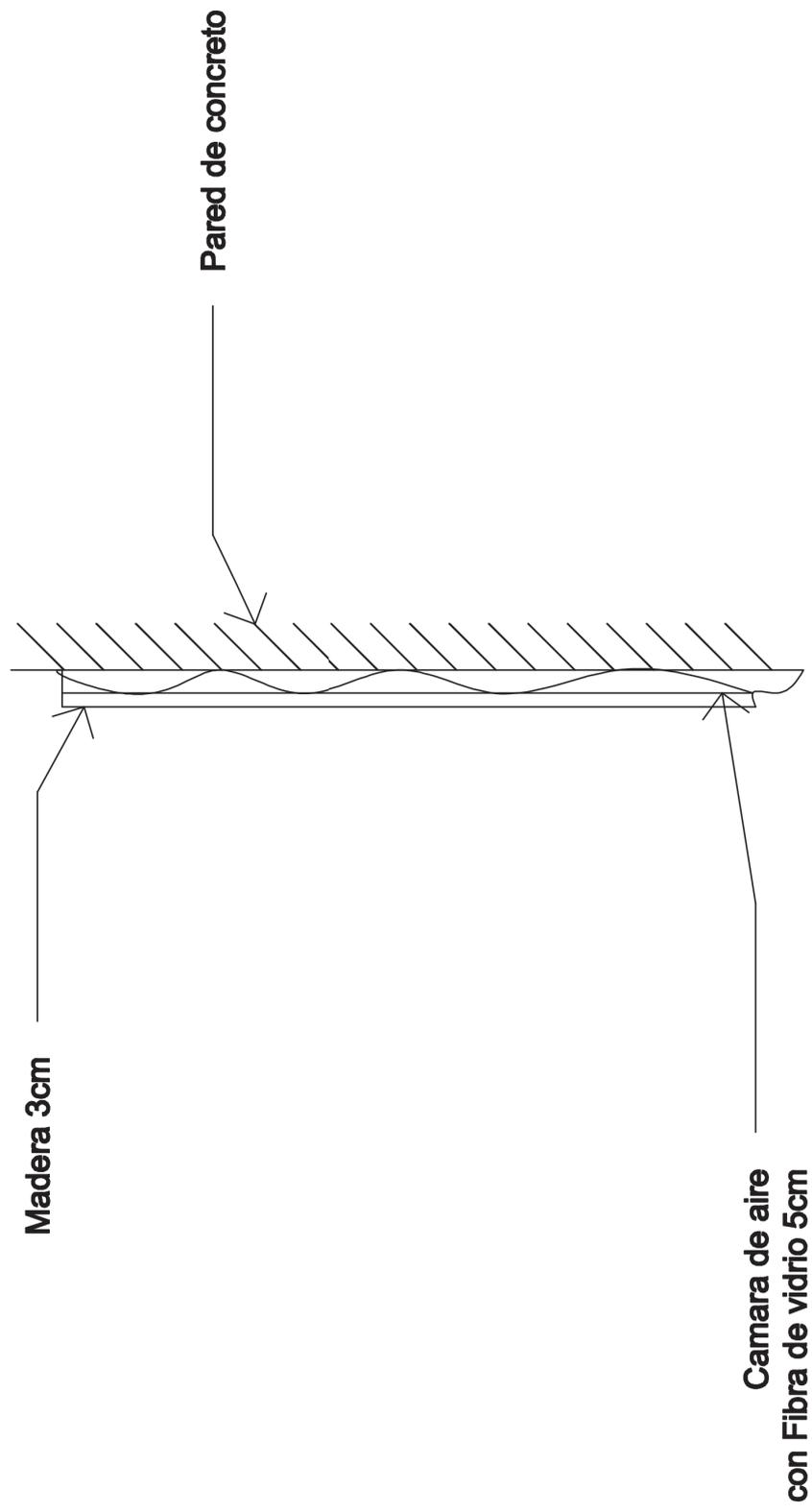
ANEXO N° 3: Planos del Ágora. Escala 1:200.

ANEXO N° 4: Planos de montaje y medidas de paredes laterales





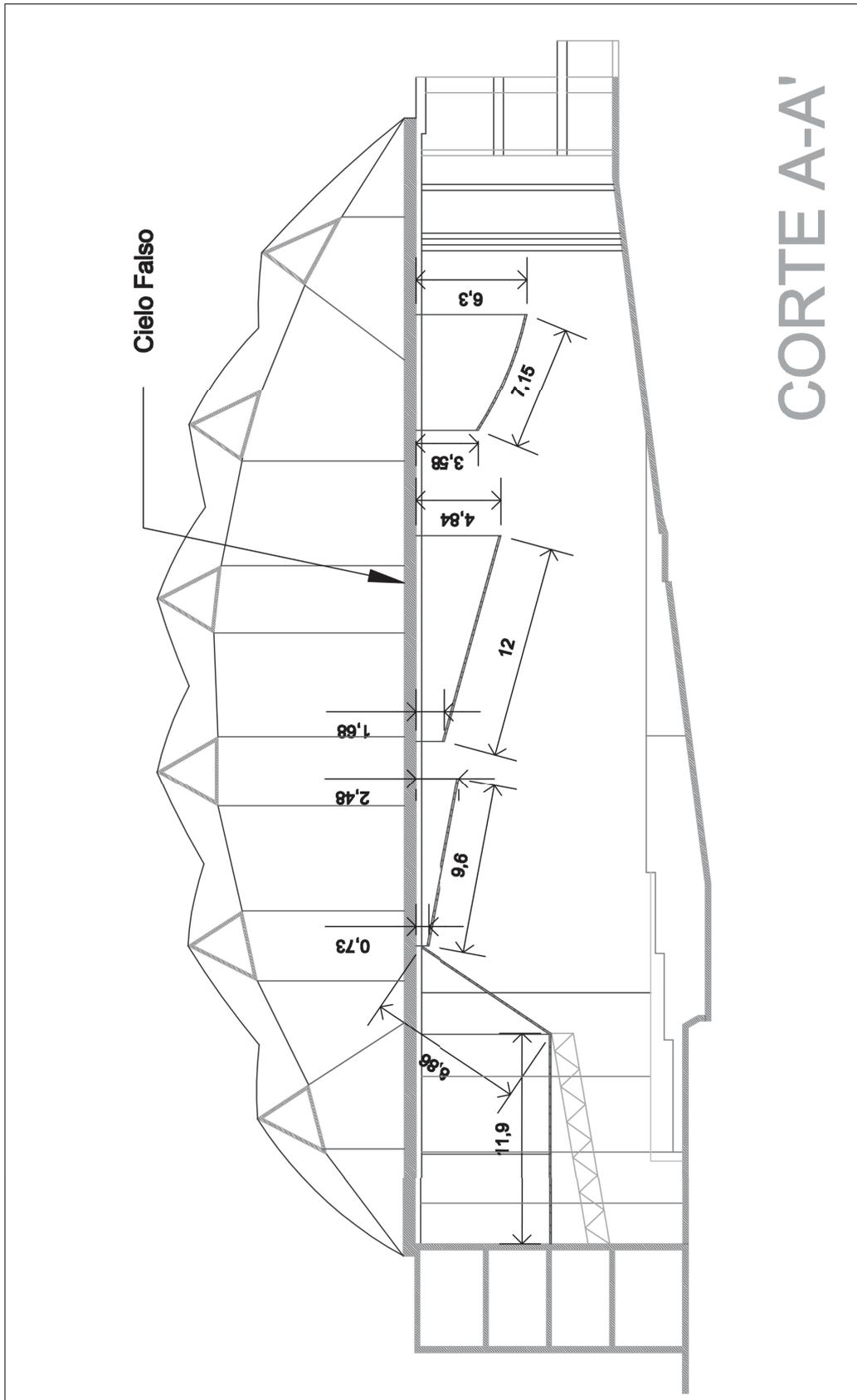
Montaje de Paredes Laterales

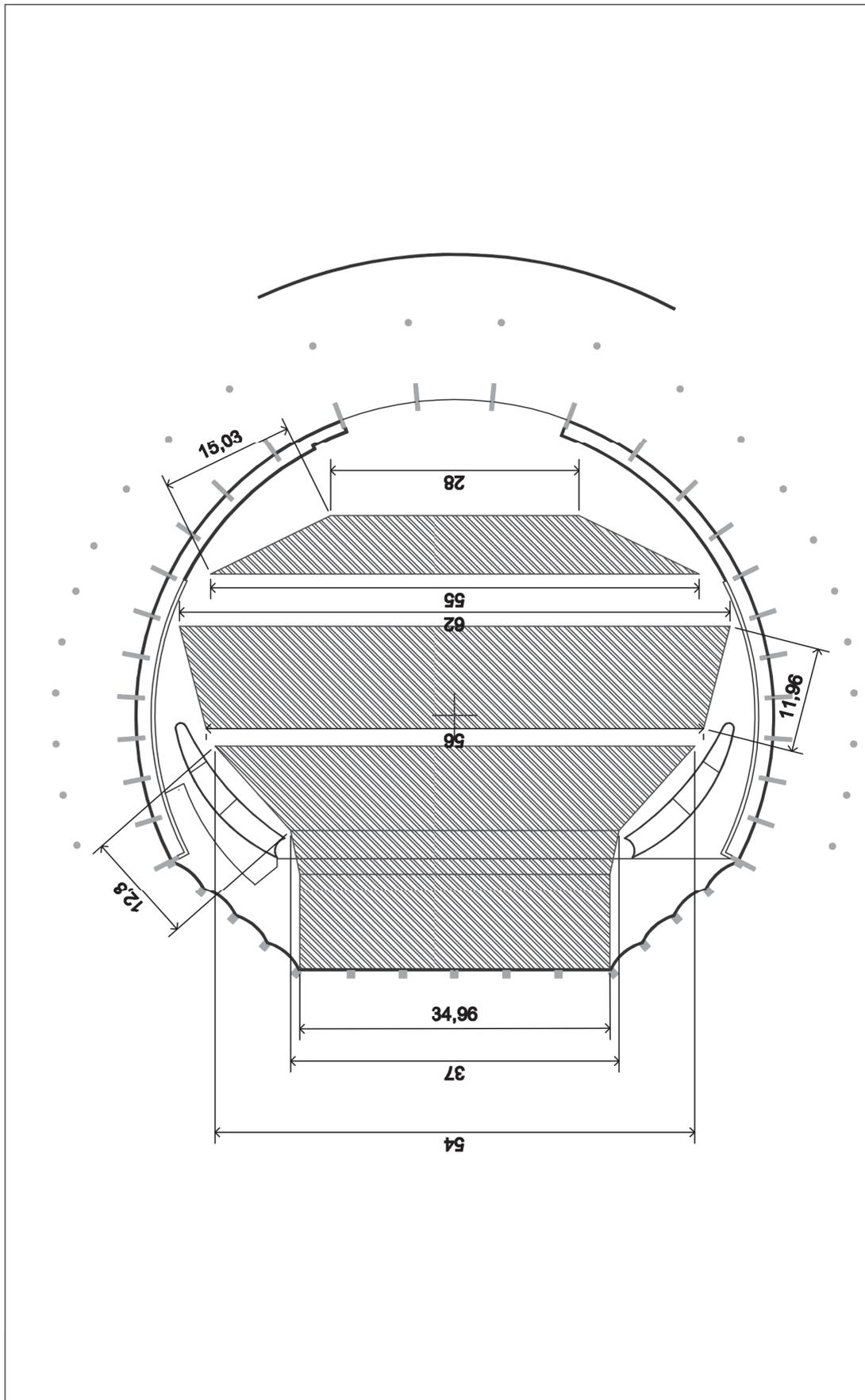


Madera 3cm

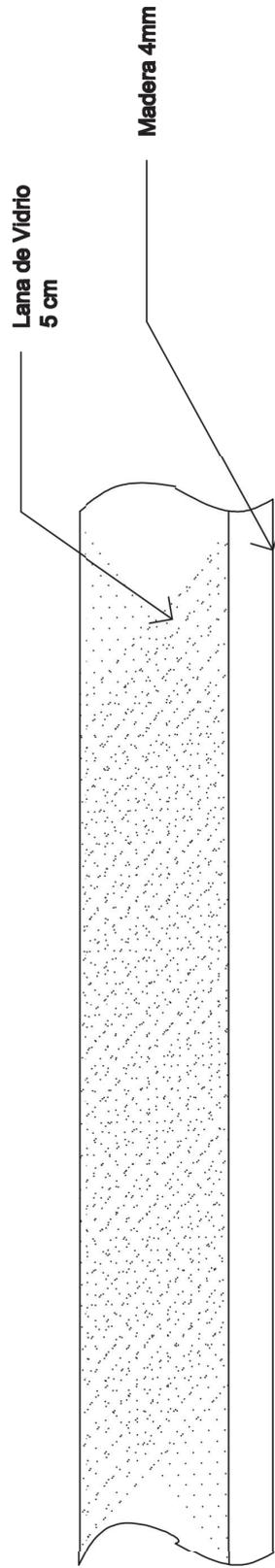
Pared de concreto

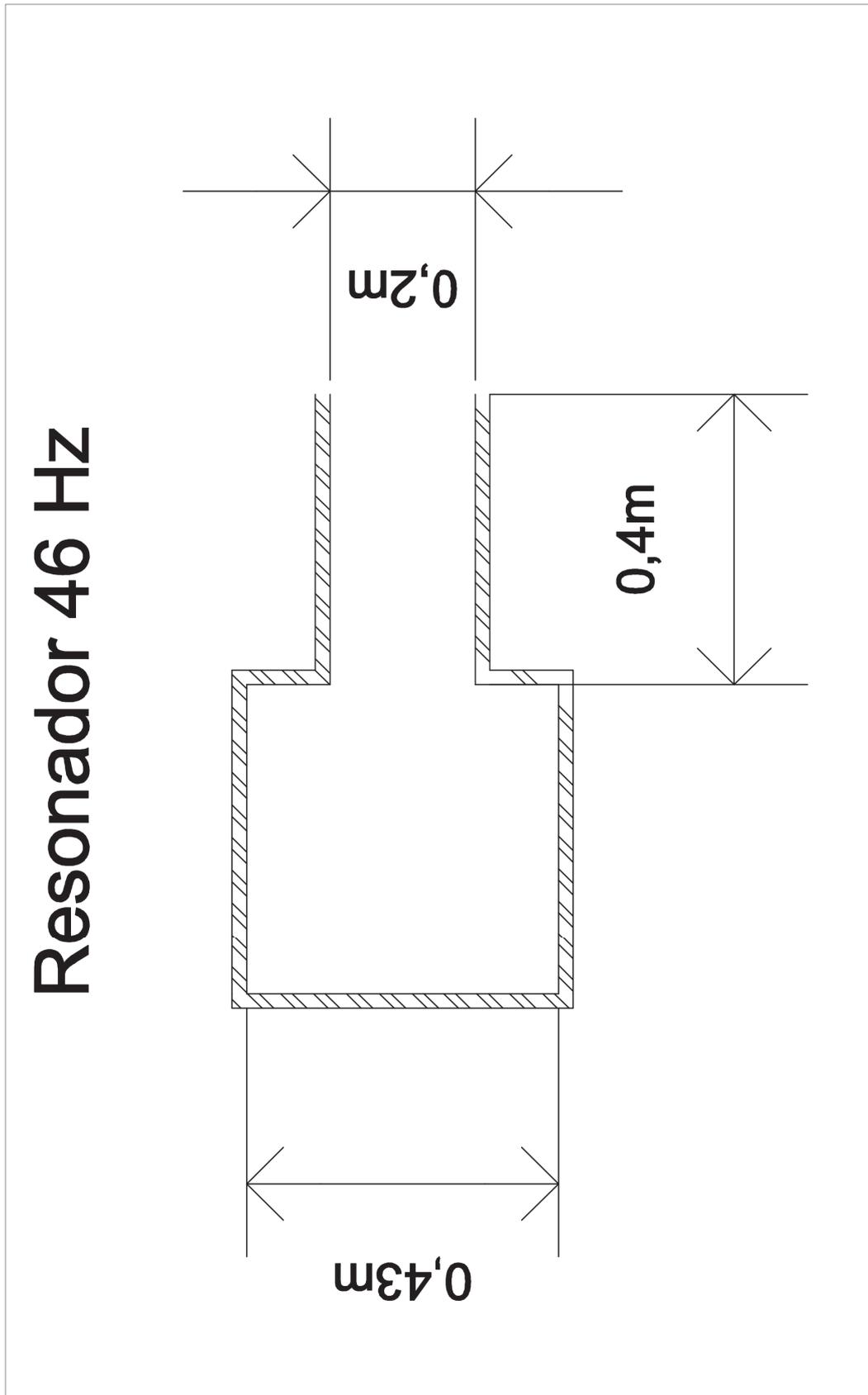
Camara de aire
con Fibra de vidrio 5cm

ANEXO N° 5: Planos de montaje y medidas de reflectores.

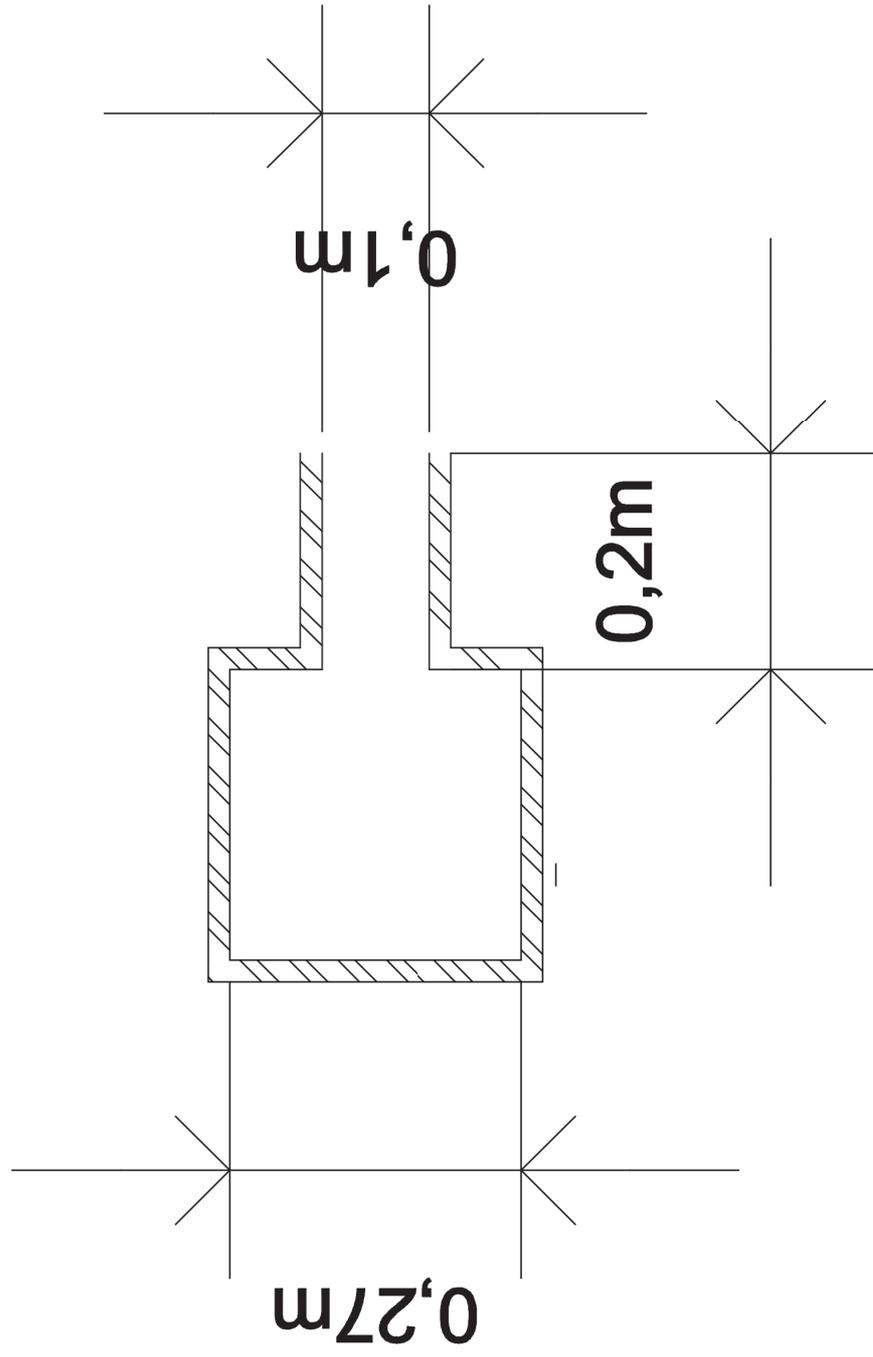


Montaje de Paneles Reflectantes

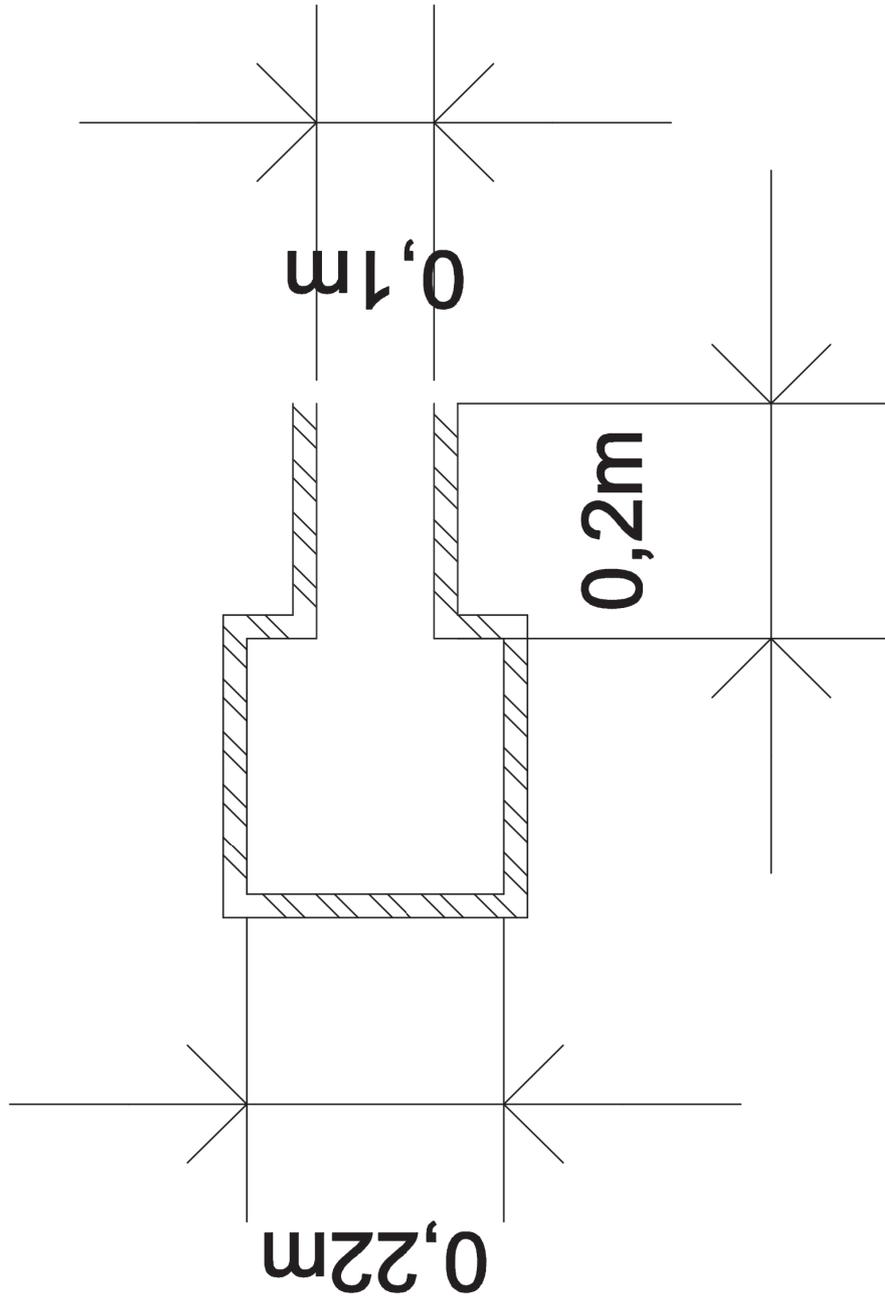


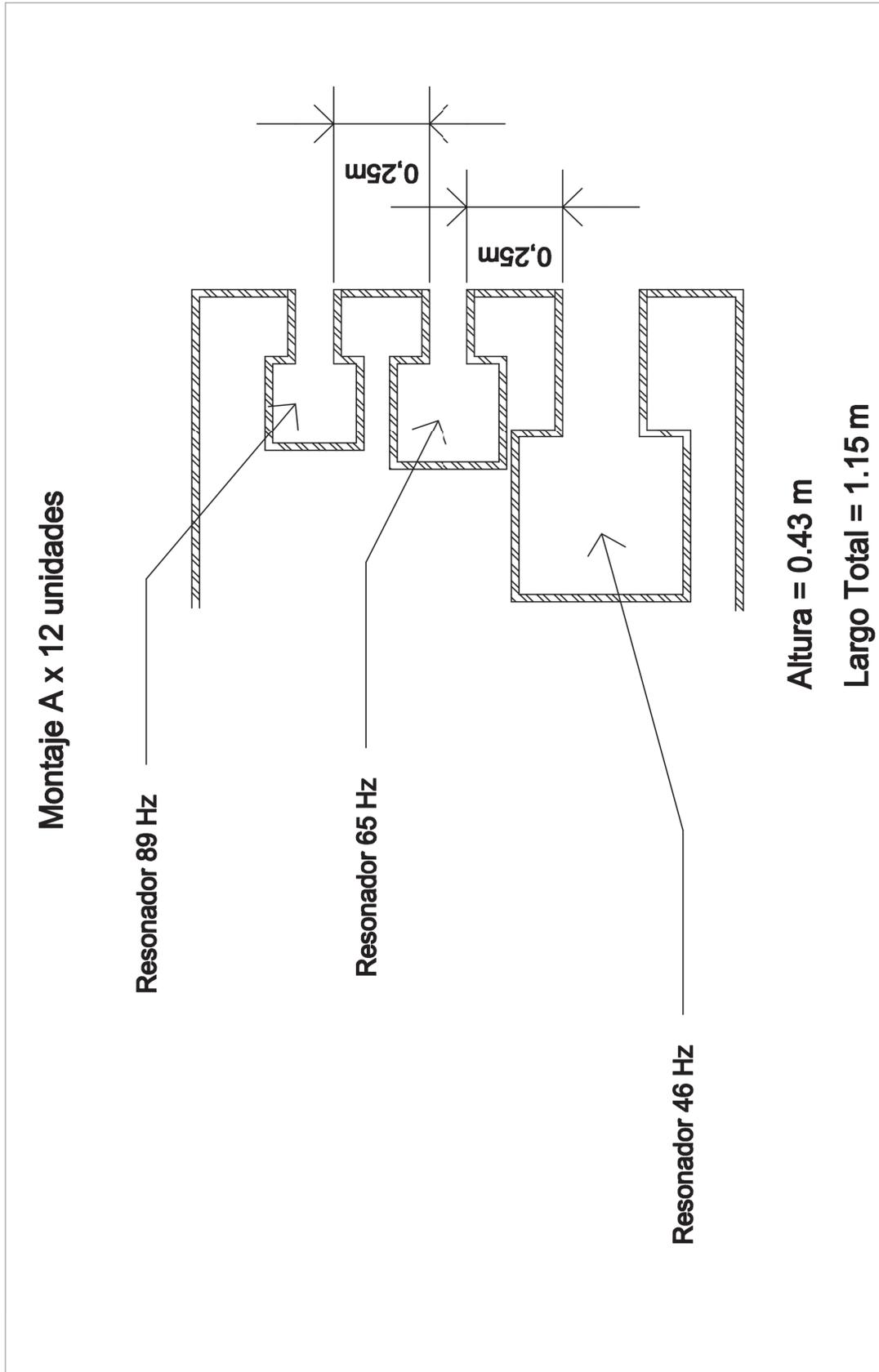
ANEXO N° 6: Medidas y montaje de resonadores

Resonador 65 Hz



Resonador 89 Hz

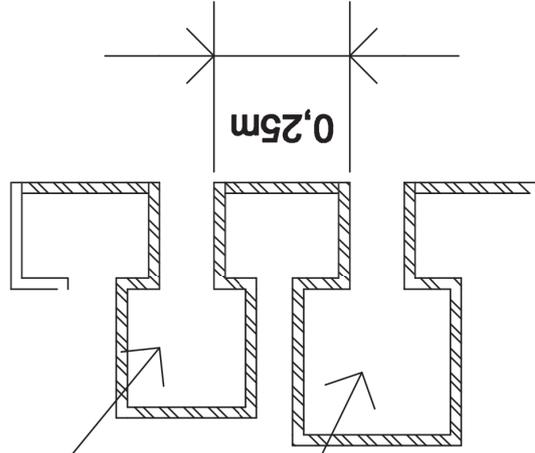


ANEXO N° 7: Montaje individual de grupos de resonadores

Montaje B x 89 unidades

Resonador 89 Hz

Resonador 65 Hz

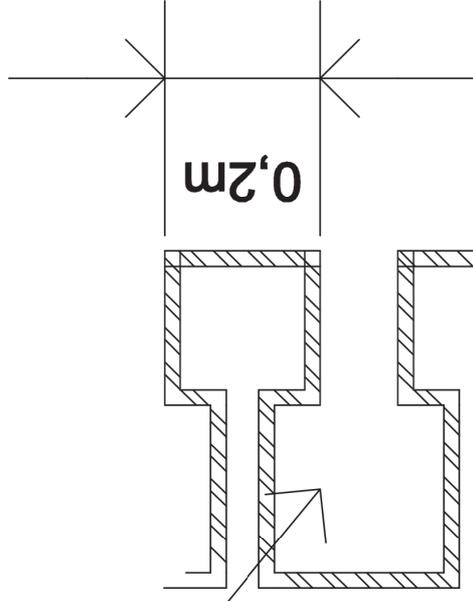


Altura= 0,25 m

Largo total=0,7 m

Montaje C x 180 unidades

Resonador 89 Hz



Altura= 0.22 m

Largo total= 0.3 m

ANEXO N° 8: Montaje Sobre Bastidores

Montaje con bastidores de madera

Material Absorbente sobre madera
cubierto con tela acústicamente
transparente

Bastidor de madera

